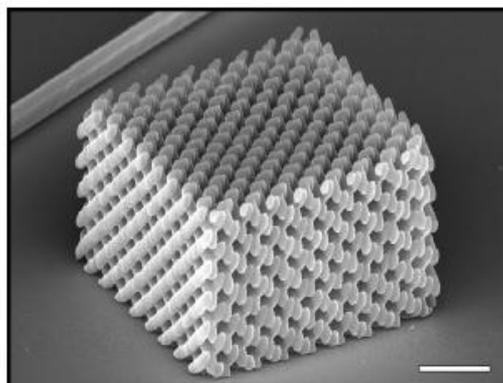


Н.Д. Ворзобова

**ОСНОВЫ ОПТИЧЕСКИХ 3D ТЕХНОЛОГИЙ
ФОРМИРОВАНИЯ МИКРО- И
НАНОРАЗМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ФОТОНИКИ И
ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ**



**Санкт-Петербург
2020**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Н.Д. Ворзобова

**ОСНОВЫ ОПТИЧЕСКИХ 3D ТЕХНОЛОГИЙ
ФОРМИРОВАНИЯ МИКРО- И
НАНОРАЗМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ФОТОНИКИ И
ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 12.03.03 Фотоника и оптоинформатика
в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных
образовательных программ высшего образования бакалавриата

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург
2020

Ворзобова Н.Д., Основы оптических 3D технологий формирования микро- и наноразмерных элементов фотоники и информационных систем – СПб: Университет ИТМО, 2020. – 65 с.

Рецензент(ы):

Шандаров Станислав Михайлович, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой электронных приборов, главный научный сотрудник научно-образовательного центра «Нелинейная оптика, нанофотоника и лазерные технологии», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)»;

В пособии приведены основы оптических 3D технологий получения микро и наноразмерных элементов фотоники и информационных систем - технологий голографии, литографии и 3D печати. Рассмотрены физические принципы и процессы, лежащие в основе технологий, примеры и характеристики элементов, направления применений. Основное внимание уделяется технологиям, базирующимся на полимерных материалах. Представлены технологии, используемые в настоящее время в производстве, а также перспективные разработки, ориентированные на получение элементов трехмерной конфигурации и структурированных элементов фотонных устройств.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2020

© Ворзобова Н.Д., 2020

Содержание

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
| 1 ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР..... | 5 |
| 1.1 Формирование периодических структур в интерференционном поле..... | 5 |
| 1.2 Дифракционные свойства периодических структур..... | 9 |
| 1.2.1 Дифракция на периодической структуре. Условие Брэгга..... | 9 |
| 1.2.2 Основы теории объемной решетки..... | 10 |
| 1.2.3 Пропускающая диэлектрическая фазовая решетка..... | 14 |
| 1.2.4 Отражательная диэлектрическая фазовая решетка..... | 17 |
| 1.2.5 Критерий объемности голографической решетки..... | 19 |
| 1.3 Голографические методы и технологии в фотополимерных материалах и их применение..... | 20 |
| 1.4 Методы и технологии интерференционной литографии..... | 22 |
| Контрольные вопросы | 29 |
| 2 ТЕХНОЛОГИИ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИТОГРАФИИ..... | 29 |
| 2.1 Основы технологий фотолитографии | 30 |
| 2.2 Оптические нанотехнологии литографии | 32 |
| 2.2.1 Литография в ЭУФ..... | 32 |
| 2.2.2 Иммерсионная литография..... | 34 |
| 2.2.3 Принципы преодоления дифракционного предела в фотолитографии..... | 35 |
| 2.2.4 Достижения оптической нанолитографии и перспективы дальнейшего развития..... | 38 |
| Контрольные вопросы..... | 39 |
| 3 ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТРЕХМЕРНОЙ КОНФИГУРАЦИИ | 39 |
| 3.1 Глубокая литография..... | 39 |
| 3.2 Полутонная литография..... | 41 |
| 3.3 Лазерная абляция полимеров | 42 |
| 3.4 Аддитивные технологии 3D печати..... | 44 |
| 3.4.1 Стереолитография | 44 |
| 3.4.2 Двухфотонная литография | 48 |
| 3.4.3 Цифровая световая проекция..... | 50 |
| 3.5 Голографическая 3D печать..... | 50 |
| Контрольные вопросы | 52 |
| 4 МЕТАМАТЕРИАЛЫ..... | 52 |
| 4.1 Основные понятия, свойства и направления применений..... | 52 |
| 4.2 Трехмерные метаматериалы..... | 54 |
| Контрольные вопросы..... | 58 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 58 |
| Список литературы..... | 59 |

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие информационных систем, систем телекоммуникаций, вычислительной техники, микромеханических систем выдвигает возрастающие требования к элементам этих систем и технологиям их получения. Тенденции развития современной электронной техники, базирующейся на технологиях литографии как базовых технологиях производства интегральных микросхем, характеризуются направленностью на уменьшение размеров элементов. Однако, несмотря на сохранение этой тенденции, традиционные технологии сталкиваются с проблемами надежности и экономической целесообразности, что приводит к необходимости перехода к новым технологиям, ориентированным на создание фотонных устройств, а также переход в трехмерное пространство. В связи с этим в последние годы наблюдается возрастающий интерес к 3D микро- и нанотехнологиям получения элементов с трехмерной формой, а также трехмерным структурированным элементам, как основы перспективных фотонных устройств.

В пособии рассмотрены основы оптических технологий получения трехмерных микро и наноразмерных элементов - технологий голографии, литографии и 3D печати. Рассмотрены физические принципы и процессы, лежащие в основе технологий и определяющие их современный уровень и перспективы развития, достигаемые характеристики элементов, используемые материалы. Основное внимание уделено технологиям, базирующимся на полимерных материалах, что связано с рядом преимуществ, в том числе, относительно низкой стоимостью, функциональными возможностями и простотой процессов получения элементов. Рассмотрены технологии, применяемые в настоящее время в производстве, а также перспективные разработки.

Пособие состоит из четырех разделов. В первом разделе рассмотрены основы голографических технологий получения структурированных элементов. Приведены принципы получения структур в периодическом световом поле, факторы, определяющие их свойства. Приведены также направления применений голографических технологий. Второй раздел посвящен технологиям оптической литографии. Рассмотрены основы традиционной фотолитографии, концепции уменьшения критических размеров элементов, принципы преодоления дифракционного предела и современные оптические нанотехнологии литографии. В третьем разделе рассмотрены методы и технологии получения малоразмерных элементов трехмерной конфигурации. Приведены классические методы глубокой и полутонковой литографии, а также основы интенсивно развивающихся аддитивных технологий 3D печати, в том числе, технологий стереолитографии, многофотонной литографии, цифровой световой проекции. Рассмотрены технологии, широко используемые для получения изделий различной трехмерной конфигурации, а также результаты

исследований последних лет. Четвертый раздел посвящен новому направлению создания структурированных материалов – метаматериалов. Представлены результаты, относящиеся к получению металл-диэлектрических структур, в том числе, трехмерных метаматериалов.

Материал учебного пособия предназначен для студентов, обучающихся по направлению 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика» по дисциплинам: «Основы оптоинформатики», «Лазерные технологии», «Основы фотоники», «Оптическое материаловедение», «Дифракционная и интерференционная оптика», «Нанотехнология», «Прикладная голография», «Технологии искусственного интеллекта», «Основы проектирования приборов и систем фотоники», «Проектная деятельность» для самостоятельной работы студентов и обеспечения усвоения, углубления и дополнения материалов лекций и лабораторных работ. Материал пособия может быть также использован при выполнении научно-исследовательских работ, выборе направлений и проведении исследований, практической реализации результатов исследований с использованием современных технологий.

Данное пособие является дополненной и переработанной версией предыдущего учебного пособия [1].

1 ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР

В настоящее время технологии получения периодических структур являются предметом исследований ведущих научных лабораторий. Эти технологии базируются на различных материалах и методах, в том числе, интерференционных методах, позволяющих получать наноразмерные структуры с периодом, соизмеримым с длиной волны излучения.

1.1 Формирование периодических структур в интерференционном поле

В разделах 1.1-1.2 частично использованы материалы, представленные в [1] и относящиеся к физическим основам метода, а также, теоретическим вопросам описания дифракционных свойств периодических структур.

Основой метода является отображение в регистрирующей среде интерференционной картины, сформированной при взаимодействии двух и более когерентных волн. На рисунке 1 показано интерференционное поле – картина стоячих волн, образованная при интерференции двух точечных когерентных источников.

В зависимости от положения регистрирующей среды в интерференционном пространстве можно зарегистрировать пропускающую (положения 1, 2, 4, 5) или

отражательную (положение 3) структуру. В зависимости от соотношения периода регистрируемой интерференционной структуры и толщины регистрирующей среды структура может являться тонкой (двумерной) или объемной (трехмерной).

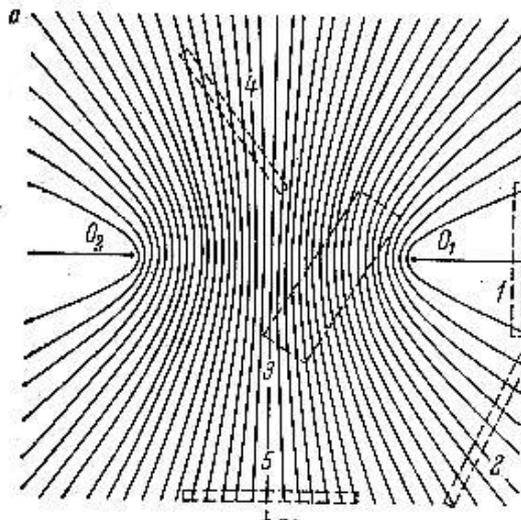


Рис.1. Поверхности максимумов интенсивности стоячих волн, образованных точечными источниками O_1 и O_2

Рассмотрим условия образования и свойства простейшей периодической структуры, сформированной при взаимодействии двух плоских волн. Интенсивность в интерференционном поле описывается следующими выражениями:

$$I = a \cdot a = a_1 \cdot a_1 + a_2 \cdot a_2 + a_1 \cdot a_2 \{ \exp[i(\varphi_2 - \varphi_1)] + \exp[-i(\varphi_2 - \varphi_1)] \} \quad (1)$$

$$I = I_1 + I_2 + 2a_1 \cdot a_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (2)$$

Можно видеть, что интенсивность в любой точке интерференционной картины, образованной двумя волнами, является суммой интенсивностей отдельных волн плюс интерференционный член. Интерференционный член содержит информацию о разности фаз интерферирующих пучков. Чтобы интерференционный член не был равен нулю, вектор a_1 должен иметь компоненту, параллельную a_2 .

Результирующая интенсивность I может быть и больше и меньше суммы интенсивностей составляющих волн. Если волны имеют постоянные и равные амплитуды, то из выражения (2) следует, что максимальная величина общей интенсивности в четыре раза больше интенсивности каждой из составляющих волн, а минимальное значение результирующей интенсивности равно нулю. При неравенстве интенсивностей интерферирующих пучков контраст в интерференционной картине определяется отношением их интенсивностей.

Формирование интерференционной структуры возможно при взаимодействии когерентных световых волн. В теории когерентности введено понятие *комплексной степени когерентности*, которая устанавливает связь между волновыми полями в точках P_1 и P_2 - отверстиях в непрозрачном экране и Q - произвольной точке экрана S , в которой интерферируют волны, исходящие из точек P_1 и P_2 (рис. 2).

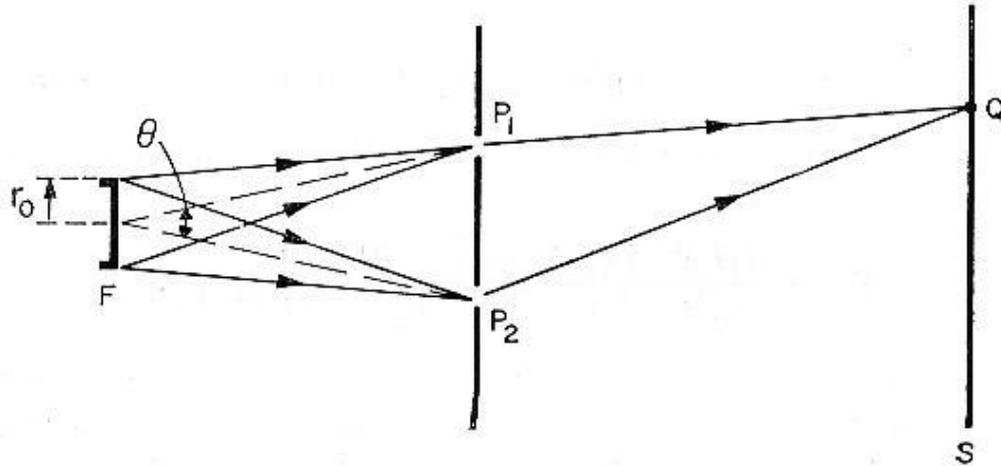


Рис. 2. К определению степени когерентности при использовании протяженного источника

Комплексная степень когерентности $\gamma_{1,2}(\tau)$ определяется как нормированная корреляция между комплексными напряженностями электрического поля в точках P_1 и P_2 :

$$\gamma_{12}(\tau) \equiv \frac{\langle \mathbf{v}_{P_1}(t+\tau) \mathbf{v}_{P_2}^*(t) \rangle}{\left[\langle \mathbf{v}_{P_1}(t) \mathbf{v}_{P_1}^*(t) \rangle \langle \mathbf{v}_{P_2}(t) \mathbf{v}_{P_2}^*(t) \rangle \right]^{1/2}} =$$

$$\frac{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \mathbf{v}_{P_1}(t+\tau) \mathbf{v}_{P_2}^*(t) dt}{\left[\left(\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \mathbf{v}_{P_1}(t) \mathbf{v}_{P_1}^*(t) dt \right) \left(\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \mathbf{v}_{P_2}(t) \mathbf{v}_{P_2}^*(t) dt \right) \right]^{1/2}} \quad (3)$$

Комплексная степень когерентности включает в себя, как предельные случаи, временную и пространственную когерентность. Переходя к понятиям интенсивности света (I) и контраста (видности) интерференционных полос (V), определяемого как

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (4)$$

можно получить для контраста:

$$V = \frac{2|\gamma_{1,2}|}{(I_1/I_2)^{1/2} + (I_2/I_1)^{1/2}}. \quad (5)$$

При равенстве интенсивностей интерферирующих волн абсолютная величина степени когерентности определяется контрастом (видностью) интерференционных полос.

Если τ – разность во времени прохождения света в точку Q из точек P₁ и P₂ стремится к нулю, контраст полос является мерой *пространственной когерентности* (взаимной когерентности в точках P₁ и P₂). Если точки P₁ и P₂ совпадают, комплексная степень когерентности зависит только от τ . В этом случае говорят о комплексной степени *временной когерентности*.

Величина τ может быть выражена через оптическую разность хода как $\Delta L = c\tau$ (с – скорость света), тогда ΔL называют *длиной когерентности*.

Если протяженный источник F состоит из ряда некоррелированных и пространственно разделенных осцилляторов, то каждый осциллятор создает свою интерференционную картину. В результате наложения множества интерференционных картин результирующая интенсивность будет однородной (контраст равен нулю), то есть источник излучения является некогерентным.

Когерентными источниками излучения являются лазеры. Когерентность лазерных источников определяется механизмом стимулированного излучения, а также свойствами резонатора. Если излучение лазера является одномодовым и одночастотным, можно говорить о высокой пространственной и временной когерентности.

Получение одномодового и одночастотного режима в газовых лазерах, лазерах на красителях и полупроводниковых лазерах достигается различными способами, среди которых введение дополнительных резонаторов – эталонов Фабри-Перо, высокоселективных брэгговских структур, пространственных фильтров.

В твердотельных лазерах когерентность определяется также наличием модуляторов добротности и элементов обращения волнового фронта.

1.2 Дифракционные свойства периодических структур

1.2.1 Дифракция на периодической структуре. Условие Брэгга

Дифракцией (в оптике) называют физическое явление, заключающееся в изменении волновых нормалей при взаимодействии света с препятствием, оптические характеристики которого (пропускание или отражение) существенно изменяются на расстояниях соизмеримых с длиной волны света.

При регистрации интерференционной картины можно получать периодические структуры, обладающие свойствами объемных и тонких решеток, а также структуры, обладающие промежуточными свойствами. На рисунке 3 схематично показана тонкая дифракционная решетка.

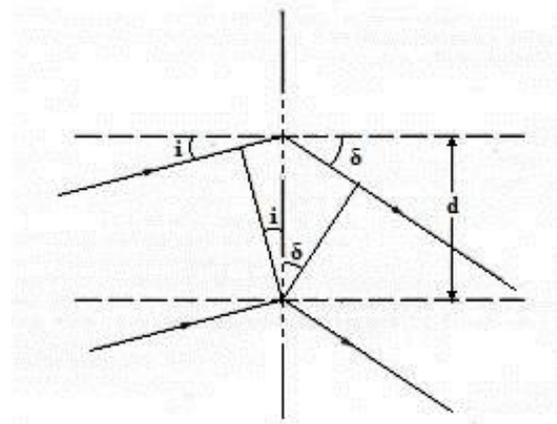


Рис.3. Дифракция света на плоской решетке

Решетка состоит из периодически расположенных щелей. Для плоской волны, падающей на решетку, условие синфазности дифрагированных пучков, приводящей к их взаимному усилению, описывается уравнением решетки:

$$d(\sin i + \sin \delta) = \lambda, \quad (6)$$

где d – постоянная решетки, i – угол падения, δ – угол дифракции.

При выполнении условия (6) образуется главный (+1) максимум дифрагированной волны, возможно наличие отрицательного (-1) и более высоких порядков дифракции. На рисунке 3 мы ограничились рассмотрением дифракции первого порядка.

На рисунке 4 показана объемная дифракционная решетка, состоящая из периодически расположенных рассеивающих плоскостей.

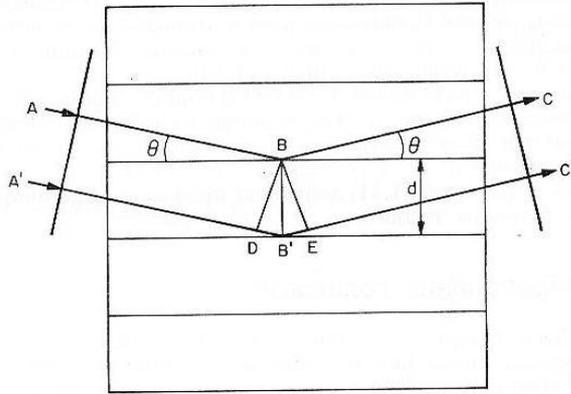


Рис. 4. Дифракция света на объемной решетке

Интенсивность излучения, выходящего из такой решетки, имеет максимальную величину в том направлении, в котором происходит синфазное сложение световых волн, рассеянных последовательными плоскостями.

Как следует из рисунка 4, условие синфазности - получения максимальной интенсивности дифрагированной волны - имеет вид:

$$DB' + B'E = 2d \sin \theta = \lambda \quad (7)$$

Условие $2d \sin \theta = \lambda$ называется *законом (условием) Брэгга* (по имени Уильяма Брэгга, получившего его для случая дифракции рентгеновских лучей на атомных плоскостях в кристалле).

Сравнение выражений (6) и (7) показывает, что последнее накладывает жесткие условия на получение максимума дифракции. Для объемной решетки каждой длине волны соответствует только один угол, при котором достигается максимальная интенсивность дифрагированного пучка.

1.2.2 Основы теории объемной решетки

Рассмотрим теорию дифракции на объемной диэлектрической структуре [1-3]. Для простоты ограничимся рассмотрением объемной решетки, показанной на рисунке 5 [2].

