

## **Введение**

Интенсивное развитие информационных систем, систем связи, вычислительной техники, микроэлектромеханических (MEMS) и микрооптоэлектромеханических систем (MOEMS) выдвигает новые требования к элементам этих систем. Одним из основных требований является уменьшение их характеристических размеров – в настоящее время, наряду с элементами микронных размеров, требуются элементы, размеры которых соизмеримы с длиной волны света. В связи с этим большой практический интерес представляют методы и технологии формирования как отдельных микроэлементов – элементов интегральной оптики, элементов MEMS и MOEMS, так и сложных структур – интегральных микросхем. Особое место занимают периодические структуры – фотонные кристаллы.

Среди многообразия технологических процессов в настоящее время наиболее перспективными представляются процессы, основанные на оптических методах. В данном курсе будут рассмотрены процессы, основанные на методах оптической литографии, голографии и фотоотверждения полимеров.

## Глава 1

# ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ

### §1. Основные свойства и применение фотонных кристаллов

*Фотонный кристалл* – это периодическая структура, позволяющая изменять направление излучения и выделять (пропускать или поглощать) излучение с определенной частотой. Идея фотонного кристалла была предложена в 1987 году Эли Яблоновичем (в настоящее время сотрудником университета UCLA в Калифорнии). Он же ввел понятие «*фотонная запрещенная зона*» - область частот, не пропускаемых структурой фотонного кристалла (по аналогии с понятием запрещенной зоны в полупроводнике).

В зависимости от возможности управлять излучением в плоскости или в пространстве фотонные кристаллы делятся на одномерные, двумерные и трехмерные.

Области применения фотонных кристаллов обширны: техника телекоммуникаций, информационные системы, лазерная техника и др. Фотонные кристаллы могут использоваться в качестве:

- узкополосных фильтров, пропускающих или поглощающих определенную частоту излучения;
- коммутаторов и мультиплексоров, обеспечивающих пространственное разделение и маршрутизацию пучков с различными частотами;
- переходных элементов из волновода в волновод, обеспечивающих минимальные переходные помехи;
- элементов интегральных микросхем (например, транзисторов);
- фотонно - кристаллических волокон;
- объемных резонаторов лазеров.

### § 2. Структуры подобные природным минералам

В природе встречаются структуры, обладающие свойствами фотонных кристаллов: алмаз, опал, кальцит, лабрадор. Из природных фотонных кристаллов наибольший интерес представляет структура опала. В настоящее время существует техника создания искусственных опалов. Искусственный опал представляет собой трехмерный глобулярный кристалл. Диаметр глобул (шаров) соизмерим с длиной волны видимого излучения. Структура состоит из периодически расположенных в пространстве плотно упакованных шаров аморфного кварца с диаметром 200 - 600 нм. При исследовании чистых опалов, а также нанокмозитов – глобулярных фотонных кристаллов, насыщенных ацетоном или этиловым спиртом, был обнаружен новый нелинейный эффект – эффект фотонного пламени [1]. При облучении излучением импульсного лазера (694 нм) наблюдалось свечение

кристаллов. Спектр излучения состоял из ряда линий с длинами волн 429, 453, 489, 535, 643 нм. Наблюдаемый эффект является предметом исследований и может быть использован в системах обработки информации в реальном времени.

В 1999 году (в университете г. Торонто) была создана структура фотонного кристалла на основе искусственного опала с управляемой шириной запрещенной зоны. Воздушные пустоты кристалла заполняют кремнием, затем субстанцию опала вытравливают, формируя инверсную опалу кристаллическую структуру с периодически расположенными сферическими пустотами. Запрещенная зона данной структуры препятствует распространению волн в диапазоне 1380-1620 нм. Для управления шириной запрещенной зоны внутренние поверхности сфер покрываются нематическим жидким кристаллом с низким коэффициентом преломления и прикладывается внешнее магнитное поле. Таким образом обеспечивается управление лучом, проходящим через структуру фотонного кристалла, то есть маршрутизация в плоскости или пространстве.

### **§ 3. Формирование периодических структур при взаимодействии когерентных световых волн**

В настоящее время технологии создания упорядоченных структур являются предметом исследований крупнейших мировых научных центров. Эти технологии базируются на различных методах, рассмотренных в данном учебном пособии, в том числе, голографических методах. Прежде, чем перейти к технологическим вопросам, остановимся на основных закономерностях формирования периодических диэлектрических структур при взаимодействии когерентных световых волн и дифракции излучения на таких структурах.

#### **1. Формирование интерференционной структуры**

Сущность голографического метода заключается в формировании интерференционной структуры с периодом соизмеримым с длиной волны, при взаимодействии двух и более когерентных волн и ее отображении в соответствующей регистрирующей среде. На рисунке 1.1 показано интерференционное поле – картина стоячих волн при интерференции двух точечных когерентных источников.

Если поместить регистрирующую среду в соответствующую область этого поля, можно зарегистрировать пропускающую (положения 1, 2, 4, 5) или отражательную (положение 3) голограмму. В зависимости от соотношения периода интерференционной структуры и толщины регистрирующей среды голограмма будет двумерной (тонкой) или трехмерной (объемной).

Рассмотрим закономерности образования и свойства простейшей периодической структуры, сформированной при взаимодействии двух плоских волн. В этом случае в плоскостях пучностей интенсивность определяется следующим образом:

$$I = \vec{a} \cdot \vec{a} = \vec{a}_1 \cdot \vec{a}_1 + \vec{a}_2 \cdot \vec{a}_2 + \vec{a}_1 \cdot \vec{a}_2 \{ \exp[i(\varphi_2 - \varphi_1)] + \exp[-i(\varphi_2 - \varphi_1)] \} \quad (1.1)$$

$$I = I_1 + I_2 + 2\vec{a}_1 \cdot \vec{a}_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (1.2)$$

Таким образом, интенсивность в любой точке интерференционной картины, образованной двумя волнами, является суммой интенсивностей отдельных волн плюс интерференционный член. В этом интерференционном члене содержится информация о разности фаз. Чтобы интерференционный член не был равен нулю, вектор  $\vec{a}_1$  должен иметь компоненту, параллельную  $\vec{a}_2$ . В этом случае результирующая интенсивность  $I$  может быть и больше и меньше суммы интенсивностей составляющих волн. Если волны имеют постоянные и равные амплитуды, то из (1.2) 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 волн контраст в интерференционной картине определяется отношением интенсивностей интерферирующих волн.

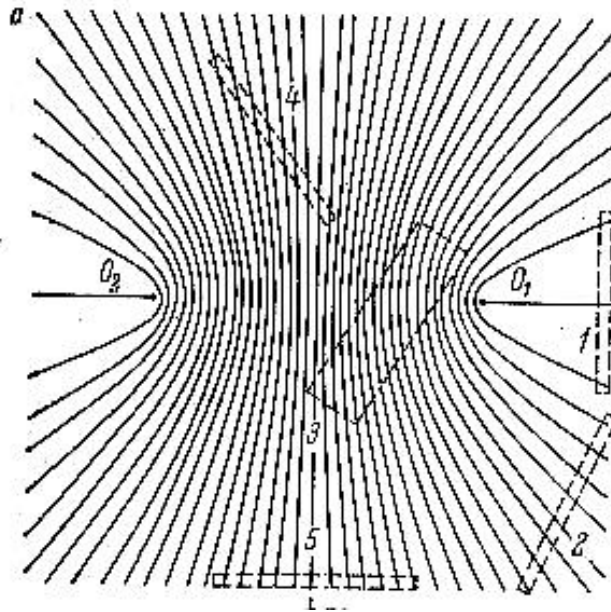


Рис.1.1. Поверхности пучностей стоячих волн, образованных точечным объектным источником  $O_1$  и точечным опорным источником  $O_2$ .

Предположим, что плоские волны, испускаемые двумя когерентными источниками, пересекаются под углом  $2\theta$  (рис. 1.2).

Для таких волн точки постоянной фазы лежат в одной плоскости. Для упрощения чертежа на нем представлены только положительные максимумы или гребни волновых фронтов  $F_1$  и  $F_2$  нормальных к плоскости чертежа. Эти максимумы расположены на расстоянии длины волны  $\lambda$  (в среде) друг от друга. Волновые нормали 1 и 2 перпендикулярны фронтам и указывают направление распространения волн. Линии пересечения плоскостей  $F_1$  и  $F_2$  перпендикулярны плоскости чертежа. На этих линиях в положениях, которые отмечены жирными точками, гребни волн складываются. Плоскости

максимальных результирующих амплитуд света делят пополам угол между волновыми нормальными. Эти плоскости нормальны к плоскости чертежа и локализованы там, где частота вертикальной штриховки максимальна. Усредненный по времени квадрат результирующей амплитуды (интенсивность), также максимален вдоль этих линий. Такие плоскости являются местом интерференции всех волн, для которых в выражении (1.1) разность фаз удовлетворяет условию  $\varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi n$ . Если принять во внимание другие разности фаз, при которых происходит сложение амплитуд, то мы приходим к синусоидальному распределению интенсивности в интерференционной картине по направлению  $y$ .

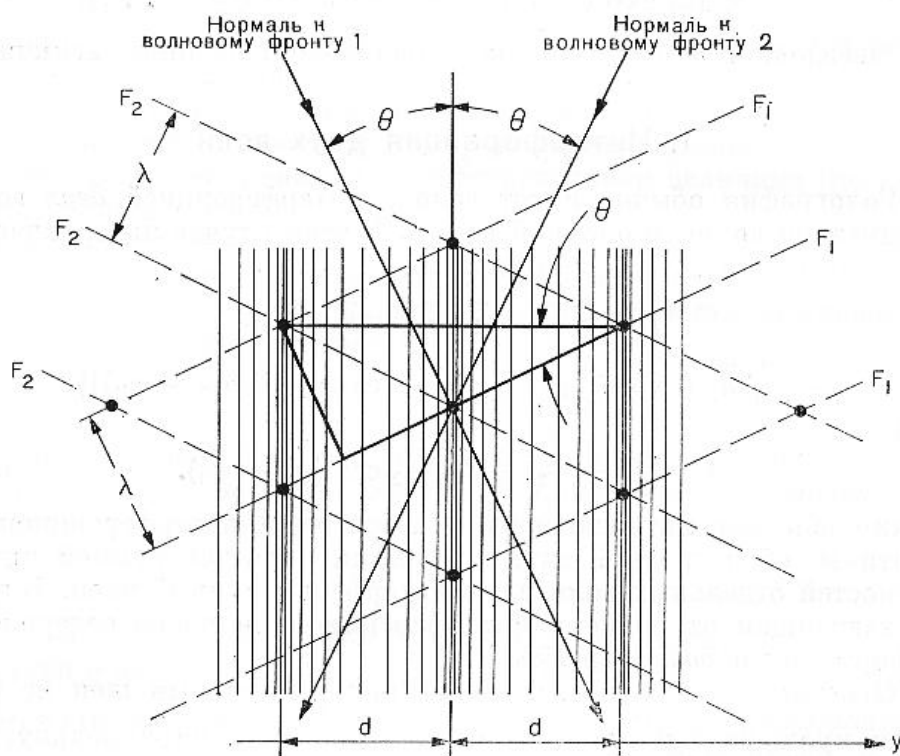


Рис. 1.2 Структура интерференционной картины, образующейся при взаимодействии двух плоских волн.

Рассматривая треугольник, изображенный жирными линиями, легко установить, что период синусоидального распределения интенсивности описывается формулой:

$$2d \sin \theta = \lambda \quad (1.3)$$

если угол  $\theta$ , образованный волновыми нормальными с плоскостями максимумов интенсивностей (пучностей) возрастает, то период  $d$  уменьшается. Важно отметить, что разрешающая способность регистрирующей среды должна составлять не менее  $1/d$  линий на единицу длины.

## 2. 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. Периодические структуры, образованные при взаимодействии двух когерентных плоских волн, можно разделить на структуры, ведущие себя подобно плоским или объемным дифракционным решеткам. На рисунке 1.3 показана (в разрезе) плоская дифракционная решетка.

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

$$d(\sin i + \sin \delta) = \lambda, \quad (1.4)$$

где  $d$  – постоянная решетки,  $i$  – угол падения,  $\delta$  – угол дифракции.

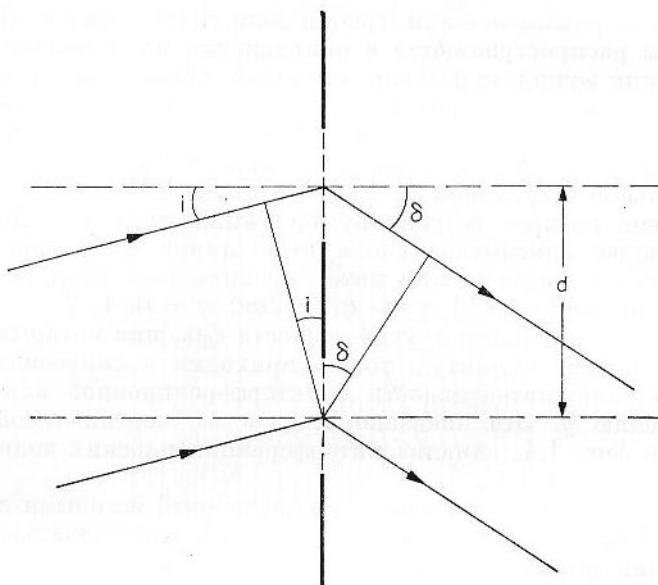


Рис. 1.3. Дифракция света на плоской решетке.

При выполнении условия (1.4) образуется главный (+1) максимум диффразированной волны. Возможны отрицательный (-1) и более высокие порядки дифракции. На рисунке 1.1 мы ограничились рассмотрением дифракции первого порядка.

На рисунке 1.3 показана объемная дифракционная решетка, состоящая из периодически расположенных рассеивающих плоскостей.

Интенсивность излучения, выходящего из такой решетки, имеет максимальную величину в том направлении, в котором происходит синфазное сложение световых волн, рассеянных последовательными плоскостями. Условие образования главного максимума диффразированной плоской волны имеет вид:

$$2d \sin \theta = \lambda \quad (1.5)$$

и называется *законом Брэгга* (по имени Уильяма Брэгга, получившего его для случая дифракции рентгеновских лучей на атомных плоскостях в кристалле).

Сравнение выражений (1.4) и (1.5) обнаруживает, что последнее накладывает более жесткие условия на наблюдение максимума дифракции. Для плоских решеток условие (1.4) допускает произвольный выбор угла падения и длины волны. Для объемной решетки это не так – угол падения связан с длиной волны.

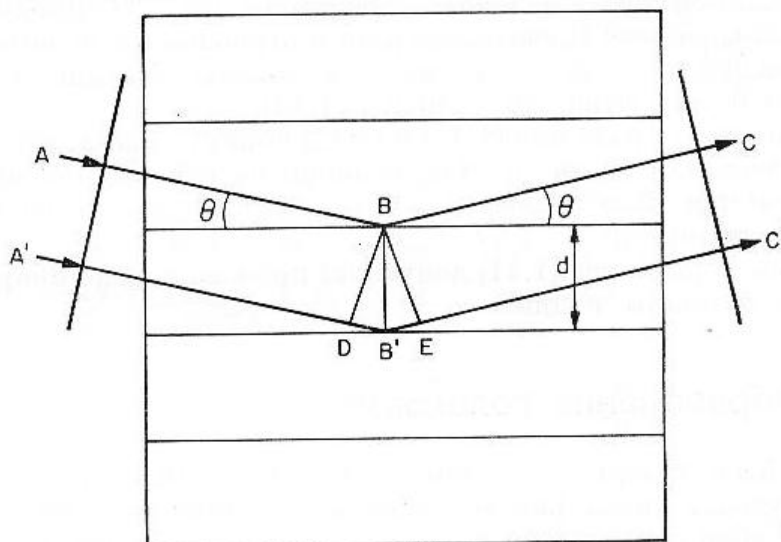


Рис. 1.4 Дифракция света на объемной решетке.  
 $DB' + B'E = 2d \sin \theta = \lambda$  (закон Брэгга)

### 3. Основы теории объемной решетки

Структура объемной голографической решетки может рассматриваться как простейший фотонный кристалл. Рассмотрим более детально дифракцию на такой структуре. Для простоты ограничимся рассмотрением объемной решетки, показанной на рисунке 1.5 [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  $\vec{k}$ . Штрихи решетки расположены на расстоянии  $d$  и составляют угол  $\Phi'$  с границами решетки. На решетку падает монохроматическая волна, вектор  $\vec{v}$  электрического поля которой перпендикулярен плоскости падения. Внутри решетки направление распространения волны определяется вектором  $\vec{\rho}$ , который составляет угол  $\Psi'$  с нормалью к поверхности решетки. Вектор  $\vec{\sigma}$  соответствует направлению распространения дифрагированной волны.

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  $\vec{v}$ , вектор магнитного поля  $\vec{H}$  и вектор смещения  $\vec{D}$  в среде и имеют вид:

$$\text{rot}\vec{v} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (1.6)$$

$$\text{rot}\vec{H} = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \sigma \vec{v} \quad (1.7)$$

$$\text{div}\vec{D} = 0 \text{ (объемные заряды отсутствуют)} \quad (1.8)$$

$$\text{div}\vec{H} = 0, \quad (1.9)$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума,  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума,  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала решетки,  $\sigma$  – проводимость среды.

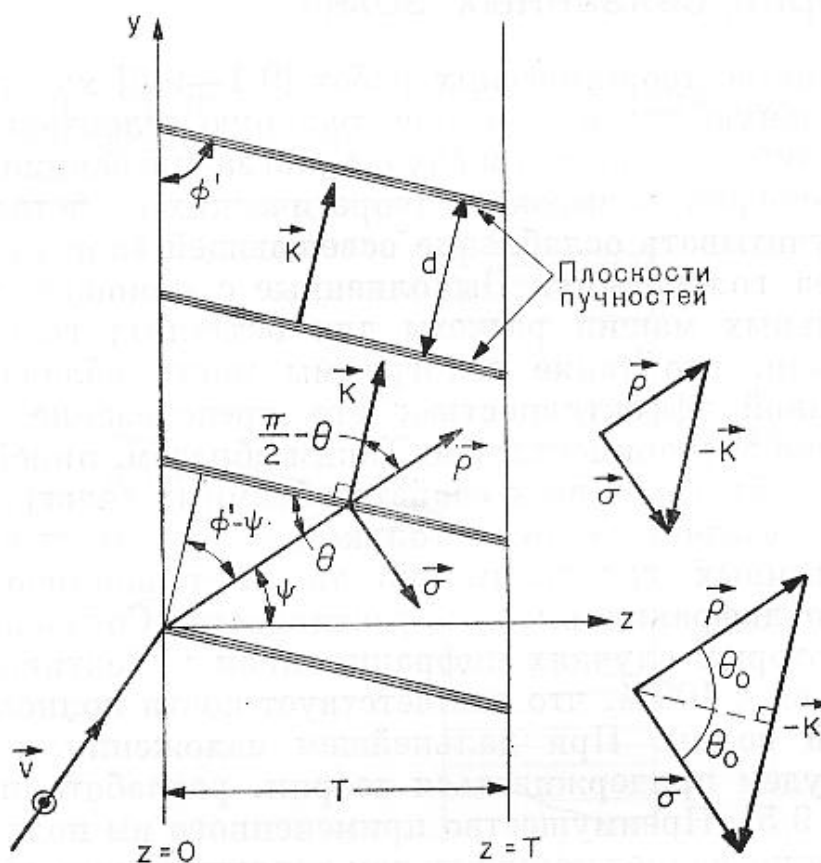


Рис. 1.5. Геометрическая схема объемной решетки.

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

$$\varepsilon = \bar{\varepsilon} + \varepsilon_1 \cos \vec{k} \cdot \vec{r} \quad (1.10)$$

$$\sigma = \bar{\sigma} + \sigma_1 \cos \vec{k} \cdot \vec{r}, \quad (1.11)$$



где  $\vec{r}$  – вектор, идущий из начала координат в соответствующую точку среды ( $\vec{r} = \vec{i}x + \vec{j}y + \vec{k}z$ )

$\bar{\epsilon}, \bar{\sigma}$  - средние значения диэлектрической проницаемости и проводимости,  $\epsilon_1, \sigma_1$  - амплитуды изменения диэлектрической проницаемости и проводимости,

получим волновое уравнение:

$$\nabla^2 a + q^2 a = 0, \quad (1.12)$$

где  $\nabla^2$  - оператор Лапласа,

$a$  - комплексная амплитуда электрического поля в произвольной точке решетки,

$$q^2 = \beta^2 - 2i\alpha\beta + 2\chi\beta[\exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}) + \exp(-i\vec{k} \cdot \vec{r})] \quad (1.13)$$

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

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

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

$$\chi = \frac{1}{2} \left( k \frac{\epsilon_1}{2(\bar{\epsilon})^{1/2}} - i\alpha_1 \right)$$

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

Постоянную взаимодействия  $\chi$  можно также представить в виде:

$$\chi = \frac{\pi n_1}{\lambda_a} - \frac{i\alpha_1}{2}, \quad (1.14)$$

где  $n_1$  - амплитуда модуляции показателя преломления.

Для решения волнового уравнения представим комплексную амплитуду электрического поля  $a$  как сумму амплитуд падающей  $a_i$  и дифрагированной  $a_d$  волн:

$$a = a_i + a_d = R(z)\exp(-i\vec{\rho} \cdot \vec{r}) + S(z)\exp(-i\vec{\sigma} \cdot \vec{r}). \quad (1.15)$$

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  $\theta$  отличается от угла Брэгга  $\theta_0$  на малую величину  $\delta$ , получим уравнения связанных волн:

$$C_R R' + \alpha R = i\chi S \quad (1.16)$$

$$C_S S' + (\alpha + i\Gamma)S = -i\chi R, \quad (1.17)$$

где

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

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

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

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

$\rho_z$  и  $\sigma_z$  - проекции векторов  $\vec{\rho}$  и  $\vec{\sigma}$  на ось Z

$$\Gamma = \beta\delta \sin 2\theta_0. \quad (1.18)$$

Эти уравнения позволяют понять физику процесса дифракции. Когда при распространении падающей и дифрагированной волн сквозь решетку пройденное ими расстояние увеличивается на  $dz$ , комплексные амплитуды этих волн меняются на  $dR$  и  $dS$ . Эти изменения вызваны поглощением, которому соответствуют члены  $\alpha R$  и  $\alpha S$ , или взаимодействием волн друг с другом, описываемым членами взаимодействия  $\chi R$  и  $\chi S$ . 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  $\Gamma$  будет большой. В результате наложения этой добавочной фазы дифрагированная волна выходит из синхронизма с падающей волной, что приводит к ослаблению взаимодействия.

Уравнения (1.16) и (1.17) представляют собой систему двух линейных дифференциальных уравнений первого порядка. Подставляя (1.16) в (1.17) получаем для  $R$  одно дифференциальное уравнение второго порядка:

$$R'' + \left( \frac{\alpha}{C_R} + \frac{\alpha}{C_S} + \frac{i\Gamma}{C_S} \right) R' + \frac{(\alpha^2 + i\Gamma\alpha + \chi^2)}{C_K C_K} R = 0. \quad (1.19)$$

Решение этого уравнения будем искать в виде:

$$R(z) = \exp(\gamma z). \quad (1.20)$$

Подставляя (1.20) в (1.19) получим квадратное уравнение для  $\gamma$ :

$$\gamma^2 + \left( \frac{\alpha}{C_R} + \frac{\alpha}{C_S} + \frac{i\Gamma}{C_S} \right) \gamma + \frac{(\alpha^2 + i\Gamma\alpha + \chi^2)}{C_R C_S} = 0, \quad (1.21)$$

решение которого имеет вид:

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

Полное решение уравнения (3.3.14) будем искать в виде:

$$R(z) = R_1 \exp(\gamma_1 z) + R_2 \exp(\gamma_2 z), \quad (1.22)$$

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

Подставляя (1.22) в (1.16) получим аналогичное уравнение для  $S(z)$ :

$$S(z) = S_1 \exp(\gamma_1 z) + S_2 \exp(\gamma_2 z). \quad (1.23)$$

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

#### 4. Пропускающая диэлектрическая фазовая решетка

Для пропускающей решетки (рис. 1.6) граничные условия при  $z = 0$  имеют вид:

$$R(0) = R_1 + R_2 = 1 \quad (1.24)$$

$$S(0) = S_1 + S_2 = 0. \quad (1.25)$$

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

$$S(T) = i \frac{\chi}{C_s (\gamma_1 - \gamma_2)} [\exp(\gamma_2 T) - \exp(\gamma_1 T)]. \quad (1.26)$$

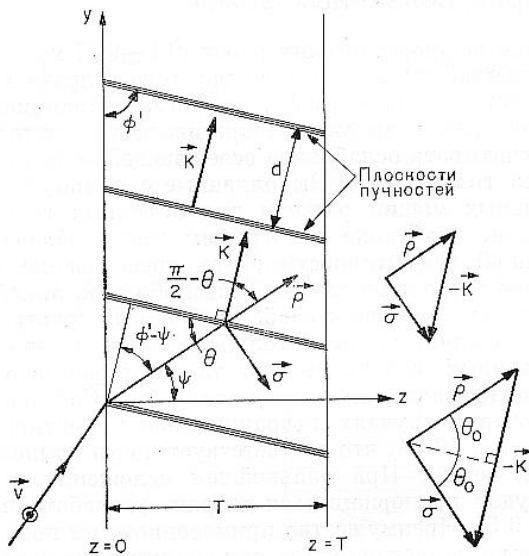


Рис. 1.6. Пропускающая решетка.

