



УДК 681.513, 621.382

Н.Н. Балан, канд. техн. наук, В.А. Васин, канд. техн. наук, Е.Н. Ивашов, д-р. техн. наук, М.Ю. Корпачев, С.В. Степанчиков, канд. техн. наук (Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»);  
e-mail: mcorpachev@gmail.com

## ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НАНОЛИТОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ\*

Рассмотрены характеристики качества работы нанолитографического оборудования, функционирующего в области экстремального ультрафиолетового и рентгеновского излучения, особенности его оптических систем и энергетические потери в них. Исследованы ключевые аспекты автоматизированного проектирования рассматриваемого оборудования. Представлено устройство для выполнения нанопераций с использованием эффекта фокусировки рентгеновского излучения нанотрубками, заключенными в свинцовую матрицу, и расположенными в них фуллеренами.

The characteristics of quality lithographic nano technology equipment functioning in the field of extreme ultraviolet and X-ray radiation, especially its optical systems and energy losses in them. Investigated key aspects of computer-aided design equipment under consideration. Presented by the device to perform nanoscale operations using X-ray focusing effect of the prisoners in the lead with a matrix of carbon nanotubes are arranged in fullerenes.

**Ключевые слова:** экстремальная ультрафиолетовая литография; оптическая литографическая система; энергетические потери в нанолитографе; устройство для выполнения нанопераций; фуллерены.

**Keywords:** Extreme ultraviolet lithography; Optical lithographic system; Energy losses in the nano lithographer; Device for nano operations; Fullerenes.

### Введение

В последнее десятилетие в области экстремального ультрафиолета (ЭУФ) и мягкого рентгена достигнут заметный прогресс при создании отражательных оптических элементов и высокоэффективных источников излучения – главным образом в процессе разработки перспективных образцов вооружения на новых физических принципах (например, «рентгеновского лазера» [1]).

Одним из центральных моментов здесь можно считать создание зеркал, обладающих весьма высоким коэффициентом отражения в ЭУФ и мягкой рентгеновской части электромагнитного излучения. Для этого используется многослойное брэгговское покрытие на атомарно-гладкой поверхности массивной подложки с заданной кривизной. На рис. 1. представлена типичная зависимость коэффициента отражения от длины волны для многослойной системы Mo–Si. В настоящее время достигнут коэффициент отражения, приближающийся к  $R = 70\%$  при 13,4 нм (теоретическое значение  $R_{\max} \sim 74...78\%$ ) [2, 3].

Источником ЭУФ обычно является лазерная плазма, генерируемая импульсным излучением мощного частотного лазера, сфокусированным на некоторую мишень. Оптическая система и шаблон

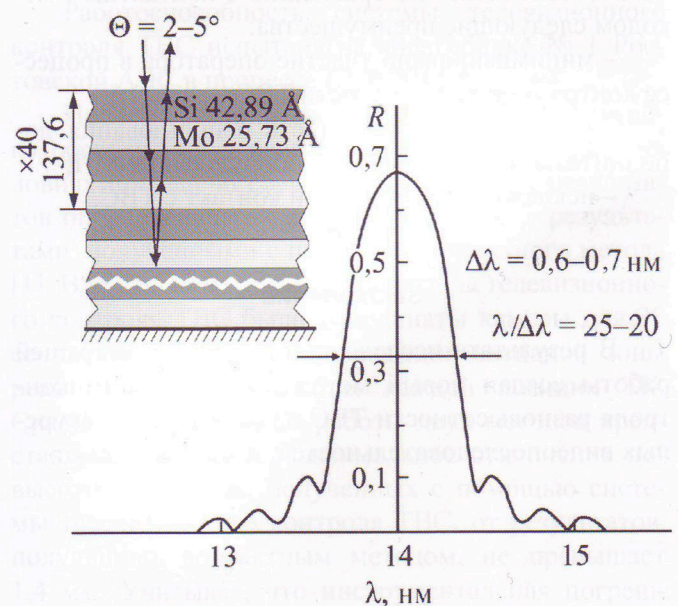


Рис. 1. Типичный спектр отражения «брэгговского» зеркала на примере многослойной системы Mo–Si

\* В редакции авторов.

создаются по принципам отражательной рентгеновской оптики с многослойными брэгговскими покрытиями, наносимыми на атомарно-гладкие поверхности: плоские (ЭУФ-шаблон) или расчетной кривизны (объектив и конденсор). При этом увеличенный в несколько раз рисунок интегральной схемы гравировается в поглощающем слое на поверхности шаблона традиционными методами субмикронной фотолитографии или электронной литографии остросфокусированным пучком.

Структура ЭУФ-нанолитографа с «лазер-плазменным» источником излучения изображена на рис. 2. Весь нанолитограф можно рассматривать как состоящий из четырех главных блоков:

- 1) источника ЭУФ-излучения, освещающего маску;
- 2) узла маски, несущего в увеличенном виде изображение слоя чипа;
- 3) оптической системы, формирующей изображение;
- 4) узла образца с нанесенным поверх образца ЭУФ-фоторезистом.

