

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

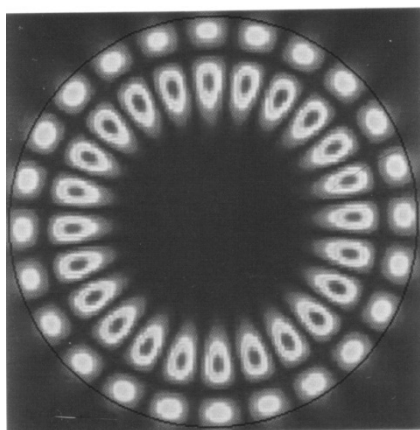


ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

Сидоров А. И. , Никоноров Н.В.

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОПТИКИ

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2009

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**



ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

Сидоров А. И., Никоноров Н.В.

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОПТИКИ

Учебное пособие

Санкт-Петербург

2009

А.И. Сидоров, Н.В. Никоноров «Материалы и технологии интегральной оптики». Учебное пособие, курс лекций. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009 г. - 107 стр.

В курсе лекций описаны основы оптики планарных волноводов, основные типы волноводных структур и их характеристики. Рассмотрены основы оптического материаловедения интегральной оптики, основные классы материалов, используемые в интегральной оптике, их характеристики и технологии синтеза, основные методы производства оптических волноводов. Приведены примеры интегрально-оптических устройств. Учебное пособие предназначено для магистров, обучающихся по направлению 200600 «Фотоника и оптоинформатика» по магистерской программе «Оптические материалы фотоники и оптоинформатики» при изучении дисциплин «Волноводная фотоника», «Материалы и технологии волоконной и интегральной оптики», а также обучающихся по направлению 200200 «Оптотехника» при изучении дисциплины «Материалы лазерной оптоэлектроники».

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения, и оптоэлектроники в качестве учебного пособия для студентов и магистров высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки 200600 - «Фотоника и оптоинформатика» и 200200 – «Оптотехника».



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2009.

© А. И. Сидоров, Н.В. Никоноров, 2009.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
1. КЛАССИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОПТИКИ	9
2. ОСНОВЫ ОПТИКИ ВОЛНОВОДОВ ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНО- ОПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ	11
2.1. Основные оптические эффекты, приводящие к волноводному распространению электромагнитной волны.....	11
2.2. Основы оптики планарных волноводов	14
2.3. Основы оптики полосковых волноводов	22
2.4. Основы оптики гофрированных и брэгговских волноводов	26
2.5. Основы оптики фотоннокристаллических волноводов.....	29
2.6. Основы оптики плазмонных волноводов	32
3. МАТЕРИАЛЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОПТИКИ: ТРЕБОВАНИЯ, КЛАССЫ, СВОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИИ	35
3.1. Требования к оптическим материалам для интегральной оптики	35
3.2. Монокристаллические диэлектрики и полупроводники.....	37
3.3. Пленкообразующие материалы	40
3.4. Стекла	42
3.5. Оптические ситаллы.....	44
3.6. Композитные материалы	44
3.7. Металлы.....	48
4. МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЛАНАРНЫХ И ПОЛОСКОВЫХ ВОЛНОВОДОВ	50
4.1. Методы вакуумного нанесения.....	51
4.2. Золь-гель методы	56
4.3. Методы эпитаксии.....	58
4.4. Методы диффузии	61
4.5. Метод ионного обмена.....	66
4.6. Метод ионной имплантации.....	68
4.7. Методы фотолитографии.....	72
4.8. Метод лазерной записи волноводов в стекле	82
4.9. Пример технологии изготовления волноводной структуры из кремния по технологии SOI (silicon on insulator)	83
5. СПЕЦИАЛЬНЫЕ РАЗДЕЛЫ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОПТИКИ	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	103
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	1104
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	105

ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В курсе лекций описаны основы оптики планарных волноводов, основные типы волноводных структур и их характеристики. Рассмотрены основы оптического материаловедения интегральной оптики, основные классы материалов, используемые в интегральной оптике, их характеристики и технологии синтеза, основные методы производства оптических волноводов. Приведены примеры интегрально-оптических устройств. Учебное пособие предназначено для магистров, обучающихся по направлению 200600 «Фотоника и оптоинформатика» по магистерской программе «Оптические материалы фотоники и оптоинформатики» при изучении дисциплин «Волноводная фотоника», «Материалы и технологии волоконной и интегральной оптики», а также обучающихся по направлению 200200 «Оптехника» при изучении дисциплины «Материалы лазерной оптоэлектроники».

Целью учебного пособия является:

Сформировать у студентов знания, умения и навыки в области материалов и технологий интегральной оптики, включая: основы оптики планарных волноводов, основные типы планарных волноводных структур и их характеристики, физические принципы построения пассивных и активных элементов, схем и систем интегральной оптики, физические эффекты и явления в волноводных структурах, основы оптического материаловедения интегральной оптики, основные классы материалов, используемых в интегральной оптике, их характеристики и технологии синтеза, основные методы производства волноводов, с целью последующего использования полученных компетенций при разработке, производстве и использовании материалов и технологий для приборов и устройств современной фотоники и оптоинформатики.

ВВЕДЕНИЕ

Оптические волноводы представляют собой протяженные структуры, внутри которых могут распространяться электромагнитные волны в видимой и инфракрасной областях спектра. Оптический волновод представляет собой в простейшем случае диэлектрический стержень круглого сечения (волокно) или прямоугольного сечения с поперечным размером, сравнимым с длиной волны. Несмотря на такую простоту, распространение электромагнитной волны в подобной структуре существенно отличается от распространения в свободном пространстве или в диэлектрическом стержне с поперечным размером, много большим длины волны. Описанием свойств оптических волноводов и созданием на их основе новых оптических устройств для передачи и обработки информации занимается специальное направление науки и техники – интегральная и волоконная оптика [1, 2, 3].

Интерес к оптическим волноводам возник в начале 60-х годов XX века после создания первых полупроводниковых лазеров. Оказалось, что излучение в области *p-n*-перехода лазера распространяется подобно тому, как СВЧ-электромагнитная волна распространяется в СВЧ-волноводе. Это послужило толчком к развитию теории планарных оптических волноводов и интегральной оптики. Дальнейшее развитие последней позволило создать оптические устройства для обработки информации, которые способны конкурировать с аналогичными устройствами интегральной электроники.

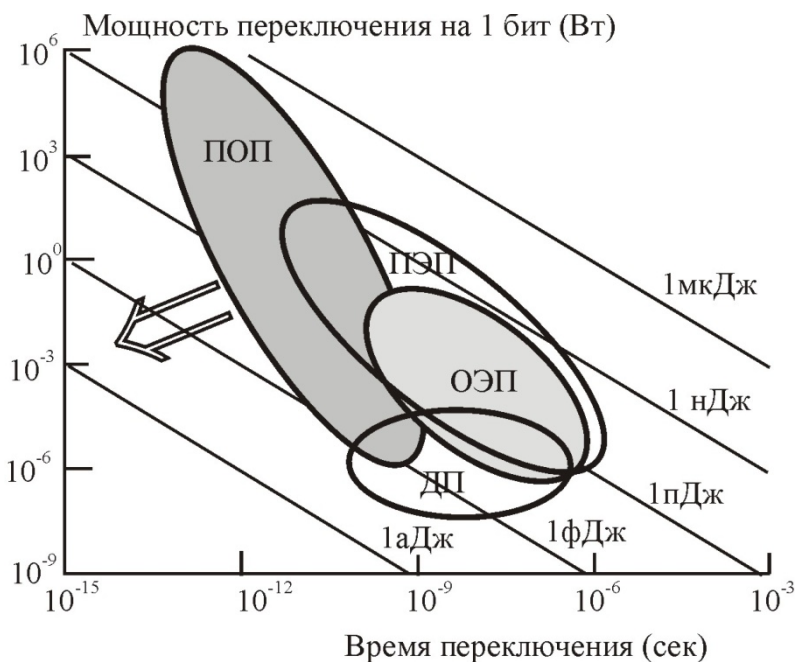


Рис.1. Сравнительные характеристики полупроводниковых электронных переключателей (ПЭП), электронных переключателей на основе джозефсоновских переходов (ДП), оптоэлектронных переключателей (ОЭП) и полностью оптических переключателей (ПОП). Прямыми линиями показаны энергии переключения

Основным достоинством интегрально-оптических является их высокое быстродействие. Уже созданы интегрально-оптические переключатели с временем переключения менее 100 фс. Такое быстродействие недостижимо для устройств обычной полупроводниковой электроники. Возможность передачи и обработки больших объемов информации определяет бурное развитие интегральной оптики в настоящее время.

При обработке электрических сигналов оптическими методами, в ряде случаев, удастся получить выигрыш – за счет упрощения конструкции устройства, увеличения быстродействия и уменьшения мощности управления. Достоинства оптических методов обработки информации иллюстрирует рис. 1. На нем показаны сравнительные характеристики электронных полупроводниковых переключателей (ПЭП), электронных переключателей на основе джозефсоновских переходов (ДП), оптоэлектронных переключателей (ОЭП) и полностью оптических переключателей (ПОП). Сопоставление производится по мощности (энергии) переключения и времени переключения (быстродействию). Из рисунка видно, что характеристики оптоэлектронных переключателей сравнимы с характеристиками полупроводниковых электронных переключателей, однако, проигрывают джозефсоновским переключателям по уровню мощности управления. В то же время, быстродействие полностью оптических переключателей в 10^2 - 10^3 раз выше, чем быстродействие переключателей других типов. Благодаря высокому быстродействию полностью оптические переключатели являются наиболее перспективными устройствами для волоконно-оптических линий связи будущего, оптических компьютеров и систем обработки информации. Однако, быстродействие полностью оптических переключателей обеспечивается за счет относительно высокой мощности управления. Поэтому, в настоящее время, основная тенденция научных исследований и разработок (стрелка на рис. 1) – уменьшение мощности управления таких устройств.

Развитие индустрии и рынка фотоники в Европе и в мире иллюстрирует диаграмма на рис. 2. Рынок фотоники в Европе вырос на 12 % с 2005 по 2006 год. В европейской индустрии фотоники занято более 250 000 человек. Во всех направлениях фотоники, приведенных на диаграмме, используются интегрально-оптические устройства.

Так как в устройствах интегральной оптики носителями сигналов являются электромагнитные волны оптического диапазона, то при разработке интегрально-оптических устройств используются оптические материалы, обеспечивающие распространение оптических сигналов без потерь, а также материалы, позволяющие управлять оптическими сигналами.

Цель данного учебного пособия – дать необходимые представления об основных типах, свойствах и особенностях оптических материалов, используемых в интегральной оптике; показать принципы, методы и

технологии изготовления элементов и узлов интегрально-оптических устройств.

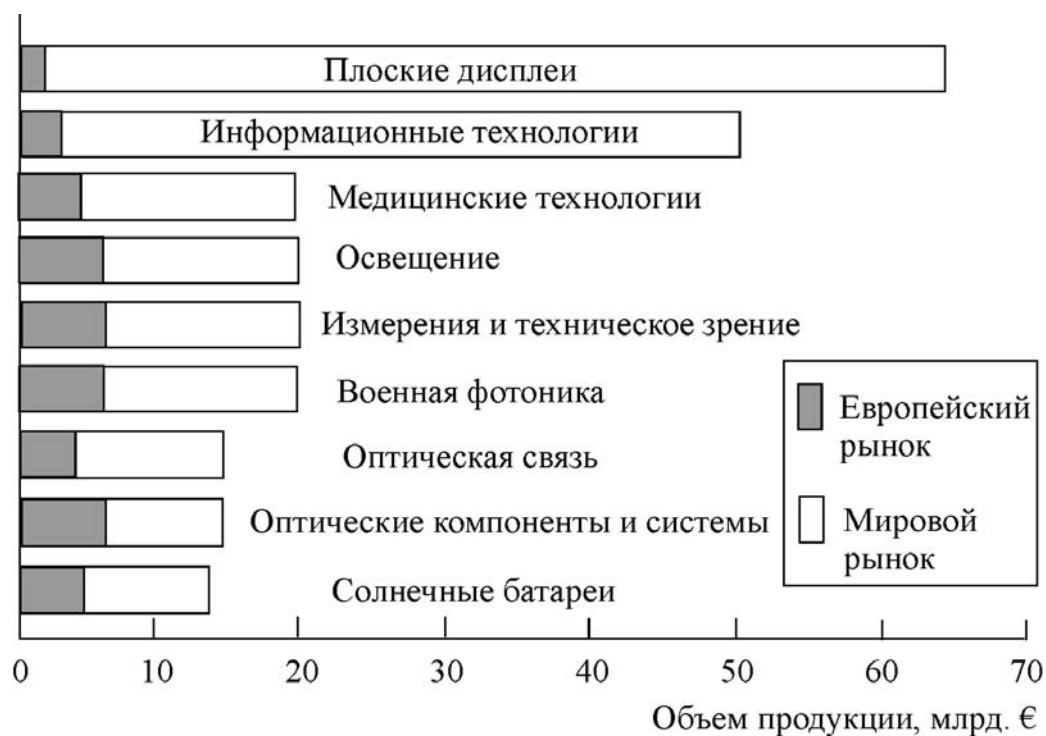


Рис. 2. Мировой и европейский рынки фотоники в 2005 г.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОПТИКИ

Общей характеристикой оптических волноводов для интегральной оптики является то, что показатель преломления материала сердцевины волновода больше, чем показатель преломления окружающей среды.



Рис. 1.1. Классификация волноводов для интегральной оптики

Оптические волноводы можно классифицировать по двум основным параметрам: по геометрии волновода и по профилю показателя преломления в поперечном и продольном направлениях. По геометрическим характеристикам волноводы делятся на две группы: регулярные и нерегулярные волноводы (рис. 1.1). К регулярным относятся волноводы имеющие равномерную и гладкую границу между сердцевиной волновода и окружающей средой, а также отсутствие модуляции показателя преломления в продольном направлении. Нерегулярные волноводы имеют пространственно-периодическую модуляцию геометрических параметров, либо показателя преломления.

Основными типами регулярных оптических волноводов являются планарные и полосковые волноводы. Планарные и полосковые волноводы

используются в интегральной оптике для передачи оптических сигналов и для построения устройств управления оптическими сигналами: оптических переключателей, модуляторов, коммутаторов и т. д.

К нерегулярным волноводам относятся гофрированные, брэгговские волноводы и фотоннокристаллические волноводы. В гофрированных волноводах имеется периодическая модуляция показателя преломления в продольном направлении на границе волновода. В брэгговских волноводах сердцевина волновода в продольном направлении имеет периодическую модуляцию показателя преломления. Волноводы данной группы используются в качестве волноводных фильтров и оптических переключателей, а также в волноводных лазерах для создания положительной обратной связи.

По профилю пространственного распределения показателя преломления в поперечном сечении планарные волноводы делятся на две группы: со ступенчатым профилем показателя преломления и с градиентным профилем (альфа-профиль). Во второй группе волноводов показатель преломления плавно изменяется от центра волновода к его границе по определенному закону. Наиболее часто используются волноводы с параболическим профилем показателя преломления. В некоторых случаях используются волноводы с многослойным тонкопленочным покрытием. Такие волноводы представляют собой промежуточную группу между волноводами со ступенчатым профилем и волноводами с альфапрофилем. Для модовой селекции используются волноводы с анизотропным показателем преломления. Такие волноводы изготавливаются из оптически анизотропных материалов, показатель преломления которых зависит от ориентации светового луча относительно оптической оси среды. Для изготовления устройств управления оптическими сигналами в интегральной оптике используются материалы с управляемым показателем преломления. В основе модуляции показателя преломления под действием внешнего управляющего сигнала наиболее часто используются электрооптический, акустооптический, термооптический, магнитооптический и нелинейно-оптические эффекты.

Материал оптического волновода может обладать усилением. Волноводы с усиливающей средой используются в волноводных и волоконных лазерах и усилителях.

Плазмонный волновод представляет собой протяженную полоску металла с поперечным размером и толщиной много меньшими длины волны излучения. Особенностью плазмонных волноводов является то, что оптический сигнал распространяется не внутри такого волновода, а по его поверхности в виде поверхностной электромагнитной волны. Это свойство плазмонных волноводов связано с возбуждением в металле плазмонов – резонансных колебаний плазмы свободных электронов. Применение плазмонных волноводов в устройствах интегральной оптики позволяет значительно уменьшить габариты этих устройств.

2. ОСНОВЫ ОПТИКИ ВОЛНОВОДОВ ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

2.1. Основные оптические эффекты, приводящие к волноводному распространению электромагнитной волны

Основным свойством оптического волновода является способность *канализовать* электромагнитную энергию оптического диапазона. В лучевом приближении это свойство волновода иллюстрирует рис. 2.1.1.

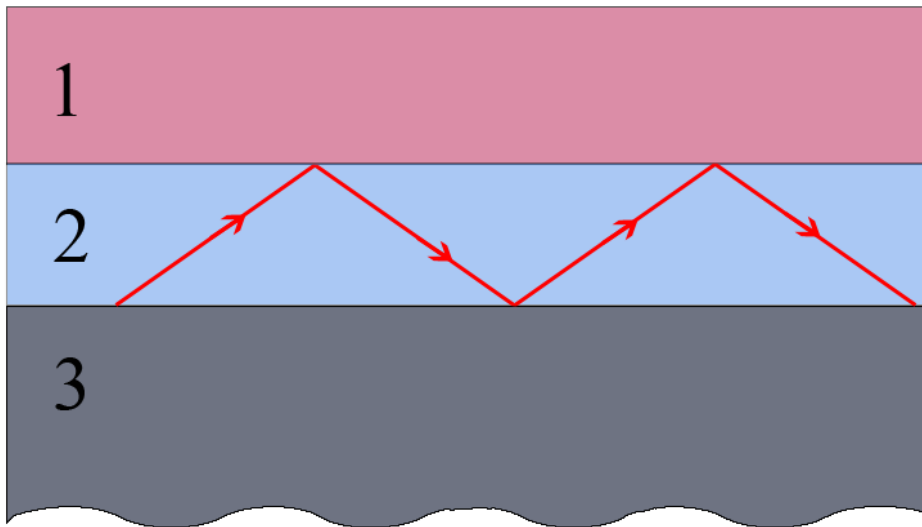


Рис. 2.1.1. Канализование луча в оптическом волноводе

Волновод на рисунке представляет собой трехслойную структуру из материалов (1...3) с разными оптическими свойствами. В случае канализования луч распространяется по центральному слою 2.

Очевидно, что такое распространение луча возможно при условии его отражения от границ между средами. Поэтому, рассмотрим законы оптики, описывающие *отражение и преломление света* на границе между двумя средами с показателями преломления n_1 и n_2 (рис. 2.1.2)

Из граничных условий можно вывести следующие выражения, описывающих свойства лучей при отражении и преломлении:

1. $\theta_3 = \theta_1$ (Угол падения равен углу отражения)
2. $\sin \theta_2 / \sin \theta_1 = n_1 / n_2$ (Закон Снеллиуса)
3. Законы Френеля

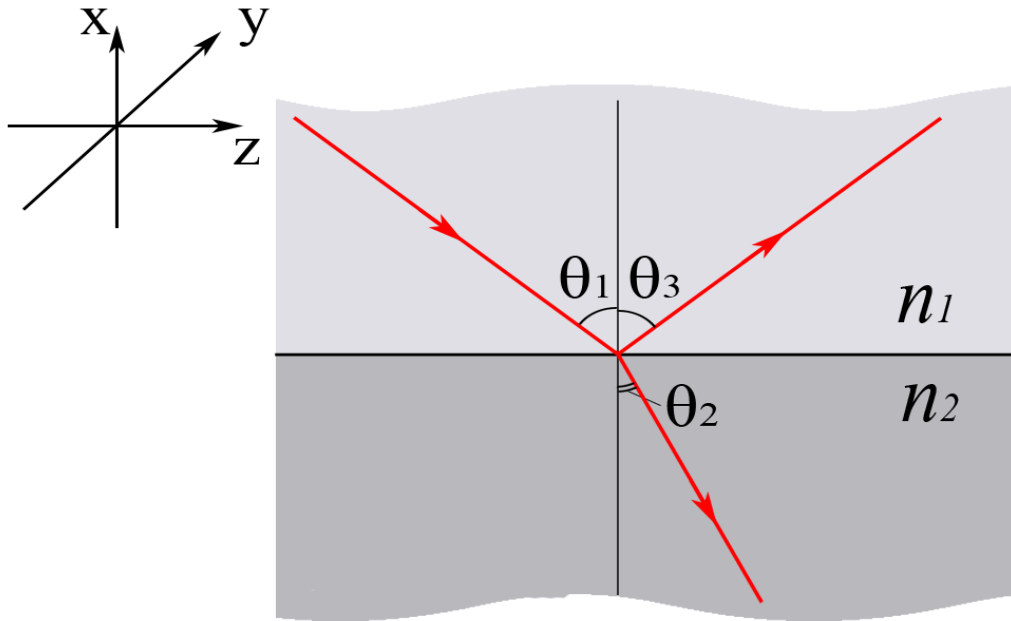


Рис. 2.1.2. Отражение и преломление света на границе двух сред

Рассмотрим подробнее законы Френеля для компонент электрического поля волны. Амплитуды электрического поля падающей (E_1), отраженной (E_3) и преломленной (E_2) волн связаны следующими соотношениями:

$$E_2 = E_1 \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}, \quad E_3 = E_1 \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2},$$

для случая, когда вектор электрического поля (E) перпендикулярен плоскости падения излучения (*TE-поляризация*: E_y, H_x, H_z , где E и H - векторы электрического и магнитного полей) и соотношениями [4]:

$$E_3 = E_1 \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2}, \quad E_2 = E_1 \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2}$$

для случая, когда вектор электрического поля (E) параллелен плоскости падения излучения (*TM-поляризация*: E_x, E_z, H_y).

Коэффициенты отражения (R) и пропускания (T) могут быть определены по следующим формулам:

$$R = \left| \frac{E_3}{E_1} \right|^2, \quad T = \left| \frac{E_2}{E_1} \right|^2.$$

Рассмотрим важный для оптических волноводов случай, при котором излучение полностью отражается от границы двух сред ($R = 100\%$).

Данная ситуация реализуется при угле падения большем критического угла θ_c . Критический угол падения определяется из выражения:

$$\sin \theta_c = n_2/n_1.$$

Из приведенного выражения следует, что эффект *полного внутреннего отражения* может возникать лишь при выполнении условия $n_1 > n_2$. Это условие также является необходимым для каналирования излучения в большинстве диэлектрических волноводов.

При распространении электромагнитных волн в тонких пленках и слоях может возникать явление *интерференции*. В случае оптических волноводов интерференция оказывает решающее влияние на характер распространения волны. Поэтому для понимания процессов, происходящих в оптических волноводах, необходимо рассмотреть основные закономерности интерференции двух электромагнитных волн.

Амплитуда плоской электромагнитной волны описывается выражением:

$$E(r, t) = E_0(r) \exp(-i\omega t) \exp[\delta(r, t)],$$

где r – координата; t – время; ω – круговая частота излучения; δ – фаза волны. При интерференции двух электромагнитных волн одинаковой поляризации происходит сложение их амплитуд:

$$E = E_1 + E_2.$$

Интенсивность излучения пропорциональна квадрату амплитуды электромагнитной волны. Квадрат суммарной амплитуды двух электромагнитных волн можно записать в виде:

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2.$$

Учитывая исходное выражение для амплитуды поля и пренебрегая быстроизменяющимся членом $\exp(-i\omega t)$ суммарную интенсивность можно представить в виде:

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1I_2)^{1/2} \cos(\delta_1 - \delta_2).$$

Таким образом, при интерференции двух электромагнитных волн суммарная интенсивность зависит от интенсивности каждой волны и разности их фаз. При $\delta_1 - \delta_2 = 0, 2\pi, 4\pi \dots$ суммарная интенсивность достигает максимума:

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1I_2)^{1/2}.$$

Из данного выражения видно, что при одинаковой интенсивности падающих волн ($I_1 = I_2$) интенсивность волны в максимуме возрастает в четыре раза.

При $\delta_1 - \delta_2 = \pi, 3\pi, 5\pi \dots$ интенсивность становится минимальной:

$$I = I_1 + I_2 - 2(I_1I_2)^{1/2}.$$

В оптических волноводах интерференционные эффекты приводят к резонансному распространению электромагнитных волн и формированию *волноводных мод*. Кроме того, явление интерференции широко используется в волноводных оптических переключателях, предназначенных для управления оптическими сигналами, и в волоконно-оптических датчиках. Примером являются волноводные интерферометры Маха–Цендера, которые широко используются в этих устройствах.

2.2. Основы оптики планарных волноводов

Планарные волноводы со ступенчатым профилем показателя преломления. Планарный волновод представляет собой тонкий слой диэлектрика с высоким показателем преломления на подложке с низким показателем преломления [1,5,6]. Среда над волноводом (например, воздух) также имеет низкий показатель преломления. Поперечное сечение планарного волновода ограничено только по вертикали, а в горизонтальном направлении – не ограничено. Волноводы со ступенчатым профилем показателя преломления бывают симметричные и асимметричные. Соответствующие им распределения показателя преломления в направлении показаны на рис. 2.2.1.

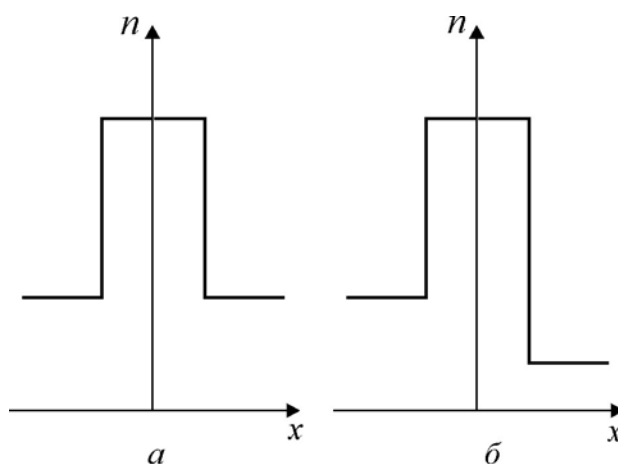


Рис. 2.2.1. Симметричный (а) и несимметричный (б) ступенчатые профили показателя преломления

В реальных интегрально-оптических устройствах наиболее часто используются асимметричные волноводы, так как они более технологичны.

Рассмотрим планарный волновод, поперечное сечение которого ограничено только по одной координате: толщина волновода по оси x равна $2a$, ширина волновода по оси y бесконечна (рис. 2.2.2). Для определенности предположим, что профиль показателя преломления – асимметричный и $n_2 > n_3$. Учтем также, что для волноводного распространения электромагнитной волны необходимо, чтобы выполнялось условие $n_1 > (n_2, n_3)$.

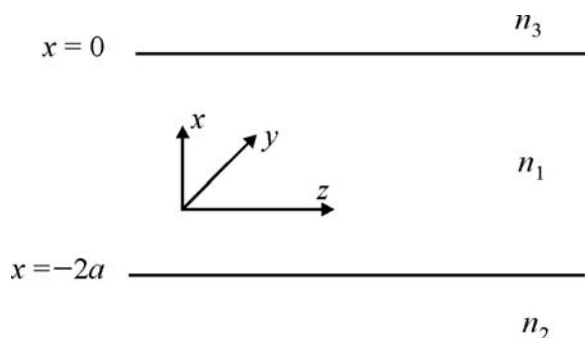


Рис. 2.2.2. Геометрия планарного волновода

Распространение лучей в планарном волноводе показано на рис. 2.2.3. Так как волновод в поперечном сечении ограничен только по оси x , то волноводное распространение лучей за счет полного внутреннего отражения возможно только в плоскости xz . Лучи, соответствующие моде низшего порядка ($N = 0$), падают на границы раздела сред с максимальным углом падения.

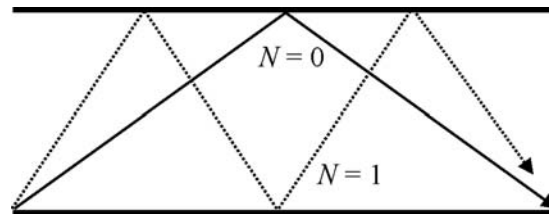


Рис. 2.2.3. Распространение лучей в планарном волноводе

Из рисунка видно, что при прохождении одного и того же отрезка волновода моды разного порядка проходят разный путь: чем выше номер моды, тем больший путь она проходит (эффект межмодовой дисперсии). Это приводит к возникновению задержки распространения оптического сигнала на высших модах по сравнению с распространением сигнала на нулевой моде (эффект межмодовой задержки). Поэтому оптический импульсный сигнал, распространяющийся по волноводу на нескольких модах, будет искажаться. Если этот сигнал представляет собой оптический импульс прямоугольной формы, то эффект межмодовой задержки приведет к его расплыванию (рис. 2.2.4).

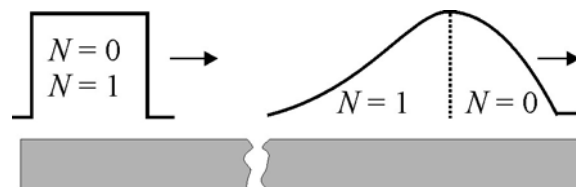


Рис. 2.2.4. Эффект межмодовой задержки

Характеристическое уравнение для мод планарного волновода со ступенчатым профилем показателя преломления может быть получено в рамках лучевого приближения и методом решения волнового уравнения. Характеристическое уравнение для ТЕ-мод имеет следующий вид [5]:

$$\operatorname{tg}(2aq - N\pi) = \frac{(p+r)q}{q^2 - pr}.$$

Здесь:

$$p^2 = \beta^2 - n_2^2 k^2, \quad q^2 = n_1^2 k^2 - \beta^2 \quad \text{и} \quad r^2 = \beta^2 - n_3^2 k^2.$$

Для ТМ-мод характеристическое уравнение примет следующую форму:

$$\operatorname{tg}(2aq - N\pi) = \frac{(n_3^2 p + n_2^2 r)n_1^2 q}{n_2^2 n_3^2 q^2 - n_1^4 pr}.$$

Решения характеристического уравнения в виде зависимостей константы распространения β от волнового числа k показаны на рис. 2.2.5. Из рисунка видно, что область допустимых значений для β , соответствующих направляемым модам, ограничена прямыми $\beta = kn_1$ и $\beta = kn_2$:

$$kn_3 \leq kn_2 \leq \beta \leq kn_1.$$

Условие отсечки для планарного волновода задается выражением $\beta = kn_2$.

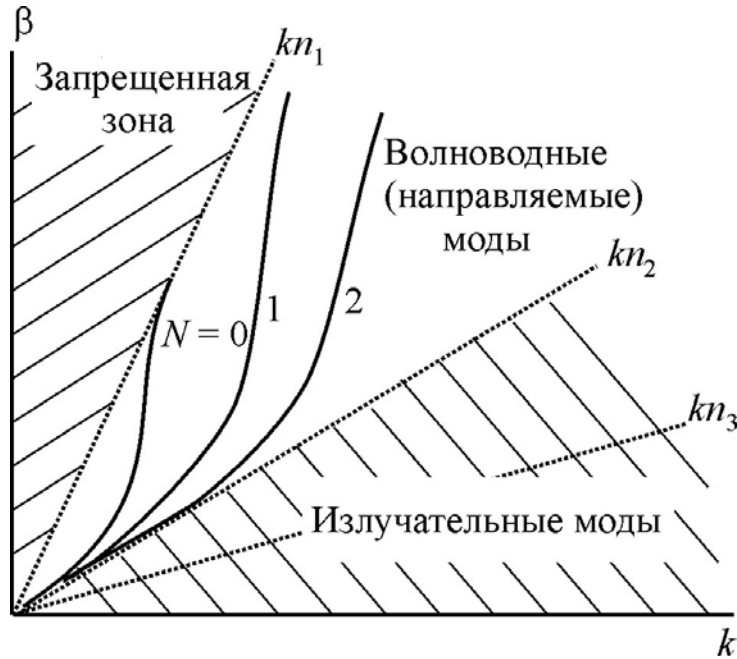


Рис. 2.2.5. Зависимость константы распространения от волнового числа

На языке лучевого описания условие отсечки соответствует нарушению условия полного внутреннего отражения, а на языке модового описания – нарушению локализации поля электромагнитной волны внутри волновода и расплыванию поля.

Для того чтобы получить распределение поля электромагнитной волны в волноводе, используется метод решения волновых уравнений. Ниже приведены выражения для распределения полей направляемых ТЕ-мод планарного волновода:

E-компонента:

$$E_y = \begin{cases} A \exp(-rx), & x \geq 0, \\ A \cos qx + B \sin qx, & 0 \geq x \geq -2a, \\ (A \cos 2aq - B \sin 2aq) \exp p(x+2a), & -2a \geq x; \end{cases}$$

H-компонента:

$$H_z = -\frac{i}{\omega\mu_0} \begin{cases} -rA \exp(-rx), & x \geq 0, \\ q(-A \sin qx + B \cos qx), & 0 \geq x \geq -2a, \\ p(A \cos 2aq - B \sin 2aq) \exp p(x+2a), & -2a \geq x. \end{cases}$$

Для направляемых ТМ-мод выражения для распределения поля принимают следующий вид:

H -компонента:

$$H_y = \begin{cases} C \exp(-rx), & x \geq 0, \\ C \cos qx + D \sin qx, & 0 \geq x \geq -2a, \\ (C \cos 2aq - D \sin 2aq) \exp p(x+2a), & -2a \geq x. \end{cases}$$

E -компонента:

$$E_z = \frac{i}{\omega \epsilon_0} \begin{cases} -\frac{rC}{n_3^2} \exp(-rx), & x \geq 0, \\ \frac{q}{n_1^2} (-C \sin qx + D \cos qx), & 0 \geq x \geq -2a, \\ \frac{p}{n_2^2} (C \cos 2aq - D \sin 2aq) \exp p(x+2a), & -2a \geq x. \end{cases}$$

Распределение E -компоненты поля ТЕ-моды планарного волновода для $N = 0$ и $N = 1$ показано на рис. 2.2.6.

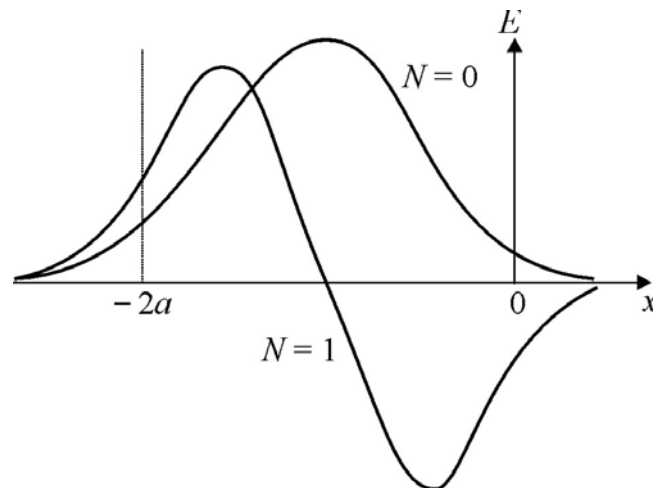


Рис. 2.2.6. Распределение E -компоненты поля ТЕ-моды планарного волновода

Из рисунка видно, что для низшей моды ($N = 0$) поле сосредоточено вблизи центральной оси волновода. Вне волновода электромагнитная волна также существует, однако ее амплитуда экспоненциально затухает по мере удаления от границы. Существование поля направляемой моды вне волновода является важным и полезным эффектом, который часто используется в оптических переключателях и коммутаторах, применяемых в интегральной оптике.

