

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

В. Я. Костюченко, И. Н. Карманов, А. С. Сырнева

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И ФОТОНИКИ

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия для обучающихся по направлению подготовки
12.03.03 Фотоника и оптоинформатика (уровень бакалавриата)

Новосибирск
СГУГиТ
2023

УДК 621.383(075.8)

К727

Рецензенты: кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
Д. Ю. Протасов

доктор технических наук, профессор СГУГиТ *С. В. Савелькаев*

Костюченко, В. Я.

К727 Современные проблемы квантовой электроники и фотоники : учебное пособие / В. Я. Костюченко, И. Н. Карманов, А. С. Сырнева. – Новосибирск : СГУГиТ, 2023. – 56 с. – Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-907711-49-5

Учебное пособие подготовлено доктором физико-математических наук, доцентом В. Я. Костюченко, кандидатом технических наук, доцентом И. Н. Кармановым, кандидатом технических наук А. С. Сырневой на кафедре физики СГУГиТ.

Содержит теоретический и практический материал по дисциплинам: «Современные проблемы квантовой электроники», «Современные проблемы фотоники».

Учебное пособие предназначено для обучающихся по направлению подготовки 12.03.03 Фотоника и оптоинформатика (уровень бакалавриата).

Рекомендовано к изданию кафедрой физики, Ученым советом Института оптики и технологий информационной безопасности СГУГиТ.

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

УДК 621.383(075.8)

ISBN 978-5-907711-49-5

© СГУГиТ, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Полупроводниковые источники фотонов	9
1.1. Полупроводниковые светоизлучающие диоды.....	9
1.2. Гетероструктуры.....	12
1.3. Лазерные диоды	14
1.4. Квантово-размерные лазеры.....	17
1.5. Перспективы развития квантово-размерных источников фотонов	19
2. Приемники фотонов на основе полупроводниковых материалов	24
2.1. Фотодиоды.....	24
2.2. Матричные детекторы фотонов	27
2.3. Фотоприемники ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазонов	29
2.4. Перспективы создания и совершенствования приемников фотонов	32
3. Транспорт фотонов	38
3.1. Волоконно-оптические системы связи.....	38
3.2. Перспективы прогресса волоконно-оптических систем связи.....	42
Заключение	47
Библиографический список.....	48
Приложение. Примерные темы рефератов	54

ВВЕДЕНИЕ

В предлагаемом учебном пособии рассмотрены современные технические устройства, применяемые для генерации электромагнитного излучения (фотонов), «транспортировки» фотонов на расстояние и их регистрации с целью передачи информации. Принципы работы этих устройств основаны на физических законах поведения электронов и фотонов. Электроны, которые имеют дискретные (квантовые) значения энергии, переходя из одного разрешенного квантового состояния в другое, испускают или поглощают кванты электромагнитного излучения (фотоны).

Электрон – стабильная элементарная частица с массой покоя $m_e = (9,1093897 \pm 0,0000054) \cdot 10^{-31}$ кг; с отрицательным электрическим зарядом, равным по модулю элементарному заряду e (наименьший заряд, встречающийся в природе в свободном состоянии) $q_e = -e = -1,6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл. Электрон обладает полуцелым спином $\frac{1}{2}$ (следовательно, он является фермионом и подчиняется принципу запрета Паули) и магнитным моментом.

В 1838 г. британский естествоиспытатель Ричард Лэминг впервые выдвинул гипотезу о неделимом количестве электрического заряда для объяснения химических свойств атомов. Ирландский физик Джордж Джексон Стони в 1891 г. назвал этот заряд «электроном» (от греческого ἤλεκτρον – «янтарь»).

В 1897 г. во время эксперимента с электронно-лучевой трубкой Дж. Дж. Томсон и его коллеги британские физики идентифицировали электрон как частицу.

В 1924 г. французский физик Луи де Бройль выдвинул гипотезу о том, что частицы материи могут быть представлены в виде волн, названных позже волнами де Бройля. Далее работы Эрвина Шредингера, Вольфганга Паули и других привели к развитию основ квантовой механики и фотоники.

Фотон (квант света) – элементарная частица света. Согласно квантовой теории, электромагнитные волны представляют собой поток фотонов,

энергия которых определяется формулой Планка и равна $h\nu$, где h – постоянная Планка, ν – частота электромагнитной волны. Как корпускула, фотон обладает импульсом в направлении движения $h\nu/c$, где c – скорость света в вакууме. Фотон является электрически нейтральной частицей, имеет целый спин, равный 1 (следовательно, фотон относится к бозонам и не подчиняется принципу запрета Паули), нулевую массу покоя, т. е. может существовать только в движении со скоростью c . Квантовый характер излучения и поглощения энергии электромагнитного поля был постулирован М. Планком в 1900 г. для объяснения свойств теплового излучения.

