

НАДЁЖНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НАНОЛИТОГРАФИИ

© 2012 г. Н.Н. БАЛАН, В.А. ВАСИН, Е.Н. ИВАШОВ,
М.Ю. КОРПАЧЁВ, А.Н. ЛАНЦЕВ, С.В. СТЕПАНЧИКОВ

Московский государственный институт электроники и математики НИУ ВШЭ

В последнее десятилетие в области экстремального ультрафиолета и мягкого рентгена, достигнут заметный прогресс при создании отражательных оптических элементов и высокоэффективных источников излучения. Этот прогресс, достигнут главным образом в процессе разработки оружия 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. приведена типичная зависимость коэффициента отражения от длины

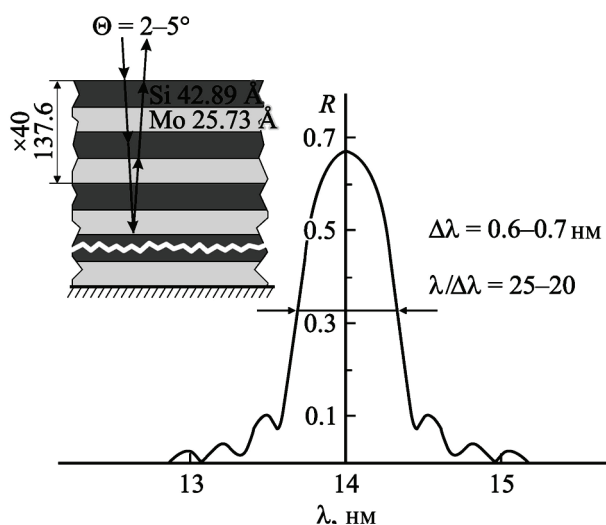


Рис. 1. Типичный спектр отражения „брэгговского” зеркала на примере многослойной системы Mo–Si.

волны для одной из наиболее эффективных систем. На многослойных брэгговских зеркалах Mo–Si, в настоящее время, достигнут коэффициент отражения, приближающийся к $R = 70\%$ при 13.4 нм (теоретическое $R_{max} \sim 74-78\%$) [2].

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

поверхности шаблона традиционными методами субмикронной фотолитографии или электролитографии остросфокусированным пучком.

Структура нанолитографа изображена, как на Рис. 2. Весь нанолитограф можно рассматривать как состоящий из четырех главных блоков: 1) источник ЭУФ излучения, освещающий маску; 2) узел маски, несущий в увеличенном виде изображение слоя чипа; 3) оптическая система, формирующая изображение; 4) узел образца с нанесенным поверх образца ЭУФ фоторезистом.

Таким образом, приведённый выше, ЭУФ нанолитограф состоит из большого числа элементов выполненных на пределе технических возможностей. Источник излу-

чения, оптическая система, вакуумная камера и устройства нанопрецизионных, а также многие другие элементы подвергаются воздействию высоких температур, переменных электромагнитных полей, интенсивных потоков загрязняющих веществ, что может привести к отказу нанолитографа.