Для мод с более высокими индексами ($N \geq 1$) распределение поля усложняется (рис. 2.2.6). Однако при этом сохраняются основные свойства волны: сосредоточение поля в сердцевине волновода и его затухание вне этой области.

Приведем также ряд полезных выражений, характеризующих свойства планарного волновода.

Количество направляемых мод волновода M :

для ТЕ-мод:

$$M = \left\{ \frac{1}{\pi} \left(2f - \arctg \sqrt{\frac{n_2^2 - n_3^2}{n_1^2 - n_2^2}} \right) \right\}_{\text{int}}.$$

Здесь индекс «int» указывает на то, что следует брать минимальное целое число, превышающее значение выражения в скобках; f – нормированная частота:

$$f = ak \sqrt{n_1^2 - n_2^2};$$

для ТМ-мод:

$$M = \left\{ \frac{1}{\pi} \left(2f - \arctg \frac{n_1^2}{n_3^2} \sqrt{\frac{n_2^2 - n_3^2}{n_1^2 - n_2^2}} \right) \right\}_{\text{int}}.$$

Поток электромагнитной энергии в волноводе P . Усредненное по времени значение потока энергии P в волноводе равно интегралу по поперечному сечению волновода от компоненты вектора Пойтинга в направлении оси z :

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} S_z dx = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*)_z dx.$$

Полный поток энергии, распространяющийся в волноводе, представляет собой сумму мощностей, распространяющихся в каждой из трех областей волновода:

$$P = P_1 + P_2 + P_3.$$

Для ТЕ-мод полный поток энергии можно представить в виде

$$P = \frac{\beta}{4\omega\mu_0} E_{y \max}^2 w_{\perp}.$$

Здесь $E_{y \max}$ – максимальное значение компоненты поля E_y ; w_{\perp} – эффективная ширина волновода для ТЕ-мод.

Для ТМ-мод полный поток энергии задается выражением

$$P = \frac{\beta}{4\omega\epsilon_0 n_1^2} H_{y \max}^2 w_{\parallel}.$$

Здесь $H_{y \max}$ – максимальное значение компоненты поля H_y ; w_{\parallel} – эффективная ширина волновода для ТМ-мод.

Свойства планарного волновода с альфа-профилем показателя преломления. Оптические волноводы, имеющие градиент показателя преломления в поперечном сечении, широко используются в интегральной оптике. В общем случае, профиль показателя преломления можно описать выражением [5]:

$$n^2(x) = \begin{cases} n_1^2(1 - 2\Delta f(x)), & x < a; \\ n_1^2(1 - 2\Delta) \equiv n_2^2, & x \geq a, \end{cases}$$

где n_1 – показатель преломления на оси волновода; n_2 – показатель преломления оболочки; $\Delta = \text{const}$; $f(x)$ – функция, задающая профиль показателя преломления; $2a$ – ширина сердцевины. Наиболее часто используется экспоненциальный либо степенной профиль показателя преломления. В случае степенного профиля («альфа-профиля») функция $f(x)$ имеет следующий вид:

$$f(x) = (x/a)^\alpha.$$

В зависимости от показателя степени α могут быть реализованы различные профили показателя преломления: линейный ($\alpha = 1$), параболический ($\alpha = 2$) и другие (рис. 2.2.7, а). Случай $\alpha = \infty$ соответствует ступенчатому профилю показателя преломления.

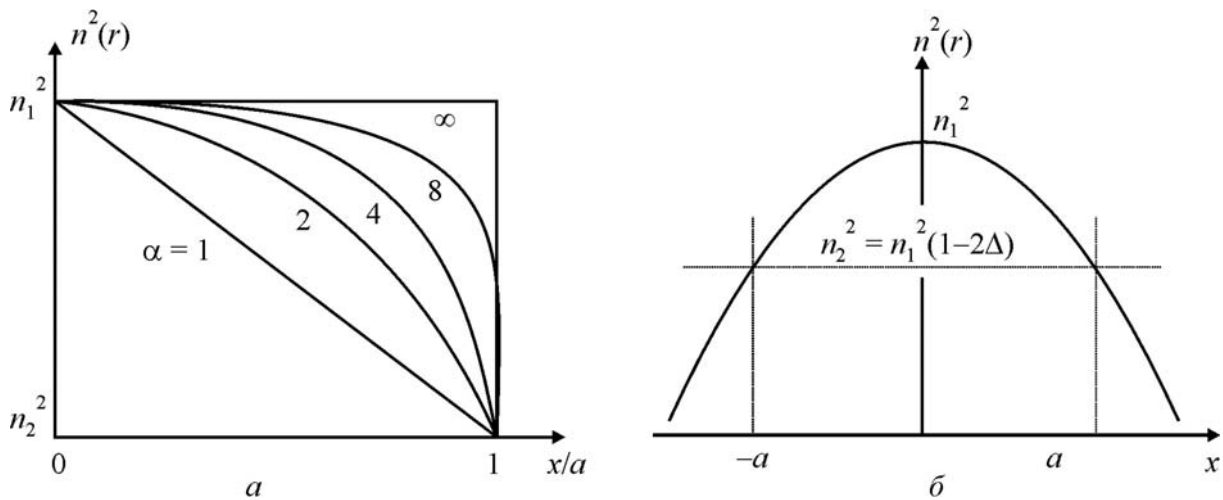


Рис. 2.2.7. а – альфа-профили планарного волновода; б – параболический профиль показателя преломления

Рассмотрим свойства прямоугольного волновода с альфа-профилем показателя преломления на примере планарного волновода с параболическим распределением показателя преломления ($\alpha = 2$). Профиль показателя преломления в таком волноводе показан на рис. 2.2.7, б. Анализ свойств волновода будет проведен в рамках лучевого приближения [6].

Из рис. 2.2.7, б становится понятным определение параметра Δ :

$$2\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}.$$

Введем также нормированную частоту V в виде

$$V^2 = 2a^2 k^2 n_1^2 \Delta.$$

Уравнение траектории лучей в двумерной среде с показателем преломления $n(x)$ имеет вид

$$\frac{dz}{dx} = \frac{\beta}{\sqrt{k^2 n^2(x) - \beta^2}}.$$

После подстановки в него выражения для $n(x)$ уравнение примет вид

$$\frac{dz}{dx} = \frac{a\beta}{\sqrt{u^2 - V^2(x/a)^2}}.$$

Здесь $u^2 = a^2(k^2 n_1^2 - \beta^2)$. Решение данного уравнения с граничным условием $x(z=0) = x_0$ приводит к выражению:

$$\frac{zV}{a^2\beta} = \arcsin\left(\frac{Vx}{ua}\right) - \arcsin\left(\frac{Vx_0}{ua}\right).$$

Из данного выражения видно, что в волноводе с параболическим профилем показателя преломления траектория луча имеет периодический характер. Причем период осцилляций равен $2\pi a^2\beta/V$, а максимальная амплитуда осцилляций равна ua/V .

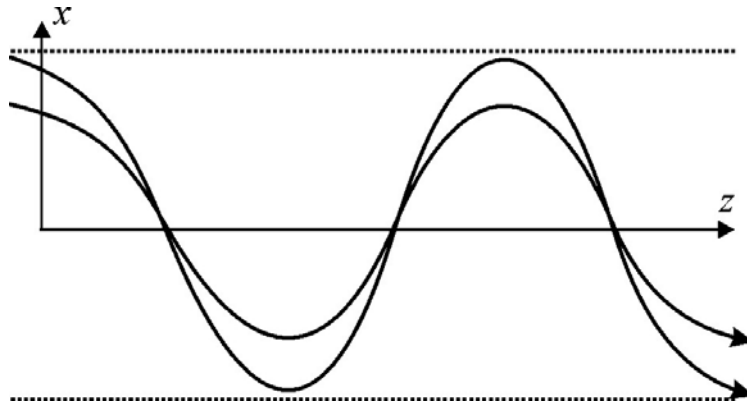


Рис. 2.2.8. Траектории лучей в волноводе с параболическим профилем показателя преломления

Траектории двух лучей в таком волноводе для разных значений x_0 показаны на рис. 2.2.8. Из него видно, что вблизи границы сердцевины волновода происходит не скачкообразное, а плавное изменение траектории лучей. Кроме того, вдоль оси z происходит периодическая фокусировка лучей, т. е. волновод обладает свойствами линзоподобной среды. Выражение для времени распространения луча имеет вид:

$$\tau = \frac{L}{c} \frac{kn_1^2}{\beta} \left(1 - \frac{\Delta u^2}{V^2} \right).$$

Здесь c – скорость света в вакууме; L – длина отрезка волновода. При использовании параксиального приближения ($\beta \approx kn_1$) выражение для времени распространения примет вид

$$\tau = \frac{Ln_1}{c}.$$

В данное выражение не входят параметры лучей, т. е. время распространения одинаково для всех лучей в волноводе. Это означает, что в таком волноводе нет межмодовой задержки (см. рис. 2.2.4), приводящей к искажению оптических сигналов. Данный эффект имеет простое объяснение. Лучи, которые распространяются вблизи оси волновода, проходят меньший путь, чем лучи, которые распространяются с большей

пространственной амплитудой. В то же время лучи вблизи оси волновода находятся в среде с более высоким показателем преломления, т. е. имеют меньшую скорость, чем скорость лучей, достигающих границы волновода. Меньшая скорость распространения компенсирует меньший путь, приводя к выравниванию времени распространения лучей с разными траекториями. Отсутствие межмодовой задержки является важным свойством волноводов с параболическим профилем показателя преломления.

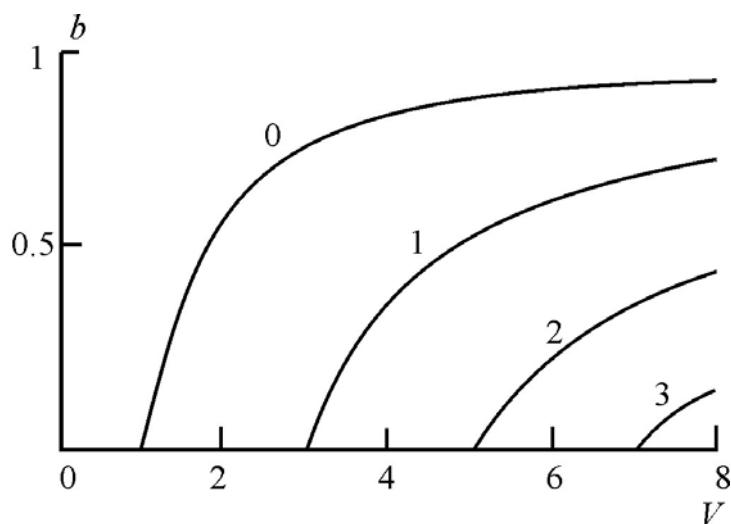


Рис. 2.2.9. Зависимость нормированной константы распространения от нормированной частоты для волновода с параболическим профилем показателя преломления

Характеристическое уравнение планарного волновода с параболическим профилем показателя преломления может быть получено как в лучевом приближении, так и решением волнового уравнения приближенными методами. Характеристическое уравнение имеет вид

$$u^2 = V(2N + 1), N = 0, 1, 2, \dots$$

На рис. 2.2.9 показана зависимость нормированной константы распространения $b = 1 - [(2N + 1)/V]$ от нормированной частоты V . Необходимо отметить, что обращение нормированной константы распространения в ноль ($b = 0$) в данном случае не соответствует реальному условию отсечки моды [6]. Это связано с тем, что при приближенном анализе волновода данного типа предполагается, что среда с параболическим профилем показателя преломления не ограничена в направлении x . В реальных волноводах среда ограничена оболочкой, поэтому данный результат для таких волноводов непригоден.

Ниже приведены распределения компонент поля ТЕ- и ТМ-мод для планарного волновода с параболическим профилем показателя преломления. Распределения получены методом приближенного решения волнового уравнения:

ТЕ-моды:

$$E_x = E_z = H_y = 0;$$

$$E_y = -\frac{\omega\mu_0}{\beta} H_x;$$

$$H_z = \frac{i}{\beta} \frac{d H_x}{d x};$$

$$H_x = \frac{\sqrt[4]{2}}{\sqrt[4]{\pi} \sqrt{2^N N!} w_0} H_N \left(\frac{x \sqrt{2}}{w_0} \right) \exp \left(-\frac{x^2}{w_0^2} \right),$$

где $w_0^2 = 2a^2/V$; H_N – функция Эрмита:

$$H_N(x) = N! \sum_{m=0}^{N/2} (-1)^m \frac{(2x)^{N-2m}}{m!(N-2m)!}, \quad N=0, 1, 2, \dots;$$

ТМ-моды:

$$E_y = H_z = H_x = 0;$$

$$H_y = \frac{\omega \varepsilon_0 n^2(x)}{\beta} E_x;$$

$$E_z = \frac{i}{\beta n^2(x)} \frac{d(n^2(x) E_x)}{d x};$$

$$E_x = \frac{\sqrt[4]{2}}{\sqrt[4]{\pi} \sqrt{2^N N!} w_0 n(x)} H_N \left(\frac{x \sqrt{2}}{w_0} \right) \exp \left(-\frac{x^2}{w_0^2} \right), \quad N=0, 1, 2, \dots$$

В данном случае w_0 задается выражением

$$w_0^2 = \frac{2}{\sqrt{2k^2 n_1^2 \frac{\Delta}{a^2} + \frac{16\Delta^2}{a^4}}}.$$

Отметим, что распределения полей ТЕ- и ТМ-мод при $2\Delta \ll k^2 n_1^2 a^2$ совпадают.

2.3. Основы оптики полосковых волноводов

Волновод с прямоугольным поперечным сечением называется полосковым волноводом (рис. 2.3.1). В этом волноводе область распространения моды в поперечном направлении ограничена по двум координатам. Если волновод расположен поверх подложки, он называется приподнятым (рис. 2.3.1, а). Данный тип волновода наиболее широко используется в интегральной оптике. В некоторых случаях используется полосковый волновод, погруженный в материал подложки (рис. 2.3.1, б). Такой волновод называется внедренным.

На рис. 2.3.1, в показан гребенчатый волновод. В отличие от обычного полоскового волновода он имеет широкий пьедестал из того же материала, что и сам волновод. В некоторых случаях используются полосковые нагруженные волноводы (рис. 2.3.1, г). В таком волноводе пьедестал изготовлен из материала, показатель преломления которого отличается от показателей преломления собственно волновода и подложки.

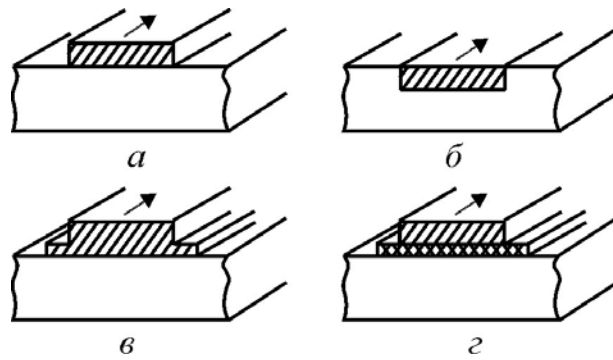


Рис.2.3.1. Разновидности полосковых волноводов
 а) приподнятый полосковый волновод
 б) внедренный полосковый волновод
 в) гребенчатый полосковый волновод
 г) нагруженный полосковый волновод

Рассмотрим свойства полоскового волновода, поперечное сечение которого ограничено по двум координатам: геометрическая толщина волновода по оси x равна $2a$, а по оси y равна $2d$ (рис. 2.3.2).

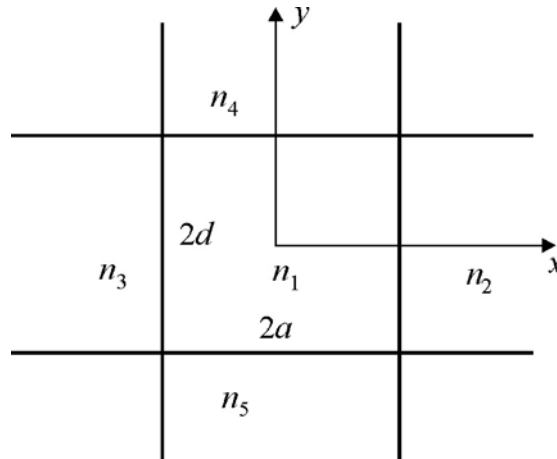


Рис. 2.3.2. Геометрия полоскового волновода

Сердцевина волновода имеет показатель преломления n_1 . В общем случае среды, окружающие сердцевину волновода с четырех сторон (рис. 2.3.2), могут иметь разный показатель преломления: n_2, n_3, n_4, n_5 . Учтем также, что для волноводного распространения электромагнитной волны необходимо, чтобы выполнялось следующее условие: $n_1 > (n_2, n_3, n_4, n_5)$.

Распространение лучей в полосковом волноводе показано на рис. 2.3.3. В отличие от планарного волновода полосковый волновод имеет не две, а четыре границы раздела сред, на которых может происходить полное внутреннее отражения. Поэтому количество типов траекторий лучей в полосковом волноводе увеличивается, по сравнению с планарным волноводом. В полосковом волноводе лучи могут распространяться в вертикальной плоскости (рис. 2.3.3, а), в горизонтальной плоскости (рис. 2.3.3, б), а также по траекториям, представляющим собой спираль, составленную из отрезков прямых линий (рис. 2.3.3, в). В последнем случае, луч последовательно отражается от всех границ раздела сред

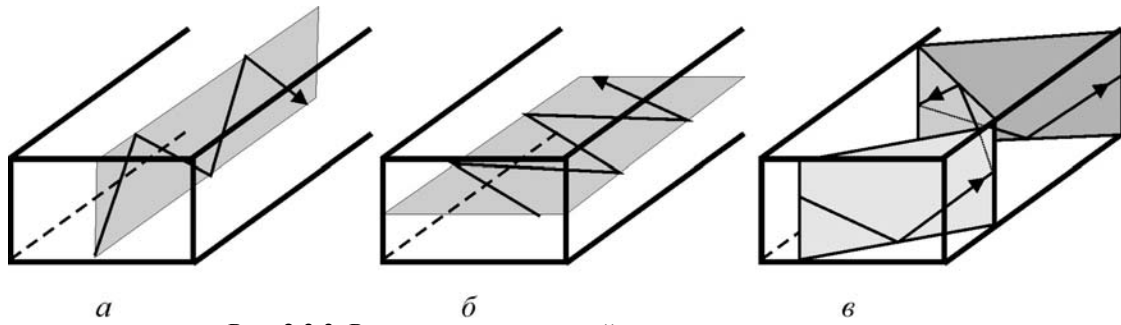


Рис. 2.3.3. Распространение лучей в полосковом волноводе

Характеристики лучей, распространяющихся по разным траекториям, зависят как от геометрических размеров волновода по каждой из координат, так и от показателей преломления сред, окружающих сердцевину волновода. Все это значительно усложняет математическое описание свойств волновода и не позволяет получить точные аналитические решения. Вот почему, для описания полосковых волноводов используются приближенные методы расчета [5].

В полосковом волноводе могут существовать как «чистые» ТЕ- и ТМ-моды, так и моды промежуточных типов. Поэтому для единого описания мод различных типов, их разбивают на две группы: моды, обозначаемые E_{NM}^x , поляризованные в основном вдоль оси x , и моды, обозначаемые E_{NM}^y , поляризованные в основном вдоль оси y . Индексы N, M – число нулей в распределении поля в направлениях x и y соответственно. Так как в полосковом волноводе могут существовать две группы мод (E_{NM}^x и E_{NM}^y) как ТЕ-, так и ТМ-типа, то для их описания требуется четыре характеристических уравнения.

Характеристические уравнения для мод полоскового волновода со ступенчатым профилем показателя преломления могут быть получены методом приближенного модового анализа [5]. Характеристические уравнения для E_{NM}^x -мод имеют следующий вид:

$$\text{для ТМ - мод :} \quad \text{tg}(2k_x a) = \frac{n_1^2 k_x (\gamma_2 n_3^2 + \gamma_3 n_2^2)}{n_2^2 n_3^2 k_x^2 - n_1^4 \gamma_2 \gamma_3},$$

$$\text{для ТЕ - мод :} \quad \text{tg}(2k_y d) = \frac{k_y (\gamma_4 + \gamma_5)}{k_y^2 - \gamma_4 \gamma_5}.$$

Здесь введены обозначения:

$$\begin{aligned} \gamma_j^2 &= (n_1^2 - n_j^2) k^2 - k_x, \quad j=2, 3; \\ \gamma_j^2 &= (n_1^2 - n_j^2) k^2 - k_y, \quad j=4, 5; \\ k_x^2 &= k^2 n_j^2 - \beta^2 + \gamma_j^2, \quad j=4, 5; \\ k_y^2 &= k^2 n_j^2 - \beta^2 + \gamma_j^2, \quad j=2, 3, \end{aligned}$$

Для E_{NM}^y -мод характеристические уравнения принимают следующий вид:

для ТМ - мод:
$$\operatorname{tg}(2k_x a) = \frac{k_x(\gamma_2 + \gamma_3)}{k_x^2 - \gamma_2 \gamma_3};$$

для ТЕ - мод:
$$\operatorname{tg}(2k_y d) = \frac{n_1^2 k_y (\gamma_4 n_5^2 + \gamma_5 n_4^2)}{n_4^2 n_5^2 k_y^2 - n_1^4 \gamma_4 \gamma_5}.$$

Решив характеристические уравнения, можно найти константы k_x и k_y . Константы распространения β можно определить из соотношения

$$\beta = k^2 n_1^2 - k_x^2 - k_y^2.$$

Рассмотрим частный случай симметричного ($n_2 = n_3 = n_4 = n_5$) слабонаправляющего ($n_1 - n_j \ll n_1, j = 2 \dots 5$) полоскового волновода. Введем нормированную константу распространения b :

$$b^2 = \frac{\beta^2 - k^2 n_2^2}{k^2 n_1^2 - k^2 n_2^2}$$

и параметр V_x :

$$V_x^2 = a^2 k^2 (n_1^2 - n_2^2).$$

Расчетные зависимости нормированной константы распространения моды низшего порядка (0, 0) от параметра V_x показаны на рис. 2.3.4 для трех значений отношения сторон волновода d/a . Для сравнения показан также результат расчета для $d/a \rightarrow \infty$ (случай планарного волновода).

Распределение поля электромагнитной волны в полосковом волноводе определяется методом решения волновых уравнений с учетом граничных условий на каждой из четырех границ волновода. При этом пренебрегают полем в угловых областях. Аналитические решения этой задачи могут быть получены лишь в приближении слабонаправляющего волновода ($n_1 - n_j \ll n_1, j = 2 \dots 5$).

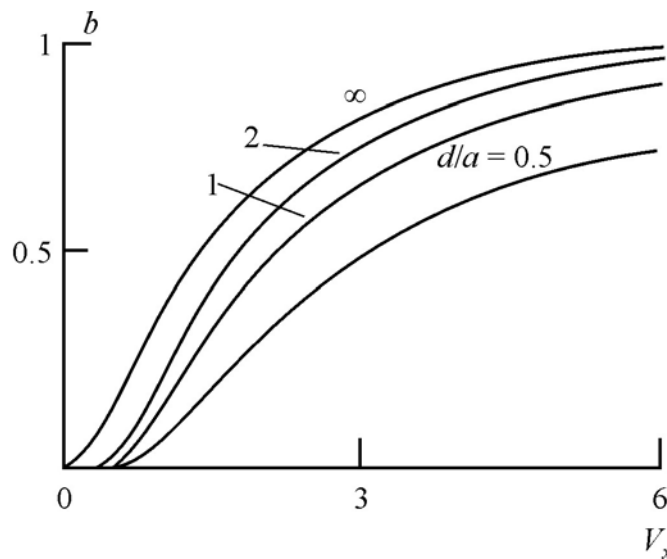


Рис. 2.3.4. Зависимости нормированной константы распространения моды низшего порядка (0, 0) от нормированной частоты

Рассмотрим распределение поля направляемых мод в прямоугольном полосковом волноводе для случая E_{NM}^x -мод. В сердцевине волновода продольные и поперечные компоненты поля электромагнитной волны имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 E_z &= A \cos[k_x(x + \xi)] \cos[k_y(y + \eta)]; \\
 E_x &= -iA \frac{n_1^2 k^2 - k_x^2}{\beta k_x} \sin[k_x(x + \xi)] \cos[k_y(y + \eta)]; \\
 E_y &= iA \frac{k_y}{\beta} \cos[k_x(x + \xi)] \sin[k_y(y + \eta)]; \\
 H_z &= -A \frac{\omega n_1^2 \varepsilon_0 k_y}{\beta k_x} \sin[k_x(x + \xi)] \sin[k_y(y + \eta)]; \\
 H_y &= iA \frac{\omega n_1^2 \varepsilon_0}{k_x} \sin[k_x(x + \xi)] \cos[k_y(y + \eta)].
 \end{aligned}$$

Здесь A – постоянная, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, ξ и η – параметры фазы волны. Приведем также выражения для компоненты E_z поля E_{NM}^x -моды в областях вне сердцевины волновода:

$$\begin{aligned}
 \text{область с } n_2 : E_z &= A \cos[k_x(a + \xi)] \cos[k_y(y + \eta)] \exp[-\gamma_2(x - a)]; \\
 \text{область с } n_3 : E_z &= A \cos[k_x(\xi - a)] \cos[k_y(y + \eta)] \exp[\gamma_3(x + a)]; \\
 \text{область с } n_4 : E_z &= A \frac{n_1^2}{n_4^2} \cos[k_x(x + \xi)] \cos[k_y(d + \eta)] \exp[-\gamma_4(y - d)]; \\
 \text{область с } n_5 : E_z &= A \frac{n_1^2}{n_5^2} \cos[k_x(x + \xi)] \cos[k_y(\eta - d)] \exp[\gamma_5(y + d)].
 \end{aligned}$$

Таким образом, как и в случае планарного волновода, распределение поля направляемых мод в полосковом волноводе в сердцевине имеет осциллирующий характер, а во внешних областях экспоненциально затухает.

2.4. Основы оптики гофрированных и брэгговских волноводов

В волоконной и интегральной оптике широко используются диэлектрические волноводы с периодической модуляцией показателя преломления вдоль направления распространения электромагнитной волны [1, 7]. Такой волновод представляет собой протяженную структуру круглого или прямоугольного сечения, у которой в продольном направлении чередуются участки с высоким и с низким показателями

преломления. Если оптическая длина каждого такого участка кратна $\lambda/4$: $n_{1,2}L_{1,2} = (2m + 1)\lambda/4$ ($n_{1,2}$ – показатели преломления участков, $L_{1,2}$ – геометрическая длина участков, $m = 0, 1, \dots$), то волновод называется брэгговским (рис. 2.4.1, а), по аналогии с брэгговскими отражателями [4]. Частным случаем брэгговского волновода является гофрированный волновод (рис. 2.4.1, б). В таком волноводе, по крайней мере, одна из границ волновода гофрирована. Гофрировка границы волновода приводит к возмущению его диэлектрической проницаемости, поэтому для описания такого волновода вводится эффективная диэлектрическая проницаемость ε^* :

$$\varepsilon^*(z) = \varepsilon(z) + \Delta\varepsilon(z),$$

где ε – диэлектрическая проницаемость невозмущенного волновода с гладкой границей; $\Delta\varepsilon = \Delta n^2$ – возмущение, вносимое периодической модуляцией показателя преломления Δn на границе волновода.

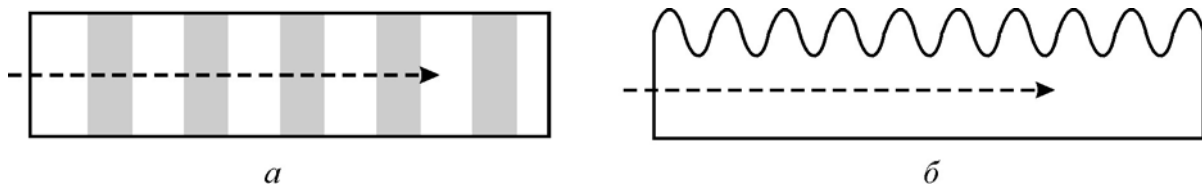


Рис. 2.4.1. а – брэгговский волновод; б – гофрированный волновод

Так как Δn является периодической функцией: $\Delta n(z) = \Delta n(z + \Lambda)$, где Λ – период гофра, то и эффективная диэлектрическая проницаемость гофрированного волновода является периодической функцией.

Для описания свойств брэгговских и гофрированных волноводов используются метод связанных волн и метод теории возмущений. Основной особенностью периодических волноводов является возможность возникновения электромагнитной волны, распространяющейся в обратном направлении по отношению к падающей волне. Существование двух волн – прямой с амплитудой E_1 и отраженной с амплитудой E_2 – требует введения двух констант распространения β_1 и β_2 соответственно. Рассмотрим основные свойства периодических волноводов на примере гофрированного волновода. Как правило, в подобных волноводах геометрические параметры выбирают таким образом, чтобы $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2 = 0$. Для длины волны λ_0 этому условию соответствует период гофра равный

$$\Lambda = m\lambda_0/2, \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

При выполнении фазового условия ($\Delta\beta = 0$) решение уравнений связанных волн дает следующие выражения для прямой и для обратной волн:

$$E_1 = A \frac{|k| \operatorname{sh}[k(z-L)]}{k \operatorname{ch}(kL)},$$

$$E_2 = B \frac{\text{ch}[k(z-L)]}{\text{ch}(kL)}.$$

Здесь A и B – константы; L – длина возмущенной (гофрированной) области волновода. Параметр k имеет вид

$$k = \frac{i\omega\epsilon_0 a_m}{4} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta n^2(x) \Psi^2(x, y, s) dx,$$

$$a_m = \begin{cases} -i/\pi m & (\text{нечетные } m), \\ 0 & (\text{четные } m), \\ 1/2 & (m=0). \end{cases}$$

Здесь ω – круговая частота электромагнитной волны; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; $\Psi(x, y, s)$ – амплитуда волноводной моды с индексом s .

На рис. 2.4.2, *a* показано распределение поля падающей и отраженной волн вдоль оси z внутри возмущенной области волновода при $\beta = 0$.

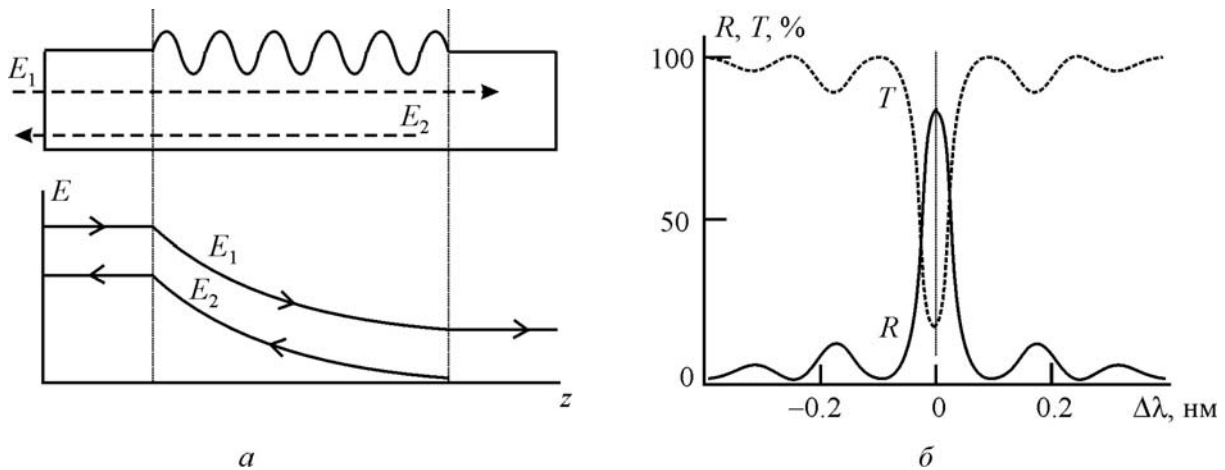


Рис. 2.4.2. *a* – распространение прямой и обратной моды в гофрированном волноводе; *б* – спектры пропускания и отражения гофрированного волновода

Из рисунка видно, что в области возмущения амплитуда падающей волны экспоненциально затухает, а амплитуда отраженной волны экспоненциально возрастает в направлении ее распространения. Это иллюстрируют спектральные зависимости коэффициентов отражения и пропускания гофрированного волновода вблизи резонанса, показанные на рис. 5.25, *б* ($\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$). Таким образом, гофрированный волновод способен резонансно ослаблять излучение на фиксированной длине волны, т. е. он является резонансным узкополосным фильтром. Излучение, не прошедшее через волновод, отражается и распространяется в виде волноводной моды в обратном направлении. Аналогичными свойствами обладает брэгговский волновод.

2.5. Основы оптики фотоннокристаллических волноводов

Фотоннокристаллические волноводы являются новым типом оптических волноводов. Их появление связано с созданием и исследованием новых оптических объектов – фотонных кристаллов. Фотонные кристаллы представляют собой периодические структуры из диэлектриков с отличающимся показателем преломления. Период этих структур – порядка длины волны. На рис. 2.5.1 показаны простейшие варианты одномерного, двумерного и трехмерного фотонных кристаллов. Одномерный (1D) фотонный кристалл (рис. 2.5.1, *а*) представляет собой чередующиеся диэлектрические слои с высоким и низким показателями преломления. Как правило, оптическая толщина этих слоев кратна $\lambda/4$. Отсюда очевидно, что брэгговский отражатель и брэгговский волновод являются в то же время одномерными фотонными кристаллами. Простейший двумерный (2D) фотонный кристалл (рис. 2.5.1, *б*) представляет собой диэлектрическую пластину с периодически расположенными отверстиями. Отверстия могут быть пустыми либо заполненными диэлектриком с иным показателем преломления. Трехмерный (3D) фотонный кристалл может быть сформирован из диэлектрических шаров (рис. 2.5.1, *в*). Подобный фотонный кристалл называется искусственным опалом, так как его структура и оптические свойства близки к структуре и свойствам природного полудрагоценного камня опала.

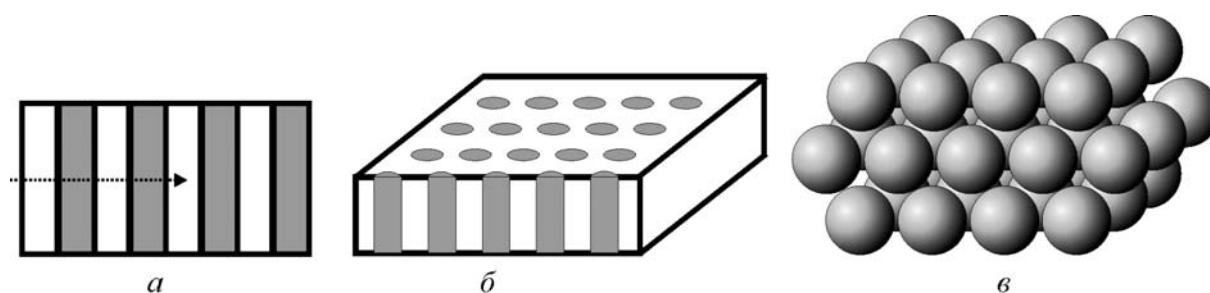


Рис. 2.5.1. Разновидности фотонных кристаллов.

