

Критерий качества в автоматизированном проектировании элементов формирования топологии в ультрафиолетовой литографии

Никита Николаевич Балан, к.т.н.

Владимир Анатольевич Васин, к.т.н., e-mail: vacuumwa@list.ru

Евгений Николаевич Ивашов, д.т.н., e-mail: ienmiem@mail.ru

Максим Юрьевич Корпачев, аспирант, e-mail: mkorpachev@gmail.com

Сергей Валентинович Степанчиков, к.т.н., с.н.с., e-mail: stpmiem@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Московский государственный институт электроники и математики», Москва

Рассмотрены функциональные, технологические, структурные, экономические и экологические локальные критерии в процессе проектирования элементов формирования топологии на полупроводниковых пластинах; представлен механизм сравнения вариантов конструктивных решений технологического оборудования ультрафиолетовой литографии по максимальному значению ожидаемого экономического эффекта; предложено устройство формирования изображения, позволяющее реализовать технологический процесс литографии в экстремальном ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах, которое соответствует критериям качества и имеет высокую экономическую эффективность

The article deals with the functional, technological, structural, economic and environmental criteria of the local elements in the design process of formation of topology on semiconductor wafers. The mechanism of comparing variants of design solutions ultraviolet lithography production equipment to maximize the value of the expected economic effect. A device forming an image that helps make the process of lithography in the extreme ultraviolet and soft X-ray, which meets the criteria of quality and has a high economic efficiency.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, критерий качества, ультрафиолетовая литография, формирование топологии микросхем, устройство для формирования изображения в литографии.

Keywords: computer-aided design, quality criterion, UV lithography, formation of the topology of chips, device for forming an image in lithography.

Благодаря волновому характеру оптических процессов важнейшим преимуществом технологии формирования изображений с помощью ультрафиолетовой литографии (рис. 1) является возможность одновременного и параллельного переноса изображений, состоящих из многих миллионов элементарных фрагментов.

Рассмотрим стадии типичного процесса ультрафиолетовой литографии.

1. Очистка поверхности подложки и подготовка к формированию резистного рельефа. Данная процедура в англоязычной литературе получила название прайминг (priming). В современном литографическом процессе эта стадия состоит из механической (в том числе и ультразвуковой) обработки, химических обработок, удаляющих органические загрязнения, плазмохимического травления тонких слоев (если это допустимо для активных слоев) и обработки в парах гексаметилдисилазана.

2. Нанесение слоя фоторезиста на поверхность подложки и его сушка. Обычно эту операцию осуществляют при помощи нанесения капли фоторезиста на быстро вращающуюся подложку, закрепленную на роторе центрифуги (рис. 2). Если

литография проводится на подложках с развитой топологией, ее предварительно планаризуют (выравнивают), например, при помощи нанесения слоя легкоплавкого покрытия или полимеризованного в плазме мономера [1]. Иногда используют нанесение фоторезиста из его аэрозоля. Сушка необходима для удаления остатков растворителя. Правильный выбор ее режимов позволяет уменьшить дефектность слоя и улучшить воспроизводимость результатов микролитографии.

3. Избирательное экспонирование фоторезиста ультрафиолетовым излучением. Такую операцию можно осуществить облучением светочувствительного слоя через фотошаблон (рис. 3). В зависимости от способа проектирования рисунка в плоскость фоторезиста различают контактные и бесконтактные (проекторные) методы ультрафиолетовой литографии (рис. 4).

4. Пострадиационная термическая обработка облученного резистного слоя. При такой обработке улучшаются функциональные характеристики резистных масок, прежде всего их контрастность при проявлении. Кроме того, правильно выбранный режим пострадиационной обработки позволяет