#### Источники излучения для нанолитографии

Промышленное применение систем ЭУФ-литографии ставит задачи повышения производи-

сти. Поэтому, рассматривая источники излучения для ЭУФ-литографа, можно сказать, что лазерная плазма была и остается одним из наиболее удобных и эффективных методов генерации ЭУФ. Собственно источником здесь является  $\sim (50...100)$ -микронное, быстро (со скоростью  $\sim 10^6$  см/с) расширяющееся, ионизированное до 20 крат облачко вещества мишени в плазменном состоянии при температуре от 0,12 до 1,2 млн градусов, соответствующей 10...100 эВ. Однако трудно преодолимым препятствием оказалось образование наряду с излучением большого количества микроосколков, загрязняющих оптическую систему и быстро выводящих ее из строя. Особенно опасно их попадание на шаблон, что приводит к воспроизводству бракованных структур в интегральных схемах. Изобретение и использование многочисленных специальных приемов защиты оптического тракта не привели к радикальному решению проблемы. Это вынудило в дальнейшем сосредоточиться на сверхзвуковых газовых струях тяжелого инертного газа ксенона. Именно на лазерной плазме ксенона построены источники излучения в опытных версиях (американских и европейской) ЭУФ-нанолитографов. Наиболее опасное положение в источнике занимает коллекторное зеркало, находящееся в максимальной близости от мишени конвертора. Только на нем, в