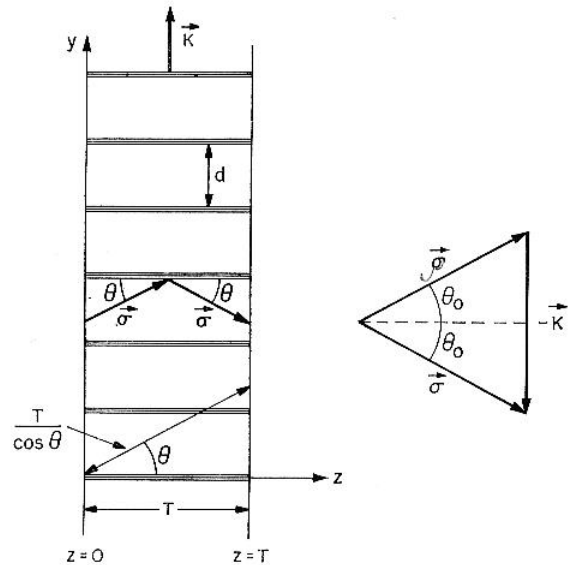


Рис. 1.7. Геометрическая схема пропускающей решетки с диэлектрическими плоскостями перпендикулярными поверхностями решетки.

Для случая, показанного на рисунке 1.7, то есть, когда плоскости решетки ориентированы перпендикулярно поверхности и, следовательно, вектор решетки  $\vec{k}$  параллелен поверхности, вектор падающей волны  $\vec{p}$  образует угол  $\theta$  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:

$$S(T) = -i \frac{\exp(-i\xi) \sin(\xi^2 + \nu^2)^{1/2}}{(1 + \xi^2 / \nu^2)^{1/2}}, \quad (1.27)$$

где

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

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

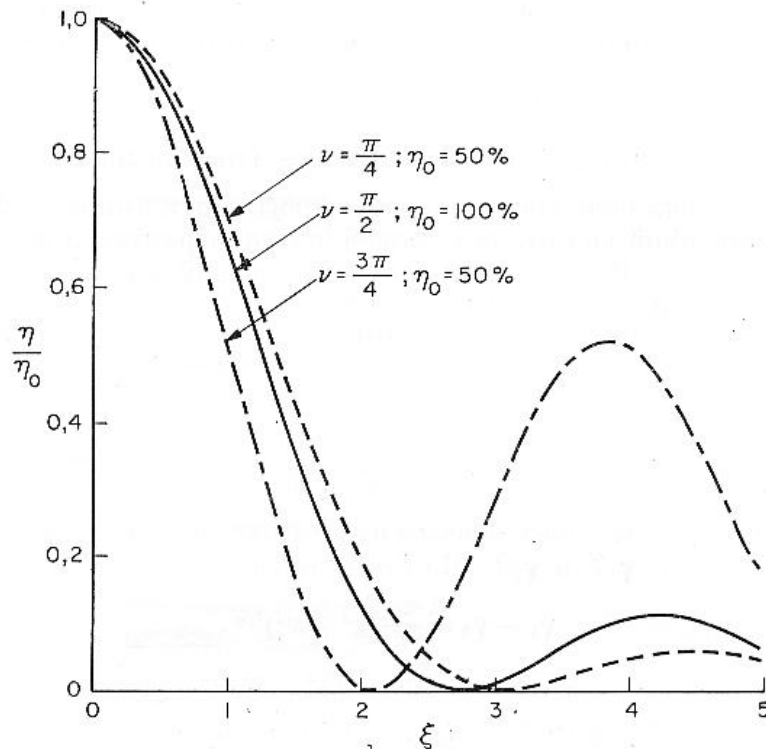


Рис. 1.8. Зависимость относительной эффективности  $\frac{\eta}{\eta_0}$  диэлектрической пропускающей решетки (без потерь) от параметра  $\xi = \delta(2\pi\bar{n}/\lambda_a)T \sin\theta_0$  для различных значений параметра  $\nu = \pi n_1 T / \lambda_a \cos\theta_0$ .

*Дифракционная эффективность* определяется как отношение квадратов амплитуд дифрагированной и падающей волн:

$$\eta = \frac{|S(T)|^2}{|R(0)|^2}. \quad (1.28)$$

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

$$\frac{n_1 T}{\cos\theta_0} = \frac{\lambda_a}{2}. \quad (1.29)$$

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 1.8.

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

### 5. Отражательная диэлектрическая фазовая решетка

Для отражательной решетки (рис. 3.5.1) граничные условия при  $z = T$  имеют вид:

$$R(0) = R_1 + R_2 = 1 \quad (1.30)$$

$$S(T) = S_1 \exp(\gamma_1 T) + S_2 \exp(\gamma_2 T) = 0. \quad (1.31)$$

Амплитуда дифрагированной волны для  $z = 0$  выражается как:

$$S(0) = S_1 + S_2 = -i\chi \left( \alpha + i\Gamma + C_s \left[ \frac{\gamma_1 \exp(\gamma_2 T) - \gamma_2 \exp(\gamma_1 T)}{\exp(\gamma_2 T) - \exp(\gamma_1 T)} \right] \right)^{-1} \quad (1.32)$$

Для случая, показанного на рисунке 1.10, при отсутствии потерь, то есть,  $\alpha = \alpha_1 = 0$ , амплитуда дифрагированной волны определяется выражением:

$$S(0) = \frac{-i}{(i\xi_r / v_r) + [1 - (\xi_r / v_r)^2]^{1/2} \operatorname{cth}(v_r^2 - \xi_r^2)^{1/2}}, \quad (1.33)$$

где

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

$$v_r = \frac{\chi T}{\cos \Psi_0} = \frac{\pi n_1 T}{\lambda_a \cos \Psi_0}$$

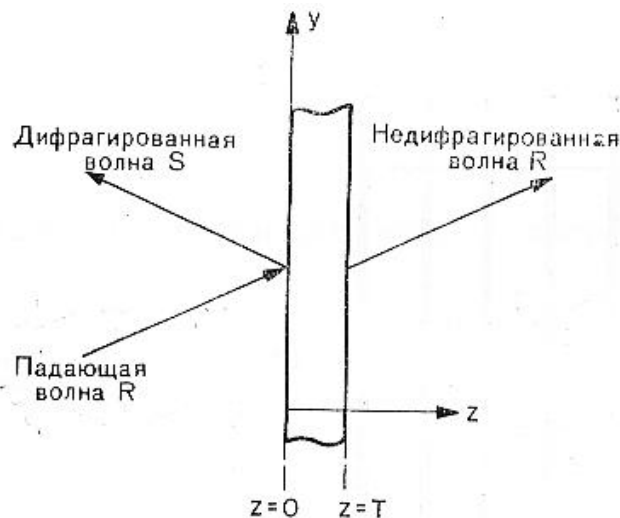


Рис. 1.9. Отражательная решетка.

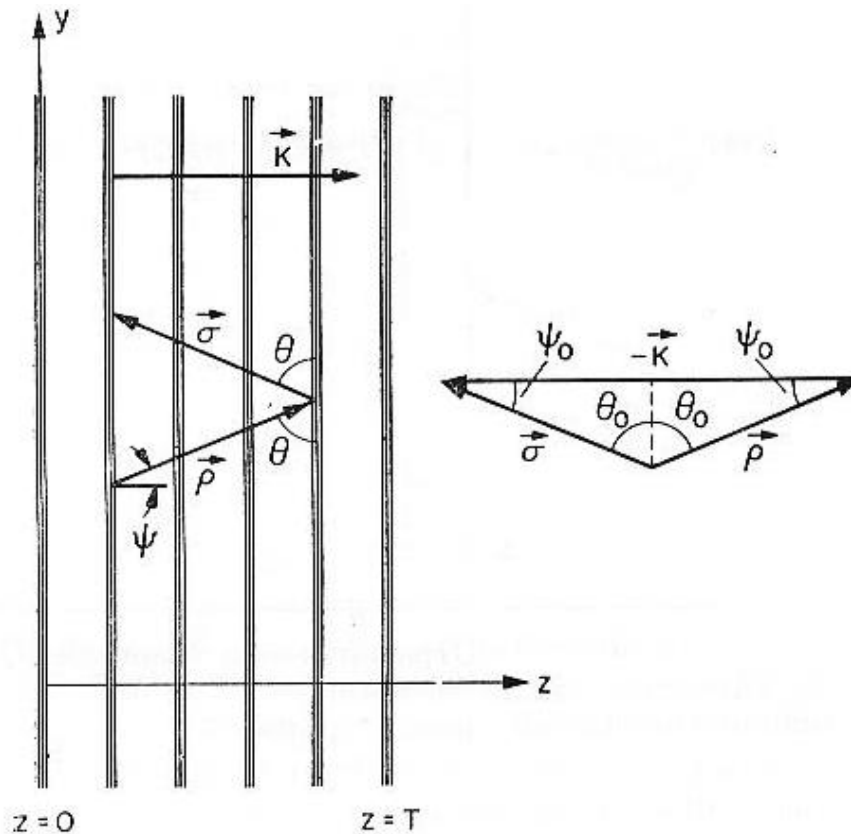


Рис. 1.10. Геометрическая схема отрагательной решетки с диэлектрическими плоскостями параллельными ее поверхностям.

На рисунке 1.11 приведена относительная эффективность, как функция параметра  $\xi_r$  для различных значений параметра  $\nu_r$ .

Принимая во внимание зависимость:

$$\xi_r = -\frac{\Delta\lambda}{\lambda_a} \left( \frac{2\pi\bar{n}}{\lambda_a} \right) T \sin \theta_0, \quad (1.34)$$

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

Рассмотренная теория дает хорошие результаты для объемных решеток. В соответствии с *критерием Клейна* объемной является решетка, для которой  $Q \geq 10$ .  $Q$  – параметр Клейна, определяемый соотношением:

$$Q = \frac{2\pi\lambda_a T}{\bar{n}d^2}. \quad (1.35)$$

Мы рассмотрели отдельные и наиболее простые случаи объемных решеток. Теория более сложных структур рассмотрена в ряде публикаций. Следует отметить, что рассмотрение дифракции на структуре с произвольным (в пространстве) распределением диэлектрической проницаемости является сложной задачей. Корректность решения этой задачи в значительной степени определяет соответствие расчетных и экспериментальных результатов при оценках оптимальных структур фотонных кристаллов и их характеристик.

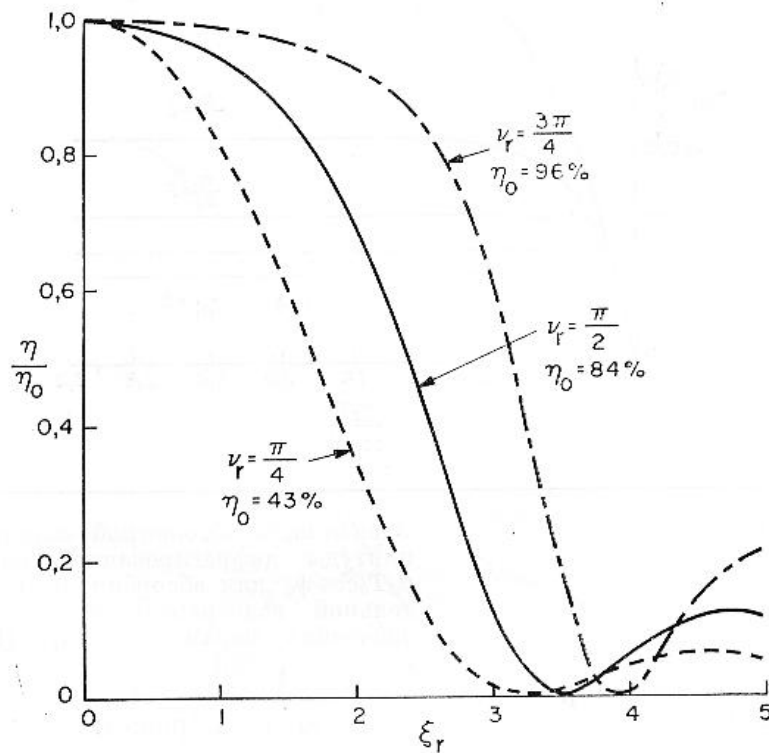


Рис. 1.11. Зависимость относительной эффективности  $\eta/\eta_0$  диэлектрической отражательной решетки (без потерь) от параметра  $\xi_r = \delta(2\pi\bar{n}/\lambda_a)T \cos\theta_0$  для разных значений параметра  $\nu_r = \pi n_1 T / \lambda_a \cos\psi_0$ .

## 6. Когерентность световых волн

Формирование интерференционной структуры возможно при взаимодействии когерентных световых волн. Общие положения теории когерентности изложены в [2.3]. Не останавливаясь на сложных теоретических аспектах, приведем основные понятия. 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 интерferируют волны, исходящие из точек  $P_1$  и  $P_2$  (рис. 1.12).

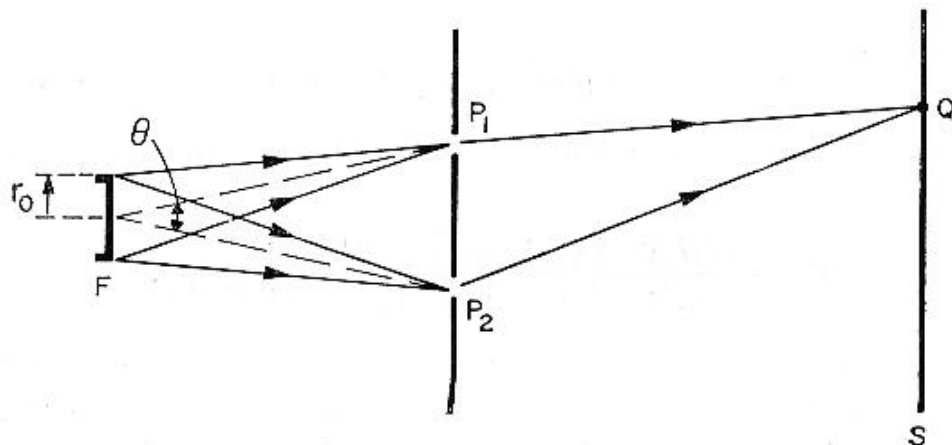


Рис. 1.12. Определение степени когерентности при использовании протяженного источника.

Согласно [3] комплексная степень когерентности  $\gamma_{1,2}(\tau)$  определяется как нормированная корреляция между комплексными напряженностями электрического поля в точках  $P_1$  и  $P_2$ :

$$\gamma_{12}(\tau) \equiv \frac{\langle v_{P_1}(t+\tau)v_{P_2}^*(t) \rangle}{\left[ \langle v_{P_1}(t)v_{P_1}^*(t) \rangle \langle v_{P_2}(t)v_{P_2}^*(t) \rangle \right]^{1/2}} = \frac{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T v_{P_1}(t+\tau)v_{P_2}^*(t) dt}{\left[ \left( \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T v_{P_1}(t)v_{P_1}^*(t) dt \right) \left( \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T v_{P_2}(t)v_{P_2}^*(t) dt \right) \right]^{1/2}}$$

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

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (1.36)$$

можно получить для видности:

$$V = \frac{2|\gamma_{1,2}|}{(I_1/I_2)^{1/2} + (I_2/I_1)^{1/2}}. \quad (1.37)$$

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

Если  $\tau \rightarrow 0$  ( $\tau$  – разность во времени прохождения света в точку Q из точек  $P_1$  и  $P_2$ ), контраст полос является мерой *пространственной когерентности* (взаимной когерентности в точках  $P_1$  и  $P_2$ ). Если точки  $P_1$  и  $P_2$  совпадают, комплексная степень когерентности зависит только от  $\tau$ . В таком случае говорят о комплексной степени *временной когерентности*. Величина  $\tau$  может быть выражена через оптическую разность хода как  $\Delta L = c\tau$  ( $c$  – скорость света), тогда  $\Delta L$  называют *длиной когерентности*. Если протяженный источник F состоит из ряда некоррелированных и пространственно разделенных осцилляторов, то каждый осциллятор создает свою интерференционную картину. Результирующая интенсивность может быть в этом случае однородной и контраст равен нулю. В этом случае источник излучения является некогерентным.

Когерентными источниками излучения являются лазеры. Когерентность таких 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 и полупроводниковых лазерах достигается различными способами, среди которых - введение дополнительных резонаторов – эталонов Фабри-Перо, селективирующих Брэгговских структур, пространственных фильтров, в твердотельных лазерах когерентность определяется также наличием модуляторов добротности и элементов обращения волнового фронта.

#### **§ 4. Методы и технологии получения периодических структур**

В настоящее время усилия многих ведущих научных лабораторий направлены на разработку методов и технологий получения периодических структур. Рассмотрим некоторые из них.

##### **1. Объемные пропускающие и отражательные голографические решетки.**

Брэгговские структуры типа объемных пропускающих и отражательных решеток, образованных при взаимодействии двух плоских когерентных волн, являются простейшими фотонными кристаллами. 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.

Для получения таких селекторов используются объемные среды с толщиной до 1 мм – реоксан, диффен, пористые стекла, фототерморелактивные стекла. Периодические структуры, полученные на таких средах, могут быть использованы в качестве брэгговских фильтров и зеркал высокоэнергетических лазеров, в том числе, для стабилизации излучения полупроводниковых лазеров [4].

##### **2. Изготовление периодических микроструктур методом голографической фотополимеризации**

Метод [5] основан на проекции интерференционной структуры, сформированной при взаимодействии трех или четырех некомпланарных плоских когерентных волн в объем светоотверждаемого полимера. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 1.13.

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 правильной комбинации интерферирующих волн можно сформировать двумерные и трехмерные кристаллические решетки. Пучки могут падать на одну и противоположные поверхности образца. Необходимые пучки отбираются при введении соответствующих

масок. Для формирования заданной структуры рассчитываются волновые векторы интерферирующих пучков.

В качестве источника излучения используется маломощный лазер непрерывного действия с длиной волны излучения 532 нм, в качестве регистрирующей среды – фотополимер со специальным инициатором на данную длину волны (отметим, что обычно используемые инициаторы обеспечивают чувствительность в УФ области спектра). Спектр поглощения фотополимера с таким инициатором приведен на рисунке 1.14.

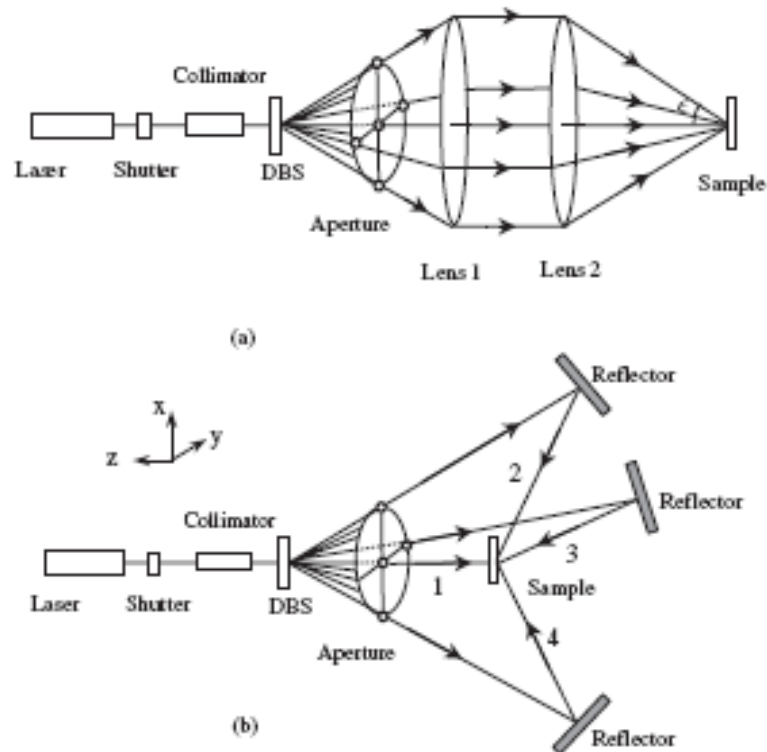


Рис. 1.13. Схема экспериментальной установки.  
 а – симметричная зонтичная геометрия, б – схема получения объемно-центрированной тетрагональной кристаллической решетки.

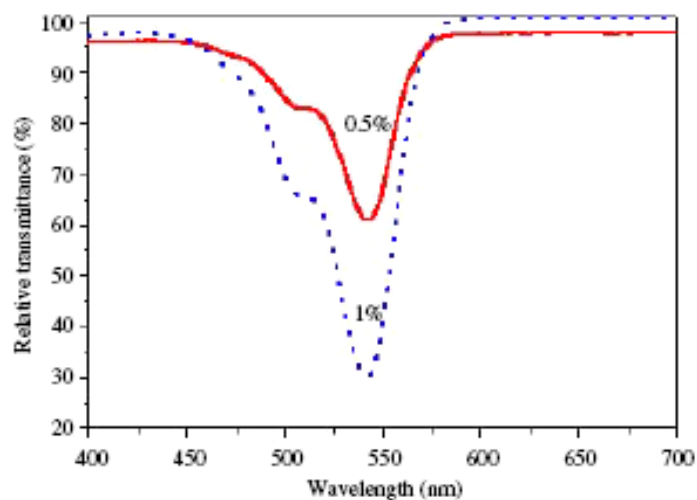


Рис. 1.14. Спектр поглощения фотополимера.

Фотографии полученных микроструктур показаны на рисунках 1.15 - 1.18.

Рисунки 1.15 (a, b) – это фотографии одномерных структур, сформированных двумя пучками с углами между ними  $10.5^\circ$  и  $2.2^\circ$ . Период интерференционных полос в них – 2.9 и 14 мкм соответственно. Дифракционная картина при освещении структуры, показанной на рисунке 1.15 (a), излучением гелий-неонового лазера с длиной волны 633 нм приведена на рисунке 1.15(c). Рисунок 1.16 иллюстрирует формирование двумерной квадратной кристаллической решетки: a – фотография микроструктуры с периодом 4 мкм, полученной при длительности экспозиции 2 с, b – ее дифракционная картина. Для демонстрации влияния длительности экспозиции показана фотография той же структуры, но при длительности экспозиции 16 с. Можно видеть, что увеличение длительности экспозиции приводит к увеличению области полимеризации. На рисунке 1.17 показаны фотография и дифракционная картина для ромбической кристаллической решетки. На рисунке 1.18 приведен результат изготовления трехмерной объемно-центрированной тетрагональной кристаллической решетки полученной по схеме, приведенной на рисунке 1.13(b). Дифракционная картина свидетельствует о трехмерном характере структуры.

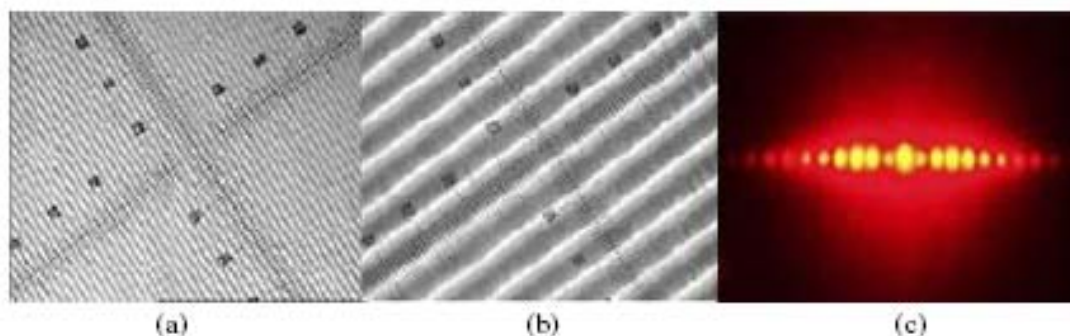


Рис. 1.15. Экспериментальные результаты для одномерных микроструктур: a,b – фотографии микроструктур, сформированных при углах пересечения пучков  $10.5^\circ$  и  $2.2^\circ$  соответственно; c – дифракционная картина для структуры a.

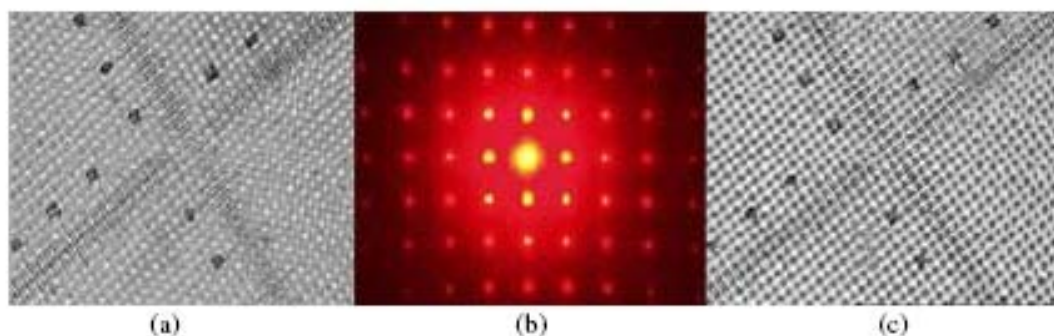


Рис. 1.16. Экспериментальные результаты для двумерной квадратной кристаллической решетки: a – структура, сформированная при экспозиции 2 с; b – дифракционная картина; c – структура, полученная при экспозиции 16 с.