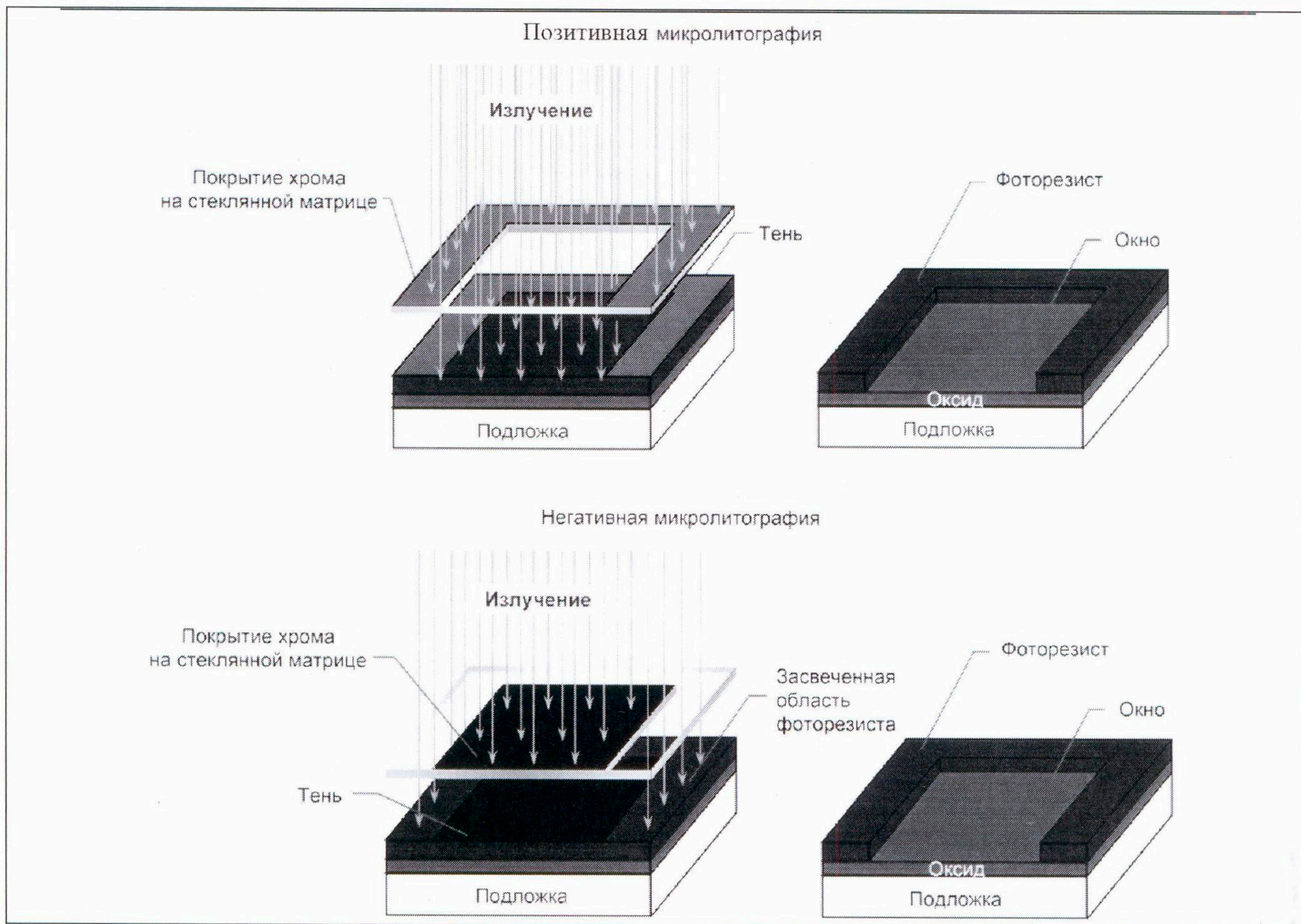


Рис. 1. Позитивная и негативная ультрафиолетовая литография

«залечивать» дефекты фоторезистных масок за счет релаксации механических напряжений, возникающих вследствие структурных перестроек фоторезистных слоев во время их экспонирования.

5. Проявление изображения в слое резиста (например, избирательное удаление экспониро-

ванных участков – в случае позитивно работающих или позитивных резистов или избирательное удаление неэкспонированных участков – в случае негативно работающих или негативных резистов).