В 1905–1917 гг. Альберт Эйнштейн посвятил ряд своих работ разрешению противоречий между теорией и результатами экспериментов, которые нельзя было объяснить, исходя из волновых представлений о свете. В частности, ему удалось теоретически обосновать закономерности такого явления, как фотоэффект, за что в 1921 г. ему была присуждена Нобелевская премия по физике.

Термин «фотон», который произошел от греческого слова φῶς, означающего свет, введен химиком Гилбертом Льюисом в 1926 г.

Электроника – это научная и инженерная дисциплина, изучающая принципы физики для проектирования, создания и эксплуатации устройств, которые «манипулируют» электронами и другими электрически заряженными частицами. Электроника охватывает такие области, как микроэлектроника, наноэлектроника, оптоэлектроника и квантовая электроника.

Квантовая электроника изучает теорию и практическую реализацию генерации и преобразования электромагнитных волн (включая радио- и оптический диапазоны), основанных на эффекте вынужденного излучения и обратной связи, а также взаимодействие излучения с веществом.

Источниками излучения в квантовой электронике являются лазер и мазер, которые позволяют, в отличие от естественных источников света, управлять частотой, расходимостью, длительностью и другими свойствами излучения. Следует заметить, что это излучение отличается высокой степенью монохроматичности.

Датой рождения квантовой электроники можно считать 1954 г., когда Н. Г. Басов и А. М. Прохоров в СССР и независимо Дж. Гордон, Х. Цайгер

и Ч. Таунс в США создали первый квантовый генератор (мазер) на молекулах аммиака.

В 1958 г. Н. Г. Басов, Б. Н. Вул и Ю. Н. Попов заложили основы теории полупроводниковых лазеров, а уже в 1962 г. был создан первый твердотельный инжекционный лазер.

В настоящее время лазеры широко используются практически во всех сферах деятельности человека, в том числе в системах оптической связи и обработки информации, в которых сочетаются принципы волоконной и интегральной оптики.

Фотоника – наука о способах генерации, передачи и регистрации, с целью практического применения электромагнитного излучения (включая свет), квантовой единицей которого является фотон. Сравнительно новый термин «фотоника» возник по аналогии с хорошо известным термином «электроника».

Фотоника – это современное состояние науки о взаимодействии света и вещества, а также многочисленные технологические приложения, в том числе связанные с передачей информации по оптическому каналу. Продолжающееся развитие технологий изготовления оптических устройств породило нанофотонику, имеющую дело с оптическими процессами, происходящими на субволновых (нанометровых) пространственных масштабах. Нанофотонные устройства и системы включают квантово-размерные структуры, такие как квантовые точки, квантовые «провода», наночастицы и периодические наноструктуры, используемые для синтеза метаматериалов с экзотическими оптическими свойствами, такими как отрицательный показатель преломления. В 2023 г. за открытие и синтез квантовых точек Нобелевской премии по химии удостоены М. Бавенди, Л. Брюс из США, а также советский физик А. И. Екимов.

В последние годы возрастают связи между фотоникой и квантовой электроникой, усиливаемые все более значимой ролью, которую играют в оптических системах полупроводниковые материалы и устройства. Эти области науки и техники перекрываются, поскольку электроны часто управляют потоком фотонов и, наоборот, фотоны управляют потоками электронов.

Термин «фотоэлектроника» известен лишь специалистам, но достижениями фотоэлектроники человечество пользуется очень широко.

Например, сейчас практически у всех есть мобильные телефоны с цифровой камерой, основным рабочим элементом которой является фотоматрица, преобразующая энергию фотонов в энергию движения электронов, то есть в электрический сигнал. Проводя существенную часть жизни у телевизора или монитора, зритель зачастую не знает, что перед ним изображение, полученное с помощью видеокамеры с фотоматрицей. Когда мы пользуемся дистанционным управлением, оптический сигнал с пульта регистрируют и дешифруют специализированные фотоприемные устройства.

Революционные изменения произошли в бытовом освещении при замене ламп накаливания и люминисцентных ламп на светодиоды.