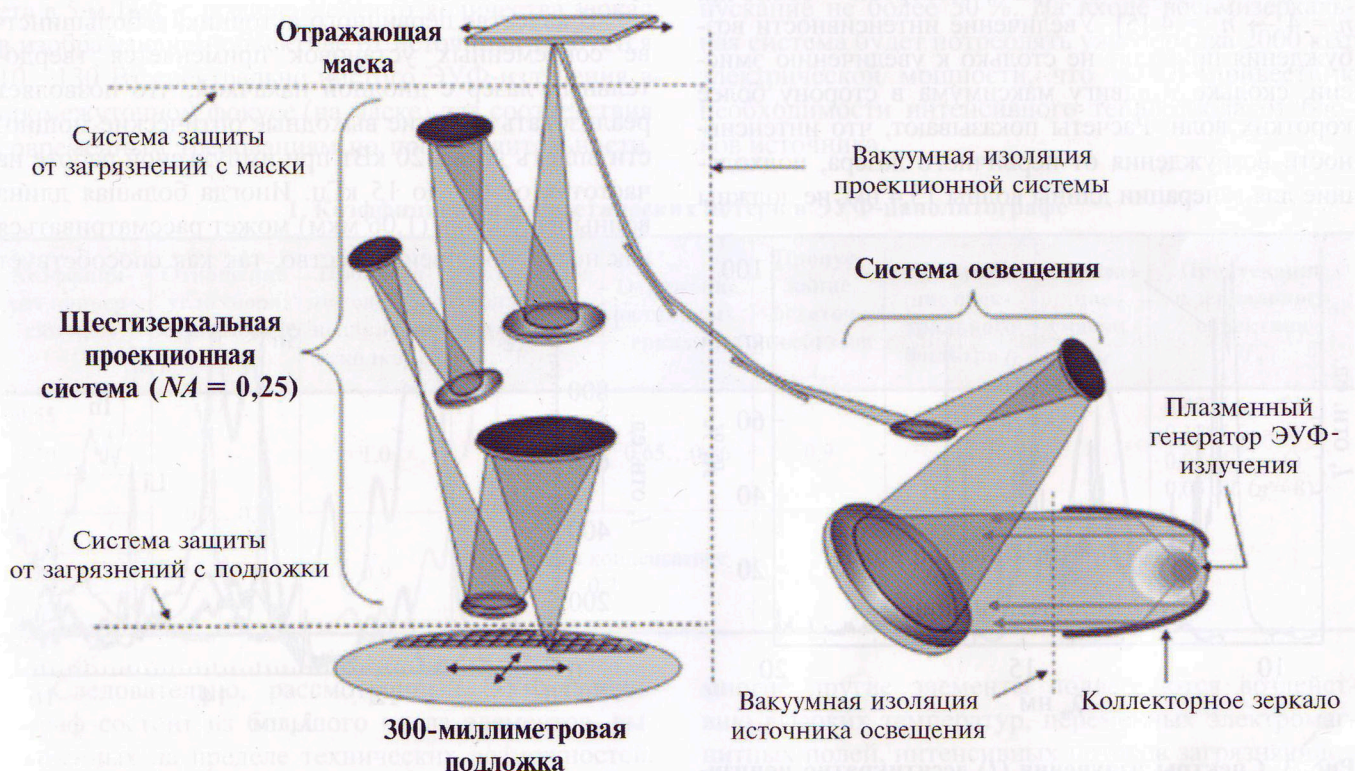


Рис. 2. Структура ЭУФ-нанолитографа с «лазер-плазменным» источником излучения

случае газовой струи ксенона, еще регистрируется некоторая коррозия, вызванная бомбардировкой высокоэнергетичными ионами и атомами инертного газа, ограничивающая срок службы. Важнее, что для борьбы с загрязнениями приходится жертвовать коэффициентом конверсии  $\eta$ , который падает до десятых долей процента и плохо поддается доведению его до приемлемых величин. Предельно достижимой величиной для газообразного Хе принято считать  $\eta = 0,7\%$  (при максимально достигнутом коэффициенте  $\eta \approx 0,55\%$ ) [4]. В погоне за увеличением коэффициента конверсии приходится направлять луч лазера в область, близко примыкающую к соплу, через которое выходит газ, где плотность максимальна. Это приводит к повышению вероятности разрушения сопла и появлению загрязнений, являющихся частицами материала сопла. Основным источником ЭУФ-фотонов в интересующей нас области спектра оказывается десятикратно ионизированный ксенон  $\text{Xe}^{10+}$  (рис. 3), и эмиссия здесь обязана дискретным линиям поглощения в серии оптических переходов с участием четвертой и пятой атомных оболочек Хе:  $4p^6 4d^s - 4p^5 4d^9 + 4d^7 (4f + 5p)$ . Однако доля излучения, приходящаяся на нужную длину волны 13,4 нм, отвечает только относительно слабым переходам  $4p^6 4d^8 5p 4d^7$  и многократно меньше излучения, приходящегося на 11 нм и отвечающего остальным переходам, осуществляемым внутри четвертой оболочки  $n = 4 \rightarrow n^* = 4$  [5]. Увеличение интенсивности возбуждения приводит не столько к увеличению эмиссии, сколько к сдвигу максимума в сторону более коротких волн. Расчеты показывают, что интенсивности возбуждения от первичного лазера, подходящие для генерации длины волны 13,4 нм, не должны

выходить за пределы  $10^{10} \dots 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>, а максимальная электронная температура не должна превышать 55 эВ [5].

### Энергетические потери в источнике излучения и оптическом тракте нанолитографа

Для эффективной конверсии на 13,4 нм выгоднее вещество, имеющее атомный номер 50 (Sn). С увеличением атомного числа (Sb, I) длина волны излучения сдвигается в коротковолновую сторону, и наоборот (In, Cd). Кроме того, определенный интерес для эмиссии 13,4 нм представляют Li, F и Sc, а также O, имеющие подходящие линии дискретного спектра в сильно ионизированном состоянии. Спектры излучения многократно ионизированных Хе, In, Sn, I, Li показаны на рис. 4.

Особое внимание уделяется олову в качестве среды формирования плазмы, генерирующей ЭУФ-излучение, что подтверждается первыми опытами.

Достигнут коэффициент конверсии не менее 2%, оценки обещают 3% и более. Используя Z-пинч-разряд и его модификации, удастся получить оптическую мощность порядка 10 Вт в промежуточном фокусе (на маске) [6]. Преимущество разрядного источника состоит еще и в отсутствии мощного первичного лазерного источника возбуждения плазмы. Но при этом возникает проблема загрязнения оптического тракта.

В качестве первичного источника в большинстве современных установок применяется твердотельный лазер с диодной накачкой, что позволяет реализовать высокие выходные оптические мощности вплоть до 5...20 кВт при импульсной работе на частотах от 0,5 до 15 кГц. Иногда большая длина волны излучения (1,06 мкм) может рассматриваться как некоторое преимущество, так как способствует

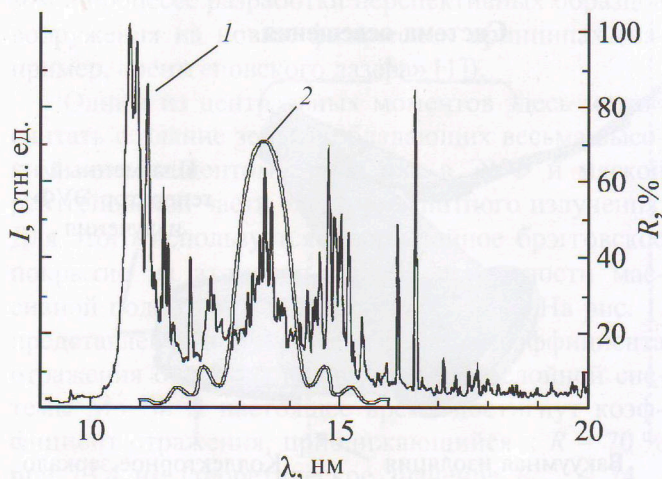


Рис. 3. Спектры излучения (1) десятикратно ионизированного Хе<sup>10+</sup> и отражения (2) типичного «брэгговского» зеркала Мо–Си