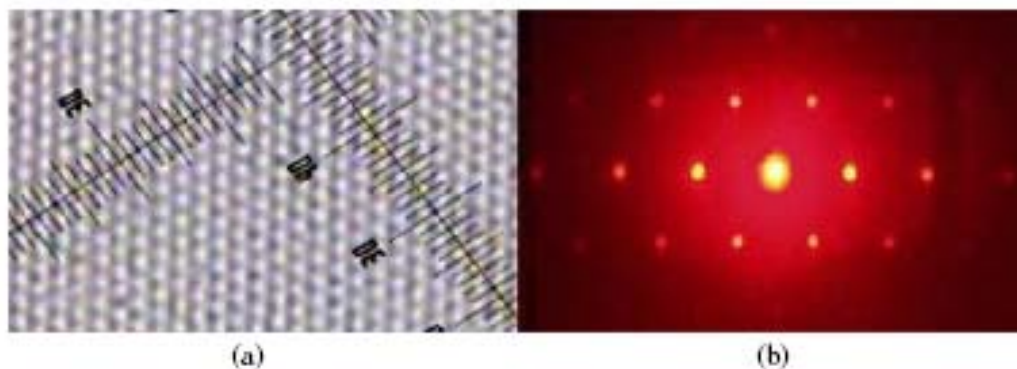


Рис. 1.17. Двумерная ромбическая кристаллическая решетка:  
 а – фотография структуры; b – дифракционная картина.

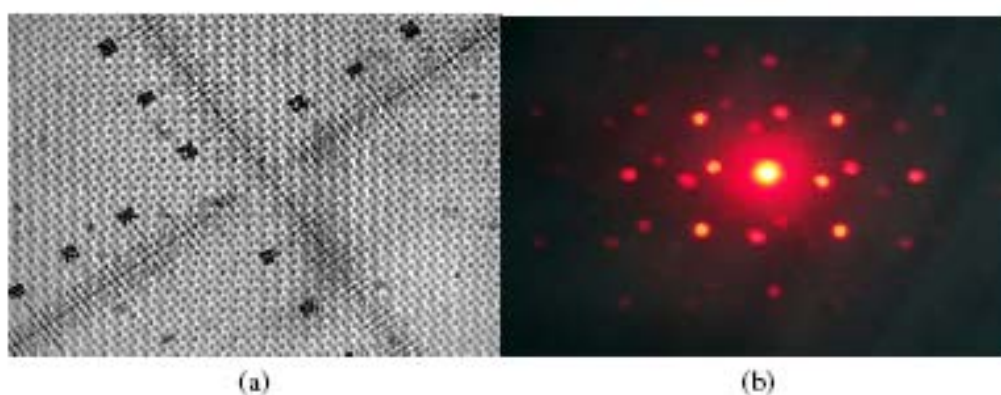


Рис.1.18. Трехмерная объемно-центрированная тетрагональная кристаллическая решетка:  
 а- фотография структуры; b – дифракционная картина.

### **3. Нанотехнология формирования решетчатой структуры методом голографической литографии**

Метод [6] основан на формировании периодической структуры в фоторезисте голографическим методом и последующем травлении кремниевой подложки. Изготовление наноструктурных решеток состоит из трех этапов:

- 1 – нанесение фоторезиста,
- 2 – голографическое экспонирование фоторезиста,
- 3 – химическое травление материала подложки.

Слой позитивного фоторезиста (50 нм) наносится методом центрифугирования на кремниевую подложку. При голографическом экспонировании излучением гелий - кадмиевого лазера (с длиной волны 325 нм) с использованием интерферометра формируется голографическая решетка, период которой  $d$  определяется углом  $\theta$  между поверхностью образца и направлением лазерного пучка:

$$d = \lambda / 2 \cos \theta .$$

Для создания двумерной маски необходимо экспонировать образец два раза при изменении ориентации интерференционной структуры на  $90^\circ$ . После экспонирования фоторезист появляется несколько секунд и

затвердевает при температуре  $120^\circ$  в течение 20 минут. Далее образец подвергается ионному травлению с использованием  $SF_2$  и  $N_2$  в различных соотношениях под давлением 80 мторр.

На рисунке 1.19 приведены фотографии полученных структур на кремниевой подложке с периодом 170 нм, но с разной глубиной травления.

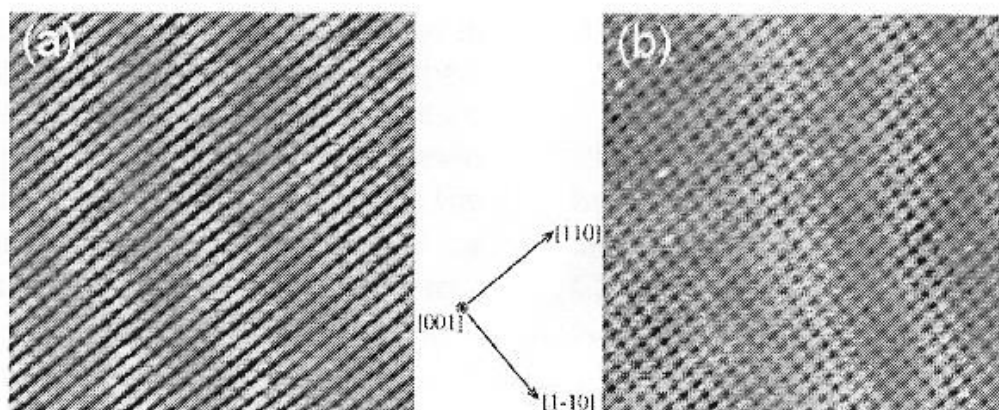


Рис. 1.19. Фотографии двумерных структур на кремниевой подложке с периодом 170 нм. а – травление при соотношении  $SF_2 / N_2 = 8/53$ ; б – травление при соотношении  $SF_2 / N_2 = 15/53$ .

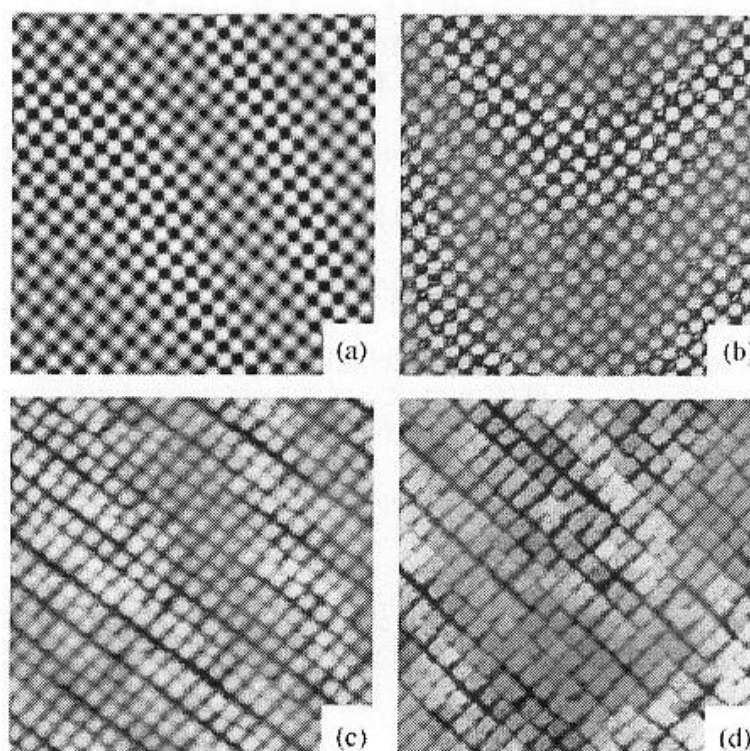


Рис. 1.20. Распределение профиля интенсивности при экспонировании в двух взаимно перпендикулярных направлениях с периодом 240 нм (а) и фотографии соответствующих структур на кремнии, полученных при различных соотношениях  $SF_2 / N_2$ : 8/53 (б), 10/53(с), 15/53 (д).

Глубина травления определяется соотношением  $SF_2 / N_2$ , временем травления и величиной давления. Как видно из рисунка 1, при большей скорости травления, то есть, при соотношении  $SF_2 / N_2 = 15/53$  исключается доминирующее направление и структура становится более равномерной. При

оптимизации условий экспонирования и проявления можно получить правильную структуру с периодом решетки 240 нм (рис.1.20а) при размере образца 5 x 5 мкм.

На рисунке 1.20 (b-d) показаны структуры, полученные при различных соотношениях SF<sub>2</sub> / N<sub>2</sub>. Размер образца – 15 x 15 мкм. Видно, что при увеличении скорости травления наблюдается изменение доминирующего направления, что может быть связано с возможным вытравливанием фоторезистивной маски. Кроме того, наблюдается изменение формы поверхности вершин кремниевых структур.

Рассмотренная технология может быть применена для последующей эпитаксии и получения германиевых структур.

#### **4. Изготовление трехмерных периодических структур в фоторезисте SU-8 методом фазовоуправляемой голографической литографии**

Основой метода [7] является регистрация многолучевой интерференционной структуры в слое фоторезиста. Особенность метода состоит в использовании системы, корректирующей фазы интерферирующих пучков. Схема установки показана на рисунке 1.21(a).

Луч фемтосекундного титан - сапфирового лазера с длительностью импульса 150 фс, длиной волны 800 нм и частотой 1 кГц проходит через дифракционный оптический элемент (DOE) и расщепляется в набор расходящихся пучков. Эти пучки коллимируются линзой L<sub>1</sub> и проходят через систему фазовой задержки (PR), представляющую собой набор стеклянных пластинок с регулируемым наклоном. Фазовоуправляемый набор пучков фокусируется линзой L<sub>2</sub> на образце (IA). Пучки необходимые для получения требуемой трехмерной структуры выделяются амплитудной маской. Фотография дифракционного элемента показана на рисунке 1.21(b). На рисунке 1.21(c) показан ход интерферирующих пучков. Все пучки линейно поляризованы, обеспечивается также оптимальное отношение их интенсивностей – 1:5. θ – угол между пучками. Четырехволновая геометрия (слева) позволяет формировать двумерные структуры, пятиволновая схема (справа) с регулированием фаз интерферирующих пучков позволяет формировать трехмерные структуры. Пространственное распределение интенсивности света в плоскости образца является суперпозицией когерентных волн и описывается выражением:

$$I(r) = \sum_{n,m} E_n e^{-i(k_n \cdot r + \delta_n)} \cdot E_m e^{i(k_m \cdot r + \delta_m)}, \quad (1.38)$$

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

На рисунке 1.22 показаны двумерные (соответствующие четырехволновому взаимодействию) и трехмерные (соответствующие пятиволновому взаимодействию) структуры.

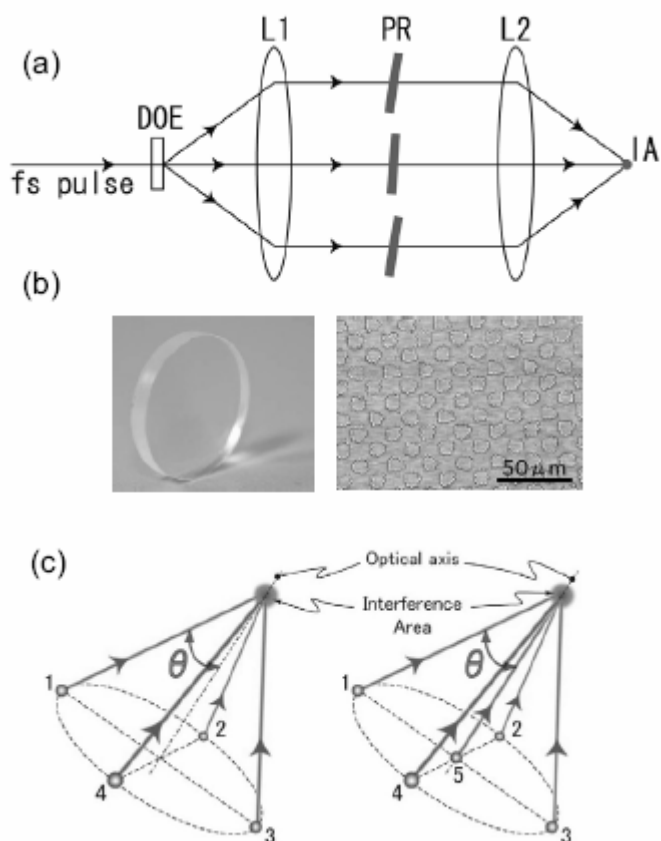


Рис. 1.21. Принцип голографической записи (а), дифракционный оптический элемент (b), схема голографической записи с использованием четырех и пяти лазерных пучков(с).

Важно отметить, что симметричная четырехволновая схема (также, как и симметричная схема с любым числом лучей), имеющая равные компоненты волнового вектора вдоль определенного направления, которое в данном случае совпадает с оптической осью системы, дает одинаковый период решетки. Это условие нарушается при добавлении центрального луча. В результате различия компонент период решетки вдоль оптической оси больше, чем в плоскости перпендикулярной к ней.

В качестве регистрирующего материала используется промышленный фоторезист SU – 8. Пленки фоторезиста толщиной 25 мкм наносятся на стеклянную подложку методом центрифугирования. SU – 8 оптически прозрачен на длине волны 800 нм. Поглощение излучения инициатором приводит к местным фотохимическим реакциям, приводящим к сшиванию полимера в течение последующей постэкспозиционной процедуры сушки. Сшивание также стимулируется оптическим нагревом. Сшитые области являются нерастворимыми в процессе последующей влажной обработки, в результате которой удаляется неотвержденный полимер. Структуры, сформированные на стеклянной подложке, являются механически и химически стойкими.

На рисунке 1.23 показаны изображения трехмерных периодических структур (на стекле), изготовленных с использованием пятилучевой схемы. Длительность экспозиции 90 с при облучении импульсами с энергией 24 мкДж. Угол между пучками  $\theta = 34^\circ$ . Размер структуры 1 мм в плоскости x - y.

Периоды в плоскости  $x - y$  и вдоль оси  $z$  1.4 и 8.0 мкм соответственно. На рисунке 1.24 показаны экспериментально измеренные спектры пропускания и отражения полученных структур.

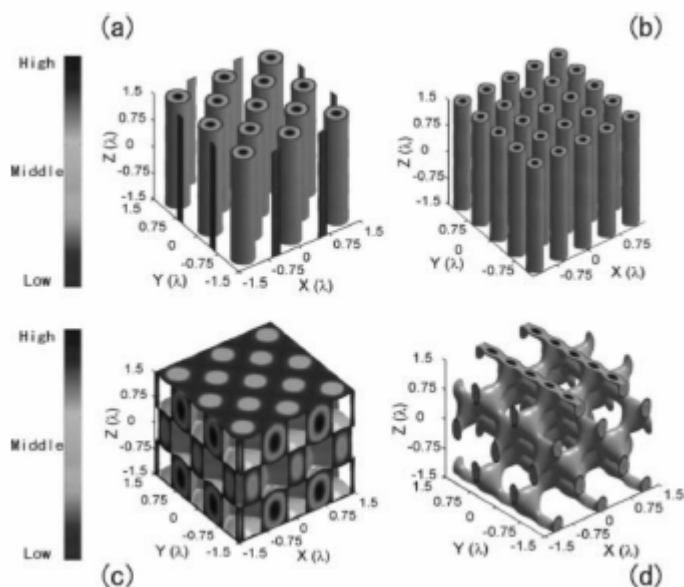


Рис.1.22. Вид интерференционных структур для четырех - (a,b) и пятиволновой (c,d) схемы. a,c – все пучки имеют одинаковую фазу, b,d – фазы пучков 2 и 4 (или 1 и 3) сдвинуты на  $\pi/2$ .

Видно, что область наибольшего пропускания практически совпадает с областью наименьшего отражения и лежит в диапазоне 2.4 – 4 мкм. Экспериментальные результаты качественно соответствуют результатам расчета с использованием уравнений Максвелла. Имеющиеся несоответствия связаны как с теоретическими допущениями, так и экспериментальными факторами, в том числе, невозможностью получения гладких краев в структурах.

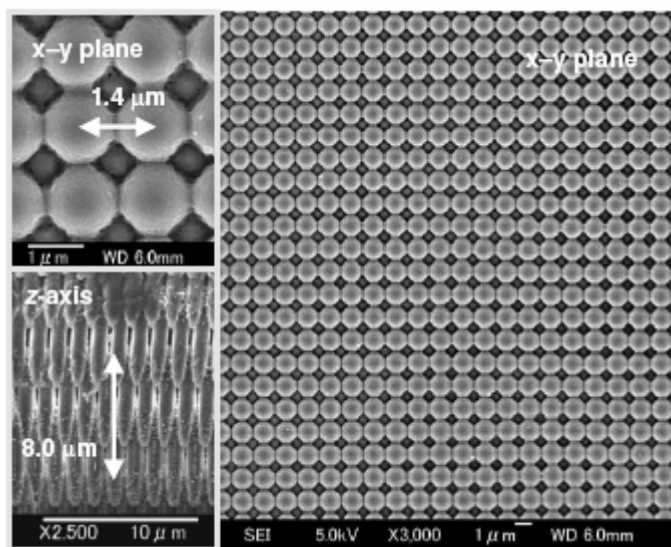


Рис.1.23. Изображения трехмерных периодических структур, изготовленных с использованием пятилучевой схемы. Периоды в плоскости  $x-y$  и вдоль оси  $z$  1.4 и 8.0 мкм соответственно.



Полученные структуры могут применяться как элементы фотоники, а также элементы микромеханических систем.

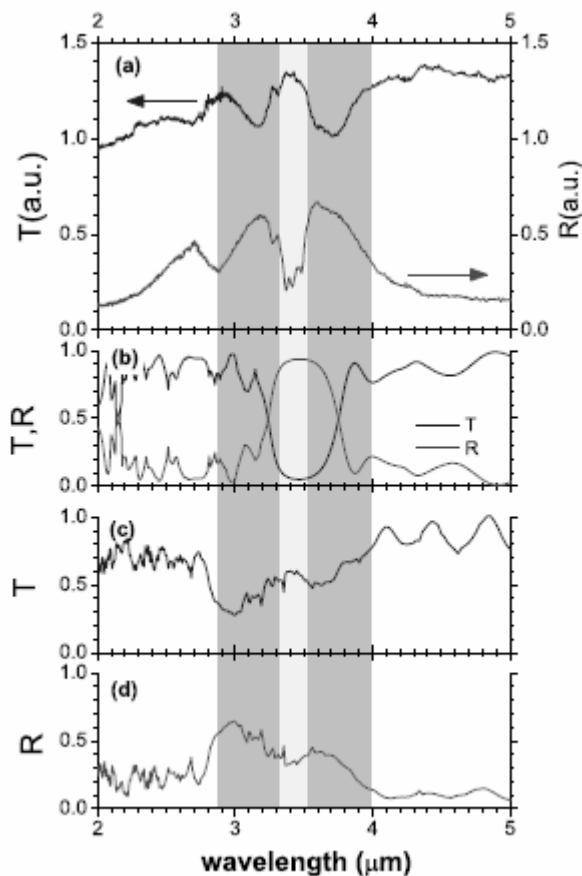


Рис. 1.24. Спектры пропускания и отражения структур, изготовленных по пятилучевой схеме.

### **5. Метод получения фотонных кристаллов с наклонными отверстиями**

Основой метода [8] является фотоотверждение полимера при сканировании лазерным пучком. В качестве источника излучения используется фемтосекундный лазер с длиной волны 800 нм, частотой повторения импульсов 1 кГц и энергией в импульсе несколько десятков наноджоулей. Для фокусировки излучения используется масляно-иммерсионный  $100\times$  объектив с числовой апертурой 1.4. В качестве регистрирующей среды применяется пленка твердого негативного фоторезиста SU – 8 с толщиной 20 мкм.

Образец устанавливается на трехкоординатный пьезо - стол, который обеспечивает разрешение порядка 5 нм и возможность сканирования области 200 х 200 х 20 мкм. Персональный компьютер управляет операцией сканирования. В области фокусировки лазерного пучка образуется отвержденная область, имеющая вид эллипсоида, размеры которого определяются энергией лазерного импульса. После экспонирования недостаточно связанный фотополимер вымывается растворителем.

Сформированная структура состоит из наклонных стержней с диаметром 360 нм, которые располагаются так, чтобы стержни смежных слоев касались. Такая конфигурация обеспечивает механическую прочность структуры. Ячейка сформированного таким способом фотонного кристалла, имеет размеры 1x1.4 мкм. Размер образца может достигать 40x40 мкм.

На рисунке 1.25 показано изображение свободно стоящего образца, полученное с помощью электронного микроскопа.

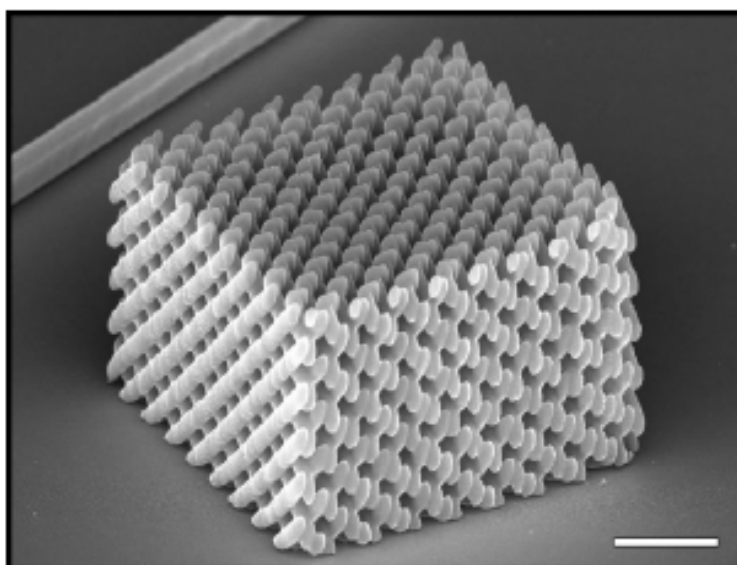


Рис.1.25. Фотонный кристалл с наклонными отверстиями. Полоса шкалы - 3 мкм.

На рисунке 1.26 приведены спектры пропускания и отражения для двух образцов с различной толщиной. Пик поглощения и отражения соответствует длине волны 1.8 мкм

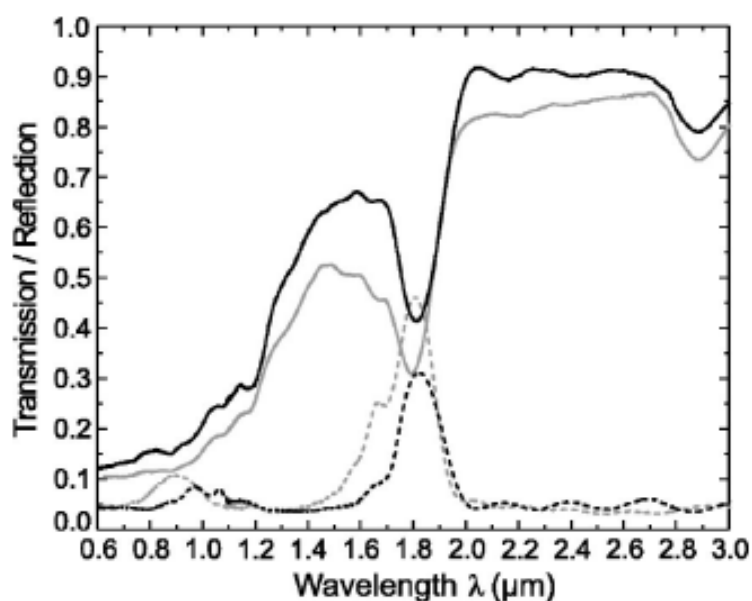


Рис. 1,26. Спектры пропускания (сплошные кривые) и отражения (пунктир) для двух образцов с толщиной 4 (черный) и 6 (серый) постоянных решетки.

Полученные структуры могут использоваться как шаблоны для изготовления кремниевых микроструктур. При этом  $\text{SiO}_2$  формируется из газовой фазы, каркас из SU – 8 уничтожается.

Сформированные структуры рассчитаны на применение в системах телекоммуникаций.

## Глава 2

# МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИТОГРАФИИ

### §1. Основы литографии

Литография в настоящее время является основным методом получения интегральных микросхем. Основой литографии является формирование микрорельефа в фоторезисте (маски), который обеспечивает возможность последующего травления материала подложки (например,  $\text{SiO}_2$ ) на незащищенных фоторезистом участках или наращивания того или иного материала на этих участках. Для формирования фоторезистивного микрорельефа используются источники оптического излучения в УФ области спектра (что связано с чувствительностью фоторезиста). Возможно также использование электронных, рентгеновских и ионных пучков. Согласно прогнозу специалистов в ближайшее десятилетие основным процессом формирования фоторезистивных масок останется оптическая литография. Рассмотрим основы метода. Основными этапами метода оптической литографии являются:

1. Создание рисунка интегральной микросхемы – фотошаблона;
2. Проекция фотошаблона в плоскость фоторезиста и формирование микрорельефа;
3. Формирование структуры на подложке (например, методом химического травления);
4. Нанесение на сформированную структуру соответствующего материала (при формировании элементов интегральных микросхем);
5. Удаление фоторезистивной маски.

