

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость автоматизации ранних этапов проектирования технических объектов связана с тем, что выявление отказов основных узлов технической системы на завершающих этапах (начиная с технического проектирования) путем испытаний опытного образца, приводит к длительным операциям по отработке конструкции, а значит и к резкому возрастанию материальных затрат и увеличению сроков процесса проектирования.

Одним из наиболее мощных средств для исследования и проектирования технических систем является моделирование. Использование моделирования, начиная с ранних стадий, и постепенное накопление информации за счёт уточнения и детализации модели позволяет говорить о расширяемой адаптивной модели всего цикла проектирования. Соответственно, при анализе различных свойств объекта проектирования модельное представление должно формироваться наиболее подходящим для этой цели образом, независимо от конкретного процесса или этапа проектирования, и сохранять все требуемые свойства разрабатываемого объекта.

Для реализации процесса проектирования, в первую очередь, необходимо осуществить сбор, требуемой для расчетов информации, провести её обработку, включающую многоаспектный анализ и оптимизацию параметров узлов объекта проектирования. Полученные результаты расчёта должны быть сохранены в базе данных с целью формирования отчётной документации. Проектирование рационально строить на основе методов и программно-технических средств с целью снижения затрат, времени и использования информационного ресурса.

Для развития субмикронных технологий и нанотехнологий, в отличие от традиционных технологий, характерен «индивидуальный» подход, при котором внешнее «управление» достигает отдельных атомов и молекул, что позволяет создавать из них как «бездефектные» материалы с принципиально новыми физико-химическими свойствами, так и новые классы устройств с характерными нанометровыми размерами.

Одним из направлений решения этой проблемы является создание и развитие автоматизированных систем проектирования различных технологических процессов, в том числе процессов формирования объектов лазерной обработки.

Фокусируя короткий лазерный импульс с определенными параметрами на заданном типе материала, возможно смещение атомов с их начальных позиций. Это позволяет принимать конструктивные решения в нанометровых масштабах.

Таким образом разработка информационной системы поддержки принятия решений при проектировании процесса формирования объектов лазерной обработки на этапе аванпроекта является задачей актуальной и своевременной.

Книга предназначена для инженерно-технических и научных работников, занимающихся информационными технологиями в проектировании объектов электронного машиностроения, в том числе проектированием объектов лазерной обработки. Издание может быть рекомендовано аспирантам вузов и студентам, обучающимся по специальности 210107 – «Электронное машиностроение» и направлению 210100 – «Электроника и наноэлектроника».

ГЛАВА 1. СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

1.1. Обзор систем поддержки принятия решений

Современные системы поддержки принятия решения (СППР), возникшие как естественное развитие и продолжение управленческих информационных систем и систем управления базами данных, представляют собой системы, максимально приспособленные к решению задач повседневной управленческой деятельности, являются инструментом, призванным оказать помощь лицам, принимающим решения (ЛПР). С помощью СППР могут решаться неструктурированные и слабоструктурированные многокритериальные задачи. СППР, как правило, являются результатом мультидисциплинарного исследования, включающего теории баз данных, искусственного интеллекта, интерактивных компьютерных систем, методов имитационного моделирования [5, 8].

Ранние определения СППР (в начале 70-х годов прошлого века) отражали следующие три момента: возможность оперировать с неструктурированными или слабоструктурированными задачами, в отличие от задач, с которыми имеет дело исследование операций; интерактивные автоматизированные (т.е. реализованные на базе компьютера) системы; разделение данных и моделей.

Существует множество определений СППР, отражающих точки зрения представителей различных дисциплин и научных школ. Приведём несколько определений СППР:

- СППР - совокупность процедур по обработке данных и суждений, помогающих руководителю в принятии решений, основанная на использовании моделей.
- СППР - это интерактивные автоматизированные системы, помогающие лицу, принимающему решения, использовать данные и модели для решения слабоструктурированных проблем.
- СППР - это система, которая обеспечивает пользователям доступ к данным и/или моделям, так что они могут принимать лучшие решения.

Последнее определение не отражает участия компьютера в создании СППР и вопросы возможности включения нормативных моделей в состав СППР.

В настоящее время нет общепринятого определения СППР, поскольку конструкция СППР существенно зависит от вида задач, для решения которых она разрабатывается, от доступных данных, информации и знаний, а также от пользователей системы. Можно привести, тем не менее, некоторые элементы и характеристики, общепризнанные, как части СППР:

- СППР - в большинстве случаев – это интерактивная автоматизированная система, которая помогает пользователю (ЛПР) использовать данные и модели для идентификации и решения задач и принятия решений. Система должна обладать возможностью работать с интерактивными запросами с достаточно простым для изучения языком запросов.
- СППР обладает следующими четырьмя основными характеристиками:
 1. СППР использует и данные, и модели;
 2. СППР предназначены для помощи операторам в принятии решений для слабоструктурированных и неструктурированных задач;

3. СППР поддерживают, а не заменяют, выработку решений операторами;

4. Цель СППР – улучшение эффективности решений.

Опираясь на выше сказанные определения можно выявить модель идеальной СППР [8]:

1. Оперировать со слабоструктурированными решениями.
2. Предназначена для ЛПР различного уровня.
3. Может быть адаптирована для группового и индивидуального использования.
4. Поддерживает как взаимозависимые, так и последовательные решения.
5. Поддерживает 3 фазы процесса решения: интеллектуальную часть, проектирование и выбор.
6. Поддерживает разнообразные стили и методы решения, что может быть полезно при решении задачи группой ЛПР.
7. Является гибкой и адаптируется к изменениям как организации, так и её окружения.
8. Проста в использовании и модификации.
9. Улучшает эффективность процесса принятия решений.
10. Позволяет человеку управлять процессом принятия решений с помощью компьютера, а не наоборот.
11. Поддерживает эволюционное использование и легко адаптируется к изменяющимся требованиям.
12. Может быть легко построена, если может быть сформулирована логика конструкции СППР.
13. Поддерживает моделирование.
14. Позволяет использовать полученные знания.

В процессе принятия решений возникла необходимость в субъективных экспертных моделях, которые могут быть крайне полезны для ЛПР. Возникла так же необходимость в учете знаний многих экспертов, в анализе принятых ранее решений. В структуре СППР появился блок «база знаний», и такие системы получили название «интеллектуальных» [1, 2].

Применительно к процессу формирования объектов лазерной технологии можно рассмотреть следующую схему развития принятия решений.

Развитие технических и программных средств, позволяющих «индустриализировать» технологию создания новых систем, привело к формированию ещё одной точки зрения СППР, которая получила название «адаптивного проектирования» [3]. Сторонники этого подхода считают, что термин СППР имеет право на существование только в тех случаях, когда «конечная система» возникает в ходе адаптивного процесса проектирования и внедрения.

Основным постулатом адаптивного подхода является итеративность процесса разработки «конечного продукта», в ходе которого пользователь, разработчик и система многократно воздействуют друг на друга. Основным методом построения СППР в рамках данного подхода является прототипирование систем [4], когда разработчиком вначале создаётся макет («прототип») системы, обладающий основными чертами желаемой СППР, который в результате совместной работы разработчика и пользователя доводится до требуемой конечной системы [5].

Опыт использования СППР показал, что поддержка, оказываемая СППР, далеко не всегда бывает достаточной. Очень часто возникают информационная перегруженность ЛПР, сложная проблема учёта противоречивых оценок по многим критериям, выявления предпочтений ЛПР. Для разрешения этих проблем необходимы использование современных

методов принятия решений и разработка специальных средств общения человека и ЭВМ [5]. Наличие дружественного человеко-машинного интерфейса, обеспечивающего удобную связь между пользователем и системой, стало одной из отличительной черт СППР [6, 7].

Таким образом, в СППР объединяются на общей основе переходы, характерные для следующих исследований:

- Принятие решений.
- Извлечение и предоставление знаний.
- Построение человеко-машинных (диалоговых) систем.

Синергетическое взаимодействие этих направлений являются машинными системами, которые позволяют лицам, принимающим решения, использовать данные, знания, объективные и субъективные модели для анализа и решения слабоструктурированных проблем [5].

Концептуальная модель СППР, соответствующая данному определению, представлена на рис. 1.1.1. Интерфейс «пользователь-система» содержит средства для генерации и управления диалогом.

Блоки анализа проблем и принятия решений включают в себя процедуры и методы, позволяющие сформулировать поставленную проблему, с помощью баз данных (БД), моделей (БМ) и знаний (БЗ) проанализировать возможности её решения и получить результат. В СППР включаются также средства для извлечения данных и знаний, построения моделей и манипулирования ими [5].

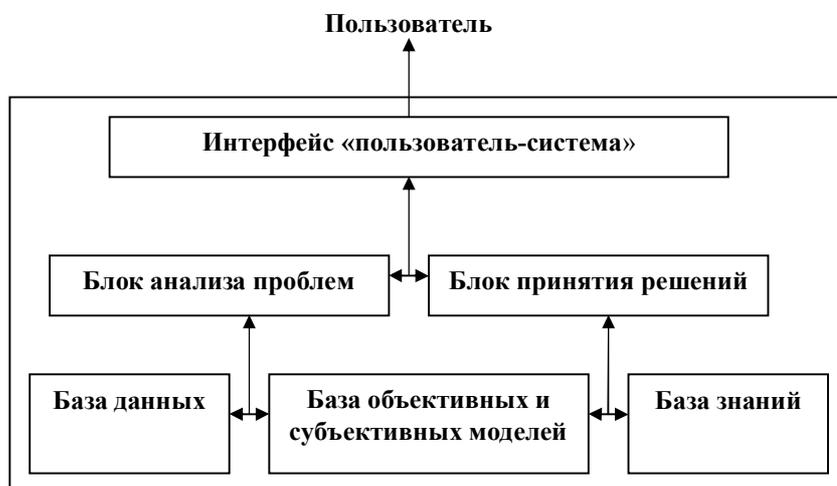


Рис. 1.1.1. Концептуальная модель СППР

1.2. Лазерное технологическое оборудование

В лазерном технологическом оборудовании используются в основном твердотельные, газовые и эксимерные лазеры. Независимо от типа лазера, режима работы (непрерывного, импульсного-периодического) и назначения, лазерные технологические установки состоят из ряда аналогичных функциональных узлов и имеют общую структурную схему (рис. 1.2.1) [9].

Лазерное излучение 2 от излучателя 1 формируется оптической системой 7 через устройство 5 дозирования энергии в световой пучок с определенными пространственными и временными характеристиками и направляется на обрабатываемый объект 8. С помощью оптической системы 7 осуществляется визуальный контроль положения обрабатываемого объекта, наблюдение за ходом обработки и оценка результата. Устройство 9 обеспечивает фиксацию обрабатываемого объекта на

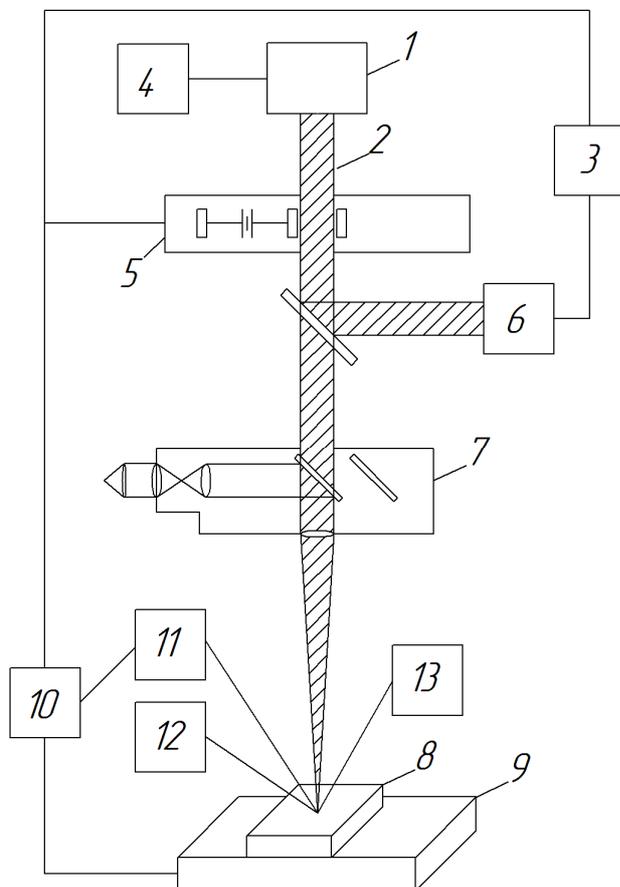


Рис. 1.2.1. Типовая схема лазерной технологической установки

трёхкоординатном столе, управляемом программирующим устройством (микроЭВМ) 10. С управляющим процессором связаны устройства контроля за лазерным излучением 3 и 6, а также датчики 11 контроля параметров технологического процесса, на основании информации от которых поступают команды управления источником питания излучателя 4 и устройством дозирования энергии 5.

Для реализации лазерно-химических процессов технологическая установка может быть дополнена устройством подачи в рабочую зону

технологической (рабочей) среды 13 и источниками дополнительной энергии 12 (механической, электромагнитной и др.). Датчики 11 контроля параметров технологического процесса могут контролировать температуру зоны обработки, состояние поверхности, яркость свечения плазменного факела и давать сигналы управляющему устройству для изменения параметров излучения или прекращения операции.

Основным элементом любой лазерной технологической установки является лазерный излучатель. Успехи в создании технологических лазеров позволяют на серийных промышленных установках получать необходимые параметры излучения. Так, для технологических CO₂-лазеров достижима мощность порядка 10 кВт в непрерывном режиме и 2 кВт в импульсно-периодическом режиме с частотой повторения 100 кГц и энергией импульса 10 Дж [9].

Созданы установки, использующие твёрдотельные лазеры на алюмоиттриевом гранате мощностью до 2 кВт в непрерывном и до 10 ГВт в импульсно-периодическом режиме с частотой повторения импульсов до 1000 Гц [9].

Эксимерные лазеры, работающие в УФ-области, позволяют обеспечить высокую однородность излучения по площади поверхности и минимальные (порядка 1 мкм) размеры пятна фокусировки.

В зависимости от типа активного элемента или среды излучателя лазеры разделяют на твёрдотельные и газовые. Кроме того, лазеры могут быть эксимерные и на красителях. Основными частями лазеров являются излучатели, состоящие из активного элемента, осветлителя и резонатора, а также источники питания и оптические системы. Характеристики активных элементов излучателей (длина волны, плотность излучения, мощность, коэффициент полезного действия и др.) определяются физическими свойствами материалов, из которых их изготавливают. Лазер называют по названию материала активного элемента.

Оптические системы лазеров всех типов служат для визуальной наводки и передачи к месту обработки излучения, регулирования его характеристик, а также контроля за ходом работы. При работе лазера его луч может перемещаться относительно объекта обработки или объект обработки относительно луча.

Движение луча относительно объекта обработки обеспечивается системой подвижных зеркал, линейно перемещающихся по координатам X и Y (рис. 1.2.2,а). При этом по оси X , вместе с зеркалами 2 и 3, перемещается объектив 4, а по оси Y — зеркало 3 и объектив 4, что создает необходимую траекторию обработки.

Для движения луча по небольшому полю изменяют угол наклона зеркал 2 и 3 вращением их вокруг взаимно перпендикулярных осей (рис. 1.2.2,б). Кроме того, лазерный луч может двигаться по круговой траектории, для чего необходимо вращать вокруг его оси оптическую систему, состоящую из зеркала и объектива. Лазерный луч можно также отклонять от оптической оси объектива вращающимся клином [9].

Движение объекта обработки относительно лазерного луча обеспечивается перемещением координатного стола лазерной установки.

Для повышения точности обработки применяют диафрагмы, резко уменьшающие зоны воздействия излучения. Изменяя конфигурацию отверстия диафрагмы, можно вырезать соответствующие отверстия в обрабатываемых изделиях. Размеры и форма получаемых с помощью лазера отверстий существенно зависят от теплопроводности и температуры плавления обрабатываемых материалов. Чем ниже подводимая энергия лазерного излучения и короче время его воздействия, тем меньше искажается форма создаваемых отверстий. Сменные светофильтры, имеющие различные коэффициенты поглощения, а также затворы и модуляторы позволяют регулировать параметры излучения.

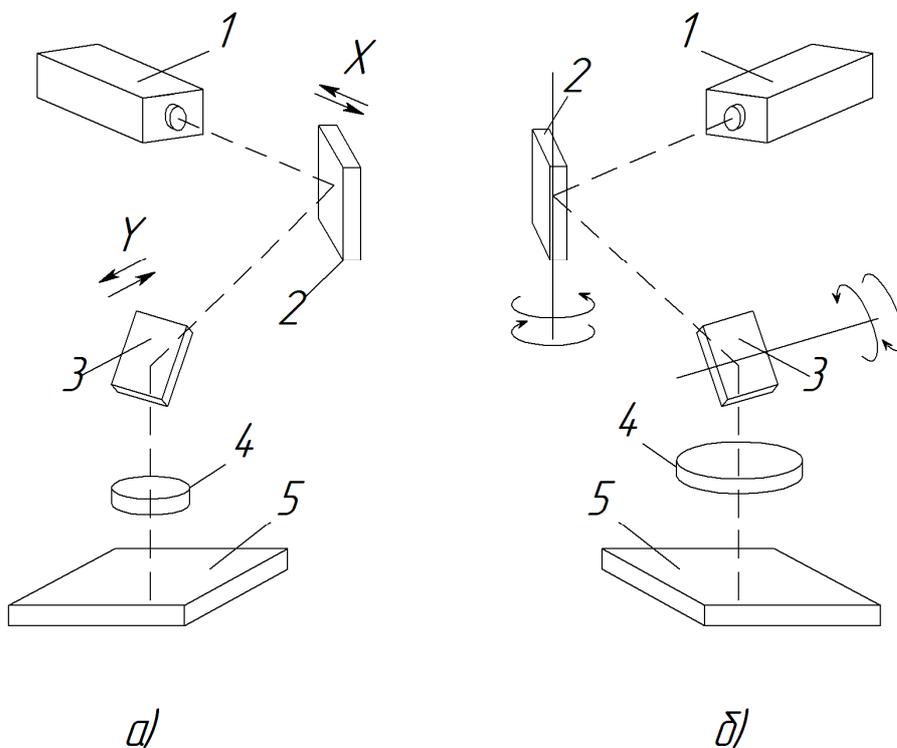


Рис. 1.2.2. Схемы лазерной обработки движущимся лучом с помощью двух подвижных зеркал, перемещающихся линейно (а) и вращающихся (б):
 1 — излучатель; 2, 3 — зеркала; 4 — объектив;
 5 — обрабатываемое изделие

Плотность мощности лазерных излучений не должна превышать оптимальных значений, так как в ином случае оптические детали лазеров могут быть повреждены. Коэффициент поглощения излучения с длиной волны 1,06 мкм оптических стекол невелик, поэтому плотность мощности должна быть не более 10^3 Вт/см². Для лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм оптические стекла непрозрачны. Поэтому в оптических системах лазеров используют монокристаллы солей галогеноводородных кислот

(хлорида натрия, бромида калия и др.) а также германия или арсенида галлия.

Высокой стойкостью к лазерному излучению обладают зеркальные фокусирующие системы с многослойным металлическим покрытием и принудительным воздушным охлаждением.

Для наблюдения за работой лазеров используют оптические системы с увеличением от 5 до 200 раз (например, микроскоп с независимыми системами для фокусировки и наблюдения). Наводят излучение на обрабатываемую поверхность по отражению источника света на ней.

При работе лазерной установки образуются пары, ионизированные частицы и капли обрабатываемого материала, осаждающиеся на нижней линзе объектива, что приводит её к нагреву, механическим повреждениям и в конечном итоге выходу из строя.

Для предохранения оптики лазеров от повреждений используют такие специальные средства защиты, как сменные защитные стёкла, прозрачные вращающиеся диски, непрерывно перематываемую прозрачную ленту, устройства, отклоняющие заряженные частицы, которые имеют определенные достоинства и недостатки. Защитные стекла, например, дешевы, но служат недолго, так как быстро загрязняются, что ослабляет энергию излучения, поступающую на обрабатываемое изделие. Защита отклонением заряженных частиц с помощью магнитного и электрического полей [9] "очищает" лазерное излучение, способствует более полному использованию световой энергии, но относительно дорога.

1.2.1. Типы технологических лазеров

Рубиновые лазеры могут работать в непрерывном или импульсном режиме. При работе в непрерывном режиме рубиновый лазер имеет низкий КПД (около 0,1%) и поэтому неэкономичен [10]. При работе в импульсном

Примечание [БЛ1]:

Диплом;
ГПНТБ

режиме без модуляции добротности выходное излучение рубинового лазера, также обладающего низким КПД, состоит из повторяющихся пиков большой мощности длительностью около 1 мкс.

Аргоновые и криптоновые ионные лазеры непрерывного действия являются самыми мощными источниками оптического излучения в видимой и ближней к ультрафиолетовой областях спектра. Эти лазеры имеют мощность 10 – 20 и 1 – 2 Вт на длинах волн соответственно 500 и 350 нм при значительных затратах электрической энергии. КПД лазеров на ионах инертных газов редко превышает 0,1%.

Лазеры на стекле с неодимом являются источниками оптического излучения с длиной волны 1,06 мкм. Активный элемент этих лазеров может быть различных форм и размеров (стрержни длиной до 2 м, пластины сечением до 10 см²). Так как неодимовое стекло обладает низкой теплопроводностью, из-за перегрева частота повторения импульсов излучения лазера ограничивается 2 Гц при их длительности 1 – 10 нс и энергии 10³ Дж [10].

Лазеры на алюмоиттриевом гранате (АИГ) работают как в импульсном, так и в непрерывном режиме. Выходная мощность, частота повторения и энергия импульсов этих лазеров обусловлены физическими свойствами АИГ. Так, при работе в непрерывном режиме, выходная мощность составляет 1 кВт, а в импульсном выходная энергия равна 500 Дж. Частота повторения импульсов при длине волны излучения 10,6 мкм составляет 200 Гц.

1.2.2. Применение лазеров в технологических процессах

Лазеры применяются для сварки, резки и выжигания отверстий. Это связано с тем, что луч лазера при встрече с твёрдым телом может в месте

Примечание [БЛ2]:

Диплом;
ГПНТБ

встречи развивать температуру до 40000°C и обеспечит испарение любого материала. Лазерный луч служит обрабатывающим инструментом высокой точности, может делать отверстия, диаметр которых меньше диаметра человеческого волоса. Луч может проникать в места, недопустимые для обычных сварочных горелок. Из-за кратковременности действия лазерного луча при сварке отсутствует явление окисления близлежащих к месту сварки участков и поэтому в ряде случаев отпадает необходимость работы в условиях вакуума. Лазерным лучом можно обрабатывать стекло, бетон, тугоплавкие металлы, можно приваривать тончайшие контакты в элементах современных микросхем и т.д. [11]. Нержавеющую сталь толщиной 5 мм лазер на CO₂ мощностью 20 кВт разрезает со скоростью 1,25 м/мин, а бетон толщиной в 40 см – со скоростью 10 см/мин.

При воздействии лазерного луча от твёрдотельного импульсного лазера на поверхность вещества может быть в общем случае три типа поведения поверхности.

При малой плотности энергии на единице поверхности ($<10^6$ Вт/см²), поверхность плавится (рис.1.2.3, а). При повышении плотности энергии луча плавление сопровождается испарением (кипением металла) (рис. 1.2.3, б). При повышении плотности энергии свыше 10^9 Вт/см² начинается мощное испарение и ионизация паров, что приводит к образованию высокотемпературной плазмы, которая начинает преграждать доступ луча к поверхности, вызывая падение интенсивности луча на поверхности (рис. 1.2.3, в) [11].

Все эти эффекты существенно зависят от длительности импульса. Зависимость плотности мощности P_u от длительности импульса τ , в разных режимах поведения поверхности обработки материалов, показаны на рис. 1.2.4. Положение разных областей на этой диаграмме для различных металлов несколько изменяется, но характер взаимного расположения остаётся тем же.

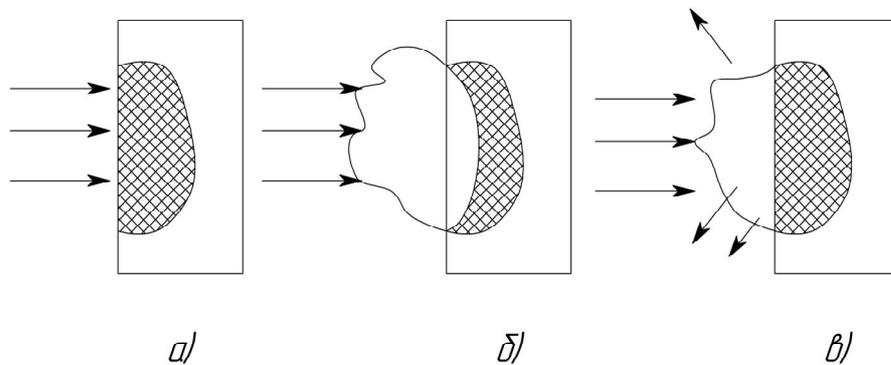


Рис. 1.2.3. Типы поведения поверхности при воздействии лазерного луча

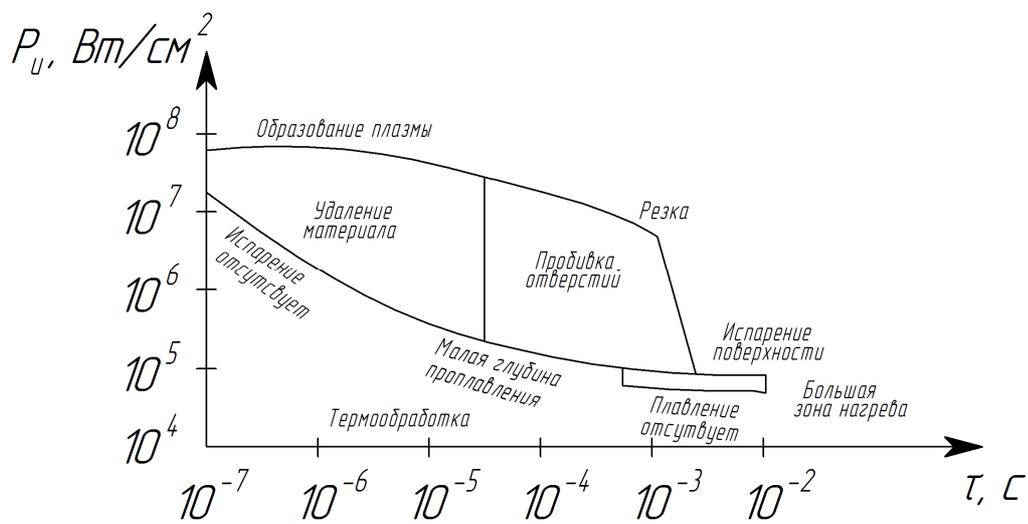


Рис. 1.2.4. Зависимость плотности мощности лазерного излучения от длительности импульса в разных режимах обработки материалов

Требованиям низкотемпературной индивидуально-последовательной технологии в наибольшей степени могут удовлетворять фотостимулированные процессы, в которых используется качественно новый вид энергетического воздействия по сравнению с тепловым. Эти процессы характеризуются тем, что они низкотемпературны, так как обеспечивают не объёмный подвод энергии, а направленное локальное воздействие без нагрева всей пластины.

Энергия излучения, при использовании этих процессов, подводится в виде квантов строго определенной величины. Это, с одной стороны, обеспечивает высокую селективность процессов, позволяя при заданной энергии квантов воздействовать только на определенные виды атомов и химических связей, а с другой стороны, обеспечивает и универсальность фотостимулированных методов, так как для каждого материала и типа обработки может быть выбрана необходимая энергия квантов. Облучение осуществляется по заданному рисунку, что позволяет формировать функциональные слои при меньшем числе технологических операций. Пространственная направленность излучения также позволяет резко повысить анизотропию процессов травления и осаждения.

Фотостимулированные процессы практически безынерционны и поэтому легко управляемы. В отличие от плазмо-химических процессов и процессов, стимулированных электронами и ионами, они позволяют варьировать давлением рабочих газовых сред в широких пределах, что даёт возможность оптимизировать их по физическим параметрам конечных структур и частично по разрешению.

Фотостимулированные процессы (для энергии менее 6 эВ) практически не вызывают радиационных повреждений сформированных ранее структур и исключают такие виды их дополнительного загрязнения, как внесение посторонних ионов и атомов из конструкционных материалов реактора.

Эффективность фотостимулированных процессов особенно повышается при применении лазеров, которые обеспечивают: использование квантов в диапазоне длин волн от инфракрасного (ИК) до вакуумного ультрафиолета (ВУФ) (0,1 – 10 эВ); практически неограниченный диапазон пиковых мощностей; возможность высокоточной пространственной и временной концентрации энергии; возможность избирательного воздействия на определенные типы атомов или химических связей.

Расширению технологических возможностей способствовало применение эксимерных лазеров, излучающих в УФ-области, где энергии квантов (5 – 10 эВ) достаточно для разрыва связей типа Si-H, C-F и др. Это открыло путь к осуществлению с помощью лазерного излучения практически всех технологических операций микроэлектроники – очистки поверхности, осаждения и травления полупроводников, окисления, легирования и т.д.

Возможность реализации лазерных процессов для субмикронной технологии ультрабольших интегральных схем (УБИС) базируется на исследованиях, основные результаты которых представлены в табл. 1.2.1.

Из таблицы следует, что наиболее универсальным с точки зрения применения в технологии микроэлектроники является излучение эксимерных лазеров. Кроме того, эксимерные лазеры обладают слабой пространственной и временной когерентностью, что облегчает предотвращение нежелательных интерференционных эффектов в условиях проекционной обработки. Таким образом, наибольшее применение в технологии найдут эксимерные лазеры, хотя для отдельных процессов не исключено применение и других типов лазеров.

Таблица 1.2.1 Лазерные процессы для субмикронных технологий

Технологический процесс	Тип лазера	Длина волны	Скорость осаждения мкм/мин	Достоинства
Очистка полупроводниковых подложек от C и O ₂	Имп. ArF (Э)	0,193	-	Отсутствие радиационных повреждений
Осаждение пленок Si ⁺	Имп. (Э) KrF	0,248	1,0	Осаждение без фотолитографии, с разрешением менее 1 мкм
	Непр. Ar ⁺	0,514	0,3	Осаждение на площади 120 см ² без радиационных повреждений
Осаждение пленок SiO ₂	Имп. (Э) ArF	0,193	0,3	Низкая температура осаждения (менее 300° C)
Осаждение металлов Al, Mo и др.	Имп. (Э) ArF	0,193	5,0	Отсутствие загрязнений, низкая температура (менее 200° C)
Травление Si в Cl ₂	Имп. (Э) XeCl	0,308	-	Отсутствие радиационных повреждений, травление без фотолитографии с разрешением 0,5 мкм
Легирование кремния бором и фосфором из BCl ₃ и PCl ₃	Имп. (Э) ArF	0,193	-	Сверхтонкое (менее 0,1 мкм) легирование. Совмещение процессов легирования для формирования сложных p-n-р структур без фотолитографии с разрешением 0,2 мкм
Отжиг после ионной имплантации	Непр. Ar ⁺	0,514	-	Отсутствие перераспределения примесей
	Непр. ArF	0,193	-	Возможно применение для СБИС с субмикронным расширением
Изготовление дифракционных решеток на GaAs	Непр. He-Cd	0,325	-	Без фотолитографии получены дифракционные решетки с периодом 0,24 мкм
Литография	Имп. ArF,	0,193;	-	Существенное сокращение времени экспозиции в 100 раз, высокое разрешение до 0,3 мкм. Низкая стоимость установки
	Имп. KrF,	0,248;		
	(Э) XeCl	0,308		

Имп. – импульсный; (Э) – эксимерный; Непр. – непрерывный.

Наиболее вероятными областями применения лазерных технологических процессов (исходя из существующей потребности и требований по совместимости с традиционными технологиями) являются: получение пленок SiO_2 в качестве активного диэлектрика из-за высокой скорости осаждения, низкой температуры процесса, отсутствия радиационных повреждений; травление Si, SiO_2 , GaAs и других материалов из-за высокой скорости травления, селективности и анизотропии, хорошего разрешения, отсутствия радиационных повреждений; сверхтонкое легирование (менее 1 мкм) Si и GaAs и лазерная кристаллизация Si на подложках; лазерное осаждение высокотемпературных сверхпроводящих керамик и других соединений из-за конгруэнтного испарения сложных соединений и низкой температуры осаждения [11].

Развиваются также импульсная лазерная литография, характеризующаяся высоким разрешением при высоких производительности и экономичности, и лазерный анализ материалов и технологических сред.

Технологические требования к эксимерным лазерам представлены в табл. 1.2.2.

1.3. Объекты лазерной обработки

В лазерной технологии применяют твёрдотельные и газовые лазеры импульсного и непрерывного действия. В большинстве процессов лазерной технологии используется термическое действие света, вызываемое его поглощением в обрабатываемом материале. Для увеличения плотности потока излучения и локализации зоны обработки применяют оптические системы [13].

Таблица 1.2.2. Характеристики эксимерных лазеров

Характеристика лазеров	Низкотемпературное фотоосаждение слоев	Очистка	ВУФ-литография (Мп.1)	Фототравление	Лазерное испарение	Лазерное легирование	Проекционная лазерография (осаждение, легирование, травление)	Источники рентгеновского излучения для рентгенолитографии
Рабочая среда	ArF (193), KrF (248), XeCl (308)	ArF (193), KrF (248)	ArF (193), KrF (248)	ArF (193), KrF (248)	KrF (248), XeCl (308), YAG (1060)	YAG (1060)	KrF (248), XeCl (308)	KrF (248)
Ширина линии, мм	-	-	< 0,003	-	-	-	< 0,006	-
Длительность импульса, нс	10 - 20	10 - 20	10 - 20	10 - 20	10 - 20	10 - 20	10 - 20	< 10
Энергия импульса, мДж	100 – 200	> 500	50 - 150	> 50	> 1000	> 50	> 1000	> 1000
Частота повторения, Гц	> 1000	> 100	> 250	> 1000	> 100	> 200	> 100	> 200
Средняя мощность, Вт	100 – 200	> 50	> 10	> 50	> 100	> 100	> 100	> 200
Расходимость, мрад	< 1	-	< 0,1	-	< 1	< 1	< 0,2	< 0,02
Ресурс без замены смеси (число вспышек)	> 3·10 ⁷	> 10 ⁷	> 10 ⁸	> 3·10 ⁷	> 10 ⁷	> 10 ⁷	> 10 ⁷	> 10 ⁷
Единообразно обрабатываемая площадь, мм	Пластины диаметром 150	Пластины диаметром 150	20 x 20	Пластины диаметром 150	20 x 20	20 x 20	20 x 20	-

Особенностями лазерной технологии являются: высокая плотность потока излучения в зоне обработки, дающая необходимый термический эффект за короткое время (длительность импульса 1 мс и менее); локальность воздействия излучения, обусловленная возможностью его фокусировки в световые пучки предельно малого диаметра (порядка длины волны излучения); малая зона термического влияния, обеспечиваемая кратковременным воздействием излучения; бесконтактный ввод энергии в зону обработки и возможность ведения технологических процессов в любой прозрачной среде (вакуум, газ, жидкость, твёрдое тело), через прозрачные окна технологических камер, оболочки электровакуумных приборов и т.д. Наиболее изучены и освоены процессы сварки, сверления и резки [12].

Лазерная сварка (рис. 1.3.1,а–г) может быть точечной и шовной. В большинстве случаев применяют импульсные лазеры, обеспечивающие наименьшую зону термического влияния. С помощью лазерной сварки можно получать высококачественные соединения деталей из нержавеющей стали, никеля, молибдена, кобальта и др. Высокая мощность лазерного излучения позволяет сваривать материалы с высокой теплопроводностью (медь, серебро). Возможна лазерная сварка материалов, плохо поддающихся сварке другими методами (вольфрам с алюминием, медь со сталью, бериллиевая бронза с некоторыми сплавами). Плотность потока излучения на поверхности свариваемых деталей в зависимости от их материала находится в пределах $0,1\text{--}1\text{ МВт/см}^2$. Глубина проплавления материала при сварке импульсным твердотельным лазером может быть $0,05\text{--}2\text{ мм}$ при её отношении к диаметру сварной точки или ширине шва от $0,5$ до 5 , что делает возможным надёжную сварку деталей толщиной от $0,01$ до 1 мм . Оборудование для лазерной сварки обеспечивает работу в следующих режимах: энергия излучения в импульсе $0,1\text{--}30\text{ Дж}$, длительность импульса $1\text{--}10\text{ мс}$, диаметр светового пятна $0,05\text{--}1,5\text{ мм}$. Производительность точечной

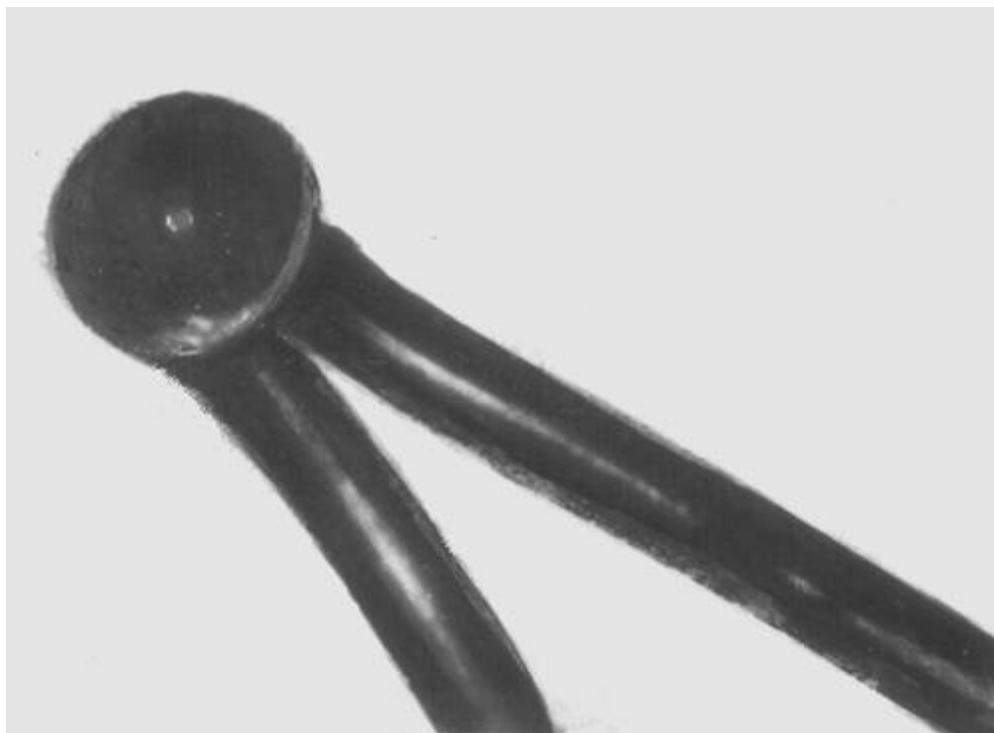


Рис. 1.3.1,а. Лазерная сварка: медно-константановая термопара, сваренная лучом лазера (диаметр проволоки 0,07 мм)

сварки составляет 60 операций в минуту, шовной – 1 м/мин при глубине проплавления 0,5 мм. Наиболее эффективно применение лазера для сварки в труднодоступных местах конструкций, при соединении легкодеформируемых деталей, в условиях интенсивного теплоотвода (например, для материалов с высокой теплопроводностью, при низких температурах и т.д.), а также в тех случаях, когда надо обеспечить минимальную зону термического влияния. Экономически выгодна замена пайки миниатюрных деталей сваркой с помощью лазера, так как в этом случае исключается загрязнение свариваемых деталей флюсом и получается соединение более высокого качества. Конструкция весит меньше. Области применения лазерной сварки: изготовление электровакуумных и полупроводниковых

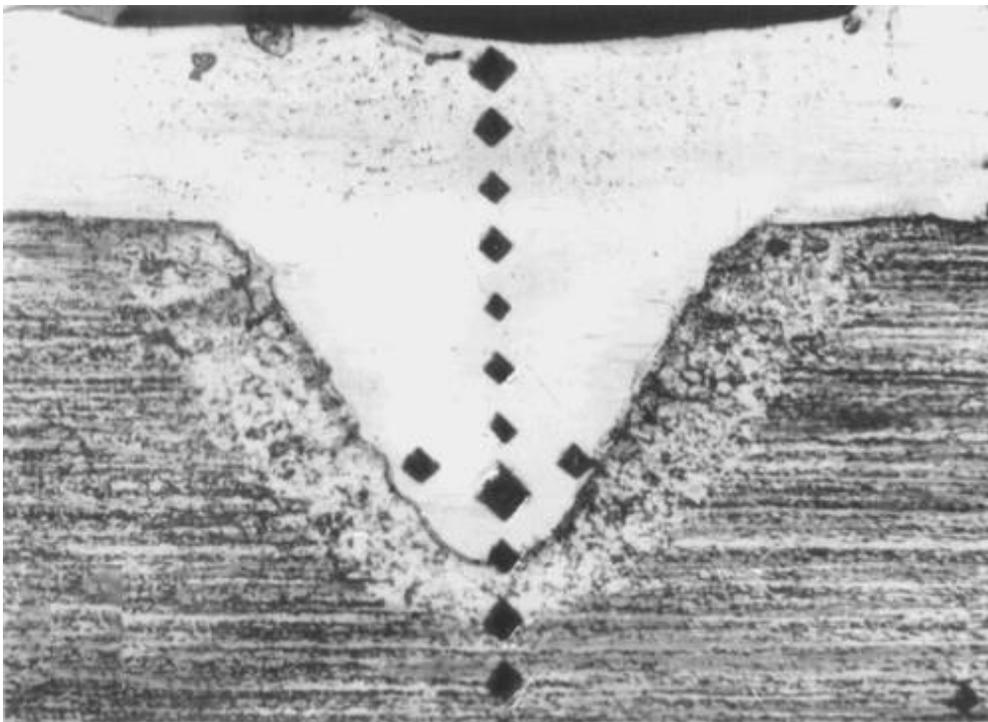


Рис. 1.3.1,б. Лазерная сварка: микрофотография шлифа сварного соединения никелевой фольги толщиной 0,2 мм с медной пластиной

приборов, интегральных схем, приборов точной механики и т.д. Лазерная сварка позволяет повысить производительность труда в 3–5 раз по сравнению с обычными способами сварки и пайки.