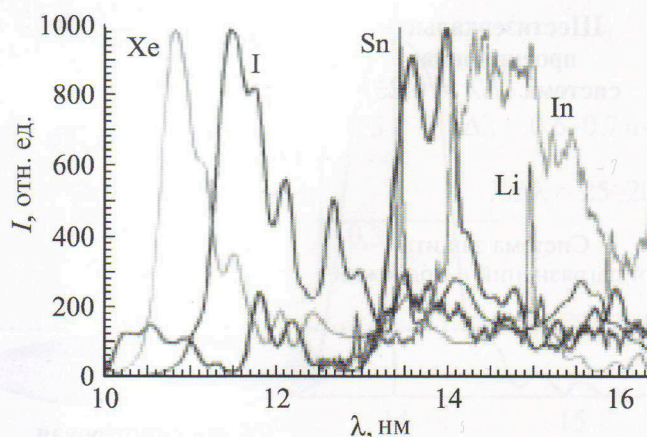


Рис. 4. Спектры излучения многократно ионизированных Хе, In, Sn, I, Li

минимизации оптимальной плотности плазмы и уменьшению загрязнений.

Альтернативой могли бы служить мощные эксимерные лазеры, преимущественно на молекулах KrF и KrCl с длиной волны 248 и 308 нм, в которых легче достигаются высокие значения энергии в импульсе. При этом затруднена возможность функционирования при высоких значениях средней мощности в квазистационарном ре-

жиме. Обобщенная энергетическая схема нанолитографа представлена на рис. 5. Помимо низкого значения коэффициента конверсии система содержит большое количество различных других источников существенных энергетических потерь (табл. 1). Особенно значимы потери на многократное отражение, приводящие к уменьшению в 300 раз в случае перспективного восьмизеркального объектива.

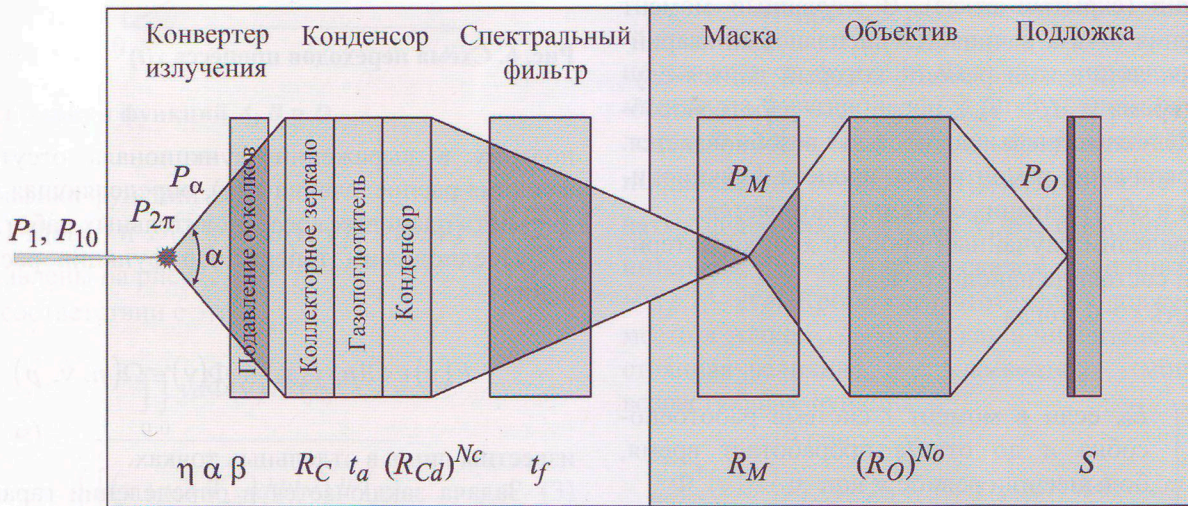


Рис. 5. Обобщенная энергетическая схема нанолитографа

При стандартной чувствительности фоторезиста в 5 мДж/см<sup>2</sup> в зависимости от количества зеркал в изображающем объективе от источника требуется 10...130 Вт спектрально чистого ЭУФ-излучения в промежуточном фокусе (на маске) для соответствия современным требованиям по производительности.

При этом фильтр спектральной очистки имеет пропускание не более 50%. На входе восьмизеркальная система будет потреблять уже порядка 2000 кВт электрической мощности, что может привести к необходимости интенсивного теплоотвода от блоков источника.