На рисунке 2.1 показаны этапы процесса фотолитографии. На поверхность материала 1 (полупроводник, диэлектрик, металл или сверхпроводник) наносится тонкий слой фоторезиста 2. Для создания рельефа фоторезист (который устойчив к агрессивным химическим, электрохимическим и другим воздействиям и предназначен для создания защитного рельефа требуемой конфигурации) освещают через фотошаблон – пластину или пленку 3, на поверхности которой предварительно создан контрастный рисунок, состоящий из прозрачных 4 и непрозрачных 5 участков. В результате действия света и последующего проявления в слое фоторезиста формируется негативный (а) или позитивный (б) микрорельеф.

Собственно процесс фотолитографии на этом заканчивается. Последующее использование защитного рельефа заключается в травлении материала подложки на незащищенных фоторезистом участках или наращивании того или иного материала на этих участках, например, при электрохимическом осаждении металла на эти участки.

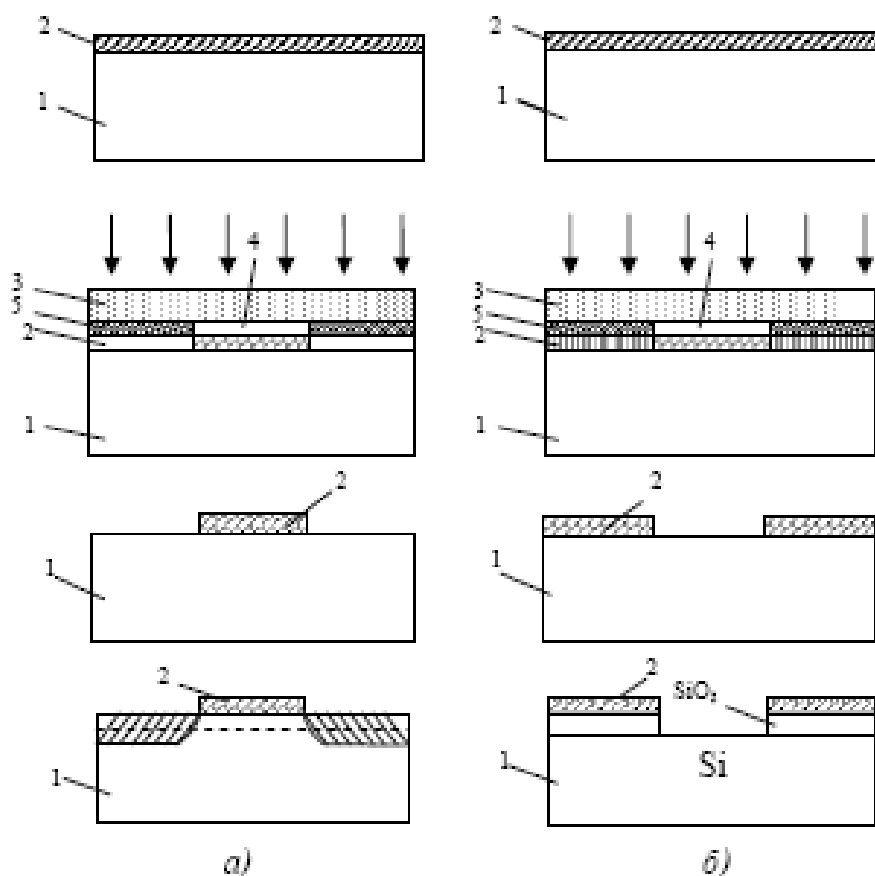


Рис. 2.1. Этапы процесса фотолитографии.  
 а – негативный фоторезист, б – позитивный фоторезист.

В зависимости от способа проектирования рисунка в плоскость фоторезиста различают контактные и бесконтактные (проекционные) методы литографии. При любом типе печати, как контактной, так и проекционной возможно ухудшение резкости края (рис. 2.2).

При контактных методах амплитудная маска накладывается непосредственно на слой фоторезиста. Контактные методы характеризуются возможностью получения малых значений  $a_{\min}$  - минимального характеристического размера, но необходимостью частой смены фотошаблона.

В проекционных методах используются оптические системы. Возможности оптической системы ограничены дифракционным пределом. Согласно критерию Рэля минимальный характеристический размер прямо пропорционален длине волны света и обратно пропорционален числовой апертуре оптической системы:

$$a_{\min} = k\lambda_0/NA, \quad (2.1)$$

$k$  – коэффициент пропорциональности,  $\lambda_0$  – длина волны в воздухе,  $NA$  – числовая апертура оптической системы:

$$NA = n \sin\theta,$$

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



Рис. 2.2. Профили распределения интенсивности в изображении для случаев контактной печати, печати с зазором и проекционной литографии.

### 1. Фоторезисты и их свойства

Термином «фоторезисты» обозначают светочувствительные и устойчивые к воздействию агрессивных факторов составы, нашедшие применение в числе прочих для фотолитографии на полупроводниках. Применяемые составы должны обладать, с одной стороны, определенными фотографическими свойствами, а с другой — резистивными, позволяющими выдерживать травление в кислотах и щелочах, нагрев и т. д. Поглощение актиничного излучения, спектральные характеристики чувствительности, резольвометрические характеристики — в этих вопросах фоторезисты близки к хорошо изученным фотоэмульсионным материалам. Основное, однако, назначение фоторезистов заключается в создании защитного рельефа требуемой конфигурации, и в этом отношении они ближе к составам, применяемым в полиграфической технике. Рельеф образуется в результате того, что под действием актиничного излучения, падающего на определенные участки слоя, последний в общем смысле слова изменяет первоначальные свойства. Появляется дифференцированная растворимость слоя: например, освещенные участки перестают растворяться в растворителе, удаляющем участки слоя, не подвергшиеся освещению. По способу образования рельефа фоторезисты удобно делить на два класса: *негативные* и *позитивные*. Различия в поведении фоторезистов обоих классов показаны на рисунке 2.3.

*Негативные* фоторезисты под действием актиничного излучения образуют защитные участки рельефа. В результате фотополимеризации, задубливания или иного процесса освещенные участки перестают растворяться и остаются на поверхности подложки. При этом рельеф представляет негативное изображение элементов фотошаблона: под непрозрачными участками фотошаблона фоторезист после обработки в растворителях удаляется, под прозрачными остаются участки, защищающие в дальнейшем от травления. *Позитивные* фоторезисты, напротив, передают один к одному рисунок фотошаблона, т. е. рельеф повторяет конфигурации

непрозрачных элементов шаблона. Актиничное излучение так изменяет свойства позитивного фоторезиста, что при обработке в соответствующих растворах экспонированные участки слоя разрушаются (вымываются). В основе создания рельефа лежит использование фотохимических реакций, преимущественно фотоприсоединения и фоторазложения. Актиничное излучение создает в слое активные центры; ими могут быть молекулы, которые, поглотив энергию фотонов, претерпевают энергетические превращения, активизируются. Фотохимическая активация, может быть прямой и сенсibilизированной. В первом случае поглотившие излучение молекулы непосредственно вступают в реакцию, например, диссоциируют на атомы или объединяются с другими молекулами. Во втором случае поглотившие излучение молекулы в реакции не участвуют, но передают свою энергию другим молекулам, в обычном состоянии к реакции не способным. Когда молекула поглощает свет, она выходит из состояния термодинамического равновесия с окружающей средой и поэтому должна терять энергию в одном из трех следующих видов: а) флуоресценции или фосфоресценции, когда вся энергия или часть ее испускается обратно в виде лучистой энергии через малый промежуток времени; б) химической энергии, т. е. путем превращения исходных веществ в новые соединения, и в) тепловой энергии, выражающейся в повышении температуры реакционной системы, или в потере энергии в окружающую среду.

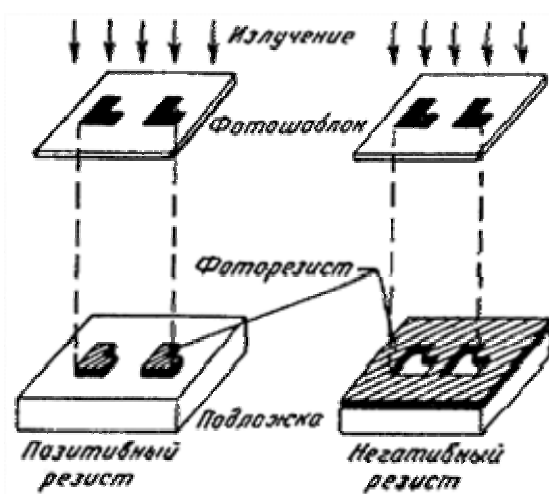


Рис. 2.3. Позитивный и негативный фоторезист.

Нанесению фоторезиста предшествует обработка подложки, улучшающая сцепление слоя резиста с подложкой (или ухудшающая смачивание подложки травителем). Для этого могут быть использованы простая очистка (обезжиривание) поверхности; физико-химическая обработка, изменяющая свойства поверхности; нанесение связующего подслоя. Для нанесения слоев на подложку можно использовать методы центрифугирования, пульверизации, купания в растворе, полива и т. д. Центрифугирование находит широкое применение в полупроводниковой технологии, так как при сравнительно несложном оборудовании позволяет

выдержать колебания толщины слоя в пределах  $\pm 10\%$ . Нанесенные на центрифуге слои зачастую содержат характерные дефекты в виде «комет». Эти дефекты возникают, если на поверхности подложки остались посторонние частицы — пыль, грязь и т.д., или сама подложка неоднородна: в пленке окисла встречаются микровключения (например, участки с кристобалитной структурой). В любом случае на таких местах вязкая масса фоторезиста задерживается и под действием центробежных сил возникают направленные от центра локальные утоньшения или даже разрывы слоя. Немаловажную роль в получении равномерного покрытия играет фильтрация самого фоторезиста. Резисты фильтруют минимум 2—3 раза через стеклянные фильтры Шотта (№ 2, 3); при высокой вязкости применяют вакуумную фильтрацию. Такая очистка позволяет избавиться от инородных частиц, пылинок и др. Более тонкой обработкой, которая устраняет имеющиеся в резистах типа поливинилциннамата субполимерные образования размером порядка 0,5 мкм, является скоростное центрифугирование. Скорость вращения центрифуги при этом 20 000 об/мин, а время, необходимое для эффективного удаления субполимерных включений, достигает нескольких десятков часов. В процессе эксплуатации вязкость фоторезистов возрастает, в результате чего растет толщина покрытия и может ухудшиться смачивание. Для контроля вязкости пригодны стандартные вискозиметры. Пульверизация резистов считается весьма перспективным методом наиболее удобным для полупроводниковой технологии. Метод пульверизации характеризуется следующими достоинствами: а) хорошо контролируемая толщина пленки, широкие интервалы изменения толщины: от 0,5 до 20 мкм; б) однородность по толщине, отсутствие утолщения на краях, неизбежно получаемого при центрифугировании; в) отсутствие проколов и нарушений пленки, возникающих на дефектах подложки за счет центробежных сил при центрифугировании; г) возможность нанесения слоя резиста на профилированную подложку, в мельчайшие углубления и отверстия подложки; д) сравнительно малый расход фоторезиста; е) высокая производительность и широкие возможности для автоматизации; ж) хорошая адгезия пленки к подложке (лучшая, чем при центрифугировании). В то же время метод пульверизации требует специального подбора растворителей, так как слой не должен стекать по подложке; тщательной очистки резиста и используемого для пульверизации воздуха или газа; наконец, разработки довольно сложного оборудования. Некоторые простейшие методы нанесения фоторезистов — купание в растворе и полив на горизонтальную плоскость, — заимствованы из полиграфической и фотографической техники. При нанесении фоторезиста купанием подложка погружается на несколько секунд, в жидкий фоторезист, после чего извлекается и сушится в вертикальном или наклонном положении. Избыток резиста стекает и окончательно удаляется с помощью беззольного фильтра. Получаемая пленка клиновидна по толщине: в нижней части подложки слой всегда толще. Этот недостаток ограничивает применение метода купания. Некоторое улучшение



однородности по толщине может быть достигнуто повторным купанием, при котором подложка опускается в раствор своей верхней частью. Несомненными достоинствами метода купания являются простота, хорошая адгезия пленки. Иногда полезную роль играет то обстоятельство, что слой наносится сразу на обе стороны подложки. Полив на горизонтальной плоскости обеспечивает лучшую по сравнению с методом купания однородность пленки по толщине (хотя при поливе неизбежно возникают утолщения по краям). Этим методом можно получать толстые слои фоторезиста — до 10—20 мкм, что затруднительно при других методах. Толстые слои обеспечивают надежную защиту при глубинном травлении; в меза-технологии часто используется метод полива. Приспособления для полива не сложны: платформа с тремя регулировочными винтами или (лучше) подвес маятникового типа с перпендикулярной площадкой. Толщина слоя при поливе регулируется изменением концентрации нанесенного фоторезиста. Операцией, завершающей формирование слоя, является сушка. Общие представления о механизме плёнообразования основаны на следующих положениях: структура большинства цепных полимеров аморфна; молекулы полимеров имеют клубкообразную форму за счет того, что отдельные звенья молекулы подвижны относительно друг друга; при испарении растворителя пленкообразователи (полимеры) переходят в стеклообразное состояние. Процесс испарения растворителя играет важную роль в образовании пленки. Одним из условий получения качественной пленки является определенная низкотемпературная выдержка после нанесения раствора полимера, необходимая для ориентации макромолекул. Последующее высушивание пленки при повышенной температуре приводит к интенсивному удалению растворителя. Следует учесть, что при формировании пленки макромолекулы стремятся перейти в устойчивое состояние, т. е. принять такую форму, которая соответствовала бы минимальному значению свободной энергии. Этот релаксационный процесс требует некоторого времени, поэтому слишком быстрая сушка может привести к возникновению напряжений в пленке. Иногда рекомендуется инфракрасная сушка слоя; она эффективна для формирования толстых слоев — порядка 3—5 мкм и выше; для обычных же толщин (0,3—0,4 мкм) различие в методах сушки мало заметно. Хорошие результаты при работе с толстыми слоями позитивных резистов (например, для глубокого травления кремния) дает вакуумная сушка с медленным повышением температуры.

## **2. Формирование защитного рельефа**

### *Фотошаблоны и их характеристики.*

В любом фотолитографическом методе — контактном, проекционном, и в методе сканирующего луча — необходимым отправным пунктом является некоторый *шаблон*, образец, содержащий информацию о размерах, расположении, конфигурации и т. д. получаемых изображений.

Чаще всего для этой цели используются пластинки из оптического стекла с полученными фотографическим или иным способом непрозрачными

элементами, хотя для решения некоторых задач могут применяться, например, плоские металлические пластинки со сквозными отверстиями.

При наличии современных фоторезистов и отработанной технологии качество фотолитографии во многом определяется качеством фотошаблонов, а производство их является в настоящее время одним из наиболее сложных процессов, связанных с фотолитографией. Сложность изготовления высококачественных фотошаблонов для распространенной в настоящее время контактной фотолитографии определяется их специфическими особенностями:

1. Высокая разрешающая способность. Фотошаблон содержит элементы весьма малых размеров: от 0,1 мкм

2. Большое количество идентичных изображений, количество изображений доходит до 20000.

3. Высокая контрастность изображения, т. е. максимально большая оптическая плотность непрозрачных участков и прозрачность остальных областей, оптические свойства фотошаблонов измеряют в видимом диапазоне, а используют фотошаблоны, как правило в УФ области. Учет спектральных свойств материала фотошаблона является характерной особенностью фотолитографии на полупроводниках.

4. Высокая точность соблюдения размеров элементов и шага между элементами, точность по размерам и точность по шагу определяются необходимостью последовательного совмещения фотошаблонов комплекта. В полупроводниковой технологии в 90% случаев используется не отдельный фотошаблон, а комплект из многих (до 20) фотошаблонов, степень совмещаемости которых целиком зависит от указанных точностей.

5. Высокое качество и однородность, под однородностью при этом понимается равномерно высокое качество всех повторяющихся изображений.

6. Стабильность характеристик (геометрических, оптических и др.). Фотошаблоны, например, не изготавливаются на фото пленке (хотя насчитывается немало сортов пленки с весьма высокой разрешающей способностью), так как размеры элементов и взаимное их расположение не должны меняться с изменением влажности и температуры окружающей среды.

7. Высокая устойчивость к истиранию, эмульсионный фотошаблон теряет качества после 20 операций контактной печати, металлизированные, в частности хромовые, фотошаблоны обладают гораздо большей (по некоторым данным в 3000 раз) износоустойчивостью, нежели эмульсионные.

8. Плоскостность рабочей (контактной) стороны шаблона.

### *Совмещение изображений*

Одной из важнейших стадий является совмещение изображений на шаблоне и подложке.

Возможны, в принципе, два метода совмещения, назовем их базовым и визуальным. При базовом методе шаблоны комплекта укрепляются в специальных приспособлениях — рамках, снабженных установочными

микрометрическими винтами. С помощью этих винтов под микроскопом фотошаблоны выставляются таким образом, чтобы элементы их совпадали для всего комплекта. В рамках предусмотрены также фиксирующие упоры или плоскости. На пластинке полупроводника должны быть выполнены особые базовые отметки. Чаще всего от круглой пластинки отрезают сегмент, базой служит получающийся срез. Пластина прижимается двумя точками базового среза и одной точкой окружности к фиксирующим элементам рамки; тем самым положение пластины точно определяется. При повторной фотолитографии пластина устанавливается в рамку со вторым фотошаблоном и снова выставляется фиксирующими элементами в точно такое же положение, как и на первой рамке. Изображения второго фотошаблона в результате совмещаются с изображениями, оставшимися на пластине после первого фотошаблона (и так далее для всех шаблонов комплекта). Базовый метод отличается простотой и высокой производительностью, однако ему свойственны принципиальные ограничения: малая точность и чувствительность к повреждениям пластинки. Малая точность совмещения объясняется тем, что воспроизводимым образом прижимать пластинку к фиксирующим элементам рамки трудно; метод позволяет реализовать точность порядка  $\pm 10$  мкм. Еще более ограничивает применимость метода то обстоятельство, что при повреждении базовых поверхностей пластинка переходит в неисправимый брак. Визуальный метод заключается в том, что изображение на пластине непосредственно наблюдается (под микроскопом) в неактиничном свете и совмещается с изображением на фотошаблоне при помощи, например, микрометрических подач. Собственно, эта же операция визуального совмещения входит неотъемлемой частью и в базовый метод, когда фотошаблоны выставляются в рамках.

### *Экспонирование фоторезиста*

Экспонирование фоторезиста может осуществляться контактным или проекционным способом. В любом случае под действием актиничного излучения в слое образуются локальные участки с изменившимися свойствами. Выбор источника, пригодного для экспонирования того или иного фоторезиста, определяется спектральным распределением чувствительности данного резиста. Для экспонирования резистов пригодны угольные дуги, ртутно-кварцевые лампы сверхвысокого и высокого давления типа ПРК-2, ПРК-4, СВДШ-250, СВД-120 и др. Зная спектральные характеристики фоторезиста и источников, можно рассчитывать какой из них наиболее эффективен.

### *Проявление и сушка рельефа.*

Процесс проявления для негативных и позитивных фоторезистов заключается в удалении ненужных участков слоя; в результате на поверхности подложки остается защитный рельеф требуемой конфигурации.

Однако, если у негативных фоторезистов проявление является простым удалением неполимеризованных областей (иногда в том же растворителе, который использовался для приготовления резиста), то у позитивных проявление связано с химической реакцией превращения инден-карбоновых кислот в растворимые соли. Проявление позитивных слоев — критичный процесс, зависящий от ряда факторов: а) тип проявителя (щелочное соединение, добавки и др.) и его концентрация; б) время и температура проявления; в) дополнительное механическое удаление растворенных участков. Для проявления позитивных фоторезистов на основе хинондиазидов обычно используют сильно разбавленные водные растворы едкого натра или тринатрийфосфата. Некоторые фирмы прилагают к фоторезистам специализированные проявители. Сушка проявленного рельефа отличается от сушки слоя тем, что при ней можно не опасаться теплового сшивания (или разрушения) фоторезиста. Соответственно температура второй сушки задается более высокой – это повышает защитные свойства рельефа.

### **3. Травление подложки с защитным рельефом и удаление защитного рельефа**

В полупроводниковой технологии широко распространен химический способ удаления. Это связано с тем, что германий, кремний и окисленный кремний можно обрабатывать в концентрированных кислотах, хорошо разрушающих органические пленки. Существуют универсальные обработки, позволяющие удалять как негативный, так и позитивный фоторезисты. Позитивный резист хорошо удаляется холодным 10—15%-ным раствором едкого кали, однако после этого необходима тщательная отмывка, так как ионы щелочных металлов активно адсорбируются на поверхности подложки. В планарной технологии, где ионы щелочных металлов могут явиться причиной нестабильности окисловой пассивирующей пленки, удалять рельеф следует кипячением в чистой серной кислоте. В тех случаях, когда обработка в серной кислоте недопустима, например, при удалении рельефа с пленки алюминия, применяют кипячение в органических растворителях, чаще всего трихлорэтилене. Хорошие результаты обеспечивает длительное набухание рельефа в хлористом метиле (для поливинилциннамата) или смеси диоксана с ацетоном, диоксане (для нафтохинондиазида с новолаком) с последующей протиркой. В комплекты реактивов для фотолитографии, выпускаемые рядом зарубежных фирм, как правило, входят составы для удаления фоторезиста.

### **4. Организация производства фотолитографического процесса**

В технологии полупроводниковых приборов фотолитография и связанные с нею процессы занимают едва ли не самое значительное место. Создать современный производственный участок фотолитографии сложно и дорого в основном по двум причинам: а) необходима тщательная изоляция от влияния внешней среды и б) требуется сложное и точное оборудование.

Пожалуй, ни одна область технологии не требует выполнения стольких условий: обеспыленность, поддержание определенной влажности и температуры, защита от действия света, вибраций и влияния вредных примесей в атмосфере. Известно, например, что при содержании в окружающей среде незначительного количества паров аммиака качество фотолитографии резко ухудшается. Для защиты от большинства внешних влияний и в первую очередь от пыли, фотолитографические процессы проводятся в специальных помещениях, «белых комнатах». Характеристики фотолитографических помещений: температура  $22 \pm 3,5^\circ\text{C}$ ; относительная влажность 25% (в помещениях для диффузии — 50%); смена воздуха от 50 до 55 объемов в 1 ч при добавлении 10% свежего воздуха каждый раз; размер пылинок не более 0,5 мкм. Работники попадают в помещение через специальные воздушные души, снимающие пыль со спецодежды. Сама спецодежда выполняется из моноволокна капрона (нейлона). Несмотря на такие высокие характеристики помещений, большинство фотолитографических операций проводятся в герметичных скафандрах. Скафандры выполняются из нержавеющей полированной стали и оргстекла. Внутренние углы скафандра должны быть закругленными, чтобы не накапливалась пыль. В наиболее совершенных скафандрах предусмотрено электростатическое удаление пыли.

Все операции можно разделить на индивидуальные и массовые. К первой группе относятся, безусловно, операции экспонирования и совмещения, в меньшей мере — операция нанесения. Иногда и проявление проводится индивидуальным порядком, например, если применяется вращение пластин или проявителя. Массовые операции — обработка подложек, сушка резиста, травление, удаление резиста. Производительность фотолитографического участка определяется в первую очередь индивидуальными операциями. Поэтому практически хорошо зарекомендовала себя схема производственного участка с дублируемыми установками нанесения и совмещения. При дублировании возрастает не только производительность, но и надежность работы участка. Для увеличения производительности созданы многошпиндельные центрифуги — для нанесения резиста на три — пять пластин одновременно с регулируемым независимо числом оборотов до 16000 об/мин, а также многопозиционные установки совмещения карусельного типа. Увеличение производительности и переход на полуавтоматическое нанесение резиста обеспечивается применением метода распыления.

Наиболее сложное и прецизионное оборудование требуется на операциях экспонирования и совмещения. Установка экспонирования и совмещения состоит из основных узлов: оптической системы (микроскопа), механизма совмещения и источника ультрафиолетового излучения. На первых стадиях разработки установок совмещения самым трудным представлялось выполнение механизма точных перемещений. В настоящее время положение несколько изменилось: точность совмещения лимитируют микроскопы, от которых требуется переменное увеличение, большие поля

зрения и рабочие расстояния, высокая разрешающая способность. В современных установках используются бинокулярные микроскопы с двумя объективами, расстояние между которыми можно менять в пределах от 12 до 25 мм. Увеличение самого микроскопа изменяется от 19-кратного— для грубой наводки при предварительном совмещении, до 1100-кратного — для контроля перемещений порядка долей микрона ( $\pm 0,25$  мкм). Разрешающая способность—не ниже 400 линий на 1 мм; в лучших моделях до 2 000 линий на 1 мм. В установке совмещения требуется большое рабочее расстояние микроскопа. Обычно эта величина составляет 10—35 мм при 100-кратном увеличении.