а – одномерный; б – двумерный;

в - трехмерный

Название фотонных кристаллов вызвано тем, что свойства фотонов в таких периодических структурах подобны свойствам электронов в периодическом электрическом поле атомов обычных кристаллов. Известно, что электрон обладает волновыми свойствами. В кристалле возникает интерференция между «волной-электроном» и периодическим электрическим полем атомов. Это приводит к появлению разрешенных и запрещенных диапазонов длин волн или энергий электронов в кристалле. Так возникают валентная зона и зона проводимости – диапазоны энергий, разрешенных для электрона, и запрещенная зона – область энергий, которые электрон в кристалле принимать не может. В фотонном кристалле имеет место похожая ситуация. Фотон, который одновременно является электромагнитной волной, интерферирует с периодической структурой

фотонного кристалла. В результате появляются диапазоны разрешенных и запрещенных энергий фотонов (или длин волн электромагнитной волны) в фотонном кристалле. Фотоны с запрещенными энергиями отражаются от фотонного кристалла; а фотоны с разрешенными энергиями в него проникают. Для таких фотонов он прозрачен.

На рис. 2.5.2 показаны спектры отражения 1D-фотонных кристаллов – совершенного (а) и с дефектом (б). Для сравнения в нижней части рисунков схематично представлены структуры энергетических зон электронов обычного кристалла без дефектов и при наличии дефекта.

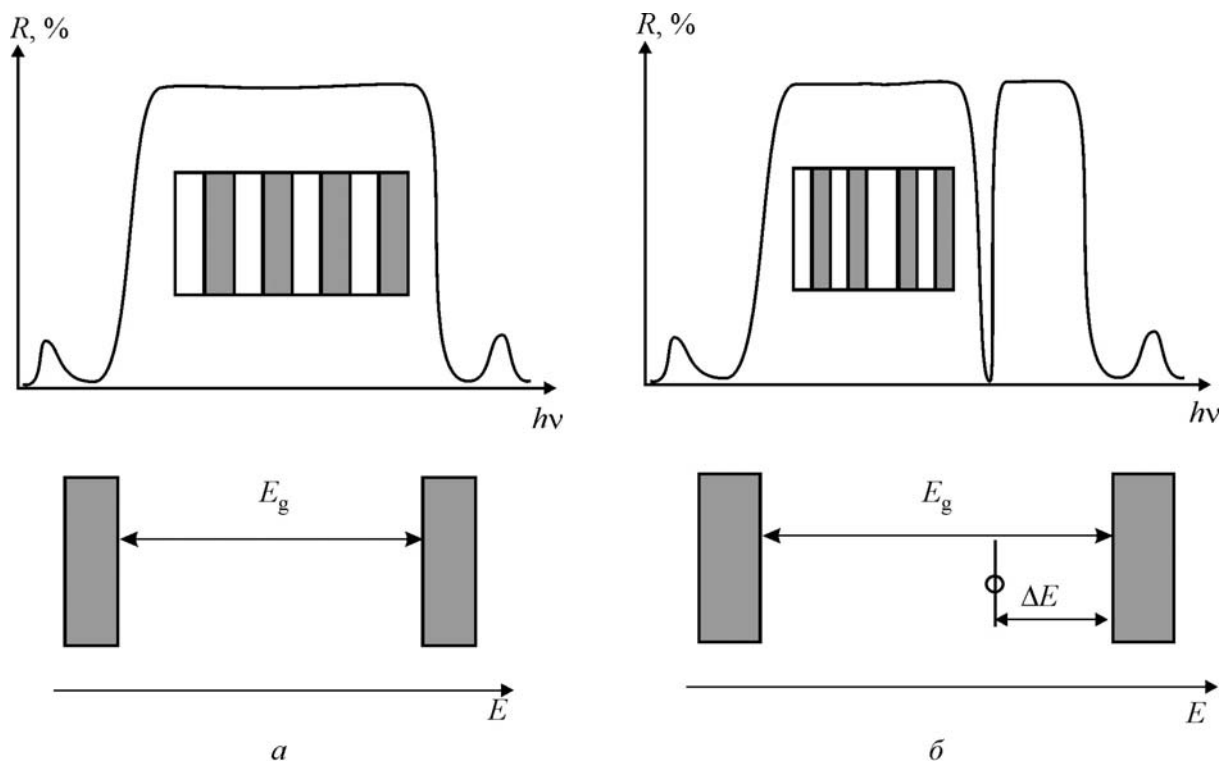


Рис. 2.5.2. Спектры отражения и энергетические зоны одномерных фотонных кристаллов.

а – совершенный фотонный кристалл; б – фотонный кристалл с дефектом

Из рисунка видно, что в совершенном фотонном кристалле возникает широкая спектральная полоса отражения – «запрещенная зона» фотонного кристалла. При наличии в фотонном кристалле дефекта, например слоя, толщина которого отличается от толщины других слоев, в полосе отражения фотонного кристалла возникает узкий минимум. Следовательно, фотоны с энергией, соответствующей этому минимуму, могут распространяться по фотонному кристаллу. Такой минимум отражения в фотонном кристалле подобен энергетическому уровню примеси или дефекта, расположенному в запрещенной зоне обычного кристалла.

Для математического описания оптических свойств 1D-фотонных кристаллов и фотоннокристаллических волноводов могут быть использованы стандартные методы, используемые для расчета многослойных тонкопленочных интерферометров [4]. Описание 2D- и 3D-

фотонных кристаллов и волноводов представляет достаточно сложную математическую задачу. Для ее решения применяют, как правило, те же методы, что и для анализа свойств обычных кристаллов (например, метод блоховских функций). На практике используют два типа фотоннокристаллических волноводов – прямоугольного и круглого поперечного сечений. Фотоннокристаллический волновод прямоугольного сечения с изгибом показан на рис. 2.5.3. Такой волновод представляет собой планарную структуру, подобную приведенной на рис. 2.5.1, б, но с протяженным участком диэлектрика, в котором отсутствуют отверстия. Этот участок и является сердцевинной волновода, в которой распространяется электромагнитная мода. Области, окружающие сердцевину, обладают свойствами фотонного кристалла и имеют высокий коэффициент отражения для данной моды. Тем самым фотонный кристалл препятствует вытеканию волны из волновода и способствует ее каналированию.

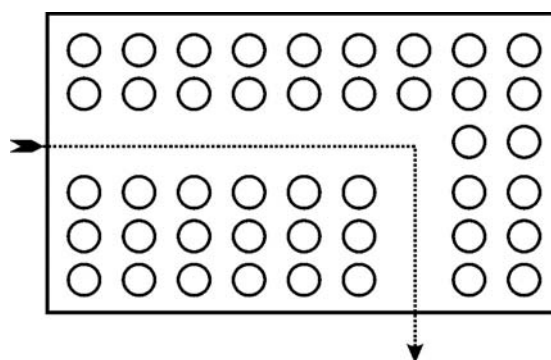


Рис. 2.5.3. Распространение луча в двумерном фотонном кристалле

Таким образом, в фотоннокристаллических волноводах свойствами фотонного кристалла обладает только среда, окружающая сердцевину волновода. В диэлектрических волноводах обычного типа каналирование обеспечивается эффектом полного внутреннего отражения от границы сердцевины волновода с окружающей средой. В фотоннокристаллических волноводах каналирование происходит в результате отражения от среды с фотоннокристаллическими свойствами. Это определяет особенности и достоинства фотоннокристаллических волноводов. Во-первых, в фотоннокристаллических волноводах возможен резкий поворот волны на 90° (см. рис. 2.5.3). В волноводах обычного типа это недопустимо, так как приводит к нарушению полного внутреннего отражения. Данное свойство позволяет уменьшить габариты интегрально-оптических устройств. Во-вторых, изменяя период фотонного кристалла и его геометрию, можно в широких пределах изменять спектральную характеристику пропускания волновода. В частности, создавая в фотонном кристалле дефекты – отверстия с диаметром, отличным от диаметра остальных отверстий, можно уменьшать коэффициент отражения для отдельных спектральных линий (см. рис. 2.5.2, б). Моды волновода с такой длиной волны будут вытекать из волновода вблизи дефекта, а на спектре пропускания волновода появится минимум. Вытекание излучения вблизи дефекта

можно также использовать для связи между двумя соседними волноводами.

2.6. Основы оптики плазмонных волноводов

В настоящее время возникло новое, бурно развивающееся направление в интегральной оптике – плазмоника [8]. Плазмонный волновод представляет собой тонкую (меньше длины волны излучения) металлическую полоску на диэлектрической подложке (рис. 2.6.1). Металлическая полоска может быть сплошной, либо прерывистой – состоящей из островков металла.

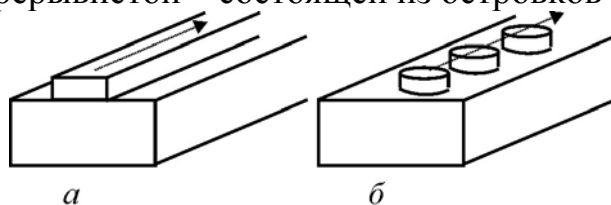


Рис. 2.6.1. Разновидности плазмонных волноводов:
а – сплошной; б - прерывистый

Основная особенность плазмонных волноводов по сравнению с обычными волноводами – электромагнитная волна распространяется не внутри плазмонного волновода, а вдоль его поверхности, в виде поверхностной электромагнитной волны. Эта волна имеет максимальную амплитуду вблизи поверхности волновода и экспоненциально затухает при удалении от нее (рис. 2.6.2). Можно провести аналогию между распространением поверхностной электромагнитной волны оптического диапазона вдоль тонкого слоя металла и распространением электрического сигнала вдоль электрического проводника.

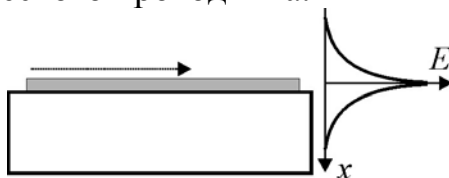


Рис. 2.6.2. Распределение поля поверхностной волны вблизи плазмонного волновода

Возникновение поверхностной электромагнитной волны связано с оптическими свойствами металла – наличием в нем коллектива свободных электронов высокой концентрации – плазмы свободных электронов. Электронная плазма является колебательной системой, которая может взаимодействовать с электромагнитными волнами, в том числе резонансно. При определенных условиях в ней возникает резонансный обмен энергией с электромагнитной волной: в металле возникает квазичастица (плазмон) – элементарное колебание плазмы, связанное с электромагнитной волной. Такое взаимодействие приводит к распространению в металле колебания плазмы и распространению по поверхности металла поверхностной волны, связанной с этим колебанием.

Диэлектрическая проницаемость металла описывается выражением

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) - i \frac{\omega_p^2 \nu}{\omega (\omega^2 + \nu^2)}.$$

Здесь ω – круговая частота электромагнитного поля; ν – частота релаксации свободных электронов металла; ω_p – плазменная частота колебаний свободных электронов:

где e – заряд электрона; N – концентрация свободных электронов; m – эффективная масса электронов; ϵ_∞ – низкочастотная диэлектрическая проницаемость.

При $\omega = \omega_p$ в металле возникает плазменный резонанс – усиление

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi N e^2}{m \epsilon_\infty}},$$

взаимодействия электромагнитной волны с плазмой свободных электронов. Если частота электромагнитного поля не превышает частоту плазменного резонанса ($\omega \leq \omega_p$), то появляется возможность формирования поверхностной электромагнитной волны за счет возбуждения плазмонов.

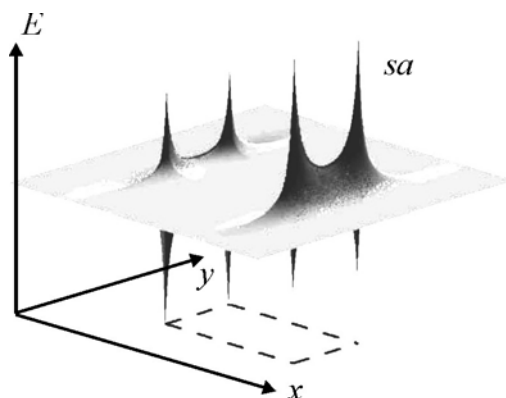


Рис. 2.6.3. Распределение поля гибридной моды плазмонного волновода

Для описания электромагнитных мод плазмонных волноводов используется метод решения волнового уравнения. Рассмотрим некоторые свойства поверхностных электромагнитных волн в плазмонных волноводах. Анализ решения волнового уравнения показывает, что в плазмонных волноводах могут распространяться симметричные (s), асимметричные (a) и гибридные (sa , as) моды. На рис. 2.6.3 показано распределение E_x -компоненты sa -моды для короткого плазмонного волновода (волновод на рисунке показан пунктиром). Для s -мод векторы \mathbf{E} и \mathbf{H} расположены симметрично относительно волновода, а для a -мод – наоборот. В гибридных волноводных модах симметрией обладает только одна из компонент электромагнитного поля – \mathbf{E} или \mathbf{H} .

Так как металлы имеют высокий коэффициент поглощения, то длина пробега поверхностных волн вдоль плазмонного волновода мала: для $\lambda = 1$ мкм – десятки микрометров, для $\lambda = 10$ мкм – до нескольких миллиметров. На рис. 2.6.4 показана зависимость коэффициента затухания мод от толщины плазмонного волновода. Из рисунка видно, что коэффициент затухания асимметричных мод при увеличении толщины волновода растет. В случае симметричных мод наблюдается обратный эффект. Поэтому для повышения эффективности передачи оптических сигналов по плазмонному

волноводу выгодно возбуждать в нем симметричные моды и уменьшать толщину металлической пленки, образующей волновод.

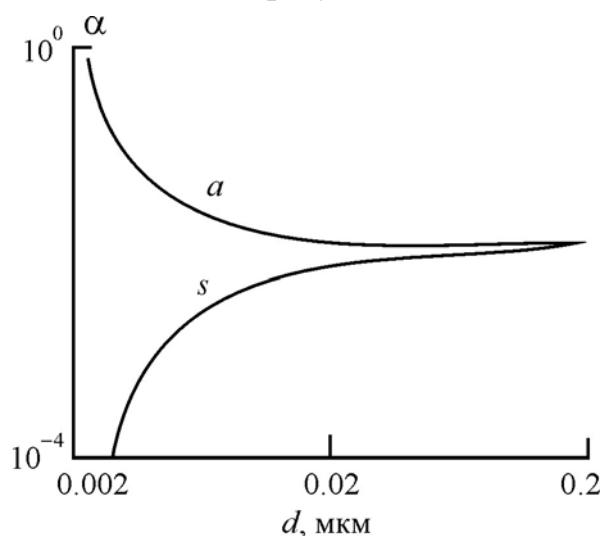


Рис. 2.6.4. Зависимость коэффициента затухания симметричной и асимметричной мод от толщины плазмонного волновода

Для поверхностных электромагнитных волн характерны все оптические эффекты, которые имеют место для волн, распространяющихся в свободном пространстве: интерференция, дифракция, отражение, преломление. В настоящее время разрабатываются не только плазмонные оптические волноводы, но и другие плазмонные оптические устройства в которых оптический сигнал распространяется в виде поверхностной электромагнитной волны [8]. К таким устройствам можно отнести концентраторы (аналоги линз и сферических зеркал), кольцевые резонаторы (аналоги кольцевых волноводных резонаторов), наноантенны оптического диапазона, плазмонные фотонные кристаллы. Двумерный характер поверхностной волны позволяет значительно уменьшить габариты таких устройств по сравнению классическими устройствами интегральной оптики. На основе плазмонных металлических наноструктур создаются метаматериалы с отрицательным показателем преломления, которые значительно расширяют функциональные возможности интегральной оптики.

3. МАТЕРИАЛЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОПТИКИ: ТРЕБОВАНИЯ, КЛАССЫ, СВОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИИ

3.1. Требования к оптическим материалам для интегральной оптики

Прежде чем обосновать требования, предъявляемые к материалам интегральной оптики, рассмотрим основные компоненты интегрально-оптического устройства (рис. 3.1.1). Такое устройство должно содержать волновод или систему волноводов, расположенных на подложке, устройства ввода и вывода оптических сигналов, а также ряд дополнительных слоев и вспомогательных элементов, обеспечивающих технологичность и надежность устройства, а также эффективность его функционирования.

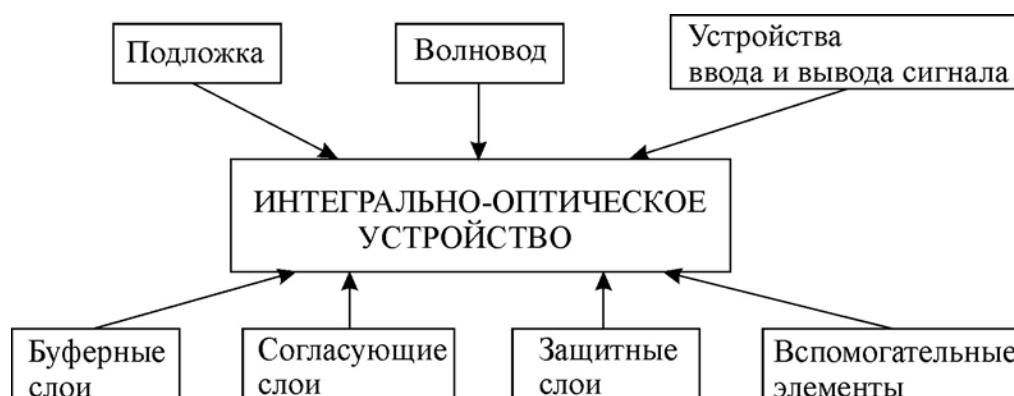


Рис. 3.1.1. Компоненты интегрально-оптического устройства

Буферные слои обеспечивают адгезию оптических пленок к подложке и согласование их температурных коэффициентов расширения. Согласующие слои предназначены для оптического согласования отдельных элементов интегрально-оптического устройства, а также для обеспечения необходимых условий для распространения оптического сигнала по волноводам. Например, такие слои могут формировать оболочку волновода или зазор между связанными волноводами. Защитные слои используются для предохранения элементов интегрально-оптического устройства от внешних воздействий, например, от окисления материалов кислородом воздуха. К функциям защитных слоев относятся также защита элементов от внешней паразитной засветки, а также электрическая изоляция. Вспомогательные элементы включают в себя электроды для подачи электрических управляющих сигналов, для вывода электрических сигналов с фотоприемников, механические и конструктивные элементы, узлы крепления и др.

Таким образом, интегрально-оптическое устройство содержит ряд компонентов, к каждому из которых предъявляются особые требования, исходя из его функциональной нагрузки. Интегрально-оптические устройства используются, в основном, в телекоммуникационном

диапазоне длин волн ($\lambda = 0.8 \dots 1.6$ мкм). Это накладывает ограничение на выбор оптических материалов и задает требования к их оптическим параметрам именно для указанного спектрального интервала. Рассмотрим, какие требования предъявляются к основным компонентам интегрально-оптических устройств.

Подложка. Интегрально-оптическое устройство может формироваться на поверхности подложки из иных материалов, но может изготавливаться из материала подложки на ее поверхности или в объеме.

Во всех случаях к материалу подложки предъявляются следующие требования:

- механическая прочность;
- химическая инертность;
- высокая температура плавления или размягчения;
- минимальное отличие ТКР подложки от ТКР остальных элементов устройства;
- технологичность изготовления и обработки;
- возможность создания поверхности оптического качества;
- в ряде случаев – изолирующие свойства и минимальный коэффициент поглощения и заданный показатель преломления.

Волновод. Требования к волноводам определяются функциями, которые они выполняют в интегрально-оптическом устройстве и технологией их изготовления. К материалам волноводов предъявляют следующие требования:

- минимальный коэффициент поглощения в рабочем спектральном интервале;
- заданный показатель преломления;
- механическая прочность;
- минимальное отличие ТКР волновода от ТКР остальных элементов устройства;
- технологичность изготовления;
- в ряде случаев – специальные оптические свойства, например, наличие электрооптического эффекта, нелинейно-оптические свойства и др.

Устройства ввода и вывода оптического сигнала. Оптический сигнал может формироваться непосредственно в интегрально-оптическом устройстве и преобразовываться в электрический на выходе устройства. В этом случае для ввода и вывода оптического сигнала используются соответственно полупроводниковые лазеры и фотоприемники, встроенные в интегрально-оптическое устройство и оптически согласованные с волноводными структурами. В этом случае к материалам лазеров и фотоприемников предъявляются стандартные требования, обеспечивающие их оптические параметры и технологичность [3,9]. Если оптический сигнал вводится в интегрально-оптическое устройство извне, например, из оптического волокна и выводится из устройства также в

оптическом виде, материалы и устройства ввода и вывода оптического сигнала должны отвечать следующим требованиям:

- минимальные оптические потери;
- минимальное светорассеяние и отражение;
- возможность конструктивного, механического и оптического согласования с интегрально-оптическим устройством;
- технологичность изготовления;

Буферные, согласующие и защитные слои. К пленочным элементам интегрально-оптических устройств предъявляются следующие требования:

- высокие механическая прочность и адгезионная способность;
- химическая инертность;
- технологичность;
- заданный показатель преломления;
- в ряде случаев – специальные оптические свойства, например, высокий коэффициент поглощения, наличие электрооптического эффекта, нелинейно-оптические свойства, а также электроизолирующие свойства.

Вспомогательные элементы. Требования, предъявляемые к материалам вспомогательных элементов определяются их функциональной нагрузкой. Однако и для них справедливы общие требования, предъявляемые ко всем элементам интегрально-оптических устройств:

- механическая прочность;
- возможность конструктивного, механического и оптического согласования с интегрально-оптическим устройством;
- технологичность изготовления.

3.2. Монокристаллические диэлектрики и полупроводники

Монокристаллические диэлектрики и полупроводники используются в интегрально-оптических устройствах в качестве подложек, оптических волноводов, для изготовления источников излучения и фотоприемников. В табл. 3.2.1 приведены оптические свойства монокристаллических материалов, наиболее часто применяемых в интегральной оптике.

<i>Таблица 3.2.1. Оптические свойства монокристаллов</i>			
Материал	Область прозрачности, мкм	n	Другие свойства
Al ₂ O ₃	0.35 ... 4.5	1.75 (1.5 мкм)	-
Si	1 ... 14	3.48 (1.6 мкм)	НЛО
GaAs	0.95 ... 12	3.38 (1.5 мкм)	ЭО, НЛО
Ga _x Al _y As	0.95 ... 3	3.2 ... 3.4	ЭО, НЛО

Примечания: НЛО – нелинейно-оптические эффекты; ЭО – электрооптические эффекты.

Монокристаллический Al₂O₃ (лейкосапфир) применяется, в основном, для изготовления подложек. На подложках из лейкосапфира методами эпитаксии выращивают монокристаллические слои

полупроводниковых материалов, используемых в интегральной оптике – Si, GaAs, GaAlAs и др. Достоинствами лейкосапфира является его высокая механическая прочность и высокая теплопроводность.

Монокристаллический кремний (Si) широко применяется в интегральной оптике в качестве подложек, для изготовления оптических волноводов, фотоприемников, микромеханических устройств и узлов крепления. Это объясняется его высокой механической прочностью, высокой теплопроводностью, а также тем, что технология выращивания и обработки кремния детально отработана и применяется в микроэлектронной промышленности.

Арсенид галлия и тройные соединения на его основе (GaAs, GaAlAs и др.) используются для изготовления источников излучения, фотоприемников и оптических переключателей. Данный класс материалов применяется, в основном, в виде монокристаллических пленок и многослойных структур, изготавливаемых методами эпитаксии.

Для выращивания объемных монокристаллов полупроводников и диэлектриков используют методы направленной кристаллизации из расплавов [10]. На рис. 3.2.1 схематично показана установка для выращивания тугоплавких оксидных монокристаллов (например Al_2O_3) методом Вернейля.

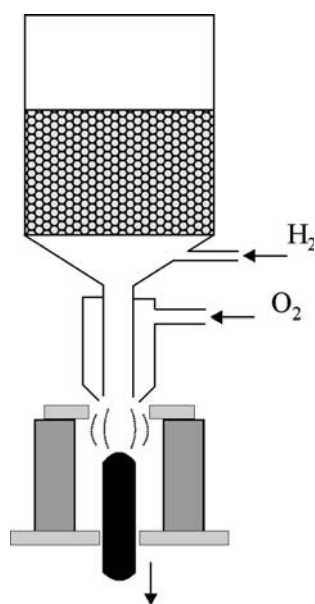


Рис. 3.2.1. Установка для выращивания кристаллов методом Вернейля

Порошок Al_2O_3 (шихта) из бункера в верхней части установки через канал в кислородно-водородной горелки поступает в область горения кислородно-водородной смеси. При этом происходит плавление порошка, и он в виде жидкости попадает на верхнюю часть кристаллической затравки из Al_2O_3 , которая расположена в теплоизолирующем кожухе. При остывании расплава и его кристаллизации происходит наращивание затравки. По мере роста кристалла его медленно опускают вниз с помощью

специального механизма. Для получения качественных монокристаллов по методу Вернейля необходимо точно согласовывать расход шихты, подачу водорода и кислорода и скорость опускания затравки.

Для выращивания полупроводниковых монокристаллов (Si, GaAs и др.) используют методы Бриджмена и Чохральского. В методе Бриджмена исходный материал помещают в запаянную ампулу из тугоплавкого материала и нагревают до температуры плавления материала (рис. 3.2.2). Затем ампулу медленно выводят из области нагрева. При этом в более холодной части ампулы происходит кристаллизация материала и формируется монокристалл. Различают вертикальный (рис. 3.2.2, а) и горизонтальный (рис. 3.2.2, б) методы Бриджмена. Горизонтальный метод используется, в основном для получения поликристаллических материалов.

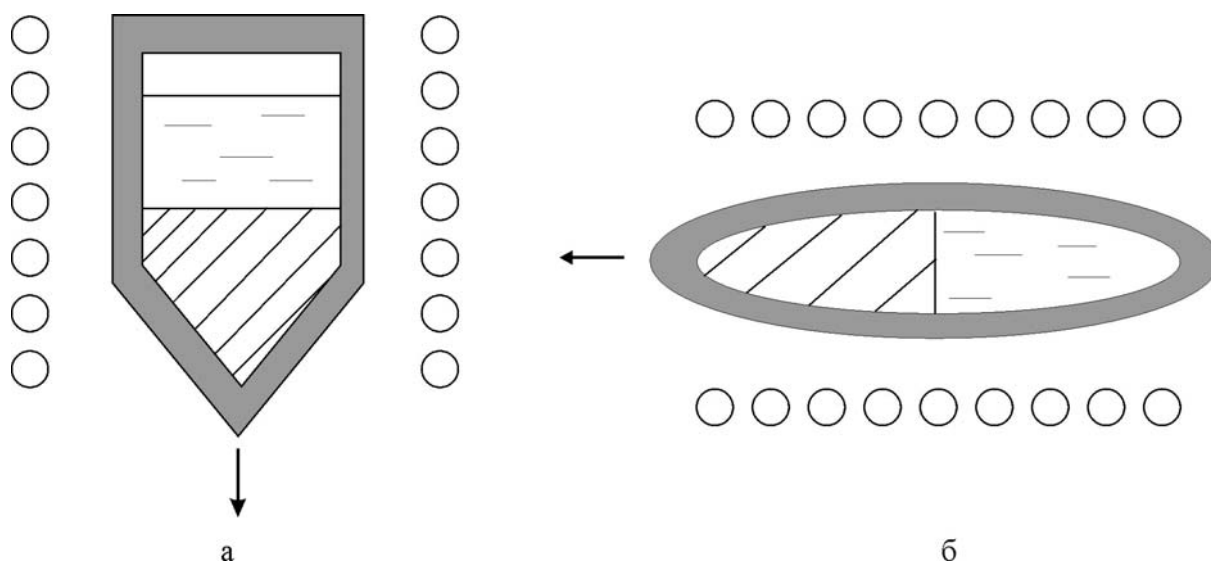


Рис. 3.2.2. Установки для выращивания кристаллов методом Бриджмена.

а – вертикальная; б - горизонтальная

В методе Чохральского исходный материал плавят в тигле из тугоплавкого материала. На поверхность расплава помещают кристаллическую затравку и затем медленно поднимают ее (рис. 3.2.3). При подъеме затравки расплав на ее торце остывает и формирует новые слои кристалла. Плавление материала и выращивание кристалла производят в атмосфере инертного газа. Для обеспечения равномерного распределения температуры в расплаве и на границе формирования кристалла тигель и кристалл вращают в разные стороны. Диаметр выращиваемого монокристалла сильно зависит от скорости вращения. Увеличение скорости вращения приводит к уменьшению переохлажденной области в расплаве и к уменьшению диаметра монокристалла. Метод обеспечивает выращивание полупроводниковых монокристаллов с определенной кристаллографической ориентацией и минимальным числом дефектов. Метод Чохральского позволяет выращивать монокристаллы кремния диаметром до 150 мм и массой более 100 кг.

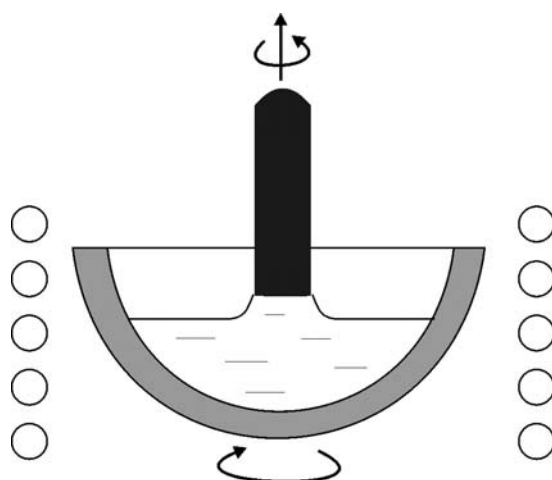


Рис. 3.2.3. Установка для выращивания кристаллов методом Чохральского

Для очистки монокристаллов от случайных примесей, а также для введения и равномерного распределения по объему легирующих примесей используют метод зонной плавки (рис. 3.2.4).

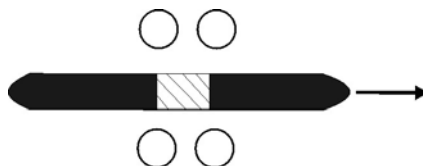


Рис. 3.2.4. Принцип зонной плавки

Метод заключается в том, что узкую область стержневидного кристалла нагревают до температуры плавления. При перемещении кристалла в печи область расплава (на рисунке показана штриховкой) смещается по кристаллу. При этом случайные примеси концентрируются в области расплава и, в конечном счете, смещаются к одному из торцов кристалла. Процедуру повторяют несколько раз. В результате этого загрязняющие примеси собираются вблизи одного торца кристалла. Торец с высоким содержанием загрязняющих примесей затем отделяют от очищенного кристалла.

Методы эпитаксии, используемые для выращивания монокристаллических полупроводниковых пленок будут рассмотрены ниже, в п. 4.

3.3. Пленкообразующие материалы

Пленки диэлектриков, полупроводников и металлов давно и широко используются в оптике для создания интерференционных фильтров, отражающих просветляющих и защитных покрытий [4, 11]. Для создания тонких оптических слоев используются пленкообразующие материалы, т. е. материалы, способные при использовании определенной технологии формировать на поверхности гладкий, равномерный и плотный слой. Оптические, электрические и механические свойства пленкообразующих

материалов изучены достаточно подробно. Для каждого материала определены оптимальные технологии и технологические режимы, позволяющие получать равномерные тонкие слои с хорошей адгезией к подложке. В таблице 3.3.1 приведены некоторые диэлектрические и полупроводниковые пленкообразующие материалы, используемые в интегральной оптике. Материалы с низким показателем преломления (CaF_2 , MgF_2 , SiO_2) используются в качестве согласующих слоев. Пленки SiO_2 и Al_2O_3 , обладающие высокой химической инертностью, используются в качестве защитных покрытий. На основе пленок из материалов с высоким показателем преломления (TiO_2 , ZnO , ZnS , ZnSe) изготавливаются планарные и полосковые волноводы. Пленки LiNbO_3 и BaTiO_3 в интегральной оптике применяются для изготовления электроуправляемых оптических переключателей и коммутаторов оптических сигналов. Пленки металлов используются для формирования электродов и плазмонных волноводов. Толщина пленки определяется той функцией, которую она выполняет в устройстве. Толщины буферных, согласующих и защитных слоев варьируются от 0.05 до 1 мкм. Толщины пленок, формирующих волновод, лежат в интервале 0.5...10 мкм.

Таблица 3.3.1. Оптические свойства пленкообразующих материалов

Материал	Область прозрачности, мкм	n	Другие свойства
CaF_2	0.15...12	1.23...1.26	-
MgF_2	0.21...10	1.38...1.40	-
SiO_2	0.2...8	1.44...1.45	-
Al_2O_3	0.25...5	1.54...1.60	-
TiO_2	0.25...5	2.2...2.6	-
ZnO	0.3...8	2.0	ЭО, НЛО
ZnS	0.38...14	2.2...2.35	ЭО, НЛО
ZnSe	0.6...15	2.5...2.6	ЭО, НЛО
LiNbO_3	0.4 ... 7	2.2	ЭО, НЛО
BaTiO_3	0.4...6	2.2	ЭО, НЛО

Примечания: НЛО – нелинейно-оптические эффекты; ЭО – электрооптические эффекты.

Для изготовления пленок используются методы вакуумного нанесения, золь-гель методы и методы эпитаксии (см. п. 4). В методах вакуумного нанесения исходный материал, как правило, представляет собой таблетку, спрессованную из порошка. В золь-гель методах применяются растворы гидролизующихся неорганических соединений металлов, либо металлоорганические соединения. В технологиях, основанных на эпитаксии исходные материалы используются в газообразном виде, либо в виде расплава.

При использовании методов вакуумного нанесения и золь-гель методов пленки получают аморфными или поликристаллическими. Поэтому показатель преломления пленок, полученных этими методами

несколько меньше показателя преломления аналогичного объемного материала. Методы эпитаксии позволяют получать монокристаллические пленки. В этом случае показатель преломления пленки будет точно соответствовать показателю преломления объемного монокристалла. Необходимо отметить, что для формирования монокристаллических пленок в методах эпитаксии используются монокристаллические подложки с определенной кристаллографической ориентацией и периодом кристаллической решетки близким к периоду решетки формируемой пленки.

Применение органических полимерных пленок в интегрально-оптических устройствах в настоящее время ограничено. В основном, они используются в волоконной оптике для изготовления внешних оболочек волокна и полимерных волокон для локальных сетей волоконно-оптической связи. Характеристики некоторых полимеров, применяемых в волоконной оптике, приведены в таблице 3.3.2.

<i>Таблица 3.3.2. Оптические свойства полимеров</i>		
Материал	Область прозрачности, мкм	<i>n</i>
Полистирол	0.4...1.6	1.59...1.60
Полиметилметакрилат	0.4...1.6	1.49
Полиэтилентерефталат	0.4...1.6	1.57
Полиэтилен	0.4...1.6	1.43

В настоящее время химия, физика и технология оптических полимеров бурно развиваются. Уже разработаны и внедряются в промышленность полимерные светодиоды. Создаются устройства для управления оптическими сигналами с применением электрооптических полимеров. Существуют лабораторные макеты гибких интегрально-оптических устройств на основе полимеров. Полимеры дешевы, технологичны, а их оптические характеристики могут варьироваться в широких пределах изменением условий синтеза и технологической обработки. Это позволяет надеяться, что в будущем полимерные материалы будут широко использоваться в интегральной оптике и на их основе будут созданы полностью полимерные интегрально-оптические устройства.