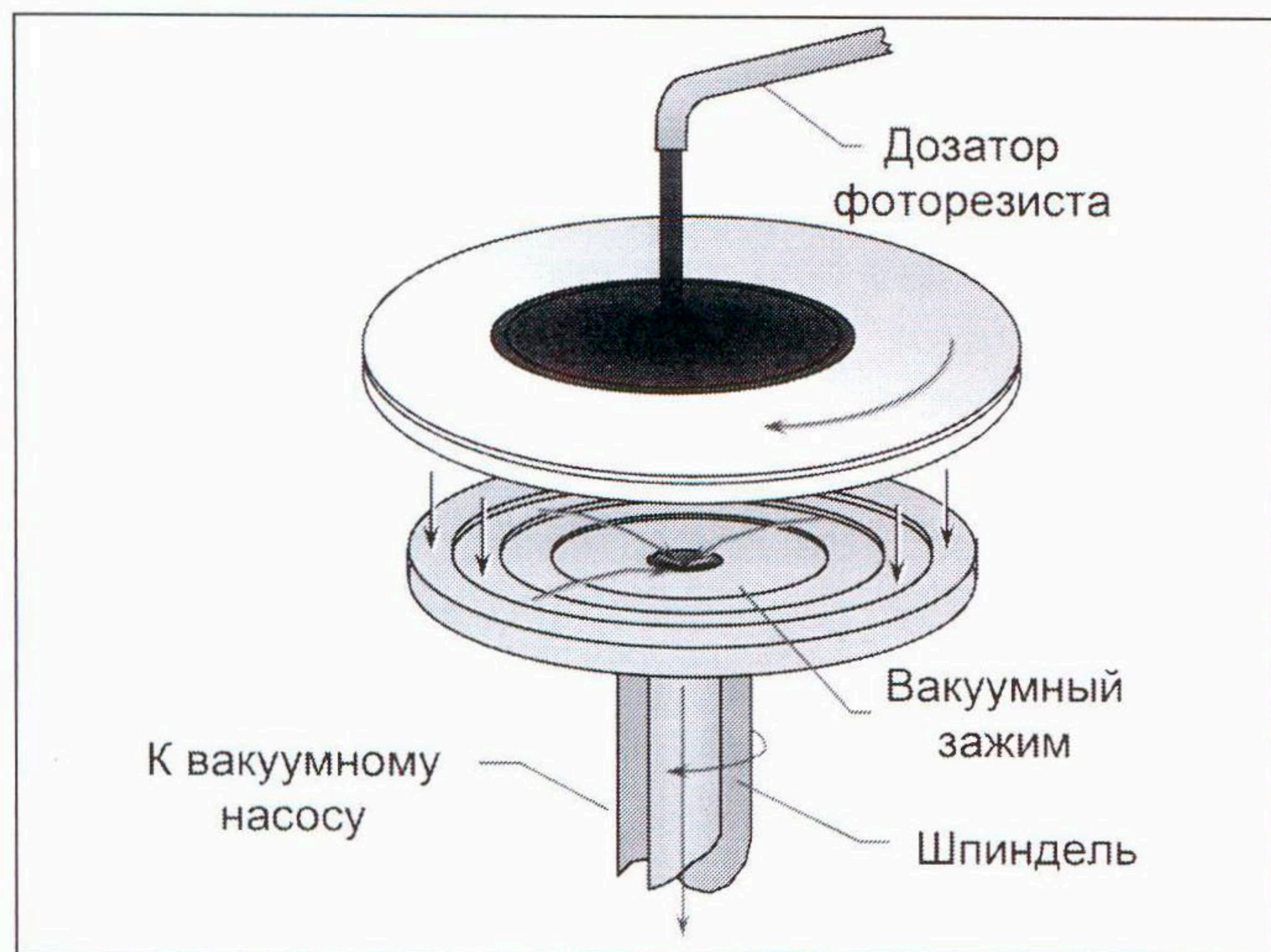


Рис. 2. Нанесение фоторезиста на поверхность подложки

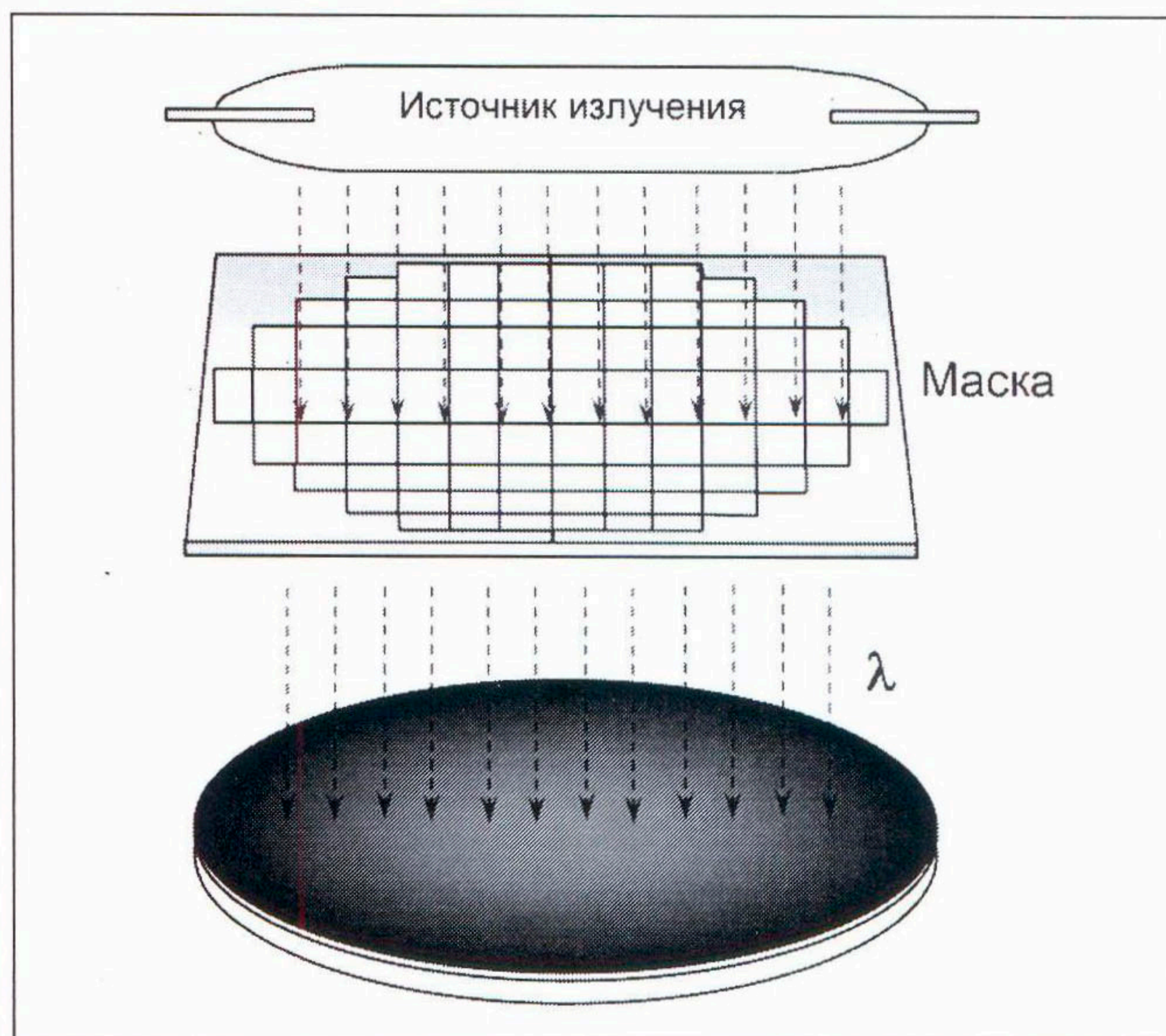


Рис. 3. Экспонирование ультрафиолетовым излучением

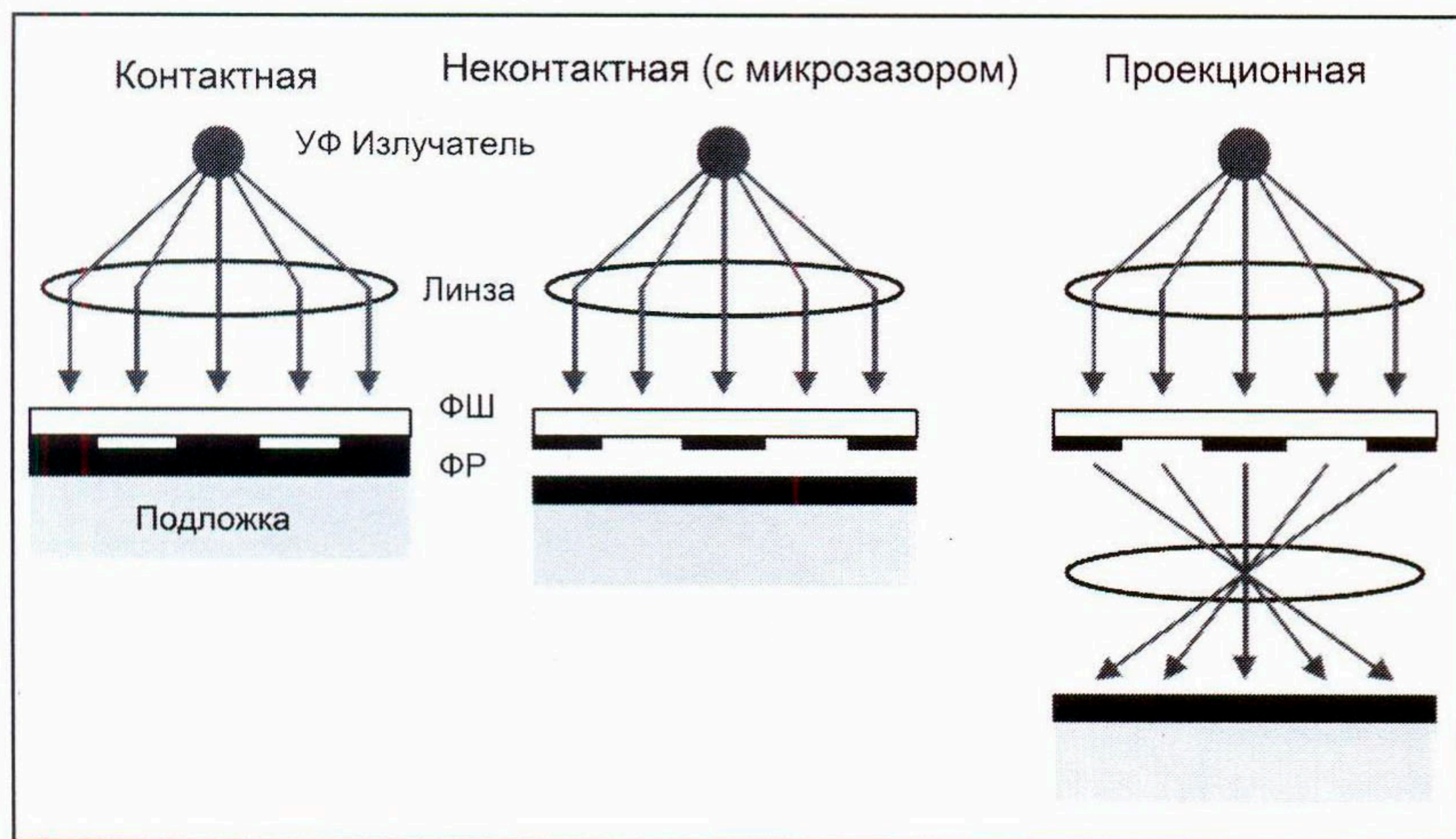


Рис. 4. Методы ультрафиолетовой литографии

Это основная стадия фотолитографии (рис. 5), на которой чаще всего определяются функциональные характеристики резистных масок, а также технологические параметры ультрафиолетовой микролитографии. При проявлении используется разница в устойчивости экспонированных и неэкспонированных участков слоя фоторезиста по отношению к действию проявляющего химического вещества (агента) или физического воздействия (например, нагревания).