Невозможно представить без фотоэлектроники не только наш быт, но и современное оружие, науку и промышленность. Опыт последних лет показал, что эффективность современных боевых действий во многом обусловлена применением таких устройств, как беспилотные летательные аппараты (БПЛА), которые оснащаются системами технического зрения, работающими в инфракрасном (ИК), видимом и ультрафиолетовом (УФ) диапазонах электромагнитного спектра. Такие системы также представляют собой фотоэлектронные устройства.

Следует заметить, что пособие рассчитано на обучающихся, которые в перспективе планируют работать в области фотоники по направлению оптической связи и оптоинформатики. В конце каждого подраздела приводится список контрольных вопросов, которые должны способствовать переосмыслению и закреплению предлагаемого материала. В приложении приведен примерный перечень тем рефератов по рассматриваемым дисциплинам.

Контрольные вопросы

1. Что такое электрон? Каковы его основные характеристики?
2. Что такое фотон? Каковы его основные характеристики и свойства?
3. Что такое электроника?
4. Что является предметом изучения квантовой электроники?
5. Назовите основные источники излучения, с которыми работает квантовая электроника. В каких областях науки и техники они используются?
6. Что означает термин «фотоника»?

7. Чем занимается нанофотоника?

8. Каковы основные области применения современных фотоэлектронных устройств?

1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИСТОЧНИКИ ФОТОНОВ

1.1. Полупроводниковые светоизлучающие диоды

Полупроводниковые светоизлучающие диоды (СИД) и лазерные диоды служат электронно-фотонными преобразователями. Эти источники фотонов стали незаменимыми благодаря своим малым размерам, большой яркости, высокой эффективности, надежности, прочности и долговечности [2].

Свет может излучаться полупроводником в результате электронно-дырочной рекомбинации. Однако материалы, способные излучать такой свет, не светятся при комнатной температуре, так как количество термически возбужденных свободных электронов и дырок мало, чтобы породить заметное излучение. С помощью внешнего источника энергии можно вызвать рождение электронно-дырочных пар в достаточном количестве, чтобы за счет процессов их рекомбинации возникло свечение (люминесценция) материала. Удобным способом является прямое смещение p - n -перехода, вызывающее инжекцию электронов и дырок в одну и ту же область пространства в окрестности перехода. Возникающее при этом рекомбинационное излучение называется инжекционной электролюминесценцией. Светоизлучающий диод представляет собой прямосмещенный p - n -переход (рис. 1.1).

Схема простого диода на p - n -гомопереходе приведена на рис. 1.2. Постоянный ток инжекции i приводит к увеличению стационарной концентрации носителей Δn , что, в свою очередь, вызывает радиационную рекомбинацию в объеме активной области V .

Основными характеристиками СИД являются внутренний поток фотонов и внутренний квантовый выход. *Внутренний квантовый выход* η_i есть отношение потока создаваемых фотонов к потоку инжектируемых электронов.

Современное производство СИД связано с трех- и четырехкомпонентными соединениями III–V групп, особенно InGaAsP, AlInGaP и AlInGaN. С помощью СИД легко генерируется свет высокой яркости всех цветов радуги, от инфракрасного до ультрафиолетового.