3.4. Стекла

Неорганические стекла являются основным материалом оптики [12]. Это связано с тем, что стекла обладают высокой прозрачностью в видимом и ближнем и среднем ИК диапазонах, низким светорассеянием, легко обрабатываются и полируются, а их показатель преломления может варьироваться в широких пределах. В интегрально-оптических устройствах стекла применяются в качестве подложек, оптических пленочных волноводов и слоев с различными функциональными свойствами. Стекла широко применяются в волоконной оптике для

создания оптических волокон, волоконных лазеров и усилителей, а также при изготовлении волоконных датчиков и сенсоров.

По своему химическому составу стекла делятся на два основных класса: оксидные и бескислородные стекла. Оксидные стекла представляют собой широкий класс оптических материалов, в котором наиболее важное место занимают силикатные, фосфатные и германатные стекла. В этих стеклах основой является соответственно SiO_2 , P_2O_5 и GeO_2 , а в качестве добавок, определяющих свойства стекла используются оксиды металлов: Na, K, B, Al, Ba, Zn и др. Некоторые марки оптических оксидных силикатных стекол, выпускаемых промышленностью перечислены в табл. 3.4.1 [13, 14]. Достоинствами оксидных стекол являются их низкая стоимость, высокое оптическое качество, химическая устойчивость и механическая прочность. Оксидные стекла используют в качестве основы для создания оптических ситаллов (п. 3.5) и композитных материалов (п. 3.6). В этом случае в стеклах проводят синтез полупроводниковых, диэлектрических либо металлических наночастиц. Легирование оксидных стекол ионами редкоземельных металлов позволяет получать активные среды для лазеров и усилителей, а также стекла с ярко выраженными магнитооптическими свойствами. Оксидные стекла изготавливают высокотемпературной варкой из шихты, вакуумным нанесением (п. 4.1) и золь-гель методом (п. 4.2). Для изменения оптических свойств тонких слоев оксидных стекол используются методы диффузии и ионного обмена (п. 4.4 и 4.5).

Марка стекла	n
КВ (кварцевое стекло)	1.46
ЛК7	1.47
К8	1.51
БК10	1.57
ТК21	1.66
ТФ5	1.74
ТФ10	1.81

К бескислородным стеклам относятся халькогенидные и галогенидные стекла. Основу халькогенидных стекол составляют сульфиды, селениды и теллуриды мышьяка и германия. Особенностью данного класса стекол является их высокий показатель преломления ($n = 2.2 \dots 3$) и прозрачность в среднем ИК диапазоне. На основе халькогенидных стекол создают оптические волноводы, волноводные голограммы, акусто-оптические и нелинейно-оптические устройства для интегральной оптики.

К галогенидным стеклам, в основном относятся фторидные и хлоридные стекла. Примерами фторидных стекол являются фтороцирконатные стекла имеющие состав: $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$, а также фтороиндиевые стекла состава: $\text{BaF}_2\text{-InF}_3\text{-GaF}_3\text{-LaF}_3\text{-GdF}_3$. Такие

стекла, легированные ионами редкоземельных металлов применяются для создания волноводных усилителей и конвертеров для преобразования ИК излучения в видимое. Хлоридные стекла, как правило, изготавливают на основе хлорида висмута с концентрацией BiCl_3 до 75 %, например: $\text{NaCl-TlCl-PbCl}_2\text{-BiCl}_3$ или $\text{KBr-PbCl}_2\text{-BiCl}_3$. Такие стекла прозрачны в спектральном интервале до 14 мкм и имеют высокий показатель преломления ($n = 1.95 \dots 2.3$). Особенностью висмутсодержащих хлоридных стекол является их ярко выраженная оптическая нелинейность.

Основными недостатками халькогенидных и галогенидных стекол являются их низкая механическая прочность, пониженная химическая устойчивость и высокое содержание токсичных материалов – несоответствие экологическим требованиям. Галогенидные стекла обладают повышенной склонностью к кристаллизации, что со временем приводит к изменению их оптических характеристик. Для изготовления халькогенидных и галогенидных стекол используют высокотемпературную варку и технологии вакуумного нанесения пленок (п. 4.1).

3.5. Оптические ситаллы

Оптические ситаллы представляют собой гетерофазные стекла с микрокристаллической фазой. Они имеют высокую механическую прочность и термическую прочность, химическую устойчивость и низкий температурный коэффициент линейного расширения. Оптические ситаллы изготавливаются на основе оксидных силикатных стекол путем введения в стекло при варке компонентов, склонных к образованию кристаллической фазы, и последующей термообработки стекла. Примером оптического ситалла является алюмосиликатная система $\text{Li}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-SiO}_2$ в которой микрокристаллическая фаза образована Al_2O_3 . Ситаллы относятся к композитным материалам, свойства которых рассмотрены в п. 3.6. Наличие микрокристаллической фазы позволяет сочетать в ситаллах достоинства стекол – высокую прозрачность, технологичность и дешевизну и достоинства кристаллов – высокую твердость и специальные оптические свойства, присущие конкретным типам монокристаллов. В частности, микрокристаллы ситалла могут быть легированы ионами редкоземельных металлов, что придает ситаллу нелинейно-оптические свойства, либо превращает его в усиливающую среду.

В интегральной оптике ситаллы могут использоваться в качестве подложек для интегрально-оптических схем. В ситаллах методом ионного обмена могут быть созданы оптические волноводы. Пленочные волноводы из ситаллов могут изготавливаться и золь-гель методами.

3.6. Композитные материалы

Оптический композит – это среда, состоящая из двух и более компонентов. Как правило, композит состоит из прозрачной среды

(матрицы), в которой находятся мелкие частицы материала с иными оптическими свойствами (рис. 3.6.1). В качестве матрицы используются стекла, полимеры, жидкости. Важным свойством композитов является возможность варьирования в широких пределах их оптических свойств, как линейных, так и нелинейных. Это позволяет создавать новые оптические материалы, свойства которых существенно отличаются от свойств входящих в них компонентов.

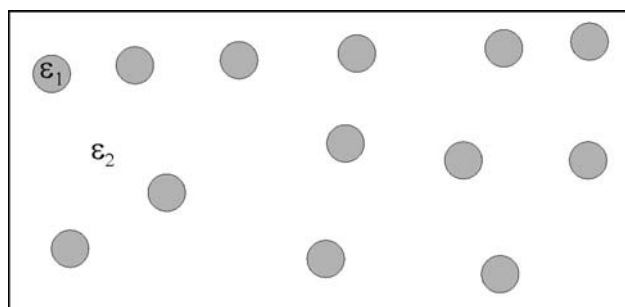


Рис. 3.6.1. Оптический композит

Эффективная диэлектрическая проницаемость оптического композита зависит от оптических характеристик матрицы и входящих в состав композита частиц. Для описания эффективной диэлектрической проницаемости используется *модель эффективной среды*. Эта модель справедлива, когда размер частиц много меньше длины волны (можно пренебречь светорассеянием) и расстояние между частицами в композите много больше их диаметра (можно пренебречь электромагнитным взаимодействием между частицами). В последнем случае среда может приближенно рассматриваться в качестве однородной. Как правило, в композитных средах используют частицы, имеющие диаметр 2...100 нм, – наночастицы. В рамках модели эффективной среды для двухкомпонентного композита (матрица и один тип сферических наночастиц) эффективная диэлектрическая проницаемость среды ϵ может быть определена из уравнения

$$p \frac{\epsilon_1 - \epsilon}{\epsilon_1 + 2\epsilon} + (1 - p) \frac{\epsilon_2 - \epsilon}{\epsilon_2 + 2\epsilon} = 0.$$

Здесь ϵ_1 и ϵ_2 – диэлектрические проницаемости наночастиц и матрицы соответственно; p – объемная концентрация наночастиц.

При наличии светорассеяния потери излучения в композитной среде зависят не только от поглощения, но и от рассеяния. Для описания таких сред коэффициент поглощения заменяется коэффициентом экстинкции.

Коэффициент экстинкции (α) композита, состоящего из наночастиц одного типа и прозрачной матрицы, в приближении однократного рассеяния равен

$$\alpha = (\sigma_a + \sigma_s)N,$$

где σ_a и σ_s – сечения поглощения и рассеяния наночастиц соответственно; N – концентрация наночастиц.

Оптические композиты с полупроводниковыми наночастицами. Оптические свойства композитных сред с полупроводниковыми наночастицами начали интенсивно исследоваться с середины 80-х гг. XX века. Наиболее подробно исследованы нелинейно-оптические эффекты в средах, содержащих наночастицы (кластеры) халькогенидов металлов (Zn, Cd, Pb). Это связано с тем, что подобные кластеры легко синтезировать непосредственно в полимерных или в стеклянных матрицах. Достоинством таких композитных стекол и полимеров является то, что из них могут быть изготовлены планарные или волоконные волноводы для нелинейно-оптических устройств интегральной оптики. Подробно изучены и широко используются стекла с нанокристаллами галогенидов серебра и меди. Такие композитные среды обладают фотохромными свойствами – под воздействием яркого света они темнеют, а после прекращения воздействия света восстанавливают начальный коэффициент пропускания. К оптическим композитным средам относятся и стеклокерамики. Стеклокерамика представляет собой композит состоящий из нанокристаллов, окруженных стеклянной матрицей. Такие материалы имеют высокое оптическое качество и механическую прочность. При введении в нанокристаллы соответствующих примесей (например, ионов переходных или редкоземельных металлов) можно создавать композитные среды обладающие оптической нелинейностью или усилением.

В кластерах халькогенидов металлов при их размере менее 10 нм (квантовые точки) возникают квантово-размерные эффекты, которые приводят к «голубому» сдвигу фундаментальной полосы поглощения и экситонных полос поглощения. Например, при уменьшении размера кластера CdS от 10 до 2 нм ширина его запрещенной зоны увеличивается от 1 до 3 эВ. Это позволяет, изменяя размер кластеров в процессе синтеза, управлять как линейными, так и нелинейными оптическими свойствами среды в заданном спектральном интервале.

Стекла с квантовыми точками как нелинейно-оптические среды обладают высоким быстродействием и малым временем восстановления начальных оптических характеристик после воздействия. Время восстановления составляет 20...25 пс. Однако из-за малого времени межзонной рекомбинации (для CdS_xSe_{1-x} это время примерно равно 20 пс) энергетический порог возникновения нелинейно-оптического отклика относительно высок, приблизительно $1...2 \text{ мДж/см}^2$.

Спектральная область применения стекол с квантовыми точками определяется спектральным положением полос поглощения (фундаментальной или экситонной), которое, в свою очередь, зависит от материала и размера квантовых точек. Для квантовых точек CdS спектральный интервал применения 350...500 нм, для CdSSe 550...600 нм,

для CdTe 580...900 нм, для PbS и PbSe 1...2 мкм. Такие среды обладают высокой нелинейной восприимчивостью.

Нелинейно-оптические свойства композитов с металлическими наночастицами. Оптические композиты с наночастицами металлов являются перспективными нелинейно-оптическими средами для волноводных и интегрально-оптических переключателей. Это объясняется высоким быстродействием таких композитных сред, относительной простотой их синтеза и возможностью варьировать их оптические свойства в широких пределах. Наиболее подробно исследованы оптические свойства нанокластеров благородных металлов – Ag, Au, Pt, а также металлов с высокой проводимостью – Cu и Al. В качестве прозрачных матриц для них используются стекла и полимеры.

Особенностью оптических свойств металлических наночастиц является возникновение плазмонных резонансов, обусловленных взаимодействием электромагнитного излучения с плазмой свободных электронов в металле. Данный эффект приводит к появлению полос поглощения и рассеяния, связанных с плазмонными резонансами.

Спектральное положение этих резонансов зависит от материала наночастиц, их размера, формы и энергетического состояния свободных электронов в наночастице. Так, для сферических наночастиц Ag полоса поглощения, связанная с плазмонным резонансом, расположена в спектральном интервале 390...420 нм, для Au – в интервале 550...560 нм, для Cu – в интервале 600...700 нм. Для наночастиц, имеющих форму вытянутого сфероида, плазмонные резонансы смещаются в сторону больших длин волн. Важным свойством плазмонных резонансов является локальное увеличение амплитуды поля электромагнитной волны внутри и вблизи наночастицы (в десятки–сотни раз по сравнению со средней амплитудой поля в среде). Это позволяет уменьшить энергетический порог возникновения нелинейно-оптического отклика.

Быстродействие нелинейно-оптических процессов в средах с наночастицами металлов определяется в основном временами электрон-электронной и электрон-фононной релаксаций свободных электронов. Для объемных образцов Ag и Au времена релаксации лежат в интервале 0.7...1 пс. Для наночастиц Ag время релаксации уменьшается до 40...50 фс. Это обеспечивает времена нелинейного отклика сред с металлическими наночастицами в диапазоне 0.5...2 пс.

Таким образом, композитные среды на основе наночастиц полупроводников и металлов обладают пико- и фемтосекундным быстродействиями и высокой нелинейной восприимчивостью. Спектральная область применения таких нелинейно-оптических сред 0.35...2 мкм. Оптические композиты являются перспективными материалами для создания быстродействующих устройств управления излучением в интегрально-оптических системах, в том числе в оптических компьютерах. Быстродействие оптических переключателей на основе

композитов с металлическими наночастицами может достигать 50...100 фс, а энергия управляющего светового сигнала – до 1 пДж.

Существует большое разнообразие методов изготовления композитных материалов. Выбор технологии определяется типом матрицы – полимер или стекло и типом наночастиц. Рассмотрим технологию создания таких композитов на примере фотохромного стекла с нанокристаллами хлорида меди. В шихту натриевоборосиликатного стекла вводят небольшое количество хлорида натрия и оксида меди. При варке стекла в нем происходит химическая реакция с образованием молекул хлорида меди. Затем проводят термическую обработку стекла при температуре 550...600 °С в течение 5...10 час. В процессе термообработки происходит диффузия молекул хлорида меди. Молекулы группируются в кластеры, которые служат зародышами для образования нанокристаллов. При увеличении температуры и длительности термообработки происходит увеличение размера нанокристаллов.

Для создания оптических композитов с наночастицами серебра в шихту стекла вводят химические соединения серебра. После варки стекла его облучают ультрафиолетовым излучением. При этом происходит фотолиз соединений серебра с образованием атомарного серебра. Затем проводят термообработку стекла при температуре 500...600 °С. В процессе термообработки атомы серебра диффундируют и формируют металлические наночастицы. Размер наночастиц зависит от температуры и длительности термообработки.

3.7. Металлы

Металлы в интегральной оптике, как правило, используются в виде тонких пленок. Из металлов с высокой проводимостью формируют электроды для оптических переключателей и коммутаторов, управляемых электрическими сигналами, для фотоприемников и источников излучения. Благородные металлы (Ag, Au) в виде тонких пленок применяются для создания плазмонных волноводов и других плазмонных оптических устройств – концентраторов, резонаторов, наноантенн и т. д.

В табл. 3.6.1 приведены оптические константы некоторых металлов, используемых для плазмонных волноводов и электродов в устройствах интегральной оптики (K – мнимая часть комплексного показателя преломления n^* : $n^* = n - iK$) [14].

В видимой области спектра и ближнем ИК-диапазоне металлы с высокой проводимостью имеют показатель преломления $n \ll 1$, а в среднем ИК-диапазоне большинство металлов имеет $n \gg 1$. Кроме того, во всех рассматриваемых областях спектра $n < K$. Это приводит к тому, что у большинства металлов действительная часть диэлектрической проницаемости $\epsilon' < 0$. Высокий коэффициент поглощения металлов оказывает сильное влияние на условия каналирования электромагнитной

волны по волноводу и приводит к ее сильному затуханию. Это необходимо учитывать при расчете и изготовлении волноводов с металлическими электродами. Для уменьшения влияния электродов на распространение оптических сигналов по волноводам между электродом и волноводом вводят буферные слои с низким показателем преломления.

<i>Таблица 3.6.1. Оптические свойства металлов</i>				
Металл	$\lambda = 0.63$ мкм		$\lambda = 10.6$ мкм	
	n	K	n	K
Алюминий	1.2	7	25	67
Медь	0.15	3.2	12.6	64.3
Серебро	0.065	4	10.7	69
Золото	0.15	3	7.4	53.4

4. МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЛАНАРНЫХ И ПОЛОСКОВЫХ ВОЛНОВОДОВ

Выбор технологии изготовления волновода для интегральной оптики определяется материалами волновода и подложки, геометрией волновода и профилем показателя преломления сердцевины волновода. На рис. 4.1 показаны основные технологические методы и процессы, применяемые для изготовления планарных и полосковых волноводов.

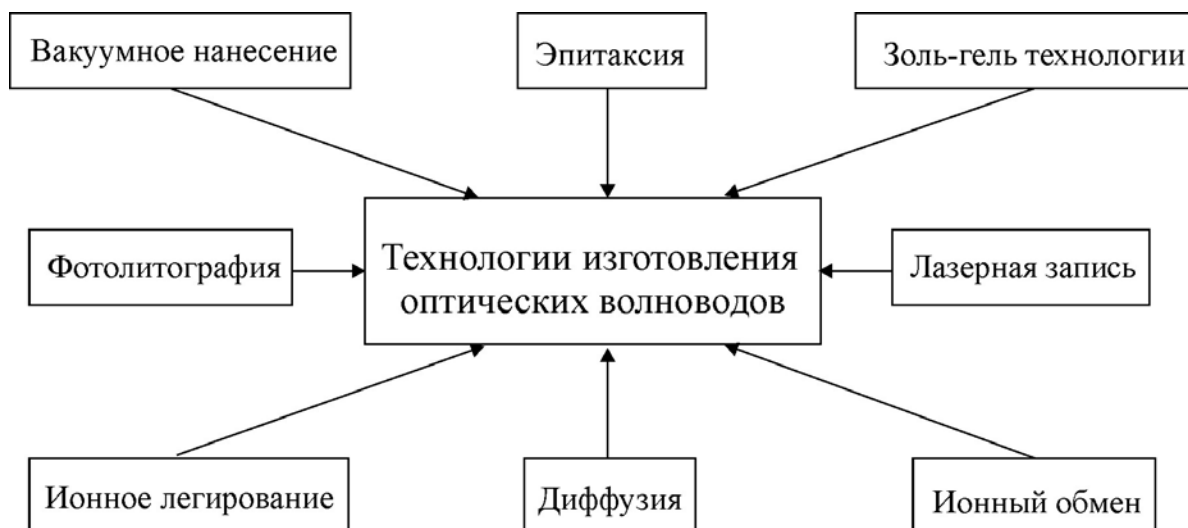


Рис. 4.1. Технологии изготовления оптических волноводов

Для создания сложных многокомпонентных устройств интегральной оптики, как правило, используют сочетание нескольких методов и технологий. Для создания волноводных структур в большинстве случаев применяют методы фотолитографии. Упрощенная схема технологического процесса изготовления интегрально-оптического устройства показана на рис. 4.2. Начинается процесс с изготовления подложек и включает в себя изготовление материала подложек, резки и шлифовки заготовок и окончательной их полировки. Затем проводится изготовление слоев с высоким показателем преломления и создание на подложке волноводов заданной конфигурации с помощью фотолитографии. (В зависимости от конструкции конкретного интегрально-оптического устройства в процесс могут вводиться дополнительные операции, в том числе, изготовление буферных слоев. В этом случае проводится дополнительные этапы фотолитографии.)

Затем проводится изготовление согласующих и вспомогательных слоев. Каждый из этих этапов включает в себя фотолитографию. При создании слоев сложной конфигурации и многослойных конструкций каждый этап может повторяться несколько раз (на рисунке повторы показаны пунктиром).

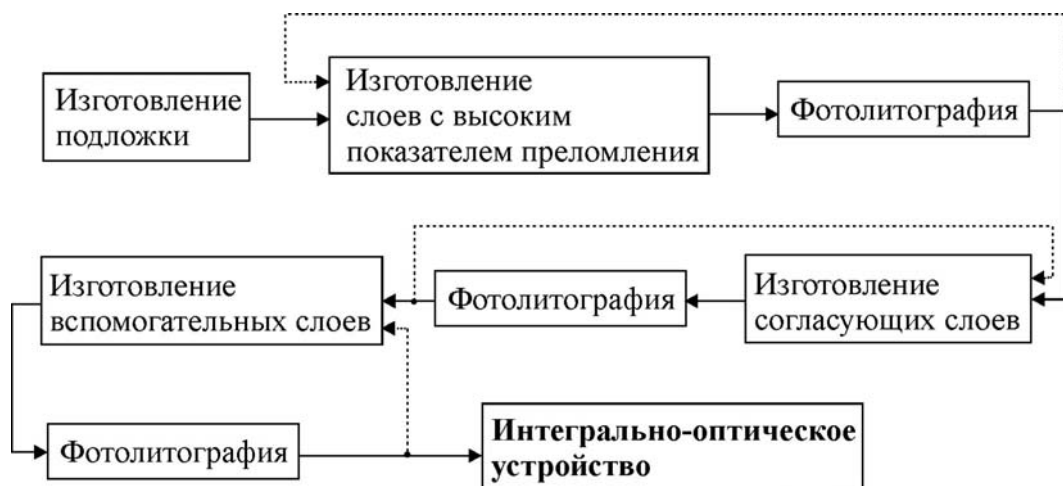


Рис. 4.2. Технологический процесс изготовления интегрально-оптического устройства

4.1. Методы вакуумного нанесения

Методы вакуумного нанесения используются для создания волноводов в виде тонких пленок, а также для нанесения тонкопленочных покрытий на волноводы. Суть методов вакуумного нанесения заключается в том, что в вакууме создают поток атомов или молекул, которые осаждаются на подложки в виде тонкого равномерного слоя формируют планарные волноводы (рис. 4.1.1).

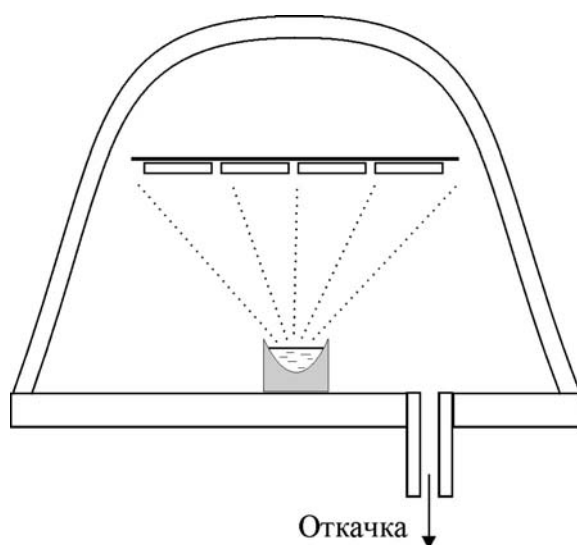


Рис. 4.1.1. Схема установки для вакуумного нанесения пленок

Установка для вакуумного нанесения состоит из вакуумной камеры, в которой расположены источник материала и подложки, на которые осаждается материал. В ходе нанесения пленки проводится постоянный контроль толщины формируемой пленки оптическими методами. Для улучшения адгезии пленки к подложке во время вакуумного нанесения слоя подложку нагревают до температуры 200...300 °С.

Существует много методов вакуумного нанесения пленок материалов. В основном, методы отличаются способом создания потока

атомов, ионов или молекул материала. Выбор метода определяется теплофизическими и химическими свойствами наносимого материала и требованиями к характеристикам пленки. Методы вакуумного нанесения пленок позволяют создавать волноводы со ступенчатым профилем показателя преломления.

Термовакuumные методы получения пленок

Термовакuumные методы основаны на нагреве в вакууме вещества до температуры испарения и образования пара и дальнейшей конденсации вещества на подложке [10]. Поток испарившихся частиц в вакууме образуется если давление пара испаряемого материала превышает давление в вакуумной камере.

В табл. 4.1.1 приведены температуры плавления и кипения некоторых материалов, применяемых в интегральной оптике. Зависимость давления пара вещества от температуры нагрева иллюстрирует табл. 4.1.2.

Таблица 4.1.1. Температуры плавления и кипения некоторых материалов

Материал	Температура плавления, °C	Температура кипения, °C
Al	659	2447
Au	1063	2709
Si	1423	2787
Al ₂ O ₃	2045	2980
SiO ₂	1983	2230
TiO ₂	1913	-
Y ₂ O ₃	2683	4300
ZnO	1975	-
CaF ₂	1423	2500
MgF ₂	1261	2240

Таблица 4.1.2. Температуры, обеспечивающие заданное давление пара для некоторых материалов

Материал	Температура, К, при давлении пара, ×133 Па			
	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁵	1	10
Al	860	1160	1830	2050
Ag	759	1025	1605	1815
Au	964	1305	2040	3220
Si	1145	1510	2330	2620

Из таблиц видно, что для создания достаточно высокого давления пара материалы должны нагреваться до температуры более 1000 °C, а во многих случаях – более 2000 °C. Поэтому для испарения разных материалов используются различные методы нагрева. Основные из этих методов показаны на рис. 4.1.2.

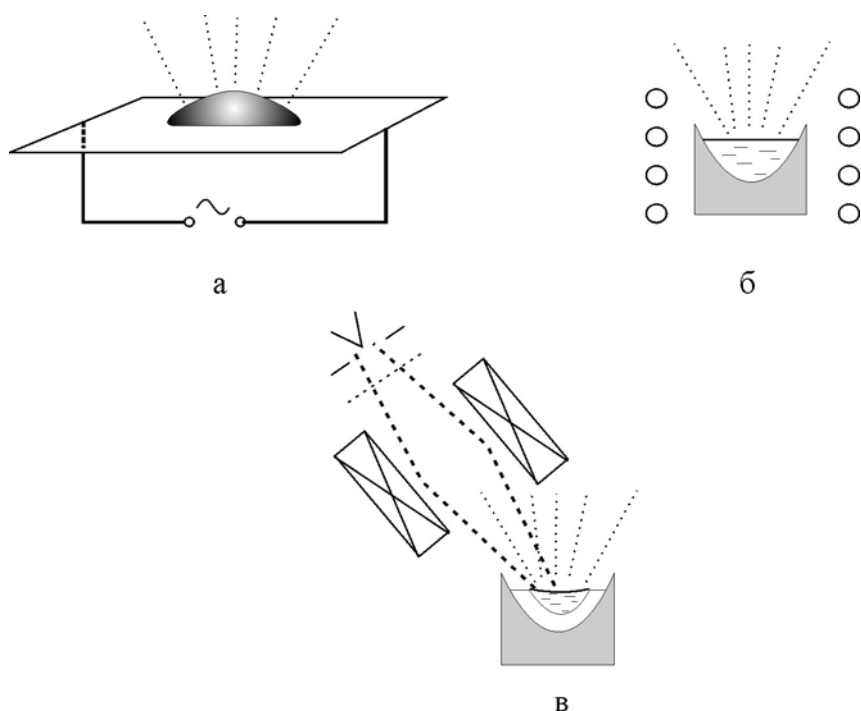


Рис. 4.1.2. Основные методы термического испарения материала для вакуумного нанесения пленок. а – резистивный; б – высокочастотный; в – электронно-лучевой

Резистивное испарение (рис. 4.1.2, а). Небольшое количество материала помещают на нагреватель из фольги или проволоки. Нагреватель изготавливают из вольфрама или молибдена и нагревают пропусканием электрического тока. Резистивное испарение используют для материалов, у которых температура испарения не превышает 1500°C . Существенными недостатками метода являются частичное испарение материала нагревателя, загрязняющее осаждаемый слой, а также растворение и химическое взаимодействие испаряемого материала с нагревателем при высокой температуре.

Высокочастотное испарение (рис. 4.1.2, б). Испаряемый материал помещают в тугоплавкий диэлектрический тигель и нагревают СВЧ-полем. Максимальная температура испарения в данном случае определяется термостойкостью материала тигля.

Электронно-лучевое испарение (рис. 4.1.2, в). Материал помещают в тигель из проводящего материала, охлаждаемый проточной водой и нагревают сфокусированным электронным лучом. В данном случае плавление и испарение материала происходит не во всем его объеме, а лишь в области воздействия электронного луча. Поэтому в данном методе удастся исключить загрязнение осаждаемого слоя материалом тигля. Электронно-лучевой метод позволяет испарять наиболее тугоплавкие материалы. Особенностью метода является то, что на начальной стадии нагрева диэлектрических материалов происходит зарядка поверхности материала, вызывающая отклонение и замедление электронов и уменьшающая эффективность нагрева. Для уменьшения этого эффекта на поверхность материала иногда наносят тонкий проводящий слой углерода.

После разогрева материала его электрическое сопротивление резко снижается и эффект зарядки поверхности исчезает.

Метод лазерной абляции

Взаимодействие импульсного лазерного излучения высокой интенсивности с поверхностью твердого тела приводит к мгновенному испарению (абляции) части вещества и образованию плазмы, состоящей из атомов, ионов, электронов и кластеров вещества, разлетающихся с высокой скоростью. Схематично метод показан на рис. 4.1.3 [10].

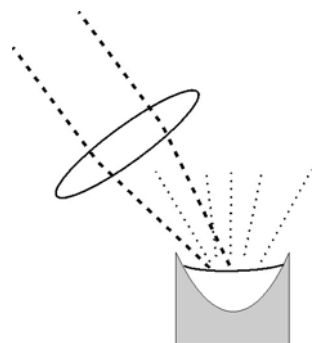


Рис. 4.1.3. Испарение материала методом лазерной абляции

Импульсный лазерный луч с помощью объектива через окно в вакуумной камере фокусируется на поверхность материала, находящегося в охлаждаемом тигле. Испаряемое вещество в виде плазмы достигает подложку и формирует на ней пленку. Данный метод является наиболее «чистым» по сравнению с другими методами нанесения пленок, так как в нем отсутствуют нагреваемые элементы и узлы, а в вакуумной камере находится только тигель с испаряемым веществом. Метод лазерной абляции позволяет испарять любые вещества независимо от их температуры плавления, электропроводности и химического состава. Лазерным нанесением пленок получены поликристаллические слои многих материалов: Cr, W, Ti, C, Si, Ge, SrTiO₃, BaTiO₃, GaAs, GaP, InSb, ZnO, ZnS, CdTe и др. Поэтому метод лазерной абляции в настоящее время широко используется в технологических процессах микроэлектроники и интегральной оптики.

Катодное распыление в плазме газового разряда

В данном методе для создания потока атомов вещества используется распыление мишени ионами инертных газов [10]. При бомбардировке поверхности мишени ускоренными ионами с энергией выше пороговой происходит отрыв атомов мишени от поверхности. Значение пороговой энергии ионов для большинства материалов лежит в интервале 5.6...5.9 эВ. При увеличении энергии ионов до 100 эВ интенсивность процесса распыления возрастает в $10^3 \dots 10^4$ раз. Схема устройства для катодного распыления показана на рис. 4.1.4.

помощью центрифуги со скоростью вращения от 200 до 18000 об/с. Небольшое количество пленкообразующего раствора подается в центр подложки во время ее вращения и равномерно распределяется по поверхности подложки. Толщина покрытия контролируется концентрацией раствора и скоростью вращения подложки. После этого подложка высушивается. При этом происходит полный гидролиз реагента и на подложке формируется тонкий равномерный слой геля. Следующим этапом является термообработка при температуре 250...350 °С. В процессе термообработки происходит термическое разложение продуктов гидролиза до оксида металла или полупроводника, а также удаление органических остатков и воды. В результате на поверхности подложки формируется тонкий прозрачный слой оксида металла или полупроводника. В таблице 4.2.1 приведены исходные реагенты, составы и оптические характеристики пленок, полученных золь-гель методом.

Таблица 4.2.1. Свойства пленок, получаемых золь-гель методом

Исходный реагент	Состав пленки	<i>n</i>	Область прозрачности, мкм
Тетраэтоксисилан	SiO ₂	1.44	0.185...7
Тетраэтоксигерманий	GeO ₂	1.66	0.23...10
Тетраэтоксититан	TiO ₂	2.2	0.36...9.5
Изопропоксиалюминий, тетраэтоксисилан	Al ₂ O ₃ + SiO ₂	1.54	0.25...10
Хлорид алюминия	Al ₂ O ₃	1.54	0.25...9
Хлорид ниобия	Nb ₂ O ₃	2.1	0.35...10
Оксихлорид циркония	ZrO ₂	2.03	0.25...9
Нитрат тория	ThO ₂	2.05	0.20...11

Пленки, полученные золь-гель методом, как правило, имеют аморфную структуру. Для формирования поликристаллической пленки проводится ее дополнительный отжиг. Показатель преломления пленок, полученных описанным методом, несколько ниже, чем показатель преломления монокристалла из аналогичного материала. Это связано с наличием в пленках наноразмерных пор. Метод позволяет изготавливать волноводы из смеси оксидов различных веществ. В то же время, выбор материалов для пленки волновода ограничен спецификой физико-химических процессов, используемых в данной технологии.

С помощью золь-гель технологий могут быть изготовлены пленочные волноводы из стекол различного состава с заданным показателем преломления. На основе золь-гель стекол могут изготавливаться композитные материалы, содержащие полупроводниковые нанокристаллы, например, CdS, CdSe, CdTe, ZnS, CuCl, CuBr и др. Такие композитные материалы обладают нелинейно-оптическими свойствами и могут использоваться для создания светоправляемых волноводных оптических переключателей.

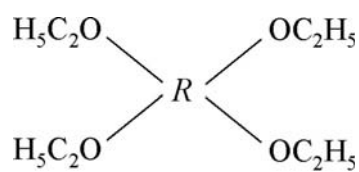
Достоинствами золь-гель метода являются его простота и отсутствие сложного и дорогостоящего вакуумного оборудования. Недостатками являются большая продолжительность и многостадийность

материала мишени. Магнетронное распыление используется, в основном, для формирования пленок металлов и полупроводников. В табл. 4.1.3 приведены типичные скорости осаждения пленок некоторых материалов, получаемых методом магнетронного распыления.

Таблица 4.1.3. Скорость осаждения полупроводников и металлов при магнетронном распылении						
Материал	Si	Ti	Al	Cu	Au	Ag
Скорость осаждения, нм/с	7	8	13	30	37	44

4.2. Золь-гель методы

Метод основан на реакциях гидролиза ряда металлоорганических и неорганических соединений в растворах [15]. Исходными реагентами, как правило, являются алкоксисоединения металлов или полупроводников, а также легко гидролизующиеся хлориды, оксихлориды и нитраты металлов. Алкоксисоединения представляют собой такие соединения, в которых ион металла или полупроводника (R) связан через кислород с органическими радикалами по схеме:



В качестве растворителя используется этанол с небольшим количеством воды. В ряде случаев в раствор в качестве катализатора добавляют небольшое количество соляной кислоты. Оптимальные соотношения компонентов раствора должны, с одной стороны, обеспечить быстрый гидролиз материала в растворе с образованием золя. С другой стороны – полный гидролиз на поверхности подложки с образованием геля. В качестве подложек могут быть использованы стекла различного состава и кристаллические материалы.

Технологический процесс формирования тонкопленочных волноводов золь-гель методом состоит из нескольких этапов. Первый этап заключается в приготовлении раствора и его созревании. Созревание растворов происходит в несколько стадий:

1. сольволиз или образование промежуточных продуктов, ускоряющих гидролиз;
2. частичный гидролиз пленкообразующих соединений;
3. коалесценция продуктов гидролиза с образованием полимолекул.