Границы решетки обозначены вертикальными линиями $z=0$ и $z=T$, параллельными оси y . Величина диэлектрической проницаемости или коэффициента поглощения меняется синусоидально в направлении вектора решетки k . Штрихи решетки расположены на расстоянии d (период решетки) и составляют угол Φ' с границами решетки. На решетку падает монохроматическая волна, вектор V электрического поля которой перпендикулярен плоскости падения. Внутри решетки направление распространения волны определяется

вектором ρ , составляющим угол Ψ' с нормалью к поверхности решетки. Вектор σ соответствует направлению распространения дифрагированной волны.

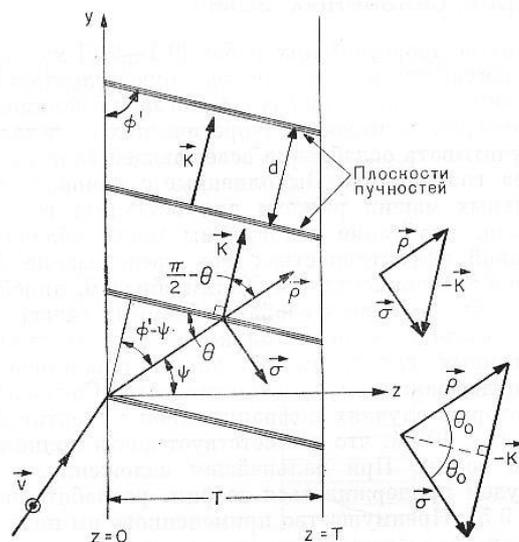


Рис. 5. Схема объемной решетки

Прохождение света через такую решетку можно описать уравнениями Максвелла (для немагнитной среды, для которой относительная магнитная проницаемость $\mu = 1$). Эти уравнения связывают между собой вектор электрического поля V , вектор магнитного поля H и вектор смещения D в среде и имеют вид:

$$\text{rot} v = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \quad (8)$$

$$\text{rot} H = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial v}{\partial t} + \sigma v \quad (9)$$

$$\text{div} D = 0 \quad (\text{объемные заряды отсутствуют}) \quad (10)$$

$$\text{div} H = 0, \quad (11)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала решетки, σ – проводимость среды.

После выполнения операции rot , дифференцирования, подстановок, а также учета распределения диэлектрической проницаемости и проводимости в соответствии с соотношениями:

$$\varepsilon = \bar{\varepsilon} + \varepsilon_1 \cos k \cdot r \quad (12)$$

$$\sigma = \bar{\sigma} + \sigma_1 \cos k \cdot r, \quad (13)$$

где r – вектор, идущий из начала координат в соответствующую точку среды ($r=ix+jy+kz$), $\bar{\varepsilon}, \bar{\sigma}$ – средние значения диэлектрической проницаемости и проводимости, ε_1, σ_1 – амплитуды изменения диэлектрической проницаемости и проводимости, получим *волновое уравнение*:

$$\nabla^2 \mathbf{a} + q^2 \mathbf{a} = 0, \quad (14)$$

где ∇^2 – оператор Лапласа, \mathbf{a} – комплексная амплитуда электрического поля в произвольной точке решетки,

$$q^2 = \beta^2 - 2i\alpha\beta + 2\chi\beta[\exp(ik \cdot r) + \exp(-ik \cdot r)] \quad (15)$$

$$\beta = k(\bar{\varepsilon})^{1/2}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_a} \quad (\lambda_a - \text{длина волны в воздухе})$$

$$\alpha = \frac{\omega\mu_0\bar{\sigma}}{2k(\bar{\varepsilon})^{1/2}}$$

$$\chi = \frac{1}{2} \left(k \frac{\varepsilon_1}{2(\bar{\varepsilon})^{1/2}} - i\alpha_1 \right)$$

$$\alpha_1 = \frac{\omega\mu_0\sigma_1}{2k(\bar{\varepsilon})^{1/2}}$$

Постоянную взаимодействия χ можно также представить в виде:

$$\chi = \frac{\pi n_1}{\lambda_a} - \frac{i\alpha_1}{2}, \quad (16)$$

где n_1 – амплитуда модуляции показателя преломления.

Для решения волнового уравнения представим комплексную амплитуду электрического поля \mathbf{a} как сумму амплитуд падающей \mathbf{a}_i и дифрагированной \mathbf{a}_d волн:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_i + \mathbf{a}_d = R(z)\exp(-i\rho \cdot \mathbf{r}) + S(z)\exp(-i\sigma \cdot \mathbf{r}) \quad (17)$$

После взятия частных производных, подстановок, исключения членов, которыми можно пренебречь, предположения медленного изменения $R(z)$ и $S(z)$, а также рассмотрения случая, когда угол падения θ отличается от угла Брэгга θ_0 на малую величину δ , получим уравнения связанных волн:

$$C_R R' + \alpha R = i\chi S \quad (18)$$

$$C_S S' + (\alpha + i\Gamma)S = -i\chi R, \quad (19)$$

$$R' = \frac{dR}{dz}$$

$$S' = \frac{dS}{dz}$$

$$C_r = \frac{\rho_z}{\beta} = \cos \Psi$$

$$C_s = \frac{\sigma_z}{\beta}$$

ρ_z и σ_z - проекции векторов ρ и σ на ось Z

$$\Gamma = \beta\delta \sin 2\theta_0. \quad (20)$$

Эти уравнения отражают физику процесса дифракции. При прохождении падающей и дифрагированной волн в решетке расстояния dz комплексные амплитуды этих волн меняются на dR и dS . Изменения вызваны поглощением, которому соответствуют члены αR и αS или взаимодействием волн друг с другом, описываемым членами взаимодействия χR и χS . Член $i\Gamma S$ соответствует добавочному фазовому множителю в дифрагированной волне. Если угол, под которым распространяется падающая волна, сильно отличается от угла Брэгга, то величина Γ будет большой. Вследствие добавочной фазы дифрагированная волна выходит из синхронизма с падающей волной, что приводит к ослаблению взаимодействия.

Уравнения (18) и (19) представляют собой систему двух линейных дифференциальных уравнений первого порядка. Подставляя (18) в (19), получаем для R одно дифференциальное уравнение второго порядка:

$$R'' + \left(\frac{\alpha}{C_R} + \frac{\alpha}{C_S} + \frac{i\Gamma}{C_S} \right) R' + \frac{(\alpha^2 + i\Gamma\alpha + \chi^2)}{C_K C_K} R = 0. \quad (21)$$

Решение этого уравнения будем искать в виде

$$R(z) = \exp(\gamma z). \quad (22)$$

Подставляя (22) в (21), получим квадратное уравнение для γ :

$$\gamma^2 + \left(\frac{\alpha}{C_R} + \frac{\alpha}{C_S} + \frac{i\Gamma}{C_S} \right) \gamma + \frac{(\alpha^2 + i\Gamma\alpha + \chi^2)}{C_R C_S} = 0,$$

решение которого имеет вид:

$$\gamma_{1,2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{C_R} + \frac{\alpha}{C_S} + \frac{i\Gamma}{C_S} \right) \pm \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\alpha}{C_R} - \frac{\alpha}{C_S} - \frac{i\Gamma}{C_S} \right)^2 - \frac{4\chi^2}{C_S C_R} \right]^{1/2} \quad (23)$$

Полное решение уравнения (21) будем искать в виде:

$$R(z) = R_1 \exp(\gamma_1 z) + R_2 \exp(\gamma_2 z), \quad (24)$$

где R_1 и R_2 – постоянные, которые можно вычислить исходя из граничных условий.

Подставляя (24) в (18), получим аналогичное уравнение для $S(z)$:

$$S(z) = S_1 \exp(\gamma_1 z) + S_2 \exp(\gamma_2 z) \quad (25)$$

Далее рассмотрим решения для некоторых частных случаев, представляющих наибольший интерес.

1.2.3 Пропускающая диэлектрическая фазовая решетка

Для пропускающей решетки (рис. 6) граничные условия при $z=0$ имеют вид:

$$R(0) = R_1 + R_2 = 1 \quad (26)$$

$$S(0) = S_1 + S_2 = 0. \quad (27)$$

Амплитуда дифрагированной волны для $z=T$ (T – толщина решетки) определяется как

$$S(T) = i \frac{\chi}{C_s(\gamma_1 - \gamma_2)} [\exp(\gamma_2 T) - \exp(\gamma_1 T)]. \quad (28)$$

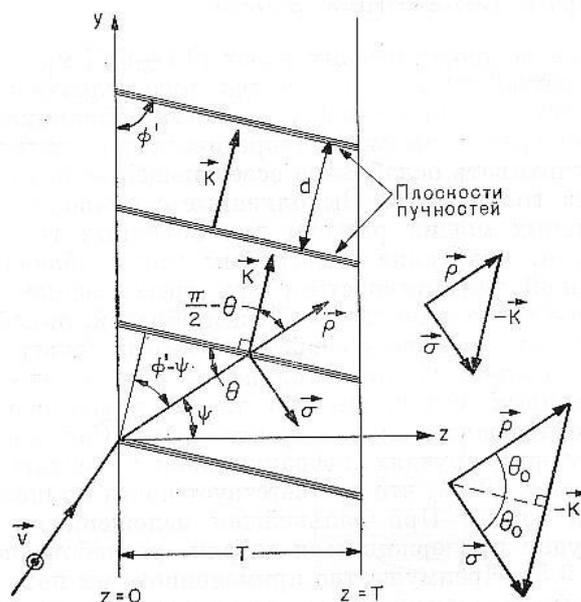


Рис. 6. Пропускающая объемная решетка

Для ненаклонной решетки, показанной на рисунке 7, когда плоскости решетки ориентированы перпендикулярно поверхности и, следовательно, вектор решетки k параллелен поверхности, вектор падающей волны ρ образует угол θ с плоскостями решетки и такой же угол ($\psi=0$) с осью Z , а также $\alpha = \alpha_1 = 0$ (диэлектрическая фазовая решетка без потерь), амплитуда дифрагированной волны $S(T)$ определяется выражением:

$$S(T) = -i \frac{\exp(-i\xi) \sin(\xi^2 + \nu^2)^{1/2}}{(1 + \xi^2 / \nu^2)^{1/2}}, \quad \text{где} \quad (29)$$

$$\xi = \delta\beta T \sin\theta_0 = \frac{\Gamma T}{2 \cos\theta_0}$$

$$\nu = \frac{\chi T}{\cos\theta_0} = \frac{\pi n_1 T}{\lambda_a \cos\theta_0}$$

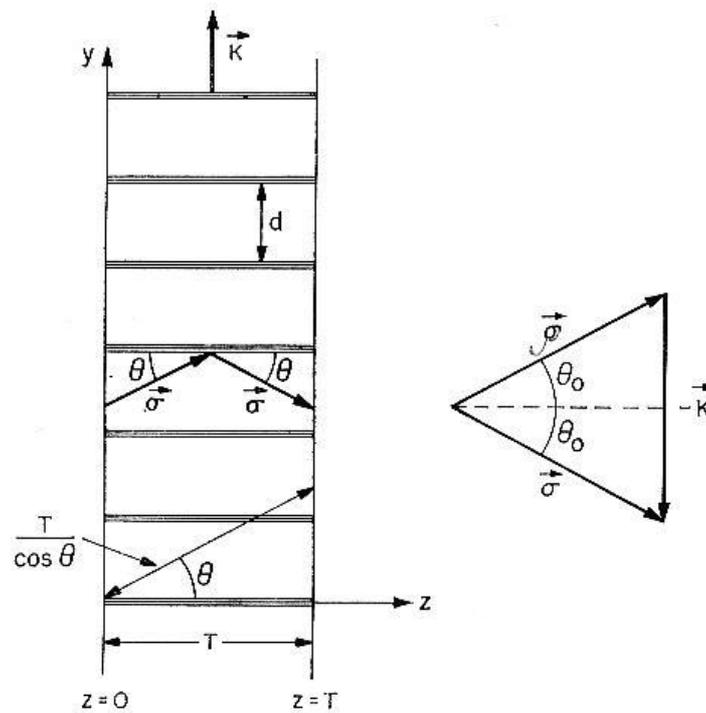


Рис. 7. Пропускающая объемная решетка с диэлектрическими плоскостями перпендикулярными ее поверхности.

Дифракционная эффективность определяется как отношение интенсивностей (квадратов амплитуд) дифрагированной и падающей волн:

$$\eta = \frac{|S(T)|^2}{|R(0)|^2} . \quad (30)$$

Для диэлектрической решетки без потерь даже при небольших изменениях показателя преломления (n_1) дифракционная эффективность может достигать 100% при больших толщинах T , то есть когда выполняется условие:

$$\frac{n_1 T}{\cos \theta_0} = \frac{\lambda_a}{2} . \quad (31)$$

Если угол падения отличается от угла Брэгга, то дифракционная эффективность будет уменьшаться. Зависимость относительной дифракционной эффективности от величины отклонения от угла Брэгга показана на рисунке 8.

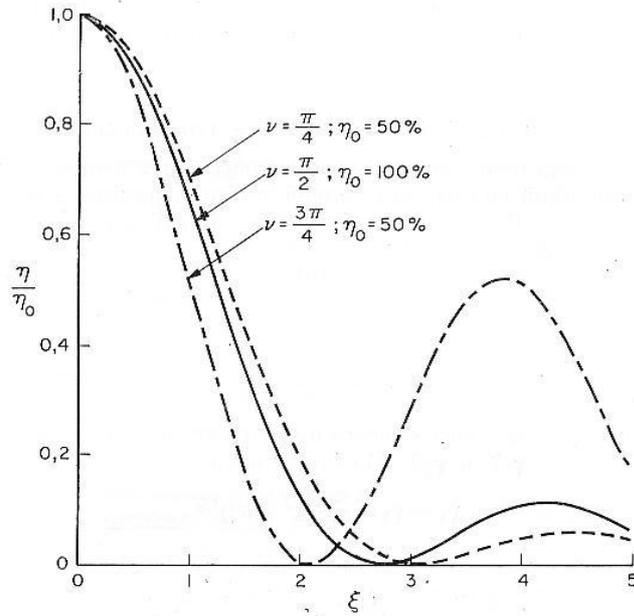


Рис. 8. Зависимость относительной эффективности η/η_0 диэлектрической пропускающей решетки (без потерь) от параметра $\xi = \delta(2\pi\bar{n}/\lambda_a)T \sin \theta_0$ для различных значений параметра $\nu = \pi n_1 T / \lambda_a \cos \theta_0$

Приведенные зависимости позволяют оценивать чувствительность решетки к изменению угла падения и длины волны падающего излучения.

1.2.4 Отражательная диэлектрическая фазовая решетка

Для отражательной решетки граничные условия при $z = T$ имеют вид:

$$R(0) = R_1 + R_2 = 1 \quad (32)$$

$$S(T) = S_1 \exp(\gamma_1 T) + S_2 \exp(\gamma_2 T) = 0. \quad (33)$$

Амплитуда дифрагированной волны для $z = 0$ выражается как

$$S(0) = S_1 + S_2 = -i\chi \left(\alpha + i\Gamma + C_s \left[\frac{\gamma_1 \exp(\gamma_2 T) - \gamma_2 \exp(\gamma_1 T)}{\exp(\gamma_2 T) - \exp(\gamma_1 T)} \right] \right)^{-1} \quad (34)$$

Для случая, показанного на рисунке 9, при отсутствии потерь, то есть $\alpha = \alpha_1 = 0$, амплитуда дифрагированной волны определяется выражением:

$$S(0) = \frac{-i}{(i\xi_r/v_r) + [1 - (\xi_r/v_r)^2]^{1/2} \operatorname{cth}(v_r^2 - \xi_r^2)^{1/2}}, \text{ где} \quad (35)$$

$$\xi_r = \frac{\Gamma T}{2 \cos \Psi_0} = \frac{\beta T \delta \sin 2\theta_0}{2 \cos \Psi_0} = \delta \beta T \cos \theta_0$$

$$v_r = \frac{\chi T}{\cos \Psi_0} = \frac{\pi n_1 T}{\lambda_a \cos \Psi_0} \quad (36)$$

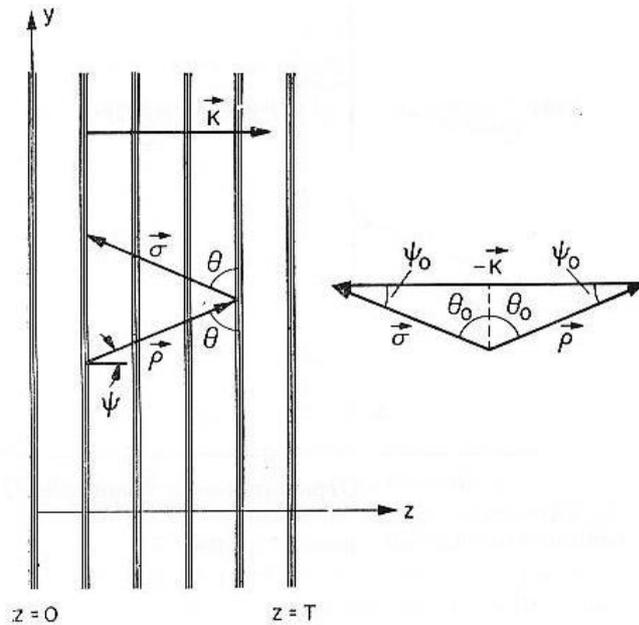


Рис. 9. Отражательная объемная решетка с диэлектрическими плоскостями параллельными ее поверхностями

На рисунке 10 приведена относительная эффективность как функция параметра ξ_r для различных значений параметра v_r .

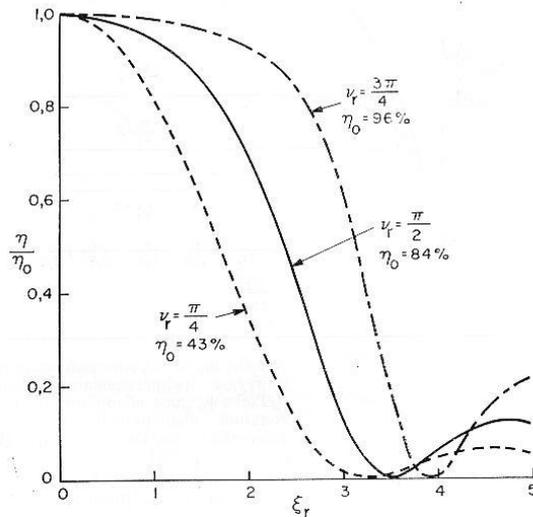


Рис. 10. Зависимость относительной эффективности η/η_0 диэлектрической отражательной решетки (без потерь) от параметра $\xi_r = \delta(2\pi\bar{n}/\lambda_a)T \cos \theta_0$ для различных значений параметра $\nu_r = \pi n_1 T / \lambda_a \cos \psi_0$

Принимая во внимание зависимость

$$\xi_r = -\frac{\Delta\lambda}{\lambda_a} \left(\frac{2\pi\bar{n}}{\lambda_a} \right) T \sin \theta_0, \quad (36)$$

с использованием приведенных кривых можно оценивать *спектральную селективность* ($\Delta\lambda$) – выделяемую полосу длин волн (частот) отражательных решеток.

1.2.5 Критерий объемности голографической решетки

Рассмотренная теория дает хорошие результаты для объемных решеток. Степень объемности решетки определяется критерием Клейна. Согласно *критерию Клейна*, объемной является решетка, для которой $Q \geq 10$. Q – *параметр Клейна*, определяемый соотношением:

$$Q = \frac{2\pi\lambda_a T}{\bar{n}d^2}, \quad (37)$$

где λ_a – длина волны (в воздухе), T – толщина решетки, \bar{n} – средний показатель преломления, d – период решетки.

Отличительным признаком объемных решеток является наличие одного порядка дифракции.

1.3 Голографические методы и технологии в фотополимерных материалах и их применение

Под голографическими методами обычно понимают методы, основанные на отображении в материале интерференционной структуры, образованной при интерференции двух и более световых пучков, приводящей к формированию периодической диэлектрической структуры с модуляцией показателя преломления.