Сверление отверстий лазером (рис. 1.3.2,а–г) возможно в любых материалах. Как правило, для этой цели используют импульсные лазеры с энергией в импульсе 0,1–30 Дж при длительности 0,1–1 мс, плотности потока излучения в зоне обработки 10 МВт/см² и более. Максимальная производительность достигается при сверлении отверстий за один импульс с большой энергией (до 30 Дж). При этом основная масса материала удаляется из отверстия в расплавленном состоянии под давлением пара,

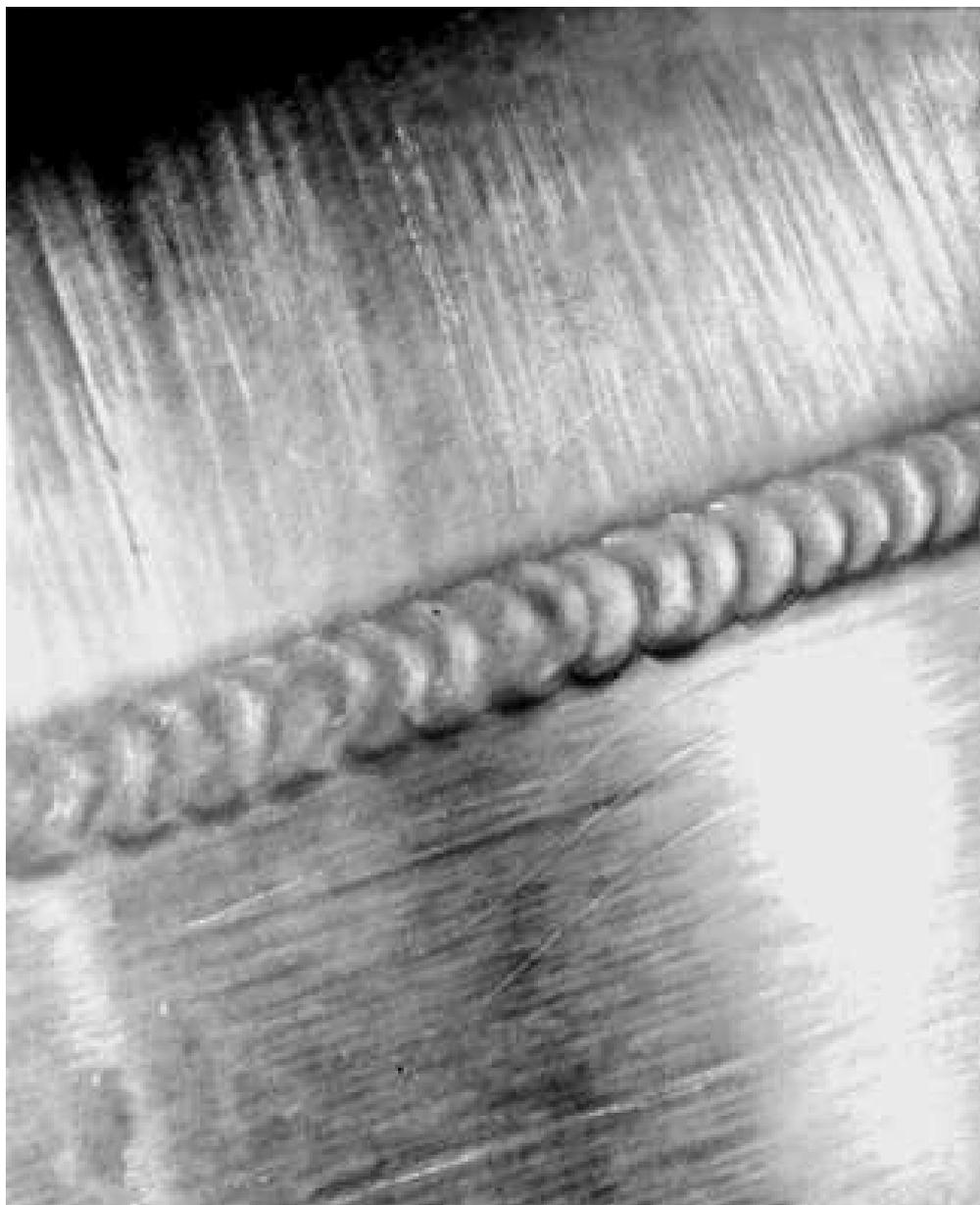


Рис. 1.3.1,в. Лазерная сварка: сварной шов, полученный при сварке листов кобальта и нержавеющей стали толщиной 0,3 мм излучением лазера на алюмо-иттриевом гранате



Рис. 1.3.1,г. Лазерная сварка: полупроводниковые приборы, корпуса которых герметизированы с помощью лазерной сварки

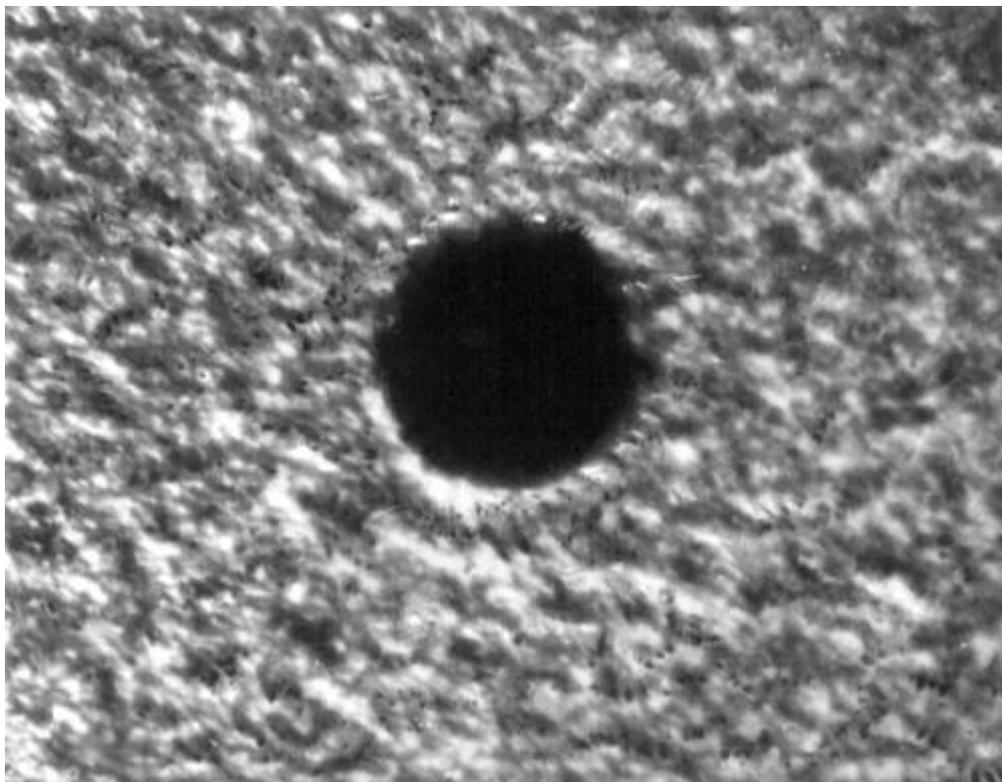


Рис. 1.3.2,а. Сверление отверстий лазерным излучением: круглое отверстие диаметром 0,1 мм в пластине из феррита толщиной 0,5 мм

образовавшегося в результате испарения относительно небольшой части вещества. Однако точность обработки одноимпульсным методом невысокая (10–20% от размера диаметра). Максимальная точность (1–5%) и управляемость процессом сверления достигается при воздействии на материал серии импульсов (многоимпульсный метод) с относительно небольшой энергией (обычно 0,1–0,3 Дж) и малой длительностью (0,1 мс и менее). Возможно сверление сквозных и глухих отверстий с различными формами поперечного (круглые, треугольные и т.д.) и продольного

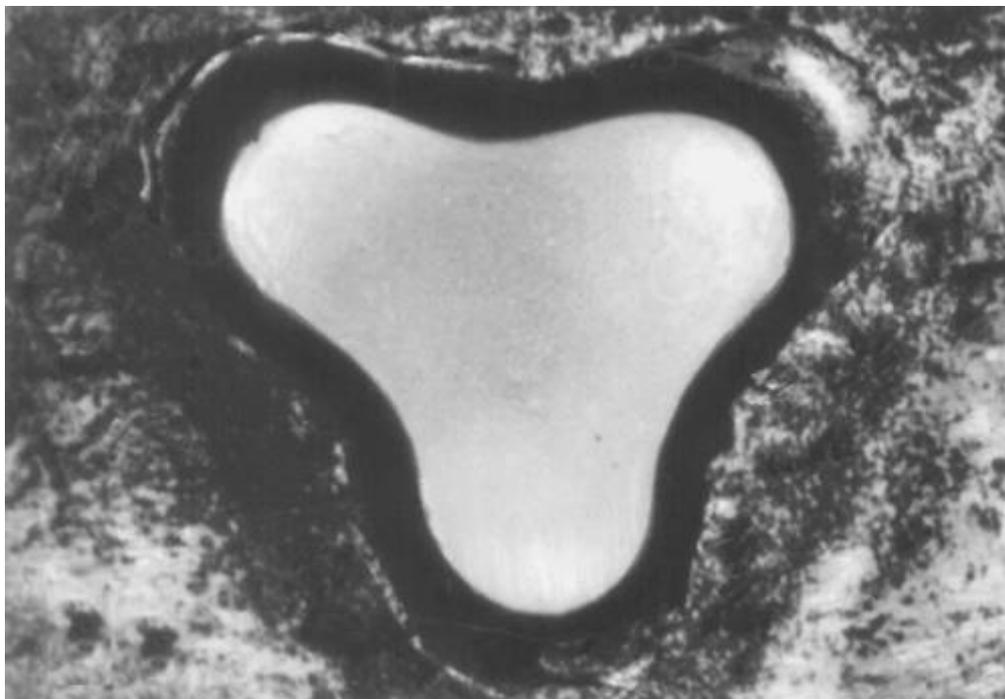


Рис. 1.3.2,б. Сверление отверстий лазерным излучением: фигурное отверстие в пластине из нержавеющей стали толщиной 0,3 мм

(цилиндрического, конического и др.) сечений. Освоено сверление отверстий диаметром 0,003–1 мм при отношении глубины к диаметру 0,5–10. Шероховатость поверхности стенок отверстий, в зависимости от режима обработки и свойств материала, соответствует 6–10 классам чистоты ($\nabla 6$ – $\nabla 10$), а глубина структурно измененного или дефектного, слоя составляет 1–100 мкм. Производительность лазерных установок для сверления отверстий обычно составляет 60–240 отверстий в минуту. Наиболее эффективно применение лазера для сверления труднообрабатываемых другими методами материалов (алмаз, рубин, керамика и т.д.), получения отверстий диаметром менее 100 мкм в металлах, сверления под углом к поверхности.

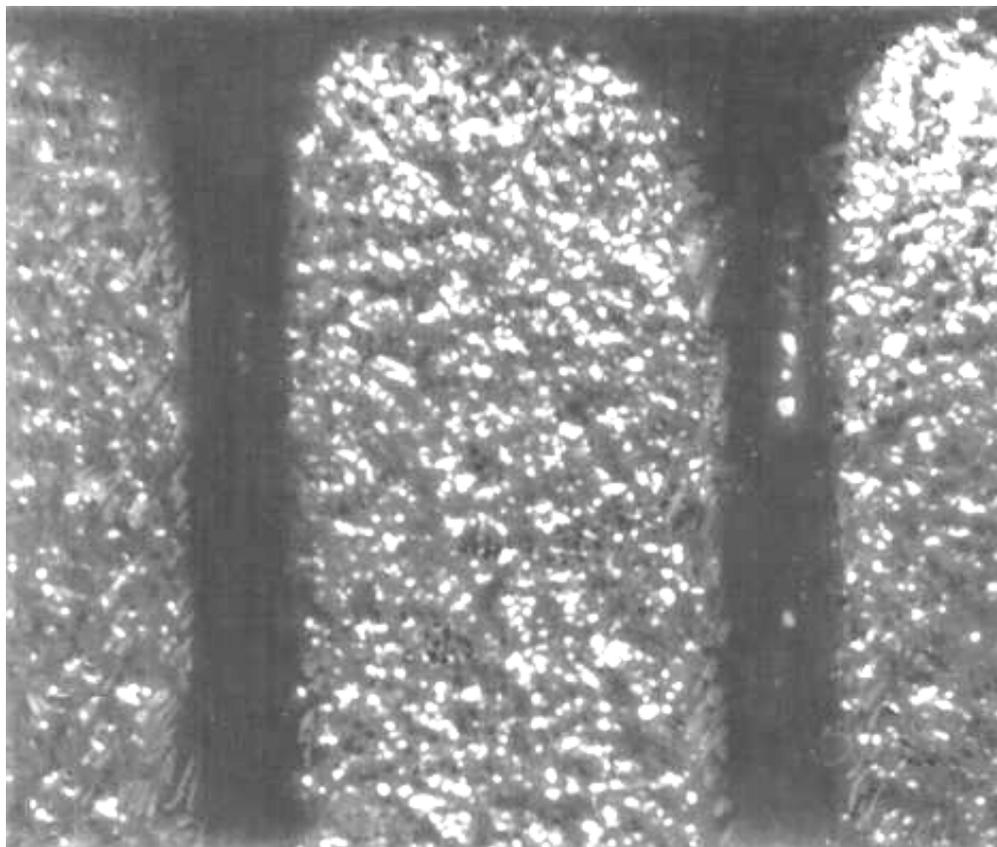


Рис. 1.3.2,в. Сверление отверстий лазерным излучением:
продольное сечение цилиндрических отверстий
диаметром 0,05 мм в пластине из феррита

Сверление отверстий лазерным лучом нашло особенно широкое применение в производстве рубиновых часовых камней и алмазных волок. Например, успешно выполняется сверление алмазных волок на установке «Квант-9» с лазером на стекле с примесью неодима (рис. 1.3.3). Производительность труда на этой операции увеличилась в 12 раз по сравнению с ранее применявшимися методами [12, 13].

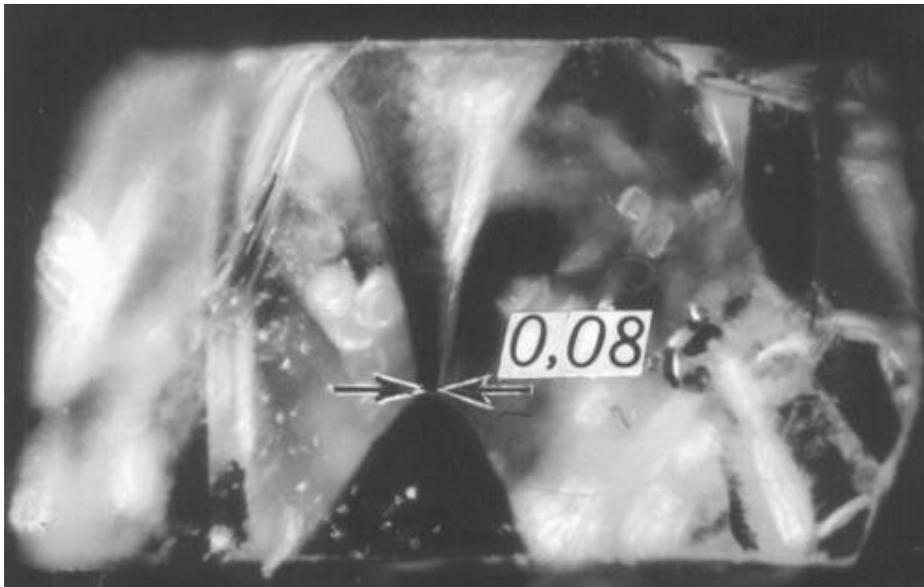


Рис. 1.3.2,г. Сверление отверстий лазерным излучением:
отверстие в алмазной волоке (толщина кристалла 1,2
мм, минимальный диаметр отверстия 0,08 мм)

Бесконтактное удаление лазером весьма малых масс материала применяют также при динамической балансировке роторов гироскопов и при точной подгонке балансов часовых механизмов, что позволяет существенно повысить точность этих операций и увеличить производительность.

Лазерную резку материалов (рис. 1.3.4) осуществляют как в импульсном, так и в непрерывном режиме. При резке в импульсном режиме непрерывный рез получается в результате наложения следующих друг за другом отверстий. Наиболее широкое применение получила резка (фрезерование) тонкоплёночных пассивных элементов интегральных схем, например, с целью точной подгонки значений их сопротивления или ёмкости.

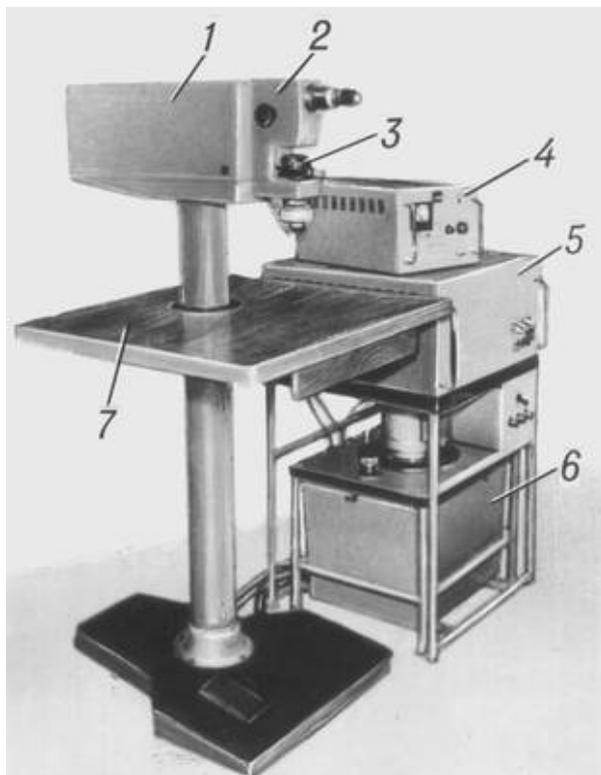


Рис. 1.3.3. Лазерная установка «Квант-9» для сверления отверстий в алмазных волокнах: 1 — лазерная головка; 2 — оптическая система; 3 — обрабатываемая деталь; 4 — система управления; 5 — источник питания; 6 — система охлаждения; 7 — стол оператора

Для этого применяют импульсные лазеры на алюмо-иттриевом гранате с модуляцией добротности и лазеры на углекислом газе. Импульсный характер обработки обеспечивает минимальную глубину прогрева материала и исключает повреждение подложки, на которую нанесена плёнка. Лазерные установки различных типов позволяют вести обработку при следующих режимах: энергия излучения 0,1–1 МДж,

длительность импульса 0,01–100 мкс, плотность потока излучения до 100 МВт/см², частота повторения импульсов 100–5000 импульсов в секунду. В сочетании с автоматически управляющими системами лазерные установки для подгонки резисторов обеспечивают производительность более 5 тыс. операций за 1 час [13]. Импульсные лазеры на алюмо-иттриевом гранате применяются также для резки полупроводниковых пластин-подложек интегральных схем.

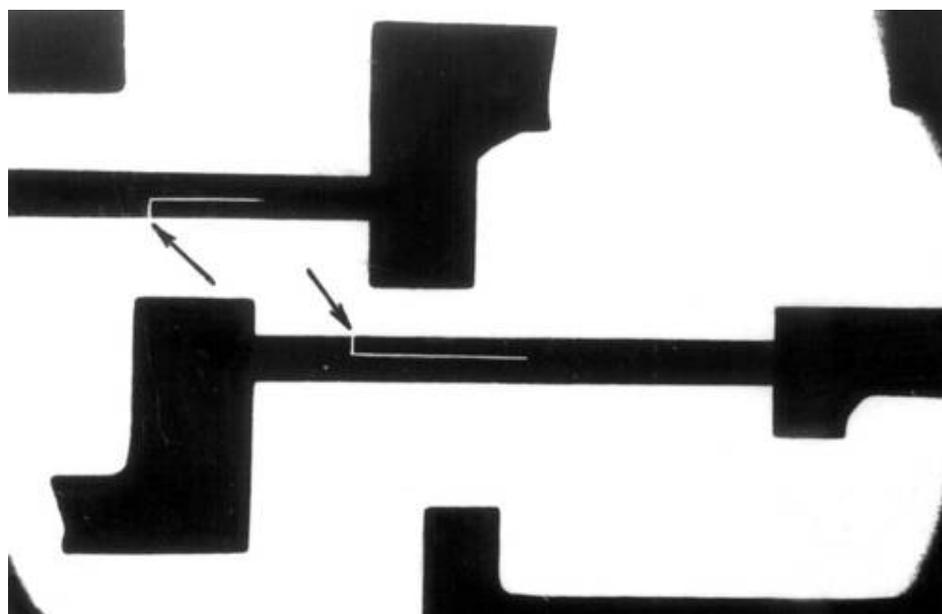


Рис. 1.3.4. Лазерная резка тонкой хромовой резистивной плёнки с целью подгонки сопротивления (толщина плёнки 0,5 мкм, ширина реза, указанного стрелкой, 50 мкм) и надрезы на стекле, по которым происходит термическое раскалывание (получены лазером на углекислом газе)

Лазеры непрерывного действия на углекислом газе мощностью от нескольких сотен Вт до нескольких кВт применяют для газолазерной резки, при которой в зону воздействия лазерного луча подаётся струя газа. Газ выбирают в зависимости от вида обрабатываемого материала. При резке дерева, фанеры, пластика, бумаги, картона, текстильных материалов в зону обработки подаётся воздух или инертный газ, которые охлаждают края реза и препятствуют сгоранию материала и расширению реза. При резке большинства металлов, стекла, керамики струя газа выдувает из зоны воздействия луча расплавленный материал, что позволяет получать поверхности с малой шероховатостью и обеспечивает высокую точность реза. При резке железа, малоуглеродистых сталей и титана в зону нагрева подаётся струя кислорода. В результате экзотермической реакции окисления металла выделяется дополнительное тепло, что позволяет значительно повысить скорость резки. Характерные режимы газолазерной резки: мощность излучения 300–1000 Вт, плотность потока излучения в зоне обработки 100 кВт/см², ширина реза 0,3–1 мм, толщина разрезаемого материала до 10 мм. Скорость резки зависит от толщины и свойств обрабатываемого материала и может быть от 0,5 до 10 м/мин, для тонких материалов (бумага, ткань) до 50 м/мин и более. Достоинства газолазерной резки: простота автоматизации процесса, малая ширина реза и небольшая глубина зоны термического влияния, отсутствие вредных отходов при резке стеклопластиков, оплавление краев реза синтетических текстильных материалов, что препятствует их распусканию.

Лазеры на углекислом газе применяют для резки хрупких материалов (стекло, керамика) методом управляемого термического раскалывания. При локальном нагреве материала по траектории движения луча создаются термические напряжения, превышающие предел прочности

материала. Возникающая трещина развивается вслед за лучом, траектория которого может иметь сложную форму. Скорость резки достигает нескольких м/мин [14]. Управляемое термическое раскалывание применяется при резке стеклянных трубок в производстве электровакуумных приборов, керамических подложек интегральных схем, для резки листового и фасонного стекла.

Так же термическое действие лазерного излучения может быть применено для поверхностного упрочнения (закалка и «залечивание» микродефектов оплавлением) быстроизнашивающихся металлических деталей, например, режущего инструмента для создания электронно-дырочных переходов в производстве полупроводниковых приборов. В производстве интегральных схем действие лазера используют для локальной термической диссоциации некоторых металлсодержащих органических соединений при изготовлении плёночных элементов схем; для интенсификации процессов локального окисления и восстановления; для получения тонких плёнок путём испарения материалов в вакууме.

Дальнейшее развитие лазерной технологии связано с увеличением мощностей лазеров, что позволяет обрабатывать материалы ещё большей толщины. Задачами лазерной технологии в области обеспечения более высокой точности обработки являются: разработка эффективных методов управления параметрами излучения, улучшение равномерности распределения интенсивности излучения по сечению пучка, повышение стабильности выходных параметров лазеров, а также детальное изучение физических процессов воздействия лазерного излучения на материалы в различных режимах работы лазеров [13, 14].

1.4. Методы получения объектов лазерной обработки

1.4.1. Лазерное распыление

Примечание [БЛЗ]:

Диплом;
ГПНТБ

В 1995 году появилось сообщение о синтезировании углеродных нанотрубок методом распыления графитовой мишени под действием импульсного лазерного излучения в атмосфере инертного (He или Ar) газа. Графитовая мишень находилась в кварцевой трубке при температуре 1200°C, по которой течёт буферный газ [16].

Фокусирующийся системой линз лазерный пучок сканирует поверхность графитовой мишени для обеспечения равномерного испарения материала мишени. Получающийся, в результате лазерного испарения, пар попадает в поток инертного газа и выносится из высокотемпературной области в низкотемпературную, где осаждаётся на охлаждаемой водой медной подложке. Сажа, содержащая нанотрубки, собирается с медной подложки, стенок кварцевой трубки и обратной стороны мишени. Также как и в дуговом методе получается несколько видов конечного материала.

В экспериментах, где в качестве мишени использовался чистый графит, получались многостенные нанотрубки, которые имели длину до 300 нм. Структура и концентрация таких нанотрубок в исходном материале главным образом определялись температурой. При температуре 1200°C все наблюдаемые нанотрубки не содержали дефектов и имели шапочки на окончаниях. При понижении температуры синтеза до 900°C в нанотрубках появлялись дефекты, число которых увеличивалось с дальнейшим понижением температуры, и при 200°C образования нанотрубок не наблюдалось.

При добавлении в мишень небольшого количества переходных

металлов, в продуктах конденсации наблюдались одностенные нанотрубки. Однако в процессе испарения мишень обогащалась металлом, и выход одностенных нанотрубок снижался.

Для решения этой проблемы стали использовать две одновременно облучаемые мишени, одна из которых является чистым графитом, а другая состоит из сплавов металлов [16].

Процентный выход нанотрубок резко меняется в зависимости от катализатора. Так, например, высокий выход нанотрубок получается на катализаторах Ni, Co смеси Ni и Co с другими элементами. Получаемые одностенные нанотрубки имели одинаковый диаметр и были объединены в пучки диаметром 5–20 нм. Смеси Ni/Pt и Co/Pt дают высокие выход нанотрубок, тогда как использование чистой платины приводит к низкому выходу одностенных нанотрубок. Смесь Co/Si дает низкий выход одностенных нанотрубок, а использование чистой меди вообще не приводит к формированию одностенных нанотрубок. На окончаниях одностенных нанотрубок, свободных от частиц катализатора, наблюдались сферические шапочки.

1.4.2. Лазерно-порошковый метод синтеза одностенных углеродных нанотрубок

Лазерно-порошковый метод непрерывного синтеза одностенных углеродных нанотрубок базируется на лазерной абляции смеси графитового и каталитических порошков (Ni/Co=1/1) лазером мощностью 2кВт в потоке аргона или азота. Основной идеей предложенного метода является более эффективное использование лазерной мощности, поглощаемой на частицах микронного размера, для испарения твёрдого материала по сравнению с абляцией массивных мишеней в известных лазерных методах за счет меньших (на 1–2 порядка величины) теплопро-

Примечание [БЛ4]:
Диплом;
ГПНТБ

водностных потерь в газе. В результате стало возможным испарять до 5 грамм графитового порошка в час [17].

Полученные образцы сажи были исследованы с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния и просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения. На основе этих исследований содержание нанотрубок в сажистом осадке оценивается 20–40%. Разработан метод непосредственного обогащения сажи нанотрубками в процессе эксперимента. В работе [17] предложены пути оптимизации параметров процесса для увеличения процентного содержания нанотрубок в саже.

1.4.3. Совместное использование лазера и сканирующего туннельного микроскопа в нанолитографии

Примечание [БЛ5]:
Диплом;
ГПНТБ

При всех своих преимуществах, сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) как литографический прибор имеет некоторые недостатки. Чтобы сообщить туннелирующим электронам энергию, достаточную для модификации молекул резиста, необходимо прикладывать высокое ускоряющее напряжение и поддерживать ток выше некоторого критического значения. Типичное значение энергии деструкции молекул резиста типа РММА составляет примерно 25 эВ. Чтобы достичь таких энергий, приходится, увеличивая напряжение, смещаться из области туннелирования в область автоэмиссии, что затрудняет работу в воздушной среде. В то же время, большое значение тока может привести к нежелательным эффектам, например, разогреву резиста и острия иглы, накоплению заряда в резисте. Избавиться от этого недостатка можно путем совместного использования лазера и СТМ [18]. При совместном использовании прецизионного, но малоомощного СТМ и возбуждения молекул резиста, которые затем могут

быть легко разрушены под действием туннельного тока.

При облучении резиста светом видимой части спектра или мягким ультрафиолетовым светом энергии фотонов, которая в этом случае составляет 2–20 эВ, недостаточно для фотодеструкции или фотоионизации полимерных молекул. Постоянно приложенное напряжение к игле СТМ сообщает электронам недостающую энергию, что вызывает деструкцию молекул резиста. Выбирая соответствующим образом рабочую частоту лазера, получаем возможность селективного возбуждения и разрыва связей в молекулах резиста. Существует несколько фактов, способствующих реализации описанного метода. Во-первых, поглощение острием иглы СТМ электромагнитного поля (фотонов) приводит к фотоэмиссии электронов. Поскольку значение туннельного тока поддерживается постоянным, то данный эффект вызывает увеличение средней энергии туннелирующих электронов, которые теперь способны вызвать ударную ионизацию молекул резиста. Во-вторых, вблизи острия иглы СТМ имеет место эффект усиления электромагнитного поля на несколько порядков, что дает возможность не только использовать лазер меньшей мощности, но и локализовать его влияние в активной области вблизи острия иглы СТМ.

Рассмотренный выше метод литографии предъявляет повышенные требования к стабильности лазерного излучения ввиду сильного влияния последнего на характер туннелирования электронов.

Если обобщить все сказанное о применении СТМ в нанолитографии, то в итоге можно сформулировать следующее: формирование и сборка наноструктур с помощью сканирующего зонда по существу перспективна, но есть два ограничения – она относительно дорогая и относительно медленная [18]. Хотя достигнуты значительные успехи в построении машин, в том числе и СТМ, использующих сотни или даже тысячи зондов одновременно, создание наноструктур с применением методов зондового сканирования всё ещё очень похоже на ручную сборку.

1.4.4. Импульсное лазерное воздействие на материал методом неразрушающего ядерного анализа

Примечание [БЛ6]:
Диплом;
ГПНТБ

Импульсное лазерное воздействие на различные материалы помимо чисто технологических применений (например, лазерный отжиг аморфных слоев полупроводников, лазерное распыление плёнок высокотемпературных сверхпроводников) привлекает внимание принципиальными возможностями физического излучения фазовых превращений в приповерхностных слоях материалов, неравновесной сегрегацией примесей, стехиометрическими нарушениями при импульсном лазерном воздействии и т.д. Развитие исследований в этом направлении сдерживается отсутствием экспериментальных установок, позволяющих прецизионно контролировать параметры облучения (плотность энергии импульсного лазерного воздействия, химический состав и давление окружающей среды), а также анализировать структурные и композиционные изменения, происходящие с образцом “in situ”, непосредственно после импульсного лазерного воздействия [19, 20].

Для решения этих задач была создана экспериментальная установка, совмещающая в одной вакуумной камере пучки различных ионов от электростатического ускорителя ЭГ8 и луч импульсного лазера [21]. Это даёт возможность исследовать результаты импульсного лазерного воздействия “in situ” при помощи набора методов неразрушающего ядерного анализа: резерфордского обратного рассеяния и каналирования ионов, ядерных реакций и ионно-индуцированного характеристического рентгеновского излучения. Указанные методы позволяют многократно облучать и анализировать образец.

Схема установки приведена на рис. 1.4.1. Пучок ускоренных ионов (обычно протонов или ионов He^+ с энергией в диапазоне 1–3 МэВ с разбросом по энергии < 200 эВ [4]) попадает в камеру рассеяния. В камере 9

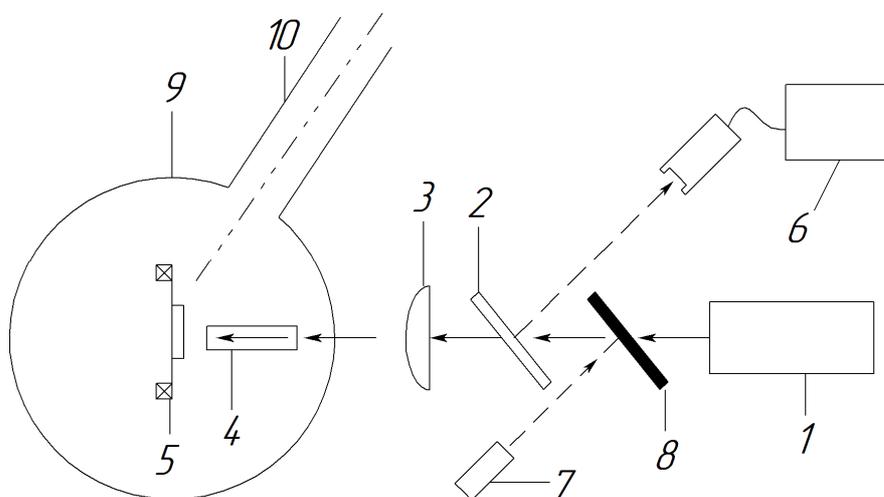


Рис. 1.4.1. Схема установки: 1 – импульсный лазер ОГМ-20; 2 – стеклянная пластинка; 3 – система фокусировки луча; 4 – гомогенизатор; 5 – гониометр с образцом, 6 – измеритель энергии/мощности излучения ИМО-2Н; 7 – юстировочный He - Ne – лазер; 8 – убирающееся зеркало; 9 – камера рассеяния; 10 – ионпровод

с рабочим вакуумом $\sim 10^{-4}$ Па установлен гониометр 5, посредством которого производится поворот исследуемого образца по трем осям с шагом $0,02^{\circ}$ и его поступательные перемещения в двух перпендикулярных направлениях. Диаметр анализирующего пучка ионов на образце варьируется от 0,5 до 1 мм. Рассеянные образцом ионы регистрируются кремниевым поверхностно-барьерным детектором [22].

Импульс рубинового лазера 1 (ОГМ-20, $\lambda=694$ нм) длительностью 20 нс попадает на образец через оптическую систему. Стеклянная пластинка 2 отражает часть падающего на неё излучения. Отраженный свет детектируется измерителем 6 энергии/мощности излучения ИМО-2Н,

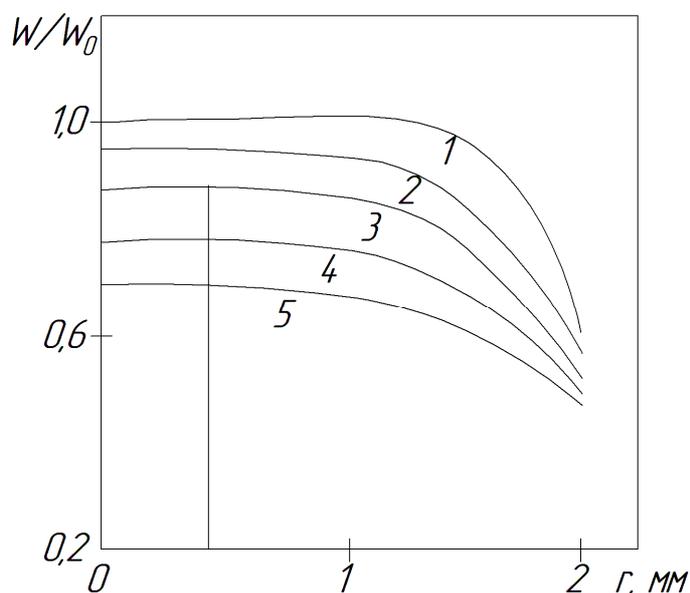


Рис. 1.4.2. Плотность энергии излучения падающего на образец, как функция расстояния от центра луча. Расстояние от гомогенизатора до образца: 1 – 0,2 мм; 2 - 0,5 мм; 3 – 0,75 мм; 4 – 1 мм; 5 – 1,25 мм. Пунктирной линией отмечена граница пуска анализирующей ионов

который служит для регистрации энергии в импульсе. Линза 3 фокусирует излучение на гомогенизаторе 4, который предназначен для перемешивания лазерных мод и позволяет сделать импульсное лазерное воздействие однородным по поперечному сечению. Гомогенизатор представляет собой кварцевый цилиндр (диаметр 4 мм, длина 5 см) с матовыми торцами и крепится на подвижном держателе в вакуумной камере. Во время облучения гомогенизатор подводится к облучаемому образцу, закрепленному на гониометре, так что расстояние между поверхностью образца и торцом гомогенизатора составляет ~0,5 мм (см. рис. 1.4.1). Перед началом экспе-

римента проводится калибровка системы регистрации, для чего на место образца помещается другой прибор ИМО-2Н, идентичный первому. После завершения облучения гомогенизатор отводится от мишени для обеспечения свободного поворота гониометра при исследовании ядерными методами. Рабочий диапазон изменения плотности энергии импульсного лазерного воздействия в данной установке составляет 0,05–1,5 Дж/см². Давление в камере, в процессе лазерного воздействия, может быть изменено в пределах 10⁻⁴ Па – 10 атм.

Лазерный луч после прохождения через гомогенизатор имеет значительную расходимость, поэтому представляется важным оценить неоднородность распределения плотности энергии импульсного лазерного воздействия на образце. Плотность энергии, излучаемой с поверхности торца:

$$W_0 = \frac{Q}{\pi r_h^2},$$

где Q – полное количество энергии излучения, прошедшего через гомогенизатор; r_h – радиус гомогенизатора. Полагая, что свет, выходящий из гомогенизатора, является полностью рассеянным, и используя приближение геометрической оптики [7], можно рассчитать приведённую плотность энергии, падающей на поверхность мишени, W/W_0 , как функцию расстояния от центра гомогенизатора. Результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 1.4.2. Принимая во внимание поперечные размеры пучка анализирующих ионов (пунктирная линия на рис. 1.4.2), можно оценить разброс плотности энергии импульсного лазерного воздействия в этих пределах. При расстоянии между поверхностью мишени и гомогенизатором 0,5 мм разброс составляет <1% [22].

Описываемая установка использовалась для изучения влияния импульсного лазерного воздействия на структуру эпитаксиальных плёнок

высокотемпературного сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_x$. Облучение плёнок проводилось как на воздухе, так и в вакууме, что позволило судить о роли окружающей атмосферы в процессах, протекающих при импульсном лазерном воздействии. На рис. 1.4.3,а, в качестве иллюстрации приведены спектры Резерфордского обратного рассеяния и каналирования ионов при случайном и ориентированном направлении падения ионного пучка, измеренные для образцов после импульсного лазерного воздействия с различными плотностями энергий W [8, 9]. Полученные после обработки спектров данные о глубине разупорядоченного слоя сравнивались с результатами расчёта глубины проплава материала в рамках тепловой модели (рис. 1.4.3,б).

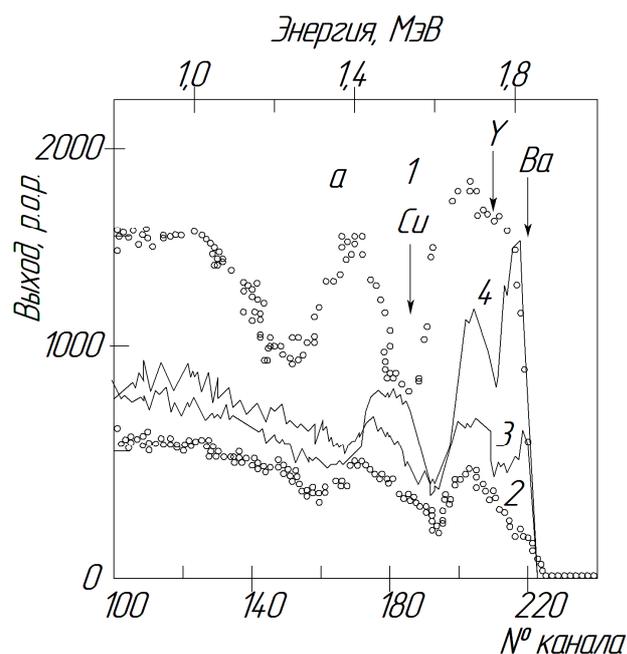


Рис. 1.4.3,а. Спектры Резерфордского обратного рассеяния для плёнки $YBa_2Cu_3O_x$ до облучения (2) и после облучения в вакууме с плотностью энергии $W=0,1$ Дж/см² (3) и $W=0,2$ Дж/см² (4)

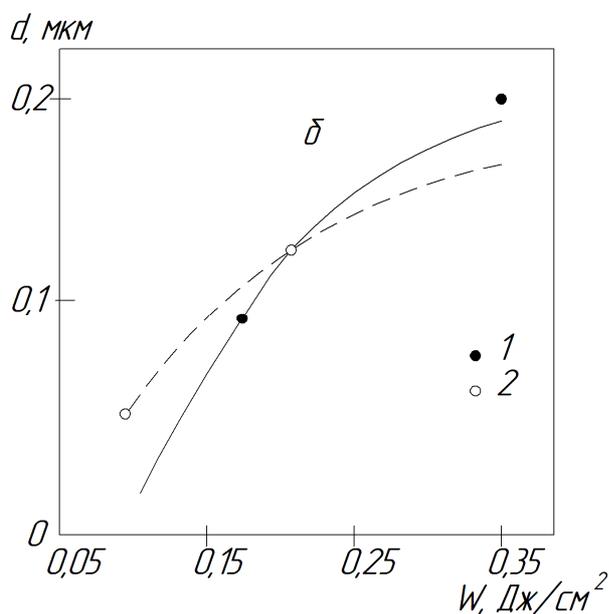


Рис. 1.4.3.6. Глубина проплава пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ толщиной 0,2 мкм как функция плотности энергии импульсного лазерного воздействия для $x=6,5$ (пунктирная линия) и $x=7$ (сплошная линия): 1 – экспериментальные данные о толщине разупорядоченного слоя при облучении на воздухе; 2 – при облучении в вакууме

1.5. Аналитическая процедура Саати в автоматизированном проектировании

В начале 1970 года американский математик Томас Саати разработал процедуру поддержки принятия решений, которую назвал “Analytic hierarchy process” (АНР). Этот метод относится к классу критериальных и занимает особое место, благодаря тому, что он получил исключительно широкое распространение и активно применяется по сей день. На основе этого метода разработаны достаточно серьезные системы поддержки

принятия решений, например “Expert Choice” [29].

В системе приняты следующие обозначения.

K_i^R – значение критерия K^R по i -ому столбцу (i -ой альтернативе);

K_j^R – значение критерия K^R по j -ой строке (j -ой альтернативе);

$\frac{K_i^R}{K_j^R}$ – парное соотношение критериев K^R , расположенных в i -ом столбце и j -ой строке;

$\sum_{j=1}^G \frac{K_i^R}{K_j^R}$ – суммарное построчное значение парных соотношений альтернатив;

$\sum_{i=1}^J \left(\sum_{j=1}^G \frac{K_i^R}{K_j^R} \right)$ – общая столбцовая сумма значений парных соотношений альтернатив. $J=G$;

$a_i^R = \frac{\sum_{j=1}^G \frac{K_i^R}{K_j^R}}{\sum_{i=1}^J \left(\sum_{j=1}^G \frac{K_i^R}{K_j^R} \right)}$ – нормированное значение альтернатив по критерию R

или оценка альтернатив. Причем $\sum_{i=1}^J a_i^R = 1$, для критерия R ,

$$\sum_{R=1}^N a_i, i=1 \dots J \Rightarrow \max .$$

Описание метода выполним на примере выбора альтернатив.

Альтернативы:

- A1
- A2
- A3
- A4.

Критерии:

- К1
- К2
- К3
- К4.

На основе АНР все так же линейная свертка, но оценки альтернатив и веса критериев получаются особым способом. В модели АНР вместо критериальной таблицы принята иерархия [29].

Представим ее следующим образом:

Уровень 0: Цель – выбрать одну из альтернатив. Уровень 1:

Критерии –

К1

К2

К3

К4.

Уровней может быть сколько угодно. Например, критерий 1-го уровня К1 можно раскрыть уровнем 2 и т.д. Ограничимся уровнем 1.

Теперь нужно получить оценки каждой альтернативы по каждому критерию. Если существуют объективные оценки, то они просто выписываются и нормируются таким образом, чтобы их сумма была равно единице. Например, если бы нас интересовал критерий «процентный выход объекта лазерной технологии» и имелись бы соответствующие данные по каждому методу, то нужно было бы составить следующую таблицу:

Альтернативы	Максимальный выход	Нормированные значения
A1	94	0,277
A2	95	0,280
A3	60	0,177
A4	90	0,265
Сумма		1,000

Иногда процедура Саати рекомендует использовать парные сравнения. Для фиксации результата сравнения пары альтернатив может использоваться, например, шкала следующего типа:

- 1 – равноценность;
- 2 – умеренное превосходство;
- 4 – сильное превосходство;
- 6 – очень сильное превосходство;
- 9 – высшее (крайнее) превосходство.

Лицо, принимающее решение, просят попарно сравнить альтернативы.

Результат парных сравнений альтернатив для критерия записывается в виде таблицы:

	A1	A2	A3	A4
A1	1/1	1/2	1/4	1/6
A2	2/1	1/1	1/2	1/5
A3	4/1	2/1	1/1	1/2
A4	6/1	5/1	2/1	1/1

Простые дроби в клетках трактуются следующим образом. Например, на пересечении строки A2 и столбца A1 записана дробь 2/1. Это выражает мнение ЛПР о том, что критерий A2 в 2 раза выше, чем критерий A1. Далее простые дроби переводятся в десятичные.

Получается следующая таблица:

	A1	A2	A3	A4
A1	1.000	0,5	0,25	0,17
A2	2	1.000	0,5	0,2
A3	4	2	1.000	0,5
A4	6	5	2	1.000

Эта таблица есть не что иное, как таблица результатов парных сравнений.