Процесс созревания может длиться от нескольких часов до двух недель. Например, растворы тетраэтоксититана пригодны для нанесения пленок через 6-10 час, растворы тетраэтоксисилана созревают лишь через 10-16 дней. После созревания раствор в виде тонкого слоя наносят на поверхность подложки. Нанесение раствора на подложку производится с

помощью центрифуги со скоростью вращения от 200 до 18000 об/с. Небольшое количество пленкообразующего раствора подается в центр подложки во время ее вращения и равномерно распределяется по поверхности подложки. Толщина покрытия контролируется концентрацией раствора и скоростью вращения подложки. После этого подложка высушивается. При этом происходит полный гидролиз реагента и на подложке формируется тонкий равномерный слой геля. Следующим этапом является термообработка при температуре 250...350 °С. В процессе термообработки происходит термическое разложение продуктов гидролиза до оксида металла или полупроводника, а также удаление органических остатков и воды. В результате на поверхности подложки формируется тонкий прозрачный слой оксида металла или полупроводника. В таблице 4.2.1 приведены исходные реагенты, составы и оптические характеристики пленок, полученных золь-гель методом.

Таблица 4.2.1. Свойства пленок, получаемых золь-гель методом

Исходный реагент	Состав пленки	<i>n</i>	Область прозрачности, мкм
Тетраэтоксисилан	SiO ₂	1.44	0.185...7
Тетраэтоксигерманий	GeO ₂	1.66	0.23...10
Тетраэтоксититан	TiO ₂	2.2	0.36...9.5
Изопропоксиалюминий, тетраэтоксисилан	Al ₂ O ₃ + SiO ₂	1.54	0.25...10
Хлорид алюминия	Al ₂ O ₃	1.54	0.25...9
Хлорид ниобия	Nb ₂ O ₃	2.1	0.35...10
Оксихлорид циркония	ZrO ₂	2.03	0.25...9
Нитрат тория	ThO ₂	2.05	0.20...11

Пленки, полученные золь-гель методом, как правило, имеют аморфную структуру. Для формирования поликристаллической пленки проводится ее дополнительный отжиг. Показатель преломления пленок, полученных описанным методом, несколько ниже, чем показатель преломления монокристалла из аналогичного материала. Это связано с наличием в пленках наноразмерных пор. Метод позволяет изготавливать волноводы из смеси оксидов различных веществ. В то же время, выбор материалов для пленки волновода ограничен спецификой физико-химических процессов, используемых в данной технологии.

С помощью золь-гель технологий могут быть изготовлены пленочные волноводы из стекол различного состава с заданным показателем преломления. На основе золь-гель стекол могут изготавливаться композитные материалы, содержащие полупроводниковые нанокристаллы, например, CdS, CdSe, CdTe, ZnS, CuCl, CuBr и др. Такие композитные материалы обладают нелинейно-оптическими свойствами и могут использоваться для создания светопроводимых волноводных оптических переключателей.

Достоинствами золь-гель метода являются его простота и отсутствие сложного и дорогостоящего вакуумного оборудования. Недостатками являются большая продолжительность и многостадийность

технологического процесса и ограниченный ассортимент пленкообразующих материалов. Золь-гель метод нанесения пленок позволяет создавать волноводы со ступенчатым профилем показателя преломления.

4.3. Методы эпитаксии

Для формирования планарных оптических волноводов из монокристаллических материалов используют технологии эпитаксии [10]. Эпитаксия это ориентированный рост слоев, кристаллическая решетка которых повторяет кристаллическую структуру подложки. Если подложка и слой состоят из одного вещества, то процесс называют автоэпитаксиальным, если из различных – гетероэпитаксиальным. Если эпитаксия происходит в результате химического взаимодействия вещества подложки с веществом растущего слоя, то такой процесс называется хемоэпитаксией. Существует целый ряд технологических методов и приемов эпитаксии, позволяющих вырастить монокристаллические слои полупроводников и диэлектриков на монокристаллических подложках. Рассмотрим некоторые из этих методов.

Конденсация из паровой фазы в вакууме. Метод заключается в испарении или распылении материала в вакууме и осаждении его на монокристаллическую подложку. Данный метод похож на вакуумные методы нанесения пленок, описанные в п. 4.1. Существенными отличиями является то, что процесс проводится в сверхвысоком вакууме, а подложка нагревается до температуры, превышающей 1000 °С. При осаждении атомов из пара на подложку происходит их миграция по поверхности. При относительно низкой температуре подложки пробег атомов по поверхности мал, поэтому формирующийся слой имеет аморфную структуру. При высокой температуре подложки атомы приобретают значительную энергию и подвижность. Они мигрируют по поверхности и занимают положения в кристаллической структуре подложки, при которых их потенциальная энергия минимальна. Таким образом, формируется плоская двумерная решетка из островков осаждаемого материала, которая, в конечном счете, превращается в сплошной монокристаллический слой. На этом слое происходит появление новых островков, наращивание нового слоя и т. д. Процесс эпитаксии схематично показан на рис. 4.3.1. Пунктирными стрелками показано осаждение и миграция атомов кремния. Сплошными стрелками – направление роста эпитаксиального слоя. Наличие сверхвысокого вакуума в данном процессе необходимо потому, что остаточные газы в вакуумной камере также могут мигрировать по подложке, встраиваться в растущую кристаллическую решетку и тем самым, создавать в ней дефекты.

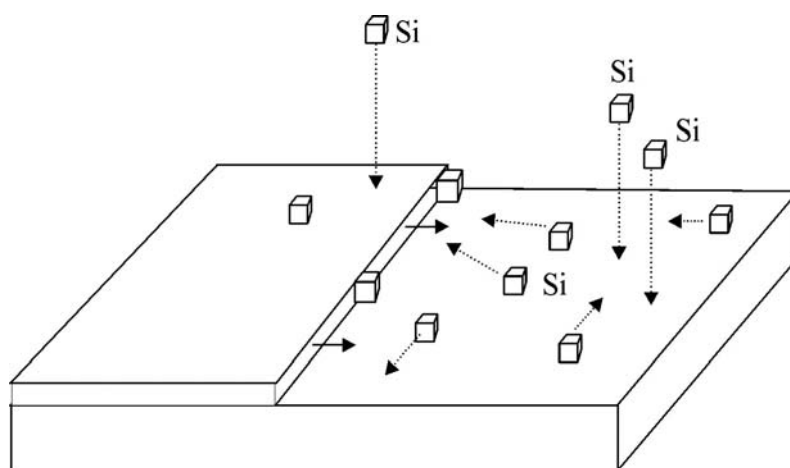


Рис. 4.3.1. Процесс эпитаксиального наращивания монокристаллического слоя

Данный метод используется, например, для автоэпитаксии кремния. В процессе автоэпитаксии может проводиться легирование растущего слоя кремния, для придания ему оптических или электрических характеристик, отличных от характеристик кремниевой подложки. Для этого в вакуумную камеру вводят малую концентрацию паров примесного вещества.

Эпитаксия из газовой фазы с диссоциацией химического соединения. Атомы материала переносятся на горячую подложку в составе химического соединения. На подложке происходит термодиссоциация реагента с выделением атомов материала растущего слоя. Данный метод позволяет выращивать слои имеющие сложный химический состав, благодаря проведению дополнительных химических реакций на подложке. В табл. 4.3.1 Приведены некоторые типы реакций, используемых для выращивания монокристаллических полупроводниковых и диэлектрических слоев.

Таблица 4.3.1. Типы реакций, используемых для эпитаксиального выращивания пленок		
Осаждаемая пленка	Уравнение реакции	Температура подложки, K
Si	$\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + 2\text{H}_2$	773...973
Si ₃ N ₄	$\text{SiH}_4 + \text{NH}_3 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + \text{H}_2$	923...1173
	$\text{SiH}_2\text{Cl}_2 + \text{NH}_3 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + \text{HCl}$	1023...1073
SiO ₂	$\text{Si}(\text{OC}_3\text{H}_7)_4 + (\text{CH}_3\text{O})_3\text{PO} \rightarrow \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O}$	> 973

Модификацией данного метода является плазменное осаждение. В парах исходных реагентов зажигают ВЧ-разряд. В плазме разряда частичная происходит диссоциация молекул реагентов и другие плазмохимические реакции. Продукты реакции диффундируют на горячую подложку и формируют на ней эпитаксиальный слой. Данный метод позволяет повысить скорость роста эпитаксиальных слоев. При выращивании слоев кремния из потока SiCl₄ с водородом скорость роста слоя может достигать 20 нм/с.

Жидкофазная эпитаксия. Заключается в наращивании монокристаллического слоя из металлического расплава, насыщенного

полупроводниковым материалом. В качестве металла используют легкоплавкий компонент наращиваемого соединения, например Ga при выращивании слоев GaAs. С помощью такой технологии получают гетеропереходы Ge-Si, GaAs-GaP, используемые в полупроводниковых лазерах и фотоприемниках, а также слои InSb, GaAs, InP, $Al_xGa_{1-x}As$ и пленки гранатов.

Твердофазная эпитаксия. В основе твердофазной эпитаксии лежат процессы твердофазного физико-химического взаимодействия в многослойной тонкопленочной системе при изотермическом отжиге. Данные процессы происходят благодаря высокой температуре и наличию хорошего контакта между слоями. Одной из фаз является монокристаллическая подложка. Другие фазы могут быть аморфными или поликристаллическими. При нагреве такой многокомпонентной структуры происходит перекристаллизация одной из фаз и ее ориентированное наращивание на монокристаллическую подложку.

Молекулярно-лучевая эпитаксия. Основана на химическом взаимодействии исходных компонентов пленки с нагретой монокристаллической подложкой при осаждении этих компонентов с помощью нескольких молекулярных пучков. Устройство установки для молекулярно-лучевой эпитаксии схематично показано на рис. 4.3.2.

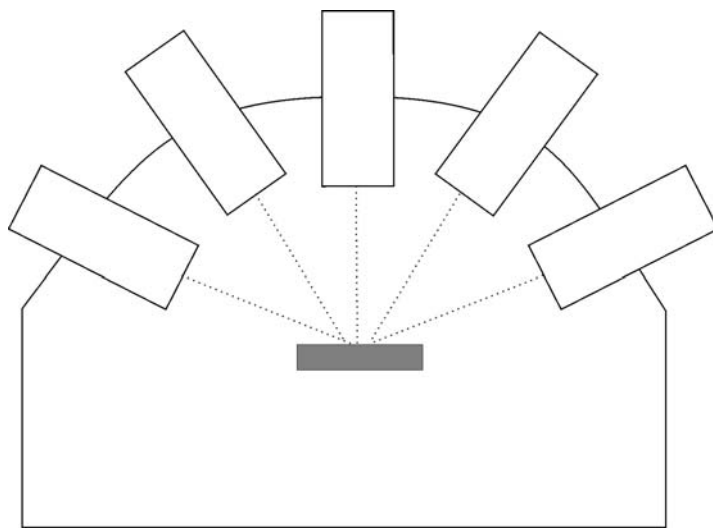


Рис.4.3.2. Схема установки для молекулярно-лучевой эпитаксии

Установка состоит из вакуумной камеры с несколькими источниками молекулярных пучков. Каждый из источников формирует пучок заданного химического состава. Одновременная реакция реагентов из нескольких пучков с нагретой монокристаллической подложкой позволяет формировать сложные многокомпонентные эпитаксиальные слои. Эпитаксия проводится в сверхвысоком вакууме. Скорость потоков из каждого источника и температура подложки модулируются по заданной программе, что позволяет создавать эпитаксиальные слои с контролируемой толщиной с точностью до монослоя. Скорость эпитаксиального наращивания в данном методе очень мала – не более 1

мкм/ч, однако, данный метод позволяет создавать наиболее совершенные и сложные эпитаксиальные структуры.

Лазерная эпитаксия (графоэпитаксия). Используется для выращивания пленок монокристаллического кремния на поликристаллических, аморфных и стеклянных подложках. На подложку наносят слой поликристаллического или аморфного кремния и затем производят лазерный отжиг пленки с помощью луча аргонового лазера. В результате лазерного отжига пленка кремния приобретает монокристаллическую структуру с малым числом дефектов.

Стимулирующее действие излучений и электрического поля на эпитаксию. Процессы эпитаксии в большинстве случаев протекают медленно, что снижает производительность при производстве интегрально-оптических устройств. Ускорить процессы эпитаксии можно с помощью УФ и ИК излучений, а также путем приложения к подложке электрического потенциала.

Воздействие излучений на процесс эпитаксии носит двойной характер. Во-первых, это чисто термическое воздействие, приводящее к увеличению кинетической энергии молекул и атомов, мигрирующих по поверхности подложки. Во-вторых, это селективное воздействие, приводящее к переводу молекул в возбужденное или ионизированное (в случае УФ излучения) состояние. В результате возбуждения или ионизации происходит увеличение реакционной способности молекул. Использование УФ или ИК облучения подложки в процессе эпитаксии позволяет увеличить скорость роста слоя на 20...30 %.

Увеличение скорости роста эпитаксиального слоя в присутствии электрического поля определяется как полярностью приложенного напряжения, так и напряженностью электрического поля. Как правило, при полевой эпитаксии используются напряженности поля до 2 кВ/см. Увеличение скорости роста эпитаксиального слоя может достигать 20 %.

Методы эпитаксиального нанесения пленок позволяют создавать волноводы со ступенчатым профилем показателя преломления.

4.4. Методы диффузии

Диффузия – процесс последовательного перемещения атомов примеси в материале, обусловленный тепловым движением. Условием возникновения диффузии является наличие градиента концентрации примеси. В процессе диффузии примесь стремится равномерно распределиться в объеме материала с минимальным градиентом – происходит растворение примеси в объеме материала. Существует два вида диффузии [10]:

- диффузия в материале, находящемся в состоянии химического равновесия, т. е. при однородном химическом составе – самодиффузия атомов растворителя;

- диффузия, когда системы не находятся в состоянии химического равновесия и градиенты химических потенциалов вызывают появление результирующих химических потоков – химическая или взаимная диффузия. Частным случаем такого вида диффузии является процесс ионного обмена (см. п. 4.5).

Диффузия атомов может происходить не только снаружи в объем материала, но и наоборот, из объема во внешнее пространство. Такая разновидность диффузии называется эффузией (диффузией наружу). Процесс эффузии объясняется тем, что существует градиент концентрации между объемом материала и окружающим пространством. Поэтому при высоких температурах некоторые компоненты материала могут выходить на его поверхность и испаряться.

В некоторых кристаллах диффузия может быть анизотропной. В кристаллах с кубической решеткой, а также в стеклах и аморфных материалах диффузия изотропна. Уравнение изотропной диффузии для одномерного случая имеет вид (второй закон Фика):

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial N}{\partial x} \right),$$

где N – концентрация примеси; D – коэффициент диффузии. Коэффициент диффузии экспоненциально зависит от температуры (первый закон Фика):

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right).$$

Здесь D_0 – константа, зависящая от типа примеси и материала в котором происходит диффузия; E_a – энергия активации для скачка атома; k – постоянная Больцмана; T – температура диффузии. Из приведенного выражения следует, что с увеличением температуры происходит увеличение коэффициента диффузии. Поэтому диффузию примесей проводят при высоких температурах.

Распределение примеси в объеме материала может быть вычислено с помощью решения уравнения диффузии. Решение уравнения диффузии в полубесконечное тело из бесконечного источника (с постоянной концентрацией примеси) имеет вид:

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}},$$

где $N(x, t)$ – концентрация примеси на расстоянии x от поверхности тела; t – продолжительность диффузии; N_0 – поверхностная концентрация диффузии; $\operatorname{erfc}(s)$ – дополнительный интеграл вероятностей, представляемый через функцию ошибок $\operatorname{erf}(s)$:

$$\operatorname{erfc}(s) = 1 - \operatorname{erf}(s) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s \exp(-s^2) ds = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_s^\infty \exp(-s^2) ds.$$

На рис. 4.4.1, а показано изменение распределения примеси по глубине при диффузии из бесконечного источника для различной

продолжительности диффузии t . Из рисунка видно, что при увеличении продолжительности диффузии толщина слоя, содержащего примесь, увеличивается, и профиль распределения примеси становится более гладким. Концентрация примеси вблизи поверхности тела при этом остается неизменной. Из рисунка также следует, что при создании оптического волновода методами диффузии его профиль показателя преломления будет не ступенчатый, а градиентный. Это характерно для всех разновидностей диффузионных технологических процессов и учитывается при расчете и проектировании интегрально-оптических устройств.

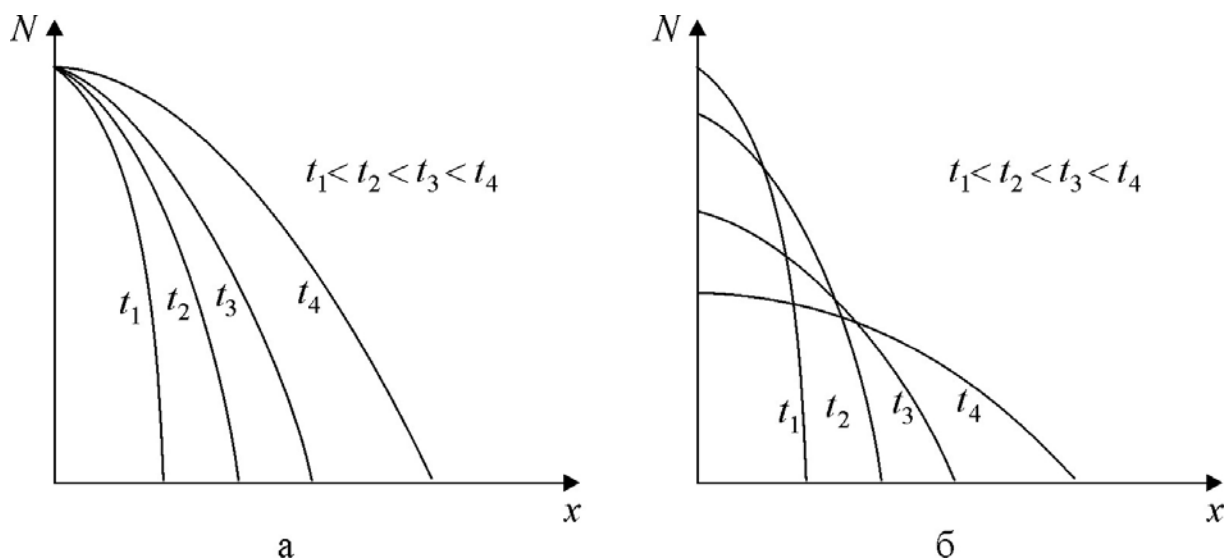


Рис. 4.4.1. Изменение профиля распределения примеси в процессе диффузии.
а – бесконечный источник; б – ограниченный источник

Если диффузия происходит из ограниченного источника, в котором концентрация примеси уменьшается со временем, то профили распределения примеси по глубине принимают вид, показанный на рис. 4.4.1, б.

В ряде случаев необходимо создать слой примеси, залегающий в глубине материала. Для этого используют процесс диффузии с последующее разгонкой примеси. Метод заключается в том, что поступление примеси из источника в какой-то момент прекращают, а на поверхность подложки наносят слой инертного материала, например SiO_2 . После этого производят нагрев подложки. При этом часть примеси переходит из подложки в нанесенный слой и вблизи поверхности подложки концентрация примеси уменьшается (рис. 4.4.2). Затем нанесенный слой удаляют травлением. Аналогичный процесс может происходить и в результате эффузии примеси из объема материала. Данные методы используются для создания оптических волноводов в объеме материала.

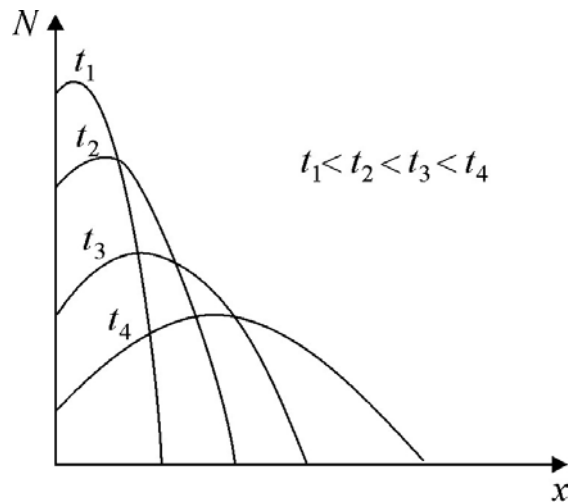


Рис.4.4.2. Изменение профиля распределения примеси в процессе диффузии с разгонкой примеси

Процессы диффузии широко используются в технологиях микроэлектроники и интегральной оптики. Методами диффузии создают *p-n*-переходы в полупроводниковых лазерах, фотоприемниках, и электроуправляемых оптических переключателях. Вводя в материал примесь, увеличивающую показатель преломления, создают планарные и полосковые волноводы.

Диффузия может проводиться из газовой фазы (рис. 4.4.3, а), из расплава (рис. 4.4.3, б) и из твердой фазы (рис. 4.4.3, в), например, из пленки материала, нанесенной на поверхность подложки. Максимально достижимая концентрация вводимой примеси зависит от предельной растворимости примеси в конкретном материале. Предельная растворимость примеси, в свою очередь, зависит от температуры. Например, предельная растворимость меди в кремнии при $T = 973 \text{ K}$ равна 10^{16} см^{-3} . При $T = 973 \text{ K}$ предельная растворимость превышает 10^{18} см^{-3} .

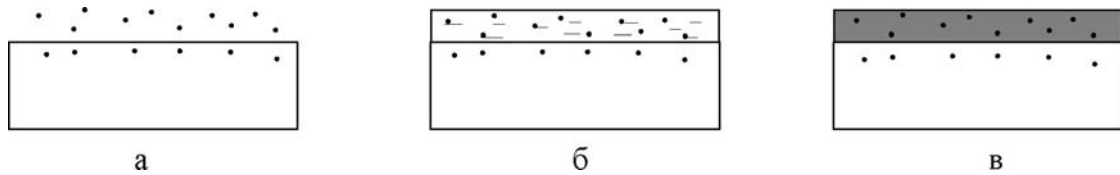


Рис.4.4.3. Диффузия из газовой фазы (а), из расплава (б) и из твердофазного источника (в)

Для создания методами диффузии полосковых волноводов используют фотолитографию (см. также п. 4.7). Примеры формирования внедренных полосковых волноводов диффузией в сочетании с фотолитографией показаны на рис. 4.4.4.

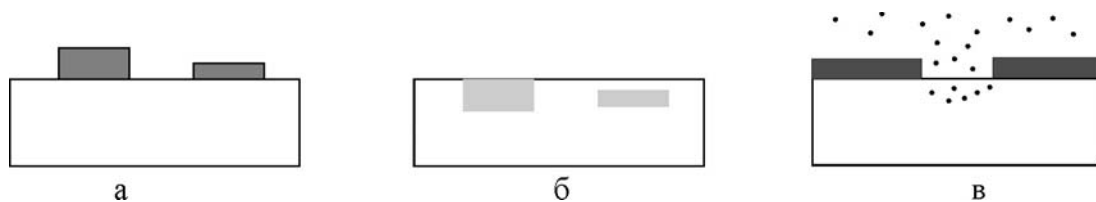


Рис. 4.4.4. а – твердофазные источники примеси; б – сформированные в результате диффузии волноводы; в – диффузия из газовой фазы через отверстие в маске

На поверхности подложки с помощью фотолитографического процесса создают полоски из материала примеси (рис. 4.4.4, а). Затем производят нагрев подложки. Примесь диффундирует в подложку, в результате чего в ней происходит локальное увеличение показателя преломления – формируется внедренный волновод (рис. 4.4.4, б). Если пленка примесного материала на поверхности подложки тонкая, то в результате сочетания процессов диффузии и эффузии может быть сформирован волновод в глубине подложки.

При проведении диффузии из газовой фазы или расплава методами фотолитографии на поверхности подложки создают маску из защитного слоя ((рис. 4.4.4, в). Защитный слой препятствует диффузии примеси на всей поверхности подложки, за исключением открытой области в которой должен сформироваться волновод. После завершения диффузии маску удаляют химическим травлением.

Методы диффузии используют для создания волноводных структур в стеклах, диэлектрических кристаллах и полупроводниках. Введение примеси в стекло позволяет увеличить или уменьшить его показатель преломления, в зависимости от типа примеси. Диффузию используют для создания планарных волноводов в приповерхностных слоях монокристаллов LiNbO_3 и LiTaO_3 которые применяются в волноводных электрооптических модуляторах. Например, при диффузии ниобия в подложку из LiTaO_3 вблизи поверхности формируется слой $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$, имеющий более высокий показатель преломления, чем чистый LiTaO_3 .

Введение примеси методами диффузии позволяет изменять показатель преломления полупроводников и тем самым формировать в них оптические волноводы. Показатель преломления полупроводника описывается выражением:

$$n = n_0 - \sum_i \frac{e^2 N_i}{n_0 \varepsilon m_i \omega^2}.$$

Здесь n_0 – показатель преломления собственного полупроводника; e – заряд электрона; N – концентрация свободных носителей заряда; ε – диэлектрическая проницаемость вакуума; индекс i соответствует типу носителя заряда; m – эффективная масса носителя заряда; ω – круговая частота излучения. Из приведенного соотношения видно, что увеличение концентрации свободных носителей заряда, например электронов, приводит к уменьшению показателя преломления полупроводника. Для создания в полупроводниковом материале волновода можно использовать полупроводник с высокой концентрацией свободных электронов и ввести в приповерхностный слой методом диффузии компенсирующую примесь. Такие примесные центры являются ловушками для свободных электронов, что позволяет уменьшить их концентрацию. Например, для GaAs эффективной компенсирующей примесью являются атомы меди, для Si – атомы золота.

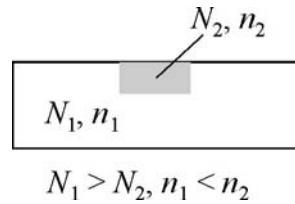


Рис. 4.4.5. Формирование волновода в полупроводнике путем введения компенсирующей примеси

Таким образом, в приповерхностном слое полупроводника сформируется область с пониженной концентрацией свободных электронов и повышенным показателем преломления (рис. 4.4.5).

4.5. Метод ионного обмена

Ионный обмен является частным случаем процесса диффузии (п. 4.4). Суть метода ионного обмена заключается в том, что ионы некоторых примесей при диффузии в объем материала способны замещать ионы этого материала [16]. При этом замещенные ионы материала также благодаря диффузии выходят из него в окружающее пространство. Таким образом, ионный обмен позволяет изменить химический состав материала в тонком слое и, тем самым, изменить его оптические характеристики, например, показатель преломления.

В качестве ионов-диффузанта обычно используются ионы щелочных металлов: Li^+ , K^+ , Rb^+ , Cs^+ , а также другие одновалентные катионы: Ag^+ , Cu^+ , Tl^+ . Ионный обмен, как правило, проводится в стеклах. Однако, волноводные структуры могут создаваться методом ионного обмена в ситаллах и диэлектрических монокристаллах со сложным химическим составом, например LiTaO_3 . Стекланные подложки в технологии ионного обмена обрабатываются в расплавах нитратов или сульфатов металлов, которые должны быть введены в стекло. Нитраты имеют относительно низкие температуры плавления $T_{\text{пл}} = 200 \dots 400$ °С. Это позволяет производить ионный обмен в стеклах имеющих низкую температуру стеклования, например, в фосфатных стеклах. Сульфаты металлов имеют более высокие температуры плавления $T_{\text{пл}} = 500 \dots 600$ °С. Это ограничивает номенклатуру стекол в которых ионным обмен может быть произведен по сульфатной технологии.

В процессе ионного обмена одновалентные катионы стекла диффундируют из стекла в расплав, а одновалентные катионы расплава движутся в стекло. Главной движущей силой в этом случае является разность химических потенциалов. При обмене катионов в стекле происходит изменение показателя преломления стекла. В зависимости от разницы поляризуемостей и радиусов катионов, а также от температуры обработки может происходить как увеличение, так и уменьшение показателя преломления. Например, при обмене ионов натрия в стекле на ионы серебра из расплава происходит увеличение показателя преломления

за счет различия поляризуемостей ионов натрия и серебра. При этом вблизи поверхности стекла формируется тонкий слой, обладающий волноводными свойствами.

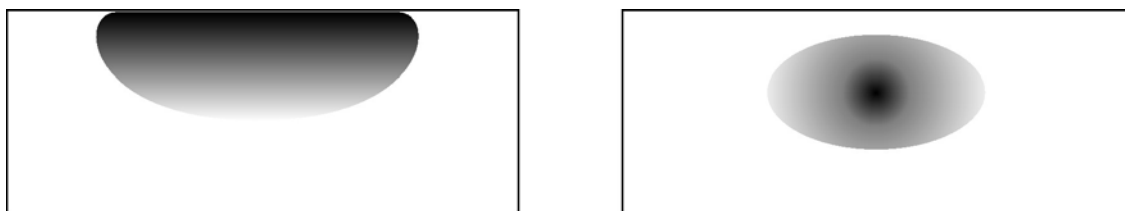
Ионный обмен может проводиться в большинстве разновидностей оксидных стекол. В табл. 4.5.1 приведены характеристики волноводных слоев, полученных в натриевосиликатных стеклах методом ионного обмена.

Таблица 4.5.1. Характеристики волноводных слоев, полученных методом ионного обмена

Ион	Δn	Толщина слоя, мкм	Оптические потери, дБ/см
Ag^+	0.1	50	< 0.2
Tl^+	0.1...0.2	12	< 0.1
Cs^+	0.04	8	0.2
Rb^+	0.015...0.02	15	0.1

Существует ряд модификаций ионообменной технологии, позволяющих расширить диапазон реализуемых волноводных характеристик и эффективно ими управлять. Например, в процессе ионного обмена можно производить замену одного типа ионов стекла на два типа других ионов. Для этого расплав должен содержать две разные соли. Например, таким образом можно заменять ион натрия в стекле на ионы лития и калия из расплава. Аналогичным образом, если стекло исходно содержит два типа катионов щелочных металлов, их можно заменить на один иной катион щелочного металла из расплава. Примером является замена ионов натрия и калия в стекле на ион цезия из расплава.

Другой модификацией ионообменного процесса является последовательный двухстадийный обмен. Такая технология позволяет создавать заглубленные волноводы внутри объема стекла. На рис. 4.5.1 показаны два типа волноводных структур эллиптического сечения и градиентным профилем показателя преломления, которые могут быть изготовлены методом ионного обмена. В первом случае (а) сформирован заглубленный волновод вблизи поверхности стекла. Во втором случае (б) заглубленный волновод находится внутри объема стекла.



а

б

Рис. 4.5.1. Поперечная структура волноводов, изготовленных методом ионного обмена:

а) заглубленный волновод сформирован вблизи поверхности стекла

б) заглубленный волновод сформирован внутри объема стекла

Эффективность ионного обмена и параметры формируемых волноводов в значительной степени зависят от состава и других характеристик ионообменного стекла. Для технологии ионного обмена

подходят некоторые коммерческие оптические силикатные стекла. Однако, в настоящее время разработаны новые типы стекол специально для технологии ионного обмена. Такие стекла могут иметь как силикатную, так и германатную либо фосфатную основу. В табл. 4.5.2 перечислены некоторые типы коммерческих стекол, условия ионного обмена и приведены величины изменения показателя преломления в сформированных волноводных структурах.

Таблица 4.5.2. Стекла для ионного обмена и технологические режимы его проведения

Марка стекла (состав)	Расплав	Температура, °C	Длительность, ч	$\Delta n \cdot 10^4$
K8	KNO ₃	350	6	56
	RbNO ₃	500	6	198
BK7	KNO ₃	400	10	70
GNS (GeO ₂ -Nb ₂ O ₅ - SiO ₂ -Na ₂ O)	KNO ₃	490	3	120
BGG35	AgNO ₃	360	1	1200
AGP (Al ₂ O ₃ -GeO ₂ - P ₂ O ₅ -Na ₂ O-Cs ₂ O)	KNO ₃	450	12	160

Метод ионного обмена в сочетании с фотолитографией позволяет создавать не только планарные, но и внедренные полосковые волноводы. Для этого на поверхность стекла наносят слой (маску) материала, препятствующий ионному обмену и процесс происходит только в области, где маска отсутствует (см. рис. 4.4.4, в). После окончания ионного обмена маску удаляют химическим травлением.

Метод ионного обмена позволяет изготавливать волноводы с градиентным профилем показателя преломления.

4.6. Метод ионной имплантации

Примесь, формирующая волновод, может быть введена в подложку не только с помощью диффузии или ионного обмена, но и с помощью технологии ионной имплантации [10]. Сущность данной технологии заключается в том, что ионы примеси в вакууме разгоняются в электрическом поле до высоких энергий (от десятков до тысяч килоэлектронвольт) и внедряются в подложку. В результате столкновений с атомами подложки они теряют энергию и тормозятся на определенной глубине. Блок-схема установки для ионной имплантации показана на рис. 4.6.1.

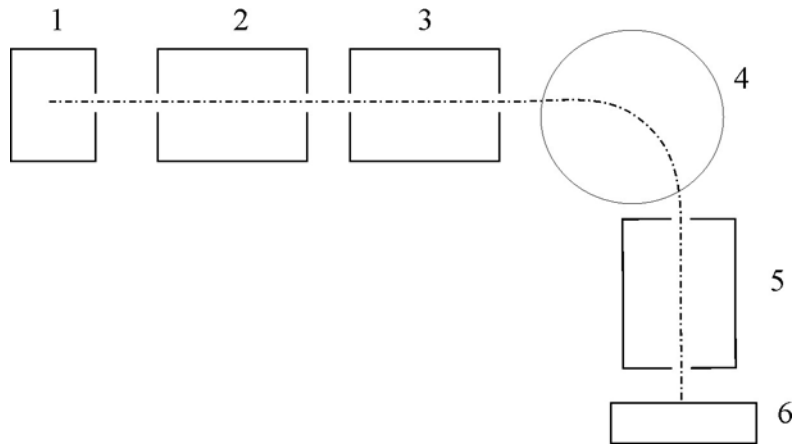


Рис. 4.6.1. Блок-схема установки для ионной имплантации. 1 – источник ионов; 2 – фокусирующая система; 3 – отклоняющая система; 4 – магнитный сепаратор; 5 – ускоритель; 6 – мишень.

Ионы примеси формируются в источнике ионов 1. Обычно для этого используется термическое испарение атомов, либо ввод атомов из газового источника с последующей ионизацией атомов с помощью электронного пучка. С помощью относительно невысокого ускоряющего напряжения в источнике формируется направленный пучок ионов, который поступает в фокусирующую систему 2, содержащую электростатические линзы и далее в отклоняющую систему 3, состоящую из вертикальных и горизонтальных отклоняющих пластин. Ионный пучок может содержать ионы загрязняющих примесей. Для выделения из пучка ионов нужного типа используют магнитный сепаратор 4. Очищенный пучок ионов поступает в ускоритель 5, где ионы разгоняются до высоких энергий, после чего внедряются в мишень-подложку 6.

Проникая в подложку и сталкиваясь с ее атомами ион отклоняется от начальной траектории. Отклонения ионов от начальной траектории носят хаотический характер. Потеря энергии ионами в материале мишени определяется двумя процессами: ядерным и электронным торможением. Для расчета глубины проникновения ионов используется не полная траектория пробега ионов в материале, а усредненная проекция L полной длины пробега на направление начального движения. Средняя глубина проникновения зависит от энергии иона E , атомных номеров иона z_1 и мишени z_2 , а также от молярных масс иона M_1 и атомов мишени M_2 :

$$L = 1.12 \cdot 10^{-23} \frac{\sqrt[3]{z_1^2} + \sqrt[3]{z_2^2}}{z_1 z_2} \frac{M_1 + M_2}{M_1} E,$$

где L – в мкм; E – в Дж.

На рис. 4.6.2 показана зависимость средней глубины проникновения ионов мышьяка (As^+) в кремний (Si) и кварцевое стекло (SiO_2) от энергии ионов. Из рисунка видно, что даже при энергии ионов в 1 МэВ глубина проникновения не превышает 1 мкм. Влияние материала мишени на

глубину проникновения проявляется при относительно низкой энергии ионов и практически отсутствует при высоких энергиях.

