

Основные теоретические положения по теме «Физические основы нанотехнологий фотоники и оптоинформатики»

Документ содержит следующие разделы:

1. Нанопотоника.....	1
2. Оптоинформатика	28
3. Квантовые технологии	40

1. Нанопотоника

Рассматриваются физические основы наноматериалов и нанотехнологий в фотонике и оптоинформатике.

Фотоника — это наука и техника, связанная с использованием светового излучения в оптических элементах и системах, где генерируются, усиливаются и детектируются оптические сигналы.

Задачи фотоники включают:

- миниатюризацию и интеграцию оптических устройств на чипах;
- сверхбыстродействие (управление сигналом за 1 фемтосекунду);
- сверхскоростную передачу информации (1 Тбит/с);
- низкий уровень управляющих сигналов (1-5 фемтоДж);
- полифункциональность оптических материалов.

Нанооптика изучает взаимодействие излучения с наноразмерными объектами.

Нанопотоника — это раздел нанооптики, исследующий нанополь с малым числом фотонов и поведение света на нанометровой шкале. Она изучает физические явления, возникающие при взаимодействии фотонов с нанообъектами (1-100 нм), и разрабатывает наноструктурированные

устройства для генерации, усиления, модуляции и детектирования электромагнитного излучения.

Цель нанофотоники — создание новых материалов с уникальными оптическими свойствами, что может стать альтернативой электронике, обеспечивая высокое быстродействие и устойчивость к помехам. Нанопотонные устройства, размеры которых 100 нм и менее, решают задачи миниатюризации и превосходят электронные аналоги в плане тепловыделения и электропитания, но имеют проблемы с надежностью электрооптических переключателей.

Нанопотонные устройства часто интегрируются в электронные чипы, используя стандартные полупроводниковые материалы, что способствует развитию технологий на основе сочетания электронных и фотонных компонентов.

Направления нанофотоники включают исследование генерации и поглощения излучения в гетероструктурах с квантовыми слоями, нитями и точками.

Нанопотоника изучает распространение, преобразование, испускание и поглощение оптического излучения в наноструктурах, используя взаимодействие излучения с веществом для создания функциональных устройств. Она объединяет области оптики, лазерной физики, квантовой электроники и материаловедения.

Основной задачей нанофотоники является разработка наноматериалов с новыми оптическими, электрооптическими и оптоэлектронными свойствами для создания фотонных устройств нового поколения.

Важные средства исследования в нанофотонике: ближнепольная сканирующая оптическая микроскопия, сканирующая туннельная микроскопия с возбуждающими фотонами (PASTM) и плазмонная оптика поверхности.

Другие разделы фотоники:

— Компьютерная фотоника: сочетает физическую и квантовую оптику, математику и компьютерные технологии.

— Микроволновая фотоника: изучает взаимодействие оптических и высокочастотных (больше 1 ГГц) электрических сигналов, включая основы оптико-микроволнового взаимодействия и фотонный контроль СВЧ-устройств.

— Радиофотоника: объединяет микроволновую и нанофотонику, основные направления включают управление фазированными антенными решетками, обработку радиосигналов оптическими методами и радиотехнические системы с использованием микроантенн и метаматериалов для приема сигналов ТГц и инфракрасных частот.

Оптоинформатика — это область науки и техники, исследующая создание и использование материалов и технологий для передачи, обработки, хранения и отображения информации на основе оптики.

Оптоэлектроника — область физики и техники, преобразующая электрические и оптические сигналы. Она делится на когерентную оптоэлектронику (оптическая связь, обработка информации, голография) и оптронику (замена электрических связей оптическими). Основные элементы включают источники излучения, фотоприемники, модуляторы, волоконные световоды и устройства для обработки информации. Таким образом базовые элементы оптоэлектроники совпадают с устройствами фотоники и оптоинформатики.

Основными элементами оптической электроники, фотоники и оптоинформатики являются источники излучения когерентные и некогерентные, фотоприемники, модуляторы, дефлекторы, волоконные световоды, и согласующие элементы, мультиплексоры, и демультиплексоры, пространственно-временные модуляторы света (управляемые транспаранты), используемые для двумерного динамического отображения и обработки информации.

Нанотехнологии в фотонике - создание наноструктур в диэлектриках и полупроводниках с использованием молекулярно-пучковой эпитаксии и электронно-лучевой литографии.

В XX веке происходил синтез новых материалов с уникальными свойствами, а в XXI веке акцент смещается на создание материалов с заданными свойствами, контролируемые их структурой. В нанотехнологии процесс контроля структуры важнее, чем сам синтез. Например, размер и форма наночастиц влияют на цветовой спектр излучения.

Создание устройств с наноструктурами включает программируемую сборку, где производство и обработка являются ключевыми этапами. Фотонные кристаллы могут образовываться методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии.

Понимание влияния размеров и форм наноматериалов на их функции требует анализа на наноуровне. Разработка методов точного атомного анализа наноструктуры, включая химическое соединение атомов и наличие дефектов, критически важна для понимания наноэффектов. Современные методы исследования основаны на физических явлениях атомной и ядерной физики.

Фотонный кристалл - структура с периодически изменяющейся диэлектрической проницаемостью либо неоднородностью, период которой сравним с длиной волны света. Состоит из диэлектрических решеток, создающих энергетические щели для электромагнитных волн, которые могут полностью отражать свет или микроволны. В таких кристаллах, полученных по полупроводниковой технологии, можно формировать идеальные фотонные щели. На рисунке 1 показано образование энергетической щели в фотонном кристалле.

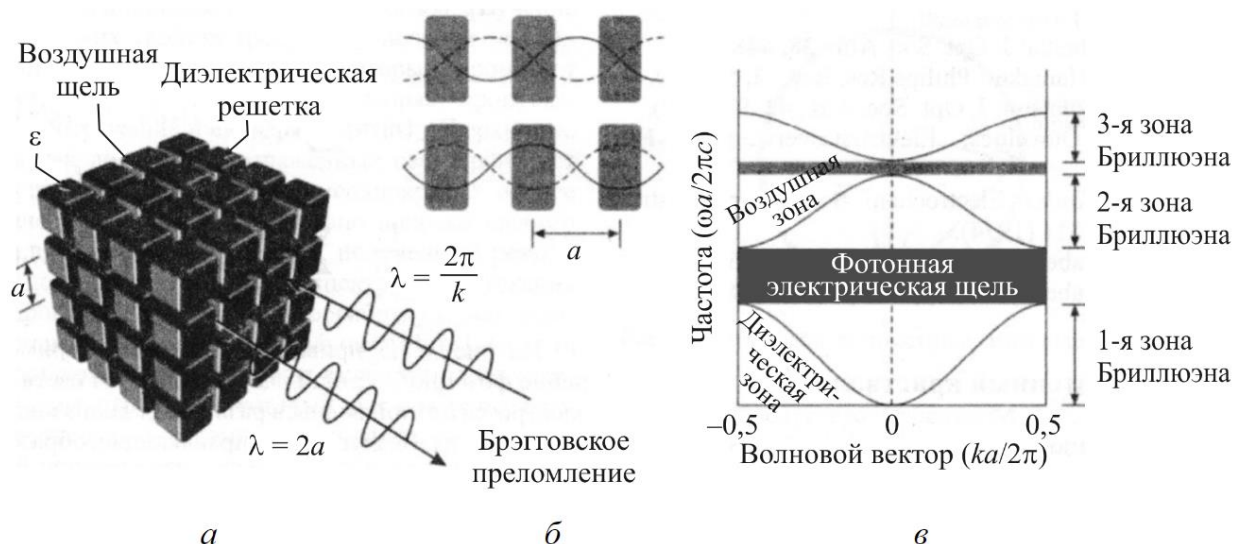


Рисунок 1 – Схема образования энергетической щели в фотонном кристалле.

а) Брегговское преломление электромагнитной. б) Стоячие волны.

с) Диаграмма зависимости частоты от волнового вектора.

Примеры структур включают:

- Поленица (GaAs и InP) для фотонной щели;
- Штырей из AlGaAs, полученных электронно-лучевой литографией;
- Слоистая структура из Si и SiO₂, создающая эффект суперпризмы;
- Воздушные сферы в матрице TiO₂, Si, Ge, CdS.

Фотонные кристаллы могут контролировать распространение излучения, изменяя ширину щели путем изменения структуры и диэлектрической постоянной. Уравнения Максвелла описывают взаимодействие электромагнитных волн с фотонным кристаллом, отражающим свет из запрещенной зоны.

Уравнения Максвелла для электромагнитного поля в СГС-системе – (1).

$$\begin{aligned} \nabla \vec{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, & \nabla \cdot \vec{E} &= 0 \\ \nabla \vec{B} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, & \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Применения фотонных кристаллов включают:

- Направленные антенны и фильтры для радаров и беспроводных систем;
- Резонаторы для терагерцевых волн, использующихся в датчиках для выявления взрывчатых веществ, наркотиков и т.д.

На рисунке 2 приведены возможное применение фотонного кристалла для контроля света и электромагнитных волн в различных диапазонах длин волн.