Механизмы совмещения обычно выполняются трех типов: пантографы, винтовые и кулачковые. Трудно отдать предпочтение какому-либо из них; пантограф, например, удобен тем, что позволяет легче менять передаточное отношение в широких пределах от 30:1 до 100:1; кулачковый механизм удобен в работе и более надежен. Наибольшую точность—до  $\pm 0,25$  мкм —обеспечивает в настоящее время винтовой механизм, состоящий из двух взаимно перпендикулярных микрометрических подач. Крепление пластины обычно вакуумное, шаблона чаще всего— механическое. Между шаблоном и пластиной при совмещении создается зазор, точно регулируемый в широких пределах (от 0 до 127 мкм). Это позволяет работать с пластинами разной толщины— от 50 мкм до 750 мкм. В некоторых установках регулировка зазора осуществляется автоматически. Иногда для ускорения рабочего цикла применяют предварительное совмещение в отдельной рамке или автоматизируют загрузку и выгрузку пластин. Столик, на котором крепится пластина, самоустанавливающийся, на воздушной подушке.

К источнику ультрафиолетового излучения предъявляются такие требования как строгая перпендикулярность светового пучка к пластине, равномерность облученности по полю диаметром 40—60 мм, иногда выделение с помощью фильтров излучения более узкого спектрального диапазона.

Хорошо приспособлены к автоматизации массовые процессы — проявление, промывка, сушка. В последнее время созданы автоматические установки проявления, промывки и сушки, рассчитанные на одновременную обработку 10 и более пластин с фоторезистом. Экспонированные пластины укладываются оператором рабочей поверхностью вверх в дискообразный держатель. После того как оператор загрузил держатель с пластинами в установку, он включает пусковую кнопку, и дальнейшие операции выполняются автоматически. Установка позволяет изменять число и последовательность циклов обработки: проявление — проявление — промывка; промывка — проявление — промывка; проявление—промывка—промывка. В последнем варианте для промывок могут быть использованы два различных состава, например, ацетон и затем спирт. Установка может быть дополнительно оборудована для проведения общим счетом восьми химических циклов. Важно отметить, что любой из перечисленных выше

циклов можно выключить из последовательности, а также прервать в требуемый момент времени для визуального контроля пластин. Прерванный цикл продолжается далее автоматически с той же точностью соблюдения времени обработки, поскольку в электронных реле предусмотрена оперативная память.

## **§ 2. Глубокая литография для получения MEMS структур**

### **1. Специальные типы фоторезистов для «глубокой» литографии и их применение для получения MEMS структур**

Развитие микромеханических систем и узлов (MEMS) в последнее время потребовало разработки новых типов фоторезистов, обеспечивающих получение трехмерных структур, высота которых значительно больше ширины. Необходимо отметить, что классические фоторезисты предназначены только для получения планарных структур. Следовательно, создание трехмерных элементов, высота которых существенно больше ширины требует и создания принципиально новых материалов для их реализации.

Рассмотрим подробнее элементы MEMS, для которых необходимы эти новые материалы.

Благодаря развитию технологий изготовления микрокатушек, электромагнитные компоненты приобретают все большее значение для MEMS. Помимо использования в качестве приводных элементов электромагнитных микроактюаторов, микрокатушки могут применяться как индуктивные элементы электронных схем, а также чувствительных элементов датчиков и телеметрических приборов.

Для построения электромагнитных микроактюаторов требуется интегрировать в катушки магнитомягкие структуры, обеспечивающие концентрирование магнитного потока. Для снижения омического и магнитного сопротивлений необходимо, чтобы сечение соответствующих структур было достаточно большим. Параметры индуктивных датчиков также улучшаются при увеличении сечения проводников, благодаря снижению сопротивления (постоянному току) и повышению добротности (Q). Кроме того, увеличение сечения ферромагнитных структур повышает чувствительность датчиков, что позволяет реализовывать высококачественные датчики магнитного поля.

Неудивительно, что в настоящее время разработки технологий изготовления многослойных катушек с большим форматным соотношением и интегрированными концентраторами магнитного поля, ведутся во многих лабораториях. И если тонкопленочная технология позволяет получать слои толщиной лишь в несколько микрон, использование аддитивных процессов с применением глубокой УФ-литографии и гальванопокрытий позволяет формировать микроструктуры высотой в десятки микрон.

В принципе, возможные геометрии катушек можно разделить на две категории: планарные спиральные одно- или многослойные катушки, создающие вертикальный магнитный поток, и трехмерные винтовые или «меандрические» катушки, создающие горизонтальное магнитное поле (рис.2.4).

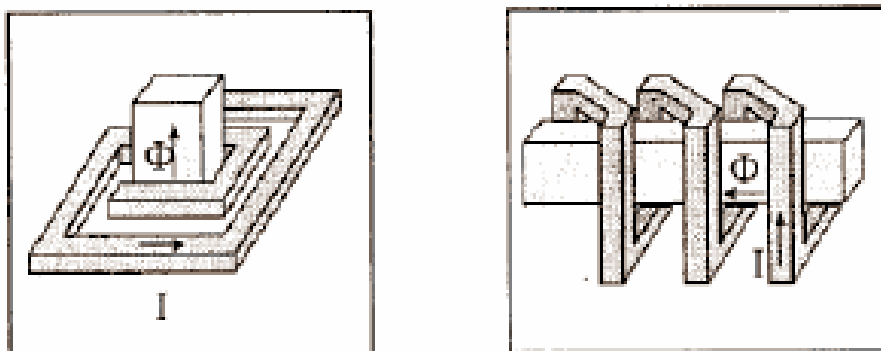


Рис. 2.4. Схема базовых конструкций микрокатушек: планарная спиральная катушка (слева) и объемная (3D) винтовая (справа)

Катушка, изображенная слева может быть изготовлена по стандартной технологии с использованием литографии, в то время как катушка, изображенная справа требует либо ручной намотки, что неприемлемо для массового производства, либо использование принципиально новой технологии, позволяющей изготовить объемную структуру.

Процесс изготовления, предназначенный для получения таких структур называется глубокой литографией и требует использования специальных фоторезистов. Изготовление катушки, изображенной на рисунке 2.4 справа предполагает проведение следующих операций: глубокая УФ-литография, гальваническое нанесение меди (проводящей структуры), никеля (магнитной структуры) и полимерной изоляции, выравнивание промежуточных слоев.

#### *Технология.*

Недавно были разработаны новые типы фоторезистов, позволяющие экспонировать толстые слои резиста в УФ лучах, например позитивный резист AZ9260 (пр-ва Clariant) на основе Novolak предназначенный для формирования микроформ с большим форматным соотношением (отношение высоты к ширине). Кроме того, используется эпоксидный негативный фоторезист SU8, использованный в целях изоляции и выравнивания.

Весьма вязкий резист AZ9260 оптимизирован для использования при прецизионной гальванопластике с толщиной слоя до 100 мкм. При этом удается обеспечить угол между боковой стенкой и подложкой в 92 градуса. Очень крутой наклон боковых стенок позволяет получать форматное соотношение (ФС) до 9 (рис. 2.5). На данный момент этот результат превзойден только негативным резистом SU8. Что касается SU8, разработан процесс для пленок с толщиной от 300 до 400 мкм. При этом удается



добиться почти вертикальных стенок с форматными соотношениями до 36 (рис. 2.6).

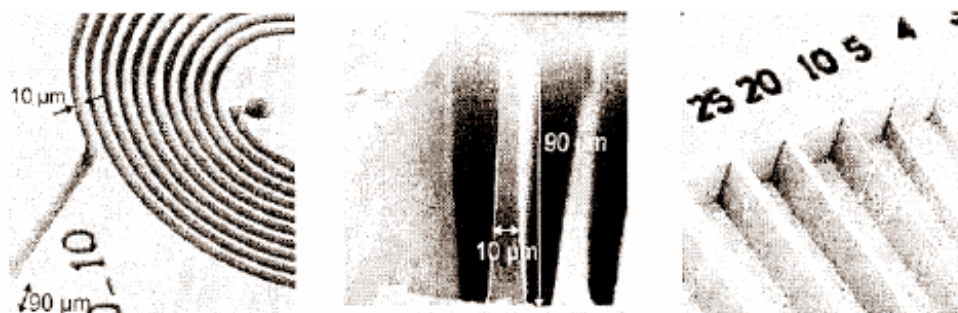


Рис. 2.5. Глубокая литография с использованием резиста AZ9260 на основе DNQ/Novolak: структура катушки с минимальным просветом в 10 мкм при высоте в 90 мкм (слева), срез слоя резиста (в центре), тестовая структура для определения разрешения и угла между боковыми стенками и подложкой (справа)

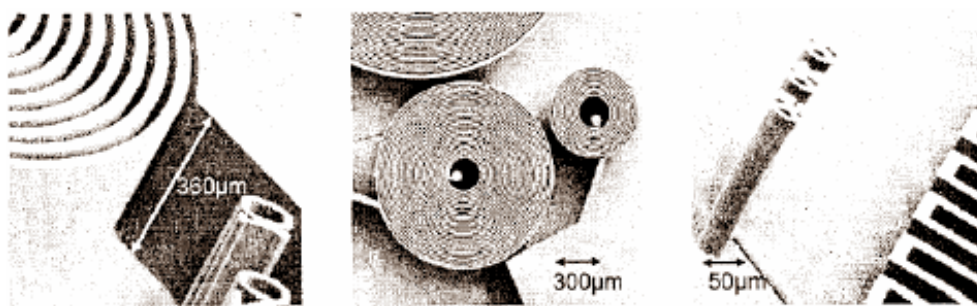


Рис. 2.6. Глубокая литография с использованием SU8 на эпоксидной основе: структура с минимальным размером элемента 10 мкм при высоте в 360 мкм



Рис. 2.7. Схематичный срез (слева) и СЭМ- (сканирующий электронный микроскоп) микрофотография (справа) внеплоскостной меандрической катушки

Как пример применения данного процесса можно привести технологические последовательности для формирования как спиральных, так и винтовых катушек. В обоих случаях ферромагнитное ярмо и полюсы интегрируются в профилированный диэлектрик катушки. Примером может служить винтовая катушка на рисунке 2.7, где показан схематичный срез

катушки, а также СЭМ-фотография внеплоскостной меандрической катушки. Катушки сформированы вокруг планарных полюсов и состоят из множества верхних и нижних проводников, соединенных через несколько слоев диэлектрика с помощью переходных отверстий.

Технологический процесс состоит из глубокой УФ-литографии с AZ9260 для создания форм (для последующей гальваностегии) с большим ФС, гальваническое нанесение меди и NiFe (нанесение проводящих и ферромагнитных структур), нанесение SU8 для изоляции, формирование и микропрофилирование межслойных соединений с высоким ФС.

### *Индуктивные микродатчики*

Важными элементами MEMS являются микродатчики на базе катушек. Например, датчик приближения на вихревых токах (показан на рисунке 2.8) состоит из обмотки возбуждения и измерительной обмотки. Две почти идентичные концентрические катушки имеют хорошую магнитную связь и создают тороидальный магнитный поток. При приближении проводящего объекта характер магнитной связи изменяется из-за возникающих вихревых токов, что в свою очередь приводит к изменению амплитуды и фазы колебаний. Точное измерение расстояния достигается в диапазоне до нескольких миллиметров. Чувствительность устройства может быть существенно повышена при использовании магнитомягкого сердечника, несмотря на дополнительные потери от вихревых токов в проводящем магнитном материале (пермаллоев). Повышение чувствительности на примере двух идентичных датчиков с сердечником и без продемонстрировано на рисунке 2.8.

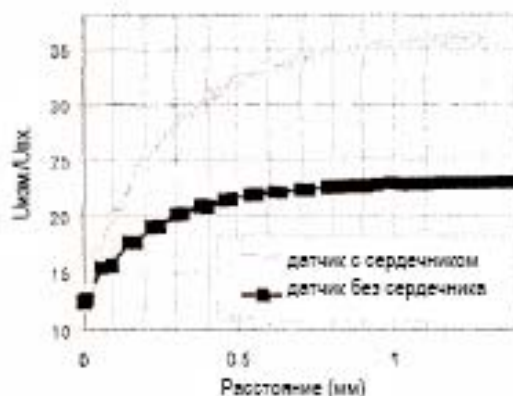


Рис. 2.8. Датчик приближения на вихревых токах с двумя вложенными трансформаторными обмотками: СЭМ-фотография (слева), возрастание чувствительности при использовании магнитомягкого сердечника (справа)

Технология получения катушек применима также к микродвигателям с бегунком (ротором), перемещающемся по направляющим. Структура катушек формируется в виде меандрической «надплоскостной» обмотки вокруг статорных полюсов, лежащих на плоскости подложки. Благодаря этому формируется горизонтальный поток. Бегунок (ротор) представляет собой «гребенчатую» траверсу с полюсными расширениями («зубцами»),

расположенными между полюсами статора. Смонтированный бегунок со статором в сборе имеет размеры 8.7 мм. Для снижения трения в структуры был введен рубиновый шарикоподшипник (рис. 2.9).

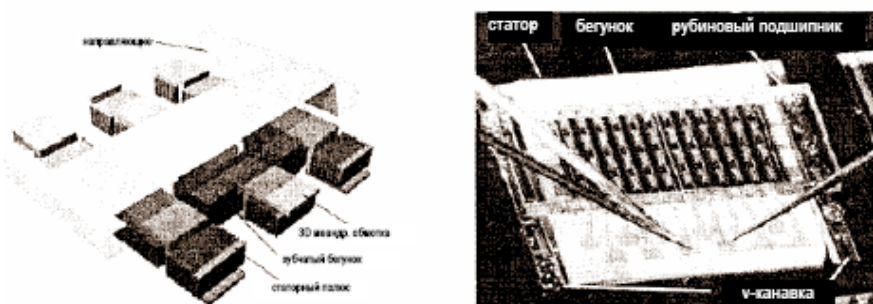


Рис. 2.9. Линейный индукторный микродвигатель с горизонтальным потоком: принцип действия (слева), микрофотография (справа).

Основные свойства фоторезистов для глубокой литографии, на которых основано создание данных элементов.

В отличие от обычных резистов, резисты для глубокой литографии основаны на применении смесей мономеров и олигомеров, имеющих малый молекулярный вес. Следовательно, резист нанесенный на подложку из раствора быстро высыхает – растворители легко диффундируют и удаляются через слой низкомолекулярного олигомера. Это свойство позволяет наносить толстые слои фоторезиста – до 2 мм толщиной, что необходимо для формирования высоких структур. Для сравнения – толщина слоя обычного фоторезиста составляет обычно 0,5 – 5 мкм. Конечно, слой, полученный из олигомера непрочный и неровный, поскольку прочность определяется длиной полимерных цепей, а ровная поверхность обусловлена поверхностным натяжением полимерной пленки при высыхании, которое также определяется длиной цепи. Однако, поскольку данный резист негативный, т.е. формирование рельефа происходит при его полимеризации УФ излучением, после полимеризации он приобретает необходимую прочность и низкая прочность свежее политого слоя не является большим недостатком.

На рисунке 2.10 представлена в качестве примера молекула такого фоторезиста SU8, состоящая всего из 3-х звеньев цепи, в то время как цепь обычных полимеров состоит из сотен звеньев.

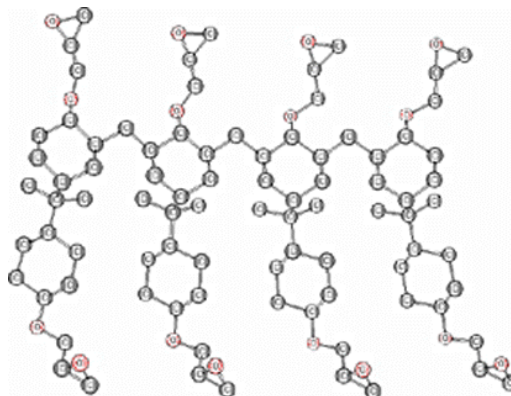


Рис. 2.10. Молекула фоторезиста SU8.

С другой стороны, поскольку полимерная цепь – короткая, необходимо в каждое звено включить все необходимые функциональные группы, что является сложной, но выполнимой для современной органической химии задачей.

Таким образом, фоторезисты для глубокой литографии являются новыми материалами, родившимися в результате потребностей получения трехмерных высоких структур. Возможности фоторезиста такого типа показывает фотография высокой структуры, приведенная на рисунке 2.11.

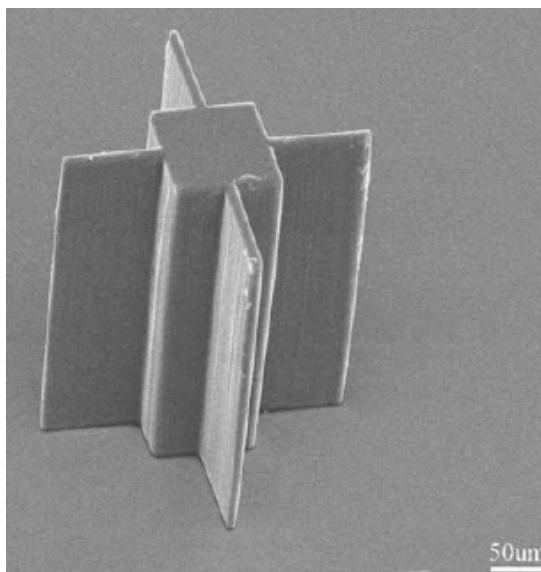


Рис. 2.11. «Высокая структура», полученная с использованием резиста SU8

### **§ 3. Современные технологии оптической литографии**

Ключевым моментом развития микроэлектроники и других применений литографии является уменьшение  $a_{\min}$ . Современные методы литографии обеспечивают возможность формирования структур микронных размеров. Перспективной задачей является продвижение в нанометровую область.

#### **1. Нанолитография в экстремально дальнем ультрафиолете**

Для реализации нанолитографа в экстремально дальнем ультрафиолете (ЭУФ) [9] необходимы соответствующие источники излучения. Специалисты корпорации Intel считают возможным достижение рубежа 0.065 мкм с использованием эксимерных лазеров с длиной волны 193 нм. Однако, продвижение в сторону уменьшения данного размера требует новых решений.

Отсутствие необходимых оптически прозрачных материалов в ЭУФ вынуждает переходить от обычной к зеркальной оптике. Одной из важных проблем на этом пути является создание оптических элементов с высоким

коэффициентом отражения в ЭУФ. Возможным решением этой проблемы является использование многослойных брэгговских зеркал на Mo – Si. Идея нанолитографа на проекционной отражательной оптической системе показана на рисунке 2.12.

Нанолитограф состоит из четырех блоков:

- 1 – источник ЭУФ излучения, освещающий маску,
- 2 – узел маски, несущий изображение чипа,
- 3 – оптическая система,
- 4 – узел образца с ЭУФ фоторезистом.

*Источник излучения.*

В качестве источника излучения могут быть использованы:

- лазерная плазма, возбуждаемая импульсным излучением лазерного источника;

- высокотемпературная плазма, формируемая разрядными методами – z-пинч,  $\theta$ -пинч, капиллярный разряд и др., образованная при взаимодействии с тяжелыми металлами, инертным газом – ксеноном, оловом.

В качестве первичного источника в большинстве работ отдается предпочтение твердотельным лазерам с диодной накачкой, рассматриваются также эксимерные лазеры.

*Оптическая система.*

Система должна быть зеркальной, но с минимальным количеством брэгговских зеркал, что связано с возможными потерями при невыполнении условия Брэгга. Возможно обеспечение оптимального соотношения числовой апертуры (которая не может быть высокой в зеркальной системе) и величины поля изображения. Для улучшения качества изображения может использоваться голографическая коррекция.

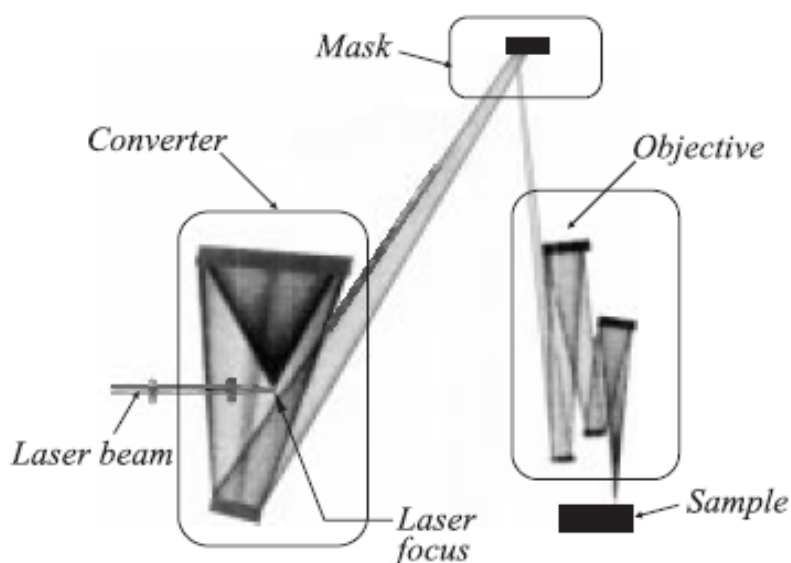


Рис. 2.12. Обобщенная схема ЭУФ нанолитографа с «лазер-плазменным» источником излучения.

### *Шаблон.*

Возможно использование шаблонов, представляющих собой брегговское зеркало с нанесенным слоем вещества сильно поглощающего УФ излучение (W, Ta, TaN, Cr и др.) Микрорисунок может быть нанесен различными методами, в том числе, методом фотолитографии.

### *Фоторезист.*

Основная проблема состоит в том, что все природные материалы являются высоко поглощающими в ЭУФ, поэтому формирование рельефа возможно в тонком приповерхностном слое. Фоторезист должен обладать чувствительностью 5-10 мДж/см<sup>2</sup> и обеспечивать необходимые химические свойства. В связи с необходимостью уменьшения  $a_{\min}$  до единиц нанометров особо актуальна проблема размытия края. Для решения указанных проблем в настоящее время наиболее приемлемыми могут быть полимеры с введением ароматических углеводородных радикалов, кремний-водородные (силановые) и силаксановые полимеры. Фоторезист должен обеспечивать также высокий контраст для компенсации уменьшения числовой апертуры зеркальных объективов.

### *Прочие проблемы.*

При создании нанолитографа необходимо решить также проблемы точной механики – прецизионного стола, оптической юстировки, вибро- и пылезащиты.

По мнению специалистов, создание нанолитографа на основе передовых достижений науки и техники является реальной, но сложной задачей.

## **2. Иммерсионная литография**

Более простым и неожиданным решением оказалась возникшая совсем недавно и интенсивно развиваемая идея иммерсионной литографии [10]. Сущность метода заключается в введении в пространство между последней поверхностью объектива и слоем фоторезиста иммерсионной жидкости (рис. 2.13).

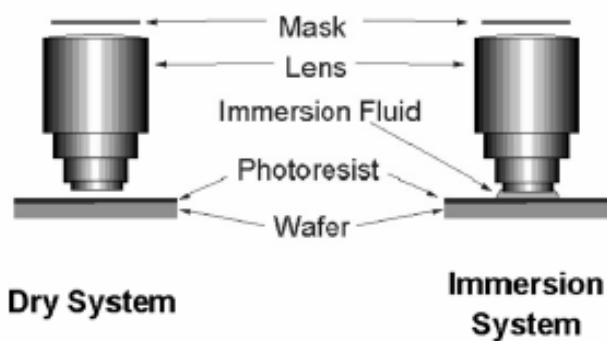


Рис.2.13. Схемы воздушной и иммерсионной систем.

Простейшим вариантом иммерсии является вода. На рисунке 2.14 а показан ход лучей в воздушной среде и при использовании воды в качестве иммерсии с показателем преломления 1.44. показатели преломления материалов линзы и фоторезиста 1.56 и 1.75 соответственно.

Рисунок 2.14 б показывает возможность увеличения разрешения при сохранении угла в иммерсионной среде. С учетом того, что разрешающая способность оптической системы пропорциональна отношению  $\lambda_0/n\sin\theta$ , а глубина резкости пропорциональна отношению  $\lambda_0/n\sin^2\theta/2$ , можно заключить, что использование иммерсии с показателем преломления превышающим показатель преломления воздуха позволяет увеличить разрешающую способность и глубину резкости.

Как отмечалось выше, идея нанолитографа основана на уменьшении длины волны. Применение иммерсии фактически эквивалентно уменьшению длины волны. Так, если длина волны литографа с эксимерным лазером 193 нм, то при использовании иммерсии с показателем преломления 1.44 рабочая длина волны сокращается до  $\lambda_0/n = 135$  нм.

Проблемами иммерсионной литографии являются:

- использование сред с большим показателем преломления;
- исключение неоднородностей в иммерсионной жидкости – пузырей и завихрений, которые возникают при перемещении пластинок относительно объектива с высокой скоростью;
- исключение возможных температурных изменений;
- устранение посторонних включений.