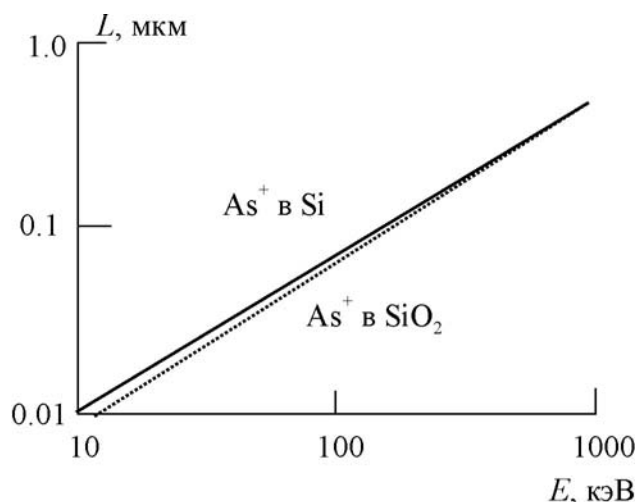


Рис. 4.6.2. Зависимость средней глубины проникновения ионов мышьяка (As^+) в кремний (Si) и кварцевое стекло (SiO_2) от энергии ионов.

В аморфных материалах и кристаллах со случайной ориентацией распределение ионов примеси, введенных ионной имплантацией, имеет колоколообразную форму с максимумом, соответствующим средней глубине проникновения (рис. 4.6.3). Таким образом, при создании оптических волноводов с помощью технологии ионной имплантации формируется заглубленный волновод с градиентным профилем показателя преломления.

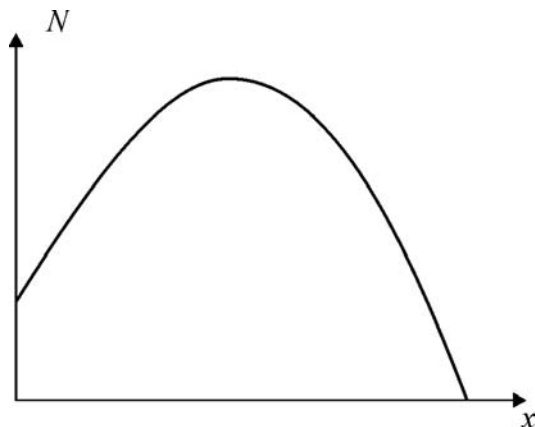


Рис. 4.6.3. Профиль распределения концентрации ионов примеси, внедренных в аморфную мишень

При имплантации ионов в монокристаллические мишени может возникать эффект каналирования ионов. Этот эффект связан с тем, что для определенных кристаллографических направлений ион может двигаться между атомами мишени как по каналу, без рассеяния (рис. 4.6.4, а). Аналогией является каналирование электромагнитных волн в оптических волноводах. При этом потеря энергии ионом происходит, в основном, за счет электронного торможения. В этом случае ион может проникнуть в кристалл на большую глубину, а профиль распределения ионов примеси

по глубине становится двугорбым (рис. 4.6.4, б). Подбором энергии ионов, ориентации кристалла и температуры мишени можно добиться того, что распределение примеси будет формироваться только за счет каналированных ионов. В этом случае может быть сформирован узкий профиль распределения примеси, залегающий в мишени на определенной глубине (пунктирная кривая на рис. 4.6.4, б).

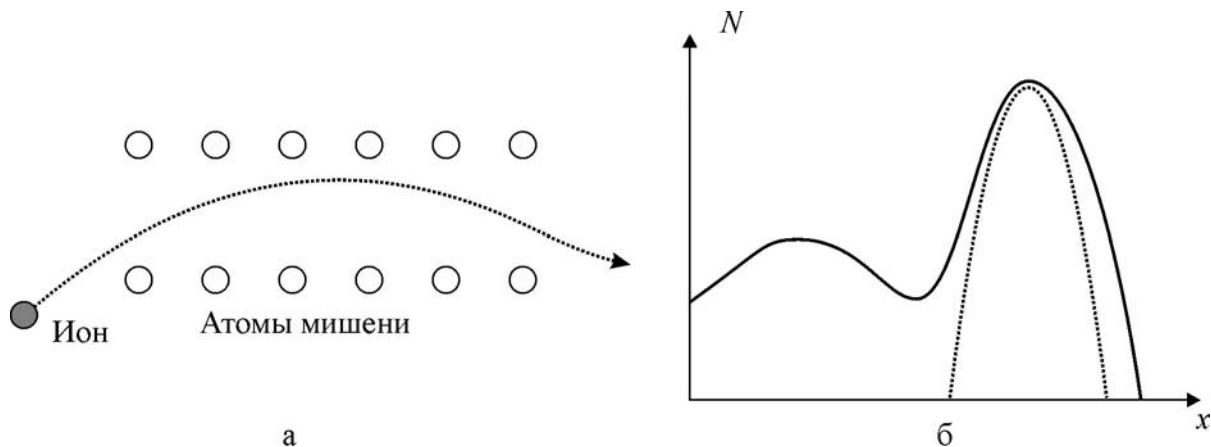


Рис. 4.6.4. а – каналирование ионов в монокристалле; б - профили распределения концентрации ионов примеси при каналировании

При столкновении энергичных ионов с атомами мишени происходит смещение атомов относительно узлов кристаллической решетки – возникают радиационные дефекты решетки, которые изменяют оптические и электронные свойства кристалла. Радиационные дефекты после имплантации устраняют термическим или лазерным отжигом.

Методом ионной имплантации в подложки могут быть введены ионы практических любых веществ со строго контролируемой концентрацией. В одну и ту же подложку могут быть введены последовательно ионы различных веществ. При последующей термической обработке диффузия и химическая реакция этих веществ может приводить к формированию новых химических соединений в подложке в виде отдельных молекул или нанокристаллов. Например, при имплантации стеклянной подложки ионами металла и ионами кислорода и термической обработке в материале подложки может быть создана примесь в виде оксида металла, а также в виде нанокристаллов оксида металла. При имплантации ионов серебра или золота в стеклянную подложку и последующей термообработке в ней формируются наночастицы этих металлов.

Для создания полосковых волноводов метод ионной имплантации сочетают с фотолитографией. В этом случае на поверхности подложки методом фотолитографии предварительно формируют защитную маску (рис. 4.6.5). При имплантации ионы, попадающие в защитный слой тормозятся в нем и не проникают в объем подложки. Ионы, попадающие в отверстия в маске, внедряются в подложку и формируют в ней примесный слой.

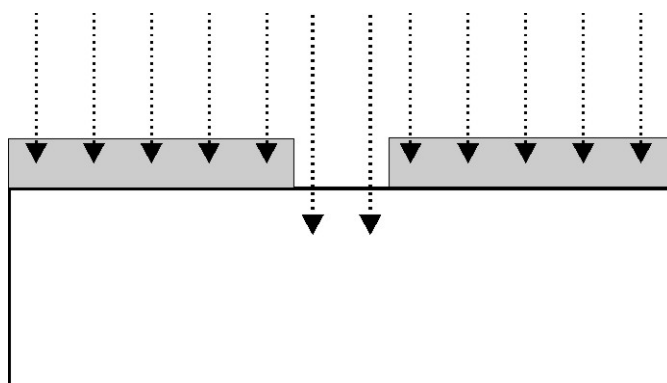


Рис. 4.6.5. Применение защитной маски при ионной имплантации

Полосковый волновод может быть сформирован и путем сканирования ионного пучка по подложке. Для этого используют сфокусированный пучок ионов, пространственное положение которого изменяют с помощью двухкоординатной электростатической отклоняющей системы.

4.7. Методы фотолитографии

Фотолитографические процессы занимают важное место в технологии изготовления интегрально-оптических устройств [10]. По продолжительности и трудоемкости на них приходится до 50 % времени и трудовых затрат. Фотолитография была разработана для нужд микроэлектронной промышленности и, в основном, ориентирована на обработку полупроводников, в первую очередь кремния. Однако, практически все методы и приемы фотолитографии могут быть использованы для изготовления устройств интегральной оптики, тем более, что кремний широко используется для изготовления оптических волноводов, оптических переключателей, фильтров, интегральных микромеханических устройств и других волноводных функциональных узлов.

Принцип фотолитографии заключается в создании на поверхности подложки защитной маски с заданным рисунком, соответствующим формируемому оптическому узлу, например, волноводу. После этого производится обработка подложки, например ее травление, через открытые области маски. В процессе изготовления сложного интегрально-оптического устройства часто приходится проводить фотолитографию многократно.

На рис. 4.7.1 показана упрощенная схема технологического процесса фотолитографии.



Рис. 4.7.1. Технологический процесс фотолитографии

Технологический процесс состоит из четырех основных этапов: изготовления фотошаблона, изготовления подложек с фоточувствительным слоем (фоторезистом), экспонирования подложек с фоторезистом и собственно литографического процесса. Так как от качества фотолитографии зависит работоспособность интегрально-оптического устройства, то на каждом шаге фотолитографического процесса производится контроль результата и выявление дефектов и брака.

Изготовление фотошаблонов

Фотошаблон представляет собой плоскопараллельную пластину из прозрачного материала, на которой имеется рисунок, состоящий из сочетания непрозрачных и прозрачных для света участков. Рисунок создается на основе пленочного покрытия и образует топологию одного из слоев интегрально-оптического устройства. Для одновременной обработки большого количества одинаковых устройств рисунок на фотошаблоне многократно повторяется. Кроме основного рисунка фотошаблон содержит также специальные метки и реперы для его точного совмещения с подложкой в процессе фотолитографии.

В зависимости от материала пленочного покрытия различают фотошаблоны на основе специальной фотографической эмульсии и на основе металлической пленки. Эмульсионные фотошаблоны изготавливают, в основном, фотографическим способом. Пленочные фотошаблоны, в частности, фотошаблоны на основе металлической пленки, могут изготавливаться методом электронно-лучевой обработки. Рассмотрим фотографический процесс изготовления фотошаблона наиболее распространенным трехступенчатым методом последовательного уменьшения.

Первый этап – изготовление оригинала фотошаблона. Оригинал изготавливается на большой (1500×1200 мм) пластине стекла, покрытой непрозрачной пленкой. Для создания рисунка часть пленки удаляется резцом координатографа, управляемого с помощью компьютера.

Второй этап – изготовление промежуточного оригинала или уменьшенной копии оригинала, выполненной на фотопластинах с высокой разрешающей способностью.

Третий этап – мультиплицирование, которое осуществляется на фотоповторителях. Фотошаблон, изготовленный на третьем этапе, называется эталонным.

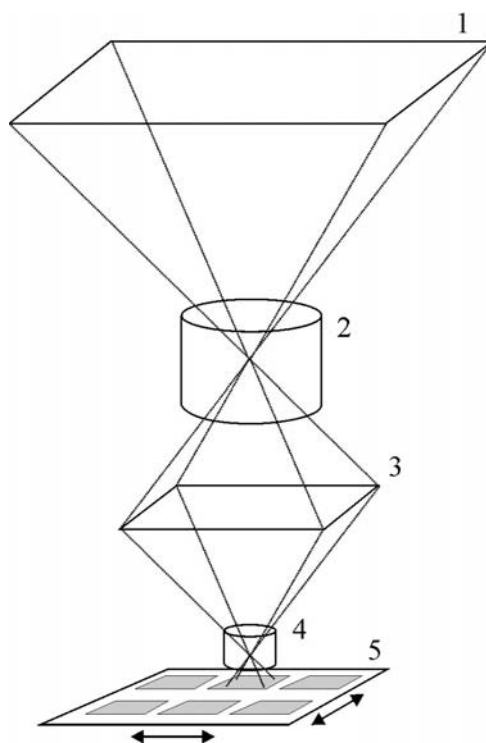


Рис. 4.7.2. Схема изготовления эталонного фотошаблона методом последовательного уменьшения. 1 – оригинал; 2 – объектив; 3 – промежуточный фотошаблон; 4 – объектив фотоповторителя; 5 – эталонный фотошаблон на координатном столе

В качестве оригинала фотошаблона часто используется непосредственно компьютерное изображение. В этом случае используется специальный компьютерный монохромный проектор, позволяющий создать изображение, соответствующее промежуточному фотошаблону,

которое подается непосредственно на объектив фотоповторителя (рис.4.7.3).

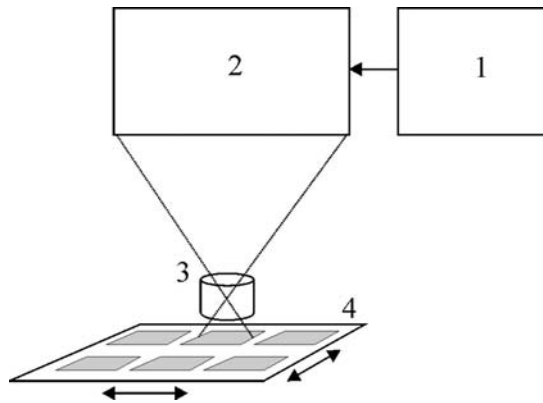
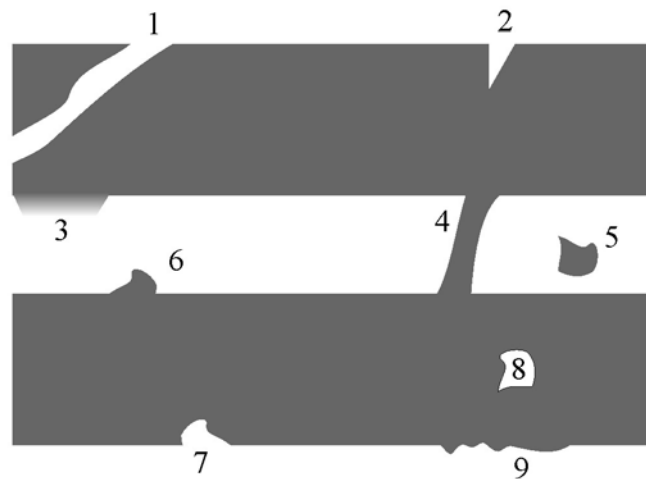
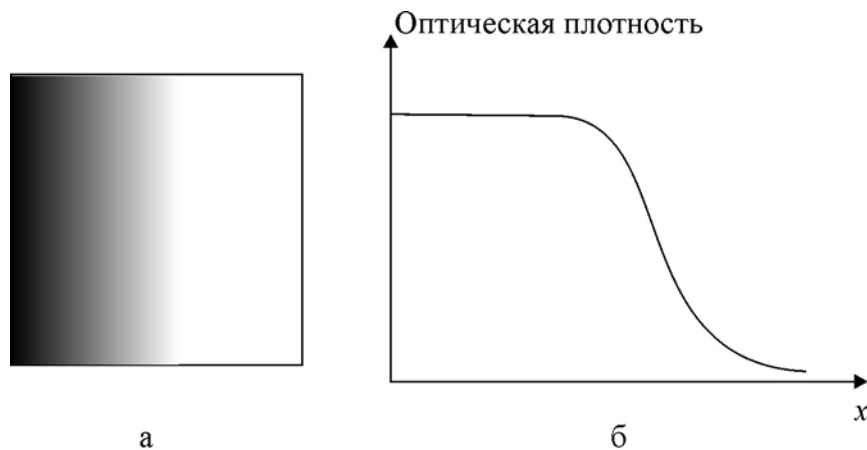


Рис. 4.7.3. Схема изготовления фотошаблона с помощью компьютерного проектора. 1 – компьютер; 2 – проектор; 3 – объектив фотоповторителя; 4 – эталонный фотошаблон на координатном столе

После изготовления эталонного фотошаблона проводится контроль качества его рисунка с выявлением и устранением дефектов. Контроль качества и устранение дефектов является чрезвычайно важной процедурой, так как при наличии дефектов на эталонном фотошаблоне появится брак во все партии изготавливаемых интегрально-оптических устройств. Основные типы дефектов фотошаблонов показаны на рис. 4.7.4.



в

Рис. 4.7.4. Дефекты фотошаблонов. а, б – размытость края рисунка; в – дефекты пленки; 1 – разрыв; 2 – царапина; 3 – размытость края; 4 – перемычка; 5 – темная точка; 6 – выступ; 7 – вырыв; 8 – светлая точка; 9 – неровность края

Эталонный фотошаблон непосредственно не используется в процессе фотолитографии. С его помощью методом контактной фотографии изготавливаются рабочие фотошаблоны.

Изготовление масок для литографии

Маска для литографии представляет собой пленку материала (как правило, полимерного) нанесенную на подложку и имеющую рисунок в виде отверстий. Рисунок маски должен в точности повторять рисунок рабочего фотошаблона. Технология изготовления масок включает в себя несколько этапов (рис. 4.7.5).

1. *Изготовление на подложке реперов для совмещения фотошаблонов с подложкой в процессе фотолитографии.* Реперы представляют собой набор ямок или полосок на подложке, расположенных в той ее части, где нет основного рисунка. Реперы могут изготавливаться с помощью дополнительного фотолитографического процесса, либо путем электронно-лучевого испарения.

2. *Нанесение на подложку слоя фоторезиста.* Фоторезист представляет собой прозрачный полимер, обладающий фоточувствительными свойствами. Светочувствительность фоторезиста повышается за счет введения в его состав фотосенсибилизаторов.

3. *Совмещение рабочего фотошаблона с подложкой.* Фотошаблон помещают на слой фоторезиста, обеспечивая его плотный контакт со слоем и совмещение реперов подложки и фотошаблона. Совмещение реперов производится с помощью автоматизированных оптических устройств.

4. *Экспонирование фоторезиста.* Слой фоторезиста освещают через фотошаблон ультрафиолетовым излучением, спектр которого попадает в полосу поглощения фотосенсибилизатора и полимерной основы. Для фоторезистов, выпускаемых промышленностью, это соответствует спектральному интервалу 280...370 мкм. Для обеспечения высокого качества маски выгодно использовать коротковолновую часть спектра излучения. Длительность экспозиции зависит от типа фоторезиста, интенсивности излучения и его спектра. Длительность экспозиции обычно лежит в интервале 20...90 мин.

Проявление и дублирование фоторезиста. Для проявления фоторезист, как правило, обрабатывают неорганическим или органическим растворителем, удаляющим ненужные участки слоя. Для отдельных типов фоторезистов проводят процесс их дублирования для повышения механической прочности. Дублирование может состоять в

термообработке слоя, либо в его обработке специальными дубящими растворами.

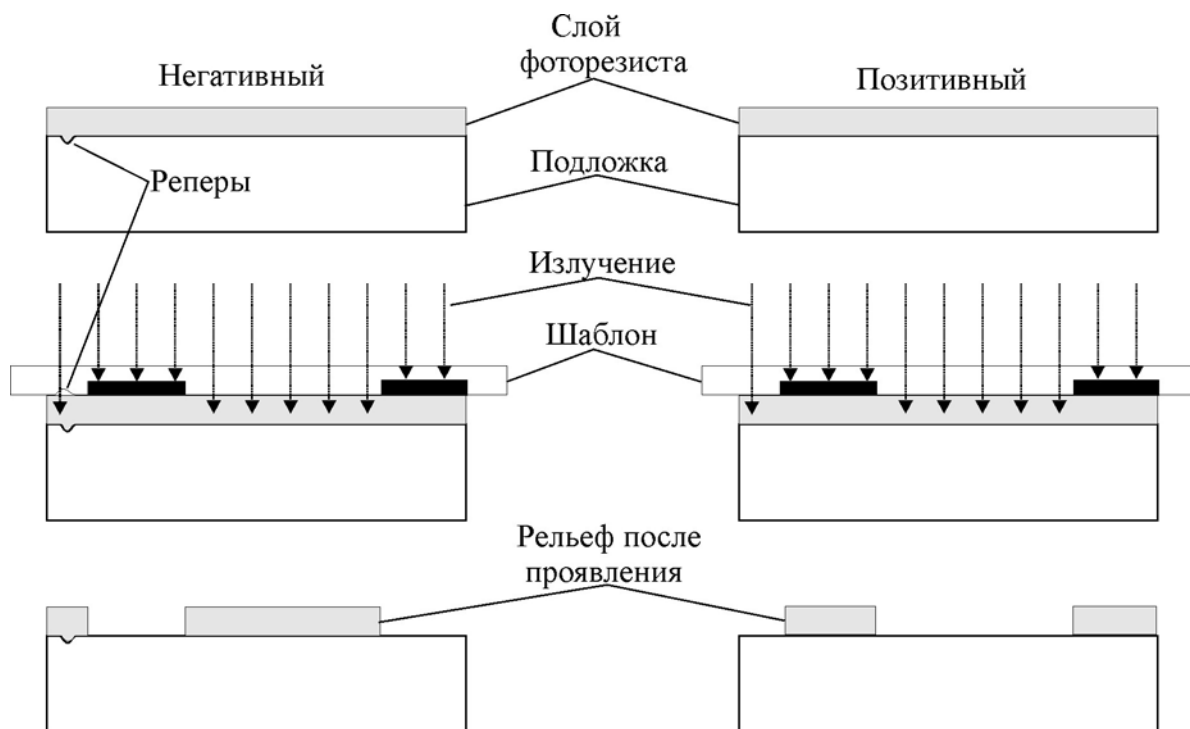


Рис. 4.7.5. Изготовление масок для литографии

В результате на поверхности подложки формируется рельефная маска с рисунком, повторяющим рисунок фотошаблона. Эта маска непосредственно используется для литографического процесса – создания на поверхности подложки рельефного рисунка методом травления.

Фоторезисты, используемые в фотолитографии, бывают негативные и позитивные (рис. 4.7.5). В негативном фоторезисте под действием света в результате фотохимических реакций происходит полимеризация освещенных участков, которые сохраняются после проявления фоторезиста. В позитивном фоторезисте на освещенных участках происходит разрыв полимерных цепочек. При проявлении позитивного фоторезиста покрытие на этих участках удаляется. Промышленностью серийно выпускается много разновидностей фоторезистов, каждый из которых предназначен для фотолитографии определенно группы материалов.

Примером позитивного фоторезиста является фоторезист ФП-383. Он представляет собой раствор новолачной смолы и фотосенсибилизатора в диоксане. Фотосенсибилизатором является смесь эфиров 1,2-нафтохинондиазида (2)-5-сульфокислоты и полифенолов. Разрешающая способность данного фоторезиста равна 400 лин/мм. Он предназначен для фотолитографии пленок диоксида кремния.

Фоторезисты наносятся на подложку тонким равномерным слоем методом центрифугирования. После нанесения пленки производится ее сушка для полного удаления растворителя.

Проявление фоторезистов может производиться несколькими методами: деструкция полимера в серной кислоте, растворение в органических растворителях (дибутилфталат, четыреххлористый углерод, хлорбензол и др.), а также деструкция полимера при плазмохимической, термической или фототермической обработке.

В ряде случаев изготавливается двухслойная маска. Верхний слой маски состоит из фоторезиста, нижний слой представляет собой тонкую пленку металла или неорганического диэлектрика. Выбор материала нижнего слоя маски определяется технологией дальнейшего литографического процесса, в частности, химическим составом и температурой травящих растворов. Двухслойные маски используются также при изготовлении волноводов методами диффузии и ионного обмена.

Технологии литографии

В основе литографических процессов лежит травление или изменение физических и оптических свойств подложки через отверстия в сформированной на ее поверхности маске. В результате травления на подложке формируется рельефный рисунок, повторяющий рисунок маски. В литографии применяют процессы влажного (химического) травления в жидких средах и сухого травления в плазме.

Влажное химическое травление используется в литографии для создания волноводов на поверхности стекол и полупроводников. Процедура травления заключается в погружении подложек с масками из фоторезиста в травящий раствор (рис. 4.7.6). Состав раствора, его температура и продолжительность травления зависят от материала подложки, типа фоторезиста, образующего маску и глубины травления. Для ускорения процесса травления используют травление в ультразвуковом поле. Форма и глубина вытравленных углублений зависит от площади отверстия в маске, материала подложки, состава травителя. При литографии должны использоваться растворы, которые воздействуют только на материал подложки и не повреждают маску.

После завершения процесса травления маску из фоторезиста удаляют путем растворения в ином растворителе. Подложку тщательно промывают, высушивают и проводят контроль качества травления.

Наиболее детально изучены процессы травления кремния, так как он широко используется в микроэлектронике и интегральной оптике. Рассмотрим некоторые особенности химического травления кремния в процессе литографии.

Для травления кремния используют изотропные и анизотропные травители. Изотропные травители травят монокристаллических кремний во всех кристаллографических направлениях с одинаковой скоростью. Изотропные травители используют для вытравливания углублений простой формы и для химической полировки поверхности пластин

кремния. Примером изотропного травителя является водный раствор состава $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH} = 1:40:15$. Скорость травления таким травителем при температуре 298 K примерно одинакова по всем кристаллографическим направлениям и равна 0.15 мкм/мин .

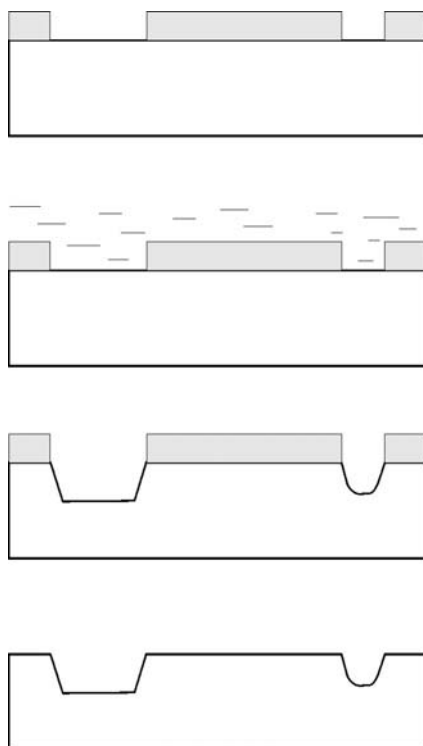


Рис. 4.7.6. Процесс литографии

При анизотропном травлении форма углубления зависит от состава травителя и кристаллографической ориентации пластины кремния. Примером анизотропного травителя является водный раствор KOH . При температуре 353 K скорость травления кремния в кристаллографическом направлении $\langle 110 \rangle$ для такого травителя в 600 раз больше, чем скорость травления в направлении $\langle 111 \rangle$. Использование анизотропных травителей позволяет создавать углубления сложной формы, что значительно расширяет возможности литографии. Некоторые простые формы углублений, полученных анизотропным травлением кремния, показаны на рис. 4.7.7.

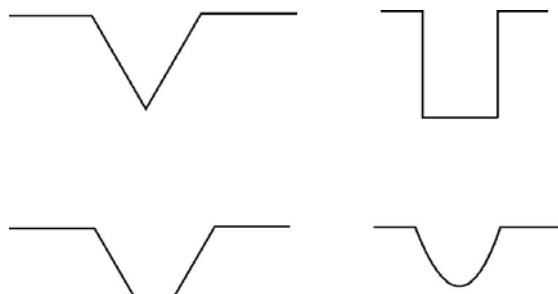


Рис. 4.7.7. Профили углублений в кремнии при анизотропном травлении

Необходимо отметить, что процессы травления идут не только в глубину подложки, но и в стороны. При этом по мере углубления области

травления происходит ее расширение и подтравливание материала под маской (рис. 4.7.8).

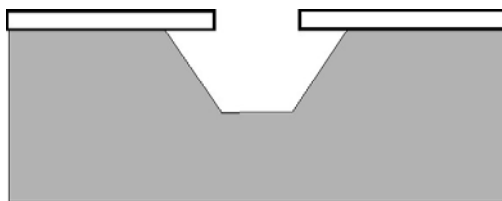


Рис. 4.7.8. Подтравливание материала под маской в процессе литографии

Этот эффект необходимо учитывать при подготовке литографии. В то же время, он используется для создания сложных трехмерных конструкций литографическим способом.

Рентгеновская литография

При использовании стандартных методов фотолитографии может быть реализована точность изготовления элементов интегрально-оптических устройств примерно 1 мкм. Точность ограничивается рядом факторов, в первую очередь, эффектами дифракции и интерференции излучения при экспонировании фоторезиста. На рис. 4.7.9 показано распределение интенсивности излучения на углу микроизображения возникающее в результате дифракции. Интерференционные эффекты возникают в результате интерференции в тонких слоях подложки и фоторезиста и также приводят к размытию изображения. Влияние дифракционных и интерференционных эффектов при контактном экспонировании фоторезиста невозможно устранить полностью. Однако, эти эффекты можно существенно уменьшить за счет уменьшения длины волны экспонирующего излучения.

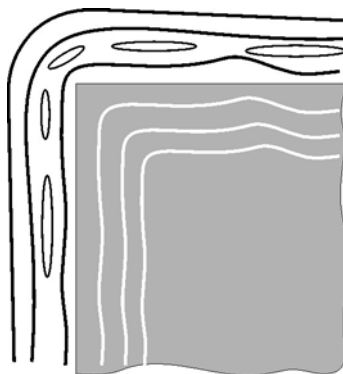


Рис. 4.7.9. Распределение интенсивности света при дифракции на краю микроизображения

Для увеличения пространственного разрешения фотолитографических методов в настоящее время ведется разработка рентгеновской, электронно-лучевой и ионно-лучевой литографии.

В методе рентгеновской литографии для экспонирования фоторезиста используется низкоэнергетическое ($E = 1...10$ кэВ)

рентгеновское излучение. Такому излучению соответствует диапазон длин волн 0.2...20 нм. В качестве источников излучения используются промышленные рентгеновские установки и источники синхротронного излучения с зеркальными оптическими системами, позволяющими сформировать пучок рентгеновского излучения требуемой геометрии.

В рентгеновской литографии используют специальные рентгенорезисты. Позитивным рентгенорезистом является, например, сополимер метилметакрилата и метакрилата. Негативным рентгенорезистом – сополимер глицидилметакрилата и этилакрилата. Фотошаблоны для рентгеновской литографии изготавливают из тонких пластин кремния или карбида кремния и покрывают тонким слоем золота.

Разработанные в настоящее время методы и технологии рентгеновской литографии позволяют создавать структуры с размерами элементов до 12 нм. Это позволило ввести технологические стандарты для рентгеновской литографии: «технология 65 нм» и «технология 32 нм». Интенсивно ведется разработка «технологии 22 нм» и «технологии 12 нм».

Электронно-лучевая и ионно-лучевая литографии

Электронно- и ионно-лучевые литографии не имеют принципиальных ограничений по разрешающей способности. Это связано с малой длиной волны де Бройля электронов и ионов. Разрешающая способность данных методов ограничивается только техническими возможностями технологических установок и практическими требованиями к размерам формируемых элементов.

Экспонирование электронорезистов и ионорезистов может проводиться тремя методами: перемещением сфокусированного пучка частиц по резисту; растровым сканированием пучка по резисту, накрытому маской; экспонирование резиста, накрытого маской, широким расфокусированным пучком. В качестве электронно- и ионорезистов используются тонкие слои полимеров: производные полиметилметакрилата (позитивные резисты) и сополимеры глицидилметакрилата (негативные резисты). Энергия электронов или ионов при экспонировании составляет 5...20 кэВ. Пространственное разрешение при электронно- и ионно-лучевой литографии может достигать 5...10 нм. Ведется разработка технологического стандарта «технология 6 нм».

Голографическая фотолитография

Принцип голографической фотолитографии заключается в формировании на поверхности фоторезиста голограммы. Интерференционная картина голограммы является тем изображением, которое экспонирует фоторезист. Для записи голограмм на фоторезистах

используют когерентные источники излучения – ультрафиолетовые лазеры и лазеры, генерирующие излучение в коротковолновой области видимого диапазона. После экспозиции фоторезист обрабатывают стандартными методами, описанными выше. На рис. 4.7.10 показано использование голографической литографии для изготовления дифракционной решетки.

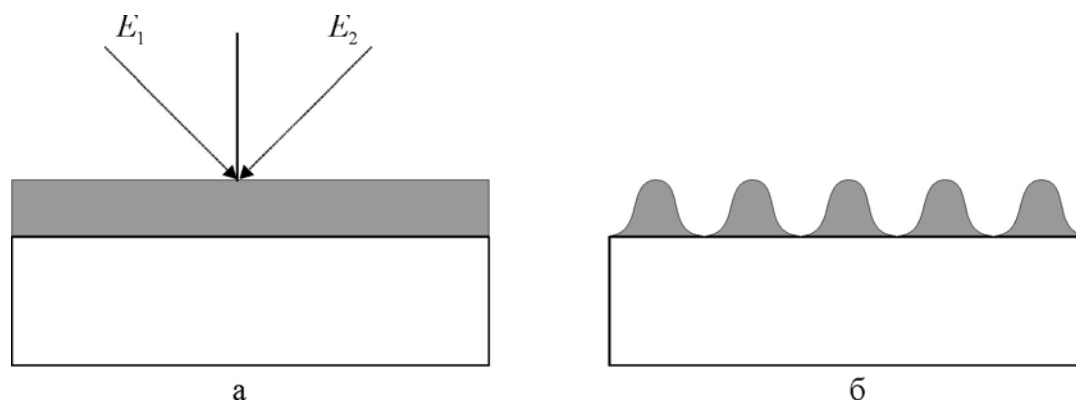


Рис. 4.7.10. формирование дифракционной решетки методом голографической фотолитографии. а – экспонирование фоторезиста двумя пучками когерентного излучения; б – фоторезист после проявления и задубливания

Метод позволяет получать дифракционные решетки с пространственной частотой до 4000 лин/мм. Подобные решетки могут быть использованы в интегрально-оптических системах в качестве устройств ввода-вывода оптических сигналов, спектральных фильтров, демультиплексоров WDM и др. Достоинствами голографической фотолитографии являются простота технологии и высокая воспроизводимость. Голографические методы используются в фотолитографии при изготовлении фотошаблонов для мультипликации (размножения) изображений и повышения качества рисунка путем удаления пространственных шумов.

4.8. Метод лазерной записи волноводов в стекле

В последние годы начало развиваться новое технологическое направление – формирование волноводов в стеклах лазерным излучением. Данный метод основан на необратимом изменении показателя преломления некоторых стекол под действием лазерного излучения. Для записи волноводов используется сфокусированный лазерный пучок (рис. 4.8.1, а), который движется вдоль подложки. Фокус пучка может находиться вблизи поверхности подложки, либо в глубине стекла. В зависимости от этого формируется либо внедренный волновод, либо погруженный в стекло. Для записи волноводов могут использоваться специальные фоточувствительные и фоторефрактивные стекла. Запись волновода может проводиться непрерывным или импульсно-периодическим излучением. При использовании фемтосекундных лазерных импульсов волновод может

быть сформирован и в других типах стекол, например кварцевом, фторидном и германатном стеклах.

На рис. 4.8.1, б показаны оптические волноводы, сформированные во фторидном стекле лазерными импульсами с длительностью 120 фс и частотой повторения 200 кГц [17]. Длина волны излучения лазера – 800 нм. Поперечные размеры волноводов могли варьироваться размером пятна в фокальной плоскости в пределах 7...30 мкм.