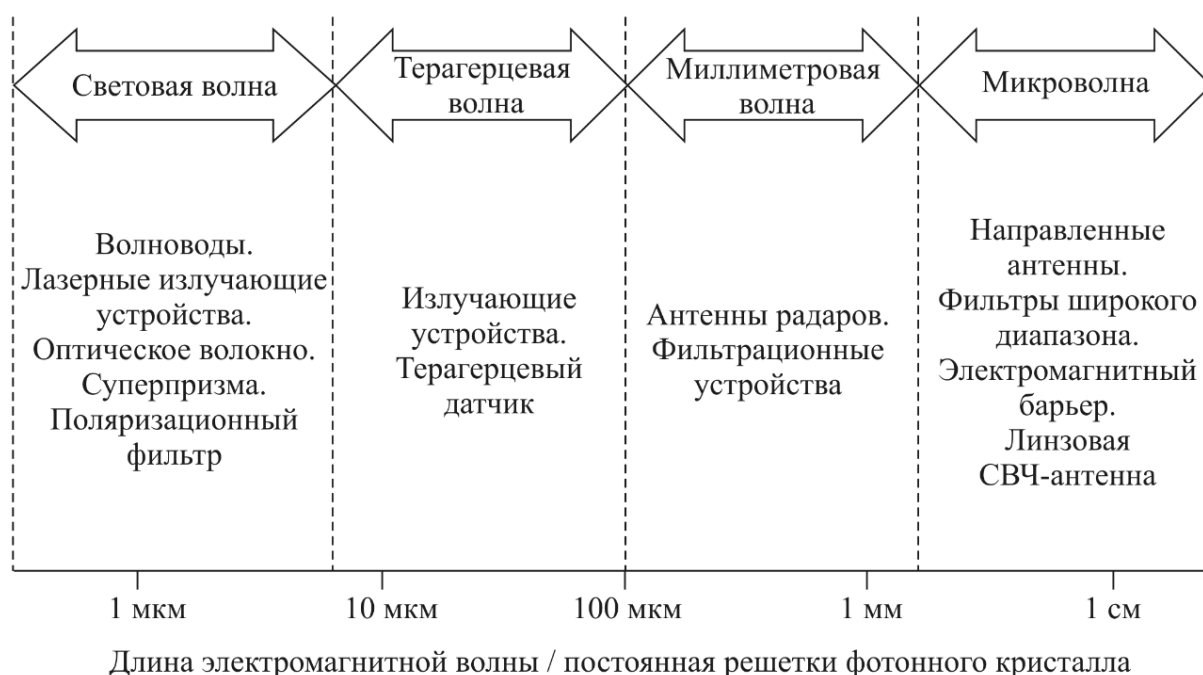


Рисунок 2 – Ожидаемые сферы применения фотонного кристалла при различных значениях частоты электромагнитных волн.

Фотонные фракталы — сложные геометрические фигуры, обладающие свойствами самоподобия. Например, в одномерном случае Канторова множество получается путем удаления центральной трети отрезка, имея фрактальную размерность $D = 0,631$. В двумерном случае образуется ковер Серпинского путем удаления центрального квадрата, имея размерность $D = 1,89$. Губка Менгера — кубический фрактал, получаемый путем удаления кубиков из центра куба и его граней, с размерностью $D = 2,73$. Японские исследователи в 2003 году создали кубические фракталы из диэлектрических материалов для исследования электромагнитных волн.

Фотонные фракталы — кубические фракталы с локализацией электромагнитных волн. Их разработка осуществляется с использованием программы 3D-CAD для создания фрактальных структур. Изготовленные структуры конвертируются в формат STL и формируются с помощью стереолитографической машины.

Примером является губка Менгера, изготовленная из композитного материала с увеличенной диэлектрической постоянной до 8,8. При облучении на частоте 13,5 ГГц наблюдается затухание ниже 1/1000, что свидетельствует о локализации волн. Спектры пропускания и отражения показывают особенности локализации энергии. Фотонные фракталы могут использоваться в связи, как фильтры и антенны, благодаря способности удерживать электромагнитные волны. На рисунке 3 показана губка Менгера 4 уровня изготовленная из композитного материала состава 10 объемных % TiO_2 — SiO_2 эпоксидная смола. Диэлектрическая постоянная была увеличена до 8,8 по сравнению 2,8 для чистой смолы.

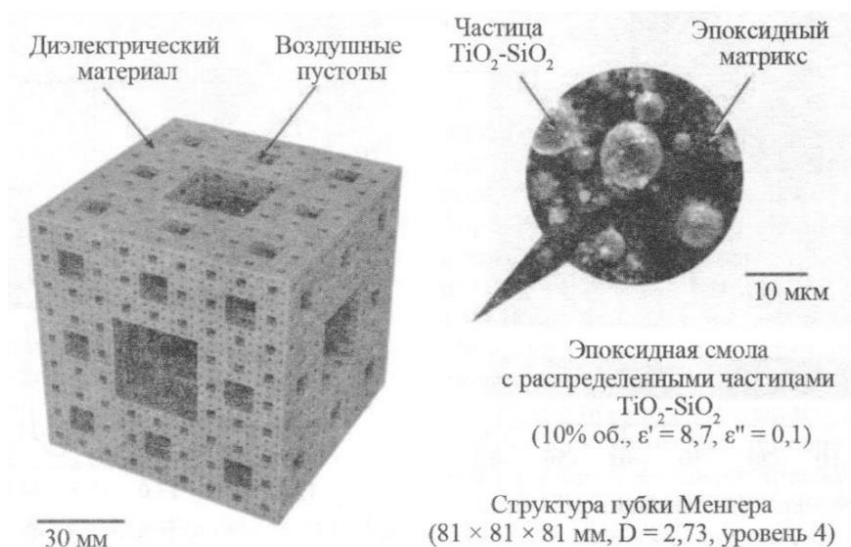


Рисунок 3 — Губка Менгера 4 уровня с размерностью $D = 2,73$

Длина волны в режиме локализации для диэлектрической губки Менгера определяется по эмпирической формуле (2).

$$\lambda = \frac{2^l a \sqrt{\epsilon_{eff}}}{3^{2l-1}} \quad (2)$$

Где λ — длина волны для режима локализации в воздухе; a — длина стороны куба губки Менгера; I — порядковый номер для режимов локализации. ϵ_{eff} — усредненная по объему эффективная диэлектрическая постоянная губки Менгера.

Прейдем к рассмотрению основных элементов фотоники и оптоинформатики.

Источники излучения

Свет излучается полупроводником в результате электронно-дырочной рекомбинации. Инжекционная электролюминесценция возникает в р-n-переходе при подключении к источнику постоянного электрического поля. Светоизлучающий диод (СИД) содержит р-n-переход из прямозонного полупроводника и излучает свет при превышении определенного напряжения, что приводит к инверсии заселенности. Это превращает его в лазерный диод (ЛД) при положительной обратной связи. СИД и ЛД являются эффективными электронно-оптическими преобразователями.

Современные СИД используют трех- и четырехкомпонентные соединения III-V групп, такие как InGaAsP, AlInGaP и AlInGaN, что позволяет генерировать свет всех цветов. Важные материалы включают GaAs, GaAsP и GaN, которые обладают различными длинами волн и излучают свет в видимом и инфракрасном диапазонах. Нитрид галлия (GaN) является ключевым прямозонным полупроводником, который активно исследуется и применяется в устройствах.

Для получения белого света СИД из III-нитридов (ближний УФ и синий диапазон) освещаются фосфорами, которые фотолуминесцируют. Полупроводниковый кристалл InGaN (460-470 нм, синий) покрывается люминофором YAG, который излучает желтый цвет, создавая белый свет. Также возможно смешивание света красного, зеленого и синего светодиодов для формирования белого цвета. СИД белого света имеют высокий КПД (30 лм/Вт), долговечность и компактность, что позволяет им вытеснять лампы

накаливания (15 лм/Вт). Они также служат источниками для волоконно-оптических лазеров и систем передачи информации.

Квантово-размерные лазеры и лазеры с микрорезонаторами.

В квантоворазмерных лазерах носители заключены в областях меньших 50 нм (длина волны де Бройля). Дефект в двумерном фотонном кристалле создает резонатор для удержания света. Конфигурации носителей включают квантовую яму, квантовую проволоку и квантовую точку, что обеспечивает квантовое ограничение движения. С уменьшением размерности увеличивается спектральный контур коэффициента усиления, что снижает пороговый ток и повышает внешний дифференциальный квантовый выход. Однако уменьшается объем зоны взаимодействия, что приводит к снижению выходной мощности лазеров на квантовых точках и проволоках.

Лазеры на квантовых ямах

Лазер на квантовых ямах имеет лучшие характеристики, чем лазер с двойной гетероструктурой, благодаря малой толщине квантовой ямы (<10 нм против 100 нм). Преимущества лазера с квантовыми ямами включают:

- Меньший пороговый ток;
- Большой коэффициент преобразования мощности в свет;
- Меньшая ширина лазерных мод;
- Быстрое время отклика;
- Меньшая зависимость от температуры.

Лазер на квантовых проволоках, состоящий из 5 проволок InGaAsP (23 нм) с интервалом 89 нм, работает при 1550 нм с пороговым током 140 мА и коэффициентом преобразования 2%, но уступает лазеру на квантовых ямах.

Лазеры на квантовых точках

Метод самоорганизации квантовых точек основан на выращивании InAs на подложке из GaAs с большей шириной запрещенной зоны. Квантовые точки, размеры которых составляют 1-10 нм, удерживаются в активной области за счет оболочки из полупроводника с большей запрещенной зоной. Энергетические уровни квантовых точек дискретные и зависят от их размера.

Лазеры на квантовых точках имеют структуру pin -диода, состоящую из слоев GaAs с квантовыми точками InAs между p и n AlGaAs. При подаче смещения электроны и дырки инжектируются в слой GaAs, где происходит рекомбинация и излучение. Для увеличения плотности квантовых точек используют несколько зародышевых слоев. Примером использования нанокластеров являются светоизлучающие ячейки на основе CdSe, где нанокластеры в полимере подвержены электролюминесценции, длина волны которой зависит от размера кластера.

Полупроводниковые вертикально излучающие лазеры (VCSEL)

Наиболее распространены поверхностноизлучающие лазеры с вертикальным резонатором (VCSEL), излучающие свет перпендикулярно активному слою. Они используют упорядоченные наноструктуры из квантовых ям или точек InGaAs в матрице GaAs. Лазер включает активную зону, среду для инжекции носителей и брэгговские рефлекторы как зеркала. Резонатор образуется решетками Брэгга с большим коэффициентом отражения, что позволяет свету многократно проходить через активный слой. Ключевым элементом является диэлектрическая пленка AlO, локализующая инжекцию носителей. При комнатной температуре максимальная эффективность достигает 16%, минимальный пороговый ток — 68 мкА. VCSEL используются в оптоволоконных системах для передачи информации и работают в диапазонах 850 нм, 980 нм и дальнего ИК (1,2 - 1,5 мкм).

Фотонно-кристаллические лазеры с микрорезонаторами

Лазеры с микрорезонаторами ограничивают свободу фотонов пространственной областью порядка 1 мкм и включают конструкции вроде микростолбиков и микродисков. Большинство из них используют квантово-размерные структуры и состоят из дефектов в двумерных фотонных кристаллах, удерживающих свет. Эти лазеры могут перестраивать длину волны и пространственное распределение моды и допускают высокие скорости модуляции. Пример: одномодовый фотонно-кристаллический лазер на 6 квантовых ямах InGaAsP, работающий при 1520 нм с пороговым током

260 мкА и выходной мощностью 2 нВт. Высокая добротность (~ 2500) позволяет усиливать спонтанное излучение за счет эффекта Перселла, что увеличивает мощность лазера. Использование матриц связанных микрорезонаторов также позволяет поднять уровень мощности.