Теперь посчитаем строчные суммы:

	A1	A2	A3	A4	Сумма по строке
A1	1.000	0,5	0,25	0,17	1,92
A2	2	1.000	0,5	0,2	3,7
A3	4	2	1.000	0,5	7,5
A4	6	5	2	1.000	14
				Сумма	27,12

Теперь нормируем суммы таким образом, чтобы их общая сумма в свою очередь была равна 1. Для этого просто разделим сумму каждой строки на 27,12 (сумма последнего столбца, т.е. сумма самих строчных сумм).

Получим:

	A1	A2	A3	A4	Сумма по строке
A1	1.000	0,5	0,25	0,17	0,07
A2	2	1.000	0,5	0,2	0,14
A3	4	2	1.000	0,5	0,28
A4	6	5	2	1.000	0,52
				Сумма	1,00

В методе Саати полученные, таким образом, нормированные суммы принимаются в качестве оценок альтернатив по критерию «наиболее эффективный метод получения объектов лазерной технологии».

Аналогичным образом получают веса критериев. Предположим, что конкретное ЛПР сравнило попарно критерии с точки зрения их сравнительной важности [29].

Запишем результаты сравнений в виде таблиц:

	К	К	К3
	1	2	
К1	1/ 1	К 12	К13
К2	К 21	1/ 1	К23
К3	К 31	К 32	1/1

	K1	K2	K3	Сумма
K1	1/1	K12	K13	K11+ K12+ K13
K2	K21	1/1	K23	K21+ K22+ K23
K3	K31	K32	1/1	K31+ K32+ K33
			Сумма	$\sum_{i,j=1} K_{ij}$

	K1	K2	K3	Сумма
K1	1/1	K12	K13	$(K11+ K12+ K13) / \sum_{i,j=1} K_{ij}$
K2	K21	1/1	K23	$(K21+ K22+ K23) / \sum_{i,j=1} K_{ij}$
K3	K31	K32	1/1	$(K31+ K32+ K33) / \sum_{i,j=1} K_{ij}$
		Сумма		1

Применяя к этой таблице описанную выше процедуру, получим веса критериев:

$$W_i = \frac{\sum_{i,j=1}^n K_{ij}}{n \sum_{i,j=1} K_{ij}} .$$

Таким образом, мы можем получить как веса критериев, так и оценки альтернатив по критериям.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

2.1. Структура проектирования процессов лазерной обработки

Первой задачей, составляющей предмет исследования, является задача разработки структуры информационной системы поддержки принятия решений при проектировании процесса формирования объектов в лазерной технологии на начальных этапах проектирования[30]. В её основу положены методы проектирования и программно-технические средства, объединённые в технологическую цепочку, обеспечивающую сбор, обработку, хранение, распространение и отображение информации.

Программным средством, позволяющим решать указанные выше задачи, является проблемно-ориентированная автоматизированная система комплексного анализа структуры информационной системы поддержки принятия решений при проектировании процесса формирования объектов в лазерной технологии (рис. 2.1.1), которая является инструментарием проектировщика в рамках предлагаемой информационной технологии.

На рис. 2.1.2 представлена структура информационной технологии начальных этапов проектирования объектов в современной лазерной технологии.

В первую очередь осуществляется сбор необходимой для расчётов информации по справочникам. Затем следует обработка входной информации, включающая комплексный расчёт на ЭВМ статических и



Рис. 2.1.1. Структура принятия решения в лазерной технологии



Рис. 2.1.2. Структура информационной технологии ранних этапов проектирования

динамических характеристик лазерного оборудования, а так же систематизацию характеристик материалов. Как исходные данные, так и результаты расчётов должны быть сохранены в базе данных (БД). БД должна быть построена по иерархическому признаку. Между параметрами

ввода и вывода необходимо обеспечить связь посредством взаимодействия БД. Кроме того, следует так же обеспечить обмен информации через интерфейсы с другими системами. Для осуществления ввода в ЭВМ конструкций и воздействующих на них внешних и внутренних факторов, а так же принятия решения по результатам расчётов, необходимо отобразить в графическом виде всю входную и выходную информацию на экране монитора.

Прогресс производства в современных условиях связывают с достижениями в области автоматизации производства. Поскольку проектирование и разработка технологии являются ступенью производства (логическим уровнем), то прогресс на этой ступени также должен определяться автоматизацией.

При неавтоматизированном проектировании результаты во многом определяются инженерной подготовкой конструкторов, производственным опытом, профессиональной интуицией и другими факторами [31–33].

В настоящее время проектирование конструкций лазерных технологических установок (ЛТУ) ведётся на основе неавтоматизированного подхода. Данный подход к проектированию включает в себя два уровня. На первом уровне проектирование ЛТУ ведётся на основе новой разработки, а на втором – выполняется согласно прототипу. В основном наибольшее применение получил второй уровень, который и будет рассмотрен ниже.

Второй уровень задается ГОСТом или ОСТом данной отрасли промышленности, уточняется на конкретном предприятии и представляет собой довольно трудоемкий процесс, традиционно состоящий из следующих этапов: согласование ТЗ, техническое предложение, эскизный проект, рабочее проектирование, изготовление опытных образцов, испытания (рис. 2.1.3) [31, 34].

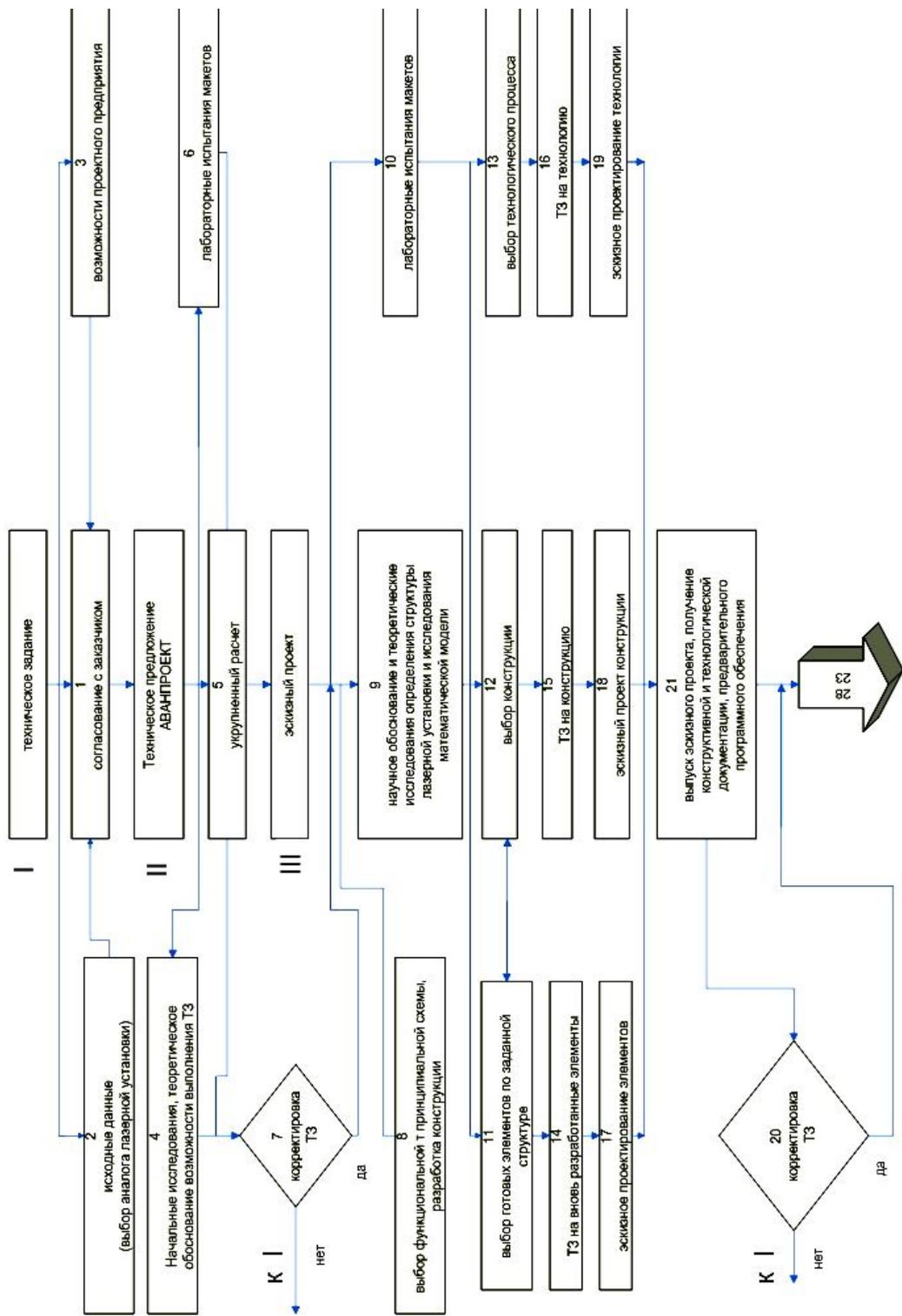
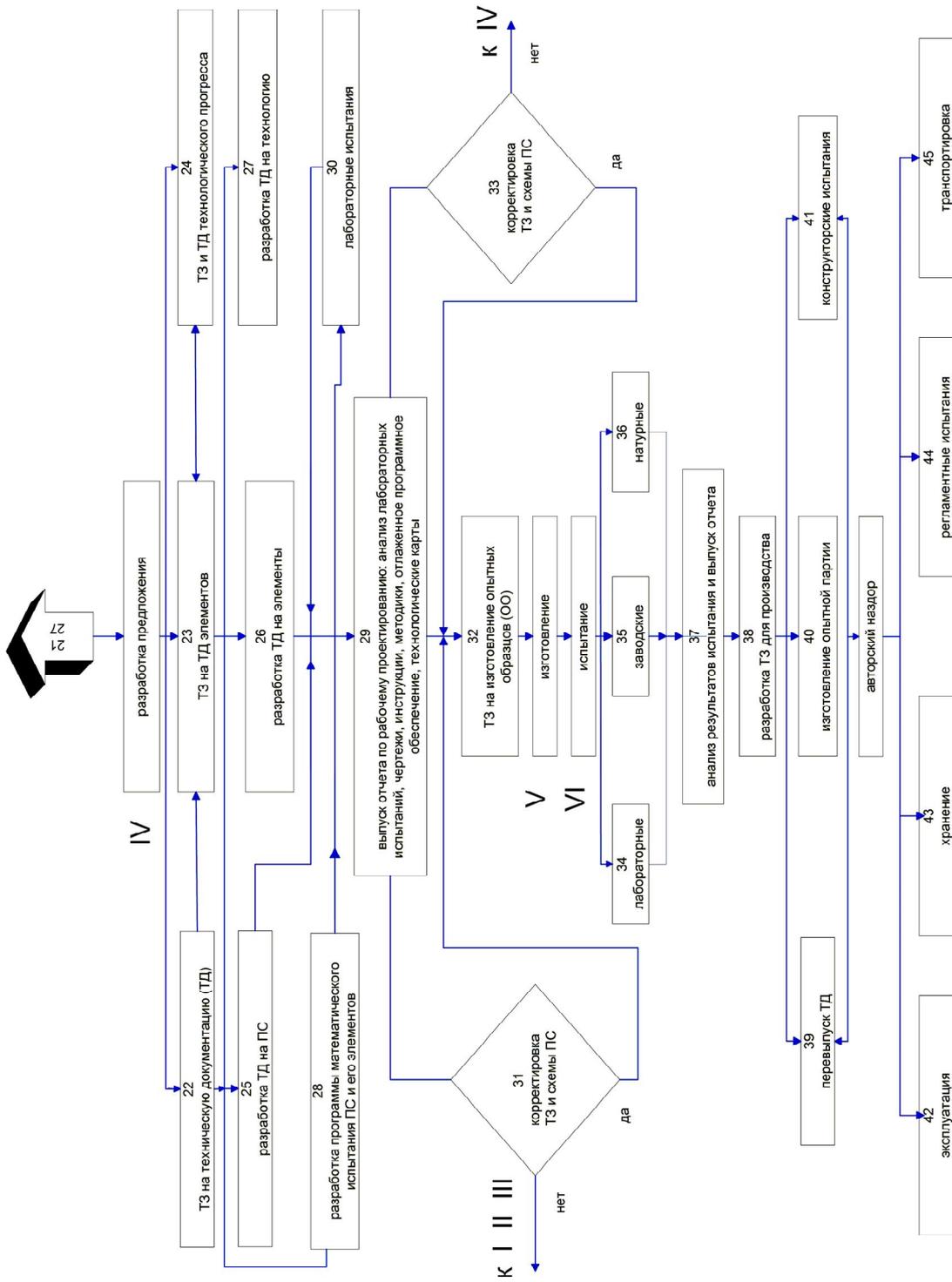


Рис. 2.1.3. Структура этапов проектирования лазерного оборудования



Разберём последовательно содержание начальных стадий процесса проектирования, к которым традиционно относятся согласование ТЗ, техническое предложение и эскизный проект.

Этап согласования технического задания обычно реализуется во взаимодействии предприятия-«заказчика» (заказчик) и предприятия-«проектировщика» (конструктор). Заказчик, естественно, стремится получить от конструктора всё, что он хотел бы воплотить в проекте. Конструктор исходит из конкретных возможностей проектного предприятия и тех, необходимых в проектном деле и сохраняемых на непредвиденные случаи запасов ресурсов, а также предварительных заделов по аналогичным разработкам, которыми он располагает (блок 1). Конструктор должен вначале определиться с аналогом (блок 2), выбрав схемное решение и найти ЛТУ близкое по характеристикам к разрабатываемой конструкции. Это достаточно трудоёмкий процесс работы с документацией. Данный этап реализован в виде блоков 1, 2, 3. Автоматизацию для приведённых блоков можно применить для блока 1.

Этап технического предложения предназначен для исследования разработки принципов построения ЛТУ, определения возможности выбора готовых или разработки новых её устройств, определения путей и способов проектирования (блок 4). На этом этапе формируются чертежи общих видов («деталировочные» чертежи), осуществляются предварительные расчёты и оценки динамических, точностных и других характеристик ЛТУ. Конструктор решает вопросы изготовления деталей и сборки всего изделия. Затем производятся расчёты новых размеров на основе технического задания и расчёты на прочность узлов ЛТУ (блок 5). Расчёты проводятся на основе эмпирических формул, что ведет к многообразию возможных решений, в зависимости от констант. Выбор необходимого решения зачастую происходит достаточно субъективно. Далее разработчик либо

проводит исследования математической модели движения, либо пропускает этот этап. Реализация данного этапа выполнена в виде блоков 4, 5, 6. С точки зрения автоматизации данный этап является одним из наиважнейших, так как именно на этом этапе определяется целесообразность принятия решения по проектированию (процессов в лазерной технологии) конструкции ЛТУ. Кроме того, практически все блоки этапа, кроме блока 6, могут быть автоматизированы.

Этап эскизного проектирования (ЭП) начинается с результатов предыдущего этапа и заканчивается конструктивной схемой лазерной установки и её узлов (блок 21). Именно конструктивная схема, выбранная и детально обоснованная на этом этапе расчётами, моделированием и испытаниями на макетах, служит основой для разработки конструкторской и технологической документации по изготовлению лазерных установок и её деталей и узлов. Конструктивные схемы являются неотъемлемой частью проекта, что качественно отличает этот этап от предыдущих. На этапе ЭП осуществляется декомпозиция (разбиение) лазерной установки на устройства, а устройств – на элементы (блок 8). Ведётся сложная, кропотливая разработка и взаимная увязка этих устройств и элементов. Здесь критерии, условия и ограничения носят более детальный и конкретный характер. Сроки их проектирования и стоимости меньше. Документация, выпускаемая на этом этапе, носит временный характер и служит для изготовления отдельных экспериментальных макетов и образцов устройств лазерной установки. Такая документация содержит эскизы конструкций, технологических карт, монтажных схем, условия технической эксплуатации, предварительное программное обеспечение. По этой эскизной документации на опытном производстве изготавливаются макеты изделий и узлов лазерной установки. Макеты объединяются в комплексные стенды, на которых начинается реализация наиболее трудоёмких и сложных проектных процедур лазерных установок – анализ отдельных её устройств и

элементов методами стендовых испытаний и физического моделирования. Кроме того на этапе эскизного проектирования составляются математические модели, алгоритмы и решаются задачи анализа и синтеза лазерных установок, оптимизации её параметров, вырабатываются вычислительные алгоритмы (блоки 9, 11, 12). В дальнейшем проводятся конструкторские расчёты устройств лазерной установки на прочность, жесткость, определяются моменты инерции и центры тяжести, предварительные согласования габаритных, установочных и присоединительных размеров изделия; предварительно проводится оценка показателей качества изделия, рассчитывается надёжность, проводится детальное технико-экономическое обоснование проекта. Последний из прилагаемых этапов наиболее длинный и содержит 14 различных блоков. Если обратить внимание на структуру схемы, то можно заметить, что с левой стороны расположены блоки, которые отвечают за документооборот, в середине находятся блоки, выполняющие основную задачу процесса моделирования, а именно выбор, расчёт и анализ, а с правой стороны расположены блоки, отвечающие за испытание и технологию. Для автоматизации процесса эскизного проектирования целесообразно автоматизировать блоки 8, 9, 11, 12, 14, 15, 17, 18 и 21.

Проведённый анализ процесса проектирования лазерных установок позволяет перейти к решению одной из важнейших задач при создании ИТ – выбору проектных процедур, подлежащих автоматизации. Для решения этой задачи необходимо формализовать процесс проектирования, составить его математические модели с тем, чтобы обоснованно проводить математизацию проектных процедур.

Следует особо подчеркнуть проблемы, которые появляются при проектировании лазерных установок, а именно [31, 35]:

1. Сложность и уникальность деталей лазерных установок, конструирование которых осуществляется в трёхмерном пространстве.
2. Обеспечение прочности при разработке лазерных установок.

3. Необходимость учёта технологических проблем в лазерной установке.
4. Сравнительно низкий уровень межотраслевой и внутриотраслевой унификации и стандартизации деталей, узлов, проектных и конструкторских решений, что требует создания на каждом предприятии своей базы данных, содержащей индивидуальные математические, графические и информационные модели элементов.

Разработка любого лазерного технологического процесса обычно включает в себя (рис. 2.1.4) создание модуля (установки), получение или выбор материалов для лазерного процесса и обработку самого процесса.

Оптимизация технологических лазерных процессов проводится по параметрам формируемых структур, технологическому согласованию лазерных процессов и производительности [30, 33].

2.2. Схема процесса автоматизированного проектирования оборудования для производства объектов лазерной обработки

При проектировании оборудования для производства объектов лазерной технологии решаются следующие проектные задачи (рис. 2.2.1):

- задачи синтеза;
- задачи анализа и оптимизации;
- исследование разбросов;
- обеспечение надежности.

Задача синтеза технических объектов направлена на создание новых вариантов проектных решений. Создаваемые в процессе синтеза проектные решения должны быть оформлены на языке оформления проектной задачи, например в виде чертежей, схем и пояснительного текста. В этом языке действуют правила, установленные единой системой конструкторской документации (ЕСКД) [36].



Рис. 2.1.4. Структура лазерного процесса



Рис. 2.2.1. Классификация проектных задач

В случае структурного синтеза синтезируется структура проектируемого объекта, в случае проектируемого – синтезируются параметры проектируемого объекта. Задача анализа технических объектов направлена на изучение их свойств. В процессе анализа исследуются заданные объекты.

Выходные характеристики оборудования, режим работы его элементов, тепловые и механические режимы установки и т.д. можно получить путём решения задачи анализа.

Довольно часто задачи синтеза решаются путём многократного решения задач анализа [36].

Поиск наилучшего проектного решения осуществляет решение задачи оптимизации. Если в процессе оптимизации ищется наилучшая структура, то такая задача является структурной оптимизацией, а если при заданной структуре отыскиваются параметры объекта, удовлетворяющие заданному критерию, то это параметрическая оптимизация.

Эффективность оптимизации в значительной мере определяется правильным выбором критериев и целевых функций. Основной целью в данном случае является разработка технологического процесса,

позволяющего с наименьшими затратами выполнить требуемую операцию и обеспечить заданное качество. Основную группу критериев составляют стоимостные:

$$C = \sum_{i=1}^p c_i,$$

где p – число переходов (операций); c_i – затраты на выполнение i -го перехода [37].

Параметры элементов любого технического объекта не могут иметь точно заданные значения. Это является следствием неизбежных погрешностей технологического оборудования, влияния внешних факторов, разбросов параметров материалов и т.д. Поэтому параметры элементов являются случайными величинами. Выходные характеристики партии объектов будут лежать в некотором диапазоне. Хорошо если этот диапазон не выходит за рамки регламентируемого в техническом задании. Учесть влияние разбросов параметров элементов на выходные характеристики и уменьшить это влияние позволяет решение задачи исследования разбросов.

Задача обеспечения надёжности направлена на достижение, заданных в техническом задании, показателей надёжности. Первая особенность этой задачи заключается в том, что её решение осуществляется на всех этапах проектирования и при выполнении большинства проектных операций. Вторая особенность заключается в том, что решение этой задачи интегрирует в себе результаты решения практически всех задач анализа характеристик объекта и исследования их разбросов [36].

Исходным документом является *техническое задание (ТЗ)*. В нём перечислены все технические требования, предъявляемые к создаваемой установке.

В состав основных требований входят:

- значение выходных характеристик и их допустимые разбросы (шероховатость поверхности, геометрическая дефектность, примесная дефектность, адгезионные свойства и т.п.);
- показатели надёжности (время эксплуатации, срок службы и др.);
- условия эксплуатации (давление и рабочая температура);
- специальные воздействия – электромагнитная и магнитная поляризация (использование воздействия перпендикулярного магнитного поля, использование электромагнита);
- условия хранения и транспортировки.

На основе технического задания создается проект (рис. 2.2.2, стрелка 1). Это эвристический набросок оборудования. На этом этапе разрабатываются эскизы структурной и функциональной схем устройства, производится предварительная компоновка и размещение.

На основе эскизов схем и конструкций производится формализация проекта (стрелка 2), результатом которой являются физические модели, схемы конструкции, составленные в терминах соответствующего научного направления. Формализация проекта производится с позиции системного подхода и заключается в учёте тех или иных факторов, влияющих на функционирование аппаратуры при построении физических моделей.

На основе физических моделей получают математические модели (стрелка 3), полученные с использованием математических методов и законов соответствующих наук. Они являются основой для расчёта выходных характеристик, проектируемой аппаратуры, а также параметров и факторов по которым оценивается фактическое состояние схемы или конструкции [36].

Решение этих задач основано на применении теории графов – разделе математики, оперирующем формальным представлением связей между объектами. Исходным для решения топологических задач является принципиальная схема разрабатываемого устройства, которая по определённым

правилам представляется в виде графа. Далее, в зависимости от задачи, над графом проводятся соответствующие преобразования для получения решения, которое удовлетворяет принятому критерию.



Рис. 2.2.2. Схема процесса автоматизированного проектирования для производства объектов в лазерной технологии

Граф есть некоторое абстрактное представление схемы, не учитывающей её электрические параметры.

В результате расчёта с использованием математических моделей (стрелка 4) получается информационная модель устройства, которая включает в себя расчётные значения выходных характеристик, требования технического задания, информацию из технических условий на элементы оборудования, расчётные значения электрических, тепловых и механических режимов работы элементов, показатели, определяющие надёжность и качество изделия, а также множество внутренних параметров схемы и конструкции, которые могут быть управляемыми. Под множеством управляемых параметров понимается перечень внутренних параметров аппаратуры, которые можно изменять в процессе проектирования, для улучшения выходных характеристик оборудования и режимов работы её элементов.

Путём сопоставления требований ТЗ с расчётными характеристиками режимов работы элементов с допустимыми режимами, приведёнными в технических условиях (стрелка 5), выявляются те характеристики и режимы работы элементов, которые необходимо изменить. На этой основе строится модель чувствительности.

В результате расчёта модели чувствительности (стрелка 6) определяются функции чувствительности, показывающие степень влияния управляемых параметров на выходные характеристики и позволяющие окончательно сформулировать проектные задачи (стрелка 7), которые необходимо решить для доработки проекта [36].

Таким образом, можно выделить три группы проектных задач:

- задачи синтеза, расчёта и оптимизации структуры и параметров оборудования;
- задачи исследования разбросов параметров вокруг номинальных значений;

- задачи обеспечения показателей надёжности и качества.

Решение сформулированных проектных задач позволяет внести соответствующие изменения в схему и конструкцию проектируемого оборудования и уточнить проект.

Так как решения в процессе проектирования принимаются в условиях отсутствия полной информации, то возникают ситуации, когда были приняты не реализуемые, по тем или иным причинам, решения. Их исправление происходит путём повторного выполнения проектных процедур.

Процесс проектирования реализуется путём моделирования различных физических процессов, протекающих в оборудовании при его функционировании.

2.3. Математические модели объекта проектирования

Математическая модель включает в себя совокупность математических элементов (чисел, переменных векторов, множеств и т.п.) и отношений между ними, которые с требуемой для проектирования точностью описывают свойства проектируемого объекта. На каждом этапе проектирования используется свое математическое описание проектируемого объекта, сложность которого должна быть согласована с возможностями анализа на ЭВМ, что приводит к необходимости иметь для одного объекта несколько моделей различного уровня сложности [33].

Описание объекта проектирования в форме математической модели должно включать следующие компоненты и правила:

C – цель функционирования;

$N\{n_d\}$ – множество элементов, составляющих систему;

$T\{t_c\}$ – множество элементов времени;

$\Pi_m\{n_m^K\}$ – множество признаков, характеризующих систему в целом

на всех этапах жизненного цикла;

$\Pi_B \{ \Pi_B^C \}$ – множество признаков, характеризующих элементы на всех этапах жизненного цикла;

$D^e \{ d_B^K \}$ – множество состояний элементов в рассматриваемый промежуток времени;

$W = D^e \times T$ – правило упорядочения смены состояний;

$V \{ n_d, n_e \}$ – множество связей между всеми элементами системы;

$R : \{ n_B^K = p_u(n_d^K) \}$ – математические схемы, описывающие отношения между признаками элементов и признаками систем;

$\Pi_a \{ \Pi_a \}$ – множество признаков, определяющих взаимодействие системы со средой;

$\Pi_0 = OP_1 \rightarrow OP_2 \rightarrow \dots \rightarrow OP_l, l = \overline{1 \dots L}$ – процесс проектирования;

$OP_1, OP_2 \dots OP_l$ – описание объекта проектирования на разных этапах его разработки;

$OP_1 = C_0 = \{ c_1, c_2, \dots, c_u \}$ – целевое описание объекта проектирования;

$OP_2 = \{ C_0, \Pi_m \}$ – концептуальное описание объекта проектирования.

Функциональное описание объекта содержит множество признаков, определяющих взаимодействие системы со средой Π_a и правило упорядочения смены состояний $W : OP_3 = \{ \Pi_a, W \}$.

Структурное описание системы включает множества: элементов составляющих систему N ; признаков, характеризующих элементы на всех этапах жизненного цикла Π_B ; связей между всеми элементами системы V , т.е. $OP_4 = \{ N, \Pi_B, V \}$.

Динамическое описание включает математические модели, построенные на множестве признаков, определяющих взаимодействие системы со средой Π_a , множестве элементов времени T и математических схемах, описывающих отношения между признаками элементов и

признаками системы [38]:

$$ОП_s = \{П_a, T, R : (П_B^K = p_u(n_d^k))\}.$$

Важный аспект проектирования оборудования – разработка наиболее экономичного, для разных производственных условий, варианта перехода от описания конструкции в виде математической модели к готовому изделию [37].

Математическую модель любого объекта характеризуют внутренними, внешними, выходными параметрами и фазовыми переменными. Внутренние параметры модели определяются характеристиками компонентов, входящих в проектируемый объект. Каждый из параметров, в свою очередь, может быть функцией, вектором или ещё более сложным математическим функционалом в зависимости от объекта проектирования [33].

Выходные параметры модели – это показатели, характеризующие функциональные, эксплуатационные, конструкторско-технологические, экономические и другие характеристики проектируемого объекта. К таким показателям могут относиться коэффициенты передачи, масса, габариты проектируемого объекта, надёжность, стоимость и т.п. Понятия внутренних выходных параметров инвариантны. При моделировании на более сложном уровне выходные параметры могут стать внутренними и наоборот.

Внешние параметры модели – это характеристики внешней по отношению к проектируемому объекту среды, а также рабочие управляющие воздействия.

Уравнения математической модели могут связывать некоторые физические характеристики компонентов, которые полностью характеризуют состояние объекта, но не являются выходными или внутренними параметрами модели (фазовые переменные). Использование вектора

фазовых переменных позволяет упростить алгоритмическую реализацию программ, составляющих уравнения математической модели устройства.

Математические модели компонентов представляют собой системы уравнений, устанавливающих связь между фазовыми переменными, внутренними и внешними параметрами, относящимися к данному компоненту. Эти уравнения являются компонентными, а соответствующая модель компонентой [33].

Математическая модель объекта проектирования, представляющего объединение компонентов, получают на основе математических моделей компонентов, входящих в объект. Объединение компонентных уравнений в математическую модель объекта осуществляется на основе фундаментальных физических законов, выражающих условия непрерывности и равновесия фазовых переменных. Уравнения, описывающие эти законы, называют топологическими, они отражают связи между компонентами в устройстве. Совокупность компонентных и топологических уравнений для проектируемого объекта образует систему, являющуюся математической моделью объекта.

Математические модели деталей и процессов на микроуровне отражают непрерывные физические процессы, протекающие в сплошных средах. Независимыми переменными в этих моделях являются пространственные координаты и время. В качестве зависимых переменных выступают переменные, такие как потенциалы, напряженности полей, концентрации частиц, деформации и т.п. Взаимосвязи переменных выражаются с помощью уравнений математической физики – интегральных, интегродифференциальных или дифференциальных уравнений в частных производных. Эти уравнения составляют основу математических моделей на микроуровне [37].

Для получения законченной математической модели, используемой в задачах проектирования, необходимо дополнительно выполнить ряд

процедур:

- выбрать краевые условия. Краевые условия представляют собой сведения о значениях фазовых переменных и (или) их производных на границах рассматриваемых пространственных и временных областей;
- дискретизировать задачу. Дискретизация подразумевает разделение рассматриваемых пространственных и временных областей на конечное число элементарных участков с представлением фазовых переменных конечным числом значений в избранных узловых точках, принадлежащих элементарным участкам;
- алгебраизировать задачу – аппроксимировать дифференциальные и интегральные уравнения алгебраическими.

Используют два основных подхода к дискретизации и алгебраизации краевых задач, составляющих сущность методов конечных разностей (МКР) и конечных элементов (МКЭ). С помощью любого из этих методов формируется окончательная модель, исследуемая при выполнении различных процедур анализа проектируемого объекта.

Пользователь автоматизированного проектирования, средствами входного языка, задает исходную информацию о конфигурации проектируемого объекта, о способе дискретизации – разделении среды на элементы, о физических свойствах участков среды. Формирование модели объекта, т.е. разделение среды на элементы, выбор математических моделей элементов из заранее составленных библиотек, объединение моделей элементов в общую систему уравнений, так же как и решений получающихся уравнений, осуществляется автоматически на ЭВМ.

Основу большинства моделей объектов на микроуровне составляют дифференциальные уравнения.

Примерами уравнения теплопроводности, диффузии, упругости, электродинамики, газовой динамики, в которых независимыми параметрами являются время t и пространственные координаты x_i , а зависимыми

могут быть температура, концентрация частиц, напряженность поля, деформация, электрические разряды, плотность и т.п. Общий вид дифференциального уравнения в частных производных (ДУЧП) [37]:

$$L_{\varphi}(Z) = f(Z), \quad (2.3.1)$$

где $Z = (t, x_1, x_2, x_3)$ – вектор независимых переменных; $f(Z)$ – функция, выражающая заданные внешние воздействия на исследуемую среду; L – дифференциальный оператор; $\varphi(Z)$ – функция, определяемая природой описываемого объекта.

В частных случаях в вектор Z может входить менее четырех переменных. Если в Z отсутствует t , то уравнение является стационарным, в противном случае – нестационарным. Уравнение может быть одно-, двух- и трёхмерным в зависимости от числа переменных x_i в векторе Z .

В качестве L могут фигурировать также интегральные или интегро-дифференциальные операторы[37].

Переход на макроуровень осуществляется путем выделения в моделируемом объекте конечного числа частей (элементов). Такое выделение можно представить как дискретизацию пространства, при которой из независимых переменных исключаются пространственные координаты. Вместо полей фазовых переменных $\varphi(Z)$ появляется конечное число фазовых переменных $\varphi(t)$, каждая из которых относится к определенному элементу дискретизированного пространства.

При переходе к представлениям макроуровня уравнение (2.3.1) превращается в систему обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ):

$$\Psi(V, V', t) = 0, \quad (2.3.2)$$

где V – вектор фазовых переменных, $V' = \frac{dV}{dt}$.

Состояние объекта выражается значениями фазовых переменных. Типичные математические модели на макроуровне, представленные уравнениями (2.3.2) с заданными начальными условиями V_0 , описывают непрерывные процессы смены состояний в исследуемом объекте. В частных случаях могут исследоваться только установившиеся состояния, тогда $V=0$, и (2.3.2) вырождается в систему алгебраических уравнений:

$$F(V) = 0. \quad (2.3.3)$$

Переход к представлениям верхних иерархических уровней для аналоговых и дискретных объектов осуществляется по-разному.

Исходя из задач конкретного этапа проектирования математическая модель проектируемого объекта должна отвечать самым различным требованиям: отражать с требуемой точностью зависимость выходных параметров объекта от его внутренних и внешних параметров в широком диапазоне их изменения; иметь однозначное соответствие физическим процессам в объекте; включать необходимые аппроксимации и упрощения, которые позволяют реализовать её программно на ЭВМ с различными возможностями; иметь большую универсальность, т.е. быть применимой к моделированию многочисленной группы однотипных устройств; быть экономичной с точки зрения затрат машинных ресурсов и т.п. Эти требования, в своем большинстве, являются противоречивыми, и удачное компромиссное удовлетворение этих требований в одних задачах может оказаться далёким от оптимальности в других. По этой причине для одного и того же компонента или устройства часто приходится иметь не одну, а несколько моделей. В связи с этим классификация моделей должна выполняться по множеству признаков, чтобы описать все возможные случаи [37].

Математические модели должны удовлетворять таким требованиям, как:

- адекватность;
- универсальность;
- экономичность.

2.3.1. Адекватность математических моделей

Примечание [БЛ7]:
Диплом;
ГПНТБ

Модель считается адекватной, если она отражает заданные свойства объекта с приемлемой точностью. Точность определяется как степень совпадения значений выходных параметров модели и объекта. Пусть ε_j – относительная погрешность модели по j -му выходному параметру:

$$\varepsilon_j = (\tilde{y}_j - y_j) / y_j, \quad (2.3.4)$$

где \tilde{y}_j – j -ый и выходной параметр, рассчитанный с помощью модели; y_j – тот же выходной параметр, имеющий место в моделируемом объекте [39].

Погрешность модели ε_M , по совокупности учитываемых выходных параметров, оценивается одной из норм вектора $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m)$, например,

$$\varepsilon_M = \max_{j=1,m} |e_j| \quad \text{или} \quad \varepsilon_M = \sqrt{\sum_{j=1}^m \varepsilon_j^2}. \quad (2.3.5)$$

Точность модели различна в разных условиях функционирования объекта. Эти условия характеризуются внешними параметрами. Если задаться предельной допустимой погрешностью $\varepsilon_{пред}$, то можно в пространстве внешних параметров выделить область, в которой выполняется условие $\varepsilon_M < \varepsilon_{пред}$.

Эту область называют областью адекватности (ОА) модели. Возможно введение индивидуальных предельных значений $\varepsilon_{пред j}$ для каждого выходного параметра и определение ОА как области, в которой одновременно выполняются все m условий вида $|e_j| \leq \varepsilon_{пред j}$.

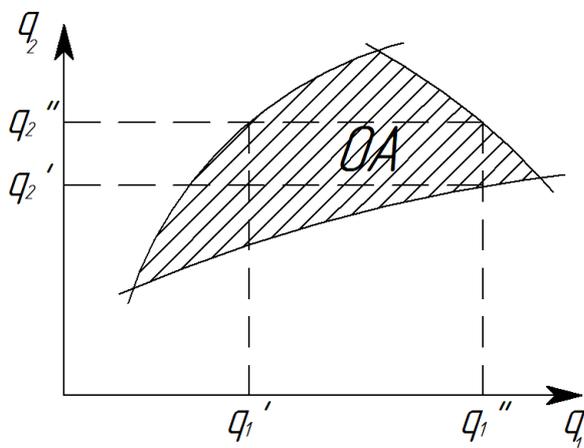


Рис. 2.3.1. Область адекватности

Пример области адекватности (заштрихована) в двумерном пространстве представлен на рис. 2.3.1. Здесь q_k – k -ый внешний параметр [39].

Определение областей адекватности для конкретных моделей – сложная процедура, требующая больших вычислительных затрат. Эти затраты и трудности представления ОА быстро растут с увеличением размерности пространства внешних параметров. Определение ОА – более трудная задача, чем, например, задача параметрической оптимизации, поэтому для моделей вновь проектируемых объектов ОА не рассчитывают.

Для моделей унифицированных элементов расчёт областей адекватности становится оправданным в связи с однократностью определения ОА и многократностью их использования при проектировании различных систем. Знание ОА позволяет правильно выбирать модели элементов из числа имеющихся и тем самым повышать достоверность результатов машинных расчётов [39].

В общем случае ОА может иметь произвольную форму, сведения о которой выражаются громоздко, и неудобна в использовании, поэтому на

практике вместо истинных ОА применяют те или иные их аппроксимации. Наиболее просто представляются и используются сведения об областях, имеющих форму гиперпараллелепипеда, который задается p двусторонними неравенствами:

$$q'_k \leq q_k \leq q''_k, k = \overline{1, p}.$$

Здесь p – размерность пространства внешних параметров.

В библиотеку моделей элементов наряду с алгоритмом, реализующим модель и номинальными значениями параметров, должны включаться граничные значения внешних параметров q'_k и q''_k , задающие область адекватности.

Графическое представление области адекватности и аппроксимирующего ее гиперпараллелепипеда удобно для двумерных случаев (см. рис. 2.3.1).

Возможно использование и других аппроксимаций ОА, например областей с линеаризованными границами в виде участков гиперплоскостей, областей в форме гиперсфер и т.п.

2.3.2. Универсальность

При определении ОА необходимо выбрать совокупность внешних параметров и совокупность выходных параметров, отражающих учитываемые в модели свойства. Типичными внешними параметрами при этом являются параметры нагрузки и внешних воздействий (электрических, механических, тепловых, радиационных и т.п.). Увеличение числа учитываемых внешних факторов расширяет применимость модели, но существенно удорожает работу по определению ОА. Выбор совокупности выходных параметров также неоднозначен, однако для большинства объектов число и перечень учитываемых свойств

Примечание [БЛ8]:
Диплом;
ГПНТБ

и соответствующих им выходных параметров сравнительно невелики, достаточно стабильны и составляют типовой набор выходных параметров [39]. Например, для макромоделей оборудования для производства объектов лазерной технологии, такими выходными параметрами являются: диаметр пучка, мощность лазерной установки, КПД и др.

Если адекватность характеризуется положением и размерами ОА, то универсальность модели определяется числом и составом учитываемых в модели внешних и выходных параметров.

2.3.3. Экономичность

Примечание [БЛ9]:

Диплом;
ГПНТБ

Экономичность модели характеризуется затратами вычислительных ресурсов для её реализации, а именно затратами машинного времени T_M и памяти P_M . Общие затраты T_M и P_M на выполнение в автоматизированном проектировании какой-либо проектной процедуры зависят как от особенностей выбранных моделей, так и от методов решения.

В большинстве случаев, при реализации численного метода, происходят многократные обращения к модели элемента, входящего в состав моделируемого объекта. Тогда удобно экономичность модели элемента характеризовать затратами машинного времени, получающимися при обращении к модели, а число обращений к модели должно увеличиваться при оценке экономичности метода решения.

Экономичность модели по затратам памяти оценивается объёмом оперативной памяти, необходимой для реализации модели.

Требования широких областей адекватности, высокой степени универсальности, с одной стороны, и высокой экономичности, с другой, являются противоречивыми. Наилучшее компромиссное удовлетворение

этих требований оказывается неодинаковым в различных применениях. Это обстоятельство обуславливает использование в автоматизированном проектировании многих моделей для объектов одного и того же типа – различного рода макромоделей, многоуровневых, смешанных моделей и т.п. [39].

Математическая модель элемента (ММЭ), наиболее точно отражающая свойства моделируемого объекта, называется полной моделью. ММЭ менее универсальные и точные, но более экономичные по сравнению с полной моделью называются макромоделями.

2.4. Уравнение состояния лазерной технологической системы

Лазерной системе свойственно определенная совокупность термодинамических форм движения материи. Важно отметить, что все эти формы движения, определяющие внутренние степени свободы системы, органически связаны между собой.

Число связанных степеней свободы l , как и общее число степеней свободы m , зависит от конкретных свойств системы. С изменением условий, в которых находится система, величины l и m могут изменяться.

Наличие связей между внутренними степенями свободы позволяет аналитически отобразить состояние системы, так как каждая функция состояния однозначно определяется факторами экстенсивности E . В соответствии с этим всегда можно составить такие уравнения, в которых аргументами будут служить факторы экстенсивности E , а функциями – функции состояния.

Лазерную систему можно рассматривать как совокупность двух потоков излучения: электромагнитного и электронно-ионного. При этом, уравнение состояния для двух связанных внутренних степеней свободы

($m=2$) имеет вид [40]:

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= f_1(s_1, s_2) \\ L_2 &= f_2(s_1, s_2) \end{aligned} \right\}, \quad (2.4.1)$$

или (в дифференциальной форме):

$$\left. \begin{aligned} dL_1 &= A_{11}ds_1 + A_{12}ds_2 \\ dL_2 &= A_{21}ds_1 + A_{22}ds_2 \end{aligned} \right\},$$

где коэффициенты

$$A_{11} = \left(\frac{\partial L_1}{\partial s_1} \right)_{s_2}; \quad A_{22} = \left(\frac{\partial L_2}{\partial s_2} \right)_{s_1};$$

$$A_{12} = \left(\frac{\partial L_1}{\partial s_2} \right)_{s_1}; \quad A_{21} = \left(\frac{\partial L_2}{\partial s_1} \right)_{s_1}.$$

Продифференцировав уравнение (2.4.1) по x , имеем:

$$\frac{dL_1}{dx} = \frac{dL_1}{ds_1} \cdot \frac{ds_1}{dx} + \frac{dL_1}{ds_2} \cdot \frac{ds_2}{dx},$$

$$\frac{dL_2}{dx} = \frac{dL_2}{ds_1} \cdot \frac{ds_1}{dx} + \frac{dL_2}{ds_2} \cdot \frac{ds_2}{dx}.$$

Умножим первое уравнение на коэффициент C_{11} , а второе на C_{22} :

$$\begin{aligned} C_{11} \frac{dL_1}{dx} &= C_{11} \frac{dL_1}{ds_1} \cdot \frac{ds_1}{dx} + C_{11} \frac{dL_1}{ds_2} \cdot \frac{ds_2}{dx}; \\ C_{22} \frac{dL_2}{dx} &= C_{22} \frac{dL_2}{ds_1} \cdot \frac{ds_1}{dx} + C_{22} \frac{dL_2}{ds_2} \cdot \frac{ds_2}{dx}. \end{aligned} \quad (2.4.2)$$

Левая часть первого уравнения определяет полный поток s_1 в системе, левая часть второго уравнения – поток s_2 , т.е.

$$j_1 = -C_{11} \frac{dL_1}{dx};$$

$$j_2 = -C_{22} \frac{dL_2}{dx}.$$

Если градиент второго потенциала равен нулю $\left(\frac{dL_2}{dx} = 0\right)$, то второго потока нет, а в первой формуле выражения (4.2.2) слагаемое $\left(\frac{dL_1}{ds_1} \frac{ds_1}{dx}\right)$ представляет собой силу X_1 , для первого потока:

$$X_1 = -\frac{\partial L_1}{\partial s_1} \cdot \frac{ds_1}{dx}.$$

Аналогичным образом при отсутствии первого потока из второй формулы выражения (2.4.2) получим

$$X_2 = -\frac{\partial L_2}{\partial s_2} \frac{ds_2}{dx}.$$

Из выражений для X_1 и X_2 находим производные:

$$\frac{ds_1}{dx} = -\frac{X_1}{\frac{\partial L_1}{\partial s_1}};$$

$$\frac{ds_2}{dx} = -\frac{X_2}{\frac{\partial L_2}{\partial s_2}}.$$

Подставляя найденные величины в формулу (2.4.2) имеем:

$$\left. \begin{aligned} j_1 &= C_{11}X_1 + C_{12}X_2 \\ j_2 &= C_{21}X_1 + C_{22}X_2 \end{aligned} \right\}, \quad (2.4.3)$$

где приняты следующие обозначения:

$$C_{12} = C_{11} \frac{\frac{\partial L_1}{\partial s_2}}{\frac{\partial L_2}{\partial s_2}};$$

$$C_{21} = C_{22} \frac{\frac{\partial L_2}{\partial s_1}}{\frac{\partial L_1}{\partial s_1}}.$$

Уравнения (2.4.3) определяют с количественной стороны процессы в лазерной системе с двумя потоками электромагнитного и электронно-ионного излучения[40, 41]. Они по существу являются кинетическими уравнениями состояния такой системы.