Одним из основных направлений применений периодических структур является использование в качестве элементов управления излучением. К таким элементам можно отнести селективирующие элементы, выделяющие определенную частоту, в том числе узкополосные фильтры на основе брэгговских структур, фотонные кристаллы, а также элементы, обеспечивающие пространственное разделение и маршрутизацию световых пучков, в том числе дифракционные дефлекторы, расщепители, мультиплексоры, коммутаторы. Другим важным направлением является использование в качестве датчиков различных параметров - температуры, влажности, смещений, химического состава.

Классическими материалами для таких применений являются галогенсеребряные материалы, бихромированный желатин (БХЖ), фоторефрактивные стекла. Эти материалы характеризуются как высокой дифракционной эффективностью – до 80%, так и высокой разрешающей способностью - более 6 тыс. лин/мм. [4], что позволяет записывать отражательные решетки с высокой дифракционной эффективностью и высокой спектральной селективностью. Галогенсеребряные материалы обладают наибольшей чувствительностью – до 10^{-6} Дж/см². К недостаткам можно отнести необходимость предварительной и последующей химической обработки, низкую влагостойкость (слои БХЖ, галогенсеребряные материалы), сложность процессов изготовления материалов (фоторефрактивные стекла).

В последние годы проявляется большой интерес к полимерным материалам, которые часто называют самопроявляющимися. По чувствительности (10^{-1} - 10^{-2} Дж/см²) и разрешающей способности они уступают галогенсеребряным материалам. Однако существенным преимуществом таких материалов является то, что голографическая запись в них происходит в результате экспонирования, то есть исключается трудоемкая предварительная или последующая химическая обработка. Применительно к голографическим технологиям в литературе наиболее широко рассматриваются фотополимеризующиеся акриламидные (AA/PVA), композиции [5,6], композиции с введением различных добавок для получения новых свойств, в том числе жидких кристаллов [7,8] и неорганических наночастиц [9-11], акрилатные композиции [9,10,12], материалы с диффузионным механизмом записи (PQ/PMMA) [13,14].

Механизм формирования модуляции показателя преломления в акриламидных и акрилатных композициях определяется процессами

диффузионного массопереноса в периодическом световом поле. В многокомпонентных композициях процессы массопереноса определяются различием скорости полимеризации компонент композиции [9,10]. Такие материалы обеспечивают высокую дифракционную эффективность - более 80%, однако для них характерна существенная зависимость от частоты записи. Рабочий диапазон частот - до 2700 лин/мм, но максимальная дифракционная эффективность достигается в узком частотном диапазоне – около 300-600 лин/мм. Материалы используются для получения структурированных голографических элементов, работающих в режиме на пропускание. Дифракционная эффективность зависит от толщины слоя. Оптимальные толщины - около 100 мкм.

Высокая частотная зависимость определяется процессами нелокальной полимеризации – полимеризации вне области действия света. [15]. Концепция увеличения разрешающей способности основана на уменьшении влияния данных процессов за счет торможения роста полимерных цепей в процессе полимеризации. Наибольшее разрешение достигнуто для материалов Dupont и Bayer (Bayfol HX). Разрешающая способность Bayfol HX, согласно данным разработчика [16], около 7000 лин/мм, однако при записи отражательных решеток (на длинах волн 0.53 и 0.63 мкм) дифракционная эффективность уменьшается (до 40-30%).

Возможность использования материалов в голографических технологиях определяется требованиями конкретных практических задач. Так, например, для управления характеристиками лазерного излучения, обеспечения высоких характеристик спектральных приборов требуются элементы на основе брэгговский структур с высокой угловой и спектральной селективностью. Для получения элементов на основе брэгговских решеток используются, в частности, материалы с диффузионным механизмом записи - реоксан, диффен с толщиной светочувствительного слоя 1 мм. Такие структуры могут работать как узкополосные спектральные фильтры с шириной полосы до 0.1 нм и пространственные фильтры с угловым разрешением до 0.3 рад.

Способность к изменению свойств решеток при изменении влажности, температуры, концентрации различных веществ, а также высокие селективные свойства, позволяющие детектировать малые угловые смещения излучения, падающего на структуру, используются для разработки различных сенсоров [17 - 19].

Возможность получения высоких дифракционных свойств в сочетании с широким диапазоном углов падения необходима при разработке элементов голографических солнечных концентраторов [20-24].

Появление новых полимерных материалов с введением различных неорганических добавок, в частности, жидких кристаллов, открывает новые технологические возможности и новые области применений. Благодаря

процессам пространственного разделения компонент композиции в периодическом световом поле [12, 25] возможно формирование слоистых структур. Слоистые структуры с жидкими кристаллами являются перспективными для создания электроуправляемых фотонных устройств [25].

Голографические технологии с применением полимерных материалов используются также для получения элементов хранения информации [26,27], волноводных элементов [27,28], в технологиях защищенной печати [29].

1.4 Методы и технологии интерференционной литографии

Приведенный ниже материал изложен частично в [1]. Методы и технологии интерференционной литографии (в литературе также употребляются термины голографическая литография и лазерная интерференционная литография (LIL)) основаны на отображении в полимерном материале интерференционной структуры, но в отличие от рассмотренных выше голографических технологий, процессы литографии ориентированы преимущественно на получение рельефных или полых полимерных структур. Обычно используют различные типы фоторезистов (AZ 6112, AZ 1518 , AZ 4620 , AZ-5214-E , FH-6400, AZ-1350), наиболее широко применяемым является негативный фоторезист SU-8, возможно также использование других фотополимеризующихся материалов.

Одним из применений технологии интерференционной литографии является получение структур фотонных кристаллов. Напомним, что в зависимости от характера распределения диэлектрической проницаемости (рис.11) структуры фотонных кристаллов принято характеризовать как одномерные, двумерные и трехмерные (не следует путать с понятием трехмерная голографическая решетка).

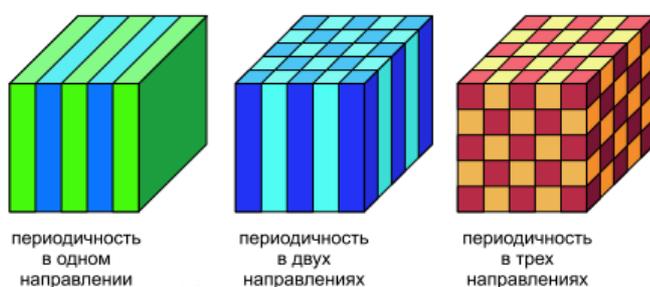


Рис.11. К понятиям одномерные, двумерные и трехмерные фотонные кристаллы

Для формирования интерференционной структуры используются различные схемы. Примеры схем приведены на рисунке 12 [1,30].

Симметричная зонтичная геометрия достигается с использованием дифракционного светоделителя (DBS), преобразующего падающую волну в один

центральный пучок нулевого порядка и несколько дифрагированных пучков первого порядка.

При комбинации интерферирующих волн можно сформировать структуры различной конфигурации. Пучки могут падать на регистрирующий материал с одной или противоположных сторон. Необходимые пучки отбираются при введении соответствующих масок.

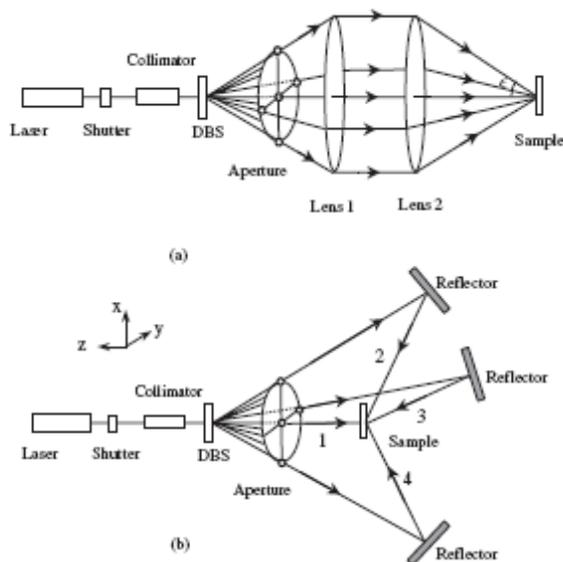


Рис. 12. Схемы получения периодических структур различной конфигурации. а – симметричная зонтичная геометрия, б – схема получения объемно-центрированной тетрагональной решетки.

Для моделирования структуры заданной конфигурации применяется математический аппарат расчета волновых векторов интерферирующих пучков. На рисунке 13 приведены конфигурации структур, полученные при различной комбинации интерферирующих пучков [1,30].

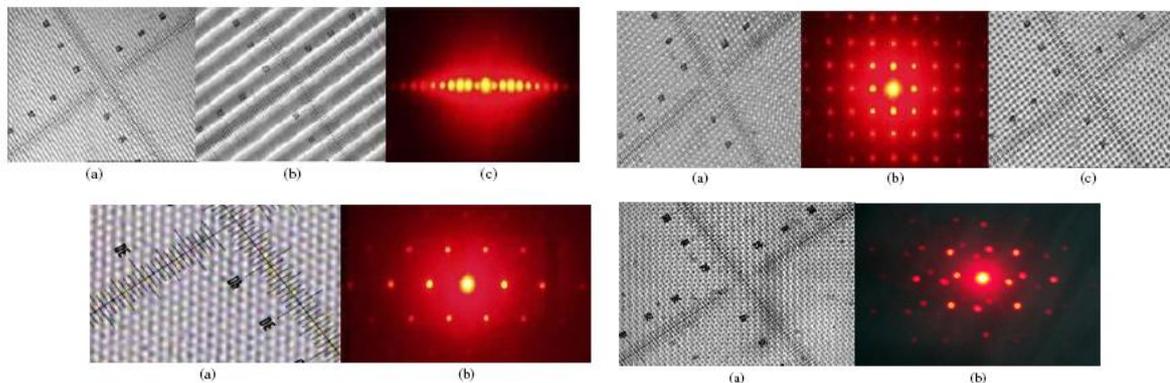


Рис. 13. Вид структур, полученных при различной комбинации интерферирующих пучков и картины дифракции

Наряду с изменением геометрии записи, изменение конфигурации структур возможно при изменении фаз интерферирующих пучков [1,31]. Схема записи показана на рисунке 14а. Луч лазера расщепляется дифракционным оптическим элементом (DOE) и преобразуется в расходящийся набор пучков. Расходящийся набор пучков коллимируется линзой L_1 и проходят через систему фазовой задержки (PR), представляющую собой набор стеклянных пластинок с регулируемым наклоном. Набор пучков с изменяемой фазой фокусируется линзой L_2 на образце (IA). Пучки, необходимые для получения трехмерной структуры требуемой конфигурации, могут выделяться амплитудной маской. На рисунке 14 приведена фотография дифракционного элемента и ход интерферирующих пучков. Все пучки линейно поляризованы, θ – угол между пучками.

Обеспечивается также оптимальное отношение интенсивностей интерферирующих пучков (1:5). Геометрия с четырьмя пучками (слева) позволяет формировать двумерные структуры, схема с пятью пучками (справа) с регулированием фаз интерферирующих пучков позволяет формировать трехмерные структуры.

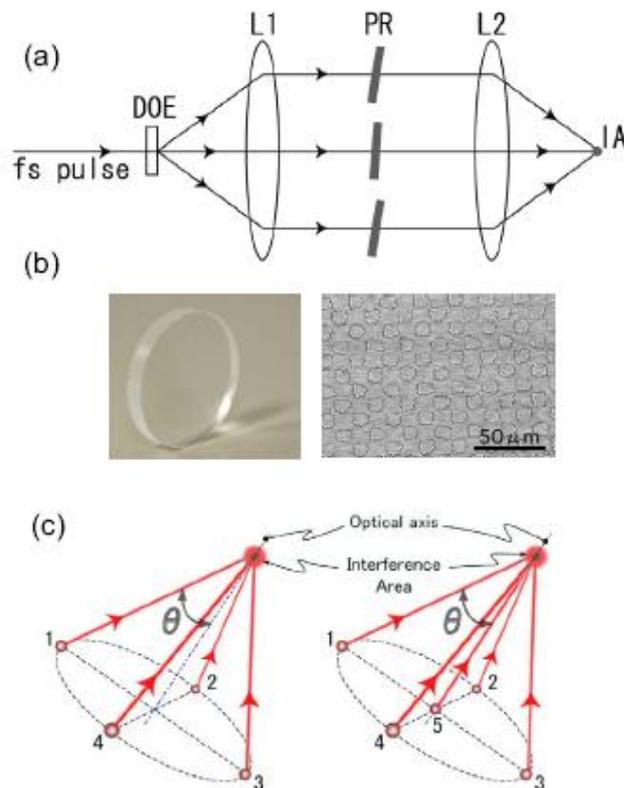


Рис. 14. Принцип записи с изменением фазы (а), дифракционный оптический элемент (b), схема записи с использованием четырех и пяти лазерных пучков (с)

Пространственное распределение интенсивности света в плоскости образца является суперпозицией когерентных волн и описывается выражением:

$$I(r) = \sum_{n,m} E_n e^{-i(k_r \cdot r + \delta_n)} \cdot E_m e^{i(k_m \cdot r + \delta_m)}, \quad (38)$$

где E – электрический вектор волнового поля, r – радиус-вектор, k – волновой вектор, n, m – число интерферирующих пучков, δ – фазовый сдвиг.

На рисунке 15 показаны двумерные (соответствующие взаимодействию четырех пучков) и трехмерные (соответствующие взаимодействию пяти пучков) структуры.

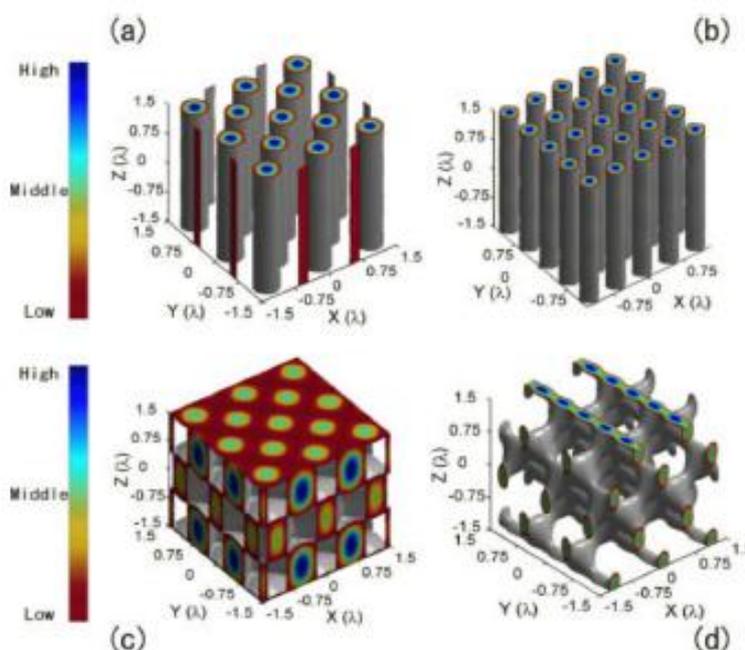


Рис.15. Вид интерференционных структур для четырех - (a,b) и пяти пучковой (c,d) схемы. a,c – все пучки имеют одинаковую фазу, b,d – фазы пучков 2 и 4 (или 1 и 3) сдвинуты на $\pi/2$

Следует отметить, что симметричная схема с четырьмя лучами, как и симметричная схема с любым числом лучей, имеющих равные компоненты волнового вектора вдоль направления, совпадающего с оптической осью системы, дает одинаковый период решетки.

Это условие нарушается при добавлении центрального луча. Вследствие различия компонент, период решетки вдоль оптической оси больше, чем в плоскости перпендикулярной к ней (рис.16).

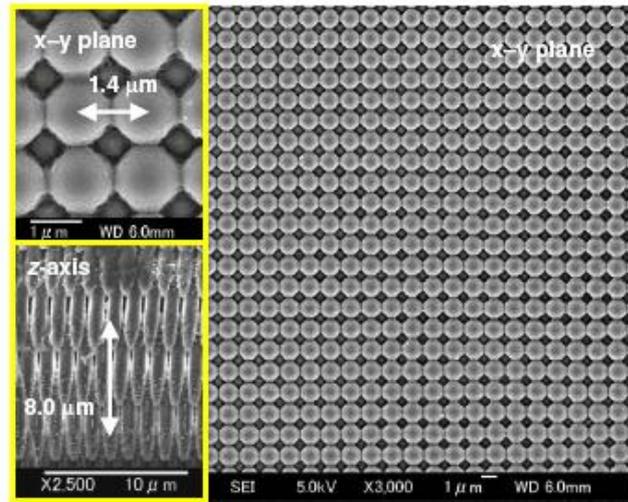


Рис. 16. Изображение трехмерной периодической структуры, полученной с использованием пятилучевой схемы. Периоды в плоскости x-y и вдоль оси z - 1.4 и 8.0 мкм соответственно

Основными исследуемыми характеристиками фотонных кристаллов являются спектры пропускания и отражения. На рисунке 17 приведены спектры пропускания и отражения для структур, полученных при записи по пятилучевой схеме. Видно, что область наибольшего пропускания практически совпадает с областью наименьшего отражения и лежит в диапазоне 2.4 – 4 мкм.

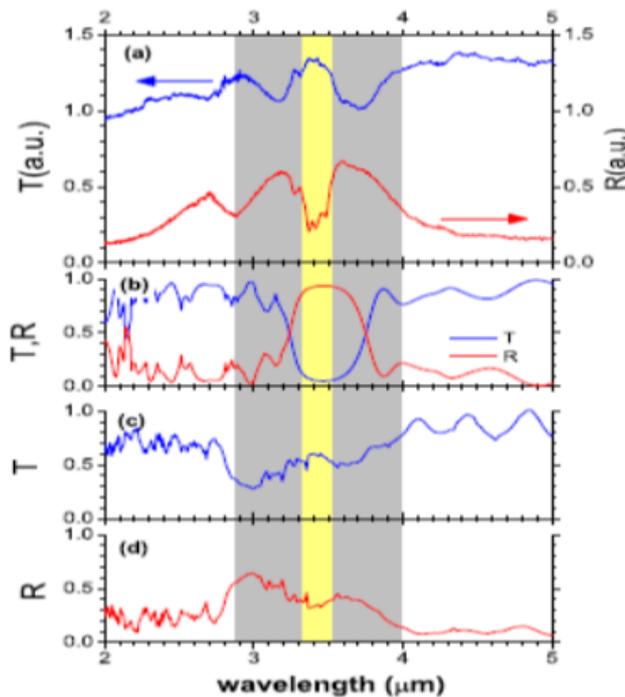


Рис. 17. Спектры пропускания и отражения структур, полученных по пятилучевой схеме

При регистрации картины интерференции семи пучков (шести внеосевых и одного центрального) можно получить спиральные структуры (рис.18) [32].

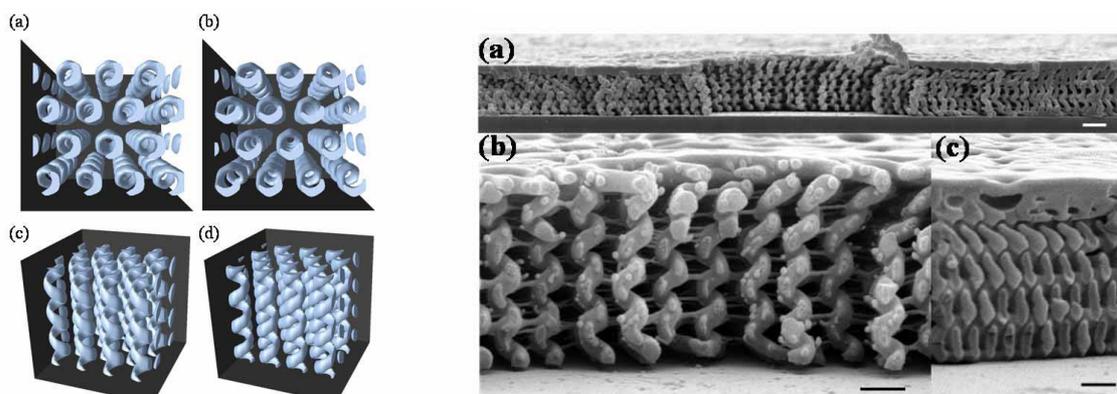


Рис. 18. Результаты моделирования (слева) и вид спиральных структур (справа), полученных при интерференции семи пучков

Наряду с получением периодических структур с различной конфигурацией в объеме материала, метод лазерной интерференционной литографии используется как надежный и недорогой метод изготовления малоразмерных полимерных масок для последующего травления и изготовления структур с необходимыми свойствами.