Случайные лазеры (порошковые, плазеры) используют обратную связь через многократное рассеяние в неупорядоченной активной среде, что обеспечивает случайное блуждание фотонов и некогерентную обратную связь. Они отличаются отсутствием направленности и пространственной когерентности, генерируют излучение от инфракрасного до ультрафиолетового диапазона. Примером является случайный микролазер на основе нанокристаллитов ZnO, который использует рассеяние для обратной связи и не требует идеальной формы поверхности. Обратная связь через рассеяние также важна в лазерной генерации молекулярными облаками в космосе и может заменить зеркальную обратную связь в рентгеновском диапазоне.

Фотоприемники

Большинство фотоприемников работает на основе внутреннего фотоэффекта, где под воздействием света генерируются подвижные носители заряда (электроны и дырки). Полупроводниковый фотодиод с p-n переходом увеличивает обратный ток при поглощении фотонов. Существует три режима работы фотодиода: холостой ход, короткозамкнутый и обратнопроводящий. В режиме холостого хода создается фотоЭДС, используемая в солнечных фотоэлементах. p-i-n-фотодиод включает слой собственного полупроводника, расширяющий обедненный слой и увеличивающий объем сбора света, что повышает эффективность. Фотодиоды не обладают усилением.

Гетероструктурные фотодиоды состоят из двух полупроводников с разной шириной запрещенной зоны. Например:

— AlGaAs/GaAs для длин волн 0,7-0,87 мкм.

— AlGaAs/InP для ИК-диапазона 1300-1600 нм (типичный p-i-n-фотодиод на 1550 нм имеет квантовую эффективность 0,75 и токовую чувствительность 0,9 А/Вт).

— InGaAs/InP также для диапазона 1300-1600 нм (сравнимые показатели с предыдущим).

В оптических системах связи используются два типа фотоприемников: p-i-n-фотодиоды и лавинные фотодиоды (ЛФД). В диапазоне 870 нм применяются кремниевые фотодиоды и ЛФД, при этом кремниевые ЛФД имеют преимущество в 10-15 дБ по обнаружительной способности по сравнению с p-i-n-фотодиодами. В диапазоне 1300-1500 нм используются p-i-n-фотодиоды из InGaAs и Ge, где InGaAs превосходит германий по показателям темнового шума и температурной устойчивости. В оптических системах связи обычно используются два типа детекторов для фотоприемников: p-i-n-фотодиод и лавинный фотодиод (ЛФД).

Солнечные фотоэлементы (СЭ) – устройства, преобразующие солнечную энергию в электрический ток. Действие солнечного элемента основано на использовании явления внутреннего фотоэффекта, т.е. возникновение свободных носителей заряда электронов и дырок в твердом теле при поглощении в нем квантов электромагнитного поля (фотонов).

Основные характеристики солнечных фотоэлементов.

— Напряжение холостого хода V_{xx} - напряжение на СЭ при бесконечном сопротивлении внешней нагрузки.

— Ток короткого замыкания I - максимальный ток, возникающий под действием солнечного света, когда освещенный СЭ замкнут накоротко во внешней цепи.

— Коэффициент заполнения FF, находится по формуле (3).

$$FF = \frac{I_n U_n}{I_{кз} V_{xx}} \quad (3)$$

— Коэффициент полезного действия КПД - отношение мощности, вырабатываемой СЭ к мощности падающего на него солнечного излучения находится по формуле (4).

$$\eta = \frac{I_H U_H}{P_c} \quad (4)$$

Спектральные характеристики СЭ:

— Квантовая эффективность – отношение числа носителей заряда, собранных фотоэлементом к числу падающих фотонов данной энергии в единичном интервале спектра.

— Спектральная чувствительность SR – отношение фототока, генерируемого в фотоэлектрическом слое к мощности поглощенного в нем излучения в единичном интервале частот.

— КПД равен произведению интегральной (по спектру) квантовой эффективности на коэффициент заполнения, интегральную оптическую эффективность, предельную эффективность.

Солнечные элементы (СЭ) диодного типа используют разделение зарядов на границе p- и n-типов. Они подразделяются на объемные кристаллические (Si, Ge, GaAs) и тонкопленочные (из аморфного, микрокристаллического и поликристаллического материала). Первоначально СЭ на основе кристаллического кремния и германия составляют 90% рынка с КПД около 20%, но имеют высокую стоимость и токсичность.

Тонкопленочные СЭ изготавливаются из материалов AB₃ (GaP, InP, GaAs) и AB₂ (CdTe) с шириной запрещенной зоны 1,1 эВ и высоким коэффициентом поглощения. Модели на основе халькоперитов (CuInGaSe₂) и кестеритов (CuZnSnSe₄) имеют КПД около 20% и 10% соответственно, занимая 10% рынка с 1980-х.

СЭ третьего поколения включают органические красители и квантовые точки с теоретическим пределом КПД 30%. Каскадные СЭ содержат несколько p-n переходов и могут поглощать широкий диапазон солнечного света, повышая КПД благодаря разделению спектра. Методы их

изготовления — молекулярно-пучковая эпитаксия или осаждение из газовой фазы, при этом используются полупроводниковые соединения и квантовые точки.

Главным критерием для солнечных элементов (СЭ) является согласование кристаллической структуры слоев. Оптимальная структура для двухслойных СЭ (InGaP/GaAs) достигает максимального КПД 31% при 200-кратной концентрации света. Трехслойная структура InGaP/GaAs/Ge достигает КПД 38%. Рекордный КПД 45-46% получен у многослойной структуры с AlInGaP, InGaAs и Ge, но их высокая стоимость (из-за германия) ограничивает применение, главным образом для космических аппаратов.

СЭ с параллельным разделением солнечного спектра имеют рекордный КПД 43%, но требуют фазовых голограмм для разделения света. Третье поколение СЭ экситонного типа состоит из органического полимера-донор и прозрачно-акцепторного материала, где экситоны генерируются солнечным излучением и разделяются на свободные электроны и дырки, создавая фототок.

Приборы с зарядовой связью (ПЗС) — это интегральные микросхемы, состоящие из совокупности МДП-структур, сформированных на общей полупроводниковой подложке. Полоски электродов образуют линейчатую или матричную регулярную структуру. Расстояние между соседними электродами малы, так, что становятся существенными их взаимовлияние.

ФПЗС (фоточувствительный прибор с зарядовой связью) изготавливают из монокристаллического кремния с тонкой диэлектрической пленкой окиси кремния. МДП-элементы имеют алюминиевые электроды длиной 3-7 мкм и зазор 0,2-3 мкм, с числом элементов от 500 до 2000. р-п-переходы создаются под электродами для передачи зарядов. При фронтальном освещении алюминий заменяют прозрачным поликристаллическим кремнием. В процессе зарядовые пары стягиваются в потенциальные ямы под электродами, образуя сигнальные пакеты. Перенос зарядов осуществляется за счет изменения

напряжения на электродах, что позволяет перемещать пакеты вдоль строки ПЗС.

Основное функциональное назначение фоточувствительных ПЗС – это преобразование оптических изображений в последовательность электрических импульсов (формирование видео сигнала).

Модуляторы

Электрооптические модуляторы основаны на электрооптический эффекте — изменении показателя преломления, вызванное наложением постоянного или низкочастотного электрического поля. Модуляторы света – устройства для управления параметрами световых потоков: амплитудой, частотой, фазой, поляризацией.

Фазовые электрооптические модуляторы на основе эффекта Поккельса используют линейное изменение показателя преломления нецентральносимметричных кристаллов в зависимости от величины электрического поля, в котором находится кристалл, формула (5).

$$n(E) = n_0 - \frac{1}{2} r n_0^3 E, \quad (5)$$

Где n_0 — показатель преломления кристалла без поля, r — электрооптический коэффициент, зависящий от свойств и ориентации кристалла, направления поля E и поляризации проходящего света.

Световой пучок, прошедший путь в кристалле, помещенном в электрическое поле, приобретает фазовый сдвиг, формула (6).

$$\varphi = \frac{2\pi n L}{\lambda} = \varphi_0 - \frac{\pi n_0^3 r E}{\lambda}, \quad (6)$$

Здесь λ — Длина волны света в вакууме, φ_0 -начальный сдвиг фаз света в кристалле без поля, L — длина ячейки Поккельса. Наличие фазового означает фазовую модуляцию света.

Амплитудные модуляторы с поляризационной ячейкой отличаются от фазовых модуляторов наличием двух скрещенных поляризаторов, между которыми находится кристалл. Интенсивность света на выходе поляризационной ячейки определяется законом Малюса (7).

$$I = I_0 \sin^2 \left(\frac{\Gamma}{2} \right) \quad (7)$$

Разность фаз $\Gamma = \varphi_1 - \varphi_2 = \Gamma_0 + \Gamma_{\sim}$, где разность фаз за счет естественной анизотропии кристалла Γ_0 считается по формуле (8), а переменная разность фаз, наведенная электрическим полем, определяется по формуле (9).

$$\Gamma_0 = \varphi_{01} - \varphi_{02} = \frac{2\pi l}{\lambda} (n_1 - n_2) \quad (8)$$

$$\Gamma_{\sim} = \frac{\pi U}{U_{\lambda/2}} \quad (9)$$

Интегрально-оптические модуляторы света. На поверхности ниобата лития LiNiO_3 методом диффузии титана создают световодную конфигурацию и напыляют электроды. При прикладывании напряжения изменяется скорость распространения света. Используется модифицированный интерферометр Маха-Цендера и электрооптический фазовый модулятор, изображенный на рисунке 4.