1. Коэффициенты энергетических потерь в ЭУФ-нанолитографе

Коэффициент конверсии η, %	Отношение угла сбора коллектора α к 2π	Пропускание системы подавления осколков β	Отражение коллекторного зеркала R <sub>C</sub>	Отражение остальных зеркал R <sub>Cd</sub>	Пропускание остаточных газов t <sub>a</sub>	Пропускание спектрального фильтра t <sub>f</sub>	Отражение маски R <sub>M</sub>	Пропускание n-зеркального объектива T <sub>0</sub>
0,55	0,2...0,3	1,0	0,5	0,65...0,86	0,9	0,5	0,65	0,4225 (n = 2)
0,70								0,1785 (n = 4)
1,5								0,0754 (n = 6)
0,7		0,9	Потери на конденсаторе 0,7		1,0			0,03186 (n = 8)
2,2								
3,0								

Следовательно, рассмотренный ЭУФ-нанолитограф состоит из большого числа элементов, выполненных на пределе технических возможностей. Источник излучения, оптическая система, вакуумная камера и устройства наноперемещений, а также

многие другие элементы подвергаются воздействию высоких температур, переменных электромагнитных полей, интенсивных потоков загрязняющих веществ, что может привести к отказу нанолитографа.

**Система восстановления нанолитографических систем**

Исследуем стратегию восстановления системы после проявления отказа. Пусть в момент  $t = 0$  нанолитограф работает до отказа в течение времени  $\xi$ , распределенного по закону  $F(x)$ . Далее от момента  $t = \xi$  до момента появления отказа  $t = \xi + \zeta$  в течение случайного времени  $\zeta$ , распределенного по закону  $\Phi(x)$ , литограф простаивает в неработоспособном состоянии (скрытый отказ). В случайный момент проявления отказа начинается внеплановый аварийно-профилактический ремонт, который длится случайное время  $\gamma (M_\gamma = T_{\text{ап}})$ , после чего работоспособность нанолитографа полностью возобновляется. После окончания ремонта весь процесс функционирования и обслуживания системы повторяется.

Определим случайный процесс  $x(t)$ , характеризующий состояние нанолитографа.

Пусть  $z \geq 0$ , тогда

$$x(t) = \begin{cases} E_0, & \text{если в момент } t \text{ система работоспособна и до отказа проработает время, большее или равное } z; \\ E_1, & \text{если в момент } t \text{ система работоспособна и до отказа проработает время, меньшее } z; \\ E_2, & \text{если в момент } t \text{ в системе имеется скрытый отказ}; \\ E_3, & \text{если в момент } t \text{ система ремонтируется (внеплановый аварийно-профилактический ремонт)}. \end{cases}$$

Схема переходов  $x(t)$  показана на рис. 6.

Введенный процесс – регенерирующий (например, моментами регенерации будут моменты перехода в состояние  $E_3$ ) и в предположении, что хотя бы одна из случайных величин  $\xi$ ,  $\zeta$  и  $\gamma$  непрерывна, – апериодический.

Поэтому при длительной эксплуатации литографической системы характеристики качества функционирования выражаются дробно-линейным функционалом

$$I(\Phi, F) = \frac{\int_0^\infty \int_0^\infty A(v, y) d\Phi(v) dF(y)}{\int_0^\infty \int_0^\infty B(v, y) d\Phi(v) dF(y)}. \quad (1)$$

Заметим, что в рассматриваемой стратегии не проводятся плановые восстановительные работы,

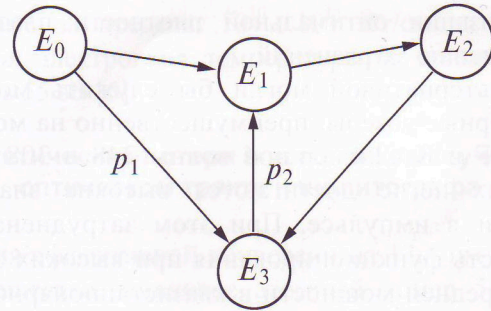


Рис. 6. Схема переходов процесса  $x(t)$

поэтому в выражении функционала отсутствует функция распределения  $G(x)$ , определяющая периодичность плановых восстановительных работ.

Предположим теперь, что функции распределения

$$F(y) \in \Omega(n, y, \pi) \text{ и } \Phi(v) \in \Omega(m, v, p) \quad (2)$$

известны лишь в отдельных точках.

Задача заключается в определении гарантированного среднего «выигрыша» и функций  $F^*(y)$  и  $\Phi^*(v)$  из рассматриваемых множеств (2), при которых он достигается, т.е. следует определить

$$\min_{\Phi \in \Omega(m, v, p)} \min_{F \in \Omega(n, y, \pi)} I(\Phi, F) = I(\Phi^*, F^*),$$

что соответствует «выигрышу», получаемому при наихудших характеристиках.

Если функционал (1) выражает потери, то необходимо брать максимумы его по  $F(y)$  и  $\Phi(v)$ .

Пусть функция  $A(v, y)$  есть время пребывания процесса  $x(t)$  в состоянии работоспособности ( $E_0 \cup E_1$ ) на периоде регенерации, для которого отказ системы происходит через время  $\xi = y$ , а длительность проявления отказа равна  $v(\zeta = v)$ . Очевидно, что в этом случае

$$A(v, y) = y.$$

Аналогично функция  $B(v, y)$  определяется как длительность периода регенерации при условии  $\xi = y, \zeta = v$ .