2.5. Методы оптимизации процесса формирования объектов лазерной обработки

Комплексные САПР охватывают все этапы разработки технических объектов, в том числе и этап технологической подготовки производства. Автоматизация проектирования технологических процессов включает в себя разработку принципиальных схем технологических процессов, маршрутной технологии, операционной технологии и получение управляющей информации на машинных носителях программно-управляемого технологического оборудования [42, 43].

Лазерный технологический процесс можно представить в виде некоторой системы, а следовательно, для его организации следует применять системный подход, сущность которого заключается в комплексном, едином рассмотрении всех частей систем технологического проектирования и в гармоническом их сочетании.

Постановку задачи оптимизации технологического процесса форми-

рования объектов в лазерной технологии можно представить следующим образом (рис. 2.5.1) [45]. Лазерный технологический процесс рассматривается как объект проектирования, на вход которого поступает вектор $\mathbf{X}(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))$ входных переменных, а скалярный выход F характеризует качество технологического процесса. Требуется сформировать такой вектор управляющих воздействий $\mathbf{R}^*(t) = (R_1^*(t), \dots, R_l^*(t))$, который минимизировал бы значение показателя F , т.е.

$$F(\mathbf{X}(t), \mathbf{R}^*(t)) = \min \{F_k(\mathbf{X}(t), \mathbf{R}(t))\}.$$

Выходы $h_1(t), \dots, h_m(t)$ характеризуют состояние процесса и индицируют нежелательные режимы работы оборудования или выход контролируемых параметров технологического процесса за установленные пределы:

$$h_j(t) \leq b_j, j = \overline{1, m},$$

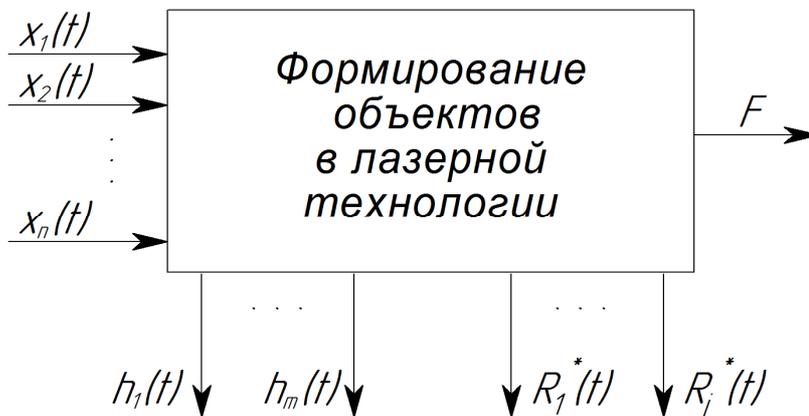


Рис. 2.5.1. Постановка задачи оптимизации технологического процесса

где b_i – требуемые или допустимые значения соответствующих параметров.

Таким образом, оптимизация процесса при проектировании процессов формирования объектов в лазерной технологии рассматривается как задача определения оптимального вектора управления $\mathbf{R}^*(t)$, минимизирующего целевую функцию $F(\mathbf{X}(t), \mathbf{R}(t))$ при условии выполнения заданных ограничений.

Подобные задачи оптимизации решают в два этапа. На первом этапе определяют идеальный вектор управления $\mathbf{R}_{ид}^*(t)$, обеспечивающий оптимизацию технологического процесса. Практически реализовать это не представляется возможным, и вектор $\mathbf{R}_{ид}^*(t)$ является эталоном, к которому надо стремиться [40]. Зная $\mathbf{R}_{ид}^*(t)$ на втором этапе, выбирают реализуемый квазиоптимальный вектор управления, с помощью которого стараются получить решение, наименее отличающееся от идеального и в тоже время, реализуемое наиболее просто.

Следует отметить, что в большинстве практических случаев оптимизированные технологические процессы дополнительно подвергаются наладке и корректировке, поскольку при построении математических моделей процессоров невозможно учесть все влияющие на процесс факторы.

На технологический процесс оказывает влияние множество случайных факторов (неточность оборудования, отклонения луча, неточности измеряемых приспособлений, внутренние напряжения обрабатываемой детали, разброс параметров обрабатываемого образца и т.д.). Поэтому параметры изготавливаемых изделий являются случайными величинами, причём влияние действующих случайных факторов на изменение параметров изделий можно, как правило, определить из статистического анализа. В подобных случаях очень важно учитывать характер взаимосвязи между случайными величинами. Для количественного выражения этой взаимосвязи служат регрессия и корреляция.

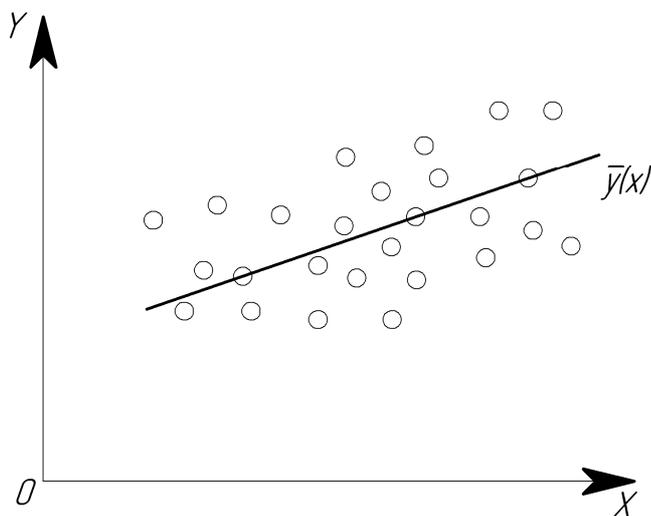


Рис. 2.5.2. Линия регрессии

Пусть x и y – случайные величины, характеризующие параметры некоторого из изделий, причём упорядоченная пара (x, y) характеризует параметры одного варианта изделия и может быть изображена точкой на плоскости. Полная совокупность вариантов изображается множеством точек, показанных на рис. 2.5.2. Математические ожидания случайных величин x и y равны соответственно $M_{(x)}$ и $M_{(y)}$, и среднеквадратичные отклонения σ_x и σ_y характеризуют рассеивание величин x и y относительно их математических ожиданий.

Рассмотрим зависимость $\bar{y}(x)$, являющуюся условным математическим ожиданием $M_{(y|x)}$. Используя выражения для условного математического ожидания и обозначая через $p(x, y)$ совместную вероятность данных значений x и y , находим:

$$\bar{y}(x) = M_{(y|x)} = \sum_y yp(x, y) / \sum_y p(x, y).$$

Определяя $\bar{y}(x)$ при различных x , можно построить линию, графически выражающую эту зависимость и называемую линией регрессии y по x (см. рис. 2.5.2). Аналогично может быть получена зависимость $\bar{x}(y)$, называемая регрессией x по y .

На практике наиболее часто встречается случай линейной регрессии, уравнение которой записывается в виде

$$\bar{y}(x) = a + b(x - M_{(x)}).$$

Коэффициенты a и b выбирают такими, чтобы получить наибольшую концентрацию точек (x, y) вблизи прямой $\bar{y}(x)$, что выражается условием

$$\phi(a, b) = M \left\{ [y - \bar{y}(x)]^2 \right\} = \min .$$

Это выражение, с учётом предыдущего, даёт следующую систему уравнений для определения коэффициентов a и b :

$$M_{(y)} - a = 0; \quad M[y(x - M_{(x)})] - b\sigma_x^2 = 0. \quad (2.5.1)$$

Величину $\mu_{xy} = M[y(x - M_{(x)})]$ называют ковариацией между x и y . Она служит мерой взаимной связи между случайными величинами a и b .

Из (2.5.1) находят значения $a = M_{(y)}$ и $b = \mu_{xy} / \sigma_x^2$, определяющие линию регрессии.

Ковариация μ_{xy} зависит от дисперсий самих случайных величин, поэтому для оценки взаимосвязи между случайными величинами более удобен коэффициент корреляции $r_{xy} = \mu_{xy} / (\sigma_x \sigma_y)$, который может меняться от нуля для независимых случайных величин до единицы, если случайные величины связаны линейной функциональной зависимостью [45].

При технологическом проектировании процессов в лазерной

технологии в качестве критериев оптимальности могут рассматриваться такие показатели эффективности, как себестоимость производства изделий, производительность технологического процесса, основное технологическое время и т.д.

2.5.1. Основные методы выбора наилучших лазерных установок по параметрам

Примечание [БЛ10]:
Диплом;
ГПНТБ

Как известно, наиболее простым типом оптимизационных задач является безусловная оптимизация функции одной переменной. Она занимает центральное место в теории оптимизации как с теоретической, так и практической точек зрения. Задачи однопараметрической оптимизации достаточно часто встречаются в инженерной практике и, кроме того, находят своё применение при реализации более сложных интерактивных процедур многопараметрической оптимизации.

Индикатором важности методов оптимизации функции одной переменной является огромное множество реализованных алгоритмов, которые условно можно сгруппировать следующим образом.

- Методы исключения интервалов:
 - метод половинного деления,
 - метод «золотого» сечения,
 - метод Фибоначчи;
- Методы полиномиальной аппроксимации;
- Методы с использованием производных.

Методы безусловной оптимизации делятся на методы одномерной и многомерной оптимизации.

К методам *многомерной оптимизации* относятся.

1. Методы нулевого порядка:

- покоординатного спуска,
 - Хука-Дживса,
 - симплексный метод Нелдера-Мида;
2. Методы первого порядка:
- градиентный,
 - наискорейшего спуска,
 - сопряженных градиентов:
 - метод Дэвидона-Флетчера-Пауэла,
 - метод Флетчера-Ривса.

2.5.2. Необходимые и достаточные условия оптимизации

Примечание [БЛ11]:
Диплом;
ГПНТБ

Рассмотрим функцию n действительных переменных

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(x).$$

Точка в n -мерном евклидовом пространстве с координатами $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ обозначается вектором-столбцом x . Градиент функции, т.е. вектор с компонентами $\partial f / \partial x_1, \partial f / \partial x_2, \dots, \partial f / \partial x_n$, обозначается $\nabla f(x)$ или, иногда, $g(x)$. Матрица Гессе (гессиан) функции $f(x)$ обозначается как $G(x)$ и является симметричной матрицей $n \times n$ элементов вида

$$G_{ij} = \partial^2 f / \partial x_i \partial x_j.$$

Функция $f(x)$ имеет локальный минимум в точке x_0 , если существует окрестность точки x_0 , такая, что $f(x) > f(x_0)$ во всех точках этой окрестности, т.е. существует положительная величина δ , такая, что для $|x - x_0| < \delta$ справедливо неравенство $f(x) \geq f(x_0)$.

В случае глобального минимума в точке x^* для всех x справедливо

неравенство $f(x) \geq f(x^*)$. Необходимым условием минимума в точке x_0 является уравнение $\nabla f(x_0) = 0$.

Т.е.

$$\partial f(x_0) / \partial x_i = 0, (i = 1, \dots, n).$$

Тогда знак разности $f(x_0 + h) - f(x_0)$ определяется членом

$$1/2 h^T G(x_0) h.$$

Если матрица $G(x_0)$ положительно определена, то этот член положителен для всех h . Следовательно, необходимым и достаточным условием минимума являются:

$$\nabla f(x_0) = 0; \quad G(x_0) \text{ – положительно определена.}$$

Необходимым и достаточным условием максимума являются:

$$\nabla f(x_m) = 0; \quad G(x_m) \text{ – отрицательно определена.}$$

2.5.3. Метод координированного спуска

Примечание [БЛ12]:
Диплом;
ГПНТБ

Одним из методов нахождения минимума функции n -переменных являются методы прямого поиска. Методы прямого поиска являются методами, в которых используются только значения функции.

Рассмотрим функцию двух переменных. Её линии уровня представлены на рис 2.5.3, а минимум лежит в точке (x_1^*, x_2^*) . Простейшим методом поиска является метод покоординатного спуска. Из точки А произведём поиск минимума вдоль направления оси x_1 и, таким образом, находим точку В, в которой касательная к линии постоянного уровня параллельна оси x_1 . Затем, производя поиск параллельно оси x_2 , получаем точку D, и т.д. Таким образом, мы приходим к оптимальной точке. Очевидным образом эту идею можно применить для функции n переменных.

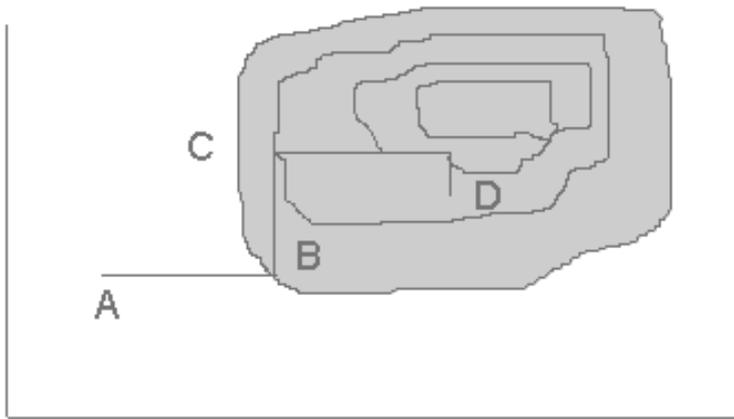


Рис. 2.5.3. Метод прямого поиска

Теоретически данный метод эффективен в случае единственного минимума функции. Но на практике он оказывается слишком медленным. Поэтому были разработаны более сложные методы, использующие больше информации на основании уже полученных значений функции [47, 48].

2.5.4. Метода наискорейшего спуска

Примечание [БЛ13]:
Диплом;
ГПНТБ

В методе наискорейшего спуска (рис 2.5.4) желательно использовать рассмотренное свойство направления градиента. Поэтому, если мы находимся в точке x_i на некотором шаге от процесса оптимизации, то поиск минимума функции осуществляется вдоль направления $\nabla f(x_i)$. Данный метод является итерационным. На шаге i точка минимума аппроксимируется точкой x_i . Следующей аппроксимацией является точка

$$x_{i+1} = x_i - \lambda_i \nabla f(x_i),$$

где λ_i - значение λ , минимизирующее функцию

$$\varphi(\lambda_i) = f[x_i - \lambda \nabla f(x_i)].$$

Значение λ_i может быть найдено с помощью одного из методов одномерного поиска (например, методом квадратичной интерполяции).

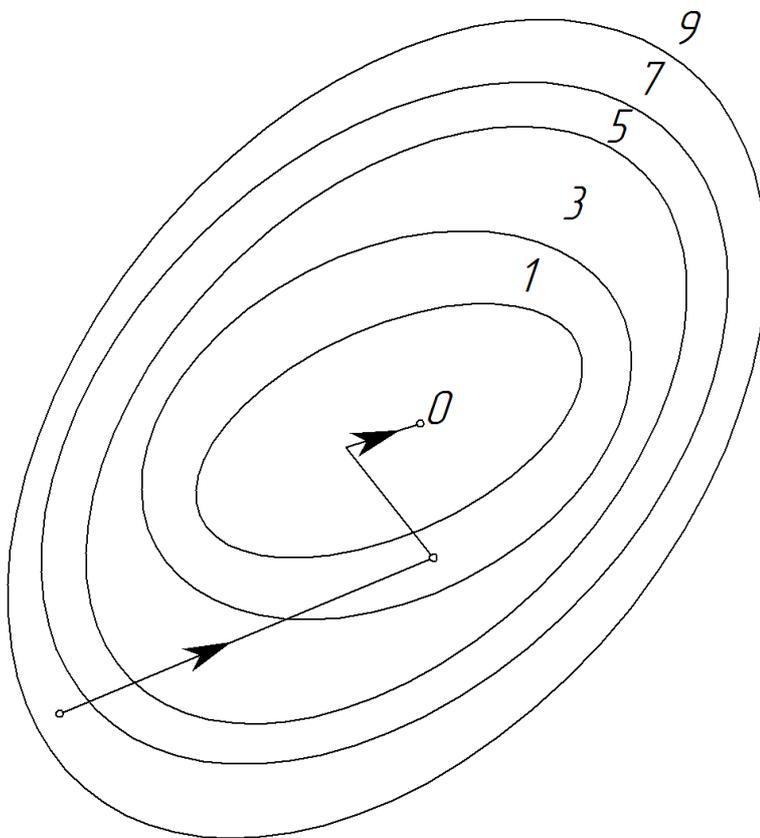


Рис. 2.5.4. Метод наискорейшего спуска

2.6. Базовые модели оптимизации для различных структур лазерного оборудования

2.6.1. Модель L-1. Формирование оптимального состава модулей лазерного оборудования (без избыточности)

Примечание [БЛ14]:
Диплом;
ГПНТБ

Лазерное оборудование составлено из набора модулей последовательного исполнения. Доступно более чем одно техническое решение (ТР) каждого модуля, но, из-за жестких ограничений по стоимости (а такой случай не должен исключаться из рассмотрения), и/или не критического характера части или всего оборудования, сохранение многократных ТР модулей нежелательно. Модель, разработанная для этой ситуации, позволяет сформировать оптимальный состав набора модулей для однотипного оборудования, оптимизируя надёжность, при существующих стоимостных ограничениях, благодаря которым полная стоимость разработки остаётся приемлемой, а проект осуществим [49]:

$$\max R = \prod_{i=1}^n R_i . \quad (2.6.1)$$

В соответствии с ограничениями

$$\sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} = 1; \quad i = 1, \dots, n ; \quad (2.6.2)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} C_{ij} \leq B ; \quad (2.6.3)$$

$$X_{ij} = 0,1; \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, m_i, (ii) ,$$

причём

$$R_i = \sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} R_{ij} . \quad (2.6.4)$$

Целевая функция модели *L-1* отражает последовательное выполнение модулей. Совокупность ограничений (2.6.2) гарантирует, что одно ТР обязательно выбрано для каждого модуля. Ограничения (2.6.3) гарантируют, что общие затраты не превысят B .

2.6.2. Модель L-2. Формирование оптимального состава модулей лазерного оборудования (с избыточностью)

Примечание [БЛ15]:
Диплом;
ГПНТБ

Вторая, рассматриваемая ситуация соответствует случаю, когда лазерное оборудование выполняет одну, но наиболее важную функцию, отказ которой может привести к очень серьезным негативным последствиям. Надёжность однотипного оборудования достигается путём введения в систему избыточных ТР каждого модуля. Соответственно, ограничения на стоимость системы, выполняющей такие функции, должны быть достаточными, чтобы допустить избыточность модулей.

Цель модели *L-1* – определить оптимальный состав модулей с учётом избыточности ТР, максимизируя надёжность оборудования, не нарушая рамки стоимостных ограничений.

Итак, сформулируем задачу, аналогичную описанной выше, но разрешив избыточность ТР модулей оборудования [49]:

$$\max R = \prod_{i=1}^n R_i . \quad (2.6.5)$$

В соответствии с ограничениями

$$X_{ij} = 0, 1; \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, m(ij) ,$$

где

$$\sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} \geq 1; \quad i = \overline{1, n};$$
$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} C_{ij} \leq B; \quad (2.6.6)$$

$$R_i = 1 - \prod_{j=1}^{m_i} (1 - R_{ij})^{X_{ij}}.$$

Надёжность i -го модуля определяется как вероятность того, что по крайней мере одно из m_i ТР выполняется правильно, а совокупность ограничений гарантирует, что для каждого i -го модуля выбрано по крайней мере одно ТР. Один из вариантов решения данной задачи – использование алгоритма динамического программирования.

2.6.3. Модель LZ-1. Формирование оптимального многофункционального [(К)-функций] лазерного оборудования (без избыточности)

Примечание [БЛ16]:
Диплом;
ГПНТБ

Итак, имеем дело с лазерным оборудованием, состоящим из нескольких функциональных блоков, каждый из которых выполняет свою функцию. Каждый блок содержит ряд модулей. Функциональные блоки могут вызываться соответствующими функциями оборудования, а модули – любым блоком. Цель этой модели состоит в определении оптимального набора модулей для функциональных блоков без использования избыточности таким образом, чтобы надёжность оборудования была максимальна при заданных ограничениях по стоимости.

Через S_k обозначим набор модулей, соответствующих функциональному блоку k . Для каждого модуля $i \in S_k$ имеются m_i доступных ТР.

Обратим внимание на то, что один и тот же модуль может вызываться различными функциональными блоками. Пронумеруем все вызываемые модули числами от 1 до n . Задача может быть сформулирована следующим образом [49]:

$$\max R = \sum_{k=1}^K F_k \prod_{i \in S_k} R_i ,$$

при ограничениях

$$\sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} = 1; \quad i = 1, \dots, n;$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} C_{ij} \leq B; \quad (2.6.7)$$

$$X_{ij} = 0, 1; \quad j = 1, \dots, m_i; \quad i = 1, \dots, n .$$

Здесь R_i задаётся выражением

$$R_i = \sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} R_{ij} .$$

Полученная постановка задачи может быть решена методом, подобным тому, который использовался для задачи (см. пункт 2.6.1) с незначительной коррекцией.

2.6.4. Модель LZ-2. Формирование оптимального многофункционального [(K)-функций] лазерного оборудования (с избыточностью)

Отличие рассматриваемой задачи заключается в том, что избыточность теперь разрешена, и возможен выбор более чем одной версии для

Примечание [БЛ17]:
Диплом;
ГПНТБ

каждого модуля лазерного оборудования.

Сформулируем задачу:

$$\max R = \sum_{k=1}^K F_k \prod_{i \in S_k} R_i ,$$

при ограничениях

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} &\geq 1; \quad i = 1, \dots, n; \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} C_{ij} &\leq B; \\ X_{ij} &= 0, 1; \quad j = 1, \dots, m_i; \quad i = 1, \dots, n . \end{aligned} \quad (2.6.8)$$

Здесь R_i задаётся выражением

$$R_i = 1 - \prod_{j=1}^{m_i} (1 - R_{ij})^{X_{ij}} .$$

Из-за наличия ограничений, так как мы имеем дело с $K > 1$ функциями лазерного оборудования, ни один из методов, предложенных ранее, не может быть «напрямую» использован для решения этой задачи. Кроме того, целевая функция – нелинейная, и решать эту задачу непосредственно, например, как задачу целочисленного программирования, невозможно [50].

Перепишем целевую функцию в линейном виде. Обратим внимание на то, что выражение $(1 - R_{ij})^{X_{ij}}$ в (2.6.6) может быть записано как [49]:

$$1 - X_{ij} R_{ij}; \quad X_{ij} = [0, 1],$$

так как, если $X_{ij} = 0$, то $(1 - R_{ij})^{X_{ij}} = 1$. Если $X_{ij} = 1$, то $(1 - R_{ij})^{X_{ij}} = 1 - R_{ij}$.

Следовательно, (2.6.6) можно переписать в виде:

$$R_i = 1 - \prod_{j=1}^{m_i} (1 - R_{ij} X_{ij}) ,$$

и целевую функцию можно представить как

$$R_i = \max_{k=1}^K F_k \prod_{i \in S} [1 - \prod_{j=1}^{m_i} (1 - R_{ij} X_{ij})] .$$

Полученная целевая функция все ещё не линейна, т.к. включает произведение бинарных переменных. Однако, выразив произведение n бинарных переменных Z_i как

$$\prod_{i=1}^n Z_i ; \quad Z_i = 0,1 ,$$

определяем

$$y = \prod_{i=1}^n Z_i ; \quad y = 0,1 ,$$

двумя линейными функциями:

$$Z_1 + Z_1 + \dots + Z_n - y \leq n - 1 ;$$

$$1/nZ_1 + 1/nZ_2 + \dots + 1/nZ_n - y \geq 0 .$$

Разделение на надёжностные оптимизационные модели для оборудования лазерной технологии позволяет более адекватно выбирать соответствующую модель для реальной ситуации при проектировании.

ГЛАВА 3. ПОСТРОЕНИЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

3.1. Модель физических процессов, протекающих при моделировании объектов лазерной обработки

3.1.1. Модель переноса тепла

Примечание [БЛ18]:
Диплом;
ГПНТБ

Теплопередача при воздействии лазерного излучения может происходить за счет процессов конвекции, теплопроводности и излучения.

Конвективный теплообмен может быть либо естественным, из-за силового воздействия гравитационного поля на газ, имеющий различную плотность вследствие температурных градиентов, либо вынужденным, при наличии газовых потоков во время откачки вакуумных камер.

В области среднего и высокого вакуума роль конвективного теплообмена в общем балансе передачи тепла мала, и в расчётах им обычно пренебрегают. При низком вакууме конвективный теплообмен является основным способом теплопередачи. Перенос тепла конвекцией в низком вакууме от поверхности нити, нагретой до температуры T_H , к стенкам вакуумной камеры, имеющим температуру T , описывается уравнением Ньютона-Рихмана:

$$E_k = \alpha(T_H - T)A, \quad (3.1.1)$$

где α – коэффициент теплообмена; A – площадь поверхности нити.

При свободной конвекции коэффициент теплообмена

$$\alpha_c = ap^{2/3}(T_H - T),$$

где α – коэффициент, зависящий от материала и формы поверхности (определяется экспериментально).

Коэффициент теплообмена в условиях вынужденной конвекции при поперечном обтекании нити для воздуха:

$$\alpha_e = Nu\lambda / d,$$

где λ – коэффициент теплопроводности газа; d – характерный размер (диаметр нити); $Nu = k_1 R^{k_2}$ – критерий Нуссельта; $Re = v_r d \rho / \eta$ – критерий Рейнольдса; v_r – скорость газового потока; k_1 и k_2 – константы, зависящие от значения Re [55]:

$$\text{при } Re < 10^3 \quad k_1 = 0,45; \quad k_2 = 0,5;$$

$$\text{при } Re > 10^3 \quad k_1 = 0,245; \quad k_2 = 0,6.$$

Теплопередача за счёт теплопроводности может рассматриваться как явление переноса, аналогичное вязкости. Этот процесс характеризуется количеством тепла, отнесённым к одной молекуле газа: $c_V m T$, где удельная теплоёмкость газа при постоянном объеме:

$$c_V = \frac{k}{(\gamma - 1)m}, \quad (3.1.2)$$

где $\gamma = c_p / c_V$ – отношение теплоёмкости газа при постоянном давлении к теплоёмкости при постоянном объёме (для воздуха и двухатомных газов $\gamma = 1,4$; для одноатомных $\gamma = 1,66$; для трёхатомных $\gamma = 1,3$).

Если концентрация газа n постоянна, то выражение для теплового потока выглядит следующим образом:

$$E_T = -\frac{1}{2} nm L c_V v_{ap} \frac{dT}{dx} A. \quad (3.1.3)$$

Преобразуем эту формулу к виду, известному под названием уравнения Фурье [55]:

$$E_T = -\lambda \frac{dT}{dx} A; \quad (3.1.4)$$

$$\lambda = \frac{nmv_{ap}Lc_V}{2} = \eta c_V. \quad (3.1.5)$$

В молекулярно-кинетической теории, используя функцию распределения молекул по скоростям, получают для коэффициента теплопроводности λ более точное выражение:

$$\lambda = \frac{(9\gamma - 5)\eta c_V}{4}. \quad (3.1.6)$$

Значения λ , рассчитанные по этой формуле для воздуха, отличаются на 20%. Градиент температуры dT/dx в уравнении (3.1.7), как и градиент скорости при расчёте вязкости газа, зависит от средней длины свободного пути молекул газа и определяются по формуле

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_1 - T_2}{d + g_1 + g_2}, \quad (3.1.7)$$

где

$$g_1 = \frac{(2 - a_1)(9\gamma - 5)}{2a_1(\gamma + 1)} L;$$

$$g_2 = \frac{(2 - a_2)(9\gamma - 5)}{2a_2(\gamma + 1)} L,$$

где a_1 и a_2 – коэффициенты аккомодации поверхностей переноса; L – длина свободного пути при средней температуре.

Для приближённых расчётов можно принять $g_1 \approx g_2 \approx L$. Значения a , для материалов подложки Pt и W, приведены в таблице 3.1.1.

Теплопроводность газа, так же как и вязкость, не зависит от давления

в области низкого вакуума и пропорциональна давлению при высоком вакууме. Для высокого вакуума ($d \ll 2g$) уравнение теплопроводности (3.1.8) и при $a_1 = a_2 = a$ примет вид [55]:

$$E_T = \frac{a}{(2-a)} k_T p (T_2 - T_1) A; \quad (3.1.8)$$

$$k_T = \frac{(\gamma + 1) v_{ap}}{8T(\gamma - 1)}.$$

Теплопередачу излучением E_{II} в вакууме можно определить по закону Стефана – Больцмана:

$$E_u = 5,7E_e \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] E_\Gamma, \quad (3.1.9)$$

Таблица 3.1.1. Коэффициенты теплопроводности

Газ	$c_p,$ кДж/кг·К	$c_v,$ кДж/кг·°С	$T = \frac{c_p}{c_v}$	a		$k_{\tau},$ $\frac{Вт}{м^2 \cdot К \cdot Па}$	$q_\Gamma = \frac{k_{\tau B}}{k_{\tau \Gamma}}$
				Pt	W		
N ₂	1,03	0,73	1,40	0,90	–	1,12	1,06
O ₂	0,92	0,66	1,40	0,84	–	1,12	1,06
CO ₂	0,85	0,66	1,30	0,87	–	1,27	0,98
Ar	0,52	0,31	1,67	0,89	0,85	0,70	1,80
H ₂ O	1,95	1,47	1,33	–	–	1,99	0,63
He	5,36	3,13	1,67	–	0,057	2,20	0,57
Ne	1,05	0,63	1,67	–	0,070	0,98	1,27
H ₂	13,8	10,2	1,41	0,36	0,950	4,56	0,274
Воздух	1,01	0,72	1,40	0,90	–	1,25	1,00

где

T_1 и T_2 – температуры на внешней и внутренней поверхностях переноса;

E_G – геометрический фактор (для параллельных плоскостей и концентрических цилиндрических оболочек $E_G = 1$);

$E_e = \frac{1}{(1/e_2) + (A_2/A_1)[(1/e_1) - 1]}$ – приведённая степень черноты;

A_1 и A_2 – площади внешней и внутренней поверхностей переноса;

e_1 и e_2 – коэффициенты излучения внешней и внутренней поверхностей (для гладкой поверхности нержавеющей стали $e = 0,1$ при 300 К и 0,06 при 77 К, а для меди соответственно 0,03 и 0,019) [55].

При установке экранов приведённая степень черноты уменьшается пропорционально количеству установленных экранов N . Если $A_1 = A_2$, а $e_1 = e_2 = e$, то приведённая степень черноты

$$E_{Ne} = \frac{E_e}{N+1} = \frac{e}{(2-e)(N+1)}.$$

В высоком вакууме излучение является практически единственным способом передачи тепла и не зависит от давления газа.

Приведённые закономерности теплопередачи, в газах при низких давлениях, широко используются в вакуумной технике для расчёта нагревательных и охлаждающих устройств, а также для косвенных измерений давления в области среднего и низкого вакуума.

3.1.2. Модель неупругих столкновений частиц

Примечание [БЛ19]:
Диплом;
ГПНТБ

Как известно, неупругими называют столкновения, сопровождающиеся изменением внутреннего состояния сталкивающихся частиц. Эти изменения понимаются здесь в самом широком смысле, в частности может

меняться и сам род частиц. Так, речь может идти о возбуждении или ионизации атомов, возбуждении или распаде ядер и т.п. В тех случаях, когда столкновение (например с квантом излучения) может сопровождаться различными физическими процессами, говорят о различных каналах реакции [57, 58].

Наличие неупругих каналов оказывает определенное влияние также и на свойства упругого рассеяния.

В общем случае, при наличии различных каналов реакции, асимптотическое выражение волновой функции системы сталкивающихся частиц, представляет собой сумму, в которой каждому возможному каналу соответствует по одному члену. Среди них имеется и член, описывающий частицы в начальном неизменном состоянии (во «входном канале»). Он представляет собой произведение волновых функций внутреннего состояния частиц и функций, описывающих их относительное движение (в системе координат, в которой покоится их центр инерции). Обозначим последнюю функцию, интересующую проектировщиков, посредством ψ и выясним её асимптотический вид [56].

Волновая функция ψ во входном канале складывается из падающей плоской волны и расходящейся сферической волны, отвечающей упругому рассеянию. Её можно представить также и в виде суммы сходящейся и расходящейся волн. Разница заключается в том, что асимптотическое выражение для радиальных функций $R_l(r)$ не может быть взято в виде стоячей волны. Стоячая волна есть сумма сходящейся и расходящейся волн с одинаковыми амплитудами. При чисто упругом рассеянии это соответствует физическому смыслу задачи, но при наличии неупругих каналов амплитуда расходящейся волны должна быть меньше амплитуды сходящейся волны. Поэтому асимптотическое выражение ψ будет задано формулой [56]:

$$\psi = \frac{i}{2kr} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) P_l(\cos \Theta) [(-1)^l e^{-ikr} - S_l e^{ikr}], \quad (3.1.10)$$

с той разницей, что S_l являются некоторыми (комплексными) величинами с модулями, меньшими единицы. Амплитуда упругого рассеяния выражается через эти величины формулой

$$f(\Theta) = \frac{1}{2ik} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1)(S_l - 1) P_l(\cos \Theta). \quad (3.1.11)$$

Для полного сечения σ_e упругого рассеяния получим:

$$\sigma_e = \frac{\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) |1 - S_l|^2. \quad (3.1.12)$$

Полное сечение неупругого рассеяния, или сечение реакций σ_r , по всем возможным каналам, также можно выразить через величины S_l . Для этого достаточно заметить, что для каждого значения l интенсивность расходящейся волны ослаблена по сравнению с интенсивностью сходящейся волны в отношении $|S_l|^2$. Это ослабление должно быть целиком отнесено за счёт неупругого рассеяния. Поэтому

$$\sigma_e = \frac{\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) (1 - |S_l|^2), \quad (3.1.13)$$

а полное сечение

$$\sigma_t = \sigma_e + \sigma_r = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) (1 - \operatorname{Re} S_l). \quad (3.1.14)$$

Парциальная амплитуда упругого рассеяния с моментом l :

$$f_l = \frac{S_l - 1}{2ik}, \quad (3.1.15)$$

а каждый из членов суммы (3.1.12) и (3.1.13) есть парциальное сечение упругого и неупругого рассеяния частиц с моментом l :

$$\left. \begin{aligned} \sigma_e^{(l)} &= \frac{\pi}{k^2} \sum_{t=0}^{\infty} (2l+1) |1 - S_l|^2 \\ \sigma_r^{(l)} &= \frac{\pi}{k^2} \sum_{t=0}^{\infty} (2l+1) (1 - |S_l|^2) \\ \sigma_t^{(l)} &= \frac{\pi}{k^2} \sum_{t=0}^{\infty} (2l+1) (1 - \operatorname{Re} S_l) \end{aligned} \right\} . \quad (3.1.16)$$

Значение $S_l = 1$ соответствует полному отсутствию рассеяния (с данным l). Случай же $S_l = 0$ соответствует полному «поглощению» частиц с данным l , при этом

$$\sigma_e^{(l)} = \sigma_r^{(l)} = \frac{\pi}{k^2} (2l+1) , \quad (3.1.17)$$

т.е. сечения упругого и неупругого рассеяния одинаковы.

При заданном значении $\sigma_e^{(l)}$ парциальное сечение упругого рассеяния может иметь значения в интервале

$$\sqrt{\sigma_0} - \sqrt{\sigma_0 - \sigma_r^{(l)}} \leq \sqrt{\sigma_r^{(l)}} \leq \sqrt{\sigma_e^{(l)}} \leq \sqrt{\sigma_0} + \sqrt{\sigma_0 - \sigma_r^{(l)}} , \quad (3.1.18)$$

где $\sigma_0 = (2l+1)\pi / k^2$.

При отличном от нуля $\sigma_r^{(l)}$, должно быть отличным от нуля также и $\sigma_e^{(l)}$, т.е. наличие неупругих каналов реакции непременно приводит к одновременному наличию упругого рассеяния.

Взяв значение $f(\theta)$ из (3.1.12), при $\theta = 0$ и сравнив с выражением (3.1.15), получим соотношение

$$\operatorname{Im} f(0) = \frac{k}{4\pi} \sigma_t , \quad (3.1.19)$$

обобщающее оптическую теорему для рассеяния:

$$\operatorname{Im} f(n, n) = \frac{k}{4\pi} \sigma .$$

Здесь $f(0)$ есть по-прежнему амплитуда упругого рассеяния на нулевой угол, но полное сечение σ_l включает в себя также и неупругую часть.

Мнимые же части парциальных амплитуд f_l связаны с парциальным сечением $\sigma_l^{(l)}$ соотношением

$$Imf_l = \frac{k}{4\pi} \frac{\sigma_l^{(l)}}{2l+1} . \quad (3.1.20)$$

Тот факт, что коэффициенты S_l в асимптотическом выражении волновой функции по модулю не равны единице, никак не отражается на сделанных заключениях об особых точках амплитуды упругого рассеяния как функции комплексного E . Эти выводы сохраняют свою силу и при наличии неупругих процессов. Аналитические свойства амплитуды меняются, однако, в том отношении, что она теперь не вещественна на левой вещественной полуоси ($E < 0$), а её значения на верхнем и нижнем краях разреза при $E > 0$ не являются комплексно-сопряженными величинами (соответственно, не являются комплексно-сопряженными и вообще все её значения в симметричных, относительно вещественной оси, точках верхней и нижней полуплоскостей).

При переходе с верхнего края разреза на нижний путём полного обхода вокруг точки $E=0$ корень \sqrt{E} меняет знак, т.е. в результате обхода меняет знак вещественная (при $E > 0$) величина k . При этом сходящаяся и расходящаяся волны в (3.1.13) меняются ролями. Соответственно этому роль нового коэффициента S_l будет играть величина $1/S_l$, обратная прежнему его значению (что не совпадает с S_l^*). Значения амплитуд f_l на верхнем и нижнем краях разреза естественно обозначить как $f_l(k)$ и $f_l(-k)$ (физической амплитудой является $f_l(k)$). Согласно (3.1.18) имеем:

$$f_l(k) = \frac{S_l - 1}{2ik} ;$$

$$f_l(-k) = -\frac{1/S_l - 1}{2ik}.$$

Исключая S_l из этих двух равенств, получим следующее соотношение:

$$f_l(k) - f_l(-k) = 2ikf_l(k)f_l(-k) \quad (3.1.21)$$

(в отсутствие неупругих процессов было бы $f(-k) = f^*(k)$).

Перепишем (3.1.24) в форме

$$\frac{1}{f_l(k)} - \frac{1}{f_l(-k)} = -2ik,$$

видно, что сумма $1/f_l(k) + ik$ должна быть чётной функцией k . Обозначив эту функцию через $g_l(k^2)$, имеем:

$$f_l(k) = \frac{1}{g_l(k^2) - ik}. \quad (3.1.22)$$

Чётная функция $g_l(k^2)$ теперь не является вещественной [56].

Когда пучок частиц проходит через рассеивающую среду, состоящую из большого числа рассеивающих центров, он постепенно ослабевает в связи с выбыванием из него частиц, испытывающих различные процессы упругих и неупругих столкновений. Это ослабление полностью определяется амплитудой упругого рассеяния на нулевой угол и, при соблюдении определенных условий, может быть описано следующим удобным формальным методом.

Пусть $f(0, E)$ есть амплитуда рассеяния на угол нуль на каждой отдельной частице среды. Будем предполагать, что f мало по сравнению со средним расстоянием $d \sim (V/N)^{1/3}$ между частицами. Тогда можно рассматривать рассеяние на каждой из них в отдельности. Введём в качестве вспомогательной величины некоторое «эффективное поле» U_{eff} неподвиж-

ного центра, определив его таким образом, чтобы вычисленная с его помощью борновская амплитуда рассеяния на угол нуль была бы как раз равна истинной амплитуде $f(0, E)$ (этим отнюдь не подразумевается, что борновское приближение применимо для вычисления $f(0, E)$ по истинному взаимодействию частиц). Таким образом, по определению, имеем [56]:

$$\int U_{eff} dV = -\frac{2\pi\hbar^2}{m} f(0, E), \quad (3.1.23)$$

где m – масса рассеиваемой частицы. Определенное вместе с амплитудой f поле – комплексно. Связь между его радиусом действия a и величиной U_{eff} получается из оценки обеих сторон равенства

$$a^3 U_{eff} \sim \frac{\hbar^2}{m} f. \quad (3.1.24)$$

Определение (3.1.23) не однозначно. Наложим на него ещё дополнительное условие, чтобы поле U_{eff} удовлетворяло условию применимости теории возмущений:

$$|U_{eff}| \ll \frac{\hbar^2}{ma^2} \quad (3.1.25)$$

(при этом $|f| \ll a$). Легко видеть, что в таком случае ослабление рассеиваемого пучка может быть описано как распространение плоской волны по однородной среде, в которой частица обладает постоянной потенциальной энергией, равной

$$\bar{U}_{eff} = \frac{N}{V} \int U_{eff} dV = -\frac{N}{V} \frac{2\pi\hbar^2}{m} f(0, E), \quad (3.1.26)$$

т.е. получающейся усреднением эффективных полей всех N частиц среды по её объёму V . Это становится очевидным, если рассмотреть сначала рассеяние на отдельном участке среды, в котором хотя и находится уже

много рассеивающих центров, но эффект рассеяния еще мал (возможность выделения таких участков обеспечивается условием (3.1.25)). Ослабление пучка при прохождении через такой участок определяется амплитудой рассеяния на нулевой угол, которая, в свою очередь, в борновском приближении определяется интегралом от рассеивающего поля по всему объему рассеивающего участка. Это значит, что интересующие рассеивающие свойства среды полностью определяются усредненным по её объёму полем (3.1.26).

Таким образом, проходящий через среду пучок частиц можно описать плоской волной $\sim e^{ikz}$ с волновым вектором:

$$k = \frac{1}{\hbar} \sqrt{2m(E - \overline{U}_{eff})}.$$

Введя волновой вектор $k_0 = \sqrt{2mE} / \hbar$ падающих частиц, запишем k в виде nk_0 .

Величина

$$n = \sqrt{1 - \frac{\overline{U}_{eff}}{E}} = \sqrt{1 + \frac{N}{V} \frac{2\pi\hbar^2}{mE} f(0, E)} \quad (3.1.27)$$

играет роль «коэффициента преломления» среды по отношению к проходящему через неё пучка частиц. Он является комплексной величиной (амплитуда f комплексна) и его мнимая часть определяет ослабление интенсивности пучка. Если $E \gg |\overline{U}_{eff}|$, то (3.1.27) дает, как и следовало:

$$\text{Im } n = \frac{N}{V} \frac{\pi\hbar^2}{mE} \text{Im } f(0, E) = \frac{N}{V} \frac{\sigma_t}{2k},$$

где σ_t – полное сечение рассеяния [56].

Наряду с поглощением, комплексный показатель преломления (3.1.27) определяет также (своей вещественной частью) закон преломления пучка при входе и выходе из рассеивающей среды.