Например, в работе [33] такая матрица используется для последующего травления слоя палладия пучком ионов аргона. Полученная в результате травления наноразмерная плазмонная структура обладает спектрально избирательными свойствами от видимой до ближней инфракрасной области спектра и может использоваться в качестве сенсора, в частности, концентрации водорода (рис.19).

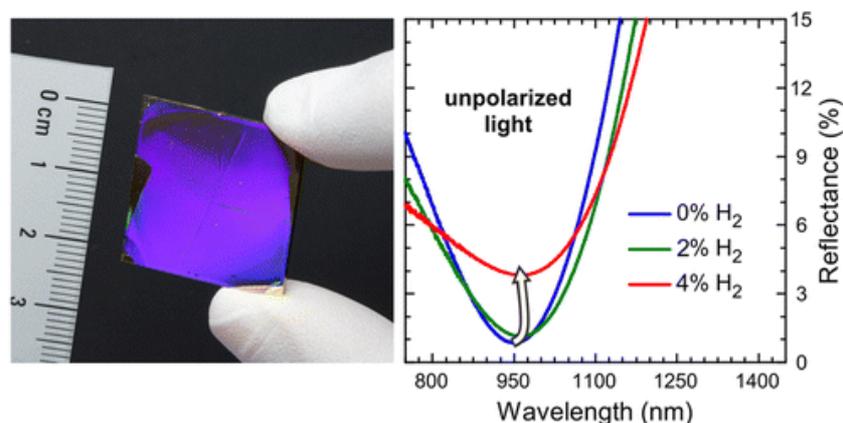


Рис. 19. Плазмонная наноструктура, изготовленная методом ионного травления через структуру, полученную методом лазерной интерференционной литографии

Большой интерес проявляется к технологиям получения структур, не являющихся диэлектрическими. Такие структуры получают методом лазерной интерференционной литографии с последующим травлением и нанесением соответствующих веществ, в том числе металла. [34-36].

Для получения малоразмерных 3D структур используют многостадийные процессы. Этапы процесса, рассмотренного в работе [36], позволяющего получать структуры с размерами элементов до 65 нм, приведены на рисунках 20 и 21. На рисунке 22 приведен вид полученных структур.

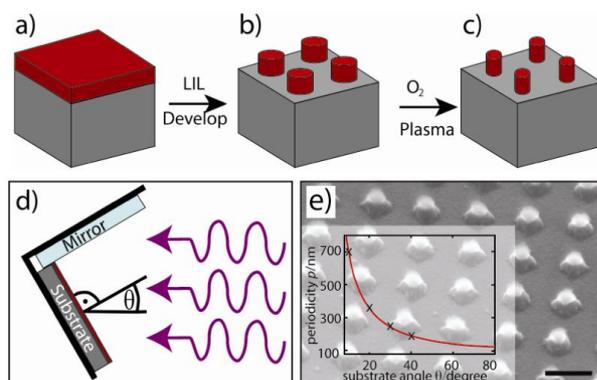


Рис. 20. (а – с) - лазерная интерференционная литография в сочетании с плазменным травлением O_2 используется для получения массивов столбов фоторезиста. d- зеркальный интерферометр Ллойда. e – СЭМ микрофотография столбов фоторезиста перед плазменным травлением, масштабная шкала - 200 нм

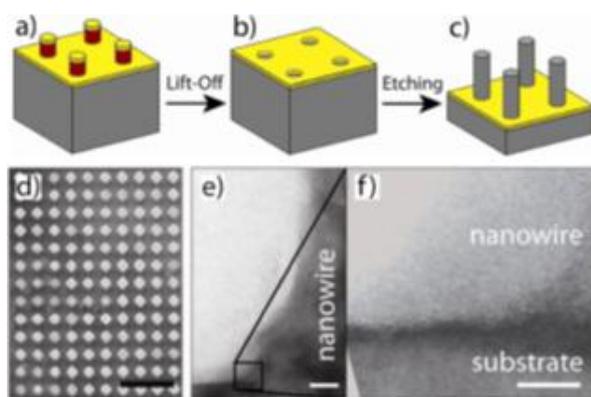


Рис. 21. Нанесение кремния, удаление фоторезиста и травление с содержанием кремния (а-с) приводят к образованию вертикального массива нанопроводников Si (d). Провода имеют диаметр около 350 нм, период 710 нм и длину несколько микрометров. Изображение (е), полученное методом пропускающей электронной микроскопии (ТЕМ) показывает основание нанопровода и подложку. Увеличение с высоким разрешением (f) доказывает, что провод и подложка образуют монокристалл. Масштабные шкалы (d), (e) и (f) - 2 мкм, 10 нм и 5 нм соответственно

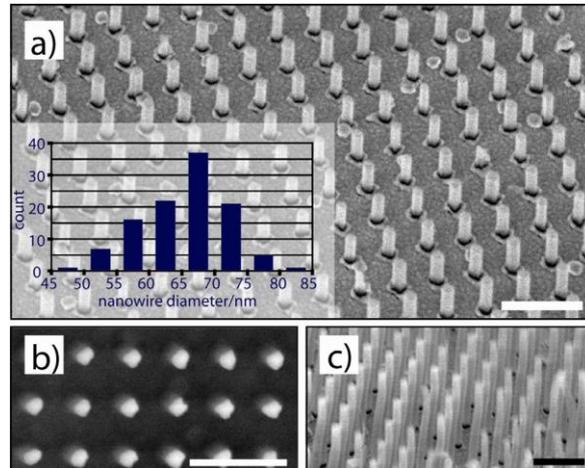


Рис. 22. Микрофотография, полученная методом сканирующей электронной микроскопии (SEM) кремниевых нанонитей (а) с периодом $p = 244$ нм, диаметром $d = 66$ нм и длиной 200 нм. На вкладке показано распределение по размеру. в, с - вид структуры с увеличенным временем травления (в - вид сверху, с- вид с наклоном). Провода имеют длину около 1 мкм и соотношение диаметра и высоты 1:15. Масштабная шкала - 500 нм

Рассмотренные технологии получения периодических структур ориентированы на применение в области фотоники, энергетики, получения сенсоров, микрофлюидных и плазмонных устройств.

Контрольные вопросы

1. Принципы получения периодических структур при регистрации интерференционной картины.
2. Типы и свойства голографических решеток.
- 3..Критерий объемности голографической решетки.
4. Особенности и преимущества использования полимерных материалов в голографических технологиях.
5. Направления применений голографических технологий.
6. Сущность метода интерференционной литографии. Примеры применений.

2 ТЕХНОЛОГИИ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИТОГРАФИИ

Литография в настоящее время является базовой технологией микроэлектроники. Основой литографии является формирование микрорельефа в фоторезисте, который обеспечивает возможность последующего травления материала подложки (например, SiO_2) на незащищенных фоторезистом участках для нанесения того или иного материала на эти участки.

Для формирования фоторезистивного рельефа могут использоваться электронные и ионные пучки (электронно- и ионно-лучевая литография), а также источники оптического излучения, преимущественно, в УФ области спектра. Остановимся на оптических технологиях. В разделах 2.1, 2.2.1 и 2.2.2 частично использован материал, приведенный в [1].

2.1 Основы технологий фотолитографии

Основными этапами процесса оптической литографии (фотолитографии) являются:

- Создание исходного рисунка интегральной микросхемы – фотошаблона;
- Проекция фотошаблона в плоскость фоторезиста и формирование микрорельефа;
- Формирование соответствующей структуры на подложке (например, методом химического травления через структуру в фоторезисте);
- Нанесение на сформированную на подложке структуру соответствующего материала (формирование элементов интегральных микросхем);
- Удаление фоторезистивной маски.

На рисунке 23 схематично показаны этапы процесса получения фоторезистивной маски. На поверхность материала 1 (полупроводник, диэлектрик, металл или сверхпроводник) наносится слой фоторезиста 2. Для создания рельефа фоторезист освещают через фотошаблон 3 с предварительно созданным контрастным рисунком, состоящим из прозрачных 4 и непрозрачных 5 участков.

При световом воздействии и последующей химической обработке (проявлении) в слое фоторезиста формируется рельеф, который в зависимости от типа используемого фоторезиста будет иметь максимумы в светлых (рис.32 а) или темных (рис. 23 б) областях фотошаблона.

Фоторезисты – полимерные светочувствительные материалы, устойчивые к воздействию агрессивных факторов (травление в кислотах и щелочах, нагрев). Фоторезисты используются для получения рельефной структуры (защитного рельефа) требуемой конфигурации.

Рельеф образуется в результате дифференцированного изменения исходных свойств (растворимости) после действия актиничного излучения.

Негативный фоторезист – светочувствительная полимерная композиция, в которой растворимость экспонированного участка понижается.

Позитивный фоторезист – светочувствительная полимерная композиция, в которой растворимость экспонированного участка повышается.

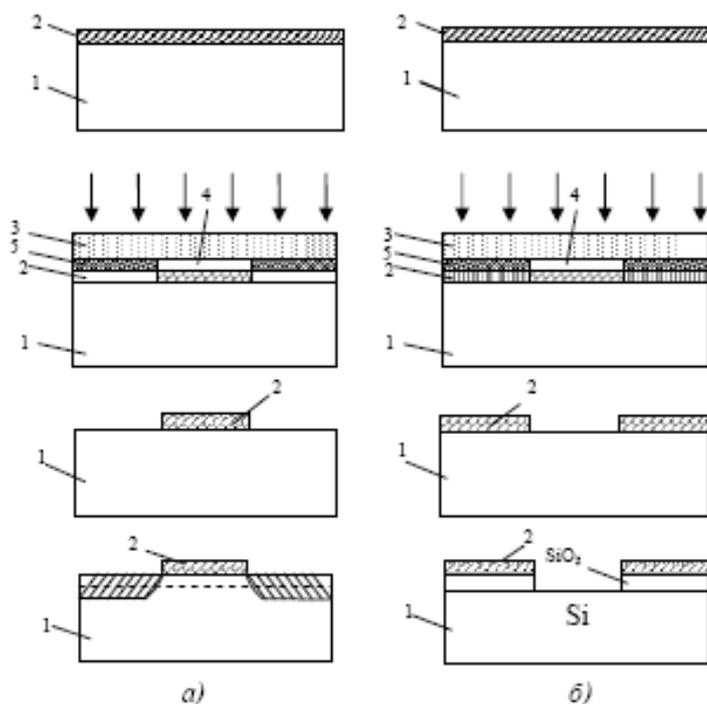


Рис. 23. Этапы процесса фотолитографии.
 а – негативный фоторезист, б – позитивный фоторезист

В фотолитографии существуют контактные и бесконтактные (проекционные) методы, отличающиеся способом проекции рисунка шаблона в плоскость фоторезиста. Важно отметить, что как контактные, так и проекционные методы приводят к некоторому размытию изображения, в частности ухудшению резкости края. Профили распределения интенсивности в изображении при различных способах печати показаны на рисунке 24.



Рис. 24. Профили распределения интенсивности в изображении для случаев контактной печати, печати с зазором и проекционной литографии

При контактных методах амплитудная маска накладывается непосредственно на слой фоторезиста. Контактные методы характеризуются возможностью получения малых значений a_{\min} - минимального характеристического размера, однако существенным недостатком контактных методов является необходимость частой смены шаблона.

В проекционных методах используются оптические системы, проектирующие рисунок шаблона в плоскость фоторезиста. Разрешающая способность при использовании оптической системы ограничена дифракционным пределом. Согласно критерию Рэлея, минимальный характеристический размер прямо пропорционален длине волны света и обратно пропорционален числовой апертуре оптической системы:

$$a_{\min} = k\lambda_0/NA, \quad (39)$$

k – коэффициент пропорциональности, λ_0 – длина волны в воздухе, NA – числовая апертура оптической системы:

$$NA = n \sin\theta, \quad (40)$$

n – показатель преломления среды перед объективом, θ – угол, под которым виден диаметр входного зрачка из точки предмета.

a_{\min} – минимальный характеристический (критический) размер (Critical Dimension (CD)).

2.2 Оптические нанотехнологии литографии

2.2.1 Литография в ЭУФ

Как видно из выражения (39), уменьшение характеристических размеров элементов возможно при уменьшении длины волны экспонирующего излучения. Уменьшение длины волны определяет необходимость использования источников излучения в коротковолновой - ультрафиолетовой (УФ) области спектра. В настоящее время в качестве источников УФ излучения возможно использование эксимерных лазеров (193 нм), фторного (157 нм), аргонового (126 нм) и водородного (116 нм) лазеров. Дальнейшее уменьшение длины волны требует перехода в экстремально-дальний ультрафиолет (ЭУФ), то есть к лазер-плазменным источникам [1, 37-39].

Разработки таких источников ведутся как за рубежом, так и в России. В настоящее время в России создан лазер-плазменный источник с длиной волны 13.4 нм и 6.7 нм [39]. Конвертор излучения строится на основе маломощного YAG:Nd- и силового CO₂-лазеров. Инжекция насыщающего сигнала в силовой каскад CO₂-усилителя осуществляется субнаносекундными импульсами на длине волны 9,2 мкм от усилителя на вынужденном комбинационном рассеянии при

накачке излучением оптического параметрического генератора с использованием излучения YAG:Nd твердотельного лазера (задающего генератора).

Использование излучения в ЭУФ предъявляет также особые требования к оптической системе и материалам. На рисунке 25 приведена принципиальная схема нанолитографа.

Оптическая система должна быть зеркальной, но с минимальным количеством брэгговских зеркал, что связано с возможными потерями при нарушении условия Брэгга. В настоящее время разрабатывается система, которая должна включать два или четыре зеркала с обеспечением шероховатости поверхности до 0.2 – 0.4 нм.

Высокие требования предъявляются к шаблонам, получение которых требует высокой степени виброзащиты и позиционирования – требуется совмещение изображений с точностью 0.2-0.5 нм. Возможно использование шаблонов, представляющих собой брэгговское зеркало с нанесенным слоем вещества сильно поглощающего УФ излучение (W, Ta, TaN, Cr и др.).

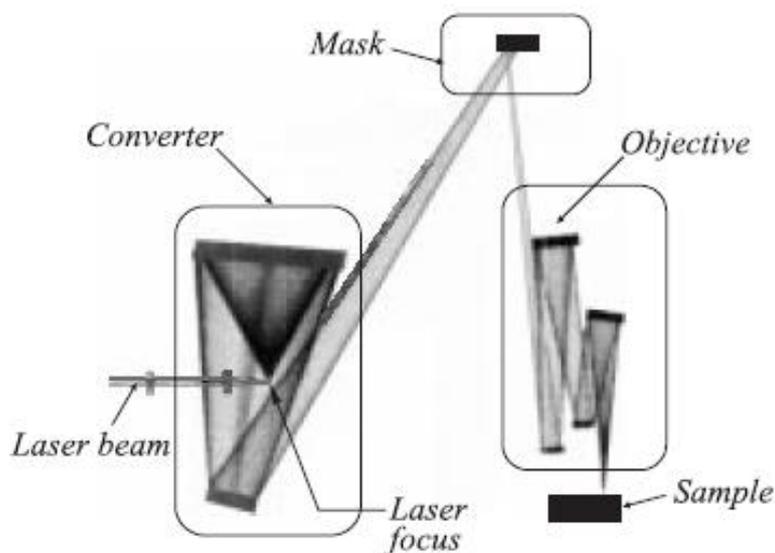


Рис.25. Принципиальная схема нанолитографа в ЭУФ

Особые требования предъявляются к фоторезистам. Основная проблема фоторезистов заключается в том, что все природные материалы являются высокопоглощающими в ЭУФ, поэтому формирование рельефа возможно в тонком приповерхностном слое. Наиболее приемлемыми могут быть кремний-водородные (силановые) и силаксановые полимеры. Рассматриваются также многослойные системы с увеличенным разрешением. Ожидаемый характеристический размер с использованием нанолитографа в экстремальном ультрафиолете - 7.5 нм.

2.2.2 Иммерсионная литография

Концепция уменьшения размеров элементов за счет уменьшения длины волны приводит к высоким требованиям к источникам излучения, элементам нанолитографа и материалам, что неизбежно сопровождается высокой стоимостью установок. Технически более простым является решение, лежащее в основе метода иммерсионной литографии [1,40,41]. Как видно из выражений (39) и (40), уменьшение характеристического размера элементов (a_{\min}) возможно при увеличении числовой апертуры (NA) и, следовательно, величины показателя преломления среды перед объективом.

Сущность иммерсионного метода заключается во введении иммерсионной жидкости в пространство между последней поверхностью объектива и слоем фоторезиста (рис. 26).

Применение иммерсии фактически эквивалентно уменьшению длины волны. Так, если длина волны эксимерного лазера 193 нм, то при использовании иммерсии с показателем преломления 1.44 рабочая длина волны уменьшается до $\lambda_0/n = 135$ нм.

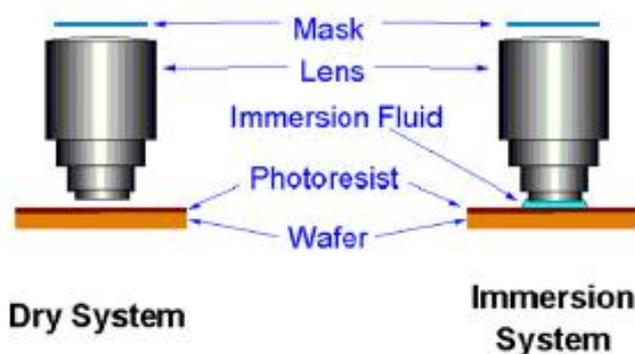


Рис.26. Схемы воздушной и иммерсионной систем

Однако необходимо принимать во внимание, что увеличение числовой апертуры неизбежно приводит к уменьшению глубины резкости проектируемого в фоторезист изображения, что предъявляет высокие требования к позиционированию фоторезиста.

Проблемами иммерсионной литографии являются: наличие и использование сред с большим показателем преломления; необходимость исключения неоднородностей в иммерсионной жидкости – пузырей и завихрений, исключения возможных температурных изменений; устранения посторонних включений.

Применение иммерсионного метода позволяет получать характеристические размеры 35 – 65 нм [40,41]. Ожидается, что использование иммерсионной

литографии может быть продлено до топологических норм порядка 11 нм и даже 9 нм [41].

2.2.3 Принципы преодоления дифракционного предела в фотолитографии

В соответствии с выражением (39), наименьший характеристический размер элементов, определяемый критерием Релея-Аббе применительно к длине волны эксимерного лазера (193 нм) и числовой апертуре современных литографических объективов 0.95, составляет 124 нм. Современные технологии уже преодолели дифракционный предел. Среди методов преодоления дифракционного предела рассмотрим несколько основных [42].

Коррекция оптической близости

Метод основан на коррекции конфигурации проектируемого изображения при введении компенсирующих элементов на фотошаблоне (рис. 27).