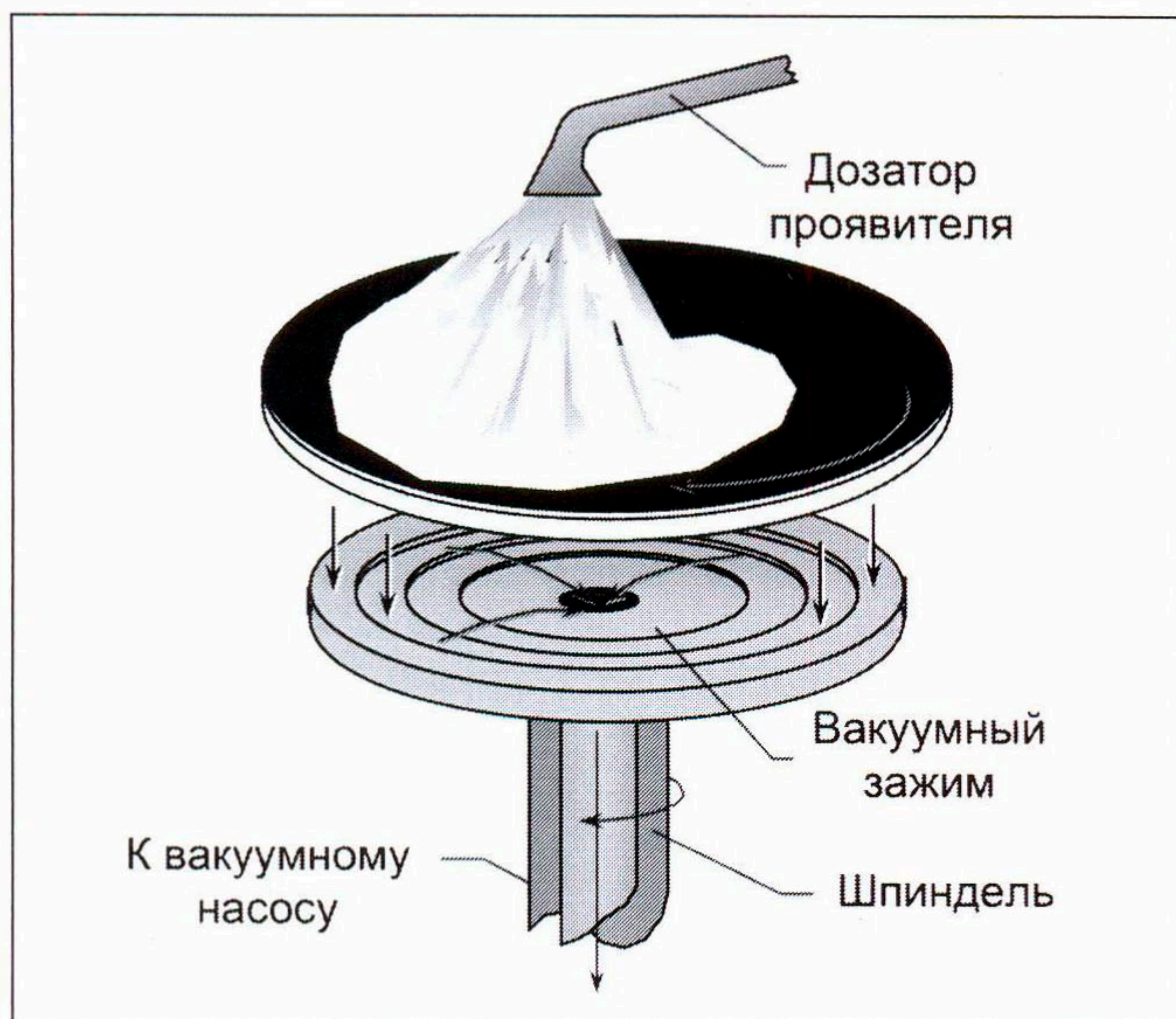


Рис. 5. Проявление изображения в слое резиста

6. Термическая обработка полученной резистной маски для улучшения ее эксплуатационных характеристик. Такая обработка повышает, прежде всего, защитные свойства фоторезиста, а также его дефектность.

Часто процесс ультрафиолетовой литографии дополняется еще двумя стадиями.

7. Модификация поверхностных слоев материала подложки (вытравливание объемных структур, легирование материала подложки, нанесение на открытые участки подложки различных материалов и т.д.) через сформированные на ее поверхности резистные маски.

8. Удаление резистной маски с поверхности подложки (заготовки полупроводникового прибора). Ранее эту стадию проводили при помощи обработки резистной маски в сильных окислителях. Однако в последние 20 – 30 лет практически все производители компонентов микроэлектроники перешли на использование травления в плазме ионизированного газа.

Современная ультрафиолетовая литография невероятно сложный и дорогостоящий технологический процесс. На ее долю приходится более половины производственных затрат при изготовлении изделий микроэлектроники [2]. Именно она чаще всего определяет возможность получения того или иного полупроводникового прибора, особенно в том случае, когда размеры элементов топологии прибора, а также толщины его активных слоев близки к критическим, т. е. предельным для современного уровня развития технологии. Успехи ультрафиолетовой литографии во многом зависят от культуры литографического производства и продуманности конструктивных решений, но в большей степени – от качества. Именно качество материалов, оборудования и производственных модулей, а также технологического процесса в целом определяет ведущее место ультрафиолетовой литографии в современной микроэлектронике. Рассмотрим основные критерии качества технологического процесса ультрафиолетовой литографии, а также оборудования, непосредственно участвующего в его осуществлении.