3.2. Параметры пучка лазера и основные соотношения при его преобразовании оптической системой

Лазерный пучок, выходящий из резонатора произвольной конфигурации, имеет своеобразную структуру, не являясь пучком гомоцентрических лучей (рис. 3.2.1). Эти лучи совпадают с нормальными к волновому фронту, который вблизи оси можно считать сферическим. В некотором сечении волновой фронт является плоским. В этом месте лазерный пучок имеет минимальный поперечный размер $2y$ (перетяжку). Положение перетяжки относительно вершин зеркал резонатора определяют по формулам [59]:

$$s_1 = \frac{dg_2(1-g_1)}{g_1 + g_2 - 2g_1g_2}; \quad (3.2.1)$$

$$s_2 = \frac{dg_1(1-g_2)}{g_1 + g_2 - 2g_1g_2}, \quad (3.2.2)$$

где d – расстояние между зеркалами резонатора; g_1 и g_2 – обобщенные параметры, определяемые соответственно через радиус кривизны зеркал r_1 и r_2 ; $g_1 = 1 - (d/r_1)$; $g_2 = 1 - (d/r_2)$.

Пространственные параметры лазерного пучка рассчитываются, с использованием понятия эквивалентного конфокального резонатора, образованного двумя сферическими зеркалами с одинаковыми радиусами. Фокусы зеркал совпадают. Для такого резонатора половина расстояния между зеркалами, т.е. фокусное расстояние каждого зеркала, является конфокальным параметром лазерного пучка [60]. Любой резонатор с зеркалами различной кривизны и различным расстоянием между ними может быть заменён эквивалентным конфокальным резонатором, конфокальный параметр которого определяется по формуле [61]:

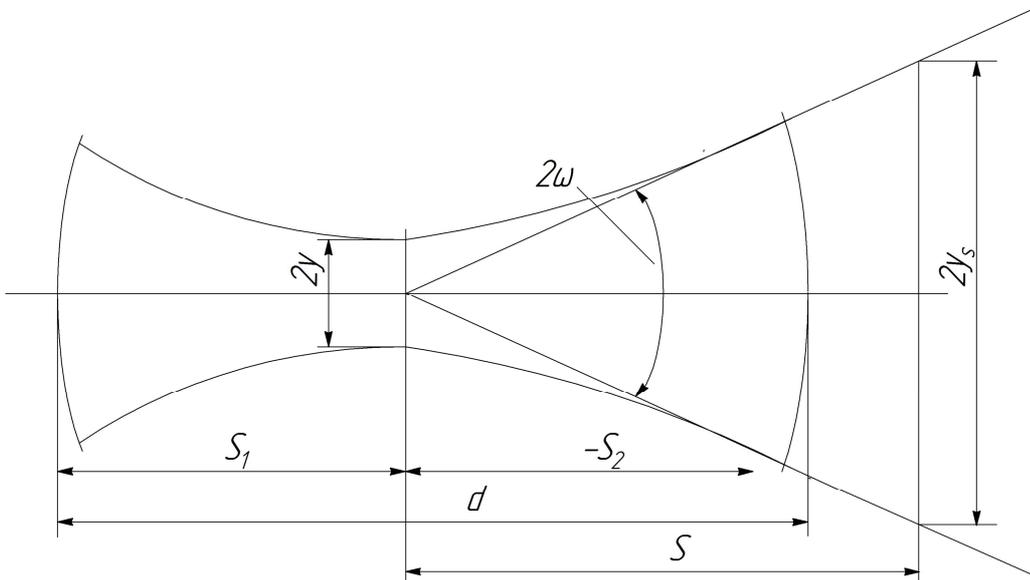


Рис. 3.2.1. Структура пучка лазера

$$z_k = \frac{d\sqrt{g_1g_2(1-g_1g_2)}}{g_1 + g_2 - 2g_1g_2}. \quad (3.2.3)$$

При использовании формул (3.2.1) – (3.2.3) следует иметь в виду, что если одно из зеркал резонатора плоское, то перетяжка находится в плоскости этого зеркала, а конфокальный параметр:

$$z_k = \sqrt{(r-d)d}.$$

Если резонатор состоит из плоских зеркал, то выходящий из лазера пучок можно характеризовать как совокупность плоских волн, расходящихся под дифракционным углом. В этом случае понятия «перетяжка» и «конфокальный параметр» не применяют.

Зная конфокальный параметр, можно найти диаметр перетяжки

$$2y = 2\sqrt{\frac{\lambda z_k}{\pi}}, \quad (3.2.4)$$

где λ – длина волны излучения лазера.

Диаметр сечения пучка в произвольном месте, расположенном на расстоянии s от перетяжки, определяется зависимостью

$$2y_s = 2y\sqrt{1 + \varepsilon^2}, \quad (3.2.5)$$

где $\varepsilon = s/z_k$ – относительная координата сечения.

В произвольном сечении волновой фронт лазерного пучка приближенно является сферическим с радиусом

$$R = (1 + \varepsilon^2) \frac{z_k}{\varepsilon}.$$

Расходимость пучка лазера характеризуется плоским углом 2ω и изменяется в соответствии с изменением диаметра $2y$ сечения пучка. Однако, при $s \gg z_k$, согласно (3.2.5), диаметр сечения пучка изменяется линейно, поэтому лазерный пучок можно рассматривать как квазигомоцентрический пучок, пересекающейся в центре перетяжки (см. рис. 3.2.1). Угол расходимости этого пучка в радианах определяется зависимостью [61]:

$$2\omega = 2\sqrt{\lambda(\pi z_k)} = \frac{2\lambda}{\pi y}. \quad (3.2.6)$$

При этом в телесном угле, соответствующем плоскому углу 2ω , заключено около 86% всего потока излучения основного типа колебаний (для основной моды). Моды высших порядков характеризуются большими значениями угла расходимости.

Таким образом, зная положение перетяжки и конфокальной параметр z_k , можно найти параметры лазерного пучка в любом сечении.

Если на пути распространения лазерного пучка установлена оптическая система, например линза, то при выходе из линзы получим лазерный пучок, характеризующийся новым значением конфокального параметра и новым положением перетяжки. Параметры преобразованного лазерного пучка рассчитываются по формуле отрезков:

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'}$$

Величины a и a' заменяют соответственно радиусом кривизны R волнового фронта, падающего на линзу, и радиусом кривизны R' волнового фронта, вышедшего из линзы.

Если перетяжка лазерного пучка расположена на расстоянии a от тонкой линзы с фокусным расстоянием f' (рис. 3.2.2, а), то конфокальный параметр преобразованного пучка:

$$z'_k = z_k / \left[\left(1 + \frac{a}{f'} \right)^2 + \left(\frac{z_k}{f'} \right)^2 \right]. \quad (3.2.7)$$

Положение перетяжки преобразованного пучка относительно тонкой линзы определяется равенством

$$1 - \frac{a'}{f'} = \frac{1 + \frac{a}{f'}}{\left(1 + \frac{a}{f'} \right)^2 + \left(\frac{z_k}{f'} \right)^2}. \quad (3.2.8)$$

Формулы (3.2.7) и (3.2.8) справедливы и для оптической системы конечной толщины, если отрезки a и a' отсчитывать от главных плоскостей.

Если положение перетяжки определять отрезком z относительно передней фокальной плоскости (см. рис. 3.2.2,а), то положение перетяжки преобразованного пучка относительно задней фокальной плоскости

находится по формуле

$$z' = -\frac{zf'^2}{z^2 + z_k^2} . \quad (3.2.9)$$

При этом значение конфокального параметра преобразованного лазерного пучка будет равно [61]:

$$z'_k = \frac{zf'^2}{z^2 + z_k^2} . \quad (3.2.10)$$

Из формулы (3.2.9) следует, что если перетяжка лазерного пучка расположена в передней фокальной плоскости ($z = 0$), то перетяжка преобразованного пучка будет находиться в задней фокальной плоскости. После отрицательной линзы перетяжка преобразованного пучка будет мнимой, а расходимость его увеличивается по сравнению с расходимостью падающего пучка (рис. 3.2.2, б).

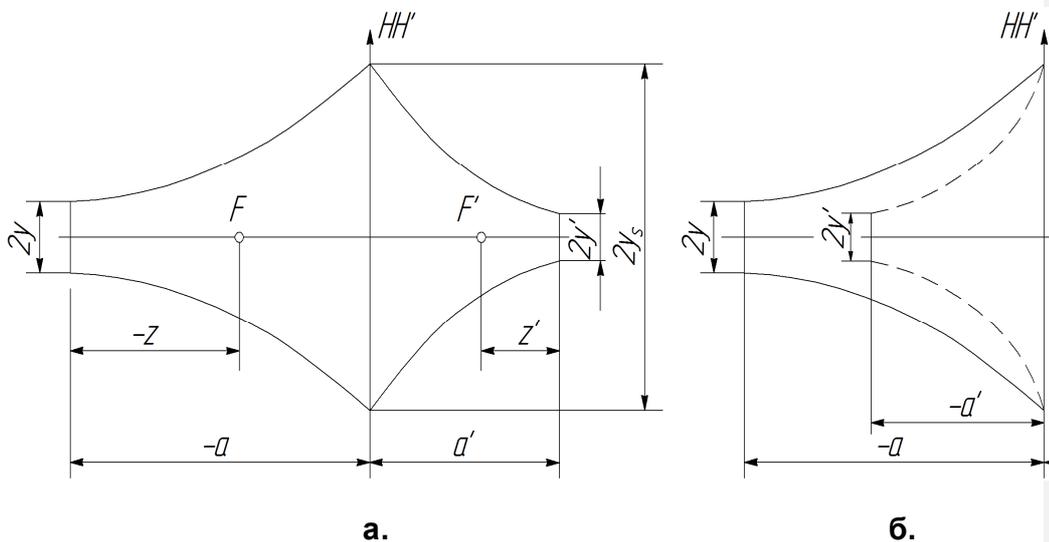


Рис. 3.2.2. Преобразование пучка лазера тонкой линзой

3.2.1. Оптические системы для концентрации излучения лазера

Примечание [БЛ20]:
Диплом,
ГПНТБ

Для получения больших значений энергетической освещённости, создаваемый лазером поток его излучения необходимо сконцентрировать в пятно минимальных размеров. Таким пятном может быть перетяжка лазерного пучка, преобразованного оптической системой [61].

Из формулы (3.2.4) следует, что для получения минимальных размеров $2y'$ перетяжки преобразованного пучка необходимо стремиться к уменьшению конфокального параметра z'_k лазерного пучка, трансформированного оптической системой. Согласно формуле (3.2.10), для данного лазера, параметр z'_k будет тем меньше, чем меньше фокусное расстояние оптической системы и чем больше расстояние между лазером и передним фокусом оптической системы. Положение перетяжки преобразованного пучка определяют по формуле (3.2.8) или (3.2.9). При этом следует иметь в виду, что при использовании короткофокусных систем $z'_k \gg f'$, поэтому согласно (3.2.9) $z \approx 0$, т. е. перетяжка преобразованного лазерного пучка получается вблизи задней фокальной плоскости.

Для полного использования потока излучения, создаваемого лазером, диаметр входного зрачка оптической системы должен быть не меньше диаметра сечения лазерного пучка в плоскости входного зрачка. Если в качестве оптической системы используется тонкая линза (см. рис. 3.2.2, а), то её диаметр определяется из условия

$$D \gg 2y, \quad (3.2.11)$$

где $2y$, находится по формуле (3.2.5), в которой величина s принимается равной расстоянию от перетяжки до главной плоскости линзы.

Из формул (3.2.5) и (3.2.10) следует, что лазер желательно располагать как можно ближе к оптической системе, чтобы получить минимальный

диаметр входного зрачка. В этом случае, даже при использовании короткофокусной системы, получается минимально возможное относительное отверстие (D/f'), что создает более благоприятные условия абберационной коррекции оптической системы.

Таким образом, если задан диаметр пятна $2y'$, на котором должно быть сконцентрировано излучение лазера, то согласно формуле (3.2.4) необходимое значение конфокального параметра преобразованного пучка равно

$$z'_k = \frac{\pi y'^2}{\lambda}. \quad (3.2.12)$$

Выбрав тип лазера и определив для него конфокальный параметр z_k из конструктивных соображений задаёмся величиной z , определяющей положение перетяжки относительно передней фокальной плоскости оптической системы. Тогда согласно формуле (3.2.9) необходимое значение фокусного расстояния оптической системы будет равно

$$f' = \sqrt{\frac{z'_k(z^2 + z_k^2)}{z_k}}.$$

Диаметр оптической системы вычисляют по формуле (3.2.5) согласно условию (3.2.11) [61].

При использовании короткофокусных систем плоскость, где концентрируется излучение лазера, получается на незначительном расстоянии от последней поверхности оптической системы, что может оказаться неудобным в эксплуатации. В этом случае целесообразно использовать двухкомпонентную систему, построенную по схеме реверсивного телеобъектива (рис. 3.2.3), у которой $a'_{F'} > f'$.

Применение двухкомпонентной системы является обязательным, если излучение лазера необходимо сконцентрировать в пятно малых размеров на значительном расстоянии [59]. Расчёт двухкомпонентной системы можно выполнить по указанной выше методике путем

последовательного использования формул (3.2.8), (3.2.9), (3.2.12) для каждого компонента.

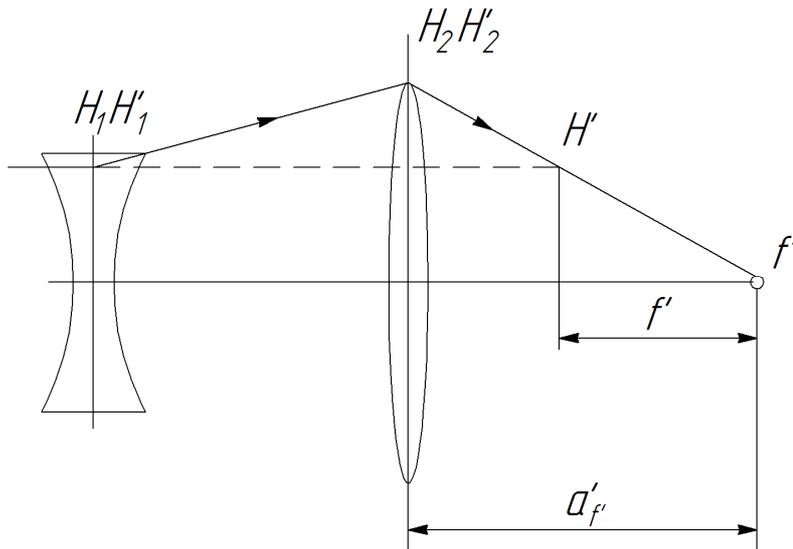


Рис. 3.2.3. Двухкомпонентная система $a'_{f'} > f'$

3.2.2. Оптические системы для уменьшения расходимости лазерного пучка

Несмотря на то, что излучение лазера характеризуется высокой направленностью, передача его энергии на большие расстояния требует уменьшения расходимости лазерного пучка. Согласно формуле (3.2.6) для уменьшения угла расходимости необходимо увеличивать конфокальный параметр. Выполнение последнего требования путем использования в резонаторе зеркал малой кривизны нерационально, так как в этом случае возрастают дифракционные потери и лазер становится более чувствительным к разъюстировке.

Рассмотрим возможность уменьшения расходимости лазерного

Примечание [БЛ21]:
Диплом;
ГПНТБ

пучка с помощью одного компонента, например одиночной линзы. Как следует из формулы (3.2.10), для увеличения конфокального параметра преобразованного пучка, перетяжка исходного пучка должна совпадать с передней фокальной плоскостью оптической системы ($z = 0$), а сама система должна быть длиннофокусной. Такое решение может оказаться неприемлемым из-за значительных габаритных размеров.

Наиболее рациональной схемой для уменьшения расходимости лазерного пучка является схема двухкомпонентной системы. Первый компонент этой системы может быть как положительным, так и отрицательным. Применение отрицательного компонента позволяет получить более компактную систему. Второй компонент положительный. Необходимое угловое увеличение системы с учетом (3.2.6) определяется по формуле

$$\gamma = \frac{2\omega'}{2\omega} = \frac{2y}{2y'} = \sqrt{\frac{z_k}{z'_k}}, \quad (3.2.13)$$

где 2ω и $2\omega'$ – угловая расходимость лазерного пучка соответственно до и после оптической системы; $2y$ и $2y'$ – диаметр перетяжки соответственно входящего и преобразованного пучков; z_k и z'_k – конфокальный параметр соответственно входящего и преобразованного пучка.

Рассмотрим основные зависимости для расчета двухкомпонентной системы (см. рис. 3.2.3). Положение перетяжки и конфокальный параметр лазерного пучка, преобразованного первым компонентом, определяется по формулам (3.2.9) и (3.2.10):

$$z'_1 = -\frac{z_1 f_1'^2}{z_1^2 + z_{k_1}^2}; \quad (3.2.14)$$

$$z'_{k_1} = -\frac{z_{k_1} f_1'^2}{z_1^2 + z_{k_1}^2}. \quad (3.2.15)$$

Для получения минимальной расходимости лазерного пучка после второго компонента необходимо, чтобы изображение перетяжки, создаваемое первым компонентом, имело минимальные размеры и располагалось в передней фокальной плоскости второго компонента ($z_2 = 0$). Выполнение первого из указанных условий обеспечивается путём применения короткофокусного компонента. Другими словами задача, решаемая первым компонентом, относится к задаче о концентрации лазерного излучения. Выполнение второго из указанных условий означает, что задний фокус F_1' первого компонента должен быть расположен относительно переднего фокуса F_2 второго компонента, на расстоянии z_1' определяемом по формуле (3.2.14). Это расстояние называется оптическим интервалом, который обозначается Δ , т.е. $z_1' = \Delta$. Следует иметь ввиду, что в большинстве практических случаев $z_{k_1}' \gg f_1'$, поэтому величина Δ сравнимо мала.

Таким образом, двухкомпонентная система, предназначенная для уменьшения расходимости лазерного пучка, близка к расфокусированной афокальной системе.

Лазерный пучок, преобразованный первым компонентом, следует рассматривать как пучок пространства предметов по отношению ко второму компоненту, т.е. $2y_1' = 2y_2$ и $z_{k_1}' = z_{k_2}$. Тогда согласно формуле (3.2.10), при $z_2 = 0$, имеем:

$$z_{k_2}' = \frac{f_2'^2}{z_{k_2}} = \frac{f_2'^2}{z_{k_1}'} . \quad (3.2.16)$$

Следовательно, угловое увеличение двухкомпонентной системы с учётом формул (3.2.13), (3.2.15) и (3.2.16) будет равно:

$$\gamma = \sqrt{\frac{z_{k_1}}{z_{k_2}'}} = \left(\frac{f_1'}{f_2'} \right) \sqrt{\frac{z_{k_1}^2}{z_1^2 + z_{k_1}^2}} . \quad (3.2.17)$$

При $\Delta = 0$ имеем афокальную систему, угловое увеличение которой определяется известной зависимостью [61]:

$$\gamma = -\frac{f'_1}{f'_2}. \quad (3.2.18)$$

Так как выражение под знаком радикала формулы (3.2.17) всегда меньше единицы, то из сравнения формул (3.2.17) и (3.2.18) следует, что угловое увеличение, а значит, и расходимость лазерного пучка для расфокусированной афокальной системы всегда меньше, чем для афокальной системы.

Таким образом, расчёт двухкомпонентной системы для уменьшения расходимости лазерного пучка можно выполнять в следующей последовательности. Для данного лазера, у которого известны угловая расходимость 2ω , конфокальный параметр $z_k = z_{k_1}$ и диаметр перетяжки $2y = 2y_1$, из конструктивных или габаритных условий задаёмся положением перетяжки z_1 относительно переднего фокуса F_1 первого компонента. Согласно условию (3.2.11) по формуле (3.2.5) определяется диаметр D_1 первого компонента. Выбираем фокусное расстояние f'_1 первого компонента из условия, чтобы его относительное отверстие D_1 / f'_1 имело значение, при котором не возникают значительные трудности абберационной коррекции системы.

По формуле (3.2.14) находим оптический интервал ($\Delta = z'_1$), по формуле (3.2.15) – конфокальный параметр лазерного пучка, преобразованного первым компонентом ($z'_{k_1} = z_{k_2}$). Зная, по техническим условиям, необходимую угловую расходимость $2\omega'$ на выходе системы и согласно формуле (3.2.13) устанавливаем угловое увеличение системы и согласно формуле (3.2.17) вычисляем фокусное расстояние второго (положительного) компонента:

$$f_2' = \left(\frac{f_1'}{\gamma} \right) \sqrt{\frac{z_{k_1}^2}{z_1^2 + z_{k_1}^2}}.$$

Диаметр D_2 второго компонента определяется, согласно условию (3.2.11), с использованием эквивалентного конфокального параметра z_{k_2} [61].

Следует отметить, что расчёт оптических систем для согласования параметров лазерного пучка с последующими оптическими элементами аналогичен расчёту рассмотренных выше оптических систем, предназначенных для концентрации излучения лазера или для уменьшения расходимости лазерного пучка.

3.3. Моделирование и алгоритмизация оптимального управления распределёнными лазерными системами

Рассмотрим задачу оптимального управления распределёнными лазерными системами, описываемыми уравнением теплопроводности.

Сначала рассмотрим задачу, которая в теплофизических терминах может быть сформулирована следующим образом. Имеется однородный стержень $0 \leq x \leq 1$ левый конец $x = 0$ которого теплоизолирован, а на правом конце $x = 1$ происходит теплообмен с внешней средой. Через $v(x, t)$ обозначим температуру стержня в точке x в момент t . Пусть $v(x, 0) = \varphi(x)$ – распределение температуры в стержне в начальный момент времени $t = 0$. Требуется, управляя температурой лазерного источника, к заданному моменту T распределение температуры в стержне сделать как можно более приближенной к заданному распределению $y(x)$, $0 \leq x \leq 1$. Математическая формулировка этой задачи – минимизировать функционал:

$$J(u) = \int_0^l |v(x, T, u) - y(x)|^2 dx . \quad (3.3.1)$$

При условии, что $v(x, T, u)$ является решением краевой задачи управления:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}; \quad (x, t) \in Q = \{0 < x < l; 0 < t \leq T\}; \quad (3.3.2)$$

$$\left. \frac{\partial v}{\partial t} \right|_{x=0} = 0; \quad 0 < t \leq T; \quad (3.3.3)$$

$$\left. \frac{\partial v}{\partial t} \right|_{x=l} = v(u(t) - v(l, t)); \quad 0 < x \leq T; \quad (3.3.4)$$

$$v|_{t=0} = \phi(x); \quad 0 \leq x \leq l . \quad (3.3.5)$$

Здесь a^2 , l , v , T – заданные положительные величины; $u = u(t)$ – управление, представляющее собой температуру внешней среды.

Сначала рассмотрим случай, когда управление $u(t)$ удовлетворяет ограничениям:

$$a \leq u(t) \leq b; \quad 0 \leq t \leq T, \quad (3.3.6)$$

где a , b – известные числа, выражающие собой крайние допустимые значения температуры внешней среды. На практике этому условию удовлетворяют кусочно-непрерывные функции $u(t)$. Обозначим через U множество кусочно-непрерывных функций $u(t)$, удовлетворяющих неравенствам (3.3.6). Таким образом, задача принимает вид (3.3.1) – (3.3.6) и заключается в определении управления $u = u^*(t) \in U$, на котором функционал (3.3.1) достигает своей нижней грани.

Для решения поставленной задачи оптимального управления (3.3.1) – (3.3.6), т.е. для минимизации $J(u)$ на множестве U , целесообразно использовать методы градиентного типа. Это реализуется путём решения краевой

задачи (3.3.2) – (3.3.5) при каждом $u(t)$ и нахождения градиента функционала (3.3.1) с последующим применением, например, метода проекции градиента или метода условного градиента для нахождения минимизирующей последовательности управлений, сходящихся к множеству $U \in U^*$ оптимальных решений задачи оптимального управления распределёнными системами [62].

На практике, при нахождении решения задачи оптимального управления распределёнными системами, часто возникает необходимость учитывать основные качественные особенности СРП, среди которых особого внимания заслуживает подвижное воздействие, выступающее в роли подвижного управления (ПУ).

Появлением новой степени свободы – возможности выбора закона $s(t)$ движения во времени источников субстанции (энергии, вещества), рассматриваемых в качестве подвижного управляющего воздействия, приводит к переходу от «обычных» (неподвижных) управлений $w_y(x, t)$ на входе распределённых блоков, зависящих от двух переменных – времени и пространственной координаты, к подвижным управлениям $w_y(x, t, x - s(t))$, описываемым функциями уже трёх аргументов.

Процесс лазерного воздействия на материал является одним из процессов, относящихся к объектам с распределёнными параметрами (ОРП) с подвижным воздействием. Источником подвижного воздействия, в данном случае, выступает лазерный луч.

Широкий круг самых различных по своему содержанию процессов, имеющих большое прикладное значение, относится к объектам с распределёнными параметрами с подвижным воздействием. Это, прежде всего процессы, связанные с неоднородным распределением параметров системы, объекты технологической теплофизики (нагрев, сварка, пайка, плавка, тепловые процессы при механической обработке деталей, формирование температурных полей с помощью сканирующих энергетических источ-

ников и др.), химические процессы (адсорбция, конвективная диффузия и др.), процессы геофильтрации, объекты акустики и гидроакустики и т.д. Источниками подвижного воздействия выступает лазерный луч.

В роли подвижного управления рассматривается соответствующая составляющая стандартизирующей функции на входе процесса лазерного воздействия, которая в большинстве случаев может быть представлена в следующем виде [63, 64]:

$$w_y(x, t, x - s(t)) = u(x, t)\psi[x - s(t), \sigma(t), t], \quad (3.3.7)$$

где

$u(x, t)$ – интенсивность лазерного луча (приблизительно эквивалентна мощности лазерной установки);

$\psi[x - s(t), \sigma(t), t]$ – функция, описывающая форму пространственного распределения лазерного луча и её изменение во времени;

$s(t)$ – закон движения лазерного луча;

$\sigma(t)$ – закон изменения параметров формы лазерного луча, определяющих степень пространственной концентрации его воздействия.

В роли конкретных управлений могут рассматриваться по отдельности, попарно или в совокупности все указанные в (3.3.7) воздействия (рис. 3.3.1), т.е. интенсивность (u -управление), форма (параметрическое ψ -управление $\sigma(t)$) и закон движения лазерного луча (s -управление). Многоканальность является одной из наиболее характерных особенностей подвижного управления.

В зависимости от выбора конкретного варианта с одним или более управляющим воздействием и характера их изменения во времени и пространстве, существует целый ряд способов реализации ПУ.

Следует отметить, что при поиске оптимальной реализации распределённой системы выбор формы источника может производиться из

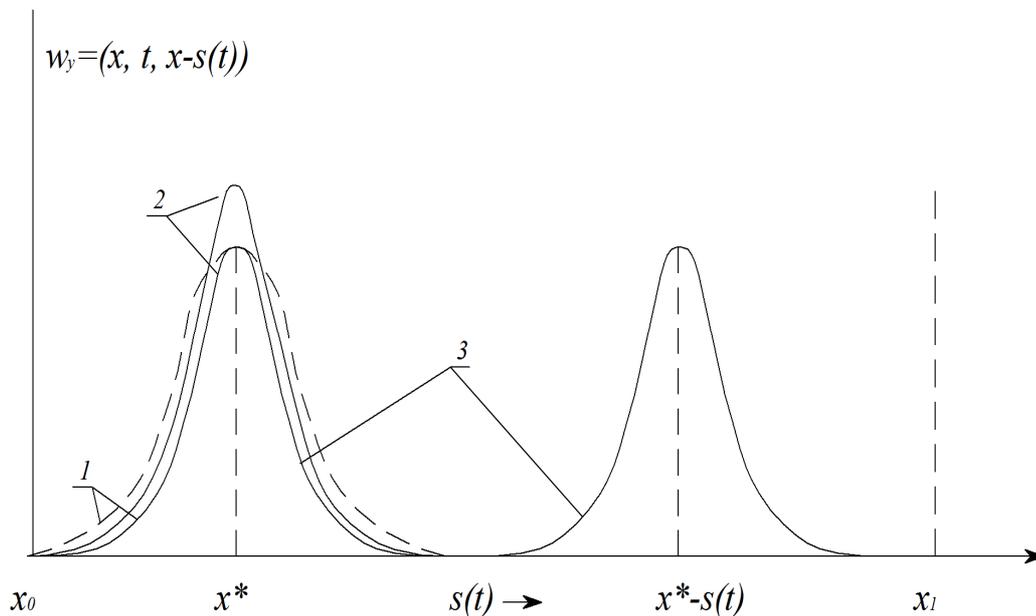


Рис. 3.3.1. Иллюстрация способов подвижного управления в распределенных системах:

- 1 – параметрическое ψ -управление $\sigma(t)$;
- 2 – u -управление;
- 3 – s -управление

широкого ряда значений. Она может быть неизменной во времени, может быть задана параметрически или выбираться произвольным образом. При этом ψ -управление осуществляется либо путём выбора в качестве управляющего воздействия самой функции $\psi[x-s(t), \sigma(t), t]$ в (3.3.7), либо за счёт управляющего параметра $\sigma(t)$ [63].

Параметрическим ψ -управлением $\sigma(t)$ может служить, коэффициент характеризующий степень сосредоточенности (пространственной локализации около центра) создаваемого лазерным сканирующим лучом подвижного источника, форма которого соответствует известному закону

нормального распределения Гаусса.

В роли подвижных источников неизменной формы, в большинстве случаев, фигурируют воздействия с высокой степенью пространственной концентрации. Для таких источников $\psi[x-s(t), \sigma(t), t]$ часто, с удовлетворительной точностью, аппроксимируется дельта-функциями, координаты точек сосредоточения которых изменяются во времени.

Что касается s -управления (рис. 3.3.2), то оно может осуществляться непрерывно или дискретно во времени, в течение одного цикла, с однократным прохождением траектории движения (одноцикловое движение) или с периодическим многократным её повторением (многоцикловое движение).

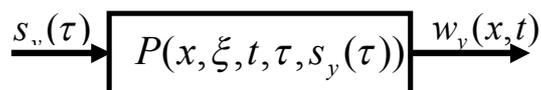


Рис. 3.3.2. Подвижное воздействие с s -управлением

В роли u -управления (рис. 3.3.3) обычно рассматривается сосредоточенное воздействие $u(t)$, являющееся интегральной характеристикой интенсивности источника во всей области его пространственного распределения.

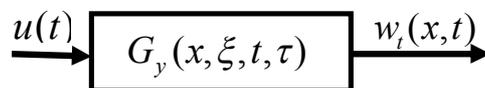


Рис. 3.3.3. Подвижное воздействие с u -управлением

Различные каналы реализации подвижных воздействий принципиально отличаются друг от друга характером зависимости функции состояния

ОРП $Q(x,t)$, $x \in \bar{D}$, от соответствующих управлений.

Как правило, функция ψ является нелинейной функцией своих аргументов s и σ . Это приводит к принципиально более сложным моделям ОРП при параметрическом ψ - и s -управлениях, которые представляются в таком случае интегральными операторами вида:

$$\begin{aligned} Q(x,t) &= \int_0^t \int_{\bar{D}} G(x,\xi,t-\tau) w_y(\xi,\tau) d\xi d\tau = \\ &= \int_0^t \int_{\bar{D}} G(x,\xi,t-\tau) u(\xi,\tau) \cdot \psi[\xi - s(\tau), \sigma(\tau), \tau] d\xi d\tau . \end{aligned} \quad (3.3.8)$$

Здесь x , ξ и t , τ – обозначения пространственного и временного аргументов входной (x и t) и выходной (ξ и τ) величин распределённого блока; $G(x, \xi, t - \tau)$ – функция Грина.

Таким образом, получаются линейные и непараметрическое ψ -управления, а также нелинейные s -управление и параметрическое ψ -управление при использовании объектов с подвижными воздействиями.

Нелинейное параметрическое ψ -управление $\sigma(t)$, в отличие от линейного, применяется значительно реже.

На рис. 3.3.4 представлен алгоритм поиска оптимальной реализации распределённой системы, учитывающий ограничения, накладываемые на параметрические функции $u(x, t)$, $s(t)$ и $\sigma(t)$ [70].

На первом этапе, для эффективной реализации поиска, производится сбор данных по существующим параметрическим функциям. В результате составляются три сводные морфологические таблицы для $u(x, t)$, $s(t)$ и $\sigma(t)$ параметрической функции соответственно. После ввода параметров, путём поиска в соответствующих морфологических таблицах, осуществляется выбор параметрических функций, удовлетворяющих заданным ограничениям.

В результате для каждой функции возможно возникновение трёх ситуаций (рис. 3.3.5):

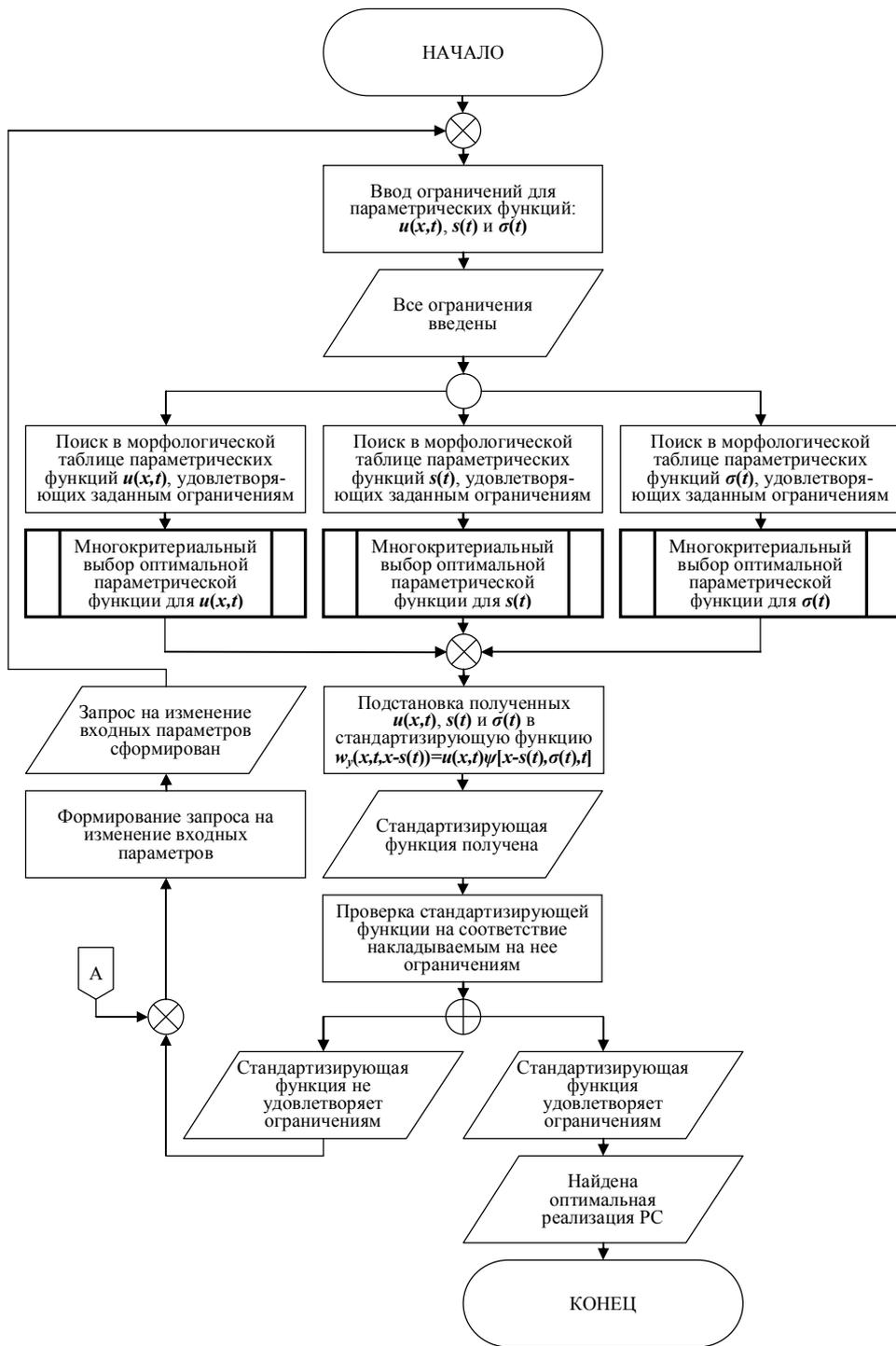


Рис. 3.3.4. Алгоритм поиска оптимальной реализации распределённой системы (РС), учитывающий ограничения, накладываемые на параметрические функции $u(x, t)$, $s(t)$, и $\sigma(t)$

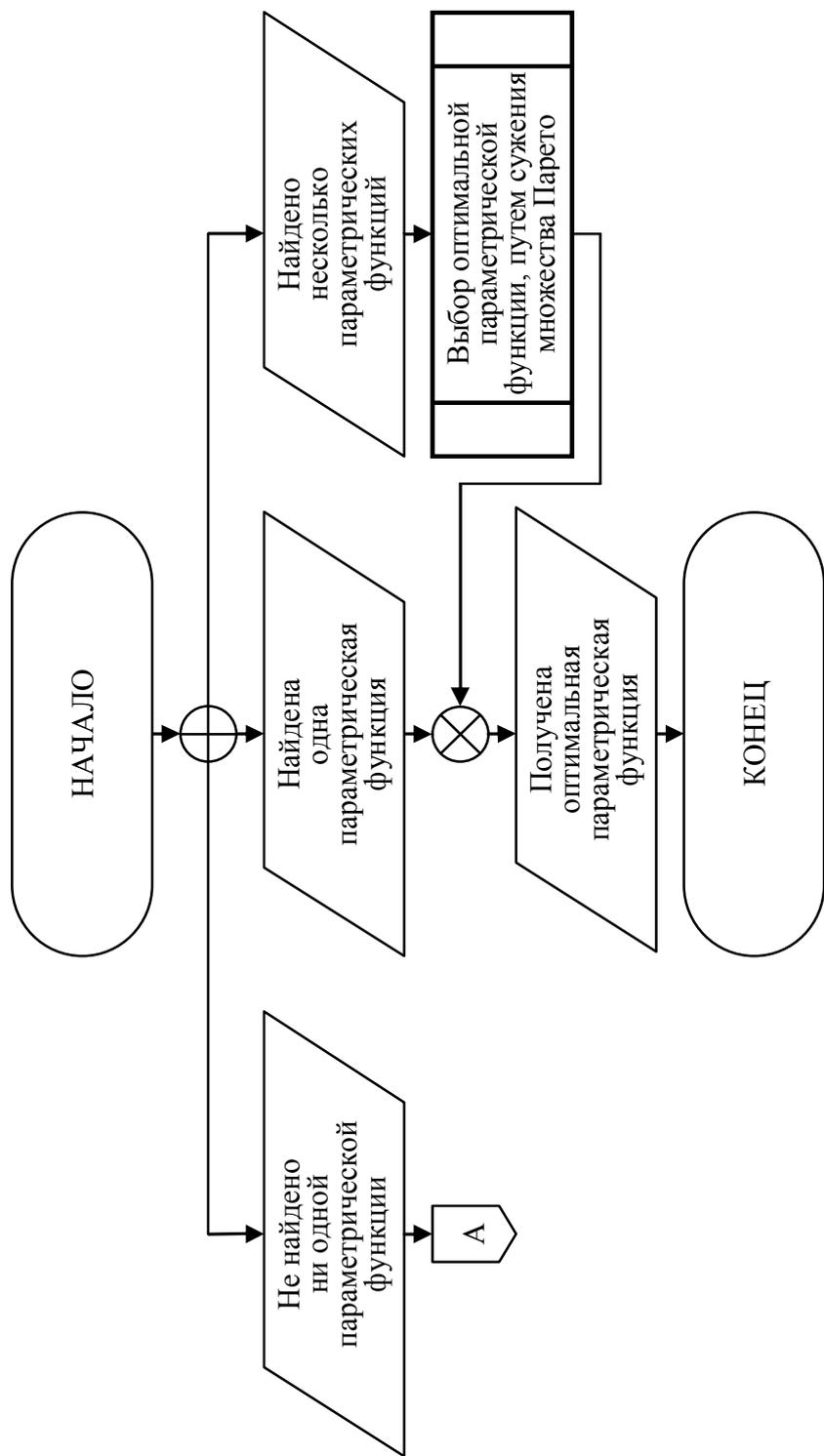


Рис. 3.3.5. Алгоритм многокритериального выбора оптимальной параметрической функции

- 1) заданным ограничениям не удовлетворяет ни одна параметрическая функция;
- 2) заданным ограничениям удовлетворяет одна параметрическая функция;
- 3) заданным ограничениям удовлетворяют несколько параметрических функций.

В случае отсутствия удовлетворяющего заданным ограничениям варианта, формируется запрос на изменение входных параметров [70]. При условии нахождения одного варианта для каждой параметрической функции (идеальный случай) осуществляется их подстановка в стандартизирующую функцию с последующей её проверкой на заданные ограничения. Если же в результате поиска найдено несколько вариантов, удовлетворяющих условиям, то необходимо выполнить выбор оптимального варианта для каждой параметрической функции путем сужения полученного множества.

Сужение множества осуществляется для упорядочения по важности однородных частных критериев, либо для утверждения их равноценности. Как известно, сущность метода выделения критерия состоит в оптимизации одного наиболее важного из рассматриваемых частных критериев при условии удовлетворения всеми оставшимися частными критериями установленных для них соответствующих ограничений, т.е. исходная многокритериальная задача становится однокритериальной условной задачей, в которой роль введённых ограничений (условий) становится решающей при поиске оптимальной альтернативы.

Таким образом, для перехода от многокритериальной (многоцелевой) оптимизации к однокритериальной может быть использован дискриминационный подход [69]:

$$\begin{cases} f_i(X) \rightarrow \min_{x \in D}; \\ f_j(X) \leq \Delta_j; \quad j=1, 2, \dots, K; \quad j \neq i, \end{cases} \quad (3.3.9)$$

где D – множество допустимых решений (альтернатив); $f_i(X)$ – частный критерий, выступающий в качестве целевой функции; $f_j(X)$ – остальные критерии, преобразованные в ограничения $f_j(X) \leq \Delta_j$.

Показатель важности критерия можно установить следующим образом. Пусть каждая альтернатива из рассматриваемой их совокупности характеризуется одним и тем же вектором частных независимых свойств, а значит, и критериев (физических, технологических и экономических), например, стоимости, окупаемости, простоты реализации, надёжности и т.д. Тогда по каждому из этих свойств каждый эксперт, руководствуясь только своей системой предпочтений, может восстановить профиль предпочтений на альтернативах и оценить их ранги. Затем восстанавливается групповой профиль предпочтений по каждому свойству, и по всей их совокупности можно вычислить суммарные ранги каждой альтернативы, соответствующие “своим” критериям. В результате восстанавливается полный групповой ранжированный профиль, по которому легко упорядочить критерии. Для этого каждому критерию следует поставить в соответствие максимальный ранг альтернативы и упорядочить эти ранги. Для упорядочения частных критериев можно воспользоваться и методом, основанным на применении логического определителя r -го ранга [65 – 68].

3.4. Математическая модель и алгоритм принятия решения для недоминируемых альтернатив лазерных установок

Данный метод позволяет выбрать в качестве оптимальной, альтернативу лазерной установки, которая минимизирует взвешенное расстояние

от назначенной “идеальной точки” для размытой и интуитивной составляющих.

Здесь нечёткой цели будет соответствовать некоторое нечёткое подмножество C исходного универсального множества X . Достижение цели, как правило, может быть осуществлено с некоторой степенью $\mu_C(x)$ – степенью принадлежности при некоторой $\mu_G(x)$ – степени выполнения ограничения [71].

Допустим, имеется m атрибутов лазерной установки, из которых необходимо сделать выбор. Каждому выбору соответствует n значений атрибутов. Для k -ой альтернативы лазерной установки существует $(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$, где $x_i^{(k)}$ – значение i -го атрибута. Обозначим через $A^{(k)}$ k -ую альтернативу, однозначно определяющую $(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$ и соответствующую одному из вариантов состава оборудования.