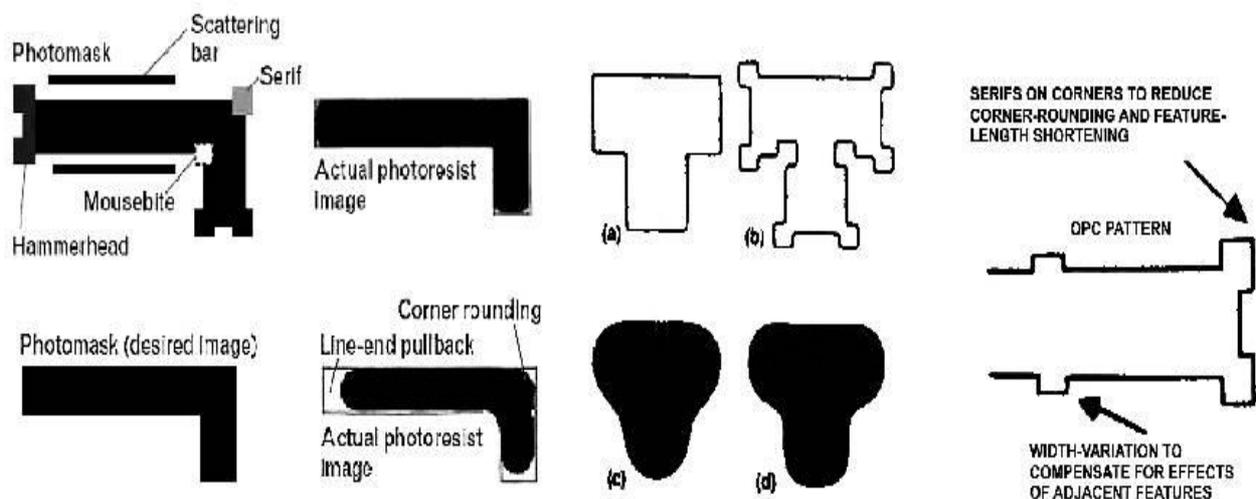


Рис. 27. Коррекция оптической близости на примере Г и Т-образного элементов.

Показаны дополнительные угловые элементы на шаблоне, обеспечивающие требуемую конфигурацию элементов. Существуют пакеты программ, позволяющих вводить в фотошаблон необходимый набор элементов, корректирующих эффекты оптической близости и моделировать результат.

Введение фазового сдвига

Принцип введения фазового сдвига показан на рисунке 28.

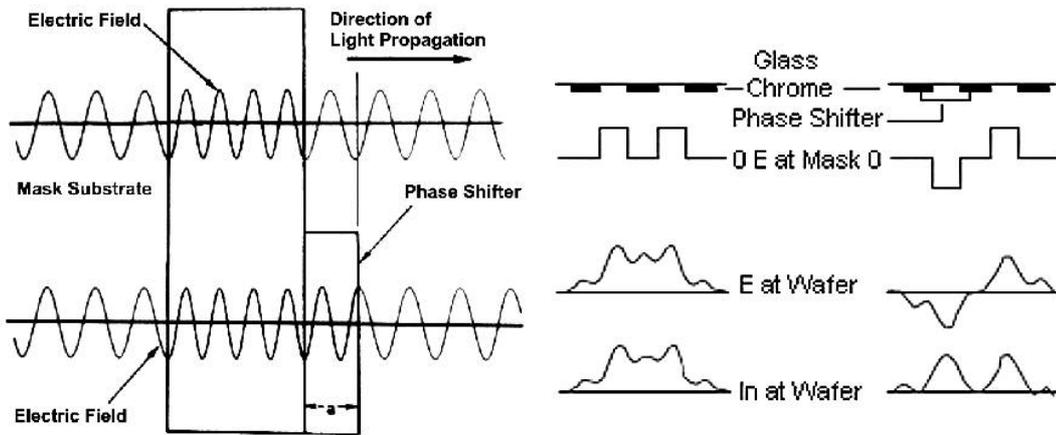


Рис.28. Принцип введения фазового сдвига (а) и работы фазосдвигающей маски.

При введении фазосдвигающих вставок из материала необходимой толщины образуется фазовый сдвиг $\Delta\varphi = (2\pi/\lambda)(2n - 1)a$.

В настоящее время наиболее широко используются «полутонные» фазосдвигающие маски, представляющие собой комбинацию прозрачного фазосдвигающего слоя и полупрозрачного покрытия.

Внеосевое освещение маски

При нормальном освещении маски в зрачок оптической системы попадает только нулевой порядок дифракции – изображение не формируется. При наклонном падении (рис.29) освещающего пучка на маску в зрачок проектирующей системы попадает излучение первого порядка дифракции. При попадании данного излучения не только формируется изображение, но и увеличивается глубина резкости.

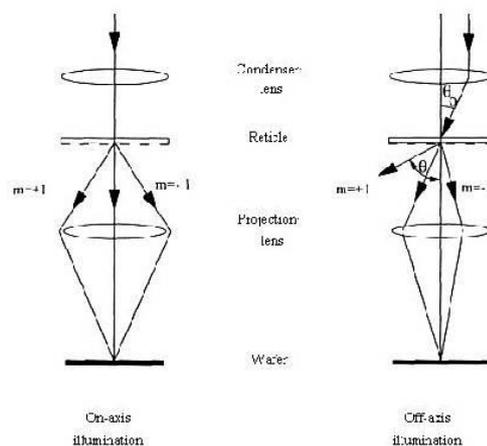


Рис. 29. Принцип внеосевого освещения маски

Двойное экспонирование и двойное «паттернирование»

Двойное экспонирование и двойное паттернирование являются наивысшими достижениями в уменьшении критических размеров элементов. Метод двойного экспонирования основан на применении двух фотошаблонов с различными и дополняющими друг друга микрорисунками при экспонировании одного и того же слоя фоторезиста.

Двойное паттернирование состоит в поочерёдном создании двух взаимодополняющих микрорисунков, задаваемых парой согласованных фотошаблонов. Фоторезист наносится, экспонируется и проявляется дважды, образуя два встроенных один в другой микрорисунка (рис. 30).

Такие технологии стали возможны в результате разработки и усовершенствования нового класса фоторезистов - «химически усиленных» фоторезистов.

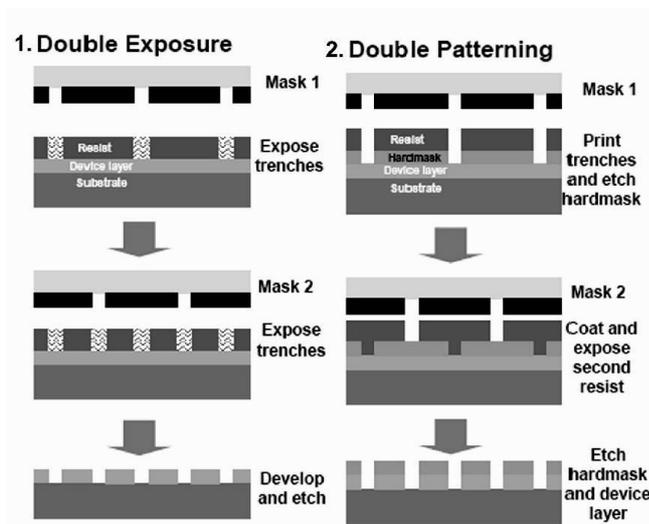


Рис. 30. Принцип двойного экспонирования (слева) и двойного паттернирования (справа)

В химически усиленных фоторезистах основная фотохимическая реакция не является прямым следствием поглощения кванта излучения. С фотоном непосредственно реагирует фотокислотный генератор, в небольшом количестве включаемый в состав резиста, который выделяет кислоту. Кислота модифицирует звенья полимерной матрицы, делая их растворимыми.

Многослойный резист и силилирование

Основой технологии является применение многослойных резистов, например, двухслойных. Верхний слой делается тонким. Нижний слой имеет большую толщину для обеспечения необходимой стойкости при проведении последующих операций. Проблема сохранения точности микрорисунка в верхнем

слое резиста и в нижнем слое решается созданием между слоями некоторого пограничного слоя, обогащённого кремнием.

2.2.4 Достижения оптической нанолитографии и перспективы дальнейшего развития

Тенденции развития технологий литографии характеризуются направленностью на уменьшение размеров элементов. За период с 2008 г до 2019 г. критический размер элементов уменьшился от 45 до 10 нм. Одной из наиболее перспективных, в рамках данной концепции, считается технология литографии в ЭУФ [43,44] , обещающая переход к размерам до 7 нм и даже 5 нм. Наряду с возможностью получения наибольшей разрешающей способности преимуществами являются высокая производительность, высокая точность совмещения, однако недостатком является высокая стоимость технологического оборудования.

В таблице 1 приведено сравнение [44] данной технологии литографии в ЭУФ с технологиями ионно- и электроннолучевой литографии (безмасковой - Maskless Lithography), а также наноиmprинт литографии. Наноимпринт литография считается относительно дешевым процессом и характеризуется, наряду с высокой разрешающей способностью, возможностью увеличения размера формируемого поля элементов. Следует, однако, отметить и недостатки, связанные с использованием гибких штампов и сложностью их изготовления.

Таблица 1 – Сравнение технологий литографии [44]

| Параметр | ЭУФ литография | Электронно- лучевая литография | Наноимпринт литография |
|---------------------|-------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| Разрешение | < 10 нм | < 5 нм | < 10 нм |
| Точность совмещения | < 2 нм | < 20 нм | < 4.5 нм |
| Производительность | 150 ед/час | 40 ед/час | 15ед/час (поле) |
| Стоимость | Очень высокая | Высокая | Низкая |

Технология ЭУФ литографии, по прогнозам специалистов, может являться перспективной в сочетании с новой трехмерной технологией самосборки

(Directed Self-Assembly - DSA) [41,44], в которой конфигурация (рисунок) задается не шаблоном, а формируется в специальном материале, представляющем собой сочетание компонент, обладающих способностью к перераспределению (самоорганизации) в пространстве.

Согласно существующим прогнозам, тенденция уменьшения размеров элементов может сохраняться, однако может перейти в плоскость экономической целесообразности. В связи с этим представляют интерес подходы, базирующиеся на совершенно иных принципах и материалах.

Возможно, в будущем технологии электроники будут вытеснены принципиально новыми решениями, основанными на квантовых процессах. Возможно, технологии будут переходить из плоскости в трехмерное пространство.

Контрольные вопросы

1. Что является основой фотолитографии?
2. На чем основана концепция уменьшения критических размеров элементов?
3. Принципы преодоления дифракционного предела в фотолитографии.
4. Преимущества и недостатки технологии нанолитографии в ЭУФ. Перспективы развития.
5. Основы технологии иммерсионной литографии.

3 ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТРЕХМЕРНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

3.1. Глубокая литография

Глубокая литография является одним из первых методов получения трехмерных элементов [1]. Основой метода глубокой литографии (deep lithography) является проекция двумерного распределения интенсивности излучения, формируемого амплитудными масками, на поверхность толстослойного материала и формирование объемных элементов, преимущественно, с постоянным сечением по высоте.

Основной характеристикой структур является аспектное отношение – отношение высота/ширина.

Первые работы [1] базировались на использовании рентгеновского излучения (процессы X-LIGA), преимуществом которого является малая расходимость в веществе. В последние годы широко применяются источники оптического излучения, в том числе, УФ излучения.

Использование УФ излучения в значительной степени определяется спектральной чувствительностью промышленных фоторезистов, в частности, прозрачного негативного фоторезиста SU-8.

Метод глубокой литографии используется для получения микрокомпонент различных приборов и систем, в том числе MEMS (микромеханических) и MOEMS (микрооптоэлектромеханических) систем [45-48]. На рисунке 31 приведены примеры [1] полимерных элементов, полученных методом глубокой литографии.

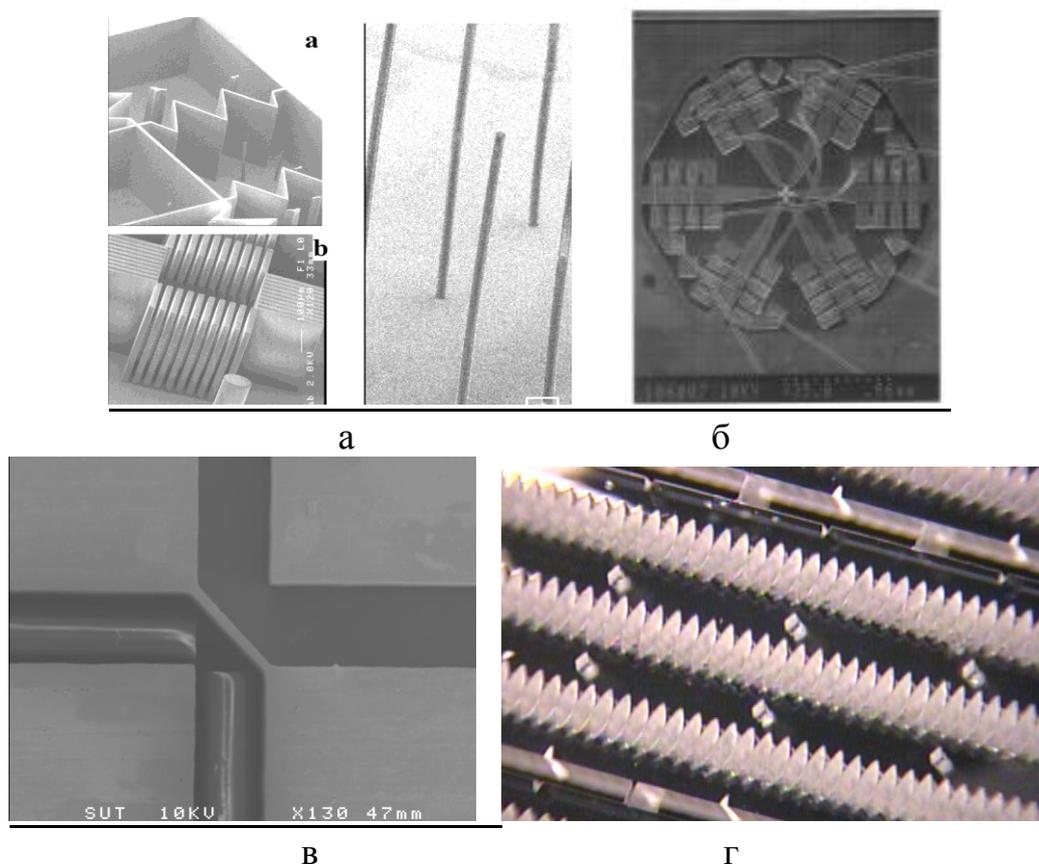


Рис. 31. а - примеры структур с высоким аспектным отношением:
 б - микропривод, в - вертикальное зеркало для сопряжения оптических волокон,
 г - плоско – параболические линзы

Приведенные выше конфигурации элементов с постоянным сечением по высоте получены при стационарном горизонтальном расположении фотомаски.

Более сложные конфигурации получают при повороте или вращении маски [49]. Примеры элементов, полученных в фоторезисте SU-8, приведены на рисунке 32 .

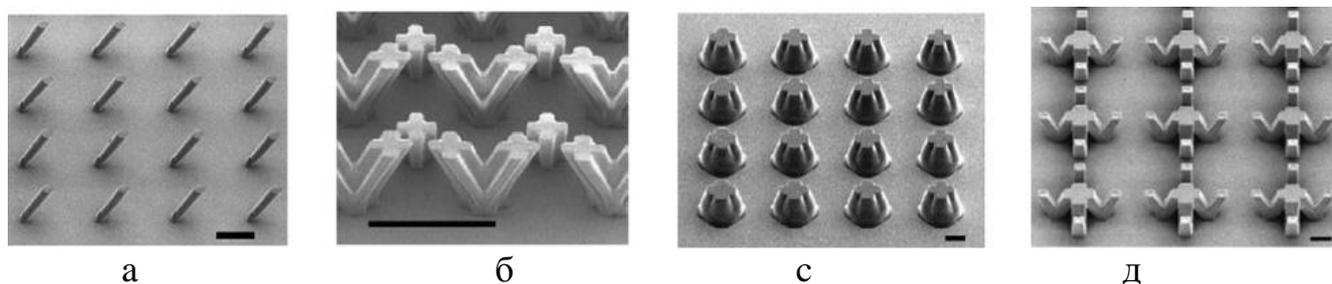


Рис. 32. Примеры элементов, полученных при вращении маски. а- наклонные стержни, полученные при однократном экспонировании УФ излучением при наклоне маски, угол наклона $19,5^\circ$, масштабная шкала - 100 мкм. б – элементы, полученные при наклоне маски и двукратном экспонировании, шкала - 200 мкм. с- конические структуры, полученные при наклоне и вращении маски. Шкала - 50 мкм. д- элементы, изготовленные при наклоне маски на отражающей подложке (кремний, с алюминиевым покрытием)

3.2. Полутоновая литография

В основе технологии полутоновой литографии (Grayscale Photolithography) лежит зависимость высоты полимерного слоя от величины экспозиции, которая определяется задаваемой оптической плотностью амплитудной маски [50].

Данная технология используется для получения трехмерных элементов с относительно простой формой поверхности [50-53]. Принцип полутоновой литографии показан на рисунке 33 [50]. При плавном изменении плотности маски возможно получение оптических поверхностей заданной формы, например сферической [51,52] (рис. 34, 35).

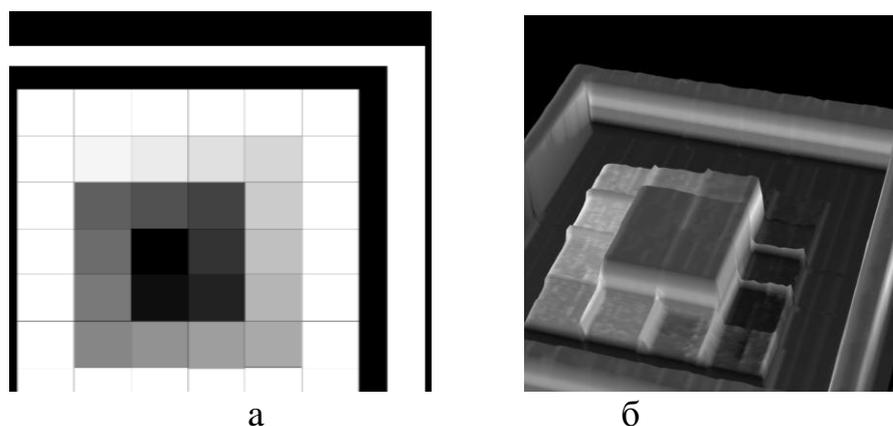


Рис. 33. а -изображение спиральной фотомаски с изменением пропускания от 0 до 100% , состоящей из квадратов размером 300 мкм. б – трехмерный профиль структуры, полученной в фоторезисте HD-8820, общая толщина образца 22,5 мкм

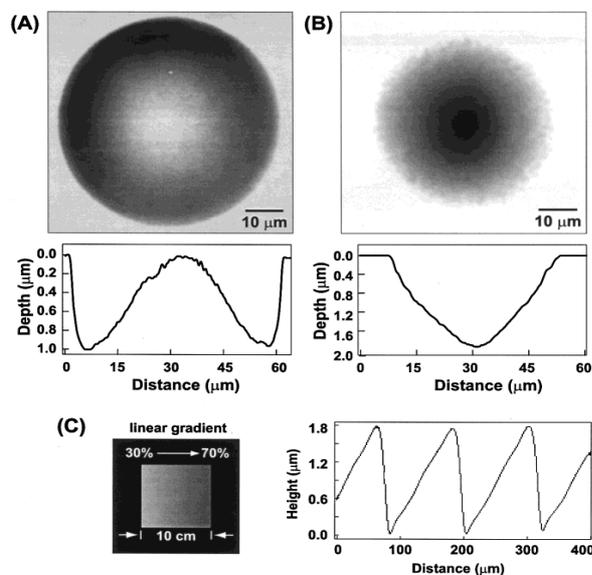


Рис.34. Трехмерные элементы в фоторезисте. а - АСМ изображение выпуклой микролинзы, полученной с использованием маски с радиальным градиентом пропускания от центра к краю от 70 до 30%, б – изображение вогнутой линзы с радиальным градиентом от центра к краю от 30 до 70%, с- фрагмент маски с непрерывным градиентом от 70 до 30% (слева) и профиль структуры (справа)

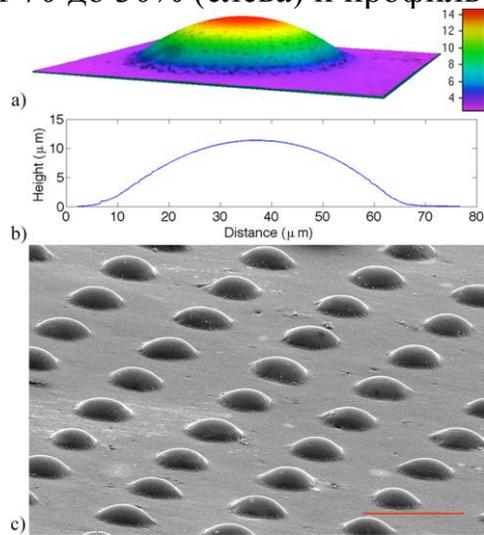


Рис. 35. а – трехмерное изображение формы микролинзы, полученное с использованием оптического профилометра, б-профиль микролинзы, с-СЭМ изображение массива микролинз, шкала – 100 мкм

3.3. Лазерная абляция полимеров

Воздействие на полимеры интенсивных потоков энергии вызывает разнообразные физико-химические процессы в зоне облучения, зависящие как от химической природы полимера, так и от режима облучения [54, 55]. В результате

термо- и фоторадиационной деструкции полимера образуется большое количество продуктов различной молекулярной массы, которые выбрасываются из зоны облучения, формируя в мишени кратер. Для обозначения такого комплексного процесса удаления вещества под действием потока энергии используют термин «абляция».