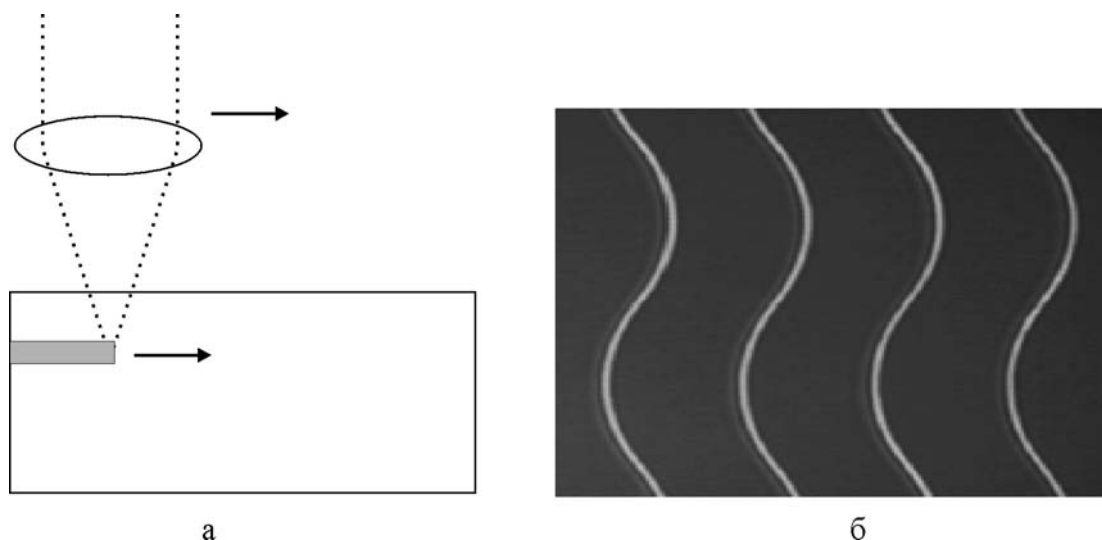


Рис. 4.8.1. а – принцип лазерной записи волноводов в стекле; б – оптические волноводы, сформированные во фторидном стекле фемтосекундными лазерными импульсами

Достоинством данного метода является его технологическая простота и отсутствие трудоемких фотолитографических процессов. Необходимо отметить, что методом лазерной записи в стеклах могут быть сформированы не только оптические волноводы, но и дифракционные решетки, голограммы, микролинзы, амплитудные и фазовые транспаранты и другие оптические элементы.

4.9. Пример технологии изготовления волноводной структуры из кремния по технологии SOI (silicon on insulator)

Рассмотрим технологию изготовления интегрально-оптических устройств на примере простого интегрально-оптического устройства, состоящего из двух волноводов и волноводного кольцевого резонатора, расположенного между ними (рис. 4.9.1). Кольцевой резонатор является узкополосным спектральным селектором, резонансная длина волны которого определяется диаметром и показателем преломления кольца. Между кольцом и волноводами существует электромагнитная связь. Это позволяет электромагнитной энергии переходить из волноводов в кольцевой резонатор и обратно. Структура изготовлена по технологии SOI (silicon on insulator) на подложке из монокристаллического кремния толщиной 200 мкм. Данная технология основана на создании на подложке

слоя диэлектрика (как правило, SiO_2) с низким показателем преломления. Поверх этого слоя наращивается тонкий слой монокристаллического кремния, формирующий волновод. В нашем случае толщина слоя SiO_2 равна 1 мкм, толщина слоя кремния – 0.22 мкм. Радиус кольца равен 4 мкм. Ширина волноводов и кольца равна 0.54 мкм.

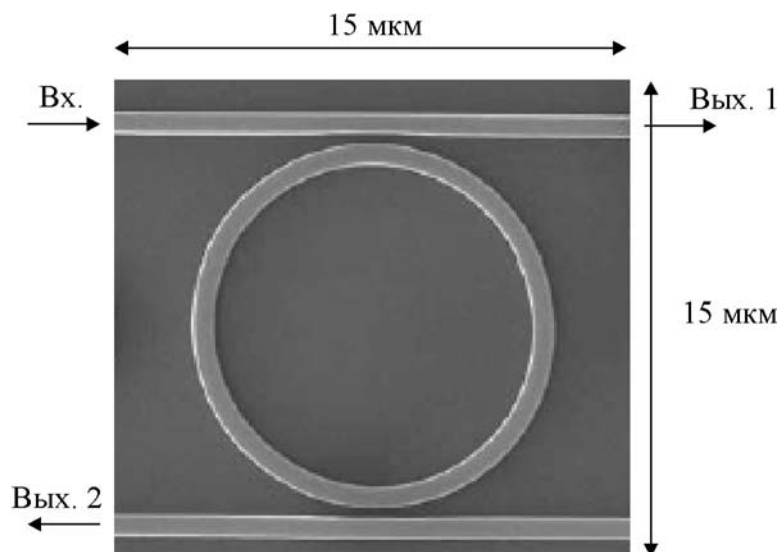


Рис. 4.9.1. Электронно-микроскопическое изображение волноводной структуры с кольцевым резонатором

На рис. 4.9.2 показана спектральная зависимость коэффициента пропускания данной волноводной структуры по выходу 1 и по выходу 2. Из рисунка видно, что она представляет собой узкополосный фильтр с шириной резонансной полосы 0.025 нм. Такие фильтры применяются в WDM волоконно-оптических линиях связи для демультиплексирования оптических сигналов.

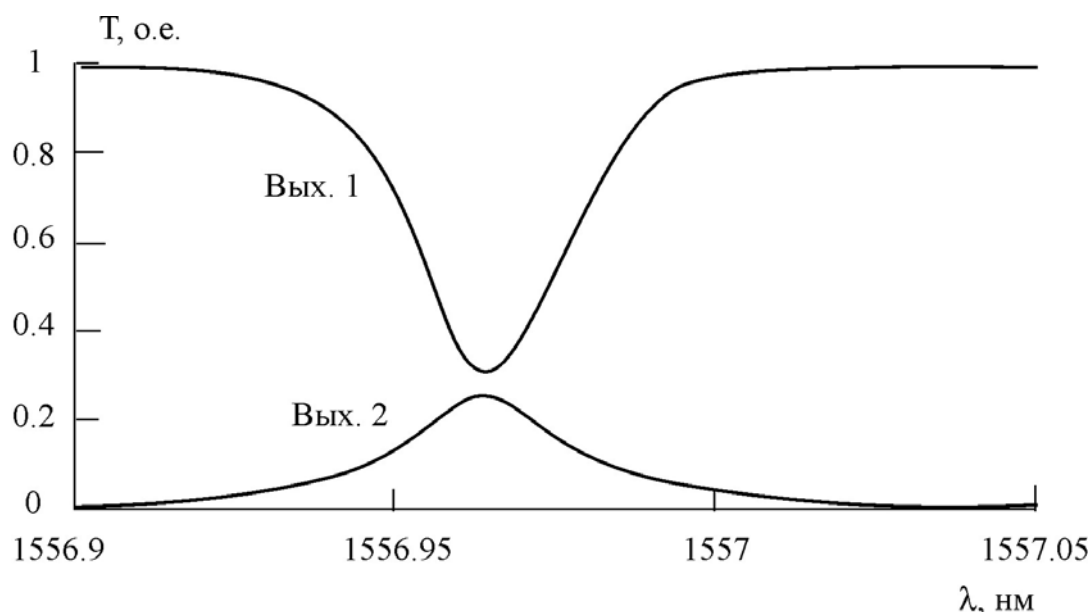


Рис. 4.9.2. Спектральные зависимости коэффициента пропускания волноводной структуры, показанной на рис. 4.9.1

Изготовление интегрально-оптических устройств проводится в герметичных «чистых» помещениях с контролируемой температурой, влажностью и концентрацией пыли в воздухе. В промежутках между операциями подложки хранятся в эксикаторах. Промывка подложек между операциями производится деионизованной водой. Высушивание подложек после промывки осуществляется потоком сухого очищенного азота.

Рассмотрим поэтапно технологический процесс изготовления волноводной структуры.

1. *Изготовление фотошаблона* (рис. 4.9.3).

Изготовление компьютерного изображения (оригинала) фотошаблона;
Проецирование изображения на подложку фотошаблона с масштабированием. Экспонирование подложки фотошаблона;
Проявка, промывка, высушивание фотошаблона;
Контроль качества фотошаблона. Устранение дефектов.

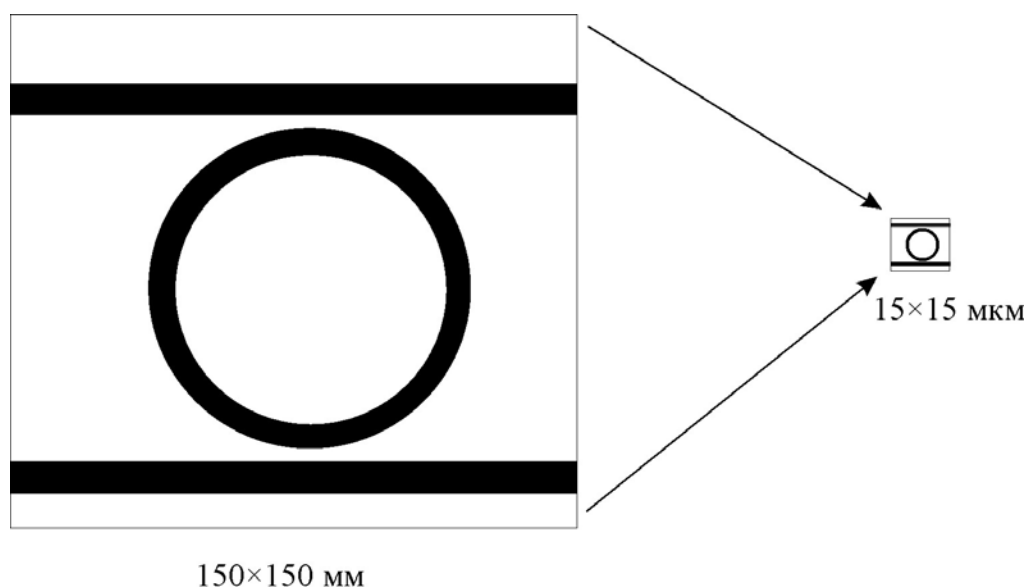


Рис. 4.9.3. Изготовление фотошаблона

2. *Изготовление исходной структуры SOI* (рис. 4.9.4).

Изготовление кремниевой подложки. Подложка вырезается из монокристалла кремния с заданной кристаллографической ориентацией. Затем производится механическая шлифовка и полировка подложки. Для улучшения качества поверхности производится электрохимическая полировка. После промывки и высушивания подложки проводится контроль ее толщины и качества поверхности;

Изготовление слоя SiO_2 . Слой изготавливается методом электронно-лучевого нанесения на нагретую подложку. В процессе нанесения производится контроль толщины слоя оптическими методами;

Контроль качества слоя SiO_2 ;

Изготовление слоя Si. Слой кремния изготавливается эпитаксиальным методом из газовой фазы;

Контроль качества слоя Si.

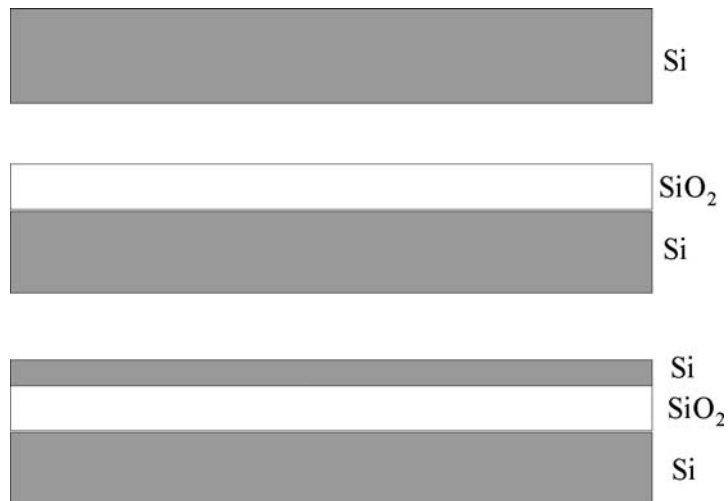


Рис. 4.9.4. Изготовление исходной структуры SOI

3. *Перенос изображения структуры на подложку* (рис. 4.9.5).

Изготовление вспомогательного слоя SiO_2 . Слой изготавливается методом электронно-лучевого нанесения на нагретую подложку. В процессе нанесения производится контроль толщины слоя оптическими методами;

Контроль качества вспомогательного слоя;

Нанесение слоя позитивного фоторезиста;

Высушивание слоя фоторезиста;

Контроль качества слоя фоторезиста;

Совмещение фотошаблона с подложкой;

Экспонирование фоторезиста.

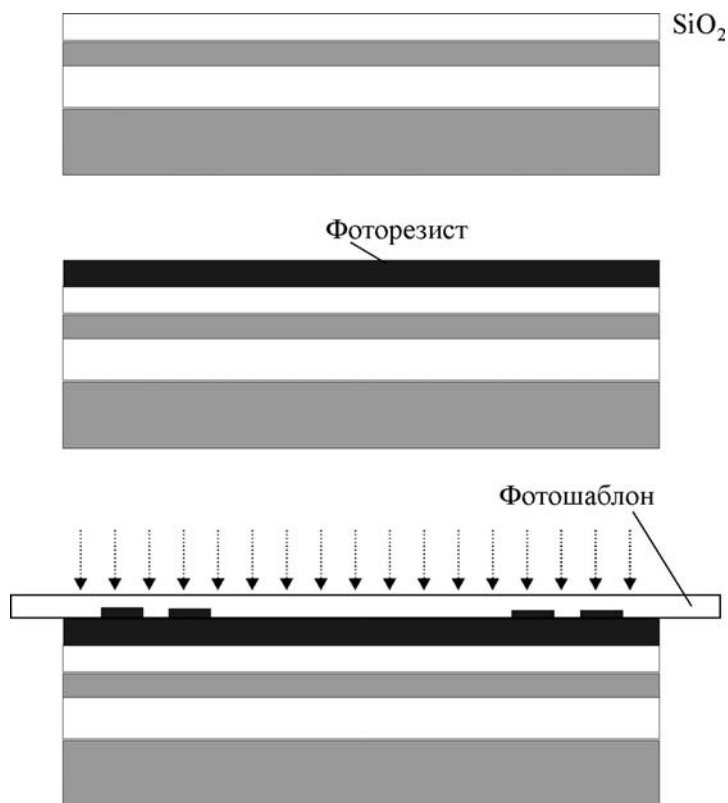


Рис. 4.9.5. Перенос изображения волноводной структуры на подложку

4. *Первый этап литографического процесса* (рис. 4.9.6).

Удаление засвеченных областей фоторезиста химическим растворением;

Промывка и высушивание подложки;

Контроль качества рисунка на фоторезисте;

Травление вспомогательного слоя SiO_2 ;

Промывка и высушивание подложки;

Контроль качества рисунка;

Удаление незасвеченных областей фоторезиста химическим растворением;

Промывка и высушивание подложки;

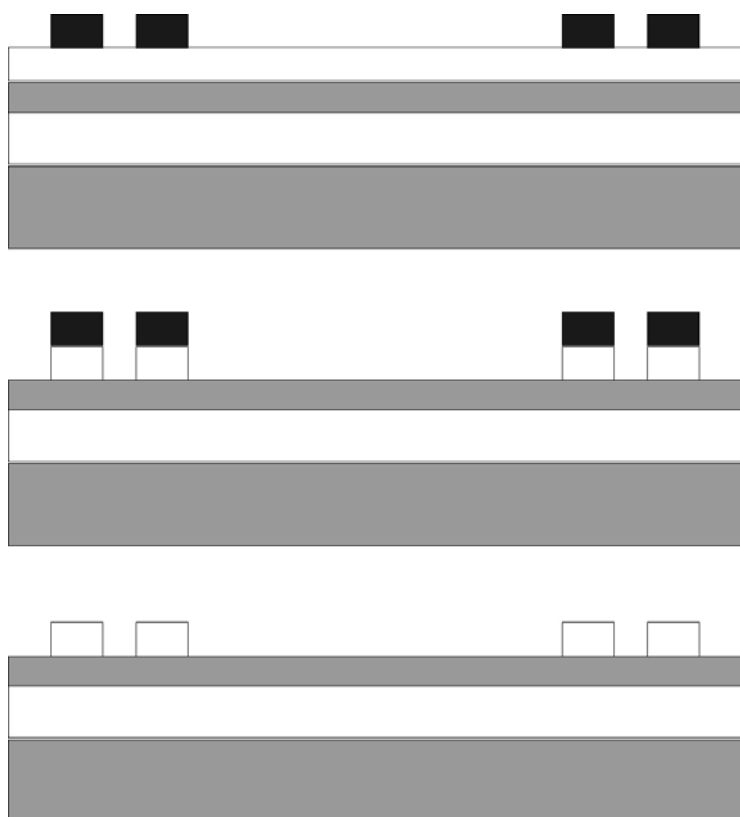


Рис. 4.9.6. Первый этап литографического процесса

5. *Второй этап литографического процесса* (рис. 4.9.7).

Травление слоя кремния химическим методом;

Промывка и высушивание подложки;

Контроль качества рисунка;

Удаление вспомогательного слоя SiO_2 химическим растворением. При этом может происходить частичное подтравливание основного слоя SiO_2 , расположенного между подложкой и пленкой кремния;

Промывка и высушивание подложки;

Окончательный контроль качества интегрально-оптического устройства.

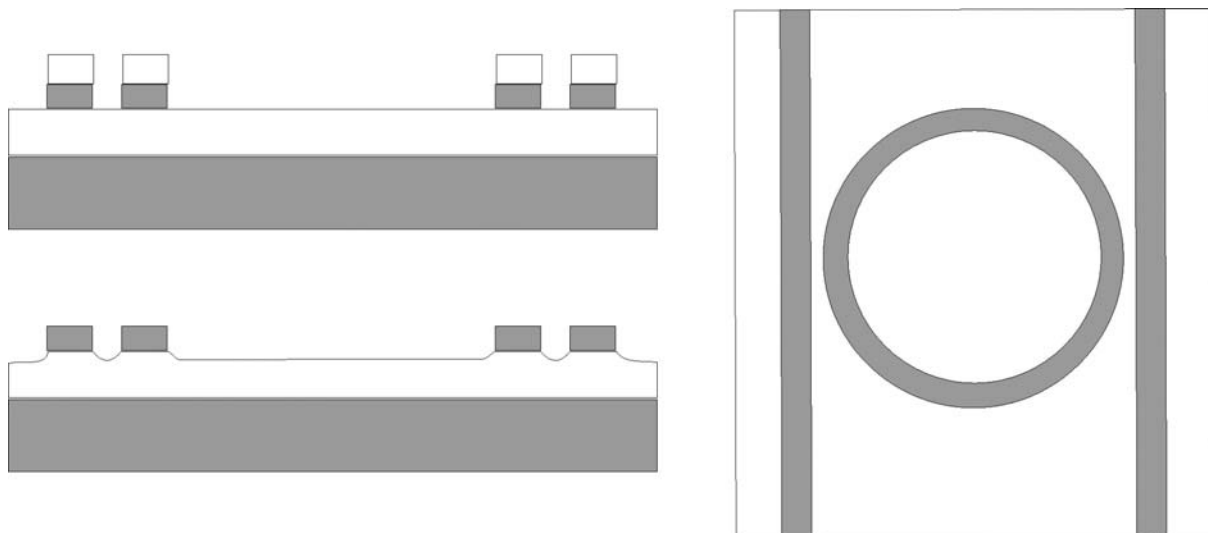


Рис. 4.9.7. Второй этап литографического процесса

Таким образом, мы видим, что изготовление даже простейшего интегрально-оптического устройства является сложным, многоступенчатым, длительным и дорогостоящим технологическим процессом с использованием сложного технологического оборудования и большого количества вспомогательных материалов. Однако, необходимо учитывать, что технологии микроэлектроники и интегральной оптики рассчитаны на одновременное изготовление большого количества устройств. Так, на каждом этапе технологического процесса одновременно может обрабатываться до нескольких десятков подложек, каждая из которых содержит от сотен до тысяч интегральных устройств. Все процессы, включая промежуточный контроль, автоматизированы. Поэтому, несмотря на сложность технологического процесса, себестоимость отдельного устройства оказывается невысокой.

5. Специальные разделы техники и технологии интегральной оптики

Интегрально-оптические устройства, как правило, состоят из большого количества элементов, несущих различную функциональную нагрузку. Основные типы элементов и узлов интегрально-оптических устройств перечислены на рис. 5.1. Пассивные элементы предназначены для передачи и преобразования оптических сигналов без энергетических затрат в виде управляющих сигналов. Для управления активными элементами используются управляющие сигналы, как оптические, так и электрические. В ряде случаев их функционирование обеспечивается с помощью электрического источника питания. Некоторые узлы и элементы интегрально-оптических устройств могут быть изготовлены как в пассивном, так и в активном исполнении. Оптическая связь между элементами в пределах одного чипа обеспечивается с помощью планарных или полосковых волноводов. Связь между разными чипами – с помощью оптических волокон. Чипы могут содержать собственные источники оптических сигналов в виде микролазеров, а также интегрированные фотоприемники для преобразования оптических сигналов в электрические.



Рис.5.1. Составные части интегрально-оптических устройств

Наиболее часто интегрально-оптические устройства используются в спектральном интервале телекоммуникационных длин волн ($\lambda = 0.8 \dots 1.7$ мкм) [18]. К ним предъявляются следующие требования:

- высокое быстродействие;
- малая потребляемая мощность;

- малые габариты;
- устойчивость к внешним воздействиям (температура, давление, влажность, вибрации и т. д.);
- технологичность;

Элементы интегрально-оптических устройств изготавливаются по технологиям, описанным в п. 4. Рассмотрим особенности построения, функционирования и изготовления элементов интегрально-оптических устройств на нескольких примерах.

Устройства на основе фотоннокристаллических волноводов. Простейший полосковый фотоннокристаллический волновод показан на рис. 5.2, а. Он представляет собой полоску из кремния, окруженную с двух сторон периодической структурой в виде отверстий в слое кремния. Такой волновод обладает спектрально-селективными свойствами (рис. 5.2, б). Максимальное пропускание волновода обеспечивается на длине волны 1525 нм. Фотоннокристаллические волноводы, как правило, изготавливаются по технологии SOI с использованием фотолитографии.

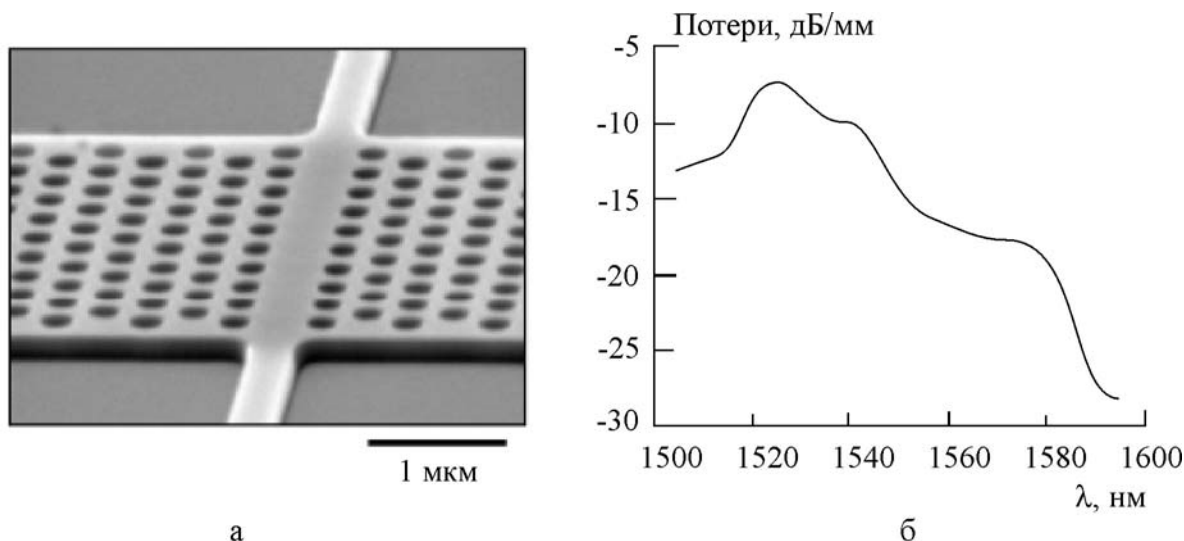


Рис.5.2. Полосковый волновод на основе двумерного фотонного кристалла (а) и его спектральная характеристика (б)

Подобные волноводные структуры могут использоваться в интегрально-оптических устройствах в качестве фильтров и демультиплексоров. Оптические характеристики фотоннокристаллических волноводов чрезвычайно чувствительны к изменению показателя преломления материала, из которого они изготовлены. Это позволяет создавать на их основе быстродействующие и низкопороговые оптические переключатели, в которых оптический или электрический управляющий сигнал изменяет показатель преломления волновода.

На рис. 5.3 показано использование фотоннокристаллических волноводов для построения переключателя оптических сигналов с оптическим управлением.

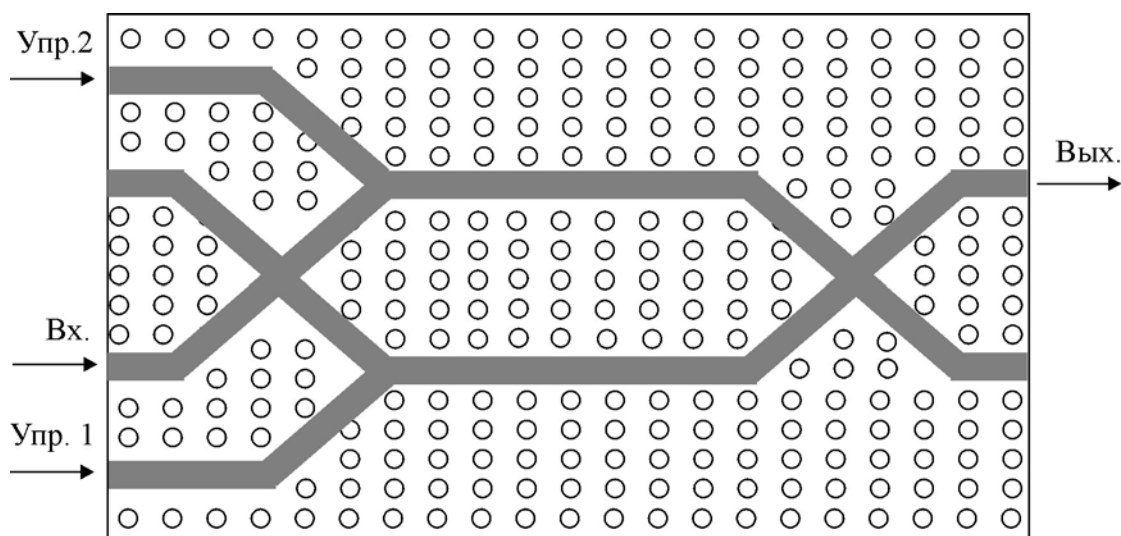


Рис. 5.3. Полностью оптический переключатель на основе фотоннокристаллических волноводов, образующих интерферометр Маха-Цендера

Волноводы в данном устройстве образуют волноводный интерферометр Маха-Цендера. Входной сигнал распределяется по первому и второму плечам интерферометра и на выходе интерферометра вновь объединяется. В зависимости от сдвига фазы сигнала в каждом из плеч интерферометра может происходить либо сложение, либо вычитание амплитуды сигнала на его выходе. Для управления сдвигом фазы сигнала используются управляющие оптические сигналы, которые подаются по волноводам непосредственно в плечи интерферометра. Энергия фотонов управляющих сигналов превышает ширину запрещенной зоны полупроводника, из которого изготовлен интерферометр. Поэтому происходит поглощение фотонов полупроводником, сопровождающееся фотогенерацией свободных электронов. Это приводит к изменению показателя преломления полупроводника и сдвигу фазы оптического сигнала. Фотоннокристаллическая структура переключателя обеспечивает его спектральную селективность и высокую чувствительность к управляющему сигналу. Быстродействие подобных переключателей на основе кремния или арсенида галлия может составлять десятки пикосекунд.

Для управления оптическими сигналами могут быть использованы фотоннокристаллические структуры с дефектами. Дефекты создают в спектре фотонного кристалла узкие линии поглощения, спектральное положение которых сильно зависит от размера дефекта и показателя преломления материала кристалла. Это позволяет уменьшить мощность управляющих сигналов и повысить быстродействие устройства. Дефекты в фотонных кристаллах создаются специально, например, путем увеличения некоторых отверстий, образующих фотонный кристалл. Если размер дефекта превышает длину волны излучения, то такой дефект может быть использован как микрорезонатор в фотонном кристалле.

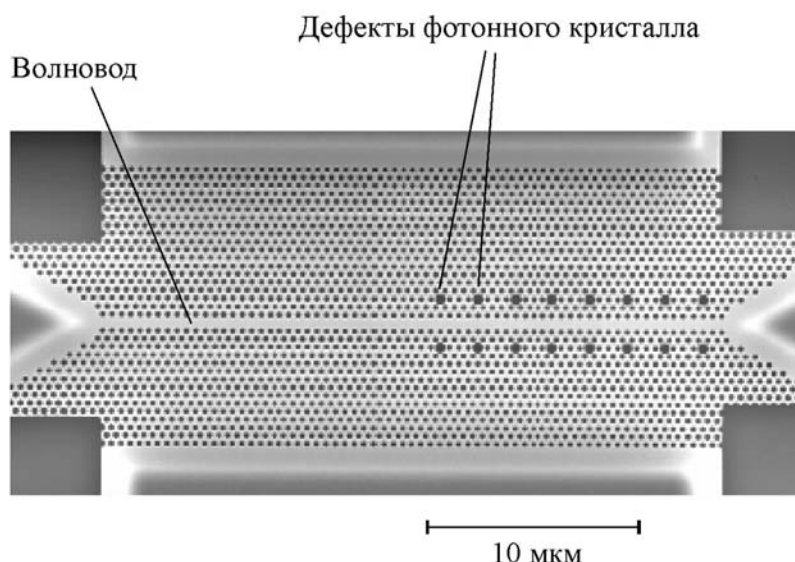


Рис. 5.4. Полностью оптический переключатель на основе фотоннокристаллического волновода с дефектами

Полностью оптический переключатель на основе фотоннокристаллического волновода с дефектами показан на рис. 5.4. Переключатель изготовлен по технологии SOI. Динамика переключения оптического сигнала под действием пикосекундного управляющего сигнала показана на рис. 5.5.

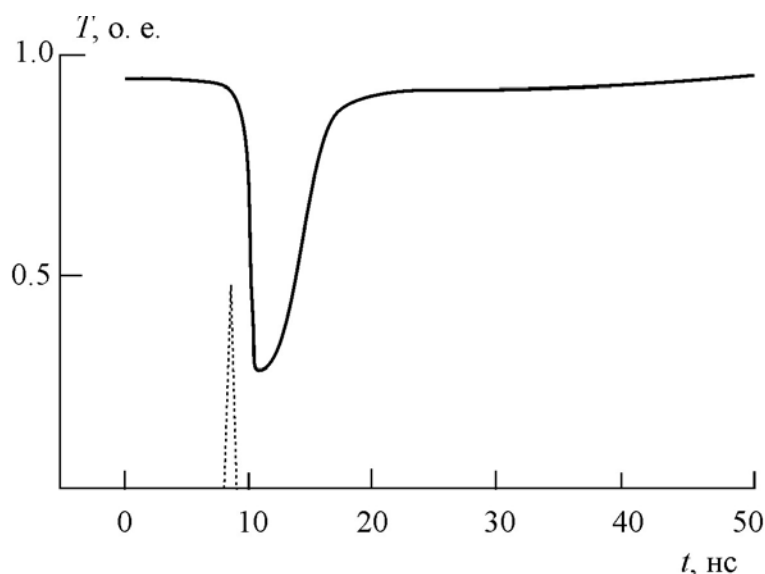


Рис. 5.5. Временная зависимость коэффициента пропускания волновода, показанного на рис. 5.4, при воздействии управляющего оптического сигнала (пунктир)

Фотоннокристаллическая структура может быть создана непосредственно в сердцевине полоскового волновода. В ряде случаев это позволяет упростить технологию изготовления устройства и обеспечить дополнительные функциональные возможности. Пример волноводного переключателя на основе одномерного фотонного кристалла, изготовленного по технологии SOI, показан на рис. 5.6.

Фотоннокристаллическая структура, в данном случае, образована непосредственно в волноводе периодически расположенными отверстиями.

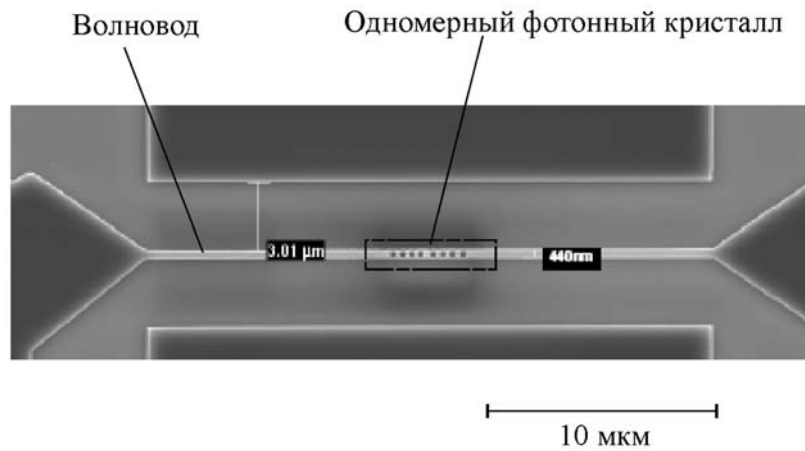


Рис. 5.6. Волноводный переключатель на основе одномерного фотонного кристалла

Управляющий оптический сигнал длительностью 30 пс увеличивает пропускание волновода на длине волны 1545 нм (рис. 5.7). При этом пропускание волновода на длине волны 1550 нм уменьшается. Это позволяет разделять оптические сигналы, имеющие разную длину волны и может быть использовано для демultipлексирования сигналов в WDM волоконных линиях связи.

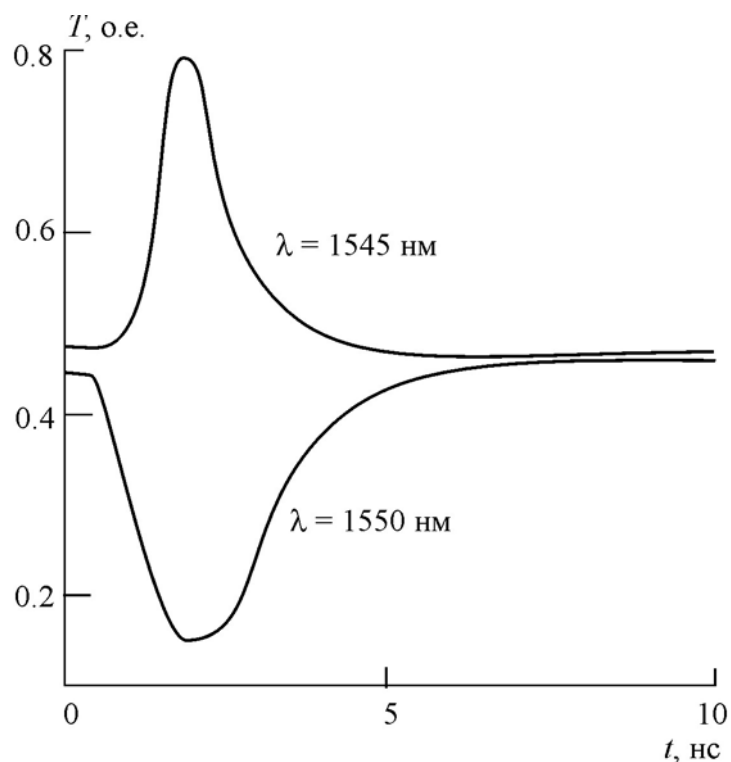


Рис. 5.7. Временная зависимость коэффициента пропускания волновода, показанного на рис. 5.6, при воздействии управляющего оптического сигнала

Устройства на основе микрорезонаторов. Микрорезонаторы применяются в интегрально-оптических устройствах в качестве фильтров, демультимплексоров и оптических переключателей. Примером микрорезонатора является кольцевой волноводный резонатор (рис. 5.8, а, см., также рис. 4.9.1). В такой структуре волноводная мода движется по кругу. Резонансы возникают в том случае, когда на полном расстоянии, которое проходит мода укладывается целое число полуволн. Ввод и вывод сигнала осуществляется с помощью полосковых волноводов, имеющих электромагнитную связь с кольцом. Спектральные характеристики кольцевого резонатора из кремния и технология его изготовления описаны в п. 4.9.