Степень отождествления альтернативы x с оптимальной лазерной установкой может быть определена согласно принципу наилучшего гарантированного результата, т.е. при использовании выражения

$$\mu_\Gamma(x) = \min \{ \mu_G(x), \mu_C(x) \} = \mu_G(x) \wedge \mu_C(x), \quad (3.4.1)$$

где $\mu_G(x), \mu_C(x)$ – функции принадлежности; $\Gamma = G \cap C$.

Под решением, в рассматриваемых условиях, понимается нечеткое множество $\Gamma \subseteq C$ с функцией принадлежности $\mu_r(x)$. Такое подмножество представляется пересечением нечёткого множества цели и нечётко ограниченного множества исходных альтернатив лазерных установок на множестве X . Выбор же конкретной наилучшей альтернативы установки (решений x^*) целесообразно осуществить согласно максимальному значению функции $\mu_r(x)$. При этом структура механизма выбора решения записывается в виде [71]:

$$x^* \in \underset{x \in X}{\text{Arg max}} \lambda \begin{matrix} \lambda \leq \mu_G(x), \\ \lambda \leq \mu_C(x), \end{matrix}$$

Согласно концепции “идеальной точки” [72] обозначим через $A^*(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ “идеальную” альтернативу лазерной установки, для которой x_i^* предпочтительней $x_n^{(k)}$ для любых k и i . Отметим, что некоторые значения x_i^* , могут и не соответствовать значениям альтернатив $A^{(k)}$ рассматриваемого множества.

Обозначим субъективную оценку относительной важности каждого i -го атрибута с помощью нечеткого множества H_i :

$$X_i = \{x_i^{(k)} : 1 \leq k \leq m\} \cup \{x_i^*\}, \quad (3.4.2)$$

где x_i^* , в общем случае, не является частью множества $\{x_i^{(k)} : 1 \leq k \leq m\}$.

H_i описывается своей характеристической функцией вида

$$f_{H_i} : X_i \rightarrow [0, 1] . \quad (3.4.3)$$

Таким образом, $f_{H_i}(x_i^{(k)})$ характеризует предпочтительность $A^{(k)}$ по i -му атрибуту. Очевидно, что $f_{H_i}(x_i^*) = 1$, т.к. x_i^* – наилучшее возможное значение i -го атрибута. В некоторых случаях может быть использовано предварительно определенное соотношение для нахождения значений $f_{H_i}(x_i^{(k)})$, например:

- а) если $0 < x_i^{(k)} \leq x_i^*$ для $\forall k$, то $f_{H_i}(x_i^{(k)}) = x_i^{(k)} / x_i^*$;
- б) если $0 < x_i^* \leq x_i^{(k)}$ для $\forall k$, то $f_{H_i}(x_i^{(k)}) = x_i^* / x_i^{(k)}$.

Как правило, специалист хотел бы использовать свои собственные

субъективные знания на этапе назначения «коэффициентов сатисфакции» для i -го значения атрибута, обеспеченного $A^{(k)}$.

Разрабатывая решающий алгоритм, применяем наиболее часто используемую меру неопределенности – энтропию, обозначив через p_i вероятностную функцию распределения:

$$-\sum_{i=1}^m p_i \ln p_i . \quad (3.4.4)$$

Чтобы выразить нечеткое множество H_i через распределение вероятностей, установим

$$p_i^{(k)} = \frac{f_{H_i}(x_i^{(k)})}{\sum_{l=1}^m f_{H_i}(x_i^{(l)})}, \quad (3.4.5)$$

где $p_i^{(k)}$ – оценка степени принадлежности $x_i^{(k)}$ нечеткому множеству H_i . Теперь можно определить неопределенность по i -му атрибуту как функцию энтропии:

$$e_i = -M \sum_{k=1}^m p_i^{(k)} \ln p_i^{(k)}, \quad (3.4.6)$$

где M – нормирующая константа, допускающая максимальное значение e_i ,

равное 1. Фактически, e_i максимально, если $p_i^{(k)} = \frac{1}{m}$, следовательно,

$M = \frac{1}{\ln m}$ и $0 \leq e_i \leq 1$. Общая неопределённость получается путём

суммирования неопределённостей по каждому атрибуту:

$$E = \sum_{i=1}^n e_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m p_i^{(k)} \ln p_i^{(k)}. \quad (3.4.7)$$

В расстоянии между двумя альтернативами лазерных установок

весовые коэффициенты, зависящие от неопределенности, будут малы, если неопределенность высока. Высокое значение неопределенности относительно некоторого i -го атрибута означает, что довольно большое количество альтернатив имеет близкие по значению коэффициенты сатисфакции относительно этого i -го атрибута и поэтому решение о выборе некоторой альтернативы установки не будет существенно зависеть от этого атрибута. Другими словами, i -ый атрибут, не отличающийся по большинству лазерных установок, имеет более существенной значение для принятия решения. Определим коэффициент сатисфакции как [73]:

$$\bar{S}_i = \frac{1 - e_i}{\sum_{i=1}^n (1 - e_i)} = \frac{1 - e_i}{n - E}; \quad 0 < n \leq 1. \quad (3.4.8)$$

Необходимо отметить, что когда неопределенность соответствующая i -му атрибуту, высока, то e_i близко к 1 и коэффициент \bar{S} мал.

Пусть w_i – относительные веса по важности, назначенные экспертом i -му атрибуту априори. Тогда комбинированный весовой коэффициент определяется как

$$S_i = \frac{\bar{S}_i w_i}{\sum_{i=1}^n \bar{S}_i w_i}, \quad 0 < i \leq 1. \quad (3.4.9)$$

Мера того, насколько удалена $A^{(k)}$ от идеальной данная лазерная установка A^* , соответствует тому, насколько значения атрибутов $A^{(k)}$ удовлетворяют субъективным целевым представлениям эксперта. Введём понятие дополнения нечёткого множества H_i , которое обозначается U_i , и для которого выполняется $f_{U_i}(x_i^{(k)}) = 1 - f_{H_i}(x_i^{(k)})$.

Итак, если необходимо определить, на сколько удалены друг от друга альтернативы лазерных установок $A^{(k)}$ и A^* по i -му атрибуту, то

можно увидеть это по степени неудовлетворённости эксперта значением i -го атрибута для $A^{(k)}$, то есть определим

$$\text{Dis}^{(i)}[A^*, A^{(k)}] = S_i f_{U_i}(x_i^{(k)}), \quad (3.4.10)$$

и тогда

$$\text{Dis}^{(i)}[A^*, A^{(k)}] = \left[\sum_{i=1}^n \left(\text{Dis}^{(i)}[A^*, A^{(k)}] \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3.4.11)$$

Здесь значение $\text{Dis}^{(i)}$ характеризует функцию различимости по каждому отдельному i -му атрибуту, а $\text{Dis}(A^*, A^{(k)})$ соответствует среднеквадратичному отклонению $\text{Dis}^{(i)}$. Нашей целью является выбор альтернативы $A^{(k_0)}$, которая максимально близка к A^* [49]:

$$\text{Dis}[A^*, A^{(k_0)}] = \min_k \text{Dis}[A^*, A^{(k)}]. \quad (3.4.12)$$

Можно ввести дополнительные метрики, в выборе которых может быть заинтересован пользователь, например

$$\text{Dis}_{(1)}[A^*, A^{(k)}] = \sum_{i=1}^n S_i f_{U_i}(x_i^{(k)}), \quad (3.4.13)$$

или

$$\text{Dis}_{(2)}[A^*, A^{(k)}] = \max_i \{ S_i f_{U_i}(x_i^{(k)}) \}. \quad (3.4.14)$$

Рассмотрим алгоритм выбора недоминируемого решения [74]. Если сформировано множество недоминируемых альтернатив лазерных установок, то для осуществления окончательного выбора на этом множестве применим метод, описанный выше. Алгоритм, реализующий данный метод можно представить в виде блок-схемы (рис. 3.4.1).

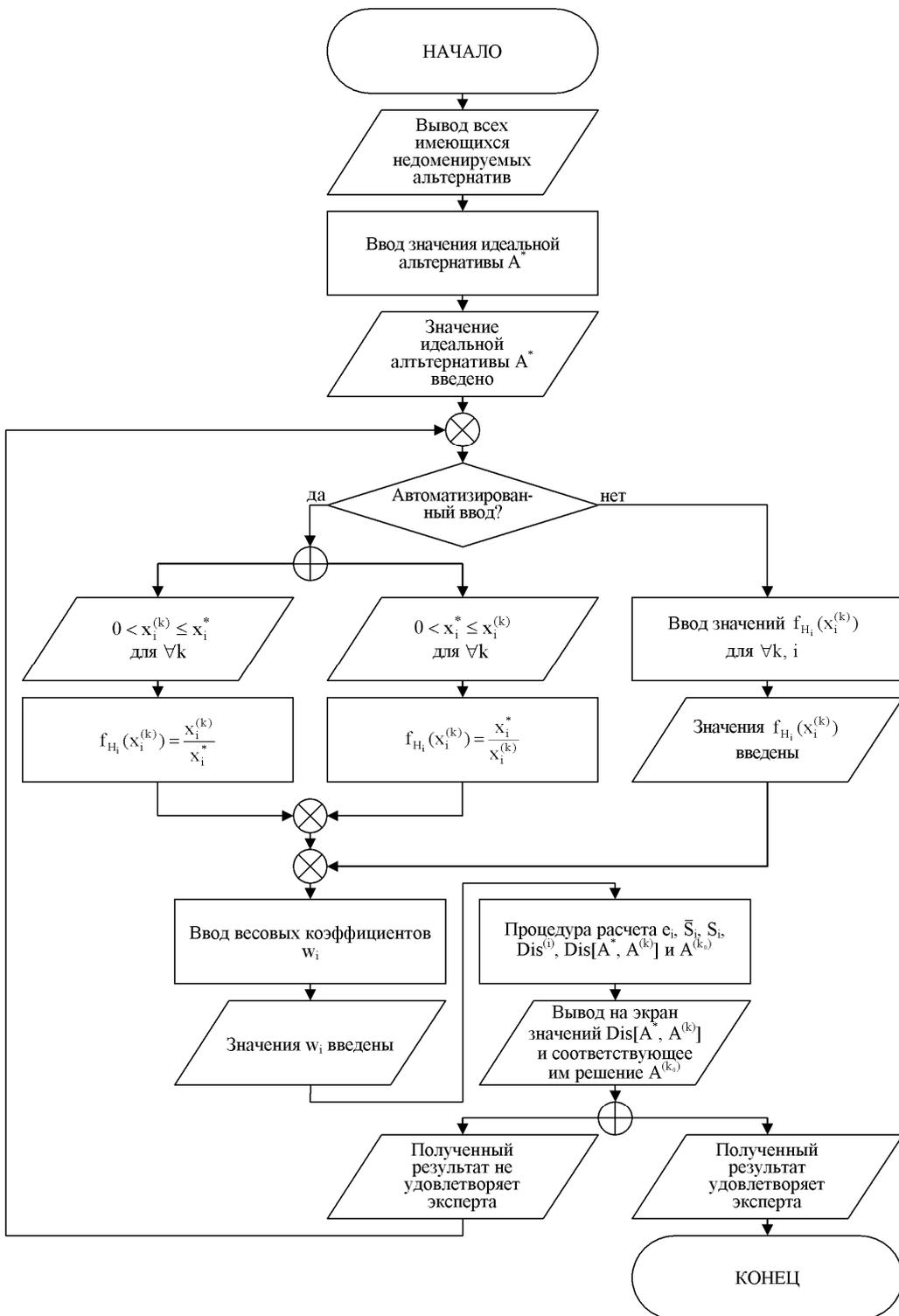


Рис. 3.4.1. Алгоритм выбора недоминируемого решения

На первом этапе пользователю предоставляются все имеющиеся недоминируемые альтернативы лазерных установок, на основе чего он назначает идеальную альтернативу. Далее пользователем задаются $f_{H_i}(x_i^{(k)})$ характеризующие предпочтительность k -ой альтернативы по i -му атрибуту для $\forall k, i$, согласно (3.4.3). Затем происходит ввод весовых коэффициентов w_i , определяющих относительную важность i -го атрибута.

После выполнения всех расчётов, эксперту предоставляются значения $\text{Dis}[A^*, A^{(k)}]$ и соответствующее им решение $A^{(k_0)}$. Если полученное решение не удовлетворяет эксперта, то последует переход к этапу назначения пользователем $f_{H_i}(x_i^{(k)})$.

Таким образом, модель и метод принятия решения на полученном множестве лазерных установок учитывает не только неопределённость в оценках эксперта, но и его интуитивные склонности относительно реальных характеристик атрибутов (критериев) и их специфики.

Данный метод [70,74] комбинирует оценки каждого значения атрибута при отсутствии полной информации о предпочтениях и субъективные оценки относительно важности всех атрибутов лазерной установки.

ГЛАВА 4. МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ОБЪЕКТОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

4.1. Выбор вариантов лазерной установки для производства объектов с локальным применением лазеров

Для того чтобы выбрать лучшее техническое решение нужно вначале дать оценку полученным вариантам, затем эти оценки сравнить и только после этого выбрать вариант с наивысшей оценкой.

Отображение множества вариантов технологических решений процесса производства на множество оценок и выбор оптимального из них, формулируется в следующем виде:

$$(F : X \rightarrow V) \rightarrow opt . \quad (4.1.1)$$

Сравнивать варианты зачастую приходится по многим признакам, т.е. пользоваться несколькими шкалами. Причем по одной шкале лучшими называются одни варианты, по другой – иные [75].

Признаки, используемые для сравнения, неравнозначны: одни более важны, другие – менее. Некоторые признаки – противоречивы.

Каждый вариант технического решения характеризуется некоторыми параметрами:

$$\rho_j ; j = \overline{1, n} . \quad (4.1.2)$$

Совокупность критериев для оценки вариантов:

$$V = \{v_i\}; i = \overline{1, m}.$$

В качестве критериев выбираются признаки, отвечающие наиболее важным целям проектирования.

Одновременно достижение оптимума по всем критериям практически невозможно. Приходится идти на компромисс. В одних случаях это уравновешивание критериев, а в других – выбор главного.

Компромисс упрощает решение задачи, сводя ее к однокритериальной.

Схемы компромиссов могут строиться на основе принципов равномерности, справедливой уступки, выделения главного критерия, последовательности уступки [75].

Принцип равномерности может требовать:

1. Равенства всех критериев

$$\underset{V \in \Omega_V}{opt} = \underset{V \in \Omega_V^k}{opt} V = \{\bar{v}_1 = \bar{v}_2 = \dots = \bar{v}_k\} \in \Omega_V^k, \quad (4.1.3)$$

где Ω_V – отображение области технических решений в пространстве V ; Ω_V^k – подмножество критериев, связанных с компромиссом; \bar{v}_k – оптимальное значение элемента множества критериев.

2. «Подтягивания» наихудшего из критериев

$$\underset{V \in \Omega_V^k}{opt} = \max \min v_i. \quad (4.1.4)$$

3. Квазиравенства критериев, т.е. равенства с допустимой погрешностью.

Принцип справедливой уступки требует абсолютной или относительной уступки. Абсолютная уступка считается справедливой, если суммарный абсолютный уровень снижения одного или нескольких критериев не превосходит суммарного абсолютного уровня повышения других критериев.

Это условие обеспечивает максимальную сумму критериев, т.е.

$$opt = \max_{V \in \Omega_V^k} \sum_{i=1}^k v_i, \quad (4.1.5)$$

где Ω_V – множество критериев, связанных компромиссом; V_i – значение i -ого критерия.

Процедура анализа принятого решения на этапе разработки технических предложений проводится в целях получения необходимой информации об объекте проектирования. В ходе анализа проверяются работоспособность объекта, особенности его взаимодействия с факторами окружения, взаимосвязи составляющих подсистем и элементов.

Интегральная величина затрат денежных средств на проектирование

$$\Phi(\tau) = \int_{\tau_n} P(\tau) d\tau,$$

где $P(\tau)$ – суммарные затраты в функции времени; τ_n – время проектирования.

Интегральная величина дохода за период эксплуатации τ_3

$$\Psi(\tau) = \int_{\tau_3} \Pi(\tau) d\tau,$$

где $\Pi(\tau)$ – суммарный доход в функции времени.

Прибыль текущая

$$f(\tau) = \Pi(\tau) - P(\tau).$$

Полная прибыль

$$F(\tau) = \int [\Pi(\tau) - P(\tau)] d\tau.$$

При выборе рациональных вариантов установок для лазерно-зондовых операций, основанных на локальном применении лазеров в туннельно-зондовом пространстве, большинство возникающих задач оптимизации

являются многокритериальными, так как функционирование установки должно удовлетворять многим критериям эффективности (f_1, f_2, \dots, f_n) одновременно, таким как.

- Критерии влияющие на высокую производительность:

- мощность,
- сходимость луча,
- диаметр пучка,
- длительность импульса,
- температура,
- габариты,
- рабочая среда.

- Критерии полученных объектов:

- шероховатость поверхности,
- геометрическая дефектность,
- примесная дефектность,
- электропроводность,
- адгезионные свойства,
- термостойкость,
- радиационная стойкость.

Основной концепцией, используемой при многокритериальной оптимизации, является концепция недоминируемых точек в пространстве решений и в критериальном пространстве (множество Парето) совместно с методикой последовательного сужения множества таких точек [69]

Рассмотрим паретовскую концепцию применительно к задачам дискретной и комбинированной оптимизации.

Функционирование установки $F(X)$ оценивается по p критериям качества $f_1, f_2, \dots, f_p(f_1, f_2, \dots, f_7)$.

Задача оптимизации имеет вид:

$$F(X) = \{f_1(X), f_2(X), \dots, f_p(X)\} \rightarrow \min_{X \in D \subset R^n},$$

где D – область допустимых решений (альтернатив лазерных установок для лазерно-зондовых операций) – является конечным и счётным

$$X^0 \in D_p \stackrel{def}{\Leftrightarrow} \neg(\exists X \in D);$$

$$\left((f_i(X) \leq f_i(X^0), i = \overline{1, p}) \wedge \exists i_0 (f_{i_0}(X) < f_{i_0}(X^0)) \right).$$

Вариант установки $X^0 \in D$ является эффективным (недоминируемым, паретовским, неулучшаемым), если в множестве допустимых альтернатив устройств D не существует решения, которое по целевым функциям было бы не хуже, чем X^0 , и, по крайней мере по одной целевой функции было бы строго лучше, чем X^0 [69].

Множество Парето в пространстве переменных (альтернатив вариантов установок) – это множество D_{II} всех эффективных точек.

Множество Парето в критериальном пространстве (в пространстве критериальных точек) – это множество:

$$II = f(D_{II}) = \{ (f_1(X), f_2(X), \dots, f_p(X)) \in R^0, X \in D_{II} \}.$$

Для любого варианта установки, не выходящей в множество Парето D_{II} , найдется вариант в множестве Парето, дающего по всем целевым функциям значения не хуже, чем у этого устройства, и хотя бы по одной целевой функции – строго лучше.

Решение многокритериальной задачи оптимизации целесообразно выбирать из множества Парето, так как любое другое, очевидно, может быть улучшено некоторой точкой Парето как минимум по одному критерию без ухудшения других критериев.

4.2. Метод Саати при структурировании множества альтернатив лазерных установок для формирования объектов в туннельно-зондовой области

Описание метода выполним на примере выбора объектов с «шероховатостью поверхности» полученных путем взаимодействия зондовой установки Луч-2 и локального применения лазера с помощью различных лазерных установок.

Критерии:

- нанодорожки (НД),
- наноотверстия (НТ),
- микрошвы (МШ).

Альтернативы (табл. 4.2.1):

- "Квант-9",
- 400-Q ,
- ЛТИ-709,
- MS-3S.

Таблица 4.2.1

Модель лазера	Энергия импульса, Дж, или мощность, Вт	Длительность импульса, мкс	Частота следования импульсов, Гц
"Квант-9"	8 Дж	7·10 ²	1
400-Q	5 Дж	5·10 ²	3
ЛТИ-709	0,63	2·10 ²	100
MS-3S	15 Дж	3·10 ²	40 – 1000

В основе аналитической процедуры (АНР) Саати линейная свертка оценки альтернатив и веса критериев получаются особым образом [3].

В модели АНР используется иерархия.

Представим ее следующим образом:

Уровень 0: Цель – выбрать лазерную установку

Уровень 1: Критерии –

- нанодорожки (НД),
- наноотверстия (НТ),
- микрошвы (МШ).

Далее нужно получить оценки каждой альтернативы по каждому критерию. Если существуют объективные оценки, то они просто выписываются и нормируются таким образом, чтобы их сумма была равна единице. Например, если бы нас интересовал критерий «процентный выход наноотверстий» и имелись бы соответствующие данные по каждой установке, то нужно было бы составить таблицу (4.2.2).

Таблица 4.2.2

Альтернативы	Процентный выход наноотверстий	Нормированное значение
"Квант-9"	94	0,277
400-Q	95	0,280
ЛТИ-709	60	0,177
MS-3S	90	0,265
Сумма		1,000

Процедура Саати рекомендует использовать парные сравнения [29].

Для фиксации результата сравнения пары альтернатив может использоваться, например, шкала следующего типа:

1. Равноценность.
2. Умеренное превосходство.
3. Сильное превосходство.
4. Очень сильное превосходство.
5. Высшее (крайнее) превосходство.

Лицо, принимающее решение, просят попарно сравнить альтернативы. Результат парных сравнений альтернатив для критерия «наиболее эффективный метод для получения объектов» записывается в виде табл. 4.2.3.

Таблица 4.2.3

	"Квант-9"	400-Q	ЛТИ-709	MS-3S
"Квант-9"	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{6}$
400-Q	$\frac{2}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{5}$
ЛТИ-709	$\frac{4}{1}$	$\frac{2}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{2}$
MS-3S	$\frac{6}{1}$	$\frac{5}{1}$	$\frac{2}{1}$	$\frac{1}{1}$

Простые дроби в клетках трактуются следующим образом. Например, на пересечении строки «Квант-9» и столбца 400-Q записана дробь $\frac{1}{2}$. Это выражает, что наиболее эффективной установкой для получения нанодорожек и нанотверстей является метод, при котором в конечном результате шероховатость поверхности в 2 раза меньше. Далее простые дроби переводятся в десятичные. Получается такая таблица (4.2.4).

Таблица 4.2.4

	"Квант-9"	400-Q	ЛТИ-709	MS-3S
"Квант-9"	1.000	0,5	0,25	0,17
400-Q	2	1.000	0,5	0,2
ЛТИ-709	4	2	1.000	0,5
MS-3S	6	5	2	1.000

Данная таблица является таблицей результатов парных сравнений.

Подсчитаем строчные суммы, представленные в табл. 4.2.5.

Таблица 4.2.5

	"Квант-9"	400-Q	ЛТИ-709	MS-3S	Сумма по строке
"Квант-9"	1.000	0,5	0,25	0,17	1,92
400-Q	2	1.000	0,5	0,2	3,7
ЛТИ-709	4	2	1.000	0,5	7,5
MS-3S	6	5	2	1.000	14
				Сумма	27,12

Далее следует нормировать суммы таким образом, чтобы их сумма была равна 1. Для этого нужно разделить сумму каждой строки на 27,12

(сумма последнего столбца, т.е. сумма самих строчных сумм). Результат такого разделения представлен в табл. 4.2.6.

Таблица 4.2.6

	"Квант-9"	400-Q	ЛТИ-709	MS-3S	Сумма по строке
"Квант-9"	1.000	0,5	0,25	0,17	0,07
400-Q	2	1.000	0,5	0,2	0,14
ЛТИ-709	4	2	1.000	0,5	0,28
MS-3S	6	5	2	1.000	0,52
				Сумма	1,00

В методе Саати полученные таким образом нормированные суммы принимаются в качестве оценок альтернатив по критерию «наиболее эффективный метод для получения объектов лазерной технологии».

Веса критериев получаются схожим образом. Допустим, ЛПР попарно сравнило критерии с точки зрения их сравнительной важности. Тогда результаты сравнений будут выглядеть следующим образом – табл. 4,2,7 (НД – способ получения нанодорожек; НТ – нанодоотверстий; МШ – микрошвов).

Здесь пересечение строки НТ и столбца МШ в ячейке со значением 3/1 говорит о том, что выход годных микрошвов в 3 раза больше чем нанодоотверстий.

Таблица 4.2.7

	НД	НТ	МШ
НД	$1/1$	$2/1$	$4/1$
НТ	$1/2$	$1/1$	$3/1$
МШ	$1/4$	$1/3$	$1/1$

Применяя к этой таблице описанную выше процедуру, получим веса критериев:

$$W_1 = 0,54 \text{ (НД);}$$

$$W_2 = 0,54 \text{ (НТ);}$$

$$W_3 = 0,54 \text{ (МШ).}$$

Таким образом, можем получить как веса критериев, так и оценки альтернатив по критериям [30].

С помощью метода Саати возможно осуществить автоматизацию выбора способа получения нанодорожек, наноотверстий и микрошвов (табл. 4.2.8).

Таблица 4.2.8

	НД	НТ	МШ
"Квант-9"	0,07	0,35	0,24
400-Q	0,14	0,33	0,20
ЛТИ-709	0,28	0,12	0,26
MS-3S	0,51	0,20	0,30

4.3. Выбор оптимального варианта технологического решения с учетом себестоимости научно-технической продукции

Требования к стоимости научно-технической продукции устанавливаются предельное значение себестоимости разработки образца, повышение которого приводит к выводу о нецелесообразности выполнения его разработки. Себестоимость научно-технической продукции представляет собой стоимостную оценку используемых в процессе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) природных ресурсов, сырья, материалов, топлива, энергии, основных фондов, трудовых ресурсов, а также других затрат на выполнение соответствующих работ.

Требования к стоимости научно-технической продукции, разрабатываемой в интересах создания образцов (предельной стоимости научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ), могут определяться следующими методами: альтернативным, предельно-результативным, интегральным, аналоговым, агрегатным [15].

При расчете требований к стоимости научно-технической продукции альтернативным методом в качестве критерия используется соответствие предстоящих полных затрат на создание образца дополнительным затратам по обеспечению требуемого уровня эффективности действующим оборудованием.

Обязательным условием применения альтернативного метода является совпадение множества задач образца, для которого производятся расчеты, и образца, на замену которому он предназначен. В противном случае должен быть произведен анализ возможности выполнения задач, для которых предназначен новый образец.

При расчете требований к стоимости научно-технической продукции

предельно-результативным методом используется статистическая связь затрат на разработку и изготовление образцов.

При расчете требований научно-технической продукции интегральным методом в качестве критерия используется условие обеспечения ассигнований, выделяемых на разработку, в таком объеме, чтобы с учётом себестоимости закупки установленного количества образцов, не превысить суммарные лимиты ассигнования.

При расчете требований к стоимости научно-технической продукции аналоговым методом в качестве критерия используется условие обеспечения полной стоимости разработки образца на уровне затрат на разработку его аналога с учетом отличия применяемой элементной базы и условий выполнения работы.

При расчете требований к стоимости научно-технической продукции агрегатным методом в качестве критерия используется условие обеспечения стоимости разработки образца, не превышающей суммарную предельную стоимость проведения эскизного и технологического проектирования, разработки конструкторской документации, а также изготовления и отладки опытного образца.

Затраты на математическое обеспечение определяются по формуле

$$C_{VJ} = C_K N_{orig} + C_K \left(\frac{100 - \sum_{i=1}^n X_i}{100} \right) N_{заим}, \quad (4.3.1)$$

где

C_{MO} – предельная стоимость разработки математического обеспечения;

C_K – стоимость разработки одной команды, рассчитываемая исходя из норм трудозатрат и стоимости нормо-часа в соответствии с установленным порядком обоснования трудовых затрат на предприятии-разработчике;

N_{orig} – количество разрабатываемых (единичных) оригинальных команд;
 X_i – коэффициент, зависящий от этапа разработки программ, на котором производится заимствование программного обеспечения. Принимаются значения коэффициента в зависимости от этапа разработки программного обеспечения в соответствии с таблицей, приведенной ниже.

$N_{заим}$ – количество заимствованных команд;

n – количество этапов разработки математического обеспечения, предшествующих тому этапу, на котором производится заимствование программного обеспечения [15].

Коэффициенты, применяемые при расчете стоимости разработки программного обеспечения приведены в табл. 4.3.1.

4.4. Методика расчета производительности лазерного оборудования

При выборе варианта технологического процесса и соответствующего типа оборудования, предпочтение отдается более производительной установке. Однако из-за высокой стоимости оборудования и инструмента, больших технологических потерь экономия, получаемая в результате использования более высокопроизводительного оборудования, может оказаться недостаточной, чтобы возместить расходы на разработку этого оборудования, заработную плату, амортизацию и т.д. [78].

Таким образом, такой критерий, как производительность, при оценке лучшего варианта может оказаться недостаточным. Опыт показывает, что при выборе оптимального варианта, т.е. наиболее экономичного способа изготовления оборудования и оснастки необходимо:

Таблица 4.3.1
Коэффициенты расчета стоимости разработки
программного обеспечения

Этап разработки программы	Коэффициент X_i
Техническое задание	5,0
Блок схема	10,0
Программирование	15,0
Компилятор	3,0
Автономная отладка	24,0
Комплексная отладка	25,5
Интеграция программных модулей	2,0
Документирование	6,0
Опытная/тестовая эксплуатация	8,0
Корректировка	2,0

1. Отобрать варианты, обеспечивающие выполнение всех точностных требований изготавливаемого класса объектов.
2. Оценить эти варианты по важнейшим экономическим показателям: ожидаемому проценту выхода годных, себестоимости единицы выпускаемой продукции и т.д.

В основу расчета вариантов целесообразно положить технологическую себестоимость, основанную на сопоставлении тех статей затрат, величина которых меняется при переходе от одного типа оборудования к другому. Технологическая себестоимость как сумма производственных издержек, непосредственно связанных с i -й унифицированной операцией, является функцией величины годового выпуска и процента выхода годных. В общем виде формула для расчета технологической себестоимости 1 тыс. объектов лазерной технологии выглядит следующим образом:

$$C_T = S_M + A_{II} + L_{III} + S_{об} + \frac{L_n + S_{ос} + S_x}{N_j} \text{ руб/тыс,} \quad (4.4.1)$$

где

S_M – расходы на специальный материал и технологическую энергию;

A_{II} – стоимость технологических потерь;

L_{III} – оплата штучного времени основных производственных рабочих (операторов);

$S_{об}$ – расходы на эксплуатацию оборудования;

L_n – оплата подготовительно-заключительного времени за год;

$S_{ос}$ – расходы на оснастку за год;

S_x – расходы на холостой режим работы за год;

N_j – годовой выпуск объекта j -ой номенклатуры, тыс. штук.

Основная трудность в расчете технологической себестоимости состоит в определении стоимости технологических потерь A_{II} , являющихся одним из главных факторов при оценке рассматриваемых вариантов технологии и оборудования

$$A_{II} = H_{(\ominus-1)j} \cdot \left(1 - \frac{\Gamma_{ij}}{100}\right), \quad (4.4.2)$$

где

$i=1, 2, \dots, V$ – номер унифицированной операции;

$j=1, 2, \dots, Q$ – количество номенклатурных групп;

$\Theta=1, 2, \dots, W_j$ – общее количество операций;

$H_{(\Theta-1)j}$ – стоимость партии изделий j -й номенклатурной группы в незавершённом производстве после $(\Theta-1)$ операций технологического маршрута, которую можно вычислить:

$$H_{(\Theta-1)j} = C_{0j} * L_j + \sum_{\Theta=1}^{\Theta-1} C_{\Theta j}, \quad \Theta = 1, 2, \dots, W_j, \quad (4.4.3)$$

где

L_j – количество заготовок j -ой номенклатуры, обрабатываемых в одной партии;

C_{0j} – стоимость заготовки изделий j -ой номенклатуры;

$C_{\Theta j}$ – затраты на обработку партии изделий j -ой номенклатурной группы на Θ -ой операции, которые вычисляются на основе нормативных трудовых и материальных затрат.

При выборе номенклатуры оборудования и экономическом сравнении вариантов технологического процесса и оборудования на основе технологической себестоимости необходимо достаточно точно определять или прогнозировать величину процента выхода годных j -ой номенклатурной группы Γ_{ij} на рассматриваемой i -ой унифицированной операции. Процент выхода Γ_{ij} зависит от точностных характеристик объекта (1), состояния дел в производстве (2), взаимозависимости параметров технологического процесса (ТП) и условий их поддержания (3) и способности оборудования стабильно обеспечивать эти условия (4) [78].

При анализе производительности используют понятия цифровой и тактической производительности. Цикловая производительность лазерного оборудования μ определяется соотношением

$$\mu = \frac{1}{t_p + t_x}$$

где t_p – время рабочих ходов установки;

t_x – время холостых ходов установки;

Фактическая производительность учитывает потери производительности, обусловленные различными причинами. Такие потери принято называть внецикловыми. Внецикловые потери исследованы мало, причём в основном анализу подвергались потери, обусловленные надёжностью самих машин и инструмента.

Остановимся лишь на тех внецикловых потерях, которые обусловлены различием работы комплексов оборудования 1-го и 2-го типов:

Комплексы 1-го типа работают в условиях прямоточности, непрерывности, ритмичности за счёт создания межоперационных заделов. К комплексам оборудования 1-го типа относится оборудование 1-ой и 3-ей фаз производства.

Комплексы 2-го типа работают при нарушении ритмичности. Поток изделий, поступающий на установки, носит случайный характер. Для комплексов оборудования 2-го типа большой интерес представляет расчёт изменений фактической производительности установок, вызванный несвоевременным поступлением изделий на обработку.

Рассмотрим в связи с этим особенности работы различного оборудования. Можно выделить три типичные циклограммы:

Первая циклограмма характерна для оборудования, у которого вспомогательное время t_v соизмеримо с временем обработки t_m .

Вторая — для установок, время загрузки и выгрузки которых пренебрежимо мало по сравнению с временем обработки t_m .

Третья циклограмма относится к многопозиционным автоматам, поточным линиям с жесткими связями, на которых изделие при обработке последовательно проходит различные операции, причем время каждой из них постоянно и равно T [78].

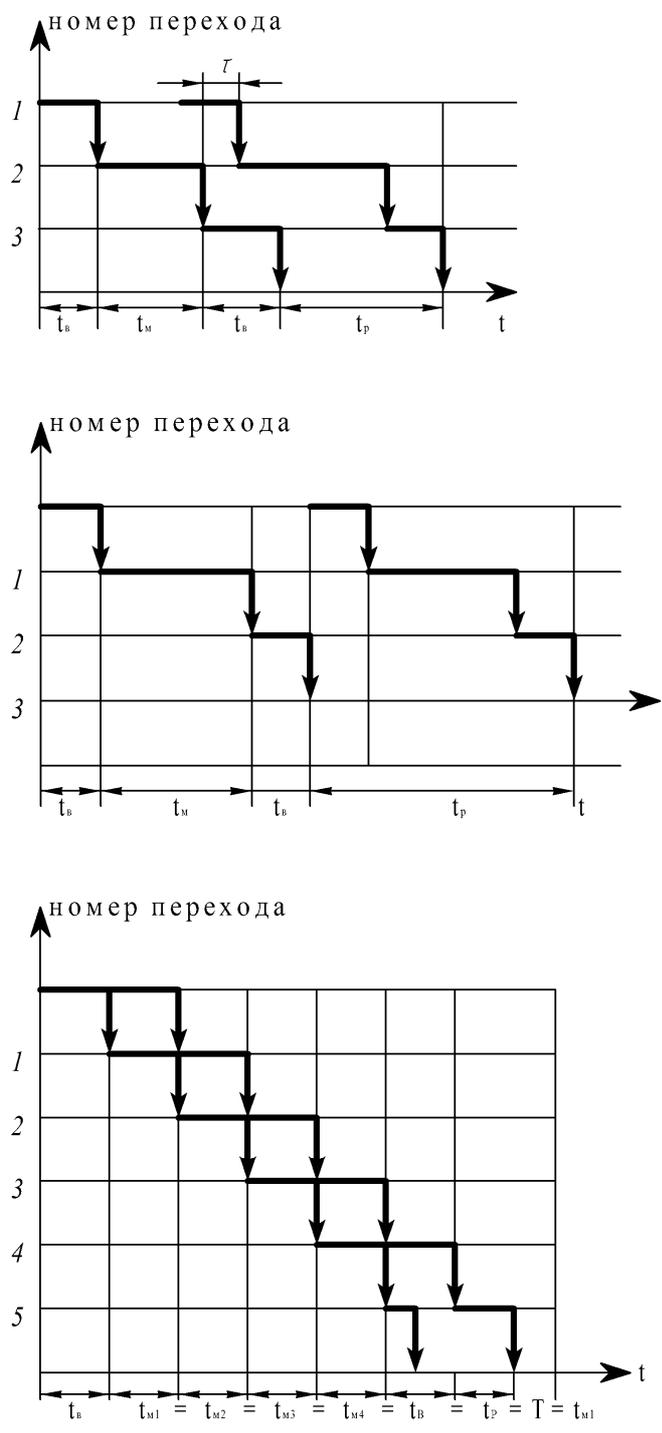


Рис. 4.4.1. Циклограммы работы лазерного технологического оборудования

Все циклограммы построены в предположении, что количество заготовок в ходе работы установки достаточно для её непрерывного функционирования (оборудование I-го типа). Однако, при случайном потоке изделий это предположение выполняется не всегда (оборудование II-го типа).

Оценим производительность обоих типов оборудования.

Для оборудования I-го типа:

1. $\mu = \frac{1}{t_p}$, парт/ч. для оборудования, у которого $t_g \approx t_m$;
2. $\mu = \frac{1}{t_m}$, парт/ч. для оборудования, у которого $t_g \ll t_m$;
3. $\mu = \frac{1}{T}$, парт/ч. для многопозиционных автоматов.

Для оборудования II-го типа:

1. Обозначим через q вероятность того, что на установку с $t_g \approx t_m$ за время t_p не поступит ни одной заготовки. В результате возникает простой в течение времени Δt . Тогда через $p = 1 - q$ обозначим вероятность того, что за время t_p поступила хотя бы одна заготовка и, значит простоя, снижающего производительность оборудования, нет. Тогда среднее время работы установки можно определить [46]:

$$\overline{t_p} = (1-q)t_p + q(t_p + \Delta t) = t_p + q\Delta t . \quad (4.4.4)$$

Наличие время простоя Δt приводит к уменьшению времени, в течение которого время обработки t_i и вспомогательное время t_g совмещены.

Наибольшее время совмещения (допустимое время простоя) составляет:

$$\tau = t_g + t_m - t_p ;$$

$$\overline{t_p} = t_p + q\tau .$$

2. Для установок с $t_e \ll t_m$ среднее фактическое время работы установки определяется по формуле (1), в которой:

$$\Delta t = \int_{tp}^{\infty} t \cdot f(t) dt,$$

где Δt – время простоя; $f(t)$ – плотность распределения вероятности потока изделий на входе установки.

3. Для определения средней фактической производительности поточной линии с n последовательными позициями и жесткими связями введем:

а) q_v – вероятность того, что заготовка поступит на обработку в интервале времени

$$v \cdot T \leq t \leq (v+1) \cdot T, \quad v=1, 2, \dots, n-1;$$

б) q_n – вероятность того, что заготовка поступит в момент времени, когда все позиции свободны. В этом случае время обработки ее составит:

$$t_{обп} = n \cdot T + \Delta t,$$

где Δt – простой всей линии;

в) $p = 1 - \sum_{v=1}^n q_v$ – вероятность того, что заготовка поступит на обра-

ботку тогда, когда первая позиция свободна, т.е. снижения производительности нет. В этом случае средний рабочий цикл поточной линии определяется соотношением:

$$\bar{tp} = \left(1 - \sum_{v=1}^n q_v\right) T + T \sum_{v=1}^{n-1} v q_v + q_n (nT + \Delta t) = T \left[1 + \sum_{v=1}^n (v-1) q_v\right] + q_n [(n-1)T + \Delta t].$$

Тогда средняя фактическая производительность установок II-го типа будет равна:

$$\text{a) } \bar{\mu} = \frac{1}{t_p} = \frac{1}{t_p + q\tau}, \text{ для случая } t_e \approx t_m;$$

$$\text{б) } \bar{\mu} = \frac{1}{t_p} = \frac{1}{t_p + q\Delta t}, \text{ где } \Delta t = \int_{t_p}^{\infty} t \cdot f(t) dt, \text{ для } t_e \approx t_m;$$

$$\text{в) } \bar{\mu} = \frac{1}{t_p} = \frac{1}{T \left[1 + \sum_{v=1}^n (v-1)q_v \right] + q_n [(n-1)T + \Delta t]}, \text{ для поточной линии.}$$

Относительное снижение производительности установок второго типа равно:

$$\delta\mu = \frac{\bar{\mu} - \mu}{\mu} \cdot 100 = \frac{t_p - \bar{t}_p}{\bar{t}_p} \cdot 100.$$

При многономенклатурном производстве среднее время обработки партий заготовок на i -й унифицированной операции рассчитывается по формуле [1]:

$$\bar{t}_{обp} = \sum_{j=1}^Q P_{ij} \cdot \bar{t}_{обp\ ij},$$

где $P_{ij} = \frac{\lambda_{ij}}{\lambda_i}$ – частота появления типа j и i -й унифицированной операции;

λ_{ij} – планируемый объем работ на i -й унифицированной операции для j -го изделия; λ_i – общий объем работ на i -й унифицированной операции.

ГЛАВА 5. СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ ПОИСКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВОК

5.1. Обобщенный критерий оценки качества лазерных установок

Обобщенный критерий K_N включает в себя функциональные экологические и экономические локальные критерии. Каждый из перечисленных локальных критериев определяется следующими параметрами: функциональным (мощность, полный КПД лазера, длительность импульса излучения); экологическим (уровень электромагнитного излучения); экономическим (стоимость, окупаемость).