Лазерная абляция используется для формирования микро- и наноразмерных структур. Локализация во времени и пространстве лазерной энергии позволяет добиться плотности мощности излучения (10^{14} – 10^{26} Вт/см²), что дает возможность реализовать различные механизмы энергетического воздействия на материал.

При обработке миллисекундными или микросекундными лазерными импульсами имеет место механизм: нагрев—плавление—испарение материала. Использование более коротких импульсов (нано-, пикосекундной длительности) приводит к другому механизму: нагрев—абляция. Расплавленная фаза исключена и почти отсутствует зона термического влияния. Характерные размеры структур при таком режиме составляют от десятков нанометров до микрометров при толщине материала до сотен микрометров.

При лазерной абляции полимера механизм воздействия определяется длиной волны лазерного излучения. Полагают, что воздействие в инфракрасной (ИК) области спектра приводит к испарению материала вследствие высокой температуры. В ультрафиолетовой (УФ) области спектра, реализуется другой механизм абляции полимера, при котором происходят фотохимические процессы, приводящие к разрыву связей в макромолекулах. Применение УФ-лазеров позволяет получать микроразмерные структуры с пространственным разрешением до 0.2 мкм.

Методом лазерной абляции можно получать структуры различной конфигурации, которая определяется как характеристиками излучения, так и физико-химическими свойствами полимера. На рисунке 36 приведен пример микроканалов, полученных в ПММА (полиметилметакрилате) при лазерной абляции в ИК области спектра [54].

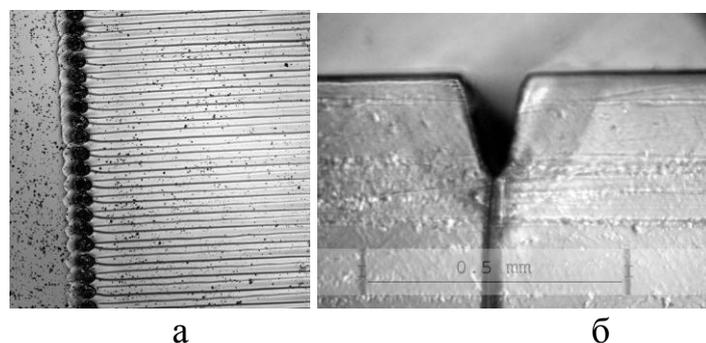


Рис. 36. а - структура, полученная при лазерной абляции ПММА. Размер изображения 0.9×0.9 мм. б – вид канала

3.4. Аддитивные технологии 3D печати

Наибольшее применение получили *аддитивные технологии 3D печати*. Термин «аддитивные» связан с принципом формирования элементов. Технологии основаны на последовательном – поточечном или послойном формировании трехмерного объекта по заданной компьютерной программе. В отличие от рассмотренных выше методов, позволяющих формировать трехмерные объекты относительно простой формы, аддитивные технологии 3D печати позволяют получать элементы сложной трехмерной конфигурации.

В настоящее время существует множество разновидностей аддитивных технологий, основные различия которых связаны с используемыми материалами и способами нанесения слоев. К ним относятся технологии, основанные на расплавлении или размягчении материалов для создания слоев – выборочное лазерное спекание (SLS); выборочная лазерная плавка (SLM), прямое лазерное спекание металлов (DMLS), печать методом послойного наплавления (FDM или FFF)), используемые для получения изделий больших размеров.

В данном разделе рассмотрим лишь оптические технологии, используемые для получения малоразмерных элементов и обеспечивающие наилучшие характеристики.

3.4.1 Стереолитография

Особое место занимает технология *стереолитографии* (stereolithography – SLA) [1, 56-60]. Технология была запатентована Чарльзом Халлом в 1986 г. Изготовление полимерных изделий выполняется послойно при использовании сфокусированного пучка УФ лазера, «пишущего» по поверхности слоя жидкого полимера, который в результате освещения затвердевает. Рисунок 37 [55] иллюстрируют данный принцип.

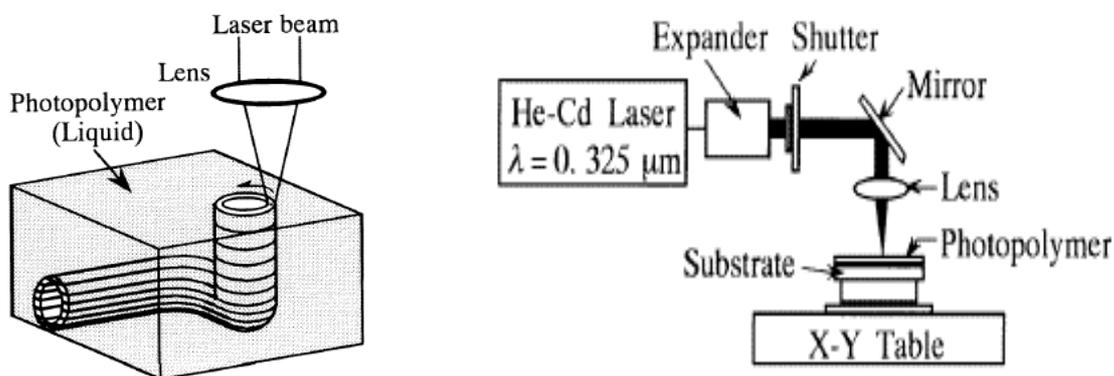


Рис. 37. Принцип записи и схема установки для изготовления изделий сфокусированным лазерным пучком

Характеристики элементов определяются размерами и формой затвердевшего участка фотополимера (области полимеризации). Размеры и форма области полимеризации связаны с распределением интенсивности освещающего пучка, дифракцией и поглощением света в объеме полимера. Рассмотрение влияния этих факторов на размер области полимеризации приведено в работе [56] и изложено также в [1].

Модель, используемая для проведения теоретических расчетов, показана на рисунке 38.

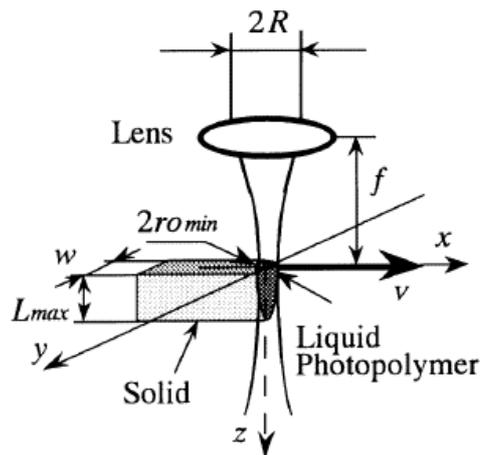


Рис. 38. Теоретическая модель

Фокус находится на поверхности полимера. Гауссовский пучок с мощностью P , длиной волны λ и радиусом r_0 проходит через линзу с фокусным расстоянием f . Интенсивность $I_g(x, y, z)$ описывается выражением:

$$I_g(x, y, z) = \frac{2P}{\pi r_{0\min}^2} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{r_0^2}\right]. \quad (41)$$

Радиус пучка (по полуширине) определяется как

$$r_0(z) = r_{0\min} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi r_{0\min}^2}\right)^2} \quad (42)$$

$$r_{0\min} = \frac{f\lambda}{\pi R}. \quad (43)$$

Интенсивность излучения уменьшается экспоненциально при его поглощении в слое полимера. Распределение интенсивности излучения по глубине выражается как

$$I(x, y, z) = I_g(x, y, z) \exp(-\alpha z), \quad (44)$$

где α - коэффициент поглощения.

Полная энергия излучения в отверждаемой области может быть выражена следующим образом:

$$E(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x - vt, y, z) dt, \quad (45)$$

где t – длительность записи.

Когда энергия $E(x, y, z)$ достигает порогового значения E_0 , полимер затвердевает. Полагая $E(x, y, z) = E_0$, из уравнения (46) определим значение Y :

$$y = \frac{r_0}{\sqrt{2}} \sqrt{\log_e \sqrt{\frac{2P}{\pi E_0 r_0 v}} - \alpha z}. \quad (46)$$

Далее необходимо рассмотреть различные частные случаи, позволяющие провести оптимизацию по следующим параметрам:

- длина волны - λ ,
- апертура пучка - f / R ,
- коэффициент поглощения - α ,
- скорость перемещения - V .

Подробное рассмотрение приведено в работе [56]. Для примера приведем зависимости размеров области полимеризации от длины волны и апертуры фокусирующей системы (рис. 40, 41).

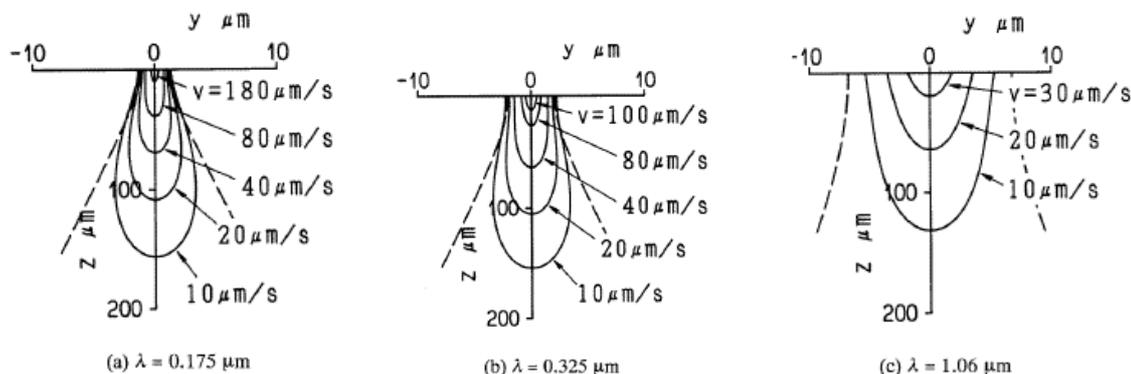


Рис . 35. Зависимость размеров отвержденной области от длины волны. $\lambda = 0.175$ мкм (а), 0.325 мкм (б), 1.06 мкм (с).

($P=0.1$ мкВт, $f / R = 20$, $\alpha = 6.94 \times 10^{-3}$ мк/м, $E_0 = 0.34$ мДж/мм²)

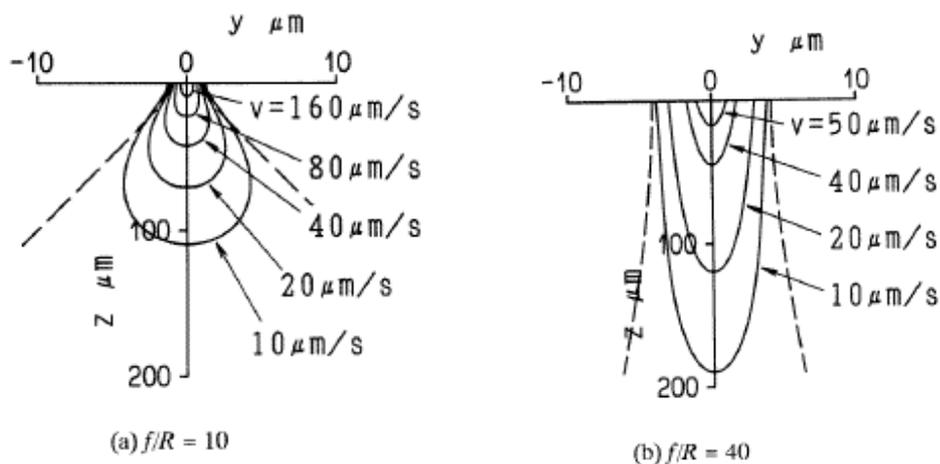


Рис. 36. Размеры отвержденной области полимера для различных отношений f/R

$f/R = 10$ (a), $f/R = 40$ (b).

($P = 0.1$ мкВт, $\lambda = 0.325$ мкм, $\alpha = 6.94 \times 10^{-3}$ мкм $^{-1}$, $E_0 = 0.34$ мДж/мм 2 , $v = 10$ мкм/с).

В результате оптимизации по всем параметрам получены оптимальные условия ($P = 0.17$ мкВт, $\lambda = 0.325$ мкм, $\alpha = 6.94 \times 10^{-3}$ мкм $^{-1}$, $E_0 = 0.34$ мДж/мм 2 , $R = 3.62$ мм, $f = 120$ мм, $v = 10$ мкм/с), которые были реализованы при получении микроэлементов, приведенных на рисунке. 37 [1,56].

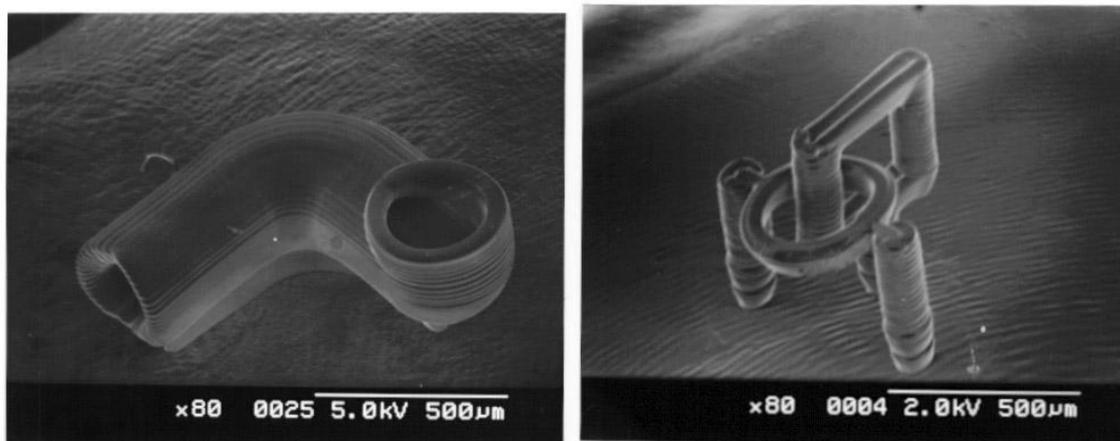


Рис. 37. Примеры полимерных элементов, полученных методом стереолитографии

Метод стереолитографии широко используется благодаря возможности получения различной формы и структуры элементов и изделий, а также их высокому качеству [59-60].

3.4.2 Двухфотонная литография

Двухфотонная литография (two-photon lithography –TPL) является разновидностью и развитием технологий стереолитографии. В последние годы наблюдается большой интерес к использованию двух- или многофотонных процессов [61-67].

При двухфотонных процессах материал, чувствительный в УФ-диапазоне, может полимеризоваться при облучении инфракрасным излучением при условии, что интенсивность излучения достаточно высока. Вероятность двухфотонных процессов пропорциональна квадрату интенсивности излучения. Требование к интенсивности излучения связано с малым временем жизни в промежуточном возбужденном состоянии (единицы фемтосекунд).

В отличие от однофотонных процессов при двухфотонной полимеризации исключается необходимость ограничения толщины полимеризуемого слоя (последовательного формирования) и возможна прямая лазерная запись (direct laser writing) в объеме материала (рис. 38).

Важным преимуществом двухфотонной полимеризации является увеличение разрешающей способности в результате локализации полимеризации в фокальной области. Уменьшение размера области полимеризации достигается за счет более существенной зависимости ее размеров от плотности энергии по сравнению с однофотонными процессами.

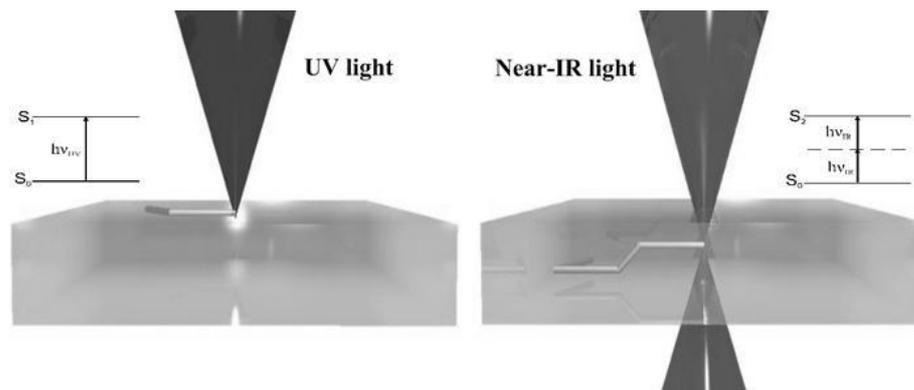


Рис. 38. К понятиям однофотонной и двухфотонной полимеризации

Метод применяется для получения периодически структурированных элементов, в том числе фотонных кристаллов. Пример структуры фотонного кристалла приведен на рисунке 39 [1, 61]. Элемент получен с использованием фемтосекундного лазера с длиной волны 800 нм, частотой следования импульсов 1 кГц и энергией в импульсе несколько десятков наноджоулей. Для фокусировки излучения использовался масляно-иммерсионный 100^x объектив с числовой апертурой 1.4. В качестве регистрирующей среды применялся негативный

фоторезист SU – 8 с толщиной слоя 20 мкм. Структура фотонного кристалла состоит из наклонных стержней с диаметром 360 нм.

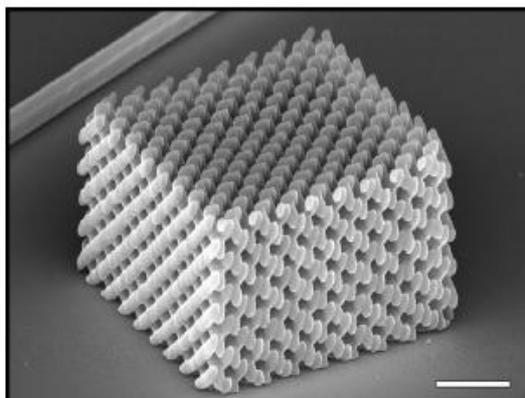


Рис. 39. Пример структуры фотонного кристалла, полученного методом двухфотонной полимеризации

Процесс поточечного формирования является наиболее точным, однако, требует большого времени (до нескольких часов) для получения сложной периодической структуры или элементов произвольной трехмерной формы при высоком качестве. Для увеличения скорости применяются различные методы распараллеливания, или геометрического дизайна пространства, в частности, многофокусная полимеризация [62]. В работе [63] существенное увеличение скорости процесса достигается за счет послойного формирования при проекции цифровых сетчатых масок. Получены элементы трехмерной конфигурации с сетчатой структурой (рис.38) и размером элемента до 170 нм.