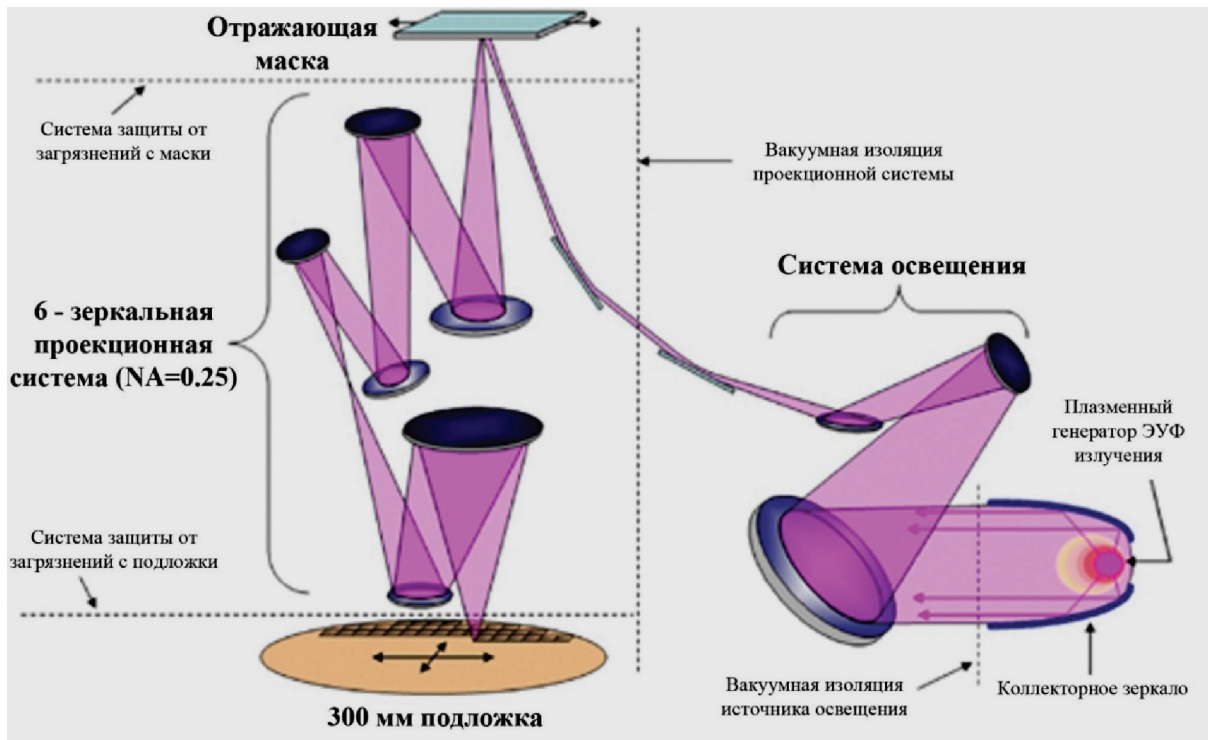


Рис. 2. Обобщенная схема ЭУФ нанолитографа с „лазер–плазменным“ источником излучения.

Рассмотрим стратегию восстановления системы после проявления отказа. Пусть в $t = 0$, нанолитограф работает до отказа в течение времени ξ , распределённого по закону $F(x)$. Далее от момента $t = \xi$ до момента появления отказа $t = \xi + \zeta$ в течение случайного времени ζ , распределённого по закону $\Phi(x)$, простаивает в неработоспособном состоянии (скрытый отказ). В случайный момент проявления отказа начинается внеплановый аварийно-профилактический ремонт, который длится случайное время γ ($M_\gamma = T_{ан}$) и после которого 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

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

Диаграмма переходов $x(t)$ приведена на Рис. 3. Введённый процесс регенерирующий (например, моментами регенерации будут моменты перехода в состояние E_3) и в предположении, что хотя бы одна из случайных величин ξ , ζ и γ непрерывна, апериодический.

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

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

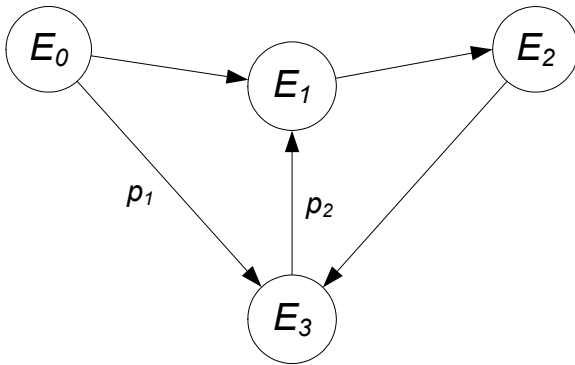


Рис. 3. Диаграмма переходов процесса $x(t)$.

Заметим, что в рассматриваемой стратегии не проводятся плановые восстановительные работы, поэтому в выражении функционала отсутствует функция распределения $G(x)$, определяющая периодичность плановых восстановительных работ.

Предположим теперь, что функции распределения $F(y)$ и $\Phi(v)$ известны лишь в отдельных точках. Используя ранее введенные обозначения, имеем

$$\begin{aligned} F(y) &\in \Omega(n, y, \pi), \\ \Phi(v) &\in \Omega(m, v, p). \end{aligned} \quad (2)$$

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

$$\min_{\Phi \in \Omega(m, v, p)} \min_{F \in \Omega(n, y, \pi)} I(\Phi, F) = I(\Phi^*, F^*), \quad (3)$$

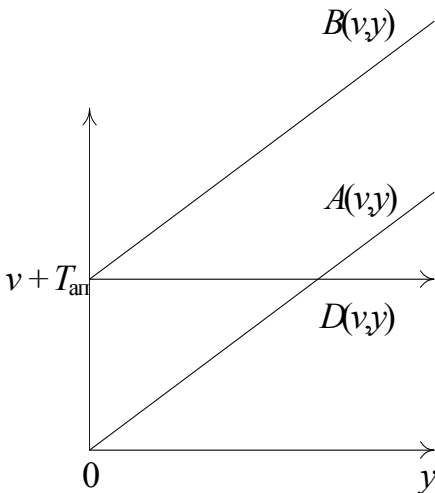


Рис. 4. Графики функций А, В и D.