Представим процесс потери качества производительности лазерных установок (ЛУ) как некоторую абстрагированную математическую модель. Пусть X_1, X_2, \dots, X_k параметры ЛУ, определяющие состояние, которое является функциями времени t . Принадлежность состояния X к множеству G_X свидетельствует о том, что ЛУ отвечает критериям качества. Если значения параметров X_1, X_2, \dots, X_k больше допустимых $X_{1p}, X_{2p}, \dots, X_{kp}$, т. е. $X_1 > X_{1p}, X_2 > X_{2p}, \dots, X_k > X_{kp}$, то ЛУ являются неудовлетворяющими параметрам качества. Если некоторые из значений параметров X будут больше допустимых, а другие меньше допустимых, то ЛУ являются частично удовлетворяющими параметрам качества. Для условия полного удовлетворения параметрам качества ЛУ $X_k \leq X_{kp}$, что соответствует тому, что множество $G_X \subseteq G_{xp}$. При этом запас по качеству будет определяться

$K_i = \frac{X_{ip}}{X_i}$, тогда качество по длительности импульса – $K_1 = \frac{t_p}{t}$. Качество

по КПД – $K_2 = \frac{\rho_p}{\rho}$, качество по мощности – $K_3 = \frac{P_p}{P}$, качество по уровню электромагнитного излучения – $K_4 = \frac{N_p}{N}$, качество по стоимости – $K_5 = \frac{C_p}{C}$, качество по окупаемости – $K_6 = \frac{O_p}{O}$. Здесь $t_p, \rho_p, P_p, N_p, C_p, O_p$ – допустимые значения длительности импульса, КПД, мощности, уровня электромагнитного излучения, стоимости и срока окупаемости для ЛУ. t, ρ, P, N, C, O – фактические значения указанных выше величин. Обобщённый критерий оценки качества в соответствии со схемой, представленной на рис. 5.1.1, принимается в виде:

$$\frac{1}{K_N} = \frac{a_1}{K_1} + \frac{a_2}{K_2} + \frac{a_3}{K_3} + \frac{a_4}{K_4} + \frac{a_5}{K_5} + \frac{a_6}{K_6},$$

где $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ – весовые коэффициенты (для определения этих коэффициентов используется метод экспертных оценок) $\sum_{i=1}^6 a_i = 1$, а в общем виде:

$$K_N = \frac{1}{\sum_{i=1}^6 a_i / K_i}.$$

5.2. Алгоритмы поиска технических решений лазерных установок

Одними из элементов системы автоматизированного проектирования, позволяющими проектировать процесс как исполнительный орган в системе обратной связи лазерного оборудования являются разработанные алгоритмы поиска технических решений при проектировании процессов

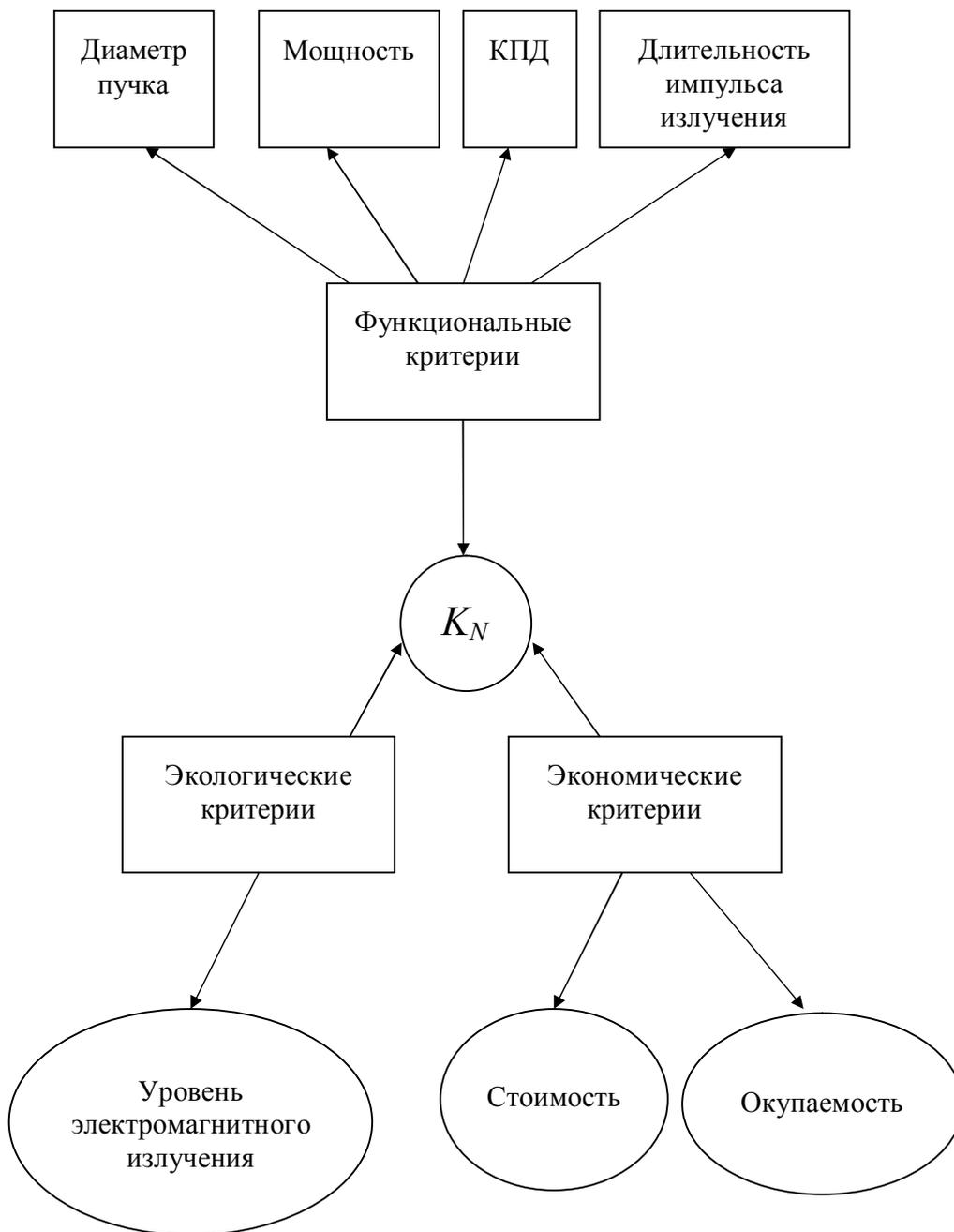


Рис. 5.1.1. Обобщенный критерий оценки качества лазерных установок

формирования объектов. Данный процесс необходимо автоматизировать с целью уменьшения времени, затрачиваемого на проектирование процессов формирования объектов. Предложенные алгоритмы поиска технических решений позволяют автоматизировать этот процесс.

На рис. 5.2.1 – 5.2.2. представлен алгоритм выбора наилучшего варианта лазерной установки с помощью обобщенного критерия оценки качества и анализа технической себестоимости выбранных решений.

Первый этап позволяет осуществить выбор лазерных установок, удовлетворяющих техническому заданию.

На этом этапе возможны следующие случаи:

- ТЗ соответствует несколько лазерных установок;
- ТЗ соответствует одна лазерная установка;
- ТЗ не соответствует ни одна лазерная установка.

В первом случае переходим ко второй стадии выбора, во втором – задачу считаем решенной, в третьем – производим либо пересмотр ТЗ, либо выполняем выбор ближайшего прототипа и производим его модернизацию. После этого добавляем обновленную лазерную установку в морфологическую таблицу, либо разрабатываем новую конструкцию, после чего добавляем новую лазерную установку в морфологическую таблицу.

На первом этапе осуществляется выбор оптимальных лазерных установок (принадлежащих множеству Парето).

Третьим этапом является выбор лучшей лазерной установки с помощью обобщенного критерия качества, а так же анализа технической себестоимости выбранных решений.

Для выделения определенной части множества Парето или нахождения некоторой единственной точки этого множества, необходимо иметь

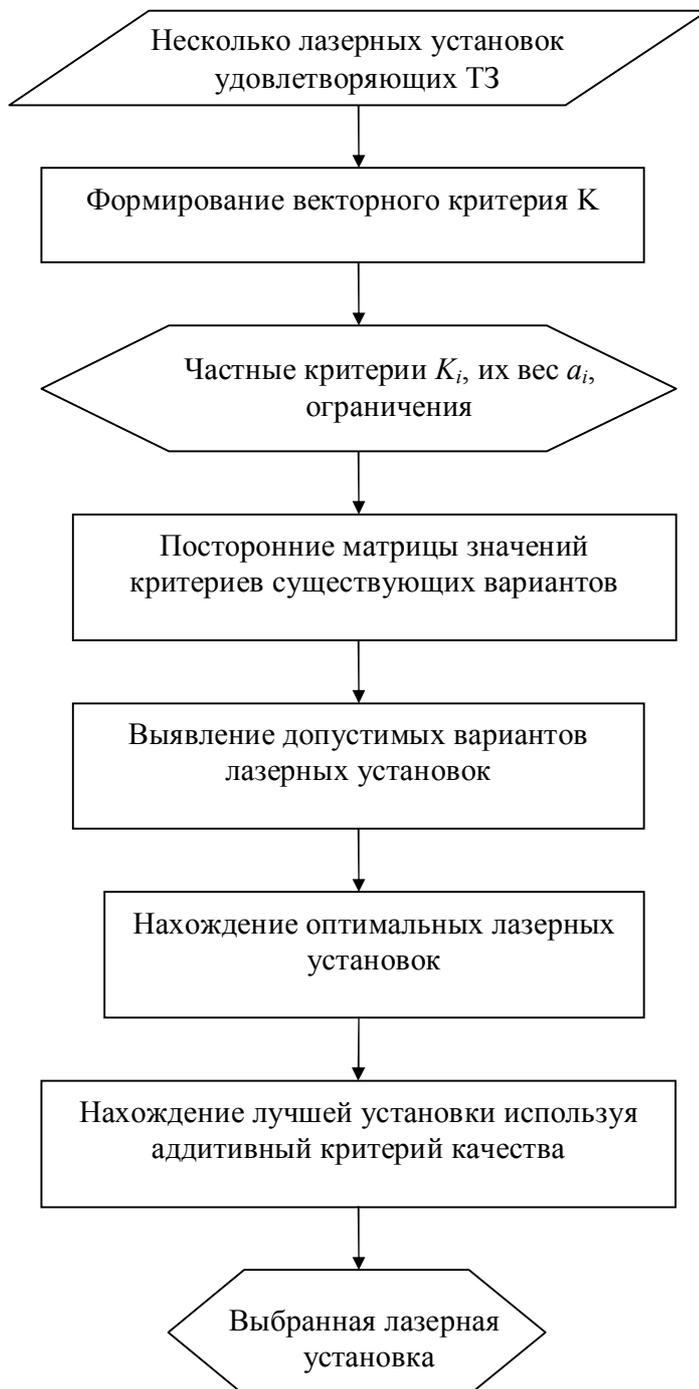


Рис. 5.2.1. Алгоритм выбора лучшей лазерной установки по критерию K

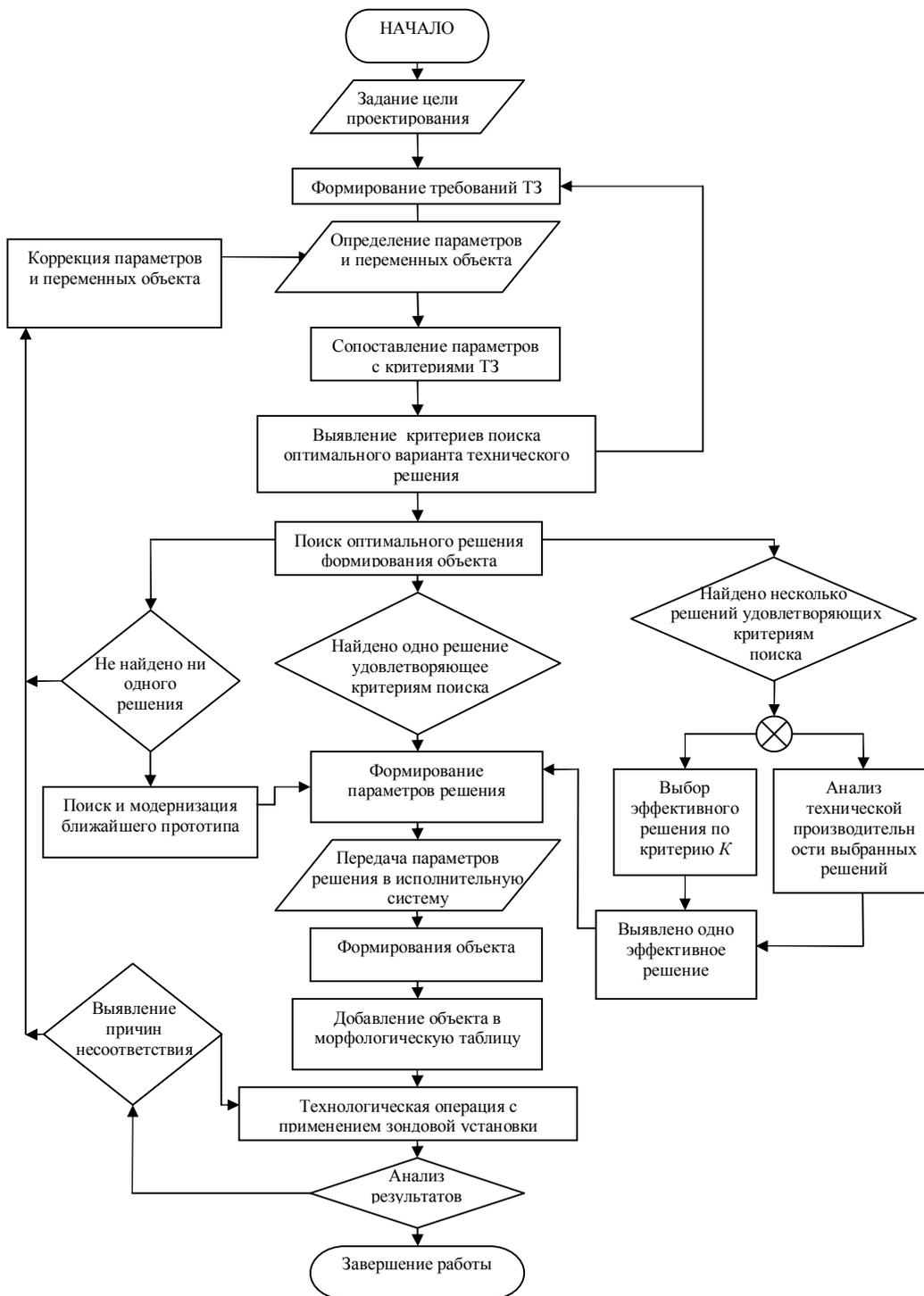


Рис. 5.2.2. Обобщенный алгоритм выбора лазерной установки при формировании объектов в лазерной технологии

дополнительную информацию о критериях установки. Здесь, основная цель проектировщика – наличие наибольшего количества информации о критериальном множестве. Только обладая такой информацией, появляется возможность рационального подбора параметров с использованием методов соответствующим требованиям проектирования лазерной установки.

5.3. Вариант технологического решения лазерно-зондовой установки

Лазерно-зондовая установка (рис. 5.3.1) содержит технологическую камеру с возможностью подачи рабочего газа, внутри которой расположен подложкодержатель снабженный системой виброзащиты, систему прецизионного позиционирования зонда и жестко закрепленный на ней зонд, снабженный устройством нагрева и устройством генерацией ультразвукового воздействия, систему прецизионного позиционирования жестко связанную с системой генерации лазерного воздействия.

На рис. 5.3.2 представлен алгоритм работы устройства.

С помощью системы генерации лазерного воздействия на образец подается поток лазерного излучения и происходит начальная стадия формирования объекта. Следующим этапом формирования объекта является воздействие зонда установки на созданный объект.

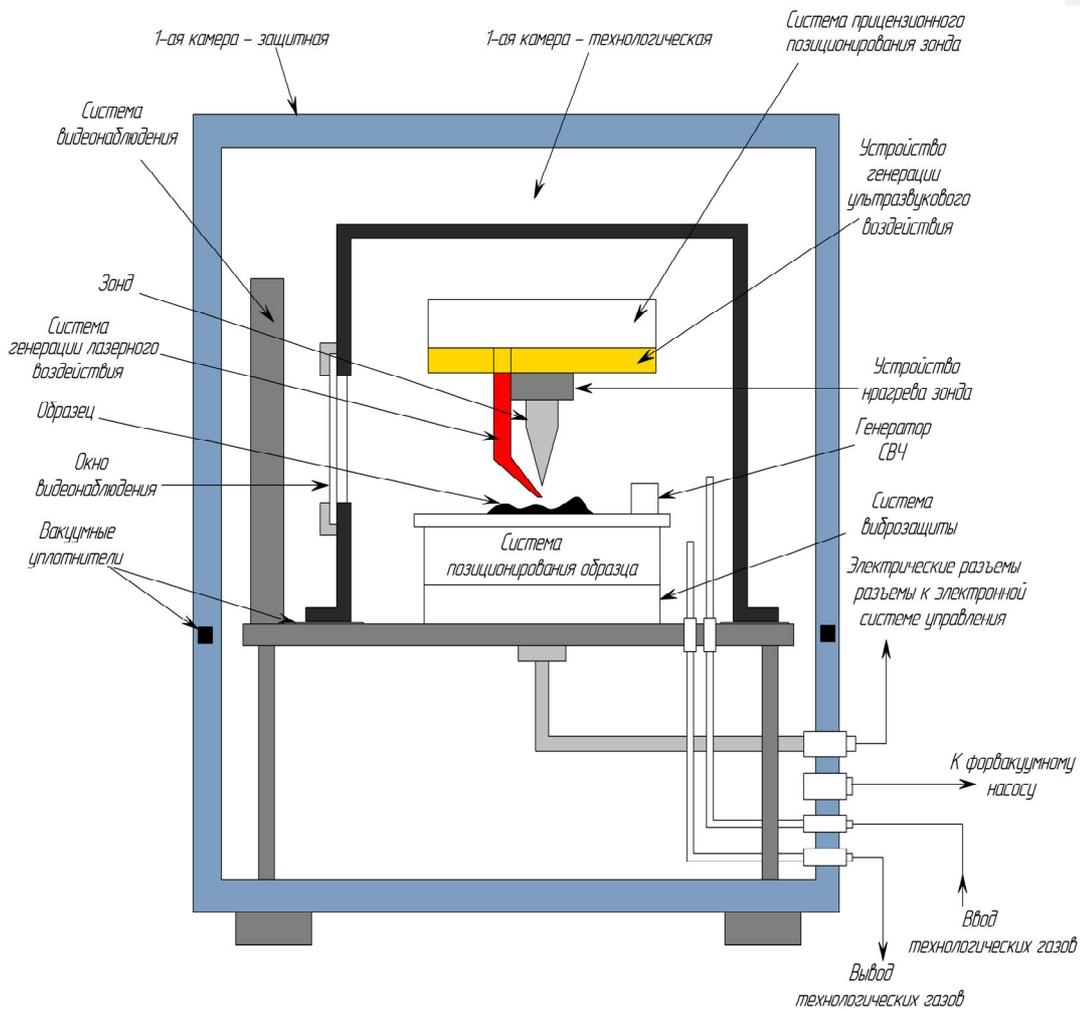


Рис. 5.3.1. Технологическая установка «Луч-2» с системой локального лазерного воздействия

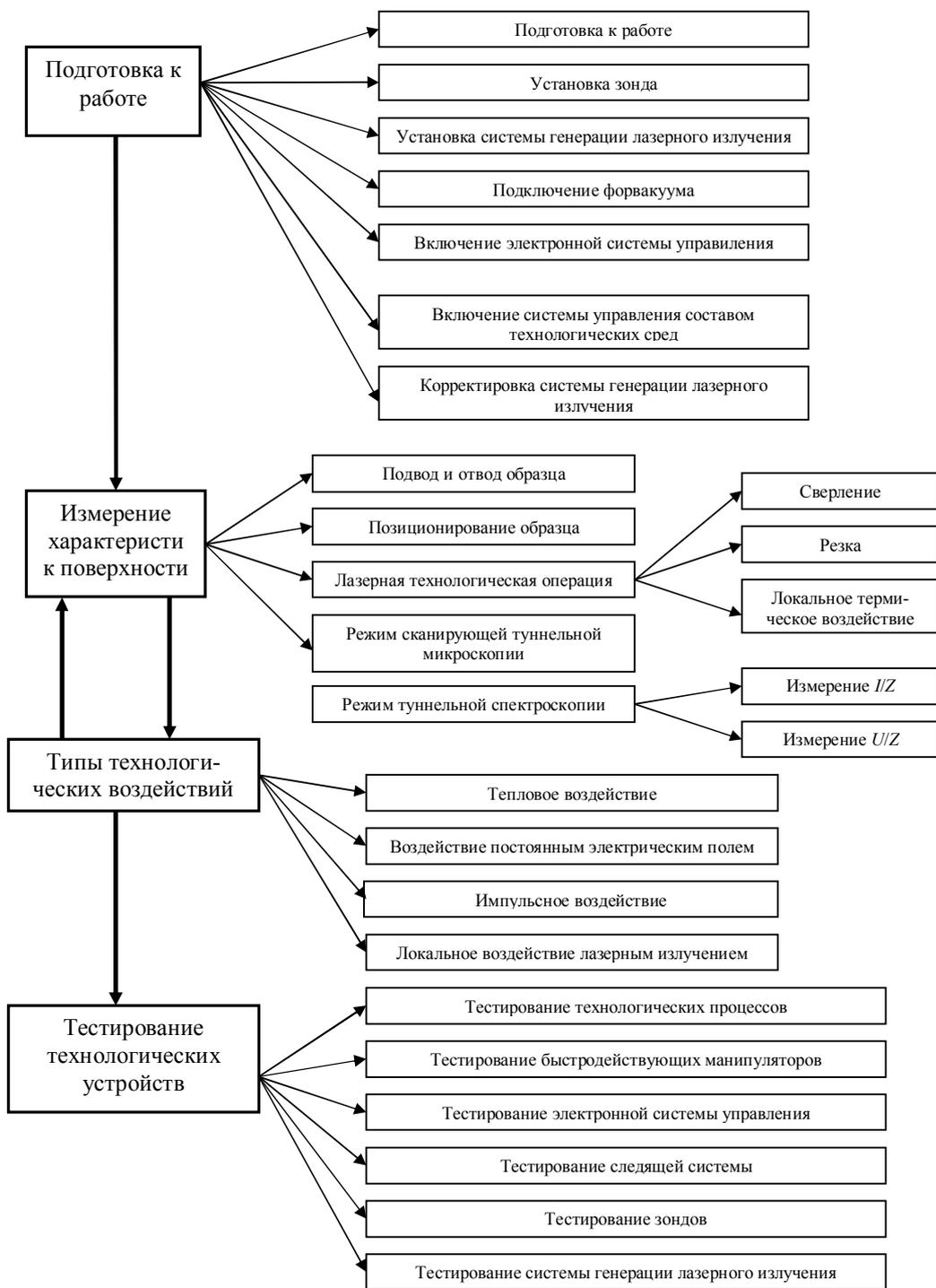


Рис. 5.3.2. Блок-схема режимов работы установки «Луч-2» с системой локального лазерного воздействия

ГЛАВА 6. ФОРМИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ В ЛАЗЕРНО-ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

6.1. Механическое воздействие лазерного излучения на атомы

В исследованиях воздействия излучения на микрочастицы вещества прежде всего обращают внимание на электромагнитный характер воздействия, приводящий, в частности, и к передаче энергии излучения во внутренние степени свободы микрочастиц. Помимо этого существует, однако, и прямое механическое воздействие, которое обычно считается слабым, но в определенных условиях и оно способно проявиться довольно ярко.

С тех пор как была открыта квантовая природа излучения, стало ясно, что квант излучения (фотон) обладает энергией $\bar{h}\omega$ и импульсом $\bar{h}k$, где ω – частота (круговая) излучения; k – волновой вектор; \bar{h} – постоянная Планка. Величина волнового вектора связана с длиной волны излучения λ соотношением $k=2\pi/\lambda$. При поглощении фотона частицей вещества последней передается импульс $\bar{h}k$. В случае оптической или более длинноволновой области спектра величина импульса фотона очень мала по сравнению с характерным значением импульса, которым обычно обладает частица вещества, хотя бы вследствие ее теплового движения. Например, если в качестве частицы вещества выступает атом массы M со скоростью теплового движения $v_T = \sqrt{\frac{2k_B T}{M}}$ (k_B – постоянная Больцмана, T – температура), то отношение импульса фотона к импульсу такого атома есть

$$\frac{\bar{h}k}{Mv_T} = \frac{2\pi\bar{h}}{\lambda\sqrt{2k_B TM}}. \quad (6.1.1)$$

Даже в случае атома водорода при комнатной температуре оптический квант ($\lambda \sim 0,5$ мкм) при поглощении чрезвычайно слабо меняет состояние его движения: отношение (6.1.1) составляет $\approx 3 \cdot 10^{-4}$. Разумеется, чем тяжелее атом (молекула), тем слабее это влияние. Тем не менее эффект может накапливаться, если частица вещества испытывает многократные акты поглощения направленного излучения. В обычных условиях, однако, приобретенный частицей импульс через определенное время теряется за счет взаимодействия ее с окружением и эффект остается слабым, если не использовать специальные источники излучения. Источники излучения, существовавшие в прежние времена (в долазерную эпоху), не могли обеспечить яркого проявления эффекта, а для его наблюдения требовалось высокое экспериментальное искусство. Существуют, правда, специфические условия, реализуемые в космических просторах в окрестностях звезд. Здесь атомы и молекулы вещества могут находиться в свободном состоянии (без столкновений друг с другом) исключительно долгое время, да и само излучение здесь достаточно интенсивное. В ряде случаев интенсивность излучения звезды достаточно высока для того, чтобы сила светового давления преодолела силу гравитационного притяжения. Тогда происходит накопление частицей импульса, направленного от звезды, и она с ускорением покидает окрестность звезды. Это хорошо известный и часто наблюдаемый эффект звездного ветра.

Резко усилить эффект светового давления позволило одно из уникальных свойств лазерного излучения – возможность сосредоточивать его энергию в узкой спектральной области и настроить эту область в резонанс с квантовым переходом внутри атома (резонансное световое давление). Величина этой энергии на несколько порядков выше той, которая могла быть достигнута с помощью резонансных спектральных источников,

использованных в экспериментах П.Н. Лебедева и более поздних экспериментах С.Э. Фриша. Чтобы эффект светового давления мог накапливаться, используют камеры с высоким вакуумом. Атомы исследуемого элемента либо находятся в малом количестве в этих камерах в обычных (равновесных) условиях, либо поставляются туда (инжектируются) в виде атомного пучка при постоянно действующей вакуумной откачке. В любом случае обеспечиваются условия, при которых атом может пролететь расстояние порядка метра с тепловой скоростью без столкновений с другими атомами. Частота излучения настраивается в резонанс с квантовым переходом атома из основного энергетического состояния (обозначим это состояние индексом 0) в первое возбужденное состояние (ему припишем индекс 1). Все остальные внутренние состояния (уровни энергии) атома не принимают участия в процессе. На такой простой (двухуровневой) модели атома вполне можно уяснить главные черты явления.

Рассмотрим, прежде всего случай бегущей монохроматической волны излучения. Примем следующие начальные условия: атом находится в основном состоянии, а частота излучения ω близка (в системе координат, связанной с атомом) к частоте $\omega_{(10)}$ квантового перехода в атоме.

Механическое действие излучения на атом в данной ситуации развивается по следующему сценарию. Атом поглощает квант излучения и как следствие воспринимает квант импульса $\hbar k$. При этом атом оказывается в возбужденном состоянии 1. Акт поглощения фотона происходит тем быстрее, чем выше интенсивность излучения. Дальнейшая судьба атома реализуется альтернативно по одному из двух путей (рис. 6.1.1): атом испускает либо точно такой же фотон, что и поглощенный ранее, то есть с теми же энергией и импульсом (случай *a* на рис. 6.1.1), либо фотон с той же энергией, но равновероятно во всех направлениях (случай *b* на рис. 6.1.1). Первый вариант соответствует процессу вынужденного испускания (этот процесс был теоретически описан

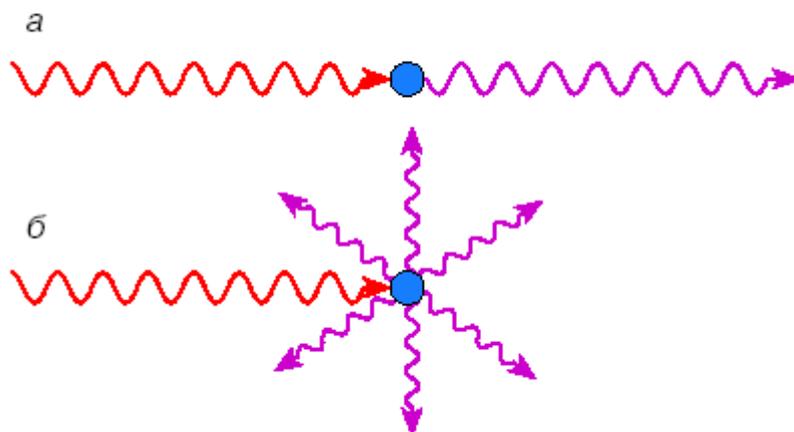


Рис. 6.1.1. Иллюстрация к процессам вынужденного (а) и спонтанного (б) испускания. Во втором случае иллюстрацию надо понимать не как испускание многих мелких фотонов, а как испускание одного, но равновероятного во всех направлениях

А. Эйнштейном и играет определяющую роль в работе всех лазеров). Вероятность его тем выше, чем выше интенсивность вынуждающего его внешнего излучения. Во втором случае происходит процесс самопроизвольного (спонтанного) испускания, вероятность которого никак не зависит от интенсивности внешнего излучения (в частности, поэтому равновероятны все направления спонтанно испущенных фотонов). После испускания фотона (как спонтанно, так и индуцированно) атом опять оказывается в основном энергетическом состоянии. На этом завершается единичный цикл, который затем будет повторяться снова и снова.

Отметим принципиальное отличие процессов вынужденного и спонтанного испускания фотона с точки зрения передачи импульса со стороны излучения атому. Если цикл реализовался по каналу поглощение – вынужденное испускание, то импульс атома целиком восстановился, поскольку

как перед началом, так и в конце цикла имеем в наличии фотон с одним и тем же импульсом $\bar{h}k$. Таким образом, за счет процесса вынужденного испускания атом не получает систематического приращения импульса. Максимум, что может передать излучение атому в данном случае, – это импульс $\bar{h}k$ в среднем по времени: при достаточно большой интенсивности излучения атом половину времени проводит в возбужденном состоянии, неся в себе при этом импульс фотона $\bar{h}k$. Совсем иное дело, когда цикл завершается спонтанным испусканием. В этом случае из-за различия направлений поглощенного и испущенного фотонов в атоме остается ненулевой импульс. При многократном повторении такого типа циклов сумма импульсов отдачи со стороны спонтанно испущенных фотонов в силу изотропности этого процесса близка к нулю, тогда как принимаемый атомом импульс от поглощенных фотонов направленного излучения есть $N\bar{h}k$, где N – число циклов. Это и есть итоговый импульс, который, как видим, способен накапливаться в атоме. Это накопление можно характеризовать средней силой F , действующей со стороны излучения на атом. Используем соотношение: сила $F = dp / dt$ есть импульс, передаваемый атому в единицу времени. Последний легко подсчитать, зная число актов спонтанного испускания в единицу времени. Оно есть $\bar{\omega}\gamma = \frac{\bar{\omega}}{\tau}$, где $\bar{\omega}$ – вероятность нахождения атома в возбужденном состоянии; γ – так называемая константа спонтанной релаксации, равная обратному времени жизни x возбужденного состояния (это время жизни как раз и обуславливается спонтанным испусканием фотона). Таким образом,

$$F = \frac{dp}{dt} = \bar{h}k\bar{\omega}\gamma .$$

Итак, в бегущей волне излучения основная сила, действующая на

атом, возникает благодаря изотропному спонтанному испусканию. Чтобы отличить от других видов сил (о них будет речь дальше), ее стали называть силой спонтанного светового давления, причем она генетически связана с той силой, которую измерял еще П.Н. Лебедев.

Оценим, насколько сильно может повлиять лазерное излучение на состояние движения атома. При относительно слабых интенсивностях излучения величина \bar{w} пропорциональна интенсивности. В поле интенсивного излучения происходит насыщение (величина \bar{w} перестает расти), максимальное значение которого в принципе может достигать величины \bar{w} , равной $\frac{1}{2}$. Оно реализуется в таких условиях, когда за время порядка τ атом много раз попеременно бывает то в основном, то в возбужденном состоянии вследствие вынужденных переходов. Примечателен тот факт, что эти условия легко осуществить за счет фокусировки излучения с помощью даже плохонького (мощностью в несколько милливатт) лазера, если частота излучения настроена в резонанс с квантовым переходом в атоме. Существующие сейчас лазеры, используемые для подобного типа задач, способны обеспечивать существенно большую мощность в непрерывном режиме (несколько ватт и более).

Итак, максимально возможная сила спонтанного светового давления создает максимальное ускорение

$$a_{\max} = \frac{\bar{h}k\gamma}{2M} .$$

6.2. Особенности поглощения светового излучения материалом

Лазерное излучение характеризуется рядом уникальных свойств. К их числу относятся большая интенсивность (плотность тока) электромаг-

нитной энергии, высокая монохроматичность, значительная степень временной и пространственной когерентности. В отличие от других источников электромагнитной энергии лазерное излучение обладает очень узкой направленностью или малой расходимостью луча.

Затухание плотности светового потока в конденсированных средах происходит в соответствии с законом Бугера-Ламберта:

$$q = q_0 A \exp\left(-\int \alpha(x) dx\right), \quad (6.2.1)$$

где q и q_0 – плотность потока излучения соответственно на глубине x от поверхности и на поверхности облучаемого тела; A – доля поглощенного потока; α – коэффициент поглощения света.

Для случая изотропной и однородной поглощающей среды выражение (6.1.1) приводится к виду

$$q = A q_0 \exp(-\alpha x).$$

Для металлических материалов поглощение лазерного излучения описывается моделью свободных электронов. Согласно этой модели падающий на поверхность металла световой поток практически полностью поглощается свободными электронами в тонком слое толщиной $d = \alpha^{-1} = 10^{-5} \dots 10^{-6}$ см. В дальнейшем происходит электрон-электронная релаксация с характерной частотой ν_{ee} . Вместе с тем вследствие электрон-фононного взаимодействия с частотой ν_{ep} происходит передача энергии от электронного газа к решетке. В результате энергия фононного газа или тепловых колебаний решетки возрастает. Если частота фонон-фононного взаимодействия ν_{pp} больше частоты электрон-фононной релаксации ν_{ep} , то энергетическая функция распределения фононного газа останется равновесной. Для большей оценки процессов лазерного воздействия на материалы проводят оценку для частоты взаимодействия $\nu_{ef}, \nu_{ee}, \nu_{ep}, \nu_{pp}$.

Частоту столкновений электронов с фононами можно оценить с помощью соотношения

$$v_{ef} = \frac{\alpha q_0}{h\nu n'},$$

где n' – концентрация поглощаемых электронов.

Поскольку для лазерного излучения видимого диапазона в ближней инфракрасной области выполняется условие $h\nu \gg kT_e$ (h – постоянная Планка; ν – частота; k – постоянная Больцмана; T_e – температура электрона), то в поглощении будут участвовать лишь электроны с $E = h\nu$ вблизи уровня Ферми.

Тогда

$$n' = \frac{nh\nu}{E_f}, \quad (6.2.2)$$

где $n = 5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ – число электронов проводимости в единице объема нормальных металлов, E_f – уровень Ферми. Проводя, например, оценку для излучения лазера на иттий-алюминиевом гранате (вторая гармоника) и принимая $\alpha = 10^6 \text{ см}^{-1}$, в соответствии с формулой (6.2.2) получаем

$$v_{ef} = (1.5 \dots 3.0) 10^2 q_0,$$

где v_f – скорость электрона на поверхности Ферми; σ_{ee} – резерфордское сечение взаимодействия для рассеяния электронов на электродах; kT_e – область размытости функции Ферми.

Принимая для начальной и конечной электронных температур значения соответственно 300 К и 3000 К, получаем $v_{ee} = (10^{11} \dots 10^{13}) \text{ с}^{-1}$.

Частота электрон-фононной релаксации может быть выражена через коэффициент теплообмена между электронами и фононами u :

$$v_{ep} = \frac{u}{\gamma_i C_i} = \frac{\pi^2}{15} \cdot \frac{nk\nu_3^2}{\gamma_i c_i d_0 \nu_f},$$

где γ_i - плотность материала; c_i – теплоемкость; d_0 – постоянная решетки; ν_3 – скорость звука в металле.

Оценку частоты энергии фононного газа можно выполнить по формуле

$$v_{pp} = \frac{k\Gamma^2 T_p}{d_0 m_i \nu_3},$$

где Γ – параметр Грюнайзена, определяющий коэффициент температурного расширения решетки; T_p – температура решетки; m_i – масса иона.

При начальной и конечной температурах решетки 300 К и 3000 К получаем $v_{pp} = (10^{13} \dots 10^{14})c^{-1}$. Соответствующие времена передачи энергии обратны частотам процессов.

В отличие от других металлов в энергетическом спектре полупроводников и диэлектриков существует запретная зона E_d , не содержащая энергетических уровней. Поэтому важным фактором является соотношение между энергией кванта $h\nu$ и шириной запрещенной зоны E_d . В зависимости от этого соотношения для полупроводниковых материалов выделяют следующие типы механизмов поглощения:

а) металлический ($h\nu < E_d$, $E_i \leq kT$), где E_i – энергия примесных уровней; T – температура материала, который характерен для легированных полупроводников, когда в зоне проводимости имеется большая концентрация свободных носителей

$$n_e \approx \exp\left[-\frac{E_i}{kT}\right];$$

б) примесный ($h\nu < E_d$, $h\nu > E_i > kT$), который характерен для примесных полупроводников, когда энергия кванта света меньше ширины запрещенной зоны, но превосходит энергию донорных или акцепторных уровней;

в) индуцированный металлический ($h\nu > E_d$), который характерен для

поглощения в полупроводниках квантов видимого диапазона частот и существенен, когда вероятности процессов безызлучательной рекомбинации малы, а поглощение происходит на неравновесных свободных носителях, генерируемых этим же излучением;

г) полупроводниковый ($h\nu > E_d$), который характерен для собственных (чистых) полупроводников и наблюдается при относительно невысоких уровнях плотности потока излучения и в дальнейшем переходящий в индуцированный металлический тип поглощения;

д) диэлектрический ($h\nu \ll E_d$), когда поглощение происходит при непосредственном взаимодействии излучения с решеткой (оптической ветвью фотонного спектра).

При мощных коротких импульсах лазерного излучения на полупроводники за времена $\tau \ll \tau_u$ концентрация свободных электронов повышается до $10^{20} \dots 10^{21}$ и полупроводник по оптическим свойствам приближается к металлу. Начальный коэффициент поглощения излучения в полупроводниках варьируется в диапазоне от 10^3 до 10^4 см^{-1} .

Перенос энергии от поверхностного слоя, поглотившего излучение, к объему материала, как в случае металлов, так и полупроводников определяется процессами теплопроводности.

Поскольку учет всех параметров и особенностей сложных процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом практически невозможен, при их анализе часто используют понятия “критическая интенсивность” или “критическая плотность потока”. Эти термины в определенной степени условны, так как связаны с понятием разрушения вещества, также имеющим условный характер. В лазерной обработке (технологии) под началом разрушения чаще всего подразумевают плавление поверхности, хотя необратимые изменения большинства материалов происходят и при нагреве ниже температуры плавления. Использование коротких и мощных импульсов лазерного излучения для модификации материалов достаточно

перспективно ввиду реализации аномально высоких скоростей нагрева и остывания материала, поглотившего излучение.

Используя критические плотности потока $q_c^{(i)} = (i=1\dots4)$, можно классифицировать технологические процессы и рассматривать их последовательно при переходе от одной критической плотности к другой.

Критическая плотность потока, необходимая для достижения к концу импульса излучения на поверхности тела температуры плавления

$$q_c^{(1)} < \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{T_{пл}\lambda}{A\sqrt{a\tau_u}}.$$

Критическая плотность потока, соответствующая достижению температуры кипения (без учета фазового перехода)

$$q_c^{(2)} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{T_{кин}\lambda}{A\sqrt{a\tau_u}}.$$

Критическая плотность потока, выше которой процессы испарения преобладают над переносом теплоты в конденсированную среду (режим “чистого” испарения)

$$q_c^{(3)} = \frac{\gamma}{A} \frac{\Omega}{\left(\frac{a}{\tau_u}\right)^{\frac{1}{2}}}.$$

Критическая плотность потока, выше которой в глубь материала распространяется ударная волна, а над поверхностью образуется плазменный факел

$$q_c^{(4)} = \beta\gamma \Omega^{\frac{3}{2}}.$$

В этих формулах : $T_{пл}$ и $T_{кин}$ – температура соответственно плавления и кипения; Ω – теплота испарения облучаемого вещества; λ – теплопроводность; a – температуропроводность; τ_u – длительность лазерного импульса; $\beta = 0,88$ – коэффициент.

6.3. Современные технологические устройства

6.3.1. Сканирующий ближнепольный оптический микроскоп

Примечание [БЛ22]:
Диплом;
ГПНТБ

Большинство существующих сканирующих ближнепольных оптических микроскопов (СБОМ) реализовано по схеме представленной на рис. 6.3.1 В качестве диафрагмы с малым диаметром отверстия в СБОМ используются оптические волокна (световоды).

В конструкцию СБОМ входят: зонд (заостренный конец световода), фотоэлектронный умножитель (фотоприемник), собирающий прошедший или отраженный от поверхности образца свет, который и формирует СБОМ–изображение, сенсор для измерения расстояния между зондом и образцом, пьезоэлектрические двигатели для перемещения зонда,

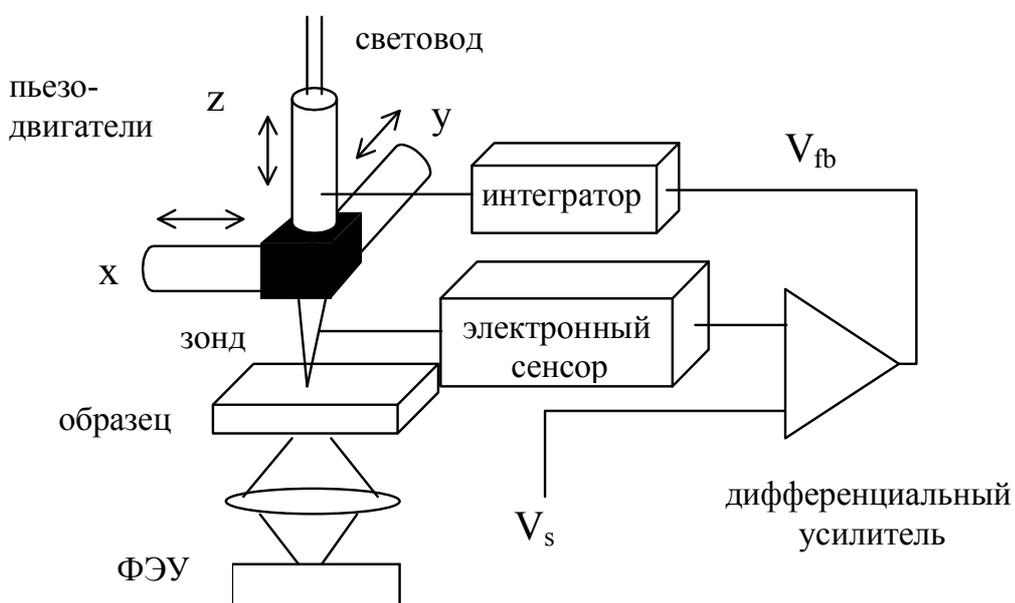


Рис. 6.3.1. Общая схема сканирующего ближнепольного оптического микроскопа

электронная цепь обратной связи для поддержания расстояния зонд-образец в пределах ближнего поля и компьютер для управления процессом сканирования, получения и обработки изображений.

В стандартной конструкции сканирующие ближнепольные оптические микроскопы позволяют исследовать поглощающую или отражающую способность образца, однако с небольшими изменениями они могут быть использованы для различных целей полупроводниковой наноэлектроники. Наиболее часто используемые схемы экспериментов, используемые в СБОМ, показаны на рис. 6.3.2.

При исследовании относительно прозрачных образцов, а также для решения биологических и тестовых задач, обычно используется геометрия "просвечивающего СБОМ". При изучении образцов с непрозрачной для используемого света подложкой наиболее применима схема "на отражение", и ее варианты имеет смысл рассмотреть подробнее.

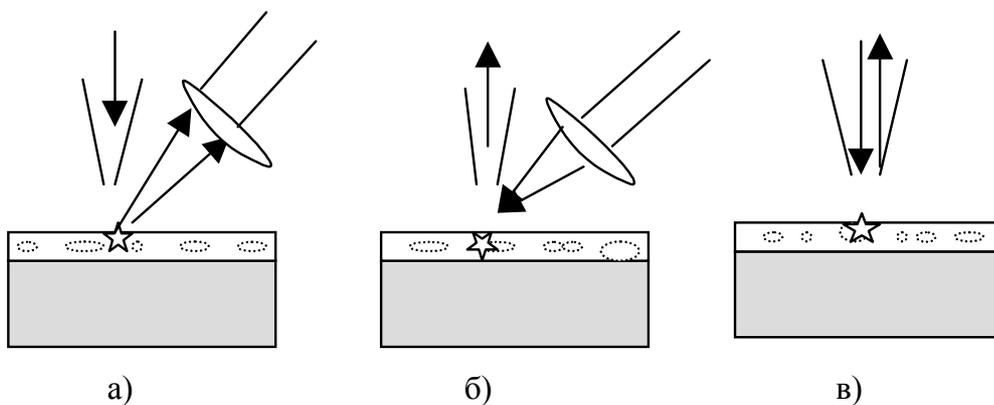


Рис. 6.3.2. Схемы экспериментов, используемых при исследовании поверхности полупроводников с помощью СБОМ.