Из описания стратегии следует

$$B(v, y) = y + v + T_{\text{ап}}.$$

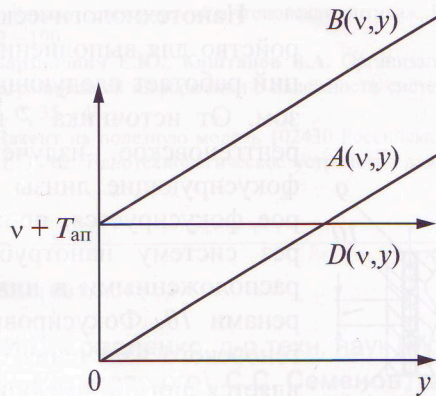


Рис. 7. Графики функций A, B и D

Графики функций  $A(v, y)$ ,  $B(v, y)$  и  $D(v, y) = B(v, y) - A(v, y) = v + T_{ан}$  представлены на рис. 7.

В соответствии с этим

$$K_{\Gamma}(\Phi, F) = \frac{\int_0^{\infty} \int_0^{\infty} y d\Phi(v) dF(y)}{\int_0^{\infty} \int_0^{\infty} (y + v + T_{ан}) d\Phi(v) dF(y)} = \frac{1}{1 + \frac{\int_0^{\infty} \int_0^{\infty} (v + T_{ан}) d\Phi(v) dF(y)}{\int_0^{\infty} \int_0^{\infty} y d\Phi(v) dF(y)}} \quad (3)$$

При определении минимума функционала (3) по  $F(y) \in \Omega(n, y, \pi)$  заметим, что этот функционал дробно-линейный, и следовательно, при любом фиксированном  $\Phi(v)$  его минимум достигается на множестве ступенчатых функций  $\Omega^*(n, y, \pi)$ , имеющих на полуинтервале  $[y_i, y_{i+1})$  один скачок величины  $\Delta\pi_i = \Delta\pi_{i+1} - \Delta\pi_i$ , т.е.

$$\min_{F \in \Omega(n, y, \pi)} K_{\Gamma}(\Phi, F) = \min_{F \in \Omega^*(n, y, \pi)} K_{\Gamma}(\Phi, F) = \min_{\tau_i \in [y_i, y_{i+1}), i=0, n} \frac{1}{\left(1 + \int_0^{\infty} (v + T_{ан}) d\Phi(v)\right) / \sum_0^n \tau_i \Delta\pi_i} \quad (4)$$

Функция  $(v + T_{ан})$  является невозрастающей по переменному  $v$  при фиксированном  $y$ , а функция  $y -$  неубывающая по  $y$  при фиксированном  $v$ . Поэтому можно утверждать, что максимум по  $\tau$  функции, стоящей в знаменателе выражения (4), или минимум функции (4) достигается при  $\tau_i = y_i + 0$ , т.е.

$$\min_{F \in \Omega(n, y, \pi)} K_{\Gamma}(\Phi, F) = \frac{\sum_0^n y_i \Delta\pi_i}{\sum_0^n y_i \Delta\pi_i + T_{ан} + \int_0^{\infty} v d\Phi(v)} \quad (5)$$

Заметим, что экстремальная функция

$$F^*(y) = \begin{cases} 0 & \text{при } y \leq 0; \\ \Delta\pi_{i+1} & \text{при } y_i < y \leq y_{i+1}, i = 0, 1, \dots, n-1; \\ 1 & \text{при } y > y_n \end{cases}$$

не зависит от функции  $\Phi(v)$ , что упрощает поиск минимума функционала (5) по функциям распределения  $\Phi \in \Omega(m, v, p)$ . Так как функционал (5) дробно-линейный, то минимум достигается на ступенчатых функциях  $\Phi \in \Omega^*(m, v, p)$ , имеющих в полуинтервале  $[v_i, v_{i+1})$  один скачок величины  $\Delta p_i = \Delta p_{i+1} - \Delta p_i$ . Кроме того, этот скачок должен иметь место в точке  $v_{i+1} - 0$ , так как в числителе (5) – постоянная величина, а в знаменателе – монотонно возрастающая функция

$$\Phi^*(v) = \begin{cases} 0 & \text{при } v \leq v_1, \\ p_i & \text{при } v_i \leq v < v_{i+1}, i = 0, 1, \dots, m-1, \\ 1 & \text{при } v \geq v_m \end{cases}$$