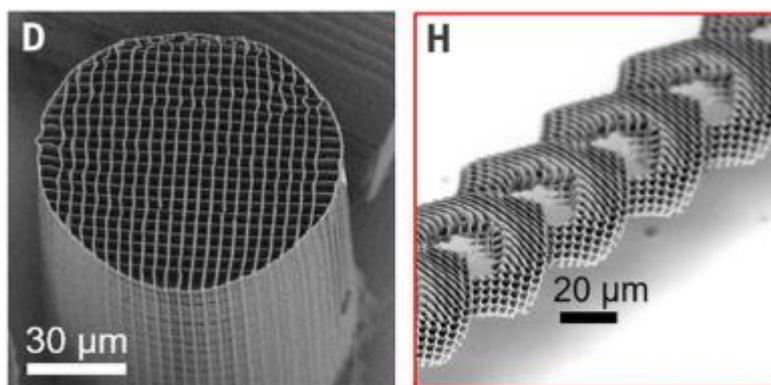


Рис. 38. Примеры элементов с сетчатой структурой

Метод двухфотонной литографии используется для получения периодических структур фотонных кристаллов [61, 65,66]. Применительно к таким структурам важной практической задачей является возможность управления периодом структур, определяющим спектры пропускания или

отражения. В связи с этим привлекательным представляется способ изменения периода, рассмотренный в работе [66]. В данной работе управление периодом структур достигается за счет объемной усадки полимера после термической обработки. Структуры с периодом 1.57 мкм были получены методом двухфотонной литографии в промышленном акрилатном фоторезисте IP-Dip. Полученные структуры нагревались до температуры 450⁰ С в атмосфере аргона с изменением длительности нагрева от 12 до 21 мин. Вследствие последующей объемной усадки период был уменьшен до 280 нм, что меньше предела разрешения используемого метода. Термическая усадка позволила плавно изменять период, а также спектры отражения фотонных кристаллов в широкой видимой области спектра (400 -750 нм). Кроме того, были получены малоразмерные (с общим размером 35 мкм) структурированные в объеме (с периодом 1.5 мкм) и окрашенные в различные цвета трехмерные объекты.

3.4.3 Цифровая световая проекция

Метод цифровой световой проекции (Digital Light Processing- DLP) является относительно новым, но быстро развивающимся методом и рассматривается одновременно как аналог и альтернатива метода стереолитографии.

Метод базируется на аналогичных материалах и принципах, но в отличие от стереолитографии, основанной на полимеризации лазерным излучением при сканировании поверхности материала одним или несколькими лазерными пучками, в технологиях DLP трехмерное изделие формируется послойно при проекции изображения сечения формируемого объекта в слой полимера. После полимеризации слоя наносится новый слой жидкого полимера, в который проектируется другое сечение создаваемого объекта. Процесс повторяется до получения изделия требуемой конфигурации. Для проекции используются цифровые светодиодные проекторы.

Преимуществами метода относительно метода стереолитографии являются увеличение скорости процесса, а также снижение стоимости установок. Технологии используются для получения малоразмерных и структурированных элементов для применений в технике, медицине [60,63,68] и по точности приближаются к технологиям стереолитографии.

3.5 Голографическая 3D печать

Рассмотренные выше аддитивные технологии 3D печати, несмотря на постоянное совершенствование, направленное на увеличение скорости процесса, остаются методами последовательного (поточечного или послойного) синтеза трехмерного объекта. Принципиально новым подходом является подход, основанный на исключении последовательного синтеза. В работах [69,70]

предложен и реализован метод, в котором весь трехмерный объект формируется в результате однократного светового воздействия на материал.

Сущность метода заключается в проекции голографического изображения формируемого трехмерного объекта в объем полимеризующегося материала (рис. 39) и его отображении в результате полимеризации в области наибольшей резкости при ограничении полимеризации вне данной области. Предлагаются принципы ограничения полимеризации, уменьшения размеров формируемых объектов, а также приводятся результаты реализации метода для получения малоразмерных элементов с произвольной трехмерной формой поверхности (рис.40).

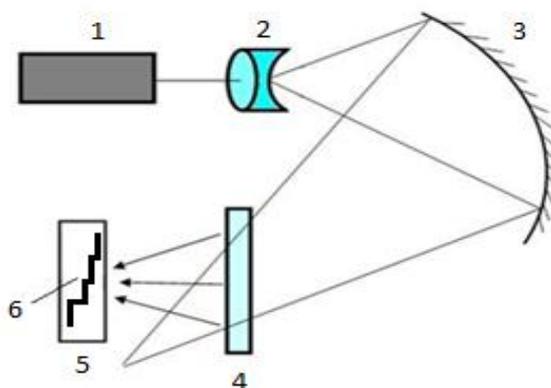


Рис. 39. Принцип голографического формирования трехмерного объекта (голографической 3D печати)

1 – лазер, 2 – микрообъектив, 3 – сферическое зеркало, 4 – проектирующая голограмма, 5 – фотополимеризующийся материал, 6 – восстановленное действительное изображение объекта

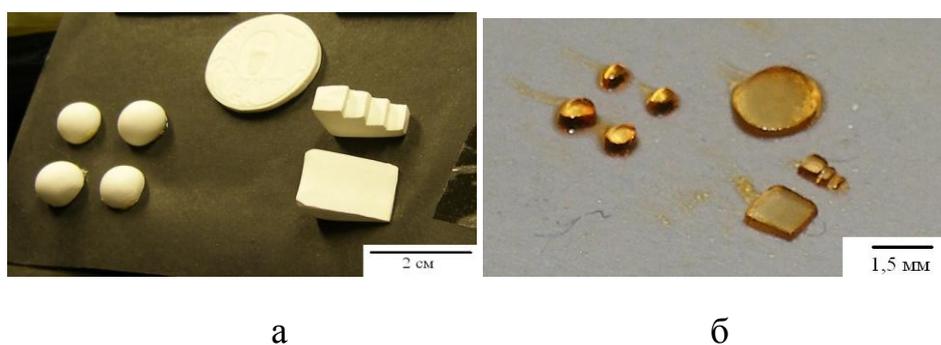


Рис. 40. а - поле модельных объектов с плоской, сферической, наклонной и ступенчатой поверхностями, б – поле полимерных элементов с конфигурациями, соответствующими модельным поверхностям

Метод является новым и в настоящее время исследуется. Метод голографической 3D печати по ряду параметров может являться альтернативой

аддитивным технологиям с преимуществом исключения последовательного синтеза трехмерного объекта – весь объект формируется в результате однократного экспонирования материала.

Контрольные вопросы

1. Какие конфигурации и размеры элементов обеспечивают методы глубокой и тоновой литографии?
2. Что является основой аддитивных технологий 3D печати? Какие технологии можно отнести к оптическим?
3. Принцип получения элементов трехмерной конфигурации методом стереолитографии.
4. Какие факторы определяют размеры области полимеризации в стереолитографии?
5. Сходство и отличие двухфотонной литографии и стереолитографии.
6. Основное преимущество двухфотонной литографии.
7. Какие факторы определяют возможность прямой лазерной записи?
8. Основное отличие метода цифровой световой проекции от методов стереолитографии и прямой лазерной записи?

4 МЕТАМАТЕРИАЛЫ

4.1 Основные понятия, свойства и направления применений

Метаматериал — искусственный композитный структурированный материал, электромагнитные свойства которого существенно отличаются от свойств компонент, входящих в его состав, и определяются особым упорядочением и структурой компонент. Метаматериалы синтезируются внедрением в исходный природный материал различных периодических структур с различными геометрическими формами (кольцеобразной, рулонной, проводной и др.), которые модифицируют диэлектрическую проницаемость ϵ и магнитную восприимчивость μ исходного материала.

Один из наиболее известных классов метаматериалов — метаматериалы с отрицательным индексом, у которых одновременно отрицательны диэлектрическая и магнитная проницаемость. Существование веществ с одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями было теоретически обосновано в работе В. Г. Веселаго в 1967 г. [71]. Такие материалы называют дважды отрицательными средами, средами Веселаго, средами с отрицательным коэффициентом преломления, средами с отрицательными индексами, левосторонними или средами обратной волны. Все эти названия отражают одни и те же физические свойства метаматериалов.

На происхождении двух последних определений остановимся подробнее. Наименование «левосторонние» среды обусловлено следующим: если в обычном материале вектора E , H и k образуют правую тройку, то в метаматериале векторы E , H и k образуют левую тройку векторов. Это объясняет и другое название метаматериалов – среды с обратной волной. В случае прямой волны вектор Умова-Пойнтинга (вектор плотности потока энергии электромагнитной волны) $S=[E \times H]$ и волновой вектор k сонаправлены, а значит сонаправлены фазовая ($v\phi=w/k$) и групповая скорости ($v_{gp}=dw/dk$). В метаматериале с отрицательными ϵ и μ вектор Умова-Пойнтинга S антипараллелен волновому вектору k , а значит, фазовая и групповая скорости направлены противоположно.

Материалы с отрицательным показателем преломления должны демонстрировать необычные свойства, такие как изгиб или преломление света, отрицательное давление. Рассматривается возможность создания линз с превышением дифракционного предела. Возможными приложениями являются усовершенствованные оптические микроскопы со сверхразрешением, устройства маскировки, биологические и химические сенсоры, компьютеры, которые будут использовать свет вместо электронных сигналов.

Большой интерес наблюдается к плазмонным метаматериалам. Плазмонные метаматериалы - это метаматериалы, которые используют поверхностные плазмоны, образующиеся в результате взаимодействия света с металлодиэлектрическими материалами. При определенных условиях падающий свет взаимодействует с поверхностными плазмонами, создавая электромагнитные волны, известные как поверхностные плазмонные поляритоны, которые распространяются вдоль поверхности раздела металл-диэлектрик. По сравнению с падающим светом, который инициировал преобразование, поляритоны могут иметь меньшую длину волны [72,73]

Большинство оптических метаматериалов, исследуемых и изготавливаемых в настоящее время, используют металлические компоненты. Наиболее распространенными являются золото и серебро. Тем не менее, существует множество других материалов, которые проявляют металлоподобные оптические свойства в определенных диапазонах длин волн.

Идея использования металлических компонент основывается на локализации электромагнитных волн в металлическом интерфейсе в виде поверхностных плазмонных поляритонов. Однако такой подход приводит к значительным потерям в металле и общей низкой эффективности устройств.

Принципиально отличным является подход, основанный на полностью диэлектрических метаматериалах с механизмом локализации света в субволновых оптических структурах через дипольные резонансы Ми на наноразмерных частицах с большим показателем преломления.

В видимой и ближней ИК областях спектра большая диэлектрическая проницаемость, как известно, достигается для полупроводников, таких как Si, Ge

и AlGaAs. В литературе последних лет рассматриваются данные материалы, а также новые разрабатываемые материалы для создания фотонных устройств с перестраиваемыми электрическими и магнитными резонансами Ми.

Подробно материалы и устройства на их основе для нелинейной оптики, применений в системах быстрой пространственной модуляции в системах телекоммуникаций, цветоизменяющих устройств и других применений рассмотрены в обзорной статье [74].

В обзорной статье [75] рассматривается применение метаматериалов в сочетании с МЭМС (микроэлектромеханическими системами) для различных применений, в том числе устройств изменения интенсивности и поляризации излучения, вычислительных систем, выполняющих логические операции, химических сенсоров, детекторов фотонов, термодетекторов, устройств распознавания для криминалистики. Рассматриваются устройства на метаматериалах работающих преимущественно в ИК и терагерцовом диапазонах. Ведутся поиски решений по созданию метаматериалов для видимой области спектра. В основном, разрабатываются устройства на основе двумерных метаматериалов.

4.2 Трехмерные метаматериалы

Наибольший научный и практический интерес представляют трехмерные метаматериалы. Прежде чем перейти к основам технологий, остановимся на терминологии. Понятие 3D включает понятия трехмерной формы и трехмерной функциональности. Трехмерная форма не всегда означает трехмерную функциональность (рис.41).

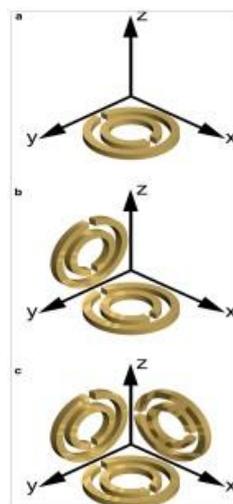


Рис. 41. Элемент с трехмерной формой, но с функциональностью метаматериала 1D (a), 2D (b) и 3D (c)

Рассмотрим теперь несколько примеров технологий получения трехмерных метаматериалов. В работе [76] рассмотрена технология получения элементов на основе метаматериалов с различной трехмерной геометрической формой. Структуры трехмерной конфигурации получают методом стериолитографии. На выступающие элементы наносят слой металла - серебра или золота. Металлический слой наносится двумя способами - методом тиснения с использованием серебряной пасты или методом напыления (возможно использование метода химического осаждения из паровой фазы).

Использование такой технологии позволяет получать различные трехмерные конфигурации металл – диэлектрических конструкций (в микронном диапазоне размеров), в частности, сферической формы, (рис.42), демонстрирующих специфические, в том числе, фокусирующие свойства, подтвержденные в терагерцовом диапазоне частот. Авторы предполагают возможность получения по разработанной технологии метаматериалов для видимого диапазона.

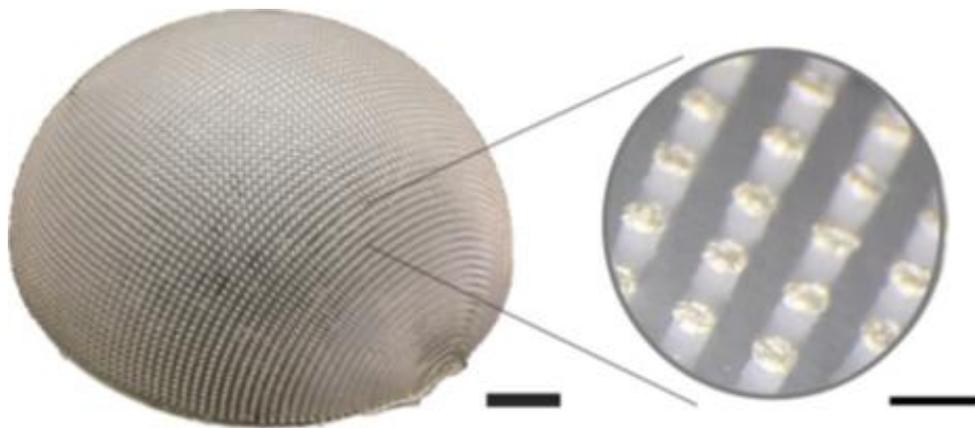


Рис. 42. Пример сферического метаматериала

Ниже приведен ряд технологий получения трехмерных материалов, рассмотренных в обзорной статье [77].

1. Укладка планарных структур в трехмерные

Металл-диэлектрические структуры из слоев металла и диэлектрика формируются послойно. Используются технологии фотолитографии, гальванические методы и методы электронно - лучевой литографии.

Получают многослойные конструкции с чередованием слоев металла (золото, серебро) и фоторезиста (SU-8) с размерами элементов десятки-сотни нанометров.

На рисунке 43 [77] показаны примеры структур, полученных методом послойной укладки.

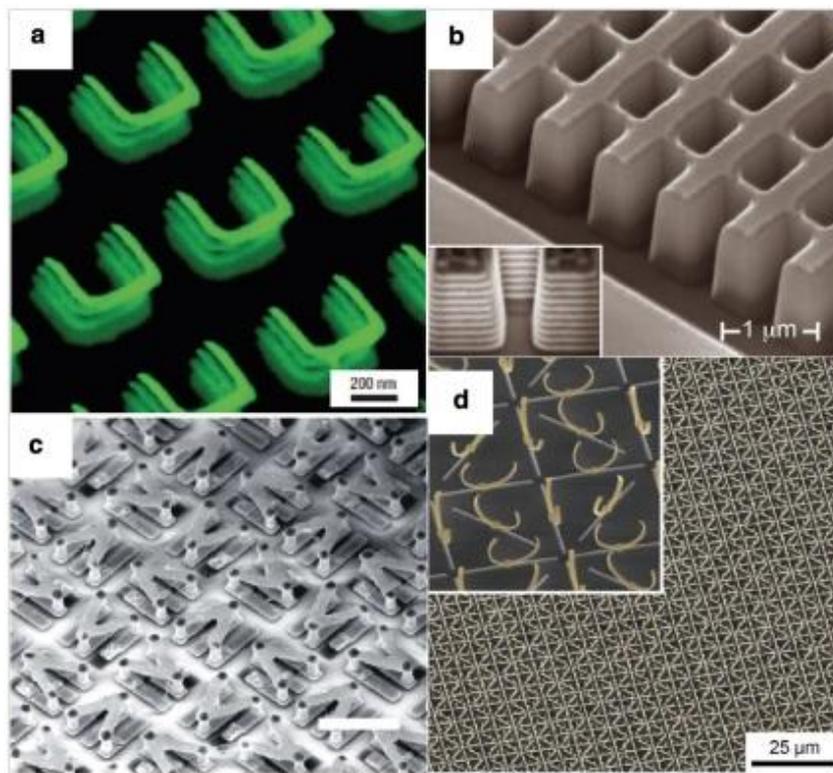


Рис. 43. Примеры трехмерных структур

a - магнитный метаматериал из четырехслойной структуры. b - метаматериал с отрицательным показателем преломления на основе ажурной конструкции из 21-слоя, c - хиральный метаматериал, на основе трехмерной металлической структуры, d - изотропный метаматериал, на основе 3D структуры разорванных колец

2. Технологии, основанные на двухфотонной полимеризации полимеров

Как было показано в разделе (3.4.2), вероятность двухфотонной полимеризации пропорциональна квадрату интенсивности света, и при использовании объективов с большой числовой апертурой возможна полимеризация в ограниченной фокальной области, что определяет возможность прямой лазерной записи.

Данная технология применяется для получения диэлектрических структур и позволяет получать размеры элементов до 65 нм. Примеры структур приведены на рисунке 44.

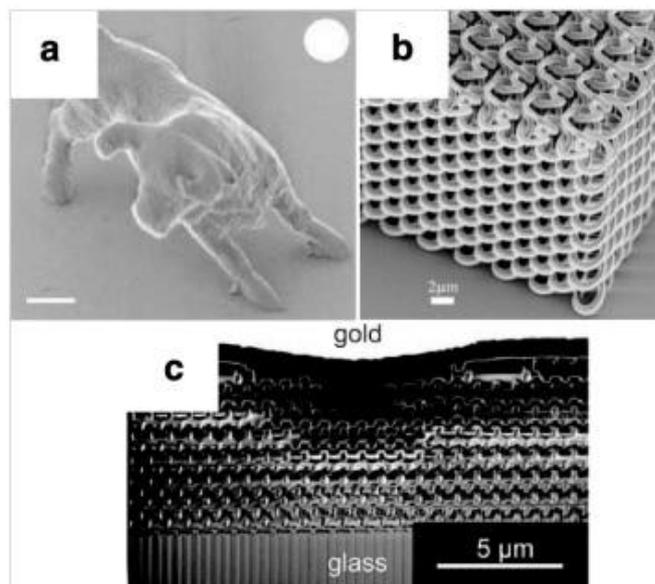


Рис. 44. Примеры трехмерных структур

а- трехмерная фигура, б – структура фотонного кристалла, с- структура маскировочного покрытия

Структуры, получаемые методом двухфотонной полимеризации, используют для последующего нанесения металла. Используются методы электроосаждения на полимерный шаблон, химического осаждения и фотовосстановления ионов металла в полимерной матрице (рис.45). Имеющиеся разработки используют золото, серебро, медь, хлорид олова, осаждаемые на структуры, полученные в фоторезисте.