Для повышения эффективности связи волновода с резонатором и уменьшения влияния этой связи на добротность резонатора часто используют волноводы, имеющие поперечный размер, меньший длины волны – фотонные проволоки. В таких волноводах могут распространяться только вытекающие моды, поэтому они обладают большими потерями. Однако, для связи с резонатором используют короткие отрезки фотонных проволок, не более 100...200 мкм и общие потери оказываются незначительными. Для перевода сигнала из обычного полоскового волновода в фотонную проволоку необходимо проводить конвертирование мод. Часто для этого используют рупорный конвертер (рис. 5.8, а), однако он обладает большими габаритами и потерями. Для более эффективного преобразования используют конвертеры более сложной конфигурации и имеющие малые габариты. Оптимизация геометрии таких конвертеров проводится методами численного моделирования. На рис. 5.8, б показан конвертер, обеспечивающий перевод сигнала из полоскового волновода с поперечным размером 10 мкм в фотонную проволоку с поперечным размером 500 нм. Эффективность преобразования сигнала превышает 90 %. Конвертер изготовлен из кремния методами фотолитографии.

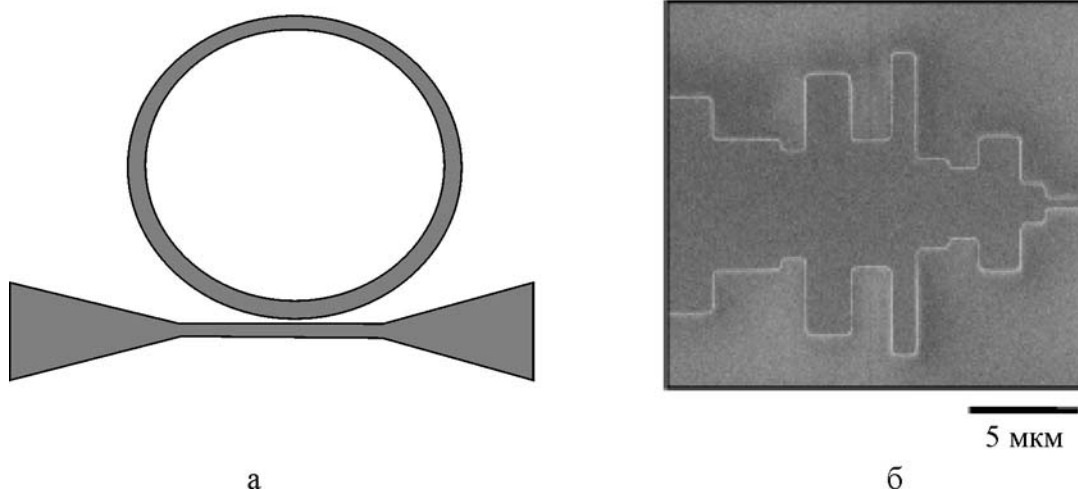


Рис. 5.8. а – кольцевой волноводный микрорезонатор с возбуждением фотонной проволокой; б – конвертер для перевода сигнала из волновода в фотонную проволоку

Среди микрорезонаторов особое место занимают резонаторы с модами шепчущей галереи. Моды шепчущей галереи во многом подобны обычным волноводным модам. Существенным их отличием является то, что они формируются в результате полного внутреннего отражения луча только от одной границы раздела сред, а не от двух или четырех, как в полосковом волноводе. На рис. 5.9 пунктиром показано распространение лучей, соответствующих модам шепчущей галереи, в резонаторах круглой и многоугольной формы. Распространение лучей аналогично распространению звуковых волн в круглой «Шепчущей Галерее» Собора Святого Павла в Лондоне. Отсюда и возникло название таких мод.

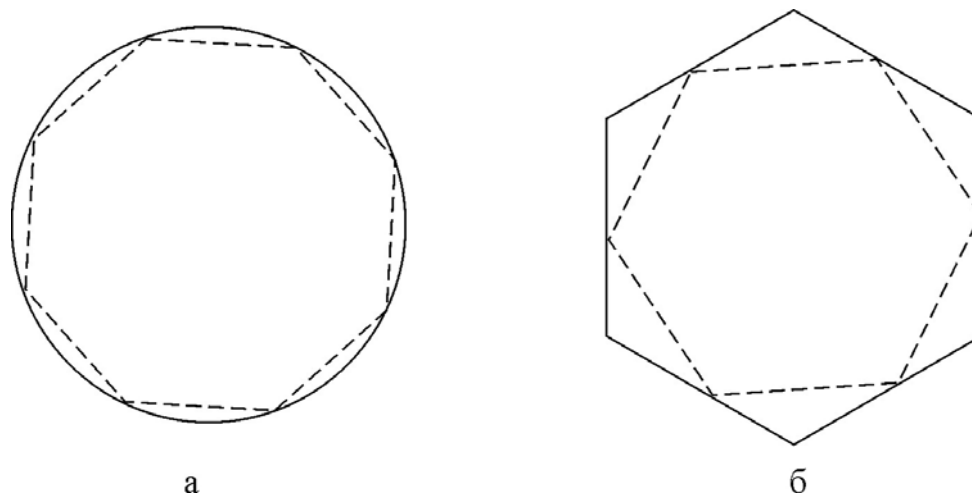


Рис. 5.9. Распространение лучей при возбуждении моды шепчущей галереи в резонаторе круглой формы (а) и имеющего форму многоугольника (б)

Резонаторы шепчущей галереи изготавливают в форме сферы, цилиндра, диска или многоугольника. На рис. 5.10, а показано распределение интенсивности моды с $N = 1$ в дисковом резонаторе, имеющем радиус r_0 . Из рисунка видно, что энергия электромагнитной волны сосредоточена вблизи границы раздела сред. Достоинством резонаторов с модами шепчущей галереи является их чрезвычайно высокая добротность, превышающая на несколько порядков добротность других типов оптических резонаторов. Так сферический микрорезонатор с модами шепчущей галереи теоретически может иметь добротность 10^{11} . Реально в сферических резонаторах достигнута добротность $5 \cdot 10^9$. Добротность цилиндрических и дисковых резонаторов может составлять $10^7 \dots 10^8$. Это позволяет создавать на основе резонаторов с модами шепчущей галереи фильтры с очень узкой спектральной полосой (рис. 5.10, б), а также микролазеры с узким спектром генерации.

Спектральное положение резонанса в резонаторах с модами шепчущей галереи сильно зависит от показателей преломления самого резонатора и окружающей среды. Благодаря этому, на основе таких резонаторов могут быть созданы чрезвычайно чувствительные волноводные датчики и сенсоры.

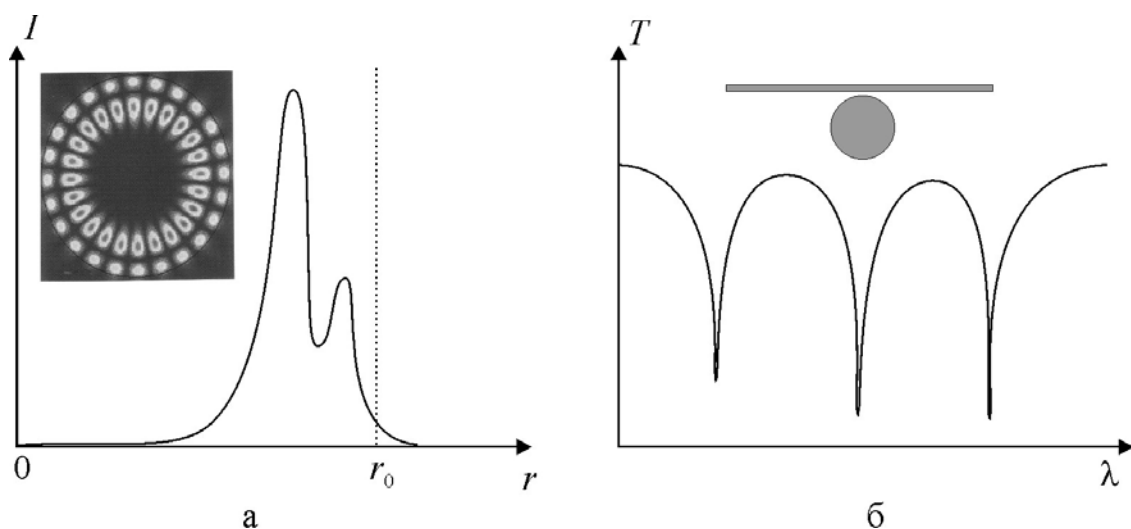


Рис.5.10. а – радиальное распределение интенсивности моды шепчущей галереи с $N = 1$ в дисковом резонаторе с радиусом r_0 ; На вставке – угловое распределение интенсивности;

б – спектр пропускания волновода, имеющего электромагнитную связь с дисковым резонатором

В интегральной оптике используются, в основном, дисковые микрорезонаторы с модами шепчущей галереи, так как они легко могут быть изготовлены методами фотолитографии. Для ввода и вывода сигнала используют электромагнитную связь резонатора с фотонной проволокой (рис. 5.10, б).

Электроуправляемые волноводные модуляторы и коммутаторы используются в интегральной оптике для управления оптическими сигналами и для преобразования электрических сигналов в оптические [1, 6]. Работа таких устройств основана, как правило, на эффекте Поккельса в диэлектрических кристаллах, на эффекте Франца-Келдыша и квантово-размерном эффекте Штарка в полупроводниках. Рассмотрим принцип работы и конструкцию волноводного модулятора на основе электроабсорбционного эффекта Франца-Келдыша [3, 9].

Конструкция модулятора и его характеристики показаны на рис. 5.11. Модулятор представляет собой планарный волновод из полупроводникового материала (GaAs) 1 с двумя продольными электродами 2. Толщина волновода – 1 мкм. При подаче на электроды разности потенциалов 5 В напряженность электрического поля в волноводе достигает 50 кВ/см. Это приводит к уменьшению ширины запрещенной зона GaAs на величину $\Delta E = 25$ мэВ и увеличению коэффициента поглощения для $\lambda = 0.9$ мкм в 100 раз. Эффект Франца-Келдыша не обладает инерционностью, поэтому быстродействие такого модулятора ограничивается только быстродействием управляющей электроники. Максимальная частота переключения модулятора может достигать десятков ГГц. Модулятор может быть использован в качестве интегрально-оптического, а также в качестве быстродействующего управляемого аттенюатора. Модуляторы подобного типа изготавливаются методами фотолитографии.

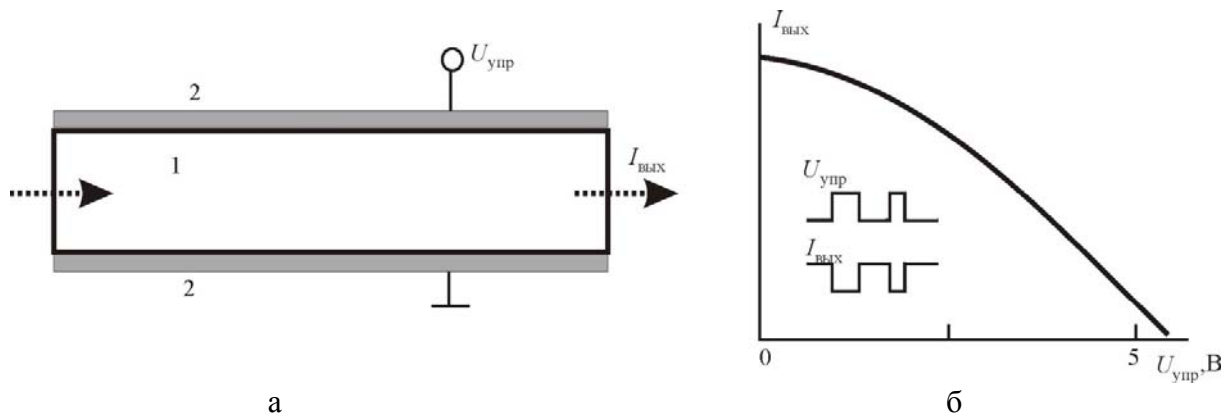


Рис. 5.11. Конструкция волноводного модулятора на основе эффекта Франца-Келдыша и зависимость оптического сигнала на его выходе от управляющего напряжения

Волноводные коммутаторы предназначены для распределения оптических сигналов и потоков информации по различным каналам. На основе коммутаторов также реализуются некоторые типы оптических логических элементов.

На рис.5.12 показана схема интегрально-оптического последовательного коммутатора 1×4 (распределяющего сигнал из одного входного канала в четыре выходных канала). Коммутатор представляет собой направленные ответвители на основе связанных волноводов. Связь между волноводами управляется за счет электрооптического эффекта в среде между волноводами (подложке из электрооптического материала). Такие коммутаторы имеют высокое быстродействие – до сотен МГц и низкий уровень перекрестных помех (взаимное влияние соседних каналов): до -25 дБ.

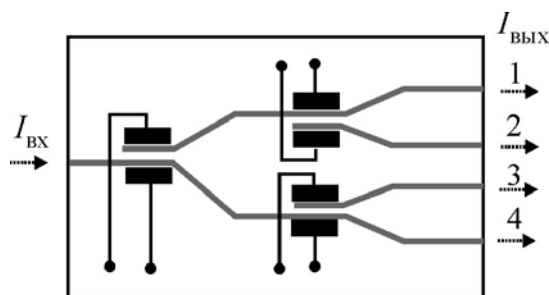


Рис. 5.12. Схема интегрально-оптического последовательного коммутатора 1×4

Интегрально-оптические устройства могут применяться для обработки не только оптических, но и электрических сигналов. Примером такого устройства является *волноводный спектроанализатор на основе акустооптического эффекта*. Спектроанализатор состоит из планарного волновода 2 изготовленного из LiNbO_3 (рис. 5.13), на поверхности которого расположены встречно-штыревые преобразователи 4 электрического сигнала в поверхностную акустическую волну 5. Анализируемый электрический сигнал $U(t)$ подается на встречно-штыревые электроды. Источником оптического излучения является полупроводниковый лазер 1, излучение которого 7 формируется

планарными волноводными линзами 2. Взаимодействие оптического сигнала с акустической волной приводит к дифракции и отклонению оптического сигнала от первоначального направления. Регистрация оптического сигнала производится с помощью линейки фотоприемников 6.

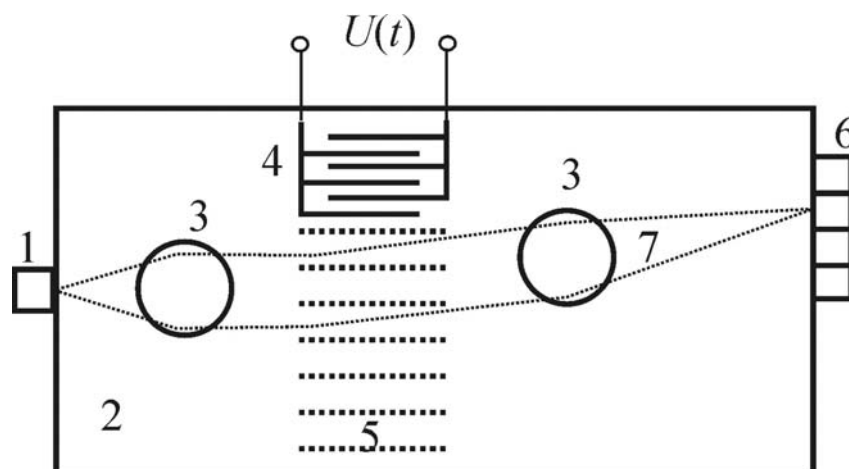


Рис. 5.13. Схема волноводного спектроанализатора на основе акустооптического эффекта

Период колебаний акустической волны определяется частотой электрического сигнала $U(t)$. При изменении частоты сигнала изменяется период дифракционной решетки, индуцированной акустической волной в волноводе. В результате – изменяется угол отклонения оптического пучка. Описанный спектроанализатор позволяет получить разрешение по частоте $\delta f = 4$ МГц в полосе 500 МГц с динамическим диапазоном до 40 дБ.

Микромеханические оптические устройства на основе кремниевых технологий. Механические устройства давно и широко используются для управления оптическими сигналами. Это вращающиеся зеркала и призмы, поворотные зеркала с электромагнитным и с электростатическим приводами, отклоняющие устройства с пьезоэлектрическим приводами и т. п. Однако подобные устройства обычно имеют большие габариты, что не позволяет использовать их в устройствах интегральной оптики. Бурное развитие полупроводниковых технологий, в частности методов фотолитографии и глубокого и анизотропного травления полупроводников, привело к возникновению нового типа оптических переключателей – интегрально-оптических микромеханических устройств [19]. Благодаря идеальным механическим характеристикам монокристаллического кремния такие устройства изготавливаются преимущественно на основе кремниевых технологий.

Принцип действия таких устройств основан на механическом перемещении или повороте оптических микроэлементов под действием внешней силы F . На рис. 5.14 в качестве примера схематично показаны три типа этих устройств. В первом случае перемещение входного волновода позволяет переключать оптический сигнал из верхнего волновода в нижний (рис. 5.14, а). Во втором случае поворот микрзеркала также осуществляет переключение оптического сигнала между двумя

олноводами (рис. 5.14, б). В этих случаях происходит пространственная модуляция излучения, но результатом является амплитудная модуляция.

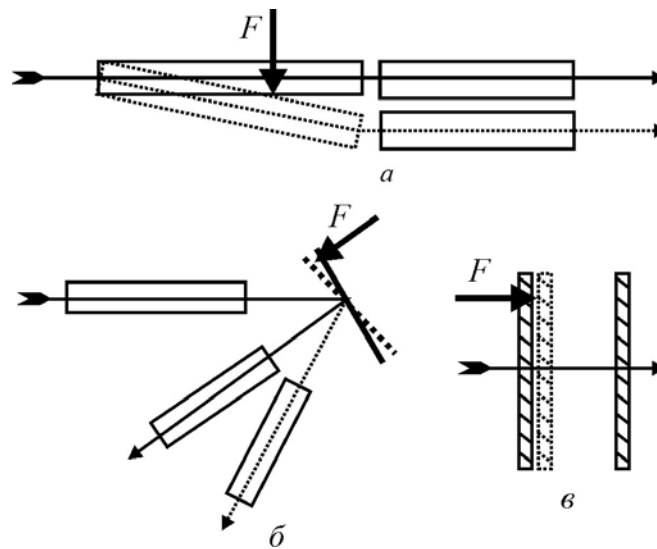


Рис. 5.14. Микромеханические волноводные переключатели. а – со смещением волновода; б – с поворотом микрозеркала; в – со сдвигом микрозеркала

Третий тип переключателя (рис. 5.14, в) представляет собой микроинтерферометр Фабри–Перо, состоящий из двух полупрозрачных зеркал. Перемещение одного из зеркал приводит к спектральному сдвигу полосы пропускания интерферометра, в результате чего происходит амплитудная модуляция излучения. Возврат переключателя в исходное состояние производится либо приложением силы с противоположным знаком, либо за счет упругих элементов. Размеры таких микромеханических переключателей обычно составляют 50...100 мкм. Перемещение управляющих элементов в них происходит на расстояния 0.1...5 мкм.

В качестве воздействующей силы F в таких устройствах обычно используется силы притяжения или отталкивания при приложении разности электрического потенциала U . Возникающее при этом усилие пропорционально напряженности электрического поля E и, следовательно, зависит от расстояния d между электродами:

$$F \sim E = U/d.$$

Для микрометровых зазоров между электродами достаточно приложить разность потенциалов в несколько вольт для перемещения или поворота управляющего элемента. Быстродействие таких устройств определяется резонансными частотами механических колебаний перемещаемых элементов и обычно лежит в интервале 0.5...5 мс. Недостатком микромеханических устройств является их низкое быстродействие. Достоинства – малые габариты, малые мощности управления и хорошая технологическая сочетаемость с интегрально-оптическими схемами.

<i>Таблица 5.1. Механические и оптические свойства монокристаллического кремния</i>	
Параметр	Показатель
Модуль Юнга	130 ... 170 ГПа
Плотность	2.33 г/см ³
Теплопроводность	156 Вт/(м · К)
Теплоемкость	713 Дж/(кг · К)
Показатель преломления ($\lambda = 1.55$ мкм)	3.48
Коэффициент поглощения ($\lambda = 1.55$ мкм)	< 0.01 см ⁻¹

Для изготовления интегральных микромеханических переключателей обычно используется поли- либо монокристаллический кремний. Это объясняется хорошо разработанной технологией изготовления интегральных устройств на основе кремния, а также его прекрасными механическими и оптическими свойствами (см. табл. 5.1).

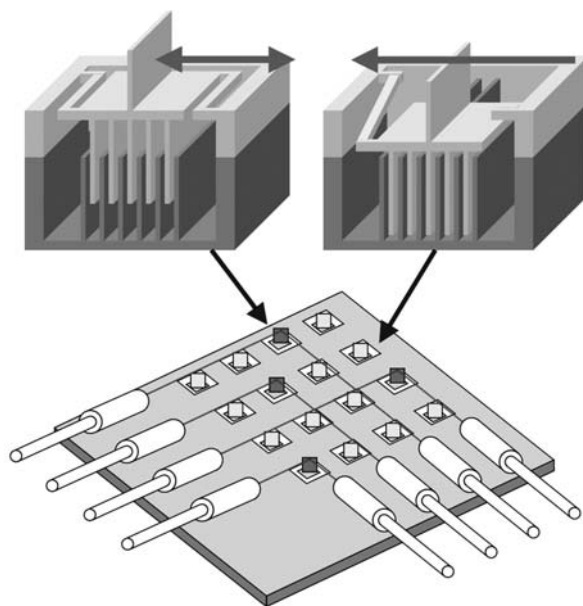


Рис. 5.15. Устройство зеркального микромеханического переключателя и волноводный коммутатор на его основе

На рис. 5.15 показан микромеханический переключатель с перемещаемыми зеркалами [19]. Переключатель состоит из зеркала, расположенного на кремниевой пластине, и двух изолированных гребенок электродов, входящих одна в другую. При отсутствии управляющего напряжения зеркало поддерживается в верхнем состоянии гибкими кремниевыми консолями и перекрывает световой пучок. При подаче управляющего напряжения под действием электростатических сил верхняя гребенка электродов втягивается в нижнюю гребенку, зеркало опускается и пропускает световой пучок. Нижняя часть рисунка иллюстрирует

использование матрицы таких микропереключателей в волноводном оптическом коммутаторе 4×4 .

Другой пример микромеханического волноводного переключателя показан на рис. 5.16 [19]. Принцип действия переключателя основан на смещении торца входного волновода относительно торца выходного волновода. Входной волновод выполнен из тонкого кремниевого стержня и одновременно является кантилевером (перемещаемым кронштейном). Выходной волновод представляет собой оптическое волокно, закрепленное в V-образной канавке в кремниевой подложке. При подаче электрического сигнала на рычаги-электроды кантилевер смещается и передача оптического сигнала в выходной волновод прекращается. При отключении управляющего сигнала кантилевер возвращается в исходное состояние.

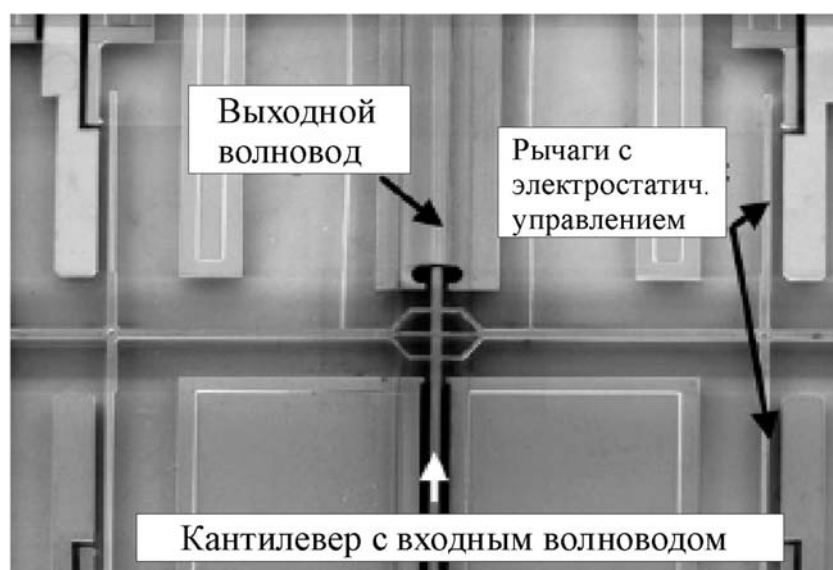


Рис. 5.16. Микромеханический волноводный переключатель на основе сдвига волновода

Для ввода и вывода оптических сигналов в интегрально-оптических устройствах часто используют оптические волокна. Точное совмещение большого количества волокон с входными или выходными элементами интегрально-оптического устройства представляет собой сложную технологическую задачу. Разработка технологий глубокого анизотропного травления кремния позволила решить эту задачу и создать микромеханические устройства для точного крепления волокон. Для этого в кремниевой пластине, на которой расположен интегрально-оптический чип, методами анизотропного травления вытравливают ряд V-образных либо ромбовидных канавок, в которые укладывают волокна (рис. 5.17). Высокая точность изготовления позволяет избежать потерь, связанных с несовпадением входных и выходных апертур.

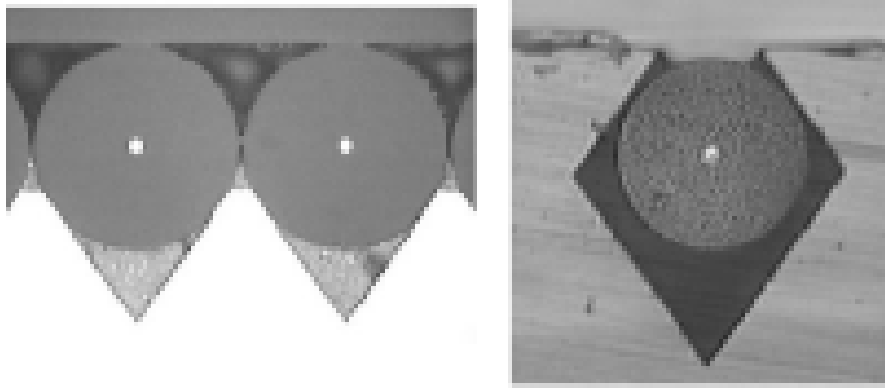


Рис. 5.17. Канавки для крепления оптических волокон в кремниевой пластине, изготовленные методом анизотропного травления кремния

На рис. 5.18 показан вариант такого устройства с выводом излучения из волокна через его оболочку в матрицу фотоприемников. Устройство изготовлено из кремния методом фотолитографии с анизотропным травлением.

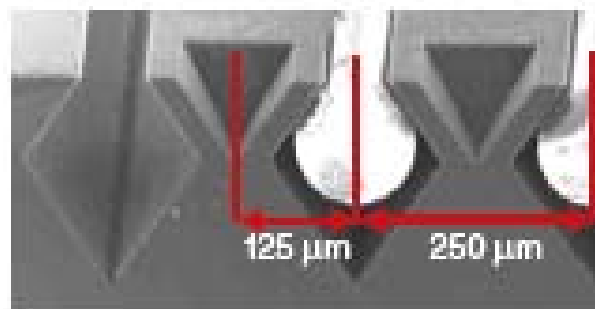


Рис. 5.18. Канавки для крепления оптических волокон в кремниевой пластине с выводом оптического сигнала из волокна в матрицу фотоприемников (фотоприемники на рисунке не показаны)

Волокна укладывают в ромбовидные канавки. При этом происходит механическое сжатие полимерной оболочки волокна в области V-образных углублений. Сжатие оболочки приводит к увеличению ее показателя преломления. В результате этого происходит нарушение полного внутреннего отражения между сердцевиной и оболочкой волокна и часть оптического сигнала переходит из волокна сквозь оболочку и тонкий слой кремния в V-образную полость. В этих полостях методами интегральных технологий изготавливают фотоприемники (на рисунке не показаны), которые регистрируют оптический сигнал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бурное развитие волоконной и интегральной оптики вызвано высокой практической эффективностью волоконно-оптических и интегрально-оптических устройств. Потребности современной техники передачи и обработки информации оптическими методами привели к разработке и созданию быстродействующих интегрально-оптических устройств различного назначения. Постоянно создаются все новые типы оптических волноводов и волноводных устройств, позволяющих повысить информационную емкость волоконных линий связи и быстродействие обработки информации в системах телекоммуникаций. Для изготовления интегрально-оптических устройств используются стекла, полупроводниковые и диэлектрические монокристаллические материалы, а также оптические композиты. Промышленное производство таких устройств основано на традиционных технологиях микроэлектроники. В то же время, оптический характер сигналов, используемый в интегрально-оптических устройствах потребовал разработки новых материалов и создания новых технологических методов и приемов, которые уже успешно применяются в промышленности.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

К п. 1

1. Какие типы оптических волноводов используются в интегрально-оптических устройствах?
2. По каким параметрам классифицируются оптические волноводы?

К п. 2

1. Какие законы оптики приводят к волноводному распространению электромагнитных волн?
2. Каковы свойства гофрированных волноводов?
3. Какими оптическими эффектами определяются свойства фотоннокристаллических волноводов?
4. Какой тип электромагнитных волн может распространяться в плазмонных волноводах?

К п. 3

1. Какие требования предъявляются к материалам интегральной оптики?
2. Перечислите виды материалов, используемых в интегральной оптике.

К п. 4

1. Какие технологии используются для изготовления устройств интегральной оптики?
2. Какие технологии используются для нанесения пленок?
3. Какими методами изготавливают погруженные волноводы?
4. В чем преимущества рентгеновской литографии перед ультрафиолетовой фотолитографией?

К п. 5

1. Какие устройства интегральной оптики могут быть реализованы с помощью фотоннокристаллических волноводов?
2. Какие устройства интегральной оптики могут быть реализованы с помощью микрорезонаторов?
3. В чем отличие мод шепчущей галереи от волноводных мод?
4. Какие микромеханические устройства для интегральной оптики могут быть изготовлены методами фотолитографии?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Интегральная оптика. Под ред. Т.Тамира. М.: Мир, 1978. - 344 с.
2. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи // М.:Техносфера, 2004. - 496 с.
3. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника // М.:Техносфера, 2004. - 592 с.
4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики // М.: Наука, 1973. - 719 с.
5. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов // М.:Мир, 1984. - 512 с.
6. Семенов А.С., Смирнов В.Л., Шмалько А.В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации // М.:Радио и связь, 1990. - 225 с.
7. Ярив А. Введение в оптическую электронику // М.: Высшая школа, 1983. - 398 с.
8. Zayats A.V., Smolyaninov I.I., Maradudin A.A. Nano-optics of surface plasmon polaritons // Physics Reports, 2005, Vol. 408, pp.131-314.
9. Ермаков О. Прикладная оптоэлектроника // М.:Техносфера, 2004. - 416 с.
10. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств. Справочник // М.: Радио и связь, 1991. - 528 с.
11. Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия // Л.: Машиностроение, 1973. - 224 с.
12. Безбородов М.А. Синтез и строение силикатных стекол // Минск: Наука, 1968. - 448 с.
13. ГОСТ 3514-76. Стекло оптическое бесцветное // М.: Изд. Стандартов, 1977. - 28 с.
14. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В. Оптические постоянные природных и технических сред. Справочник // Л.: Химия, 1984. – 216 с.
15. Бубис И.Я., Вейденбах В.А., Духопел И.И. и др. Справочник технолога-оптика // Л.: Машиностроение, 1983. - 414 с.
16. Никоноров Н.В., Петровский Г.Т. Стекла для ионного обмена в интегральной оптике: современное состояние и тенденции дальнейшего развития (обзор). // Физ. и хим. стекла, 1999, Т. 25, № 1, с.21-69.
17. J. Qiu, K. Miura, K. Hirao Femtosecond laser-induced microfeatures in glasses and their applications // J. Non-cryst. Sol., 2008, Vol. 345, pp.1100-1111.
18. Wada O. Femtosecond all-optical devices for ultrafast communication and signal processing // New Journal of Physics., 2004, Vol. 6., pp.183. 2004.
19. Hoffmann M., Voges E. Bulk silicon micromachining for MEMS in optical communication systems // J. Micromach. Microeng., 2002, Vol. 12., p.349.

В 2007 году

СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

КАФЕДРА ОПТОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И МАТЕРИАЛОВ

- 1994 г.** Организована базовая кафедра СПбГУ ИТМО при Государственном оптическом институте (ГОИ) им. С.И.Вавилова – кафедра оптического материаловедения. Образование кафедры явилось логичным развитием тесных связей, которые в течение многих лет существовали между ГОИ и ИТМО. В частности, для преподавания в ИТМО широко привлекались ведущие сотрудники ГОИ, а ИТМО был постоянным источником, из которого ГОИ черпал новые молодые кадры. Кафедра начала подготовку специалистов по образовательному направлению «Оптотехника», специальность «Оптические технологии и материалы».
- 1999 г.** Реорганизация кафедры. На кафедре созданы три направления: оптическое материаловедение, информационная оптотехника, физическая оптика и спектроскопия. Кафедра переименована в кафедру оптического материаловедения и оптики (ОМиО).
- 2002 г.** Кафедра ОМиО вошла в состав нового факультета СПбГУ ИТМО - фотоники и оптоинформатики.
- 2003 г.** При кафедре создана учебно-исследовательская лаборатория материалов и технологий фотоники.
- 2004 г.** Кафедра явилась одним из инициаторов и организаторов создания нового образовательного направления подготовки бакалавров и магистров – «Фотоника и оптоинформатика». Кафедра начала подготовку бакалавров и магистров по направлению - 200600 «Фотоника и оптоинформатика».
- 2005 г.** Кафедра ОМиО переименована в кафедру оптоинформационных технологий и материалов (ОТиМ).

2006 г. Кафедра ОТиМ – лидер в России по подготовке специалистов по оптическому материаловедению в области фотоники и оптоинформатики. Кафедра ведет совместные научные исследования с зарубежными компаниями Corning, Samsung, PPG Inc.

2007 г. Первый выпуск бакалавров по направлению «Фотоника и оптоинформатика». Кафедра ОТиМ - участник выполнения инновационной образовательной программы в СПбГУ ИТМО «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий», реализуемой в рамках Приоритетных Национальных Проектов «Образование».

Александр Иванович Сидоров
Николай Валентинович Никоноров

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОПТИКИ

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Компьютерная верстка
Заведующая РИО

А.И. Сидоров
Н.Ф. Гусарова

Редакционно-издательский отдел СПб ГУИТМО
Лицензия ИД №00408 от 05.11.99. Отпечатано на ризографе. Тираж 100 экз.
Заказ №.
Подписано в печать

Редакционно-издательский отдел
Санкт-Петербургского государственного
университета информационных
технологий, механики и оптики
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