что соответствует «выигрышу», получаемому при наилучших характеристиках.

Если функционал (1) выражает потери, то необходимо брать максимумы его по $F(y)$ и $\Phi(v)$ [3]. 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 в этом случае $A(v, y) = y$ (4).

Аналогично функция $B(v, y)$ определяется как длительность периода регенерации при условии $\xi = y, \zeta = v$. Из описания стратегии следует $B(v, y) = y + v + T_{ан}$ (5).

Графики функций $A(v, y)$, $B(v, y)$ и $D(v, y) = B(v, y) - A(v, y) = v + T_{ан}$ приведены на Рис. 4. Тогда

$$\begin{aligned} K_T(\Phi, F) &= \frac{\int_0^\infty \int_0^\infty y d\Phi(v) dF(y)}{\int_0^\infty \int_0^\infty (y + v + T_{ан}) d\Phi(v) dF(y)} = \\ &= \frac{1}{1 + \int_0^\infty \int_0^\infty (v + T_{ан}) d\Phi(v) dF(y)} \cdot \frac{\int_0^\infty \int_0^\infty y d\Phi(v) dF(y)}{\int_0^\infty \int_0^\infty y d\Phi(v) dF(y)}. \end{aligned} \quad (6)$$

При определении минимума функционала (6) по $F(y) \in \Omega(n, y, \pi)$ заметим, что этот функционал – дробно-линейный и, следовательно, при любом фиксированном $\Phi(y)$ 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.

$$\begin{aligned} \min_{F \in \Omega(n, y, \pi)} K_{\Gamma}(\Phi, F) &= \min_{F \in \Omega^*(n, y, \pi)} K_{\Gamma}(\Phi, F) = \\ &= \min_{\tau_i \in [y_i, y_{i+1}), i=0, n} \frac{1}{1 + \int_0^{\infty} (v + T_{\text{ап}}) d\Phi(v)} / \sum_0^n \tau_i \Delta \pi_i \end{aligned} \quad (7)$$

Функция $(v + T_{\text{ап}})$ является невозрастающей по переменному v при фиксированном y , а функция y является неубывающей по y при фиксированном v . Поэтому можно утверждать, что максимум по τ функции стоящей в знаменателе выражения (7), или минимум функции (7) достигается при $\tau_i = y_i + 0$, т. е.

$$\min_{F \in \Omega(n, y, \pi)} K_{\Gamma}(\Phi, F) = \frac{\sum_0^n y_i \Delta \pi_i}{\sum_0^n y_i \Delta \pi_i + T_{\text{ап}} + \int_0^{\infty} v d\Phi(v)} \quad (8)$$

Заметим, что экстремальная функция

$$F^*(y) = \begin{cases} 0 & \text{при } y \leq 0, \\ \Delta \pi_{i+1} & \text{при } y_i < y \leq y_{i+1}, i=0, 1, \dots, n-1, \\ 1 & \text{при } y > y_n, \end{cases} \quad (9)$$

не зависит от функции $\Phi(v)$, что упрощает поиск минимума функционала (8) по функциям распределения $\Phi \in \Omega(m, v, p)$. Так как функционал (8) 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 (8) – постоянная величина, а в знаменателе – монотонно возрастающая функция

$$\Phi^*(v) = \begin{cases} 0 & \text{при } v \leq v_1, \\ p_i & \text{при } v_i \leq v < v_{i+1}, i=0, 1, \dots, m-1, \\ 1 & \text{при } v \geq v_m \end{cases} \quad (9)$$

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

$$\inf_{\Phi \in \Omega(m, v, p)} \min_{F \in \Omega(n, y, \pi)} K_{\Gamma}(\Phi, F) = \frac{\sum_0^n y_i \Delta \pi_i}{\sum_0^n y_i \Delta \pi_i + \sum_0^{m-1} v_{i+1} \Delta p_i + T_{\text{ап}}}. \quad (10)$$

При определении минимума функционала по Φ необходимо условие $\Phi(v)=1$ при $v \geq v_m$ ($v_m < \infty$), так в противном случае нижняя грань исследуемого функционала равна нулю и мы получаем тривиальную оценку [3].