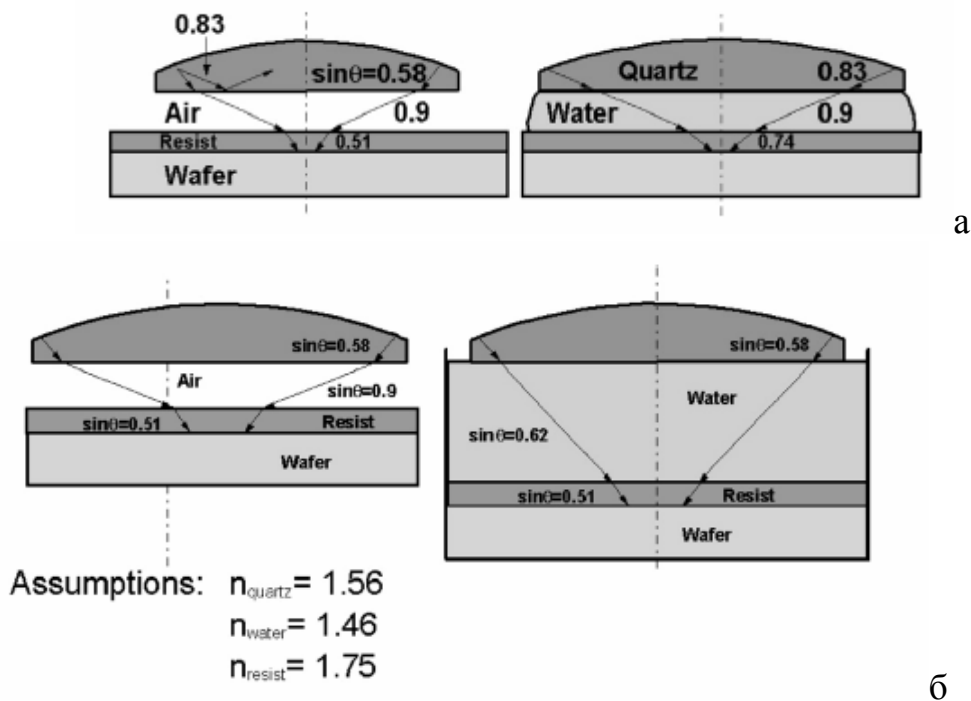


Рис. 2.14. Принцип иммерсионной литографии.  
а – сохранение угла в фоторезисте, б – сохранение угла в иммерсии.

Применение иммерсионного метода (согласно сообщениям [9,10]) позволит выйти на характеристические размеры 35 – 65 нм (эквивалентные

размерам, прогнозируемым корпорацией Intel) без изменения существующих установок.

### 3. Голографическая литография

#### *1. Используемые принципы голографии*

Не смотря на постоянное продвижение в сторону уменьшения характеристических размеров при использовании методов классической литографии (по прогнозу специалистов эта тенденция приближается к насыщению), представляют интерес методы, базирующиеся на совершенно новых принципах. К таким методам относятся методы голографической литографии. Прежде, чем перейти к рассмотрению конкретных технических решений, остановимся на основных используемых принципах голографии.

#### *Образование голограммы.*

Голограмма представляет собой зарегистрированный результат взаимодействия (интерференции) двух или более когерентных волн. Таким образом, для получения голограммы когерентное излучение, идущее от лазера, необходимо разделить на два пучка, один из которых освещает объект, а другой служит опорным (рис. 2.15).

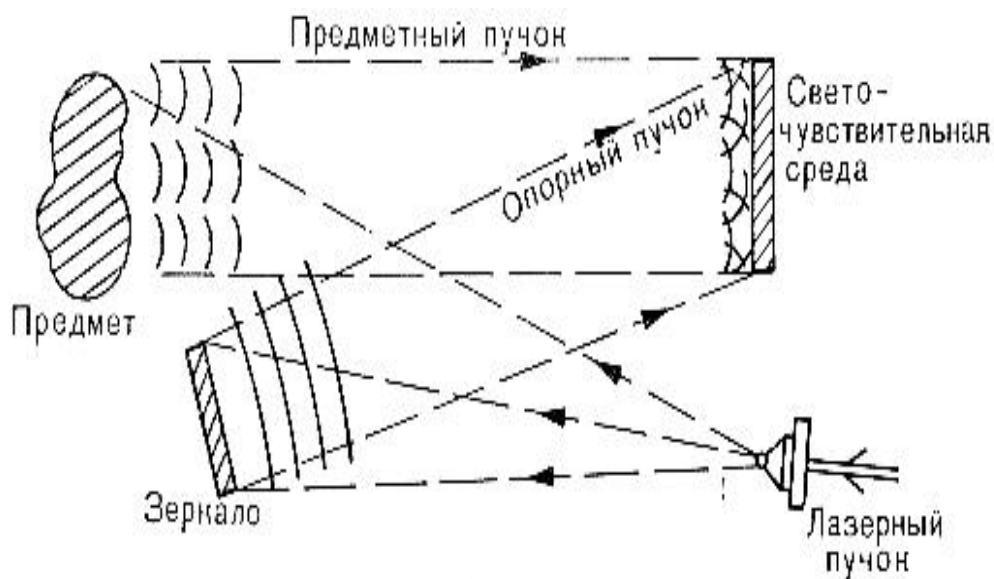


Рис. 2.15. Схема получения голограммы.

Опорная волна обычно является плоской или сферической. Опорный пучок направляется так, чтобы он пересекался (взаимодействовал) с пучком, проходящим через объект или отраженным от объекта. Если оба пучка когерентны, то в объеме, в котором пересекаются пучки, образуется интерференционная картина. В область перекрытия помещается регистрирующая среда, в которой при действии света происходят физические или химические изменения. После экспонирования среда (если это требуется) подвергается дополнительной обработке, при которой эти изменения



преобразуются в соответствующие вариации показатели преломления, оптической плотности или изменения толщины (рельефа).

### Восстановление волнового фронта.

Если голограмму осветить исходным опорным пучком, то в результате дифракции на образованной структуре восстанавливается волновой фронт, который при регистрации голограммы шел от объекта. Восстановленная волна исходит из голограммы точно так же, как исходная предметная волна. Наблюдатель, видящий волну идентичную исходной предметной волне, воспринимает ее как бы исходящей от *мнимого*

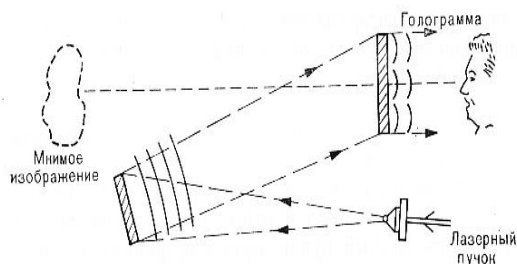


Рис. 2.16. Образование мнимого изображения предмета при освещении голограммы исходным опорным пучком.

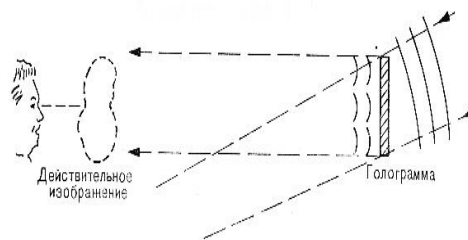


Рис. 2.17 Образование действительного изображения предмета при освещении голограммы пучком, сопряженным исходному опорному пучку.

изображения предмета, расположенного точно там, где ранее находился предмет (рис. 2.16).

Но, если обратить опорный пучок так, чтобы все лучи обращенного пучка были направлены противоположно лучам исходного опорного пучка, то такой *сопряженный* пучок, освещающий обратную сторону голограммы, создаст *действительное* изображение предмета в месте его первоначального расположения (рис. 2.17)

Поскольку в этом случае восстановленная волна является сходящейся, действительное изображение может быть зарегистрировано любой средой, которая установлена в плоскость действительного изображения.

### Голограмма сфокусированного изображения

При использовании в схемах записи голограмм объективов, формирующих изображение, можно получать голограммы сфокусированных изображений. Регистрирующая голографическая среда при этом помещается в плоскость изображения (рис.2.18).

Преимущество этого способа заключается в уменьшении требований к когерентности источника излучения, используемого на стадии восстановления, - для получения восстановленного изображения голограмму можно освещать протяженным источником. Конечно, резкое изображение будет наблюдаться только в одной плоскости, то есть, способ имеет преимущество, когда объект является плоским (например, амплитудным транспарантом).

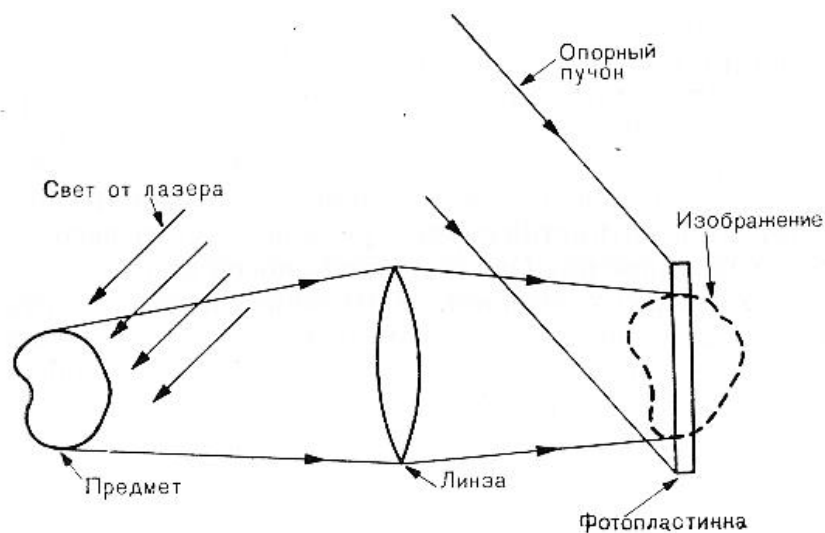


Рис. 2.1. Получение голограммы сфокусированного изображения.

### *Получение голограмм с использованием полного внутреннего отражения*

Как было показано выше, если осветить голограмму пучком, сопряженным опорному пучку, который используется для ее получения, то можно восстановить неискаженное изображение предмета. Разрешение в спроецированном действительном изображении должно быть ограничено только дифракцией на краях голограммы, что определяет преимущество использования голографических методов в технологиях литографии.

Голографическая литография является проекционным методом, не требующим частой замены фотошаблона, в отличие от методов контактной литографии.

В последнее время нашел применение метод с использованием полного внутреннего отражения. Когда требуется получить максимальную разрешающую способность, недопустимо смещение голограммы относительно освещающего пучка. Метод с использованием призмы полного внутреннего отражения обеспечивает точное воспроизведение опорного пучка и положения голограммы. Схема приведена на рисунке 2.19.

Здесь опорная волна проходит через призму и слой иммерсионной жидкости и входит в голографический слой через заднюю поверхность подложки. Когда волна достигает границы эмульсия – воздух, происходит полное внутреннее отражение. При интерференции предметной волны с отраженной опорной волной образуется пропускающая голограмма, а при интерференции предметной волны с падающей опорной волной образуется отражательная голограмма. Чтобы получить действительное изображение предмета, голограмму освещают волной антипараллельной опорной.

Если при восстановлении используется та же схема, что и при получении голограммы, то обе голограммы, зарегистрированные в голографическом слое, пропускающая и отражательная, восстанавливают действительное изображение в месте расположения исходного транспаранта.

Недифрагированный на голограмме свет отражается на границе эмульсия – воздух и не накладывается на восстановленное действительное изображение.

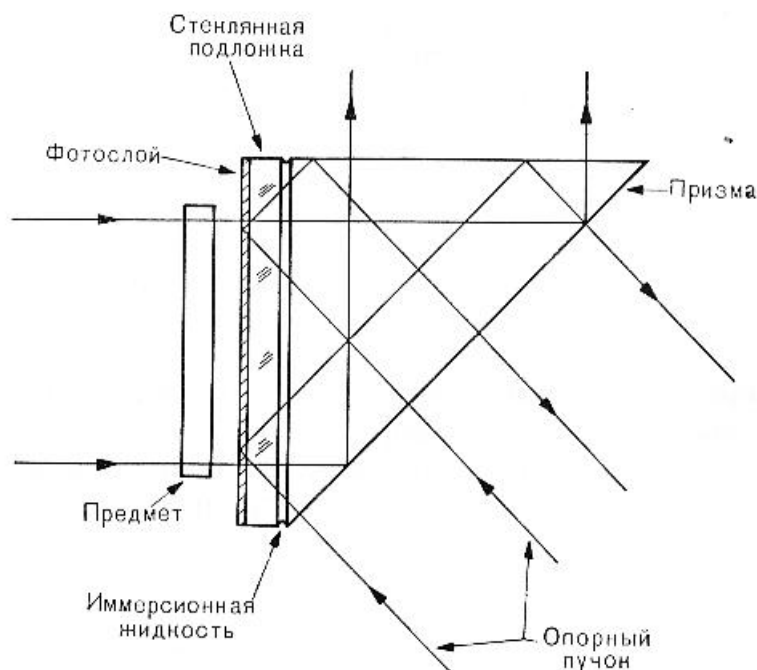


Рис. 2.19. Получение голограмм с использованием полного внутреннего отражения.

## 2. Технологии голографической литографии

### Голографическая литография с использованием полного внутреннего отражения

В работе [11] рассмотрено применение голографической литографии с использованием полного внутреннего отражения для получения периодических микроструктур. Метод состоит из следующих этапов:

1. Получение фотомаски;
2. Получение голограммы фотомаски;
3. Перенесение изображения, восстановленного голограммой на фоторезист.

Фотомаска изготавливается с использованием электронно-лучевого пишущего устройства в слое резиста (PMMA). Затем производится ионно-лучевое травление хрома на кварце. Голографическая запись производится по схеме, приведенной на рисунке 2.20.

В качестве источника когерентного излучения используется аргоновый лазер с длиной волны 364 нм. Маска (объект) освещается объектным пучком под углом  $\theta$  к нормали. Угол освещения подбирается в соответствии с периодом  $d$  рисунка на маске и длиной волны  $\lambda$  так, чтобы выполнялось условие:

$$\sin \theta = \lambda / 2 d \quad (2.2)$$

При освещении под этим углом два дифракционных порядка, симметрично расположенные относительно нормали, интерферируют с

коллимированным опорным пучком в плоскости голографического слоя. Расстояние от маски до голографического слоя составляет 100 мкм. Для формирования структур с различным периодом угол  $\theta$  регулируется. Восстановленное голограммой изображение впечатывается в слой фоторезиста SPR 505.

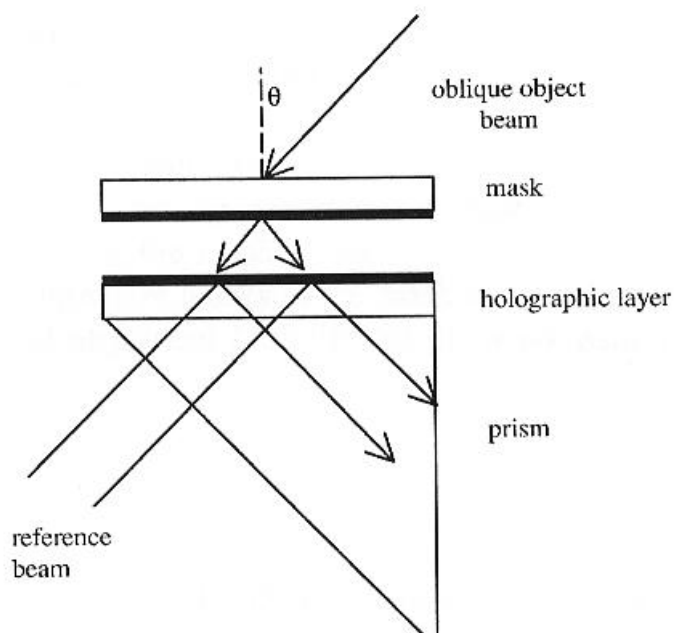


Рис. 2.20 Схема записи голограммы фотомаски.

Метод позволяет записывать периодические с шириной штриха 120 нм и квазипериодические с наименьшей шириной штриха 150 нм структуры. Фотографии полученных структур с периодом до 240 нм приведены на рисунке 2.21.

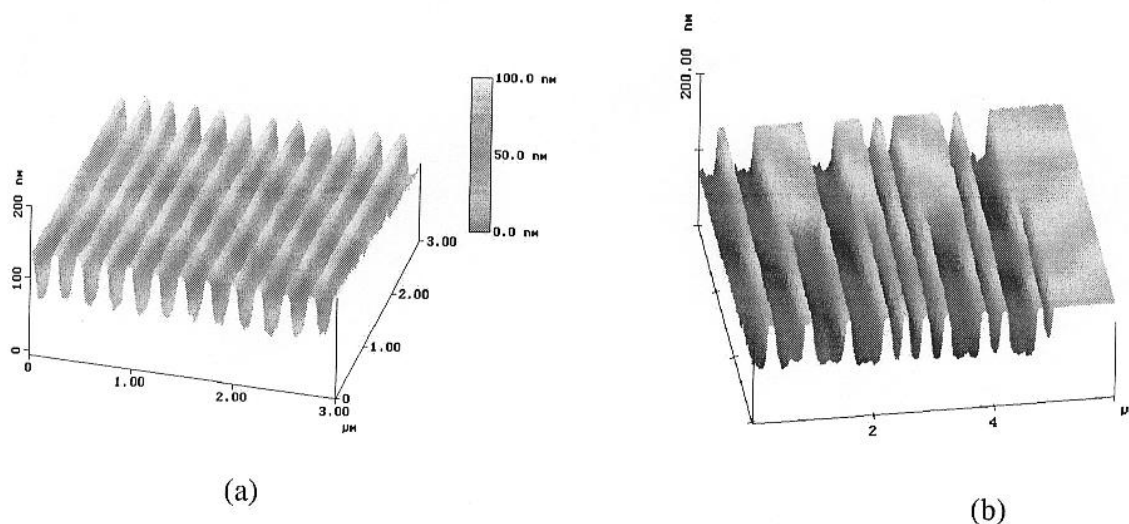


Рис. 2.21. Изображения периодических структур (а) на фоторезисте с шириной штриха 120 нм и квазипериодических структур (б) с наименьшей шириной штриха 150 нм.

Преимуществами данного метода по сравнению с традиционными методами являются:

1. Высокая числовая апертура ( $NA = 0.9$ ), обеспечивающая высокое разрешение;

2. Большой размер поля образца (не менее 4 x 4 дюйма).

Разработанная технология может применяться для получения элементов лазеров с распределенной обратной связью, акустических фильтров, интегрально оптических элементов, дифракционных элементов оптических приборов.

### *Голографическая литография с большим полем*

Необходимость уменьшения характеристического размера элементов интегральных микросхем приводит к неизбежному уменьшению размера регистрируемого безаберрационного поля. Так, например, устройства на базе эксимерных лазеров имеют поля не превышающие единиц миллиметров. Малые размеры мгновенных полей компенсируют при использовании методов сканирующего или пошагового экспонирования. Это приводит к необходимости выполнения большого числа операций, а также к проблемам совмещения фрагментов рисунка.

В ряде практических задач, например, при производстве дисплеев большой площади требуются технологии, обеспечивающие большие поля. В связи с этим перспективными представляются проекционные методы голографической литографии. Рассмотрим некоторые из них.

В основе «большепольной» голографической литографии лежит формирование микроструктур в фоторезисте при проекции изображения, восстановленного голограммой [12]. Схема записи голограмм и воспроизведения изображений показана на рисунке 2.22.

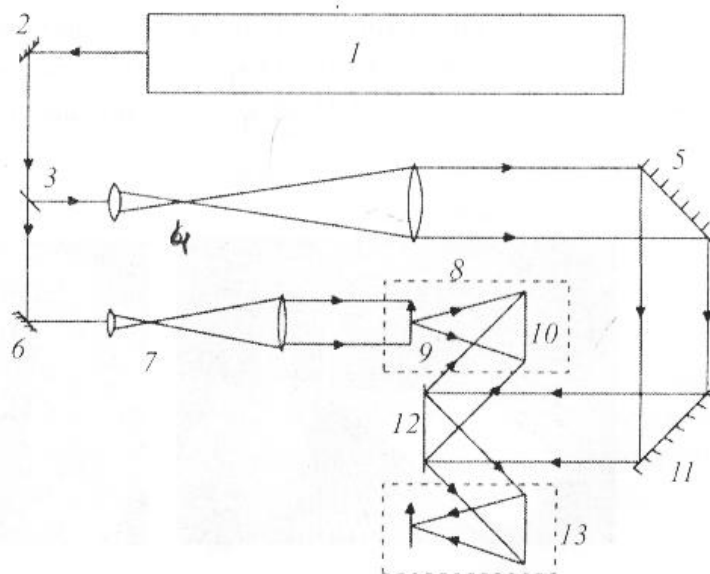


Рис. 2.22. Схема установки для записи голограмм и восстановления изображений.

Излучение лазера 1 направляется на зеркало 2 и падает на полупрозрачное зеркало 3. Здесь излучение делится на два пучка: объектный

и опорный. Опорный пучок отражается от зеркала 3, расширяется коллиматором 4, отражается от зеркал 5 и 11 и направляется на плоскую дифракционную решетку 12. Излучение, дифрагированное на решетке 12 в +1 порядок дифракции, направляется в плоскость регистрации голограммы 10. Объектный пучок проходит через зеркало 3, отражается от зеркала 6, расширяется коллиматором 7 и направляется на объект 9, представляющий собой бинарный амплитудный транспарант (фотошаблон). Восстановление изображения осуществляется излучением, дифрагированным на решетке 12 в -1 порядок дифракции при перемещении стола 8.

В качестве источника излучения используется аргоновый лазер с длиной волны 488 нм. Регистрирующей голографической средой является халькогенидный стеклообразный полупроводник (ХСП) с толщиной 1 мкм. Размер голограммы – 70 x 70 мм. В результате экспонирования и последующей химической обработки в слое ХСП образуется рельефно-фазовая голограмма. Для увеличения дифракционной эффективности рабочая поверхность голограммы покрывается слоем алюминия. Регистрация действительного изображения фотошаблона, восстановленного голограммой, осуществляется на слоях позитивного органического фоторезиста AZ – 1350 толщиной 0.2 – 0.5 мкм, нанесенных методом центрифугирования поверх слоя хрома, осажденного на стеклянную подложку толщиной 2 мм. Для проявления экспонированных слоев фоторезиста используется раствор едкого калия. Травление пленки хрома до стекла через полученную резистивную маску проводится в растворе четырехводного сернистого церия.

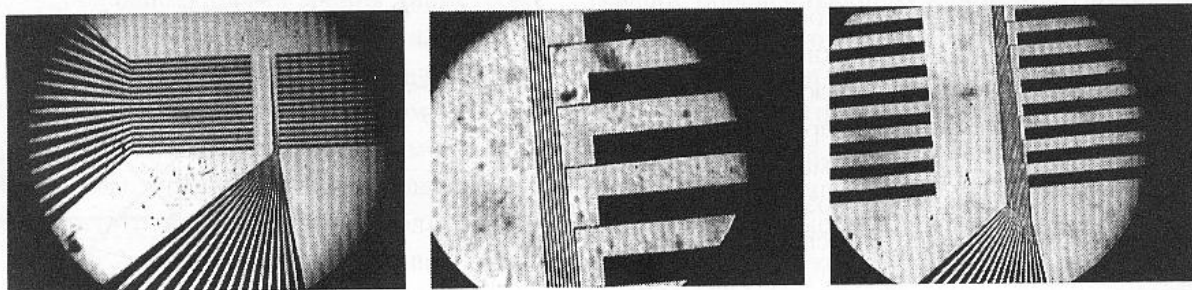


Рис. 2.23. Изображения структур, полученных методом проекционной голографической литографии.

Рассмотренный метод обеспечивает получение структур с характеристическим размером до 0.8 мкм. Фотографии полученных структур показаны на рисунке 2.23.

Развитием рассмотренной выше технологии является метод, в котором записываются голограммы сфокусированных изображений. Принципиальная возможность и перспективность этого метода отмечалась достаточно давно. Однако, практическая реализация началась в начале 90<sup>х</sup> годов с разработки фирмой «Holographic Technologies» (Швейцария) промышленной голографической фотолитографической установки (НМА 150) для изготовления плоских дисплеев с размером пластин 400 x 400 мм.

Впоследствии (1995 г) этой фирмой совместно с компанией «Samsung» была разработана установка (SHA 200) для производства интегральных микросхем. Одним из существенных недостатков разработанных технологий являлось использование метода контактной фотолитографии, приводящего к разрушению голограммы.

Этот недостаток исключается при использовании рассмотренного в [12] проекционного голографического метода. Преимуществами метода являются: исключение оптических элементов, определяющих необходимость работы в УФ области спектра, снижение требований к когерентности восстанавливающего излучения при использовании голограмм сфокусированного изображения, а также возможность коррекции aberrаций объектива (не высокого качества), так как голограмма выполняет роль корректора. Схема установки показана на рисунке 2.24.

Излучение аргонового лазера с длиной волны 488 нм направляется на частично прозрачное зеркало  $M_1$  и разделяется на два пучка – опорный и объектный. Опорный пучок отражается от зеркала  $M_1$ , расширяется коллиматором  $L_1 - L_2$ , отражается от зеркал  $M_2$  и  $M_3$  и направляется на дифракционную решетку  $G$ . Излучение, дифрагированное на решетке в +1 порядок дифракции, направляется на плоскость регистрации голограммы  $GR$ . Объектный пучок проходит через зеркало  $M_1$ , отражается от зеркал  $M_4$  и  $M_5$ , расширяется коллиматором  $L_3 - L_4$  и направляется на объект  $O$ , представляющий собой бинарный амплитудный транспарант. Объектив  $L_5$  в плоскости голограммы формирует изображение объекта  $O$ . Восстановление голографического изображения осуществляется излучением, дифрагированным на решетке  $G$  в -1 порядок дифракции при перемещении стола с объектом, объективом и голограммой. В отличие от рассмотренного выше процесса, здесь для записи голограммы используются слои ХСП, в том числе, в сочетании со слоями хрома при их последовательном нанесении на стеклянную подложку.