Различают функциональные, технологические, структурные, экономические и экологические локальные критерии, на основании которых строится обобщенный критерий.

Каждый из перечисленных критериев определяется следующими параметрами:

функциональными:

- разрешающая способность, нм,
- числовая апертура,
- глубина фокуса, нм,
- точность совмещения, нм;

технологическими:

- диаметр пластины, мм,
- размер кадра, мм²,
- время экспонирования, с,
- давление разряжения в рабочей камере, Па,
- время выхода на рабочий режим, с,
- выход годных изделий, %;

структурными:

- оптимальное количество литографических установок, шт.;
- класс чистоты производственного помещения;

экономическими:

- стоимость, у.е.,
- производительность,
- окупаемость;

экологическими:

- выброс загрязняющих веществ, кг,
- уровень электромагнитного излучения, мкВт/см.

Представим процесс потери качества технологического оборудования ультрафиолетовой литографии как некоторую абстрактную математическую модель. Пусть X_1, X_2, \dots, X_k – параметры оборудования, определяющие состояния, которые являются функциями времени. Принадлежность состояния X множеству состояний G_X ($X \in G_X$) свидетельствует о том, что технологическое оборудование ультрафиолетовой литографии отвечает критериям качества. Если значение 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 оборудование не удовлетворяет критериям качества. Если некоторые из значений параметров X_1, X_2, \dots, X_k будут больше допустимых, а другие меньше, то оборудование ультрафиолетовой литографии частично удовлетворяет критериям качества. Для полного удовлетворения параметров технологического оборудования ультрафиолетовой литографии критериям качества должны выполняться условия $X_1 \leq X_{1p}, X_2 \leq X_{2p}, \dots, X_k \leq X_{kp}$, что соответствует соотношению $G_X \subset G_{Xp}$. При этом запас по качеству будет определяться как $K_i = X_{ip}/X_i$. Тогда локальные критерии качества

будут вычисляться по следующим формулам:

по разрешающей способности –

$$K_1 = a_{1p}/a_1,$$

по числовой апертуре –

$$K_2 = NA_{2p}/NA_2,$$

по глубине фокуса –

$$K_3 = DOF_{3p}/DOF_3,$$

по точности совмещения –

$$K_4 = h_{4p}/h_4,$$

по диаметру пластины

$$K_5 = D_{5p}/D_5,$$

по размеру кадра

$$K_6 = S_{6p}/S_6,$$

по времени экспонирования

$$K_7 = t_{э7p}/t_{э7},$$

по давлению разряжения в рабочей камере

$$K_8 = \lg P_{8p}/\lg P_8,$$

по времени выхода на рабочий режим

$$K_9 = t_{в9p}/t_{в9},$$

по выходу годных изделий

$$K_{10} = \mu_{10p}/\mu_{10},$$

по оптимальному количеству литографических установок

$$K_{11} = N_{11p}/N_{11},$$

по классу чистоты помещения

$$K_{12} = M_{12p}/M_{12},$$

по стоимости

$$K_{13} = C_{13p}/C_{13},$$

по производительности

$$K_{14} = \omega_{14p}/\omega_{14},$$

по окупаемости

$$K_{15} = O_{15p}/O_{15},$$

по выбросу загрязняющих веществ

$$K_{16} = U_{16p}/U_{16},$$

по уровню электромагнитного излучения

$$K_{17} = E_{17p}/E_{17},$$

где в числителе находятся допустимые, а в знаменателе – фактические значения соответствующих параметров технологического оборудования.

Тогда обобщенный критерий оценки качества можно найти из выражения

$$\frac{1}{K_N} = \frac{a_1}{K_1} + \frac{a_2}{K_2} + \dots + \frac{a_{17}}{K_{17}},$$

где a_1, a_2, \dots, a_{17} – весовые коэффициенты (для определения этих коэффициентов используется метод экспертных оценок), для которых справедливо соотношение

$\sum_{i=1}^{17} a_i = 1$, а в общем виде обобщенного соотношения

щенный критерий оценки качества оборудования и ультрафиолетовой литографии выражается в следующем виде:

$$K_N = \frac{1}{\sum_{i=1}^{17} \frac{a_i}{K_i}}$$

Выбранный вариант технического решения оборудования ультрафиолетовой литографии окончательно оценивается по критерию экономичности. Оптимальным вариантом будет тот, который обеспечивает снижение стоимости совокупной общественной продукции [3]:

$$\sum_{j=1}^{Z_H} Q_j G_{mj} \rightarrow \min,$$

где Z_H – число типоразмеров конечной совокупности продукции; Q_j – объем производства продукции j -го вида; G_{mj} – индивидуальная стоимость единицы продукции.