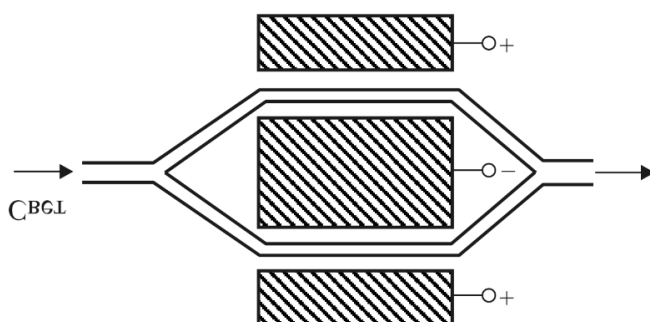


Рисунок 4 — Пленочный (волноводный) интерференционный модулятор света

Y-образные разветвления функционируют как светоразделительные элементы. В зависимости от фазы волн на выходе интерферометра они могут складываться или образовывать волну второй моды, которая излучается в подложку.

Электропоглощающие модуляторы на основе эффекта Келдыша-Франца. Эффект Келдыша-Франца: при приложении электрического поля к освещаемому полупроводнику в области его прозрачности, когда энергия фотона меньше ширины запрещенной зоны ($h\omega < E_g$) наблюдается поглощение

света. В области, где энергия фотона больше ширины запрещенной зоны ($h\omega > E_g$) возникают осцилляции коэффициента поглощения и отражения, как функции приложенного электрического поля и частоты света.

В электропоглощающих модуляторах и переключателях без поля падающий пучок света на рабочей длине волны, большей ширины запрещенной зоны, проходит свободно. При приложении электрического поля свет поглощается за счет уменьшения ширины запрещенной зоны. Эти модуляторы работают с большими скоростями и меньшим напряжением. Они интегрируются в единый чип с полупроводниковыми источниками света и используются в оптоволоконных системах связи.

Электропоглощающие модуляторы на основе квантоворазмерного эффекта Штарка имеют большой сдвиг пика поглощения и более крутой край поглощения, чем объемные полупроводники. Они обладают высокими скоростями, большими коэффициентами контрастности, низкими управляющими напряжениями.

Квантоворазмерным эффектом Штарка вызывается направлением электрического поля перпендикулярно плоскости квантовой ямы. При этом:

- Разность энергий между уровнями энергии зоны проводимости в валентной зоне уменьшается с ростом электрического поля ($h\nu_2 < h\nu_1$);
- Наклон зон вызывает сдвиг локализации волновых функций в сторону краев ямы;
- Ионизация экситонов подавляется, а экситонные уровни энергии остаются неуширенными даже при высоких значениях поля.

Магнитооптические модуляторы света основаны на эффект Фарадея, заключающемся во вращении плоскости поляризации линейнополяризованного света. Свет распространяется вдоль постоянного магнитного поля, в котором находится вещество. Принципиальная схема фарадеевского модулятора света приведена на рисунке 5. Изменение магнитного поля катушки 2 приводит к периодическому углу вращения плоскости поляризации света в магнитооптическом элементе 1.

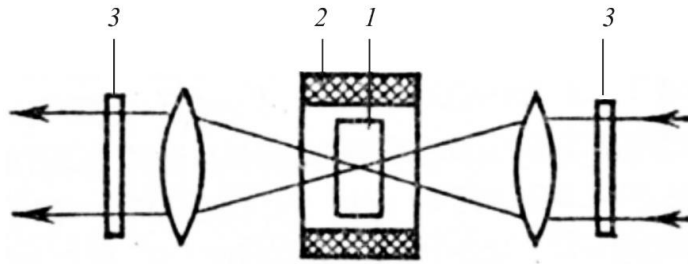


Рисунок 5 - Магнитооптический модулятор света. 1-магнитооптический элемент. 2-катушка. 3- поляризаторы.

Интенсивность света, прошедшего через такую систему, определяется по формуле (10).

$$I = I_0 \cos^2(\varphi_0 + \theta_1 \sin \Omega t), \quad (10)$$

Где φ_0 - угол поворота между первым и вторым поляризаторами 3, θ_1 - максимальный угол вращения плоскости поляризации в элементе, Ω - частота приложенного магнитного поля.

Акустооптические модуляторы света имеют следующий принцип действия: акустическая волна в оптически прозрачной среде изменяет показатель преломления, образуя структуру, аналогичную дифракционной решетке. При малом периоде структуры и большой области взаимодействия происходит дифракция света, аналогичная дифракции рентгеновских лучей. Угол падения света близок к углу Брэгга, что приводит к наблюдению бокового дифракционного максимума. При малой области взаимодействия образуется плоская решетка и наблюдается дифракция Рамана-Ната, где частота света изменяется. Акустооптическое взаимодействие позволяет изменять частоту и интенсивность света. Принципиальная схема акустооптического модулятора света показана на рисунке 6. Модуляторы интенсивности света с акустическими волнами нашли практическое применение, включая акустооптические процессоры.

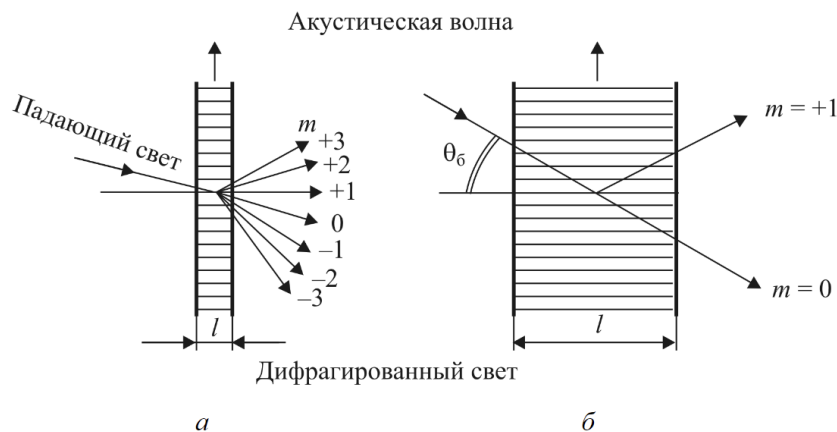


Рисунок 6 – Схема дифракции света в звуковой волне:

а – при большой области взаимодействия l (пространственная решетка);

б – при малой области l (плоская решетка)

Пространственные модуляторы света (ПМС) — это прибор, который модулирует интенсивность света так, чтобы в каждой заданной точке она была изменена в заданное число раз. Конструктивно это плоский оптический элемент с управляемым коэффициентом пропускания интенсивности $T(x, y)$. Интенсивность прошедшего света $I_0(x, y)$ связана с интенсивностью падающего света $I_i(x, y)$ формулой (11). В пространственном модуляторе коэффициент пропускания является управляемым в различных точках.

$$I_0(x, y) = I_i(x, y)T(x, y) \quad (11)$$

На оптически прозрачной подложке размещаются электрооптический и фотопроводящий слои, разделенные диэлектрическим зеркалом. Снаружи находятся прозрачные электроды с постоянным напряжением, которое в отсутствие света действует на фотослой с высоким темновым сопротивлением. Свет, падающий на фотопроводник, снижает его сопротивление, позволяя напряжению воздействовать на электрооптический слой, создавая пространственный рельеф. Свет, падающий, с другой стороны, используется для считывания информации. В качестве электрооптического слоя применяют электрооптические или жидкие кристаллы (ЖК).

Достоинствами ЖК ПМС являются низкое рабочее напряжение и удовлетворительное разрешение 60-100 линий / мм. малая толщина слоя жидкого кристалла 2-50 мкм. Недостатки – высокая чувствительность к температуре, малое время хранения записанной информации и большое время записи. Применение. ПМС используются для преобразования некогерентного изображения в когерентное, для сложения и вычитания изображений, выделения движущейся части изображения.

Оптрон – оптоэлектронный прибор, состоящий из оптического излучателя и фотоприемника, объединенных один с другим в оптические и электронные связи и помещенных в общий корпус. Физическую основу работы оптрона составляют процессы преобразования электрического сигнала в оптический в излучателе и оптических сигналов в электрические в фотоприемнике, а также передача этих сигналов по оптическим каналам и электрическим цепям.

Типы связей между излучателем и фотоприемником определяют функциональные возможности оптрона. На рисунке 7а) показана схема прямой электрической связи прибор с оптическим входом и оптическим выходом. Обеспечивающий преобразование излучения, например из инфракрасного в видимое. На рисунке 7б) показана прямая оптическая связь электрических входа и выхода играющая роль гальванической развязки. На рисунке 7в) показан регенеративный оптрон с прямой электрической и положительной обратной оптической связью. На рисунке 7г) оптрон с открытым оптическим каналом связи. На рисунке 7д) оптрон с управляемым оптическим каналом связи.

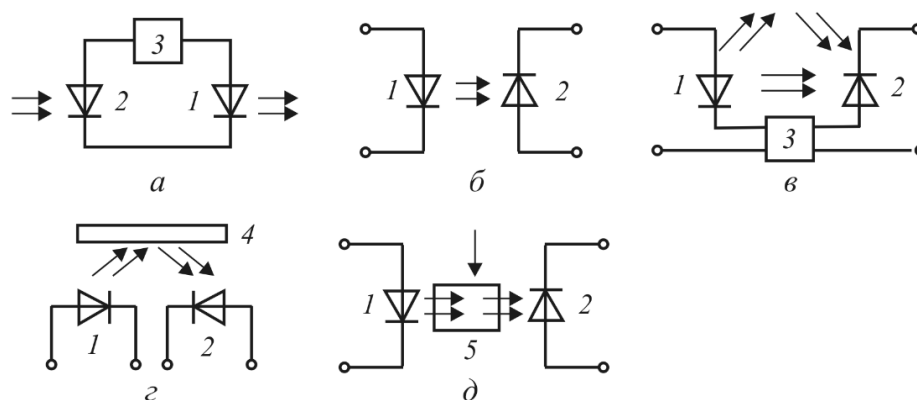


Рисунок 7 – Электрические и оптические связи в оптронах:

1 – излучатель; 2 – фотоприемник; 3 – микроэлектронный блок;
4 – отражатель; 5 – управляемая оптическая среда

Наибольшее распространение получили оптопары – оптроны с прямой оптической связью (рисунок 7б). Они обладают высокой электрической прочностью, отсутствием обратного воздействия фотоприемника на излучатель, малыми габаритами и массой.

Волоконный световод (ВС) – закрытое устройство для направленной передачи света, представляет собой длинную гибкую нить из оптически прозрачного материала. Число типов колебаний (мод), которые могут распространяться по ВС пропорционально квадрату диаметра сердцевины и разности показателей преломления сердцевины и оболочки.