Для повышения надёжности литографической установки целесообразно ввести обобщённый коэффициент качества. Для повышения обобщённого коэффициента качества необходимо обеспечить устойчивое функционирование нанолитографической установки в условиях высоких температур, переменных электромагнитных полей и интенсивных потоков загрязняющих веществ. Эта задача решается применением устройства для выполнения нанопераций.

Согласно предложенному устройству (Рис. 5), на торце пьезосканера установлен источник рентгеновского излучения 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 [4].

Введение в устройство для выполнения нанопераций фокусирующих линз, выполненных в виде фуллеренов, расположенных в каналах свинцовой матрицы, диаметр d каналов 20 – 50 нм, количество фуллеренов не менее 10^3 в одном канале, даёт возможность фокусировать излучение в области экстремального ультрафиолета и мяг-

кого рентгена с уменьшением фокусного расстояния до нескольких мкм и обеспечением устойчивого функционирования нанолитографического комплекса условиях высоких температур, переменных электромагнитных полей и интенсивных потоков загрязняющих веществ.

Устройство для выполнения нанопераций (Рис. 5) содержит неподвижную платформу 1, закреплённый на ней пьезосканер 2, на котором установлен источник излучения 3, подложкодержатель 4 с установленной на нём подложкой 5. На торце 6 пьезосканера 2 установлен источник рентгеновского излучения 7 с фокусирующими линзами 8, выполненными в виде фокусирующих элементов – фуллеренов 9, расположенных в каналах 10 свинцовой матрицы 11 (Рис. 5). От источника 7 (Рис. 5) подаётся рентгеновское излучение на фокусирующие линзы 8, которое фокусируется, проходя через систему фуллеренов 9. Фокусировка рентгеновского излучения осуществляется линзой, имеющей двояко – вогнутый профиль, получаемый за счёт двух соседних фуллеренов 9 в канале 10 (Рис. 5). Количество фуллеренов 9 в канале 10 не менее 10^3 , обусловлено тем, что коэффициент преломления рентгеновских лучей близок к единице и отличается от неё на $10^{-5} - 10^{-7}$.

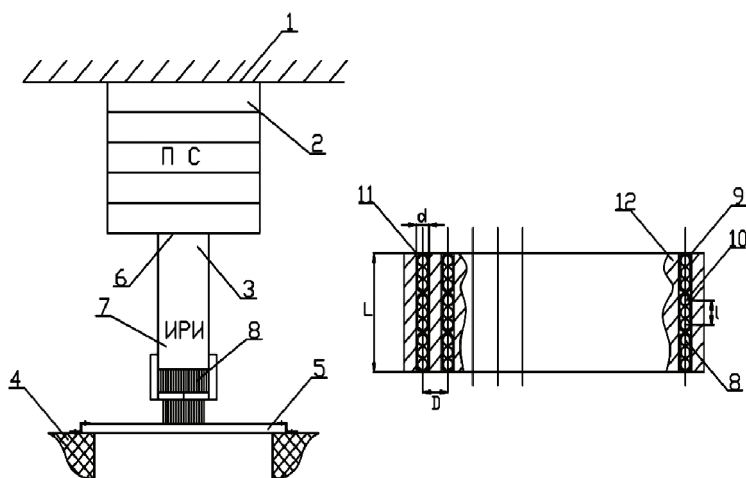


Рис. 5. Устройство для выполнения нанопераций.

углеродных нанотрубок 9 (Рис. 5). Количество углеродных нанотрубок 9 не менее 10 в одном канале 11 и количество фуллеренов 10 в одной углеродной нанотрубке 9 не менее 10^3 , обусловлено тем, что коэффициент преломления рентгеновских лучей близок к единице и отличается от неё на $10^{-5} - 10^{-7}$.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сейсян Р. Нанолитография СБИС в экстремально дальнем вакуумном ультрафиолете // Журнал технической физики. – 2005. - т. 75, - в. 5. с.1-13.
2. Борисов В.М., Виноходов А.Ю., Кирюхин Ю.Б. и др. // Материалы всероссийского совещания «Рентгеновская оптика». Нижний Новгород, 2003 с. 124-130.
3. Барзилович Е. Ю. Каштанов В. А., Организация обслуживания при ограниченной информации о надёжности системы // М., «Сов. радио», 1975.
4. Патент на полезную модель 102430 Российская федерация, МПК7 H01L 37/02. Нанотехнологическое устройство для выполнения операций / М.Ю. Корпачёв, Е.Н. Ивашов, П.С. Костомаров, М.М. Якункин; заявитель и патентообладатель МИЭМ. – № 2010119552/07; заявл. 17.05.2010; опубл. 27.02.2011, Бюл. № 6.