Создание новых технологий формирования систем ультрафиолетовой литографии требует дополнительных капиталовложений, которые берутся из фонда накопления. Направляя определенную часть ресурсов из фонда на создание и внедрение новых средств получения нужной продукции в ту или иную область проектирования технологии и оборудования ультрафиолетовой литографии, необходимо быть уверенным, что экономия на затратах в данной области будет больше, чем недополучаемая экономия в других областях, куда эти ресурсы не поступают. В этом и состоит смысл оценки по критерию сравнительной экономичности сопоставимых вариантов. Мерой соответствия этому критерию выступают определенные показатели, которые по своей структуре могут быть частными и обобщенными. В качестве частных используются следующие показатели: снижение трудоемкости продукции; рост производительности труда; высвобождение рабочих; снижение материалоемкости и энергоемкости. В качестве обобщенного показателя используются приведенные экономические затраты. Экономический эффект от производства и использования новых технических решений ультрафиолетовой литографии, с учетом морального износа, рекомендуется определять по формуле

$$\Theta = \left[3_1 \frac{B_{\Gamma 2} P_{A1} + E_H}{B_{\Gamma 1} P_{A2} + E_H} + \frac{(I'_1 + I'_2) - E_H (K'_2 + K'_1)}{P_{A2} + E_H} - 3_2 \right] A_{\Gamma 2},$$

где $3_1, 3_2$ – приведенные затраты, обусловленные производством базового (существующего) и нового объекта, р./ед.; $B_{\Gamma 1}, B_{\Gamma 2}$ – годовые объемы работ при использовании оборудования ультрафиолетовой литографии на основе базового и нового варианта в натуральных единицах; P_{A1}, P_{A2} – доля амортизационных отчислений от балансовой стоимости на полное восстановление базового и нового вариантов оборудования ультрафиолетовой литографии (определяется как величина, обратная сроку службы оборудования с учетом морального старения); E_H – нормативный коэффициент эффективности; I'_1, I'_2 – годовые эксплуатационные издержки потребителя при использовании базового и нового вариантов; K'_1, K'_2 – капитальные вложения потребителя при использовании базового и нового варианта; $A_{\Gamma 2}$ – годовой объем производства новых изделий.

При сравнении вариантов конструктивных решений технологического оборудования ультрафиолетовой литографии предпочтение отдается тому из них, который обладает большим значением ожидаемого экономического эффекта [4].

На этапе принятия решения еще не известны окончательные параметры нового варианта технологического оборудования. Экономическое сравнение имеет приближенный характер. Но оно ориентирует разработчика в выборе оборудования ультрафиолетовой литографии по составляющим элементам и позволяет использовать при этом функционально-стоимостной анализ.

Для реализации технологического процесса ультрафиолетовой литографии в экстремальном ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах предложено техническое решение, удовлетворяющее критериям качества и имеющее высокую экономическую эффективность [5].

Согласно этому решению в устройство для формирования изображения были введены лазерный источник, собирающее асферическое коллекторное и плоское отражательное зеркала, проекционный объектив, вакуумная камера и средства откачки, что обеспечило возможность формирования уменьшенного изображения шаблона.

Устройство для формирования изображения (рис. 6) содержит образец 1 с фоторезистом 2, источник света 3, собирающее асферическое коллекторное зеркало 4, плоское отражающее зеркало 5, маску – фотошаблон 6 и проекционный объектив 7. Источник света 3 выполнен в виде лазерного ис-