Характеристики волоконных световодов: оптические потери, дисперсия групповой скорости, оптическая нелинейность, механическая прочность.

Технология изготовления и применения световодов:

Волоконные световоды изготавливаются методом химического осаждения из газовой фазы с использованием кислорода и хлоридов кремния, германия и фосфора. Заготовка диаметром 20-30 мм перетягивается в волоконный световод диаметром 100 мкм с защитной оболочкой. Новые методы включают вытягивание нитевидных кристаллов из расплава или экструзию поликристаллических волокон. Разрешающая способность жгутов, передающих изображения, составляет 10-50 линий на 1 мм и определяется

диаметром сердцевины и числом волокон. Кроме того, используются волоконно-оптические диски для электроннолучевых трубок, которые имеют разрешающую способность до 100 линий на 1 мм. Для интегральной оптики разработаны планарные волноводы в виде тонкой пленки, которая наносится на подложку, с определенными условиями для волноводного режима. Диэлектрические световоды изготавливают методами катодного распыления, эпитаксиального наращивания и ионной имплантации.

Технологии наноплазмоники

Плазма твердых тел состоит из ионов, атомов и подвижных носителей заряда — электронов, находящихся в самосогласованном поле.

Электронная ферми-жидкость: Плазма металлов — сильно вырожденная электронная ферми-жидкость, где электроны взаимодействуют с ионами кристаллической решетки и сталкиваются с примесями и дефектами. Концентрация носителей заряда в металлах достигает $10^{22} - 10^{23} \text{ см}^{-3}$.

Электрическая нейтральность: Плазма в среднем нейтральна и подвержена плазменным колебаниям из-за флуктуаций.

Плазмоны — это квазичастицы, описывающие продольные коллективные колебания электронов, с плазменной частотой, определяемой по формуле (16).

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n}{m}} \quad (16)$$

Плазмоны обладают высокой энергией и могут быть объемными или поверхностными.

Поверхностные плазмоны: возникают у границы проводника с вакуумом, их частота вдвое меньше, чем у объемных плазмонов. Они представляют собой колебания плотности свободных электронов, распространяющиеся вдоль границы с диэлектриком или вакуумом, имея продольную и поперечную составляющие электрического поля.

Использование поверхностных плазмонов в оптике основывается на полном внутреннем отражении. При этом:

1. Если скорость электромагнитной волны совпадает со скоростью поверхностного плазмона, возникает плазмонный резонанс (SPR), нарушая условия полного отражения.

2. Частота падающего света совпадает с частотой колебаний свободных электронов, что приводит к увеличению амплитуды колебаний электронной плазмы и значительному поглощению света в видимой части спектра.

3. Длина волны максимума поглощения зависит от металла наночастицы (Ag, Au, Cu) и её размера и формы.

Плазмоны могут быть наблюдаемы с помощью оптического микроскопа, где разные цвета соответствуют резонансам дефектов поверхности.

Плазмонный резонанс (англ. plasmon resonance) — возбуждение поверхностного плазмона на его резонансной частоте внешней электромагнитной волной (в случае наноразмерных металлических структур называется локализованным плазмонным резонансом). Плазмонный резонанс может происходить в отдельных частицах и кластерах, так и в протяженных поверхностях различной геометрии.

Наноплазмоника — это раздел нанофотоники, изучающий оптические свойства и явления, возникающие при колебаниях электронов проводимости в металлических наноструктурах и их взаимодействии со светом, атомами и молекулами. Основные аспекты:

— Плазмонные колебания: исследуются колебания электронов в металлических наноструктурах, которые обладают высокой частотой и сильной локализацией.

— Гигантские локальные поля: эти поля увеличивают сечение комбинированного рассеяния, что позволяет обнаруживать отдельные молекулы и определять структуру ДНК без маркеров.

— Эффективные флюорофоры: сложные спектры плазмонных частиц позволяют усиливать поглощение и испускание света, создавая наноразмерные источники света.

— Оптические компьютеры: наноплазмоника обещает новую элементную базу для оптических компьютеров, включая устройства, аналогичные транзисторам для сверхбыстрых сигнальных процессоров.

— Поверхностный плазмонный резонанс: важен для создания химических и биологических сенсоров, позволяя значительно увеличить интенсивность сигналов флуоресценции при контакте с биообъектами.

Плазмонный нанолазер

Нанолазеры и плазмонные поля представляют собой новый подход к миниатюризации фотонных устройств, фокусируясь на локализации света.

Типы плазмонов: существуют два вида плазмонов для нанолазеров — локализованные плазмоны на металлических частицах и плазмоны, распространяющиеся по поверхности металл-диэлектрик.

Плазмонный нанолазер является квантовым генератором когерентных плазмонных полей и состоит из активной среды, источника накачки и резонатора. Существует три типа резонаторов:

— 3D-резонатор для локализованных плазмонов. На рисунке 10 показаны две изученные конфигурации 3D-спазера а) конфигурация с усиливающей средой в центре металлической частицы (конфигурация нанооболочки) и б) конфигурация наночастицы. Накачка молекул красителя производилась импульсным лазерным излучением. При увеличении мощности накачки возникал узкий пик на длине волны 531 нм, соответствующий плазмонному резонансу. Интенсивность излучения демонстрировала порог генерации спазера. Дополнительно, в случае наностержней частота плазмонного резонанса настраивается изменением их длины, что позволяет синхронизировать с частотой квантовых излучателей.

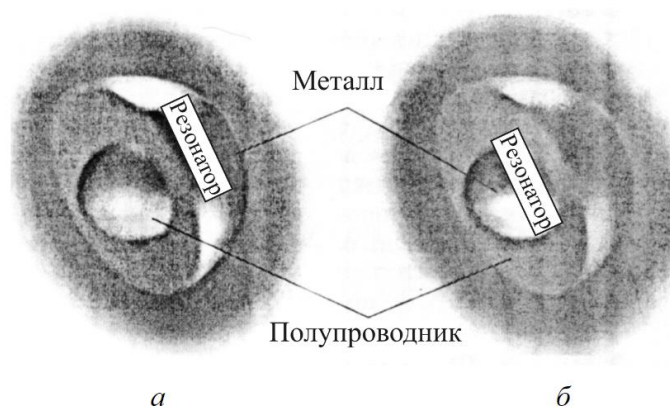


Рисунок 10 - Конфигурация 3D-спазера а) с усиливающей средой (полупроводник) в центре металлической наночастицы; б) с активной средой вне металлической наночастицы.

— 2D-резонаторы для плоских волн. Состоит из полупроводникового стержня, расположенного рядом с металлической поверхностью, что формирует гибридную волну в зазоре между ними. Эта структура обеспечивает сильную локализацию поля и большую длину распространения волны. Первая демонстрация 2D-плазмонного нанолазера произошла в 2010 году с использованием CdS в качестве активной среды и резонатора. Обратная связь обеспечивалась отражением на концах наностержня из-за разницы в коэффициентах преломления. Лазерная накачка проходила на длине волны 405 нм, а генерация наблюдалась на 489 нм с поперечным размером локализации около 10 нм. Генерация происходила при криогенной температуре для наностержня диаметром 52 нм. В другой демонстрации использовался наностержень из InGaN с InN оболочкой на поверхности Ag. При температуре 120K наблюдался генерационный пик в зеленой области, а при 8K узкая линия лазерной генерации на длине 500 нм;

— 1D-линейные резонаторы (нанолазер). Состоит из металлической наноструктурированной поверхности и прилегающего диэлектрика, который служит усилителем для поверхностной плазмонной волны. Возможны различные планарные структуры, такие как диэлектрик-металл-диэлектрик и металл-диэлектрическая пленка-металл. В 1D-резонаторе используется

полупроводниковый нанодиск (активная среда), расположенный на расстоянии 10 нм от металлической поверхности. В другой конфигурации металлическая (Au) нанопленка-волновод расположена внутри InGaAs, причем длина волновода составляет 1 мм, а ширина — 100 мкм. Оптическая накачка проводилась на длине волны 1,06 мкм, а генерация наблюдалась на 1,46 мкм при комнатной температуре. Также рассматривается нанолазер с полупроводником CdS на Ag с изолятором MgF₂, где сформированы только плазмонные моды, обеспечивающие одномодовый режим генерации с шириной линии 1,1 нм. Нанолазер на основе плазмонного кристалла включает решетку наночастиц золота с полимерным активным слоем и генерирует излучение на 913 нм при оптической накачке длиной 800 нм. Излучение было когерентным на площади 50×50 мкм при комнатной температуре. Еще одна схема включает решетку наноотверстий на InP с активной средой InGaAs, оптическая накачка осуществлялась на 1,06 мкм. При превышении порогового значения мощности наблюдалось резкое увеличение излучения до 1480 нм, что указывает на достижение генерации нанолазера при криогенных температурах.

Спазер — это квантово-плазмонный прибор, состоящий из инверсно возбужденных квантовых точек, окружающих плазмонные наночастицы. Принцип его действия основан на инверсной заселенности и обратной связи от индуцированного излучения. Спазер генерирует и усиливает ближние поля, где плазмоны действуют аналогично фонтонам, обеспечивая условия для обратной связи. Усиление плазмонов происходит за счет безизлучательной передачи энергии от квантовой точки через дипольное взаимодействие. Спазер функционирует как автоколебательная система, поддерживая незатухающие колебания, четко балансируя накачку и диссипацию.

Плазмонные материалы для резонаторов включают благородные металлы с минимальными потерями. Основные потери происходят из-за взаимодействия электронов, а также рассеяния на дефектах решетки.

- Серебро (Ag): основной плазмонный материал с минимальными потерями в видимой и ближней инфракрасной области;
- Золото (Au): химически инертно, создает тонкие пленки, имеет высокие потери при 470 нм.;
- Медь (Cu): менее эффективна, легко окисляется, имеет аналогичные диэлектрические свойства золота при длинах волн >600 нм.
- Алюминий (Al): оптически лучше серебра и золота в «голубой» и ультрафиолетовой области, но имеет значительные потери на межзонных переходах при 800 нм.