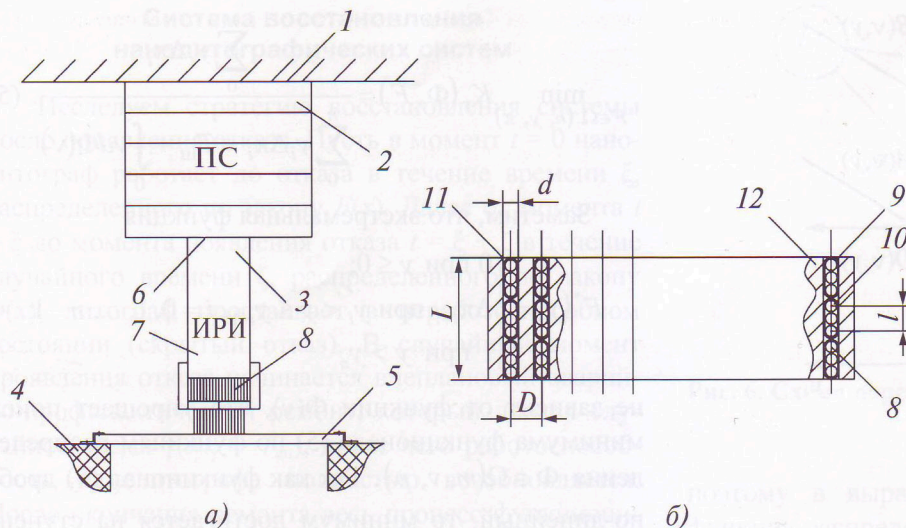
не является функцией распределения, так как она непрерывна справа, и для коэффициента готовности  $K_{\Gamma}(\Phi, F)$  определяем нижнюю грань по  $\Phi \in \Omega(m, v, p)$ , т.е.

$$\inf_{\Phi \in \Omega(m, v, p)} \min_{F \in \Omega(n, y, \pi)} K_{\Gamma}(\Phi, F) = \frac{\sum_0^n y_i \Delta\pi_i}{\sum_0^n y_i \Delta\pi_i + \sum_0^{m-1} v_{i+1} \Delta p_i + T_{ан}}$$

При определении минимума функционала по  $\Phi$  необходимо условие  $\Phi(v) = 1$  при  $v \geq v_m (v_m < \infty)$ , так как в противном случае нижняя грань исследуемого функционала равна нулю и получаем тривиальную оценку [6].

### Техническое решение для нанолитографии

Для повышения надежности литографической установки целесообразно ввести обобщенный коэффициент качества. Для повышения обобщенного коэффициента качества необходимо обеспечить устойчивое функционирование нанолитографической установки в условиях высоких температур, переменных электромагнитных полей и интенсив-



Нанотехнологическое устройство для выполнения операций работает следующим образом. От источника 7 подается рентгеновское излучение на фокусирующие линзы 8, которое фокусируется, проходя через систему нанотрубок 9 с расположенными в них фуллеренами 10. Фокусировка рентгеновского излучения осуществляется линзой, имеющей двояковогнутый профиль, получаемый за счет двух соседних фуллеренов 10 внутри углеродных нанотрубок 9. Число углеродных нанотрубок 9 не менее десяти в одном канале 11 и число фуллеренов 10 в одной углеродной нанотрубке 9 не менее

**Рис. 8. Устройство для выполнения нанопераций:**  
 а – общий вид; б – свинцовая матрица с каналами

ных потоков загрязняющих веществ. Эта задача решается применением устройства для выполнения нанопераций (рис. 8).

Согласно предложенному устройству, на торце пьезосканера (ПС) установлен источник рентгеновского излучения (ИРИ) с фокусирующими линзами, выполненными в виде фокусирующих элементов – фуллеренов, расположенных в каналах свинцовой матрицы, диаметр  $d$  каналов 20...50 нм, количество фуллеренов не менее  $10^3$  в одном канале, длина  $L$  каждого канала составляет 20...50 мкм, а расстояние  $l$  между каналами по осям не менее двух диаметров канала [7].

Введение в устройство для выполнения нанопераций фокусирующих линз, выполненных в виде фуллеренов, расположенных в каналах свинцовой матрицы, с диаметром  $d$  каналов 20...50 нм и количеством фуллеренов не менее  $10^3$  в одном канале, дает возможность фокусировать излучение в области экстремального ультрафиолета и мягкого рентгена с уменьшением фокусного расстояния до нескольких мкм и обеспечением устойчивого функционирования нанолитографического комплекса в условиях высоких температур, переменных электромагнитных полей и интенсивных потоков загрязняющих веществ.

Устройство для выполнения нанопераций содержит неподвижную платформу 1, закрепленный на ней ПС 2, на котором установлен источник излучения 3, подложкодержатель 4 с установленной на нем подложкой 5. На торце 6 ПС 2 установлен ИРИ 7 с фокусирующими линзами 8, выполненными в виде фокусирующих элементов – фуллеренов 9, расположенных в каналах 10 свинцовой матрицы 11.

$10^3$  обусловлено тем, что коэффициент преломления рентгеновских лучей близок к единице и отличается от нее на  $10^{-5} \dots 10^{-7}$ .