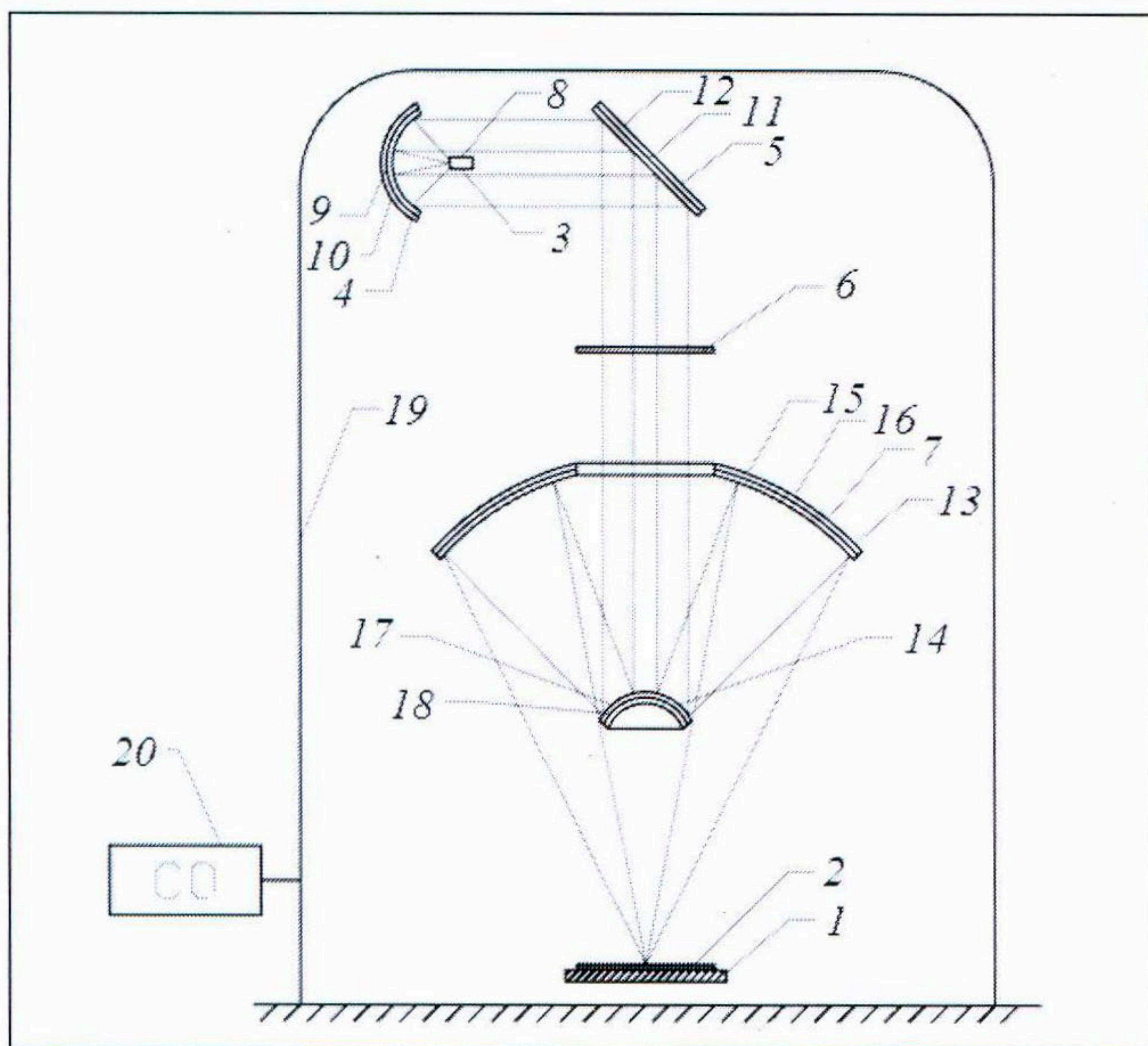


Рис. 6. Устройство для формирования изображения

точника 8, собирающее асферическое коллекторное зеркало 4 и плоское отражающее зеркало 5 – в виде чередующихся четвертьволновых слоев 9, 10, 11 и 12 двух пар материалов – молибдена и кремния (Mo-Si), проекционный объектив 7 состоит из большого вогнутого зеркала 13 с центральным отверстием и малого выпуклого 14, причем поверхность зеркал также выполнена многослойной в виде чередующихся четвертьволновых слоев 15, 16, 17 и 18 двух пар материалов – молибдена и кремния (Mo-Si). Устройство дополнительно снабжено вакуумной камерой 19 и средством откачки 20.

Данное устройство работает следующим образом [6]. Лазерный источник 8 обеспечивает генерацию электромагнитного излучения, которое отражается от чередующихся четвертьволновых слоев собирающего асферического коллекторного зеркала 4, а затем плоского отражающего зеркала 5, сфокусированным пучком, попадает на маску фотошаблона 6, при прохождении через которую переносит изображение, содержащее структуру топологии, на малое выпуклое зеркало 14 проекционного объектива 7. Малое выпуклое зеркало 14 отражает падающее излучение таким образом, что оно, попадая на большое вогнутое зеркало с централь-

ным отверстием 13 проекционного объектива 7, фокусируется на подложке 1, экспонируя фоторезист 2. Отражение от многослойных зеркал 4, 5, 13 и 14 возможно благодаря тому, что малая часть падающего излучения отражается от каждой пары слоев молибдена и кремния (Mo-Si), причем толщина слоя в четверть волны подобрана так, чтобы отраженные волны при интерференции складывались. Процесс проходит в вакуумной камере 19 с поддержанием необходимого разряжения средством откачки 20.

Применение предлагаемого устройства для формирования изображения позволяет обеспечить возможность формирования уменьшенного изображения шаблона.

В заключение следует отметить следующие резервы повышения производительности технологического оборудования:

- для сокращения холостых ходов цикла необходимо использовать принципиально иную (например, карусельную) компоновку при проектировании нового оборудования;
- повышение производительности оборудования достигается только в том случае, если все механизмы и устройства работают с высокой надежностью, так как ускорение в ущерб надежности обычно компенсируется снижением выхода годных приборов или простоями;
- с целью повышения надежности работы диффузионных насосов и уменьшения обратного потока паров масла в конструкциях необходимо устанавливать высоковакуумные криогенные ловушки.

Статья выполнена членами РВО (Российского научно-технического вакуумного общества).

ЛИТЕРАТУРА

1. Волчков Л.И., Степаньянц Ю.Р. Организационно-технические мероприятия по повышению производительности технологического автоматизированного оборудования. М.: Высшая школа. 1988.
2. Кахоновский Г.В. Новые методы в сборочном производстве цветных кинескопов. М.: Высшая школа. 1985.
3. Power, B.D. and Crawley, D.Y. // Vacuum. 1984. V. IV. № 4. P. 415 – 437.
4. Кац А.М. Теория упругости. М.: ГИГТЛ. 1956.

Поступила 18.04.2012 г.