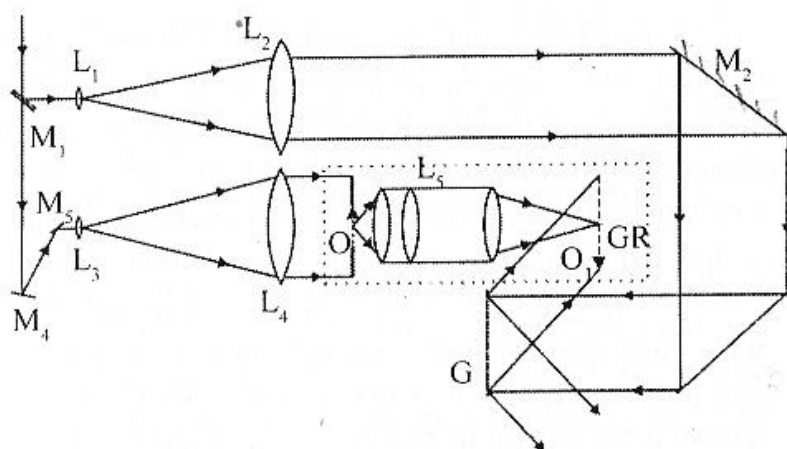


Рис. 2.24. Схема установки для записи и восстановления голограмм сфокусированного изображения.

Рассмотренный способ позволяет получать структуры с характеристическим размером 1.3 мкм (предполагается возможность уменьшения этого размера).



## Глава 3

# ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ И МИКРОСТРУКТУР ПРИ ФОТООТВЕРЖДЕНИИ ПОЛИМЕРОВ

### § 1. Фотоотверждение при сканировании лазерным пучком

Классические методы литографии позволяют получать преимущественно планарные тонкие структуры. Тенденции развития информационных, телекоммуникационных, MEMS и MOEMS систем определяют необходимость получения объемных микроэлементов и микроструктур. Получение толстослойных микроэлементов является предметом многочисленных исследований, проводящихся в последние годы. Наиболее успешным является процесс, в котором слой фоторезиста толщиной несколько сотен микрон освещается рентгеновскими лучами (процесс LIGA) [13], однако, он не может применяться для получения трехмерных структур. Кроме того, применение рентгеновского излучения имеет много ограничений.

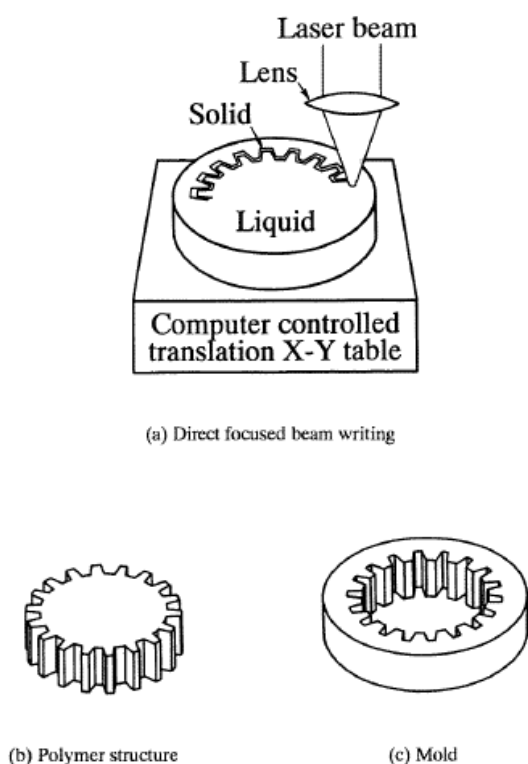


Рис. 3.1. Принцип изготовления микроструктур сфокусированным лазерным пучком.

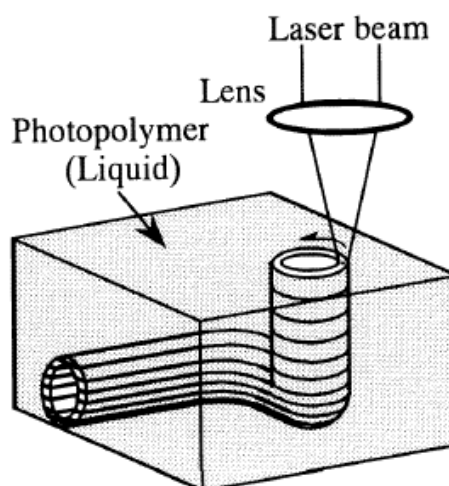


Рис. 3.2. Схема изготовления многослойной трехмерной микроструктуры.

Более перспективными являются процессы, основанные на методе сканирования лазерным пучком [13, 14]. Изготовление полимерных структур выполняется при использовании сфокусированного пучка УФ лазера,

пишущего по поверхности жидкого полимера, который в результате облучения затвердевает. Рисунки 3.1 и 3.2 иллюстрируют данный принцип.

Точность передачи формы в данном методе определяется размерами и формой затвердевшего участка фотополимера. Размеры и форма затвердевшей области обусловлены формой и распределением интенсивности освещающего пучка, дифракцией и поглощением света в объеме полимера. В связи с этим необходимо понимание процессов отверждения и определение оптимальных условий.

Модель, используемая для проведения теоретических расчетов, показана на рисунке 3.3.

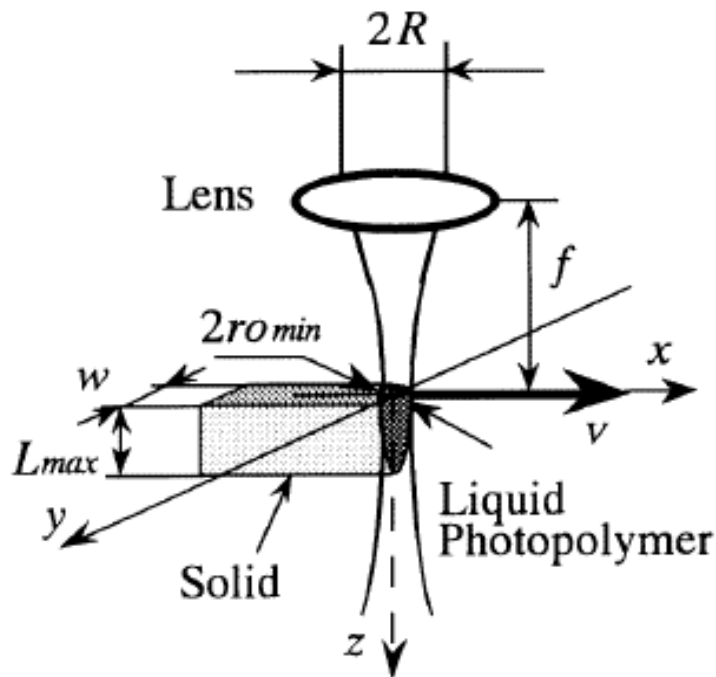


Рис. 3.3. Теоретическая модель.

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

$$I_g(x, y, z) = \frac{2P}{\pi r_{0\min}^2} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{r_0^2}\right]. \quad (3.1)$$

Радиус пучка (по полуширине) определяется, как

$$r_0(z) = r_{0\min} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi r_{0\min}^2}\right)^2} \quad (3.2)$$

$$r_{0 \min} = \frac{f\lambda}{\pi R} \quad (3.3)$$

Интенсивность уменьшается по экспоненте с поглощением луча в полимере. Обозначим коэффициент поглощения через  $\alpha$ . Тогда распределение интенсивности света по глубине выражается, как

$$I(x, y, z) = I_g(x, y, z) \exp(-\alpha z). \quad (3.4)$$

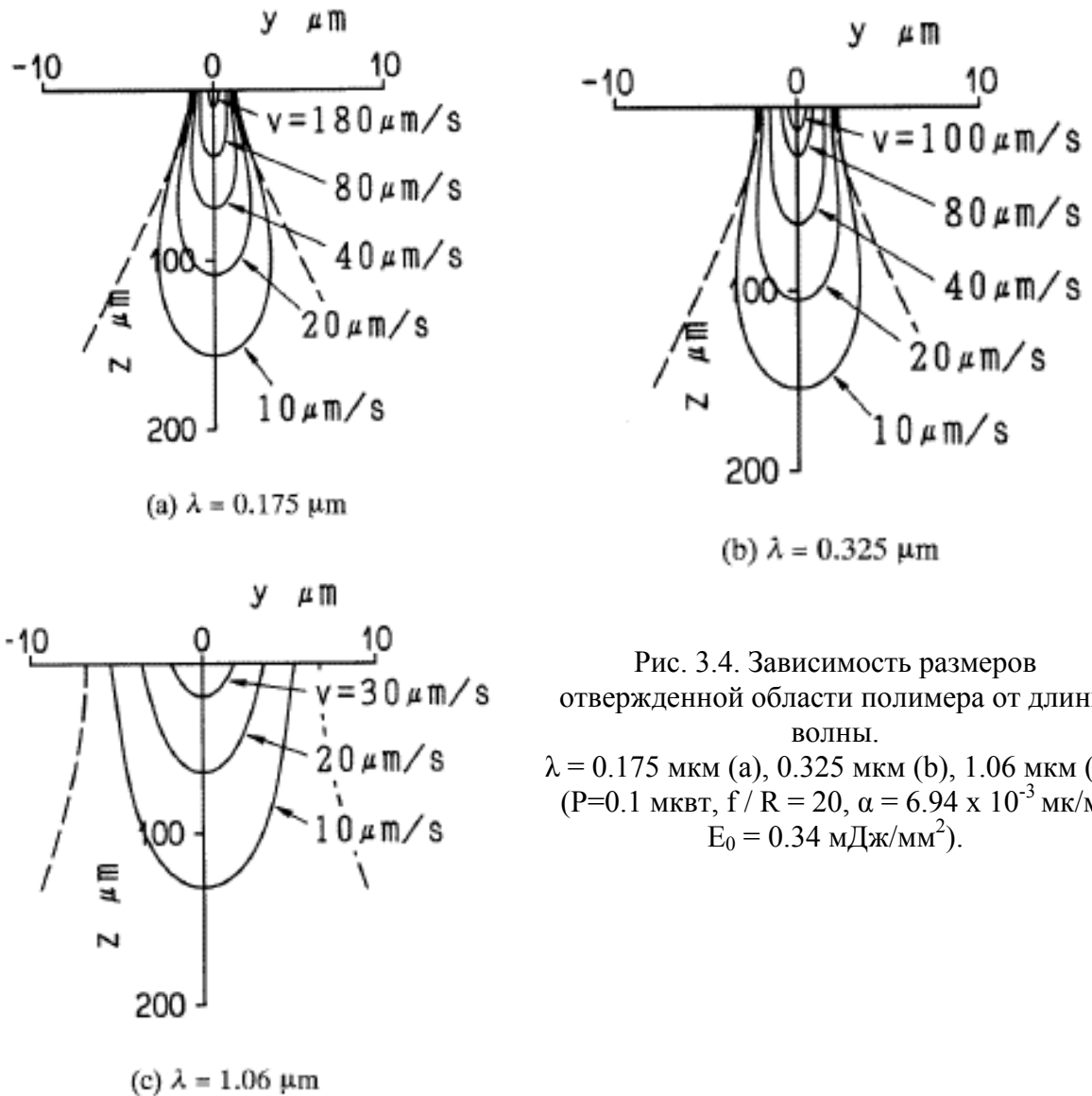


Рис. 3.4. Зависимость размеров отвержденной области полимера от длины волны.  
 $\lambda = 0.175 \text{ мкм}$  (a),  $0.325 \text{ мкм}$  (b),  $1.06 \text{ мкм}$  (c).  
 $(P=0.1 \text{ мкВт}, f/R = 20, \alpha = 6.94 \times 10^{-3} \text{ мк/м}, E_0 = 0.34 \text{ мДж/мм}^2)$ .

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

$$E(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x - vt, y, z) dt, \quad (3.5)$$

где  $t$  – время записи.

Когда энергия  $E(x, y, z)$  достигает порогового значения  $E_0$ , полимер затвердевает. Полагая  $E(x, y, z) = E_0$ , из уравнения (3.5) определим значение  $y$  :

$$y = \frac{r_0}{\sqrt{2}} \sqrt{\log_e \sqrt{\frac{2P}{\pi E_0 r_0 v}} - \alpha z} . \quad (3.6)$$

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

- длина волны –  $\lambda$  ,
- апертура пучка -  $f / R$  ,
- коэффициент поглощения –  $\alpha$  ,
- скорость перемещения –  $v$  .

Подробное рассмотрение приведено в работе [13]. Для примера приведем зависимости размеров отвержденной области от длины волны и апертуры (рис. 3.4, 3.5).

Полученные оптимальные условия ( $P = 0.17$  мкВт,  $\lambda = 0.325$  мкм,  $\alpha = 6.94 \times 10^{-3}$  мк/м,  $E_0 = 0.34$  мДж/мм<sup>2</sup>,  $R = 3.62$  мм,  $f = 120$  мм,  $v = 10$  мкм/с) реализованы при получении микроэлементов и микроструктур. Схема установки показана на рисунке 3.6.

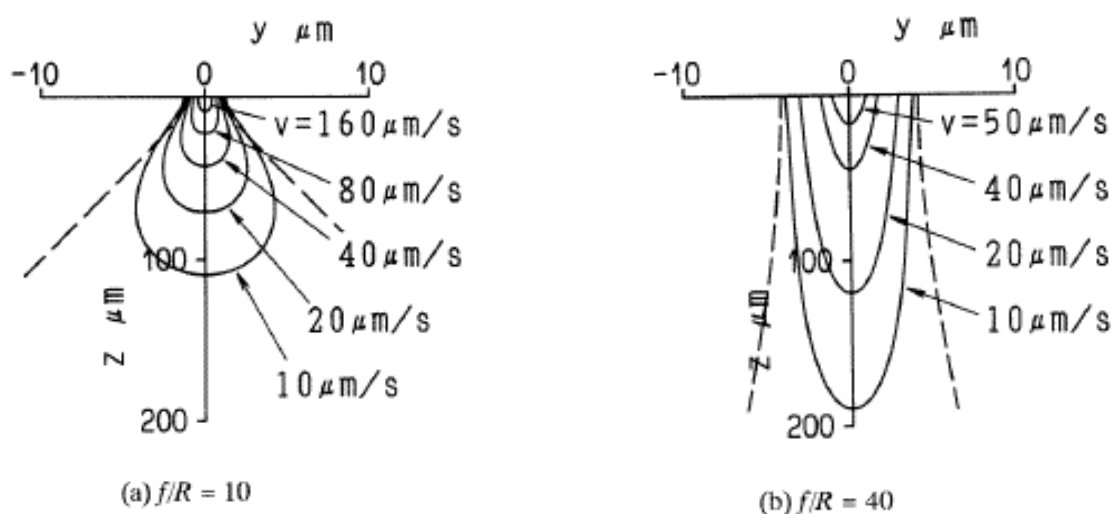


Рис. 3.5. Размеры отвержденной области полимера для различных отношений  $f / R$  .  
 $f / R = 10$  (a),  $f / R = 40$  (b).

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

Луч гелий - кадмиевого лазера с длиной волны 0.325 нм расширяется, проходит через затвор, отражается зеркалом и фокусируется на поверхность полимера, установленного на управляемый компьютером стол. В качестве светоотверждаемого материала используется полимер, производимый компанией «Asahi Chemical Co. Ltd.» на основе ненасыщенного полиэстера торговой марки «APR stamp resin» (Katadori – 20). После записи неэкспонированный жидкий полимер удаляется при обработке в ацетоне.

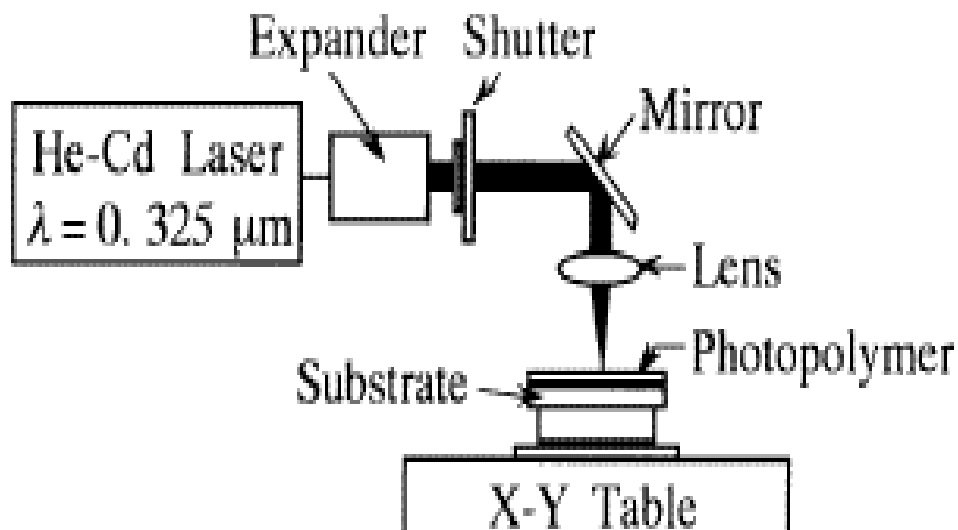


Рис. 3.6. Схема установки для получения микроэлементов при сканировании сфокусированным лазерным пучком.

Вид полученных структур приведен на рисунке 3.7.

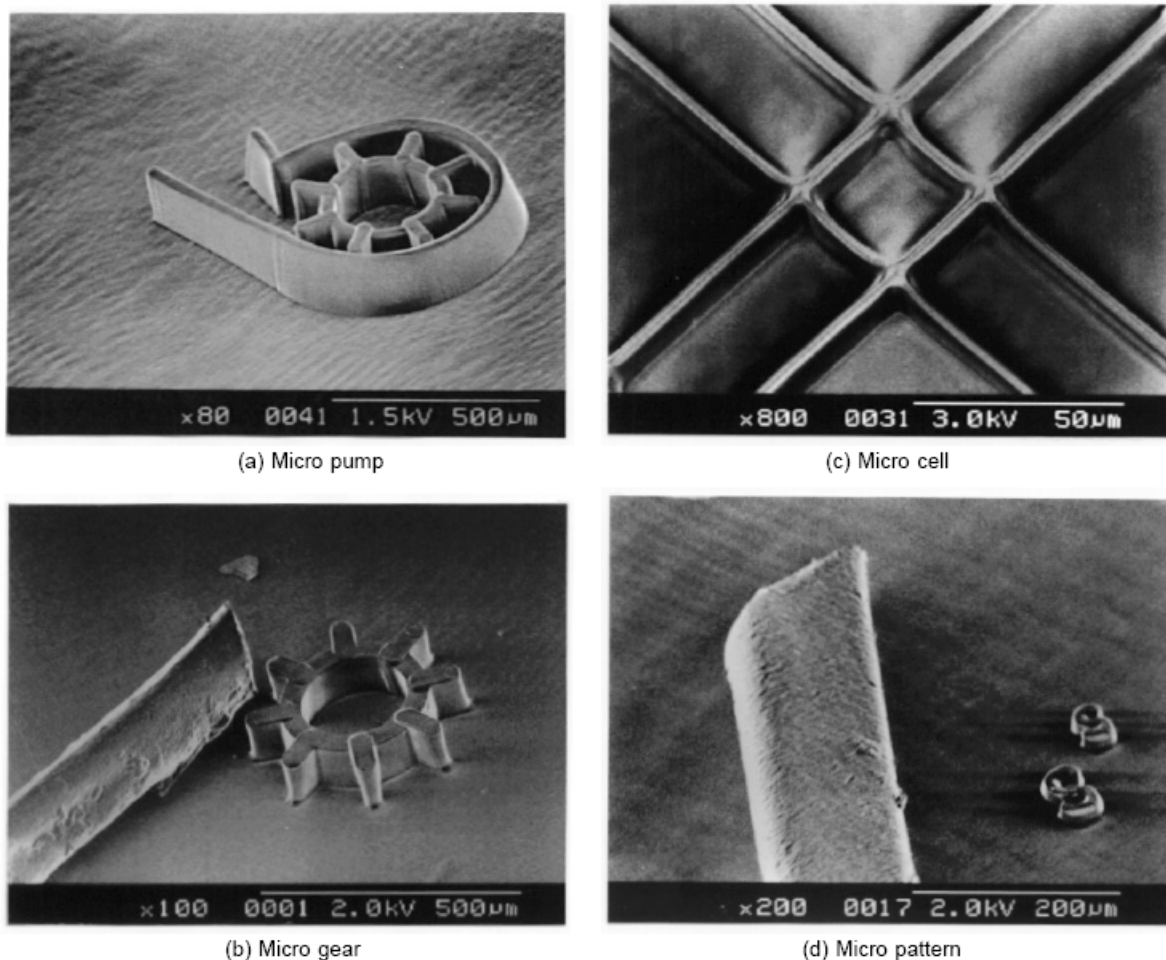


Рис. 3.7. Примеры полимерных структур: а – микропомпа, б – микромеханическая деталь, с - микроячейка, д – микроэлемент (буква).

На рисунке 3.8 приведена фотография микроэлемента, полученного при послойном отверждении полимера (наложении слоев друг на друга), как показано на рисунке 3.2.

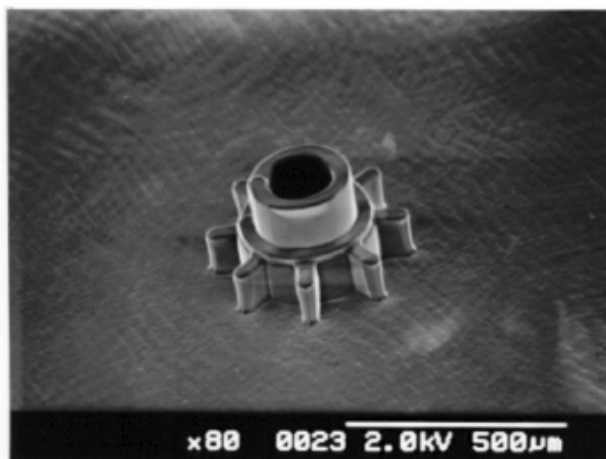
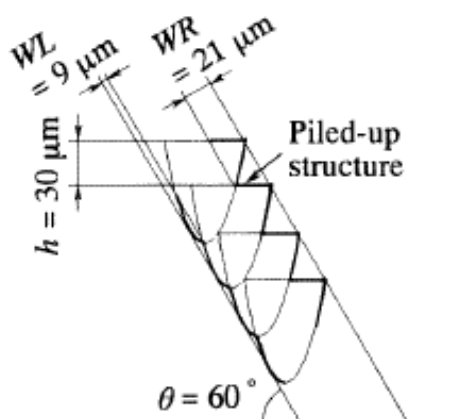
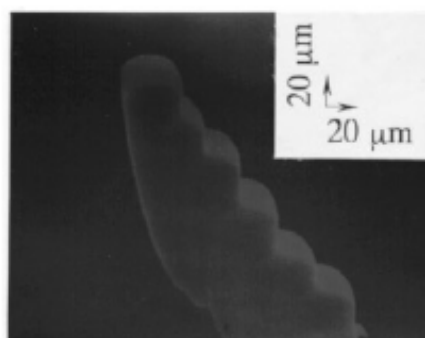


Рис. 3.8. Пример наложенной структуры.



(a) Calculated profile



(b) Micrograph

Рис. 3.9. Сложный профиль.

а – расчетный профиль, б – микроэлемент.

(( $P = 2.0$  мкВт,  $\lambda = 0.325$  мкм,  $f/R = 192$ ,  $\alpha = 4.9 \times 10^{-2}$  мкм/м,  $E_0 = 0.34$  мДж/мм<sup>2</sup>,  $v = 10$  мкм/с,  $\theta = 60^\circ$ ,  $h = 30$  мкм).

Точность передачи размеров в рассмотренном способе зависит от толщины слоя, определяющей высоту элементов. Наибольшая точность достигается для толщин 10 мкм, для толщин 100 и 200 мкм она составляет 0.5 и 2 мкм соответственно.

Более сложной является задача получения трехмерных структур произвольной конфигурации. В этом случае большая глубина отверждения является негативным фактором. Уменьшение глубины отверждения достигается за счет увеличения коэффициента поглощения при введении родамина В ( $C_{28}H_{31}ClN_2O_3$ ) до  $4.9 \times 10^{-2}$  мкм/м.

На рисунке 3.9 рассмотрен пример получения сложного профиля с наклоном  $60^\circ$ . Точность передачи размеров составляет 5 мкм по ширине и глубине и 1 мкм по бокам.

## **§ 2. Фотоотверждение с использованием амплитудных масок.**

Процесс, рассмотренный выше, позволяет получать микроэлементы и микроструктуры относительно сложной конфигурации, однако, для его реализации требуются сложные прецизионные устройства, управляемые компьютером. Далее будет рассмотрен процесс, позволяющий получать объемные структуры и элементы, но с применением более простой техники при уменьшении трудоемкости получения отдельного элемента.

Метод также основан на отверждении полимера под действием света. Конфигурации формируемых структур определяются распределением плотности в амплитудной маске, которая накладывается на слой отверждаемого полимера. Метод в принципе аналогичен методам контактной литографии и позволяет получать толстослойные элементы и структуры (при использовании контрастных фотошаблонов). При использовании тоновых шаблонов возможно получение трехмерных микроэлементов с изменением формы поверхности – микролинз, микропризм и др.