Применение предполагаемого технологического устройства для выполнения нанопераций позволяет обеспечить эффективную фокусировку рентгеновского излучения и устойчивое функционирование нанолитографической установки в условиях высоких температур, переменных электромагнитных полей и интенсивных потоков загрязняющих веществ.

**Заключение**

Таким образом, дальнейшее развитие литографической технологии невозможно без создания информационной системы поддержки и принятия решений, направленной на поиск оптимальных стратегий повышения надежности отдельных узлов литографической установки и характеристик качества функционирования нанолитографических систем в целом.

**Библиографический список**

1. Сейсян Р. Нанолитография СБИС в экстремально дальнем вакуумном ультрафиолете // Журнал технической физики. 2005. Т. 75, вып. 5. С. 1 – 13.
2. Kim D.E., Cha D.H., Lee S.W. Optimized Structures of Multi-layer Soft X-Ray Reflectors in the Spectral Range of 30 to 300 Å // Japanese Journal of Applied Physics. 1998. V. 37. P. 2728 – 2733.
3. Салашенко Н.Н. Исследования в области многослойной рентгеновской оптики в ИФМ РАН // Материалы всероссийского совещания «Рентгеновская оптика». Н. Новгород. 1998. С. 53 – 57.
4. O'Sullivan G., Dunne P. Spectroscopy of a 13.5 nm Laser Plasma Source // Proc. ISMT EUVL Source Workshop, oct. 2002, Dallas. V. 4. P. 8 – 17.
5. Прогресс в создании мощных разрядных источников излучения в экстремальном УФ-диапазоне / В.М. Борисов и др. // Материа-

лы всероссийского совещания «Рентгеновская оптика». Н. Новгород, 2004. С. 182 – 190.

6. **Барзилович Е.Ю., Каштанов В.А.** Организация обслуживания при ограниченной информации о надежности системы. М.: Сов. радио, 1975. С. 35 – 40.

7. **Патент** на полезную модель 102430 Российская федерация, МПК7 H01L 37/02. Нанотехнологическое устройство для выполнения

операций / М.Ю. Корпачев, Е.Н. Ивашов, П.С. Костомаров, М.М. Якушкин; заявитель и патентообладатель МИЭМ. № 2010119552/07; Заявл. 17.05.2010; Оpubл. 27.02.2011, Бюл. № 6.

*Статья поступила в редакцию 12.09.2012 г.*

УДК 658.562.6; 681;3.01

**И.Л. Коваленко**, д-р техн. наук (Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского), **С.С. Семенов**, канд. техн. наук (ОАО «Государственное научно-производственное предприятие «Регион»), **А.В. Полтавский**, д-р техн. наук (Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН);  
e-mail: gnpregion@sovintel.ru

## КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Предложен комбинированный метод оценки технического уровня сложных технических систем, повышающий достоверность оценки за счет интегрирования данных, полученных на основе математического моделирования, результатов аналитического исследования и экспертных оценок.*

*In this article we propose a method for assessing the technical level of complex technical systems, which increases the reliability of estimates by integrating data on the evaluation of the technical level of CTS derived from mathematical modeling, assessments and analytical studies.*

**Ключевые слова:** сложные технические системы; оценочные показатели; экспертная оценка; математическое моделирование; технический уровень; ранг.

**Keywords:** Complex technical systems; Performance indicators; Peer review; Mathematical modeling; Technical level; the Rank.

### Введение

При разработке *сложных технических систем (СТС)* на всех стадиях проектирования, особенно на ранних, стоит задача выбора целесообразных направлений исследований для формирования технических решений или синтеза наиболее предпочтительного образца СТС из множества допустимых альтернативных.

При разработке СТС, даже в условиях ресурсных ограничений, возникает необходимость обеспечения высокого уровня СТС при ее реализации. С этой целью анализируется уровень конкретных СТС, тенденции их развития и возможные направления совершенствования с учетом факторов, влияющих на эффективность и качество СТС.

Для этого используются методы математического моделирования, а также, при невозможности получения аналитической зависимости, методы экспертных оценок, позволяющие применить знания специалистов при определенном уровне конкордации [1]. Естественно предположить, что каж-

дый из методов имеет как достоинства, так и недостатки. Однако в случае выбора наилучшего варианта СТС из числа альтернативных результатов оценки *технического уровня (ТУ) СТС*, полученных несколькими методами, появляется возможность повышения достоверности оценки, которая обеспечивается предлагаемым комбинированным методом оценки ТУ СТС. Он заключается в анализе и согласовании результатов оцениваемых решений, сформированных с помощью методов различных классов (аналитических исследований, математического моделирования, экспертных оценок и т.д.). В качестве способа согласования предложена процедура вычисления среднеарифметических рангов решений на основе их рангов, отражающих результаты оценивания, полученные разными методами.

### Краткий обзор некоторых известных методов многокритериального выбора решений

Одна из специфических особенностей задачи проектирования заключается в наличии большого числа возможных альтернатив для критериев опти-