Другие плазмонные материалы включают прозрачные проводящие оксиды, такие как окись индия-олова и окись цинка (ZnO), которые проявляют металлические свойства при длинах волн $>1,3$ мкм. Нитрид титана и нитрид циркония также имеют плазмонные свойства в видимом диапазоне (>500 нм).

Для уменьшения потерь требуется небольшое значение действительной части комплексной диэлектрической проницаемости, что может быть достигнуто легированием или уменьшением концентрации носителей заряда.

Идеальный плазмонный материал требует уменьшения расстояния между атомами в решетке и экранирования электростатического поля. Для эффективного применения в оптических компьютерах необходимо найти способы электрического сопряжения с полупроводниками без лазерной накачки.

Применения устройств наноплазмоники:

- Фотонные интегральные схемы с наноразмерными плазмонными лазерами интегрируются с электронными и оптическими компонентами, обеспечивая функциональность оптических схем с широкой полосой модуляции. Пассивные плазмонные элементы, такие как детекторы и волноводы, улучшают характеристики и снижают энергопотребление.
- Сенсоры на основе активной плазмоники измеряют интенсивность излучения, чувствительного к присутствию веществ на уровне менее 10^{-9} частиц.

— Биомедицинские применения 3D-спазера обеспечивают интенсивность излучения, превышающую флуоресценцию квантовых точек, что позволяет манипулировать и резать биологическую ткань с высокой точностью.

— Оптическая связь и хранение информации используются в терагерцовом диапазоне, обеспечивая высокую плотность информации на носителях данных.

— Построение изображений с суперразрешением достигается за счет высокой плотности энергии в нанолазерах.

— Ультрабыстрая спектроскопия возможна с локализацией энергии на нанометровой шкале и фемтосекундной временной шкале.

— Фотолитография использует нанолокализованные поля плазмонных лазеров для преодоления дифракционного предела.

— Наноплазмоника соединяет электронные устройства меньшего 100 нм с фотоникой более 100 ТГц и применяется в нанооптике, биосенсорах и других областях, таких как измерение толщины пленок и подсчет связываний белков.

2. Оптоинформатика

Оптика неоднородных сред – раздел физической оптики, в котором изучаются явления, сопровождающие распространение оптического излучения в оптически неоднородных средах, показатель преломления которых не постоянен, а зависит от координат.

Абсолютным прибором называется оптическая система, дающая стигматическое т.е. резкое без аббераций (искажений) изображение трехмерного предмета. Простым примером абсолютного прибора является сферический градан (оптический элемент из прозрачного материала с определенным законом распределения коэффициента преломления n) с распределенным показателем преломления по радиусу (формула (12)) – линза

Луненберга. В этом случае неоднородная сфера собирает каждый падающий пучок параллельного света в единый фокус.

$$n(r) = n_0 \sqrt{2 - \left(\frac{r}{r_a}\right)^2} \quad (12)$$

В приборе - «рыбий глаз» Максвелла отображение осуществляется преобразованием инверсии (формула 13).

$$n(r) = \frac{n_0}{1 + \left(\frac{r}{a}\right)^2} \quad (13)$$

Для аксиальной симметрии принципу абсолютного прибора удовлетворяет градан с распределением $n(z)$, зависящим от формы сферической поверхности.

При радиальной симметрии принципу «абсолютного прибора» удовлетворяет распределение обратного гиперболического косинуса – формула (14).

$$n(r) = \operatorname{sech}(gr) = \frac{1}{\operatorname{ch}(gr)} = 1 - \frac{g^2 r^2}{2!} + \frac{5}{4!} g^4 r^4 - \dots, \quad (14)$$

где g - постоянная распространения.

Сельфок – (радиальный градан) безоболочечный одножильный многомодовый световод способен самостоятельно формировать и транслировать изображение. В нем все возбуждаемые моды имеют равные скорости распространения. В практически реализованных сельфоках на основе кварцевого стекла с параболический показатель распределения определяется по формуле (15).

$$n(r) = n_0 \left(1 - \frac{g^2 r^2}{2}\right) \quad (15)$$

Мутные среды – среды, в которых распространения света сопровождается значительным рассеянием, влияющим на условия распространения, вследствие чего нарушается прозрачность среды. Рассеяние света в среде происходит на оптических неоднородностях.

Задача рассеяния:

1. Определить поле, рассеянное отдельным элементом мутной среды, предполагая внешнее поле, в котором находится внешний элемент,

суперпозицией облучающего поля и поля, создаваемого всеми остальными элементами тела.

2.Просуммировать действие всех элементов(частиц) тела.

Для классификации мутных сред в поле бесконечно плоской когерентной волны вводятся четыре параметра:

- $x_1 = d / \lambda$, d – расстояние между элементами;
- $x_2 = a / \lambda$, a – размер частиц;
- $x_3 = l / \lambda$, l – среднее расстояние между центрами частиц в мутной среде;
- $x_4 = R / \lambda$, R – Размер мутной среды.

Интегральная оптика – раздел современной оптики, изучающий процессы генерации, распространения и преобразования света в тонкопленочных диэлектрических волноводах, а также разработку принципов и методов создания на единой подложке.

Основой интегральных оптических устройств являются планарные волноводы. Планарные волноводы — световоды, в виде тонкой пленки, толщиной h порядка длины волны λ , нанесенную на подложку.

Активные элементы интегральной оптики: модуляторы, переключатели, сканеры используются для управления параметрами лазерной волновой моды. Это амплитуда, фаза, поляризация моды. Принцип работы этих устройств основан на изменении показателя преломления материала микроволновода под действием электрического или магнитного полей, или упругой деформации. Наибольшее распространение получили электрооптические и акустооптические устройства управления светом. Они основаны на брегговской дифракции на фазовых решетках, индуцируемых электрическим полем или акустопервоверхностными волнами.

Перейдем к рассмотрению *волоконно-оптических систем связи*. Волоконно-оптические компоненты, такие как оптические волокна, источники для оптических передатчиков, оптические усилители и детекторы, являются

основными элементами волоконно-оптических систем связи. Эти системы состоят из оптических линий и сетей, соединяющих множество пользователей в географической области. Оптическая линия связи включает источник света, модулируемый электрическим сигналом, оптическое волокно с низкими потерями и малой дисперсией, а также фотоприемник, преобразующий оптический сигнал обратно в электрический (рисунок 8). Электрический сигнал преобразуется в оптический путем модуляции источника света. Оптический сигнал передается по волокну, проходит через усилитель к приемнику. Приемник преобразует оптический сигнал обратно в электрический.



Рисунок 8 – Аналоговая оптическая волоконная система связи.

Другие оптические элементы:

— Мультиплексер – оптическое устройство, объединяющее несколько спектральных каналов с различными длинами волн в один оптический канал (WDM wavelength division multiplexing) число спектральных каналов может достигать 40.

— Демультиплексер – оптическое устройство, разъединяющее оптические каналы на спектральные.

Оптические усилители классифицируются на усилители мощности, линии и предусилители. Усилители мощности увеличивают оптическую мощность перед вводом в волокно, усилители на линии поддерживают сигнал при передаче, а предусилители усиливают сигнал перед фотоприемником. Рассматриваются оптические волоконные усилители, в частности полупроводниковые (SOA) и волоконные эрбиевые (EDFA) и празеодимовые (PDFA) усилители.

Полупроводниковые усилители, основанные на InGaAsP и InGaAs, компактны и интегрируются с другими компонентами, но имеют высокий уровень шума, температурную зависимость, большие перекрестные потери и несовместимость с геометрией оптоволокна. Их применяют как нелинейно-оптические устройства и оптические переключатели, реже — в качестве усилителей на линии. Несколько усилителей могут объединяться в массив.

Волоконный усилитель легированные эрбием (EDFA).

Волоконный усилитель с легированным эрбием (EDFA) — полупроводниковый оптический усилитель, конструкция которого основана на оптическом волноводе и работает на основной оптической моде. Пример: усилитель из InGaAsP/InP длиной 1 см с усилением 13 дБ на длине волны 1550 нм.

Основные характеристики эрбиевого волоконного усилителя:

- Используется в оптических линиях связи с высоким спектральным уплотнением;
- Ионы эрбия возбуждаются при длинах волн 514, 532, 667, 800, 980 и 1480 нм;
- Делятся на S-band (1525-1565 нм) и L-band (1568-1620 нм).

Преимущества:

- Одновременное усиление сигналов с разными длинами волн;
- Прямое усиление оптических сигналов без преобразования;
- Низкий уровень шума и простота интеграции в системы передачи;
- Высокая выходная мощность.

На рисунке 9 изображена упрощенная схема эрбиевого волоконного усилителя для попутного направления подключения источника накачки. Первый оптический изолятор подавляет отраженный от соединителя сигнал обратно в линию. Второй изолятор подавляет отраженный сигнал обратно в активированное волокно. Лазер накачки помещен в блок размером 3 20 15 8 × × мм и подсоединен одномодовым волокном к усилителю.

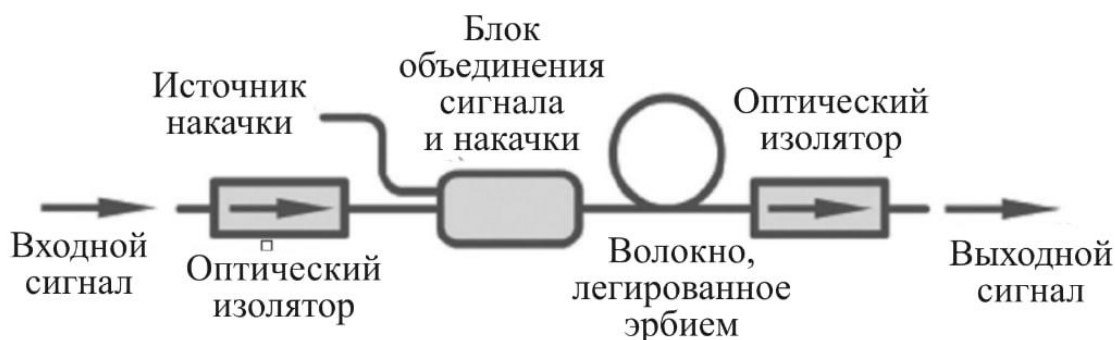


Рисунок 9 – Упрощенная схема эрбиевого волоконного усилителя
накачка в попутном направлении

Преимущества волноводного усилителя:

1. Плоский профиль спектра усиления.
2. Рабочий диапазон эрбиевого усилителя случайно совпадает с диапазоном минимальных оптических потерь кварцевого волокна.