Процесс состоит из следующих этапов:

1. Получение амплитудной маски (фотошаблона);
2. Светоотверждение фотополимерного слоя УФ излучением, прошедшим через фотошаблон;
3. Удаление неотвержденного полимера (проявление);
4. Укрепление полученной структуры УФ излучением.

Фотошаблон изготавливается при уменьшении рисунка, сформированного методом компьютерной графики (трафарета), с использованием фотопроекторной установки. Схема установки приведена на рисунке 3.10.

Амплитудный трафарет 3 освещается галогенной лампой 1 с использованием конденсора с линзой Френеля 2. Изображение трафарета с уменьшением, определяемым параметрами объектива 4, проектируется в плоскость фотопленки 5. Совмещение плоскости изображения с плоскостью фотопленки контролируется с помощью микроскопа 6.

Для получения фотошаблона применяется высококонтрастная и высокочувствительная фотопленка Kodak – EL Camera. Для обработки пленки используется проявитель Accusmax Rapid Access. Для получения фотошаблонов с требуемым контрастом и передачей тоновых градаций необходимо обеспечить оптимальные условия экспонирования и проявления. Эти условия определяются экспериментально на основании измерений зависимости оптической плотности от величины экспозиции и условий проявления. На рисунке 3.11 приведены характеристические кривые пленки Kodak – EL Camera при различных условиях проявления.

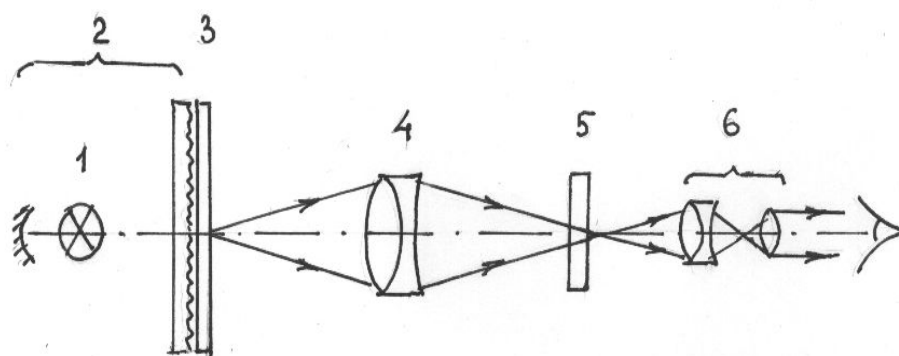


Рис. 3.10. Схема фотопроекторной установки.

Видно, что для получения контрастных шаблонов может быть использована обработка в концентрированных растворах проявителя, а для получения тоновых шаблонов оптимальными являются процессы обработки в разбавленном проявителе (1:5 – 1:10) при длительности проявления 30 сек – 1 мин. С целью исключения повреждений при многократном использовании шаблоны покрывают антиадгезионным слоем.

Схема установки фотополимеризации показана на рисунке 3.12

Параллельный пучок излучения ртутной лампы 1 с длиной волны 365 нм, сформированный линзой 2 и зеркалом 3, падает на фотошаблон 4, наложенный на светоотверждаемый материал 5, нанесенный на стекляннную подложку 6, и формирует отвержденную микроструктуру с конфигурацией, соответствующей распределению интенсивности падающего излучения. Высота отвержденной структуры определяется толщиной прокладок 7..

Неотвержденный полимер удаляется при обработке в изопропиловом спирте. После сушки укрепление сформированной структуры производится при дополнительном облучении излучением ртутной лампы.



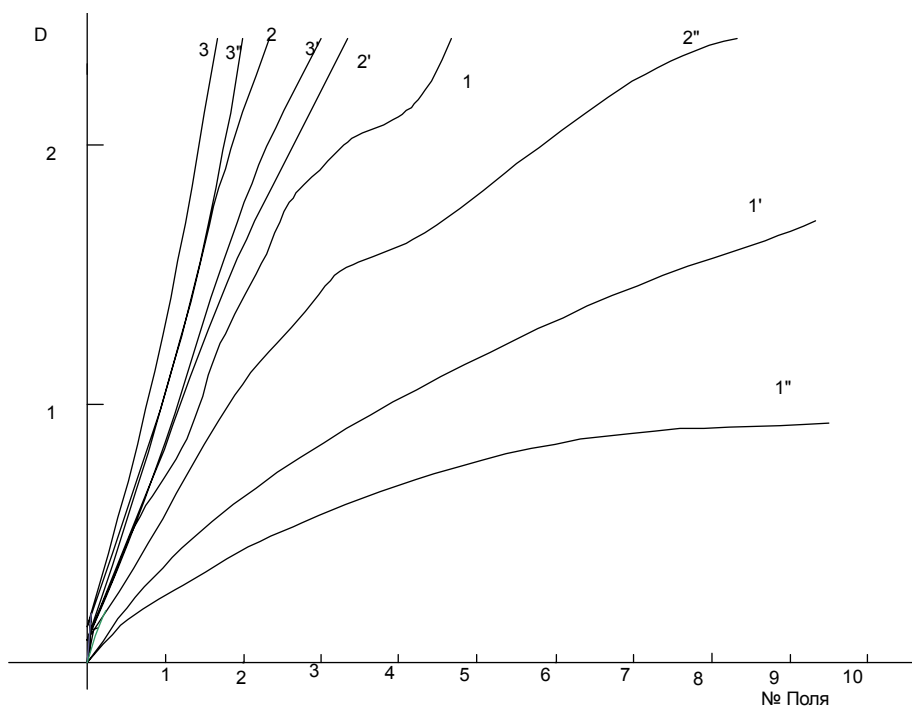


Рис.3.11. Зависимость оптической плотности фотошаблона от плотности трафарета.  
 Длительность проявления: 30 сек (1,1',1<sup>11</sup>), 1 мин (2,2',2<sup>11</sup>), 2 мин (3,3',3<sup>11</sup>).  
 Концентрации рабочего раствора: 1:2(-), 1:5(-), 1:10(---).

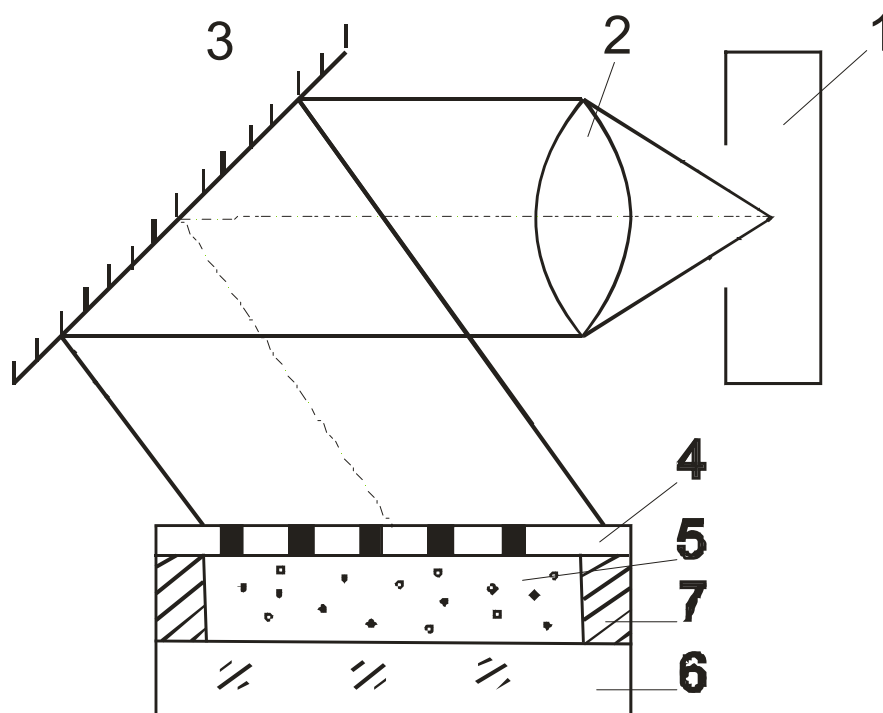


Рис. 3.12. Схема установки фотополимеризации.

В качестве отверждаемого материала используется мономерная композиция на основе смеси акриловых мономеров с инициатором фотополимеризации.

Важными закономерностями, наблюдаемыми при данном способе формирования микроструктур, являются:

1. Уменьшение ширины (до двух раз) формируемого элемента относительно ширины линии в трафарете;
2. Уменьшение толщины микроэлемента по глубине, связанное с самофокусировкой в процессе фотоотверждения;
3. Сжатие структуры вследствие усадки в процессе вымывания неотвержденного материала;
4. Искажения, связанные со способом отделения фотошаблона.

Рассмотренный метод позволяет формировать микроэлементы и микроструктуры с шириной 2 – 20 мкм и высотой 30 – 300 мкм.

При получении периодических структур важным является требование к форматному соотношению – отношению ширины и высоты формируемых элементов. Метод фотоотверждения с использованием амплитудных масок позволяет получать соотношение ширины и высоты элементов до 1:10.

Фотографии микроструктур, полученных с использованием рассмотренного метода, приведены на рисунке 3.13.

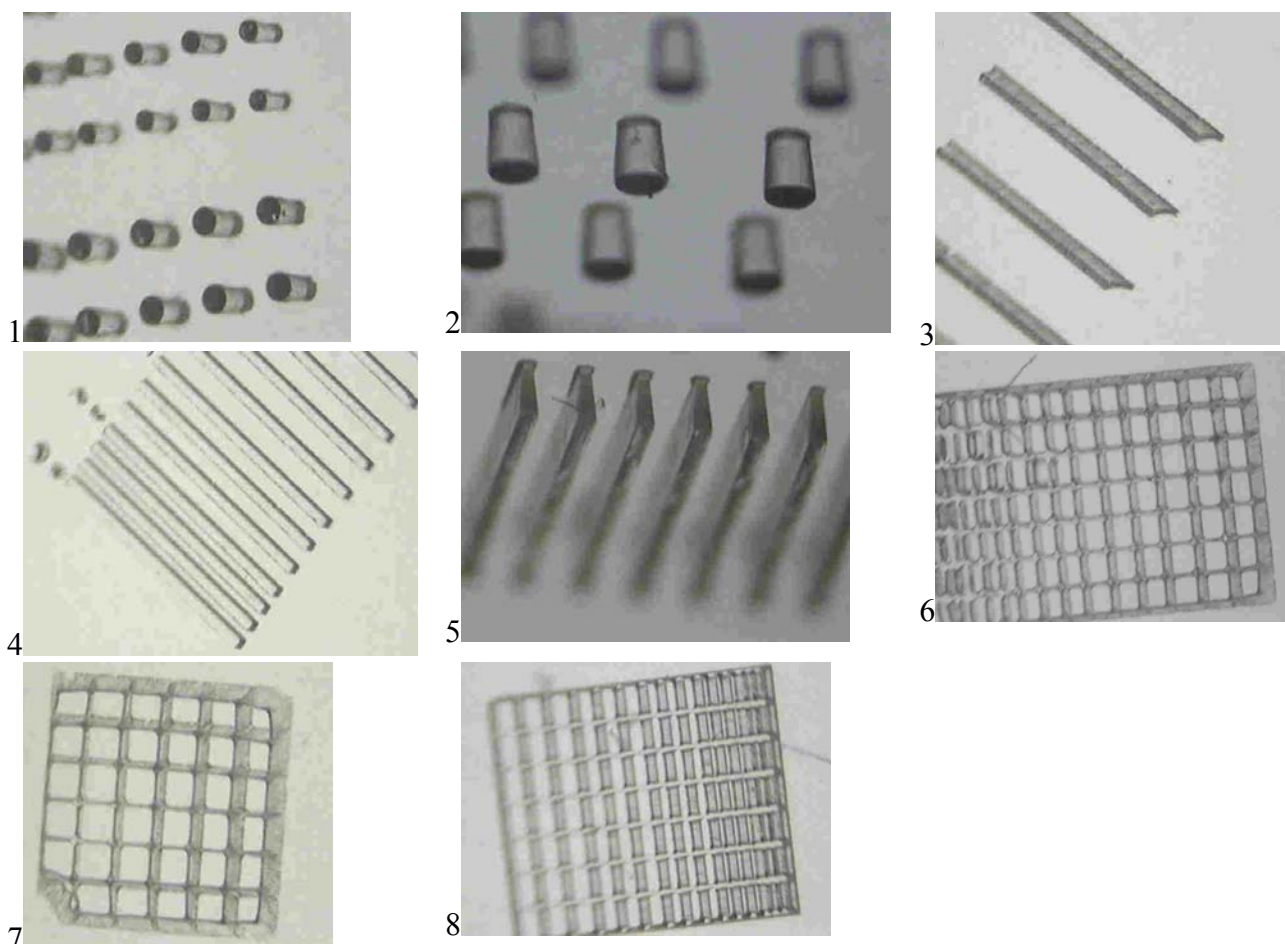


Рис. 3.13. Микроструктуры, полученные при фотоотверждении с использованием амплитудных фотошаблонов.

Высота структур: 30 мкм (2,5), 100 мкм (4,8), 300 мкм (1,3,6,7), ширина (диаметр) элементов: 2 мкм (2,5), 20 мкм (1,3,4,6-8).

### § 3. Особенности получения трехмерных структур в фоторезисте SU8

Как было показано выше, одной из возможностей получения трехмерных микроэлементов является фотоотверждение толстослойных материалов. В предыдущем параграфе рассмотрен процесс, основанный на использовании толстослойных лабораторных светоотверждаемых материалов. В последнее время большой интерес проявляется к промышленному материалу – фоторезисту SU8. Возможность его использования для получения объемных микроструктур рассматривалась в предыдущих разделах. В работе [15] рассмотрены особенности получения микроэлементов с высоким форматным соотношением (отношением высоты и ширины) в SU8. Размерные характеристики и качество структур определяются рядом факторов. Авторы работы [15] рассматривают влияние на качество элементов количества оставшегося растворителя в пленках SU8.

Пленка фоторезиста SU8 – 2075 наносится на очищенную кремниевую подложку методом центрифугирования. Толщина пленки определяется скоростью вращения и изменяется в диапазоне 100 – 400 мкм. С целью уменьшения количества растворителя, повышающего плотность пленки, а также уменьшения прилипания накладываемой маски пленка SU8 подвергается мягкой сушке. На рисунке 3.14 приведена зависимость количества оставшегося растворителя в пленке SU8 от длительности сушки (при температуре 95°).

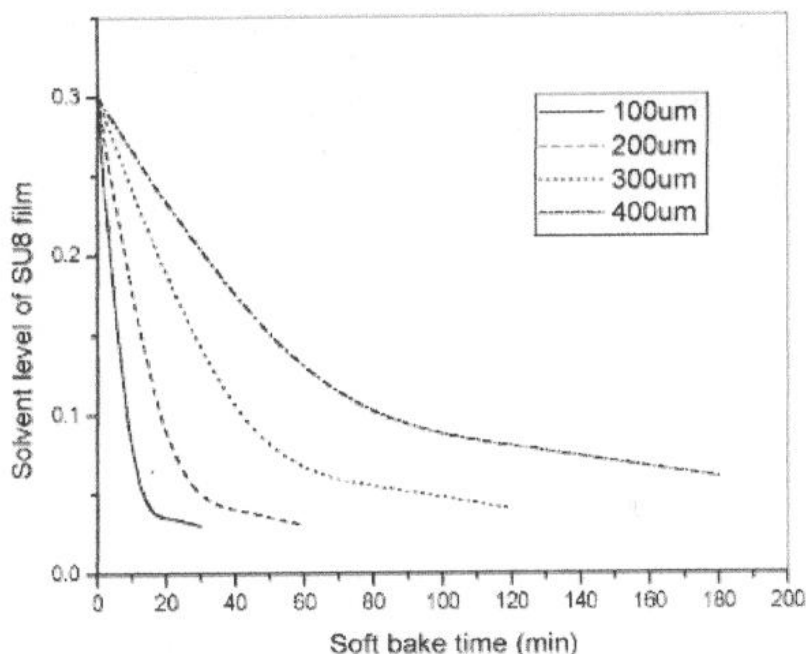


Рис. 3.14. Уровень оставшегося растворителя в пленке SU8.

Эксперименты показали, что, качество структур, получаемых в толстослойных пленках, связано, как с количеством оставшегося растворителя, так и равномерностью его распределения по толщине.

Структуры, полученные контактным методом при фотоотверждении узкополосной ртутной лампой, показаны на рисунках 3.15 и 3.16.

На рисунке 3.15 показана структура плохого качества – с дефектами на боковой стороне, связанными с высоким содержанием растворителя в пленке. На рисунке 3.16 показаны качественные микроструктуры с высоким соотношением высоты и ширины, полученные при оптимальных условиях сушки.

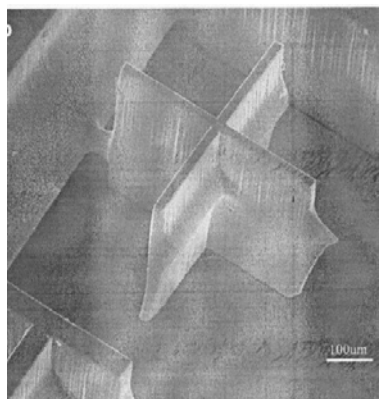


Рис. 3.15. Изображение структуры при высоком уровне растворителя в пленке SU8.

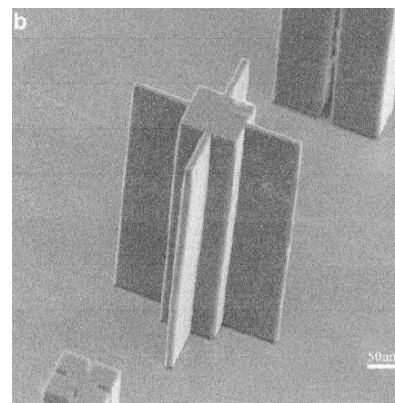
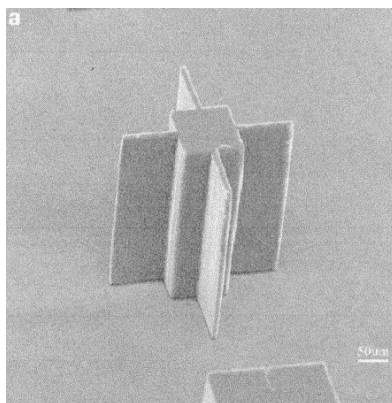


Рис. 3.16. Изображения некоторых микроструктур с высоким форматным соотношением.  
а – ширина – 5 мкм, высота – 280 мкм; б – ширина – 10 мкм, высота – 350 мкм.

## **Заключение**

Анализ достижений в области технологий формирования микроструктурных элементов показывает, что основной тенденцией является поиск технологических процессов, обеспечивающих возможность продвижения из микронной в нанометровую область размеров элементов. Наряду с развитием классических методов литографии, формируются новые подходы, обеспечивающие возможность создания широкопольных систем. Совершенствуются процессы получения таких классических структур, как многоэлементные интегральные микросхемы, а также ведутся интенсивные разработки методов синтеза новых элементов – фотонных кристаллов. Современный уровень в этом направлении характеризуется поиском новых форм и конфигураций и развитием теоретических методов исследований структур с произвольным распределением диэлектрической проницаемости. Особое место в ряду разрабатываемых процессов занимают методы получения трехмерных структур. Наибольшие успехи в настоящее время достигнуты в области получения объемных планарных структур. В направлении разработки технологий получения трехмерных микроструктур произвольной конфигурации остается еще много нерешенных проблем.

## **Рекомендованная литература**

1. Кольер Р., Бернхард К., Лин Л.. Оптическая голография. М.: Мир, 1973. – 564 с.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. – 856 с.
3. US. Patent №6, 673, 497 B2 High efficiency volume diffractive elements in photo-thermo-refractive glass. Efimov O.M., Glebov L.B., Smirnov V.I. - 2004.
4. Shen X.X., Yu X.Q., Yang X.L., Cai L.Z., Wang Y.R., Dong G.Y., Meng X.F., Xu X.F. Fabrication of periodic microstructures by holographic photopolimerization with a low-power continuous-wave laser of 532nm // J.Opt.A: Pure Appl. Opt.. - 2006. - V. 8. - P. 672-676.
5. Huang C.J., Zhu X.P., Li C., Zuo Y.H., Cheng B.W., Li D.Z., Luo L.P., Yu J.Z., Wang Q.M. Nanofabrication of grid-patterned substrate by holographic lithography // Journal of Crystal Growth. - 2002. - V. 236, - P. 141-144.
6. Kondo T., Juodkazis S., Mizeikis V., Matsuo S., Mizawa H. Fabrication of three-dimensional periodic microstructures in photoresist SU-8 by phase-controlled holographic lithography // New Journal of Physics. – 2006. - v. 8, - P. 250-256.
7. Deubel M., Vegener M., Kaso A., John S. Direct laser writing and characterization of “Slanted Pore” Photonic Crystals // Applied Physics Letters. - 2004. - V. 85. - №11. – P. 1895-1897.
8. Сейсян Р. Нанолитография СБИС в экстремально дальнем вакуумном ультрафиолете // Журнал технической физики. – 2005. - Т. 75, - В. 5. С. 1-13.
9. Lin B.J., Optical lithography - present and future challenges // C.R. Physique. – 2006. - V. 7, - P. 858-874.
10. Marge M., Bruynooghe S., Clube F., Nabari A., Saussol J.L., Grass E., Mayer M., Schnabel B., Kley E.B. 120 nm lithography using off-axis TIR holography and 364 nm exposure wavelength // Microelectronic Engineering. – 2001. - V.57. - P. 59-63.
11. Корешев С.Н., Ратушный В.П. Использование метода голографии для получения изображения двумерных объектов при решении задач фотолитографии высокого разрешения // Оптический журнал. – 2004. - Т. 71. - №10. - С. 32-39.
12. Nakamoto T., Yamaguchi K., Abraha P.A., Mishima K. Manufacturing of three-dimensional micro-parts by UV laser induced polymerization. // J. Micromech. Microeng.. – 1996. - V.6. - P. 240-253.
13. Maruo S., Jkuta K. Submicron stereo-lithography for the production of freely movable mechanisms by using single-photon polymerization // Sensors and Actuators. – 2002. - V.100. - P. 70-76.
14. Liu G., Tian Y., Kan Y. Fabrication of high-aspect-ratio microstructures using SU8 photoresist. // Microsystem Technologies, Springer-Verlag. – 2005. - V.15. - P. 343-346.

## ***Контрольные вопросы***

1. Основные требования к микроструктурным элементам информационных систем.
2. Что такое фотонный кристалл?
3. Основные свойства, на которых основано применение фотонных кристаллов.
4. Примеры природных фотонных кристаллов.
5. Физические принципы формирования периодических структур при взаимодействии когерентных волн.
6. Понятие когерентности света.
7. Способы улучшения когерентности лазерных источников излучения.
8. Основы технологии формирования периодических структур с использованием голографического метода.
9. Особенности технологии получения периодических структур при прямом лазерном экспонировании.
10. Основы процессов фотолитографии.
11. Способы формирования защитных резистивных масок.
12. Основные требования к фоторезисту.
13. Современные тенденции развития методов литографии.
14. Факторы, определяющие качество элементов, формируемых методами литографии.
15. Особенности литографии в экстремальном УФ.
16. Сущность иммерсионного метода литографии.
17. Сущность и преимущества - голографических методов литографии.
18. Основы метода формирования микроэлементов и микроструктур при сканировании лазерным пучком.
19. Факторы, определяющие параметры отвержденной области при действии сфокусированным лазерным пучком.
20. Проблема формирования трехмерных структур при сканировании лазерным пучком.
21. Сущность метода формирования микроэлементов и микроструктур при фотоотверждении полимера с использованием амплитудных масок.
22. Примеры получаемых микроструктур и микроэлементов.
23. Характеристические размеры микроэлементов для различных технологий, точность воспроизведения размеров и конфигураций.

Оглавление:

<b><u>ВВЕДЕНИЕ</u></b>	<b>3</b>
<b><u>ГЛАВА 1</u></b>	<b>4</b>
<b><u>ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ</u></b>	<b>4</b>
§1. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ	4
§ 2. СТРУКТУРЫ ПОДОБНЫЕ ПРИРОДНЫМ МИНЕРАЛАМ	4
§ 3. ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ КОГЕРЕНТНЫХ СВЕТОВЫХ ВОЛН	5
§ 4. МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР	19
<b><u>ГЛАВА 2</u></b>	<b>30</b>
<b><u>МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИТОГРАФИИ</u></b>	<b>30</b>
§1. ОСНОВЫ ЛИТОГРАФИИ	30
§ 2. ГЛУБОКАЯ ЛИТОГРАФИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ MEMS СТРУКТУР	41
§ 3. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИТОГРАФИИ	46
<b><u>ГЛАВА 3</u></b>	<b>59</b>
<b><u>ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ И МИКРОСТРУКТУР ПРИ ФОТООТВЕРЖДЕНИИ ПОЛИМЕРОВ</u></b>	<b>59</b>
§ 1. ФОТООТВЕРЖДЕНИЕ ПРИ СКАНИРОВАНИИ ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ	59
§ 2. ФОТООТВЕРЖДЕНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АМПЛИТУДНЫХ МАСОК.	65
§ 3. ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ СТРУКТУР В ФОТОРЕЗИСТЕ SU8	69
<b><u>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</u></b>	<b>71</b>
<b><u>РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА</u></b>	<b>72</b>
<b><u>КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ</u></b>	<b>73</b>