- а) локальное облучение из острия, сбор объективом (линзой); б) фокусировка накачки линзой, сбор острием;
- в) возбуждение и сбор одним и тем же зондом

При возбуждении носителей излучением из острия (см. рис. 6.3.2,а) удается достичь больших плотностей накачки, и область взаимодействия образца с накачкой хорошо локализована. Недостаток этой схемы при изучении фотолюминесценции состоит в том, что возбужденные носители в чистом однородном полупроводнике за время жизни до акта рекомбинации могут удалиться от острия на длину диффузии, которая составляет несколько микрон, так что спектр излучаемого сигнала не обязательно будет соответствовать точке, находящейся непосредственно под иглой. Это существенно сужает разрешающую способность метода.

Сбор сигнала острием при облучении ближайшей области поверхности, сфокусированной с помощью линз накачкой (см. рис. 6.3.2,б), более удобен при регистрации сигнала от заведомо локализованных источников (например, квантовых точек), однако эффективность возбуждения носителей вокруг острия оказывается невысокой, и кроме того, возможные особенности фокусировки излучения накачки в ближнем поле иглы и микронеровностей поверхности, учесть которые сложно, затрудняют интерпретацию наблюдаемых результатов и оставляют сомнения в их однозначности.

Наиболее просты в интерпретации изображения, полученные при локальном облучении поверхности и сборе сигнала с помощью одной и той же иглы (см. рис. 6.3.2,в). Единственным недостатком следует считать определенную потерю сигнала при двукратном прохождении света через иглу, что при наличии высокочувствительного фотоприемника не является фатальным.

СБОМ может быть применен в таких областях, как биология, медицина, генетика, для исследования объектов в их естественной среде. Это предотвращает определенные артефакты, которые могут возникать в процессе приготовления образцов или поведения образца в неестественной среде.

6.3.2. Атомный нанозонд с единичным фотоном

Примечание [БЛ23]:
Диплом,
ГПНТБ

Использование фотона для обнаружения отдельного квантового объекта рассматривалось еще Гейзенбергом и фон Нойманом в 20-х годах в “gedanken experiments” в контексте квантовомеханических ограничений воздействия процесса квантового измерения на объем измерения. Развитие оптических и лазерных технологий последних лет сделало возможным проведение экспериментов по исследованию воздействия единичного фотона (локализованного в моде резонатора) на единичный атом. Световое поле в моде высокочастотного резонатора с энергией порядка одного фотона позволяет детектировать отдельные атомы и локализовывать их. Существует ряд предложений по использованию светового поля высокочастотного резонатора для детектирования атома с пространственным разрешением лучше, чем длина волны света. Положение атома в стоячей световой волне высокочастотного резонатора сильно коррелирует с фазой волны, поскольку в присутствии светового поля атом поляризуется, что в свою очередь изменяет фазу световой волны. Измерение изменения фазы световой волны при пролете атомом светового поля дает информацию об относительном (к пучности стоячей волны) положении атома в стоячей волне. Пространственное перекрытие атомного волнового пакета с модой светового поля вносит ограничение на пространственное разрешение подобного метода.

Рассмотрим возможность использования светового поля с энергией порядка единичного фотона для обнаружения единичного атома с пространственным разрешением в нанометровом диапазоне и с наносекундным временным разрешением. На рис.6.3.3 представлена схема такого *атомного нанозонда*.

Высокочастотный оптический резонатор образован двумя зеркалами M_1 и M_2 . Лазерное излучение инжектируется в резонатор через

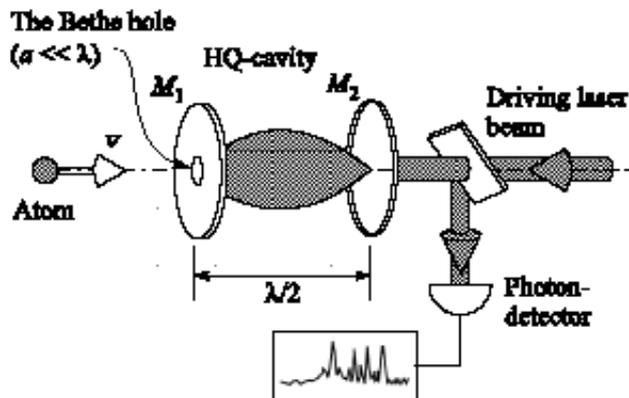


Рис. 6.3.3. Схема атомного нанозонда

зеркало M_2 . Зеркало M_1 имеет отверстие диаметром $2a$, существенно меньшим длины волны вводимого в резонатор излучения (получившего название в научной литературе - “the Bethe hole”). Как будет показано ниже, такое отверстие не изменяет заметно добротности резонатора. Через это отверстие атом может входить внутрь резонатора и взаимодействовать со световым полем моды резонатора. Атом внутри моды резонатора изменяет его резонансные свойства, и часть лазерного излучения отражается от резонатора. Отраженное излучение регистрируется с помощью фотодетектора. Сигнал с фотодетектора несет информацию об атоме внутри моды резонатора. Пространственное разрешение такого атомного зонда определяется размерами отверстия, минимальная величина которого ограничена “размерами” самого атома и характерной длиной межатомного взаимодействия, то есть лежит в нанометровом диапазоне. Очевидно, что временное разрешение атомного нанозонда не хуже времени пролета атома через резонатор. При длине резонатора, равном $l_r = \lambda / 2$, и тепловых атомных скоростях временное разрешение лежит в наносекундном диапазоне. Объем локализации атома составляет величину

$$V = \pi a l^2 \ll \lambda^3.$$

Рис. 6.3.4 и 6.3.5 иллюстрируют временную эволюцию инверсной заселенности атома и среднего числа фотонов в моде резонатора при пролете атома через резонатор для сравнительно большого числа фотонов в резонаторе $\langle n_0 \rangle = 10$ и скорости атома $v = 20$ м/с. Сложная временная динамика поля моды резонатора и инверсной заселенности объясняется зависимостью частоты Раби осцилляции от числа n фотонов, ведущей к известному эффекту "коллапса" и восстановлению инверсной заселенности атома, отчетливо заметному на рис. 6.3.4 для достаточного проявления

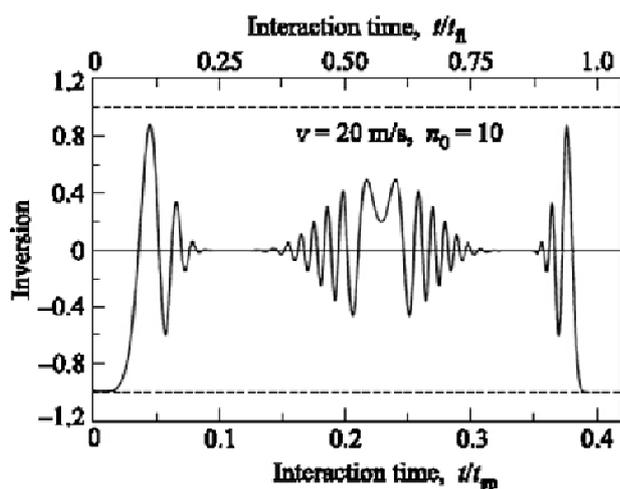


Рис. 6.3.4. Временная эволюция инверсной населенности атома при пролете атома через резонатор. Среднее число фотонов в резонаторе до влета атома $\langle n_0 \rangle = 10$, скорость атома $v = 20$ м/с. На нижней шкале время приведено в единицах времени спонтанного распада верхнего уровня атома $\tau_{вр}$, на верхней шкале – время взаимодействия нормировано на время пролета атома через резонатор

эффекта времени взаимодействия атома при относительно малой его скорости. Появление атома в резонаторе изменяет его свойства. Пропускание резонатора T и, соответственно, отражение R становятся зависимыми от **времени** :

$$T(t) = \left| \frac{X(t)}{Y} \right|^2,$$

где $X(t)$ – амплитуда поля моды резонатора, Y – амплитуда лазерного поля, накачивающего резонатор. В рассматриваемой схеме атомного нанозонда информация об атоме заключена в отраженном от резонатора излучении, которое следующим образом зависит от параметров атома и резонатора:

$$|Y_{refl}(t)|^2 = \left(1 - \pi \frac{\langle n(t) \rangle}{n_{ph} \cdot VF} \right) n_{ph} cS.$$

На рис. 6.3.6 показана зависимость отраженного потока фотонов за

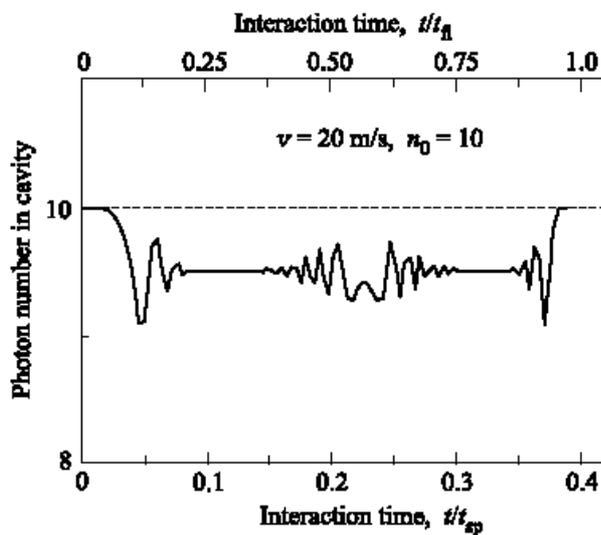


Рис. 6.3.5. Временная эволюция среднего числа фотонов в моде резонатора при пролете атома через резонатор

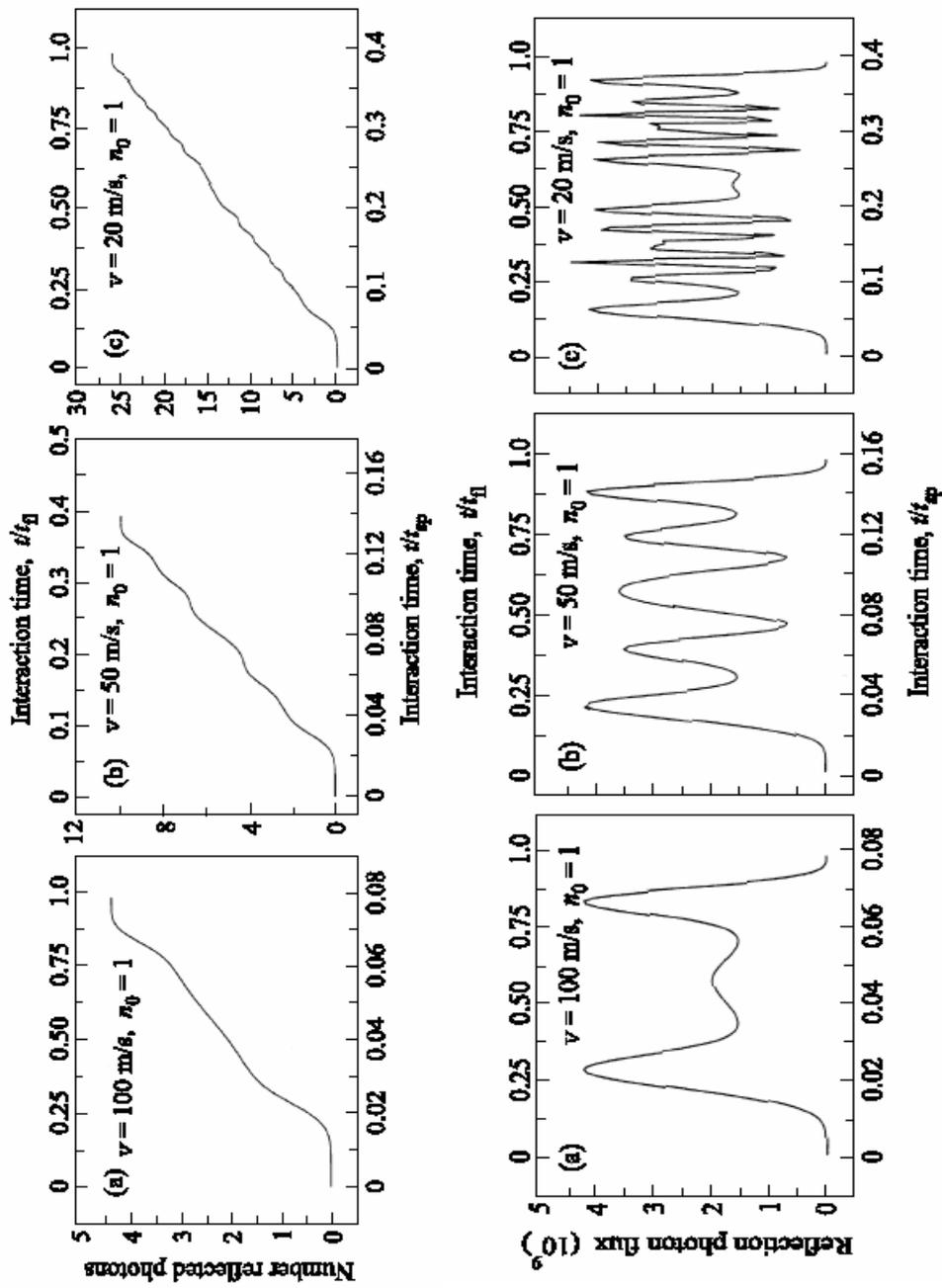


Рис. 6.3.6. Зависимости отраженного от резонатора потока фотонов от времени взаимодействия атома с полем моды резонатора для различных скоростей атома: (а) $v = 100$ м/с; (б) $v = 50$ м/с; (с) $v = 20$ м/с. Среднее число фотонов в моде резонатора $\langle n_0 \rangle = 1$

время пролета атома через резонатор, когда в моде резонатора запасен один фотон $\langle n_0 \rangle = 1$, а резкость резонатора $F = 5 \cdot 10^5$ для трех значений атомных скоростей $v = 20, 50$ и 100 м/с. Осцилляционный характер поведения отраженного потока фотонов определяется быстрым обменом энергией между атомом и электромагнитным полем резонатора. Зависимость интегрального сигнала отраженных фотонов определяется как

$$N_{refl} = \int_0^t |Y_{refl}(t)|^2 dt$$

для различных значений скорости атома $v = 20, 50$ и 100 м/с и $\langle n_0 \rangle = 1$. Видно, что даже при достаточно большой скорости атома ($v = 100$ м/с) отраженное число фотонов достигает величины 5 фотонов. При этом время составляет величину $t_{per} = -0,08\tau_{sp}$.

6.3.3. Устройство для получения нанометровых отверстий на подложке

В основу разработки положена задача получить нанометровые отверстия на подложке.

Устройство для получения нанометровых отверстий (рис. 6.3.7) содержит неподвижное основание 1 с установленным на нем источником лазерного излучения 4, на пьезоприводе 2 жестко закреплена фокусирующая линза 5, а технологический блок 3 установлен на трехкоординатном столе 6, устройство дополнительно снабжено системой подачи инертного газа 7 и технологическим блоком 8.

Технологический блок (рис. 6.3.8) содержит вакуумную камеру, внутри которой расположены анод и катод, связанные с источником питания 9. Анод выполнен в виде сетки 10, на верхней стенке вакуумной камеры установлена линза с возможностью подачи лазерного потока через

Примечание [БЛ24]:
Диплом;
ГПНТЬ

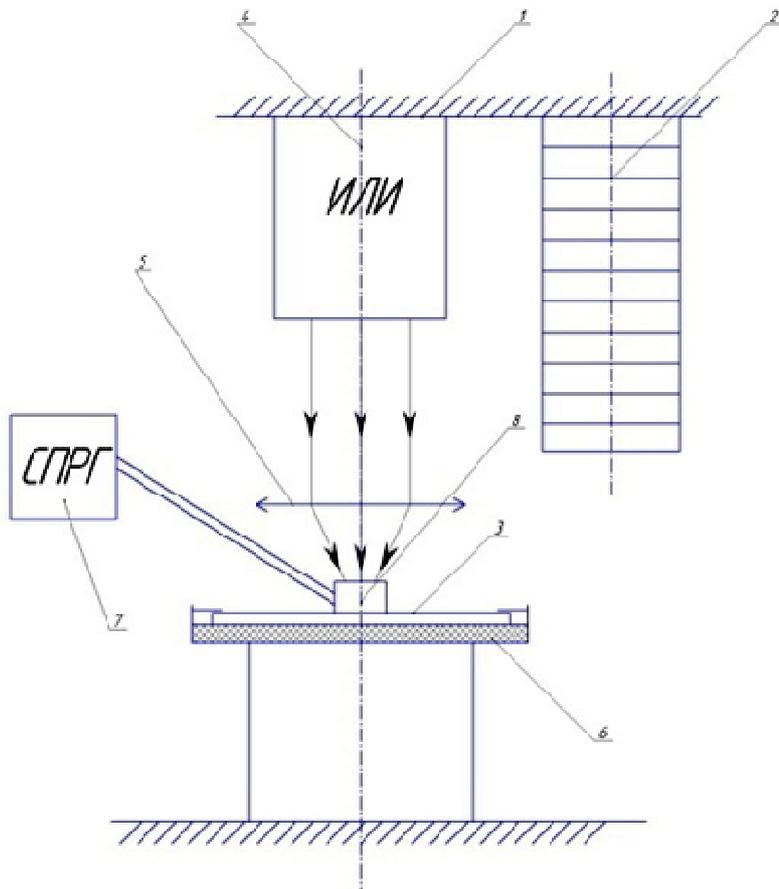


Рис. 6.3.7. Устройство для получения нанометровых отверстий на подложке

сетку-анод на катод 11, на котором установлена полочка 12. Внутри вакуумной камеры расположен электромагнит 13, с возможностью подачи магнитного потока с индукцией B в анодно-катодный зазор перпендикулярно силовым линиям напряженности E электрического поля.

Устройство для получения нанометровых отверстий на подложке работает следующим образом.

В анодно-катодный зазор подается поток лазерного излучения, что

порождает бомбардировку молекул рабочего газа, вследствие чего формируется поток ионов, направленный на сверхтонкую пластину, закрепленную на катоде. Таким образом происходит образование отверстий в сверхтонкой пластине, величиной с ион.

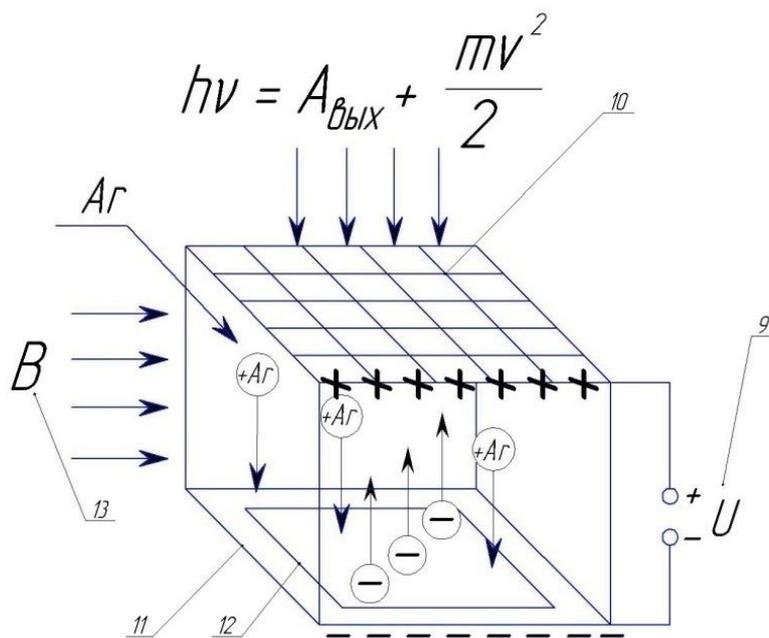


Рис. 6.3.8. Технологический блок

Применение устройства позволяет получать нанометровые отверстия на подложке в производстве изделий микро- и нанoeлектронной техники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение необходимо отметить следующее.

Представленная информационная система поддержки принятия решений является составной частью системы автоматизации проектирования процесса производства объектов лазерной обработки. Показана технологическая и экономическая целесообразность разработки элементов данной автоматизированной системы.

Разработанная структура автоматизированной системы поддержки принятия решений при проектировании процессов лазерной обработки позволяет перейти к реализации формирования объектов на основе существующих и перспективных технологий микроэлектроники.

Предложенные модель и алгоритм оптимального управления распределенными лазерными системами являются составной частью системы поддержки принятия решений при проектировании процессов формирования объектов на этапах аванпроекта. Методика оценки качества лазерных установок учитывает функциональные, экологические и экономические локальные критерии качества, которые входят в обобщенный критерий с учётом их весовых соотношений.

Предложенная модель многокритериальной задачи принятия решений учитывает множество показателей и параметров лазерных установок для проведения технологических операций при формировании объектов лазерной обработки.

Разработанный, на основе морфологического анализа-синтеза, комплекс алгоритмов позволяет создавать технические решения устройств формирования объектов в нанотехнологическом масштабе, соответствующих критериям патентоспособной новизны, изобретательского уровня и промышленной применимости. Комплекс обеспечивает снижение затрат в производстве элементов микроэлектроники.

На основе предложенных алгоритмов и пакетов прикладных программ разработаны элементы автоматизированной системы проектирования процесса формирования объектов лазерной обработки.

Предложенная схема моделирования позволяет принимать научно обоснованные, технически целесообразные, технологически и экономически выгодные решения при формировании объектов микро- и нанотехнологического масштаба в электронном машино- и приборостроении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fox M. S. The Intelligent Management System: An Overview. // Process and Tools for Decision support. / Ed. By H. G. Sol. – Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1983. – P. 105 – 130.
2. Fedorowich J., Williams G. B. Representing Model Knowledge in an Intelligent Decision Support System. //Decision Support Systems – 1986, #2. – P.3 – 13.
3. Keen P. G. W. Decision Support Systems: A Research Perspective. // Knowledge Representation for Decision Support Systems / Ed. By L. B. Methlie and R. H. Sprague. – Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1985. – P. 23 – 44.
4. Henderson I. C., Ingreham R. S. Prototyping for DSS: A Critical Appraisal. //Process and Tools for Decision Support. /Ed. By G. Fick and R. H. Sprague. – Oxford: Pergamon Press, 1980. – P. 5 – 22.
5. Ларичев О.И., Петровский А.Б. Системы поддержки принятия решений: современное состояние и перспективы развития // Итоги науки и техники. М.: ВИНТИ, 1987. Т. 21, С. 131-164.
6. Alter S. A. Decision Support Systems: Current Practice and Continuing Challenges. – Reading, Mass.: Addison – Wesley Publ. Co. – 1980. – 316 p.
7. Ginzberg M. J., Stohr E. A. Decision Support Systems: Issues and Perspectives. //Process and Tools for Decision Support. /Ed. by H. G. Sol. - Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1983. – P. 9 – 31.
8. Сараев А.Д., Щербина О.А. Системный анализ и современные информационные технологии. Труды Крымской Академии наук. - Симферополь: СОНАТ, 2006. - С. 47-59.

9. Моряков О.С. Элионная обработка. М.: Высшая школа, 1990. – 128с.
10. Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.А. Блохин, и др. Машиностроение. Энциклопедия. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т. III. – М.: Машиностроение, 2000, – 744 с.
11. Малышев В.А. Основы квантовой электроники и лазерной техники: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 2005. – 543 с.
12. Бонч-Бруевич А.М., Ельяшевич М.А. Действие излучения большой мощности на металлы, М., 1970.
13. Вейко В.П., Либенсон М.Н., Таипов Р.А. и др. Лазерная технология, Л.: Электроника, 1970. – 120 с.
14. Бубякин Г.Б., Левинсон Г.Р., Свиридов А.Н. Технологическое применение газовых лазеров. – Л.: ЛДНТП, 1970. – 32 с.
15. Смирнов С. А. Оценка интеллектуальной собственности. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 352 с.
16. Рыбалко В.В. Наноразмерные углеродосодержащие материалы. – М.: МИЭМ, 2003. – 50 с.
17. Неволин В.К. Физические основы туннельно-зондовой нанотехнологии: Уч. пособие. – М., 2000.
18. Щука А.А. Нанoeлектроника. – М.: Физматкнига, 2007. – С. 192-193.
19. Двуреченский А. В., Качурин Г. А., Нидаев Е. В., Смирнов Л. С. Импульсный отжиг полупроводниковых материалов. – М.: Наука, 1982.
20. Venktesan T., Wu X., Inam A. et al. //IEEL J. Quantum Electronics, 1989. V. 25. №11. – P. 2388.
21. Комаров Ф.Ф., Кумахов Н.А., Ташлыков И.С. Неразрушающий анализ поверхностей твердых тел ионными пучками. – Минск: Университетское изд-во, 1987. – 260 с.

22. Чеченин Н.Г., Монахов Э.В., Бурдель К.К. Установка для исследования *in situ* импульсного лазерного воздействия на материалы методами неразрушающего ядерного анализа. НИИЯФ МГУ. Приборы и техника эксперимента, 1994, №3. – С. 142-145.
23. Алмазов А.В., Дзагуров О.Б., Криволап В.В. и др. Препринт НИИЯФ МГУ 88-015/36. М., 1988.
24. Тулинов А.Ф., Чеченин Н.Г., Бедняков А.А. и др. Препринт НИИЯФ МГУ 88-55/76. М., 1988.
25. Затекин В.В., Чеченин Н.Г. // Инф. бюл. Алгоритмы программы. М.: ВНИЦентр, 1989. Т. 7, С. 5.
26. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973.
27. Кореев В.В., Монахов Э.В., Селезнев Б.В. и др // СФХТ, 1992. Т.5, №12, С. 2320.
28. Chechenin N.G., Chernysh A.V., Korneev V.V. et al. // J. Phys. (Paris), 1993. V. 3, №12, P. 2173.
29. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радиосвязь, 1993. – 320 с.
30. Ивашов Е.Н., Реутова М.В. Применение метода Саати при структурировании множества альтернатив получения углеродных нанотрубок, фуллеренов и кластеров. Деп. Рукопись ВИНТИ №2325. В 2003; 31.12.2003. – 12 с.
31. Компьютерные технологии обработки информации: Учеб. пособие / С.В. Назаров, В.И. Першиков, В.А. Тафинцев и др.; Под ред. С.В. Назарова. – М.: Финансы и статистика, 1995. – 248 с.
32. Сольнищев Р.И. Автоматизация проектирования систем автоматического управления: Учеб. для вузов по спец. «Автоматика и управление в технических системах». – М.: Высшая школа, 1991. – 335 с.

33. Проектирование гидравлических систем машин: Учеб. пособие для студентов вузов по специальности «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» / Г.М. Иванов, С.А. Ермаков, Б.Л. Коробочкин, Р.М. Пасынков; Под общ. ред. Г.М. Иванова. – М.: Машиностроение, 1992. – 224 с.
34. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств: Учеб. пособие для вузов / О.В. Алексеев, А.А. Головков, И.Ю. Пивоваров и др.; Под. ред. О.В. Алексеева. – М.: Высшая школа, 2000. – 497 с.
35. ГОСТ 34.601-90. «Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Стадии создания».
36. Автоматизированное проектирование машиностроительного гидропривода / И.И. Бажин, Ю.Г. Беренгард, М.М. Гайцгорн и др.; Под общ. ред. С.А. Ермакова. – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.
37. Тумковский С.Р. РТУиС, МИЭМ. Курс лекций «Автоматизированное проектирование РЭС».
38. Норенков И.П., Маничев В.Б. Основы теории и проектирования САПР: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1980. – 335 с.
39. Быков В.П. Методическое обеспечение САПР в машиностроении. –Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1989. – 255 с.
40. Теоретические основы САПР: Учебник для вузов/ В.П. Корячко, В.М. Курейчик, И.П. Норенков. – М.: Энергоавтомиздат, 1987, – 400 с.
41. Вейк А.И. Техническая термодинамика и основы теплопередачи. – М.: Металлургия, 1965. – 375 с.
42. Вейк А.И. Термодинамика. 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1965. – 282 с.
43. Иванов Ю.В., Лакота Н.А. Гибкая автоматизация производства РЭА с применением микропроцессоров и роботов. – М.: Радио и связь, 1987. – 464 с.

44. Норенков И.П. Принципы построения и структура САПР. – М.: Высшая школа, 1986. – 146 с.
45. Основы автоматизации управления производством / Под ред. И.М. Макарова. – М.: Высшая школа, 1983.
46. Чулков В.П. Расчет комплексов оборудования. – М.: МИЭМ, 2006. – 26 с.
47. Банди Б. Методы оптимизации. Основной курс. – М.: Высшая школа, 1988. – 127 с.
48. Хук Р., Дживс Т.А. Прямой поиск решения для числовых и статических проблем. 1961. – С. 212-219.
49. Слободин М.Ю., Царев Р.Ю. Компьютерная поддержка многоатрибутивных методов выбора и принятия решения при проектировании корпоративных информационно-управляющих систем. – СПб.: Инфо-да, 2004. – 223 с.
50. Васильков В.М. Автоматизация управления производством изделий электроники. – М.: Радио и связь, 1982. – 222 с.
51. Шалагин А.М. Механическое воздействие лазерного излучения на атомы. – М.: Физика, 1999. – С. 86-92.
52. Балкин В.И., Летохов В.С., Миногин В.Г. // Успехи физических наук. 1985. Т. 147, №1. – С. 117-156.
53. Казанцев А.П., Сурдутович Г.И., Яковлев В.П. Механическое воздействие света на атомы. – М.: Наука, 1991. – 188 с.
54. Манзон Б.М. // Успехи физических наук. 1981. Т. 134, №4. – С. 611-639.
55. Розанов Л.Н. Вакуумная техника: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1982. – 207 с.
56. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика (нерелятивистская

- теория). – М.: Физматгиз, 1963. – 704 с.
57. Иванов В.И. Взаимодействие высокоинтенсивных ионизирующих излучений с твердым телом. – М.: МИРЭА, 1994.
 58. Валиев К.А., Раков А.В. Физические основы субмикронной литографии в микроэлектронике. – М.: Радио и связь, 1984.
 59. Климков Ю.М. Прикладная лазерная оптика. – М.: Машиностроение, 1985. – 128 с.
 60. Пахомов И. И., Рожков О. В., Рождествин В. Н. Оптико-электронные квантовые приборы. – М.: Радио и связь, 1982. – 456 с.
 61. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В. Н. Теория оптических систем. 3-е изд. – М.: Машиностроение, 1992. – 448 с.
 62. Васильев Ф.П. О градиентных методах решения задач оптимального управления системами, описываемыми параболическими уравнениями // Оптимальное управление. Сборник. – М.: Знание, 1978. – С. 118-143.
 63. Бутковский А.Г., Пустыльников Л.М. Теория подвижного управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1980.
 64. Чубаров Е.П. Управление системами с подвижными источниками воздействия. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
 65. Современное состояние теории исследования операций / Под ред. Н.Н. Моисеева. – М.: Наука, 1979.
 66. Батищев Д.И. Методы оптимального проектирования. – М.: Радио и связь, 1982.
 67. Лотов А В. Введение в экономико-математическое моделирование. – М.: Наука, 1984.
 68. Современное состояние теории исследования операций. – М.: Наука, 1979.
 69. Семенкин Е.С., Семенкина О.Э., Терсков В.А. Методы оптимизации в

- управлении сложными системами: Учебное пособие. – Красноярск: Сибирский юридический институт МВД России, 2000. – 254 с.
70. Вишневецкий А.С., Домась К.И., Таун Н.К. Моделирование и алгоритмизация оптимального управления распределенными системами. // Системы управления и информационные технологии. 2008, 1.2(31). – С. 291-295.
71. Катгулев А.Н., Северцев Н.А. Математические методы в системах поддержки принятия решений. – М.: Высшая школа, 2005. – С. 30-31.
72. Каипов В.Х., Селюгин А.А., Дубровский С.А. Методы обработки данных в системах с нечеткой информацией. – Фрунзе: Илим, 1988. – 187 с.
73. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. / Борисов А.Н., Алексеев А.В., Меркурьева Г.В. и др. – М.: Радио и связь, 1989. – 304 с.
74. Вишневецкий А.С., Домась К.И., Тхань Н.Д., Бинь Л.Т. Математическая модель и алгоритм принятия решения для недоминируемых альтернатив // Системы управления и информационные технологии, 2008, 2.3(32). – С. 336-339.
75. Петренко А.И., Семенов О.И. Основы построения систем автоматизированного проектирования. – 2-е изд. – К.: Вища шк. Головное издательство, 1985. – 294 с.
76. Домась К.И., Ивашов Е.Н. и др. Метод измерения нанорельфа и наноструктуры поверхности подложки. НТК «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» – Датчик-04: материалы конференции – М.: МИЭМ, 2004.
77. Домась К.И., Ивашов Е.Н. и др. Системы формирования и сканирования нанообъектов. НТК «Датчики и преобразователи информации

- систем измерения, контроля и управления» – Датчик-04: материалы конференции – М.: МИЭМ, 2004.
78. Домась К.И., Ивашов Е.Н. и др. Построение аналитических устройств наноэлектроники на основе квантомеханического подхода. Деп. Рук. ВИНТИ № 1204. В 2004; 13.07.04.
 79. Домась К.И., Ивашов Е.Н. и др. Механическое и полевое тестирование модифицированных наноструктур. Деп. Рук. ВИНТИ № 1202. В 2004; 13.07.04.
 80. Домась К.И., Ивашов Е.Н. и др. Туннельный метод измерения нанорельефа поверхности. Деп. Рук. ВИНТИ № 1201. В 2004; 13.07.04.
 81. Домась К.И., Ивашов Е.Н. и др. Оптоволоконная нанотехнология в электронике и методы её реализации. Деп. Рук. ВИНТИ № 1203. В 2004; 13.07.04.
 82. Домась К.И., Ивашов Е.Н. и др. Устройство перемещения для нанотехнологии. Пат. РФ на ПМ № 37580. Оpubл. 27.04.04. Б.И. № 12.
 83. Домась К.И., Ивашов Е.Н. и др. Устройство для регистрации химического состава. Пат. РФ на ПМ № 43104. Оpubл. 27.12.04. Б.И. № 36.
 84. Домась К.И., Ивашов Е.Н. Устройство для получения нанодорожек. Пат. РФ на ПМ № 42696. Оpubл. 27.12.04. Б.И. № 34.
 85. Домась К.И., Ивашов Е.Н. и др. Измерительное устройство для нанотехнологии. Пат. РФ на ПМ № 42697. Оpubл. 27.12.04. Б.И. № 34.
 86. Домась К.И., Ивашов Е.Н. и др. Формирование нанообъектов на подложке с использованием оптоволоконна. НТК «Вакуумная наука и техника» – М.: МГИЭМ 2004, материалы конференции.
 87. Домась К.И., Ивашов Е.Н. Лазерно-зондовая технология как инструмент механического воздействия на атомы. Труды IX международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и

- микросхемы». – Ульяновск: УлГУ, 2007. – С. 114.
88. Домась К.И., Ивашов Е.Н. и др. Применение измерительных лазеров в нанотехнологии. НТК «Нанотехнологии 2005» –Владимир, 2005, материалы конференции.
89. Домась К.И., Ивашов Е.Н. Формирование источника ионов с помощью лазерно-зондовой нанотехнологии. Всероссийская конференция с международным интернет участием «От наноструктур, наноматериалов и нанотехнологий к nanoиндустрии» – Ижевск: ИжГТУ, 2007. – С. 24.
90. Домась К.И., Ивашов Е.Н. и др. Метод регистрации химического состава поверхности объекта в нанотехнологии. НТК «Прогрессивные машиностроительные технологии» – Образование через науку 2005 – М.: МГИЭМ 2005, материалы конференции.
91. Домась К.И., Ивашов Е.Н. Особенности поглощения светового излучения материалом при автоматизированном проектировании процессов в лазерно-зондовой нанотехнологии. INTERMATIC-2007 // Материалы VI Международной НТК «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного машиностроения». М.: МИРЭА, 2007, часть 3. – С. 166 - 169.
92. Домась К.И., Ивашов Е.Н. и др. Формирование наноструктур на атомарном уровне. НТК «Прогрессивные машиностроительные технологии» – Образование через науку 2005 – М.: МГИЭМ 2005, материалы конференции.
93. Вакуумное оборудование тонкоплёночной технологии производства изделий электронной техники: Учебник для вузов в 2-х томах. Т. 1 / Е.Н. Ивашов, Л.К. Ковалев, С.В. Степанчиков и др. – Красноярск: Красноярское книжное изд-во; Сиб. аэрокосм. акад., 1995. – 256 с.

94. Вакуумное оборудование тонкоплёночной технологии производства изделий электронной техники: Учебник для вузов в 2-х томах. Т. 2 / Е.Н. Ивашов, Л.К. Ковалев, С.В. Степанчиков и др. – Красноярск: Красноярское книжное изд-во; Сиб. аэрокосм. акад., 1996. – 416 с.
95. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973.
96. Дюков В.Г., Кудреярлов Ю.А. Растровая оптическая микроскопия. – М.: Наука, 1992.
97. Жданов Г.С., Либенсон М.Н., Марциновский С.А. Оптика за дифракционным пределом: Принципы, результаты, проблемы. УФН, 1998, №7. – С. 801.
98. Paesler M.A., Moyer P.J. Near-Field Optics: Theory, Instrumentation and Applications. Wiley, 1996.
99. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. – М.: Мир, 1984.
100. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т.П. Теория поля. – М.: Физматгиз, 1960.
101. Bethe H.A. Theory of Diffraction by Small Holes. Phys. Rev. 66, 163 (1944).
102. Durig U., Rohl D.W., Rohner F. Near-Field optical-scanning microscopy. J. Appl Phys. 59, 3318 (1986).
103. Karrai K., Grober R.D. Piezoelectric tip-sample distance control for near field optical microscopes. Appl. Phys. Lett. 66, 1842 (1995).
104. Валиев К.А. Физика субмикронной литографии. – М.: Наука, 1990.
105. Физика и технология источников ионов. / Сб. под ред. Я. Брауна. – М.: Мир, 1998.
106. Чу С., Каэн-Тануджи К.Н., Филипс У.Д. УФН 169, 274 (1999).
107. Timp G., Behringer R.E., Tennat D.M. et al. Phys. Rev. Lett. 69, 1636 (1992).
108. Lison F., Adams H.-J., Haubrich D. et al. Appl. Phys. B65, 419 (1997).
109. Делоне Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. – М.: Наука, 1989.

110. Peuser P., Ames F., Bohn J. et al. Appl. Phys. B38, 249 (1985).
111. Mago V.K., Lal B., Ray A.K. et al. J. Phys. B20, 6021 (1987).
112. Bohm H.D.V., Michaelis W., C. Weitkamp. Opt. Commun, 26, 177 (1978).
113. Ворончев Т.А., Соболев В.Д. Физические основы электровакуумной техники. – М.: Высшая школа, 1967.
114. Казанцев А.П., Сурдутович Г.И., Яковлев В.П. Механическое воздействие света на атомы. – М.: Наука, 1991.
115. Arisawa T., Mariyama Y., Suzuki Y. and K. Shiba. Appl. Phys. B28, 73 (1982).
116. Ивашов Е.Н. и др. Устройство для получения нанометровых отверстий на подложке. Патент РФ на ПМ № 42696. Оpubл. 10.12.2004. Бюл. №34.
117. Андреева Л.Л., Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. Способ получения электронного луча. Патент РФ на изобретение №2208262. Оpubл. 10.07.2003. Бюл. №19.
118. Производство тонкоплёночных структур в электронном машиностроении: Учебник для вузов в 2-х томах. Т. 1 / А.Т. Александрова, Е.Н. Ивашов, С.В. Степанчиков и др. – М.: Машиностроение, 2006. – 462 с.
119. Производство тонкоплёночных структур в электронном машиностроении: Учебник для вузов в 2-х томах. Т. 2 / А.Т. Александрова, Е.Н. Ивашов, С.В. Степанчиков и др. – М.: Машиностроение, 2006. – 427 с.
120. Александрова А.Т., Васин В.А., Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. Вакуумная механика в электронном машиностроении: Монография. – М.: МИЭМ, 2009. – 145 с.
121. Васин В.А., Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. Нанотехнологические процессы и оборудование электронной техники. – М.: МИЭМ, 2009. – 264 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ	5
1.1. Обзор систем поддержки принятия решений	5
1.2. Лазерное технологическое оборудование	10
1.2.1. Типы технологических лазеров	15
1.2.2. Применение лазеров в технологических процессах	16
1.3. Объекты лазерной обработки	22
1.4. Методы получения объектов лазерной обработки	37
1.4.1. Лазерное распыление	37
1.4.2. Лазерно-порошковый метод синтеза одностенных углеродных нанотрубок	38
1.4.3. Совместное использование лазера и сканирующего туннельного микроскопа в нанолитографии	39
1.4.4. Импульсное лазерное воздействие на материал методом неразрушающего ядерного анализа.....	41
1.5. Аналитическая процедура Саати в автоматизированном проектировании	46
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ	53

Примечание [БЛ25]:

Диплом;
ГПНТБ

Примечание [БЛ26]:

Диплом;
ГПНТБ

Примечание [БЛ27]:

Диплом;
ГПНТБ

2.1. Структура проектирования процессов лазерной обработки	53
2.2. Схема процесса автоматизированного проектирования оборудования для производства объектов лазерной обработки	62
2.3. Математические модели объекта проектирования	69
2.3.1. Адекватность математических моделей	76
2.3.2. Универсальность	78
2.3.3. Экономичность	79
2.4. Уравнение состояния лазерной технологической системы	80
2.5. Методы оптимизации процесса формирования объектов лазерной обработки	83
2.5.1. Основные методы, выбора наилучших лазерных установок по параметрам	88
2.5.2. Необходимые и достаточные условия оптимизации	89
2.5.3. Метод координированного спуска	90
2.5.4. Метода наискорейшего спуска	91
2.6. Базовые модели оптимизации для различных структур лазерного оборудования	93
2.6.1. Модель <i>L-1</i> . Формирование оптимального состава модулей лазерного оборудования (без избыточности)	93
2.6.2. Модель <i>L-2</i> . Формирование оптимального состава модулей лазерного оборудования (с избыточностью)	94
2.6.3. Модель <i>LZ-1</i> . Формирование оптимального многофункционального [(К)-функций] лазерного оборудования (без избыточности)	95

2.6.4. Модель LZ-2. Формирование оптимального многофункционального [(К)-функций] лазерного оборудования (с избыточностью)	96
---	----

ГЛАВА 3. ПОСТРОЕНИЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ	99
--	-----------

3.1. Модель физических процессов, протекающих при моделировании объектов лазерной обработки	99
--	-----------

3.1.1. Модель переноса тепла	99
------------------------------------	----

3.1.2. Модель неупругих столкновений частиц	103
---	-----

3.2. Параметры пучка лазера и основные соотношения при его преобразовании оптической системой	111
--	------------

3.2.1. Оптические системы для концентрации излучения лазера	116
---	-----

3.2.2. Оптические системы для уменьшения расходимости лазерного пучка	118
---	-----

3.3. Моделирование и алгоритмизация оптимального управления распределенными лазерными системами	122
--	------------

3.4. Математическая модель и алгоритм принятия решения для недоминируемых альтернатив лазерных установок	132
---	------------

ГЛАВА 4. МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ОБЪЕКТОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ	140
--	------------

4.1. Выбор вариантов лазерной установки для производства объектов с локальным применением лазеров	140
4.2. Метод Саати при структурировании множества альтернатив лазерных установок для формирования объектов в туннельно-зондовой области	145
4.3. Выбор оптимального варианта технологического решения с учетом себестоимости научно-технической продукции	151
4.4. Методика расчета производительности лазерного оборудования	153
ГЛАВА 5. СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ ПОИСКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВОК	162
5.1. Обобщенный критерий оценки качества лазерных установок	162
5.2. Алгоритмы поиска технических решений лазерных установок	163
5.3. Вариант технологического решения лазерно-зондовой установки	168
ГЛАВА 6. ФОРМИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ В ЛАЗЕРНО-ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ	171
6.1. Механическое воздействие лазерного излучения на атомы	171
6.2. Особенности поглощения светового излучения материалом	176
6.3. Современные технологические устройства	182
6.3.1. Сканирующий ближнепольный оптический микроскоп	182
6.3.2. Атомный нанозонд с единичным фотоном	185
6.3.3. Устройство для получения нанометровых отверстий на подложке	190

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	193
ЛИТЕРАТУРА	195
ОГЛАВЛЕНИЕ	206