Волоконные ВКР-усилители (Raman fider amplifiers, RFA) работают на основе вынужденного комбинационного рассеяния и имеют две стандартные конфигурации:

1. Распределенные ВКР-усилители — сигнал и накачка передаются по одному волокну, которое выполняет функцию усиливающей среды.
2. Сосредоточенные ВКР-усилители — усиление обеспечивается коротким отрезком нелинейного волокна.

Излучение накачки может распространяться в прямом, обратном или двунаправленном направлениях.

Основные характеристики:

- Ширина полосы ВКР-усиления для кварцевого волокна составляет около 100 нм (12,5 ТГц на 1550 нм);
- Многочастотная накачка обеспечивает усиление в различных областях прозрачности волокна;
- Усиление RFA примерно на 20 дБ ниже, чем у EDFA, как и эффективность.

Преимущества ВКР-усилителей:

- Большая ширина полосы;
- Произвольная рабочая длина волны;
- Совместимость с существующими системами.

Нанополаризатор — синтетический объемный или пленочный композитный материал с анизотропией пропускания и/или отражения, обусловленной структурой компонентов.

Объемные поляризаторы для ближнего инфракрасного диапазона изготавливаются из стекла с металлическими наночастицами. Примеры:

- Polar Cor (Corning, США) — боросиликатное стекло с анизотропными наночастицами серебра.
- HOYA Corp. (Япония) — использует частицы меди.

Пленочные поляризационные материалы:

- NanoOpto Corporation (США) — анизотропия отражения от металлического зеркала с периодической решеткой.
- Photonic Lattice Inc. (Япония) — гофрированная многослойная диэлектрическая пленка.

Принцип действия поляризаторов на основе многослойных структур: Периодические диэлектрические структуры обладают двулучепреломлением, зависимым от поляризации света. Спектр отражения зависит от показателей преломления в слоях, что создает сильную анизотропию. Многослойные структуры работают как анизотропные одномерные фотонные кристаллы.

Металлические линейные наноструктуры (линейные решетки): Уменьшение коэффициента отражения для поляризованных световых волн. При поляризации вдоль штрихов ведет себя как металлическая поверхность, а перпендикулярно — как диэлектрик.

Поляризаторы широко используются в волоконно-оптических системах связи и выполняют следующие функции:

1. Пропуск линейнополяризованного излучения — они пропускают излучение с электрическим полем, совпадающим с осью пропускания, и блокируют ортогональную поляризацию.

2. Функции поляризационного делителя или объединителя — если блокируемая компонента отражается, поляризатор может использоваться для деления или объединения световых пучков.

Оптическая технологии в информатике

Оптическая запись, хранение и считывание информации

Носитель информации – физический сигнал или среда. Сама информация – задается параметрами сигнала или параметрами состояния среды. Процесс записи информации - воздействие сигнала на носитель, изменяющее состояние этого носителя. Считывание информации – изменение параметров считываемого сигнала или его генерация под действием носителя. Физические способы записи, хранения и считывания информации могут быть, электрическими, магнитными, оптическими, акустическими и др. Элемент памяти (ЭП) – наименьший участок среды носителя информации, позволяющий хранить единицу информации.

Запись и хранение информации осуществляется нарушением поверхности или рельефа носителя, механической перфорацией носителя. Считывание механическим, электромеханическим или оптическим методами.

Оптические диски. Запись –лазерным пучком прожиганием отверстий в непрозрачной подложке. Считывание информации – лазерным пучком меньшей интенсивности. Время записи (считывания) информации для оптического диска 123 составляет от 100 до 500 мс., плотность записи 10^8 бит/см². Запись одного бита информации на оптическом диске в тысячу раз дешевле, чем магнитная запись на лентах и дисках.

Магнитные элементы памяти. Принцип действия основан на сохранении намагниченности носителя после выключения внешнего магнитного поля. Различают магнитные ЭП на ферритовых кольцах и магнитных лентах. Другими типом являются ЭП на цилиндрических магнитных доменах (ЦМД). В нем перемещение ЦМД осуществляется по направлению от головки записи к головке чтения при приложении внешнего

продольного поля. Поле создается коммутацией тока системой проводников в подложке. Достоинствами магнитных устройств памяти являются энергонезависимость (сохранение информации при отключении питания), и высокая радиационная стойкость. Недостатки: потеря информации в сильных магнитных полях и высоких температурах.

Электрические элементы памяти. Работа оптических элементов памяти основана на перераспределении в ЭП тока, заряда и напряжения, с основным акцентом на полупроводниковые устройства памяти, такие как постоянные запоминающие устройства (ПЗУ). Информация в ПЗУ записывается на этапе изготовления через наличие или отсутствие перемычки в цепи истока полевого транзистора. Современные ПЗУ емкостью 1 Мбит имеют ЭП площадью ≈ 30 мкм² и время переключения 80-150 нс.

В основе *оптических ЭП* лежит оптическая бистабильность (самовоздействие света в нелинейных системах с обратной связью), требующая нелинейности и обратной связи. Это явление связано с самовоздействием света в нелинейных системах, где два устойчивых состояния поля прошедшей волны соответствуют определённой интенсивности и поляризации падающего излучения. Обратная связь создаёт область значений интенсивности и поляризации, в которой выходные характеристики неоднозначно зависят от параметров падающего излучения. При фиксированных значениях падающего излучения могут существовать два стационарных состояния поля прошедшего излучения, что приводит к реализации оптической бистабильности. В нелинейных системах могут также возникать режимы устойчивого, периодического, субгармонического и хаотического изменения интенсивности поляризации света.

Голографические элементы памяти используют голографию для записи, хранения и восстановления изображений и являются аналоговыми элементами памяти. Их оптическая плотность носителя информации, например, эмульсионного слоя фотопластинки, изменяется непрерывно. Запоминающие голографические устройства (ЗГУ) применяют

голографический метод для работы с информацией в двоичном коде, алфавитно-цифровом формате или в виде изображений. Информация записывается как плоская или объемная голограмма (амплитудная, фазовая или поляризационная), что позволяет достичь высокой плотности хранения (до 5×10^2 бит/мм²), помехоустойчивости и надежности. Голограммы представляют собой периодическую структуру с промодулированным амплитудным пропусканием, вызываемым изменением проводимости или диэлектрической проницаемости. Они делятся на фазовые, если модуляция связана только с изменением диэлектрической проницаемости, и амплитудные, если связана с изменением проводимости.

Запоминающие устройства на однокуантовых джозефсоновских элементах памяти основаны на Джозефсоновском контакте, представляющем собой тонкую изолирующую прослойку между двумя сверхпроводниками. Стационарный эффект Джозефсона позволяет протекание сверхпроводящего тока через контакт, переходя от нулевого напряжения к нестационарному состоянию при достижении критического тока. Этот эффект сохраняется до критического значения тока, после чего ток и напряжение падают до нуля. Характеристика туннельного контакта показывает гистерезис. Свойство быстро переключаться при превышении критического тока делает эти элементы полезными в ЭВМ. Минимальный размер однокуантовых джозефсоновских элементов памяти составляет около 0,1 мкм, обеспечивая плотность записи до 10^2 бит/мм², а время переключения при температуре жидкого азота — около 11 нс. Одноэлектронные элементы работают на туннелировании одиночных электронов и имеют минимальный размер, ограниченный толщиной туннельной прослойки в 3-4 нм.

Сегнетоэлектрические энергонезависимые запоминающие устройства нового поколения имеют низкое энергопотребление, высокую скорость работы и потенциально высокую плотность. Для их создания необходимы тонкие сегнетоэлектрические пленки с большой остаточной поляризацией и устойчивостью к повторным включениям, синтезируемые при температуре

около 650 °С. Существуют два типа сегнетоэлектрических оксидов: цирконат-титан свинца (PZT) со структурой перовскита и висмутовые сегнетоэлектрики. PZT обладает высокой поляризацией, но содержит неэкологичный свинец. Висмутовые сегнетоэлектрики имеют слоистую перовскитную структуру, что способствует долговечности и поляризационным свойствам.

Монокристаллы висмутовых материалов, такие как BiTiO_3 и BaBiTiO_3 , имеют высокую поляризацию и были получены методом выращивания из расплава. Температура Кюри для этих монокристаллов составляет около 540 °С, а максимальная диэлектрическая проницаемость достигает 7000 при 560 °С. Эффективность их использования объясняется замещениями в структуре, что нарушает локальную симметрию и улучшает свойства материала.

Новая память на основе кремниевых наноточек. Новая память состоит из слоя диэлектрического материала с включенными в него дискретными кремниевыми наноточками, диаметром всего 3 нм. И каждая такая наноточка может хранить один бит информации. Чтобы управлять операциями с памятью, вся структура покрыта тонким слоем металла, который выступает в роли металлического управляющего электрода, затвора. А кремниевая наноточка, в совокупности с диэлектрическим материалом и металлическим управляющим электродом, представляет собой полевой транзистор, способный находиться в активном и неактивном состоянии. Осуществляет процессы записи и стирания информации в 10-100 раз быстрее, чем самые быстрые образцы существующей компьютерной памяти, использующей для хранения информации электрический заряд. Такой метод хранения информации является весьма надежным и долговременным.

Квантовая память на фотонных ячейках. Эти ячейки памяти способны к детектированию поляризации фотона света («поляризационный квантовый бит»), запоминанию полученного значения поляризации, и излучению фотона света с такой же поляризацией, в случае создания необходимых условий

(операция «чтения»). Сейчас данная технология еще далека от совершенства и практического применения.

Оптические технологии в вычислительной технике

Оптические компьютеры (ОК) - интенсивно разрабатываемые в 1980 - 90е гг. поколение вычислительных машин на основе использования оптич. излучения в качестве носителя информации. Составными частями ОК служат устройства, которые формируют, передают, преобразуют и осуществляют другие операции над информационными и управляющими световыми потоками.

Проникновение оптических методов в вычислительную технику идет по трем основным направлениям:

1. Аналоговые оптические вычисления для быстрого выполнения интегральных преобразований, хотя их точность и динамический диапазон ограничены, что затрудняет использование в универсальных системах.