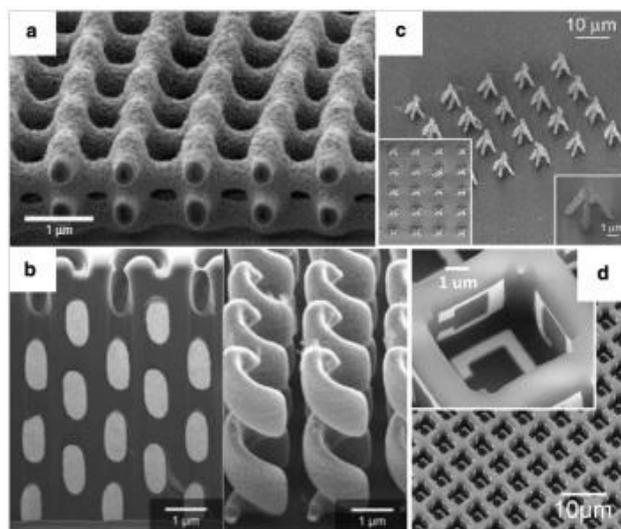


Рис. 45. Техника изготовления металлизированных конструкций. а -химическое осаждение паров серебра на полимерную матрицу, б - электроосаждение в 3D шаблоне SU -8, с - двухфотонно-индуцированное фотовосстановление ионов металлов д- метод проекционной литографии

3. Другие методы

Для получения трехмерной формы используют также методы тоновой литографии и цифровой светодиодной проекции. Структурирование осуществляется методом электроннолучевой литографии. Рассматриваются также возможности использования процессов самоорганизации (самосборки) для получения металл-диэлектрических структур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены материалы, отражающие базовые принципы, лежащие в основе оптических 3D технологий получения микро- и наноразмерных элементов – голографических технологий, технологий литографии и 3D печати.

Рассмотрены основы технологий, а также примеры их использования для получения малоразмерных структурированных элементов на основе диэлектрических и металл-диэлектрических структур и элементов трехмерной конфигурации.

Рассмотрены технологии, используемые в производстве, перспективные разработки последних лет, достигаемые характеристики элементов, используемые материалы, области применений.

Систематизированный материал пособия может способствовать

- ориентации в многообразии современных технологий,
- оценке современного уровня и тенденций их развития,
- оценке возможностей использования технологий для достижения требуемых характеристик проектируемых элементов, приборов и систем,
- оценке возможностей практической реализации результатов математического моделирования материалов и процессов,
- совершенствованию существующих и разработке новых технологий.

Более углубленное понимание рассмотренных вопросов возможно с использованием источников, приведенных в списке литературы.

Контрольные вопросы

1. Понятие метаматериал. Прогнозируемые и реализованные свойства метаматериалов.
2. Отличие понятий трехмерная форма и трехмерная функциональность.
3. На каких принципах и технологиях основано получение трехмерных метематериалов?

Список литературы

1. Н.Д.Ворзобова, И.Ю.Денисюк. // Оптические методы формирования микроэлементов информационных систем. 2008. <http://window.edu.ru/resource/730/58730/files/itmo268.pdf>.
2. Н. Kogelnik. Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings. // Bell Syst. Tech. J.- 1969.-Vol. 48.- P. 2909–2945.
3. Р. Кольер, К. Бернхард, Л. Лин. // Оптическая голография. М.: Мир, 1973.
4. Барачевский В.А. Современное состояние разработки светочувствительных сред для голографии. // Оптика и спектроскопия.- 2018.- Т. 24, № 3, С. 371-399.
5. Fernández, R., Gallego, S., Márquez, A., Francés, J., Martínez, F.J., Beléndez, A. Influence of index matching on AA/PVA photopolymers for low spatial frequency recording. // Appl. Opt.- 2015.- Vol. 54.- P. 3132–3140.
6. Fernández, R., Bleda, S., Gallego, S., Neipp, C., Márquez, A., Tomita, Y., Pascual, I., Beléndez, A. Holographic waveguides in photopolymers. // Opt. Express.- 2019.- Vol. 27.- P. 827–840.
7. Fernández, R., Gallego, S., Márquez, A., Francés, J., Martínez, F.J., Pascual, I., Beléndez, A. Analysis of holographic polymer-dispersed liquid crystals (HPDLCs) for tunable low frequency diffractive optical elements recording. // Opt. Mater.- 2018.- Vol. 76.- P. 295–301.
8. Semkin, A., Sharangovich, S. Holographic formation of non-uniform diffraction structures by arbitrary polarized recording beams in liquid crystal-photopolymer compositions. // Polymers.- 2019.- Vol. 11.- P. 861.
9. Smirnova, T.N., Kokhtich, L.M., Sakhno, O.V., Stumpe, J. Holographic nanocomposites for recording polymer–nanoparticle periodic structures: I. General approach to choice of components of nanocomposites and their holographic properties. // Opt. Spectrosc.- 2011.- Vol. 110.- P. 129–136.
10. Smirnova, T.N., Kokhtich, L.M., Sakhno, O.V., Stumpe, J. Holographic nanocomposites for recording polymer–nanoparticle periodic structures: II. Mechanism of formation of polymer–nanoparticle bulk periodic structure and effect of parameters of forming field on structure efficiency. // Opt. Spectrosc.- 2011.- Vol. 110.- P. 137–144.
11. Tomita, Y., Hata, E., Momose, K., Takayama, S., Liu, X., Chikama, K., Klepp, J., Pruner, C., Fally, M. Photopolymerizable nanocomposite photonic materials and their holographic applications in light and neutron optics. // J. Mod. Opt.- 2016.- Vol. 63.- P. S1–S31.
12. Vorzobova, N.D., Bulgakova, V.G., Moskalenko, A.I., Pavlovets, I.M., Denisyuk, I., Burunkova, Y.E. Development of periodic and three-dimensional structures in acrylic-monomer photopolymer materials by holographic methods. // Radiophys. Quantum Electron.- 2015.- Vol. 57.- P. 8–9.

13. Liu, P., Chang, F., Zhao, Y., Li, Z., Sun, X. Ultrafast volume holographic storage on PQ/PMMA photopolymers with nanosecond pulsed exposures. // *Opt. Express.*- 2018.- Vol. 26.- P. 1072–1082.
14. Borisov, V.N., Angervaks, A.E., Ryskin, A.I., Veniaminov, A.V. Two-model spectral study of volume holograms in materials with diffusion-based mechanisms. // *Opt. Eng.*- 2019.- Vol. 58.- P. 024102.
15. Sheridan, J.T., Lawrence, J.R. Nonlocal-response diffusion model of holographic recording in photopolymer. // *J. Opt. Soc. Am. A.*- 2000.- Vol.- 17.- P. 1108–1114.
16. Bruder, F.-K., Fäcke, T., Rölle, T. The chemistry and physics of Bayfol HX film holographic polymers. // *Polymers.*- 2017.- Vol. 9.- P. 472.
17. Cody, D., Gul, S., Mikulchyk, T., Irfan, M., Kharchenko, A., Goldyn, K., Martin, S., Mintova, S., Cassidy, J., Naydenova, I. Self-processing photopolymer materials for versatile design and fabrication of holographic sensors and interactive holograms. // *Appl. Opt.*- 2018.- Vol. 57.- P. 173–183.
18. Liu, H., Yu, D., Zhou, K., Wang, S., Luo, S., Li, L., Wang, W., Song, Q. Novel pH-sensitive photopolymer hydrogel and its holographic sensing response for solution characterization. // *Opt. Laser Technol.*- 2018.- Vol. 101.- P. 257–267.
19. Mikulchyk, T., Martin, S., Naydenova, I. N-isopropylacrylamide-based photopolymer for holographic recording of thermosensitive transmission and reflection gratings. // *Appl. Opt.*- 2017.- Vol. 56.- P. 6348–6356.
20. Akbari, H., Naydenova, I., Martin, S. Using acrylamide-based photopolymers for fabrication of holographic optical elements in solar energy applications. // *Appl. Opt.*- 2014.- Vol. 53.- P. 1343–1363.
21. Marín-Sáez, J., Atencia, J., Chemisana, D., Collados, M.-V. Characterization of volume holographic optical elements recorded in Bayfol HX photopolymer for solar photovoltaic applications. // *Opt. Express.*- 2016.- Vol. 24.- P. 720–730.
22. De Jong, T.M., de Boer, D.K.G., Bastiaansen, C.W.M. Surface-relief and polarization gratings for solar concentrators. // *Opt. Express.*- 2011.- Vol. 19.- P. 15127–15143.
23. Vorzobova, N.D., Sokolov, P.P., Veselov, V.O., Schelkanova, I.J. Holographic formation and diffractive properties of hybrid periodic structures. // *Appl. Opt.*- 2018. - Vol. 57.- P- 3323–3328.
24. Pen E. F. Energy efficiency of photovoltaic panels when using holographic gratings as passive solar trackers. // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.* – 2019. – Vol. 55, № 3. – P. 271-279.
25. R. Fernández, S. Fenoll, S. Gallego, A. Márquez, J. Francés, V. Navarro Fuster, A. Beléndez, I. Pascual. Influence of the spatial frequency on the diffractive optical elements fabrication in PDLCs. // *Proceedings SPIE.*- 2016.- Vol. 9979.- P. 997019.

26. Guo, J., Gleeson, M.R., Sheridan, J.T. A review of the optimisation of photopolymer materials for holographic data storage. // *Phys. Res. Int.*- 2012.- Vol. 2012.- P. 1–16.
27. Malallah, R., Li, H., Kelly, D., Healy, J., Sheridan, J. A review of hologram storage and self-written waveguides formation in photopolymer media. // *Polymers.*- 2017.- Vol. 9.- P. 337.
28. Fernández, R., Bleda, S., Gallego, S., Neipp, C., Márquez, A., Tomita, Y., Pascual, I., Beléndez, A. Holographic waveguides in photopolymers. // *Opt. Express.*- 2019.- Vol. 27.- P. 827–840.
29. Naydenova, I., Cody, D., Zawadzka, M., Martin, S., Mihaylova, E., Curran, S., Duffy, P., Portillo, J., Connell, D., McDonnell, S. Serialized holography for brand protection and authentication. // *Appl. Opt.*- 2018.- Vol. 57.- P. 131–137.
30. X.X. Shen, X.Q. Yu, X.L. Yang, L.Z. Cai, Y.R. Wang, G.Y. Dong, X.F. Meng, X.F. Xu. Fabrication of periodic microstructures by holographic photopolimerization with a low-power continuous-wave laser of 532 nm. // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*- 2006.- Vol. 8.- P. 672-676.
31. T. Kondo, S. Juodkazis, V. Mizeikis, S. Matsuo, H. Mizawa. Fabrication of three-dimensional periodic microstructures in photoresist SU-8 by phase-controlled holographic lithography. // *New Journal of Physics.*- 2006.- Vol. 8.- P. 250.
32. Y.K. Pang, J.C.W. Lee, H.F. Lee, W.Y. Tam, C.T. Chan, P. Sheng. Chiral microstructures (spirals) fabrication by holographic lithography. // *Optics express.*- 2005.- Vol. 13, № 19.- P. 7615-7620.
33. S. Bagheri, N. Strohfeldt, F. Sterl, A. Berrier, A. Tittl, H. Giessen. Large-area low-cost plasmonic perfect absorber chemical sensor fabricated by laser interference lithography. // *ACS Sensors.*- 2016. Vol. 1(9).- P. 1148-1154.
34. P. N. Dyachenkoa, S. V. Karpeeva, E. V. Fesikb, Yu. V. Miklyaevc, V. S. Pavelyeva, G. D. Malchikov. Fabrication of three-dimensional metallodielectric photonic crystals by interference lithography. // *Proc. of SPIE.*- 2010.- Vol. 7713.- P. 77131J.
35. Saekow B. Laser Interference Lithography for Photonic Crystals Template. // *Journal of the Microscopy Society of Thailand.*- 2010.- Vol. 24, №. 2.- P. 108-111.
36. J. de Boor, N. Geyer, J. V. Wittemann, U. Gosele, V. Schmidt. Sub-100 nm silicon nanowires by laser interference lithography and metal-assisted etching. // *Nanotechnology.*- 2010.- Vol. 21.- P. 095302-7.
37. R. Seisyan. Nanolithography in the extreme vacuum ultraviolet. // *J. Techn. Phys.*- 2005.- Vol. 75, № 5.- P. 1-13.
38. Seisyan R. P. Nanolithography in Microelectronics. // *J. Tech. Phys.*- 2011.- Vol. 81, №. 8.- P. 1-14.
39. R. P. Seisyan, V. G. Bepalov, A. P. Zhevlakov, E. A. Makarov, A. YU. Rodionov. Dual-pulse bispectral laser excitation and plasma initiation in an extreme-

- UV radiation source for nanolithography. // *Journal of Optical Technology*.- 2017.- Vol. 84, No. 11.- P. 753-760.
40. B.J. Lin. Optical lithography - present and future challenges. // *C.R. Physique*.- 2006.- Vol. 7.- P. 858-874.
41. М. Макушин. Компетентное мнение. // *Зарубежная электронная техника*.- 2017.- Т. 7 (6630).- С. 2.
42. Р.П. Сейсян. Нанолитография в микроэлектронике. // *Журнал технической физики*.- 2011.- Т. 81, № 8.- С. 1-14.
43. Киреев В. Ю. Нанотехнологии в микроэлектронике. // *Нанолитография – процессы и оборудование. Долгопрудный: Издательский дом “Интеллект*. – 2016.
44. R. M. M. Hasan, X. Luo. Promising Lithography Techniques for Next-Generation Logic Devices. // *Nanomanufacturing and Metrology*.- 2018. Vol. 1.- P. 67–81.
45. R. Chimchang, R. Tongta, R. Phatthanakun. Vertical Micromirror Fabrication by X-ray Lithography for Single Mode Optical Fiber Switching Applications. // *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2012. V.65.
46. Mancini D. C. X-ray lenses fabricated by deep x-ray lithography. // *Design and Microfabrication of Novel X-Ray Optics*.//*Proceeding of SPIE*- 2002.- Vol. 4783.- P. 28-36.
47. J.–M. A. T. Cannistra, T. J. Suleski. Characterization of hybrid molding and lithography for SU-8 micro-optical components. // *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*.- 2010.- Vol. 9, No.1.- P. 013025.
48. B.K. Goldenberg, E.F. Reznikova, A.G. Lemzyakov, V.F. Pindyurin. Microbeams X-ray lithographer for the direct formation of deep LIGA structures. // *Avtometriya*.- 2013.- Vol. 49, No 1.- P. 96-102.
49. Han M. 3D microfabrication with inclined/rotated UV lithography. // *Sensors and Actuators A: Physical*.- 2004.- Vol. 111, №. 1.- P. 14-20.
50. J. H. Lake, K. M. Walsh, S. M. Namara. Low-cost maskless grayscale lithography using a new photodefinable polyimide for polymer MEMS application. // *IEEE*.- 2009.- P.1889-1891.
51. H. Wu, T. W. Odom, G. M. Whitesides. Reduction Photolithography Using Microlens. // *Anal. Chem*.- 2002.- Vol.74.- P. 3267-3273.
52. D. Dyer, S. Shreim, S. Jayadev, V. Lew, E. Botvinick, M. Khinea. Sequential shrink photolithography for plastic microlens arrays. // *Applied physics letters*.- 2011.- Vol.99.- P. 99-102.
53. L. Mosher, C. M. Waits. Double-Exposure Grayscale Photolithography. // *Journal of Microelectromechanical systems*.- 2009.- Vol. 18, No. 2.- P. 308-315.
- 54 A.A. Evstrapov, T.A. Lukashenko, S.G. Gornyi, K.V. Yudin. PMMA microfluidic CHIPS: Laser ablation and thermal bonding. // *Scientific instrumentation*.- 2005.- Vol. 15, № 2.- P. 72–81.

55. P.N. Grakovich, L.F. Ivanov, L.A. Kalinin, I.L. Riabchenko, E.M. Tolstopyatov, A.M. Krasovskiy. Laser ablation of polytetrafluoroethylene. // *Russian Chemical Journal*.- 2008.- Vol. LII, № 3.- P. 97-105.
56. T. Nakamoto, K. Yamaguchi, P.A. Abraha, K. Mishima. Manufacturing of three-dimensional micro-parts by UV laser induced polymerization. // *J. Micromech. Microeng.*- 1996.- Vol. 6.- P. 240–253.
57. S. Maruo, K. Jkuta. Submicron stereo-lithography for the production of freely movable mechanisms by using single-photon polymerization. // *Sensors and Actuators*.- 2002.- Vol. 100.- P. 70-76.
58. Bártolo P. J. Stereolithography: materials, processes and applications. // *Springer Science and Business Media*.- 2011.
59. Фрицлер К.Б., Принц В.Я. Методы трехмерной печати микро- и наноструктур. // *Успехи физических наук*.- 2019.- Т. 189, № 1 - С. 55-71.
60. G. Taormina, C. Sciancalepore, M. Messori, F. Bondioli. 3D printing processes for photocurable polymeric materials: technologies, materials, and future trends. // *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*.- 2019.- Vol. 16(3).- P. 151-160.
61. M. Deubel, M. Vegener, A. Kaso, S. John. Direct laser writing and characterization of “Slanted Pore” Photonic Crystals. // *Applied Physics Letters*.- 2004.- V. 85, №11.- P. 1895-1897.
62. Q. Geng, D. Wang, P. Chen. S.-C. Chen. Ultrafast multi-focus 3-D nano-fabrication based on two-photon polymerization. // *Nat. Commun.*- 2019.- Vol. 10.- P. 2179.
63. C. Schmidleithner, S. Malferrari, R. Palgrave, D. Bomze, M. Schwentenwein, D. M. Kalaskar. Application of high resolution DLP stereolithography for fabrication of tricalcium phosphate scaffolds for bone regeneration. // *Biomed. Mater.*- 2019.- Vol. 14. P. 045018.
64. S. K. Saha, D. Wang, V. H. Nguyen, Y. Chang, J. S. Oakdale, S.-C. Chen. Scalable submicrometer additive manufacturing. // *Science*.- 2019.- Vol. 366.- P. 105–109.
65. Sharma R., Kuebler S.M., Grabill C.N., Martinez N., Rumpf R.C. Fabrication of functional nanophotonic devices via multiphoton polymerization. // *ACS Symposium Series*.- 2019.- Vol. 1315.- P. 151-171.
66. Liu Y. Structural color three-dimensional printing by shrinking photonic crystals. // *Nature communications*.- 2019.- Vol. 10, №. 1.- P. 1-8.
67. X. Zhou, Y. Hou, J. Lin. A review on the processing accuracy of two-photon polymerization. // *AIP Advances*.- 2015.- Vol. 5.- P. 030701.
68. E. Behroodi, H. Latif1, F. Najaf. A compact LED-based projection microstereolithography for producing 3D microstructures. // *Scientific Reports*.- 2019.- Vol. 9.- P. 19692.
69. Vorzobova, N.D., Bulgakova, V.G., Veselov, V.O. Formation of 3D structures in a volumetric photocurable material via a holographic method. // *Opt. Spectrosc.*- 2015.- Vol. 119.- P. 1034–1037.

70. Н. Д. Ворзобова, В. Г. Булгакова. Способ получения трехмерных объектов. Патент RU 2646086 C1. (01 марта 2018).
71. Veselago V.G. Electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . // Success of the physical sciences.- 1967.- Vol. 92.- P. 517.
72. Андрианов Е. С. Квантовая наноплазмоника. //М: ИД “Интеллект.- 2015.- С. 368.
73. K. Yao, Y. Liu. Plasmonic metamaterials. // Nanotechnol Rev.- 2014.- Vol. 3(2).- P. 177–210.
74. Y. Kivshar. All-dielectric meta-optics and non-linear nanophotonics. // National Science Review. 2018.- Vol. 5.- P. 144–158.
75. Z. Ren, Y. Chang, Y. Ma, K. Shih, B. Dong, C. Lee. Leveraging of MEMS Technologies for Optical Metamaterials Applications. // Advanced Optical Materials.- 2019.- P. 1900653.
76. A. Sadeqi, H. R. Nejad, R. E. Oweyung, S. Sonkusale. Three dimensional printing of metamaterial embedded geometrical optics (MEGO). // Microsystems and Nanoengineering.- 2019.- Vol. 5.- P.16.
77. T. Tanaka, A. Ishikawa. Towards three- dimensional optical Metamaterials. // Nano Convergence.- 2017. – Vol.4.- P.34.

Ворзобова Надежда Дмитриевна

**ОСНОВЫ ОПТИЧЕСКИХ 3D ТЕХНОЛОГИЙ
ФОРМИРОВАНИЯ МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ ФОТОНИКИ И ИНФОРМАЦИОННЫХ
СИСТЕМ**

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49