2. Оптические соединения для передачи сигналов, что может повысить надежность по сравнению с электрическими соединениями. Переход к гибридным оптоэлектронным системам приводит к необходимости использовать новые элементы, такие как оптоэлектронные преобразователи, с потерями до 30%.

3. Создание оптических элементов на основе бистабильности, что позволяет разрабатывать полностью оптические логические устройства и усилители, включая оптические транзисторы и запоминающие ячейки. Такой подход устраняет многократные преобразования энергии между электрической и оптической формами.

В современном электронном компьютере можно отметить следующие оптические узлы и элементы: устройства ввода информации – оптический сканер, оптическая мышь; устройства обмена информацией – инфракрасный порт, оптоволокно; устройства вывода информации – лазерный принтер, дисплей, голографический (объемный) дисплей; устройства памяти –

долговременная память на перезаписываемых оптических дисках, магнитооптические диски, голографические диски.

3. Квантовые технологии

Физические основы квантовой нанотехнологии

Квантовая нанотехнология — область исследований нанотехнологий, основанных на квантовой теории. В квантовых нанотехнологиях основное внимание уделяется использованию квантовых феноменов в наноматериалах и наносистемах.

Квантовая нанотехнология фокусируется на манипуляциях с отдельными квантовыми состояниями атомов и молекул, в отличие от неквантовых нанотехнологий, которые работают с множествами атомов. Основные концепции квантовых нанотехнологий включают квантовые наноассемблеры и самовоспроизводящиеся машины, которые могут копировать себя только в виде открытых (негамильтоновых) систем. Квантовые наномашин отличаются от неквантовых по принципам работы и способны создавать сложные структуры из квантовых состояний, такие как состояния сверхпроводимости и сверхтекучести. Главное применение квантовых технологий включает три сферы: сенсоры, защищенная связь и квантовые вычисления. Сенсоры уже коммерциализированы, обеспечивая высокую чувствительность, например, для обнаружения взрывчатых веществ. Линии связи с квантовым шифрованием защищены от прослушивания, а квантовые вычисления находятся на стадии исследований.

Квантовая суперпозиция (когерентная суперпозиция) — это суперпозиция состояний, которые не могут быть реализованы одновременно с классической точки зрения, это суперпозиция альтернативных (взаимоисключающих) состояний.

Принцип суперпозиции в квантовой механике подразумевает, что все уравнения должны быть линейными. Наблюдаемая величина, например, положение или энергия частицы, соответствует собственному значению

эрмитова линейного оператора, действующего на конкретное собственное состояние (волновую функцию). Линейная комбинация собственных функций также описывает физическое состояние, но измерение приведет к неопределенности, и результат будет с вероятностями, определяемыми квадратами коэффициентов. Квартовая суперпозиция приводит к интерференционным эффектам и запутанным состояниям для составных систем.

Квантовая запутанность — это явление, при котором квантовые состояния двух или более объектов взаимозависимы, даже если они удалены на большие расстояния, что противоречит принципу локальности. Например, при измерении спина одной запутанной частицы состояние второй всегда будет противоположным. Запутанное состояние неразделимо (несепарабельно) и позволяет проводить высокоэффективные измерения на одной составляющей, не влияя на другие. В англоязычных публикациях используется термин "Quantum entanglement", тогда как в русскоязычной литературе встречаются разные варианты, такие как "запутанные квантовые состояния" и "зацепленные состояния".

Квантовые вычисления и операции

Квантовый компьютер использует для вычисления не обычные (классические) алгоритмы, а процессы квантовой природы, так называемые квантовые алгоритмы, использующие квантовомеханические эффекты, такие как квантовый параллелизм и квантовая запутанность. Если классический процессор в каждый момент может находиться ровно в одном из состояний обозначаемых кет-векторами: $|0\rangle$, $|1\rangle$, ..., $|N - 1\rangle$, то квантовый процессор в каждый момент находится одновременно во всех этих базисных состояниях, при этом в каждом состоянии $|j\rangle$ — со своей комплексной амплитудой λ_j . Это квантовое состояние называется квантовой суперпозицией данных классических состояний и обозначается как

Кубит (q-бит, quantum bit, квантовый бит;) — квантовый разряд или наименьший элемент для хранения информации в квантовом компьютере. Система, обладающая двумя различающимися состояниями называется двоичной цифрой или битом. Бит всегда имеет только одно из двух возможных значений: 0 или 1. Один классический бит может находиться в одном и только в одном из состояний $|0\rangle$ или $|1\rangle$. Квантовый бит, называемый кубитом, находится в состоянии, определяемом формулой (17).

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle = a \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + b \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (17)$$

Кубиты могут быть связаны между собой через ненаблюдаемую связь, что позволяет им изменяться согласованно и интерпретироваться как заполненный квантовый регистр. Такой регистр информативнее классического, так как может находиться в различных комбинациях и реализовывать сложные зависимости. Кубиты в регистре могут обмениваться состояниями и преобразовывать их, что позволяет создавать компьютеры для параллельных вычислений, при этом остаётся задача считания конечного результата. Обобщением понятия кубита является кунит (qudit), который может хранить более двух значений. Квантовая система из L кубитов имеет 2^L линейно независимых состояний, и операции в квантовых вычислениях соответствуют повороту векторов состояния в 2^L -мерном гильбертовом пространстве, что позволяет задействовать одновременно 2^L классических состояний.

Физическими системами, реализующими кубиты, могут быть любые объекты, имеющие два квантовых состояния:

- поляризационные состояния фотонов;
- электронные состояния изолированных атомов или ионов;
- спиновые состояния ядер атомов, и т. д.

Упрощённая схема вычисления на квантовом компьютере выглядит так:

1. Берется система кубитов, на которой записывается начальное состояние.

2. Затем состояние системы или её подсистем изменяется посредством унитарных преобразований, выполняющих те или иные логические операции.

3. В конце измеряется значение, и это результат работы компьютера.

Квантовый алгоритм — это алгоритм для выполнения на квантовом компьютере, представляющий собой классический алгоритм с последовательностью унитарных операций (гейтов) над кубитами. Он может быть описан словесно или графически. Результат работы алгоритма вероятностный, и с увеличением операций можно приблизить вероятность правильного результата к единице. Квантовый компьютер не увеличивает число алгоритмически разрешимых задач, но решает некоторые из них быстрее. Для этого алгоритм должен генерировать и использовать запутанные квантовые состояния. Задачи, решаемые квантовыми алгоритмами, также могут быть решены классическим компьютером, но с экспоненциальными затратами по времени, что делает квантовый параллелизм предпочтительным.

Существуют три класса квантовых алгоритмов:

- 1) алгоритмы с квантовыми скрытыми подгруппами преобразований абелевых групп;
- 2) алгоритмы с усилением амплитуд состояний;
- 3) алгоритмы для моделирования квантовых систем на компьютере.

Основные проблемы, связанные с созданием и применением квантовых компьютеров:

1. необходимо обеспечить высокую точность измерений $10^{-5} - 10^{-4}$ параметров управляющих кубитами сигналов;
2. внешние воздействия могут разрушить квантовую систему или внести в неё искажения.

Принципиальная схема любого квантового компьютера должна включать следующие функциональные блоки:

- квантовый регистр для ввода данных;
- квантовый процессор для преобразования данных;

— устройство для считывания данных.

Квантовый компьютер представляет собой регистр из n -кубитов, управляемых внешними классическими сигналами. Квантовый компьютер встроен в классическое окружение, состоящее из управляющего классического компьютера и генераторов импульсов, управляющих эволюцией кубитов, и средствами измерения состояний кубитов (рисунок 11)

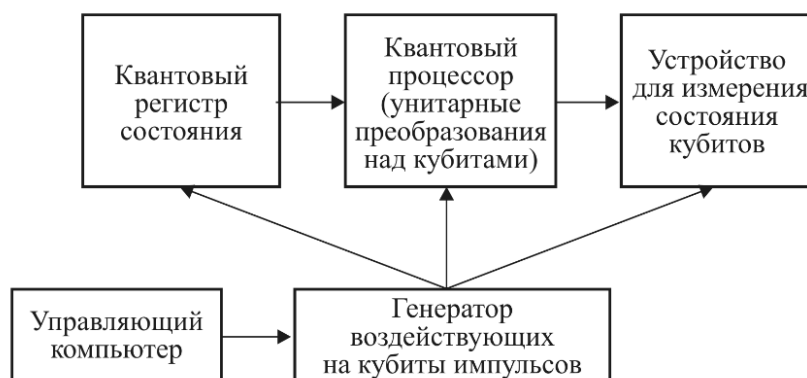


Рисунок 11 – Схема квантового компьютера

Квантовый компьютер является цифровым вероятностным компьютером с аналоговым управлением, что отличает его от всех типов классических компьютеров.

Основная проблема физической реализации идеального квантового компьютера — это быстрый распад чистых квантовых суперпозиционных состояний. Этот процесс называется декогеренцией и накладывает основное требование на физические элементы квантового компьютера: время сохранения ²³⁷ когерентности состояния должно быть больше времени вычисления. Существует два способа избежать распада когерентности:

- а. квантовую систему максимально изолировать от окружения (сделать её замкнутой).;
- б. увеличить время когерентности искусственно.

Главные технологии для квантовых компьютеров:

— Твердотельные квантовые точки на полупроводниках: логические кубиты основаны на зарядовых состояниях или спине электронов/ядер.

Управление осуществляется через внешние потенциалы или лазерные импульсы.

— Сверхпроводящие элементы: используются джозефсоновские переходы и сквиды, где логические кубиты определяются наличием куперовских пар. Управление происходит через внешний потенциал или магнитный поток.

— Ионы в вакуумных ловушках Пауля: логические кубиты используют основное и возбужденное состояния внешнего электрона в ионе. Управление – классические лазерные импульсы.

— Смешанные технологии: применяют заранее приготовленные запутанные состояния фотонов для управления атомными ансамблями или для интеграции с классическими вычислительными сетями.

Разработки квантового компьютера активно продолжаются, и хотя уже достигнуты значительные успехи, повседневное применение этой технологии все еще остается вдалеке. Учёные и инженеры сталкиваются с множеством технических и теоретических вызовов, которые необходимо преодолеть, прежде чем квантовые компьютеры смогут стать частью нашей повседневной жизни.