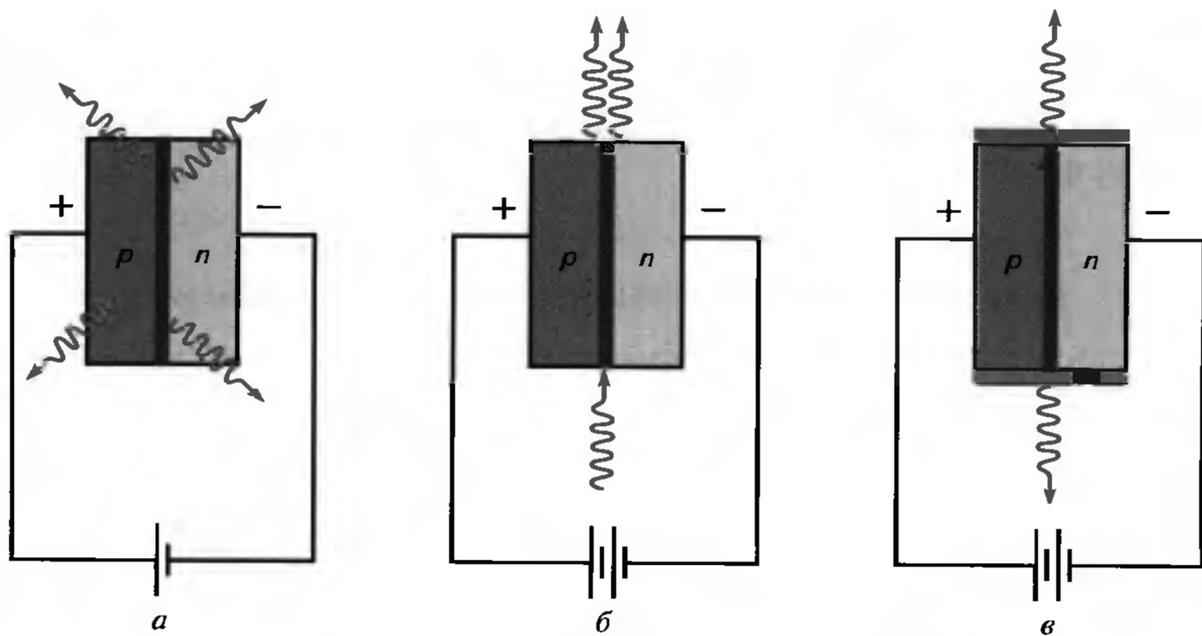


Рис. 1.1. Прямосмещенный полупроводниковый диод на p - n -переходе, действующий как: a – светоизлучающий диод (СИД); $б$ – полупроводниковый оптический усилитель (ПОУ); $в$ – лазерный диод (ЛД)

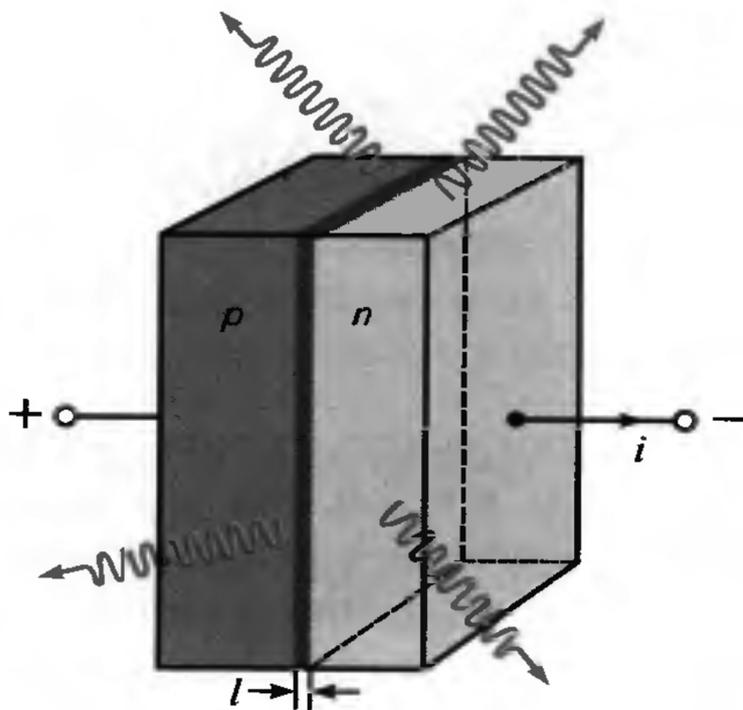


Рис. 1.2. Диод на p - n -гомопереходе

СИД может иметь конфигурацию поверхностного или торцевого излучателя. СИД с поверхностным излучателем испускает свет с грани прибора, параллельной плоскости активной области. СИД с торцевым излучателем испускает свет с торца активного слоя.

GaAs был использован для изготовления первого лазерного диода с длиной волны излучения $\lambda=0,873$ мкм. Далее электролюминесценция была обнаружена у других двухкомпонентных прямозонных полупроводников III–V групп: CaSb ($\lambda=1,7$ мкм), InP ($\lambda=0,919$ мкм), InAs ($\lambda=3,44$ мкм), InSb ($\lambda=7,29$ мкм).

У четырехкомпонентного полупроводника $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ за счет изменения состава можно менять ширину запрещенной зоны, что позволяет изменять длину волны в диапазоне $0,549 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 3,44 \text{ мкм}$.

Четырехкомпонентный полупроводник $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})\text{In}_{1-y}\text{P}$ позволяет перекрыть значительную часть ближнего инфракрасного и видимого спектра. СИД на основе этого материала используется в таких устройствах, как лазерные указки и DVD-плееры.

На основе материала GaN изготавливаются СИД для ультрафиолетовой области спектра.

Смесь красного, зеленого и синего света воспринимается как белый свет. СИД белого света вытесняют лампы накаливания в качестве средств освещения жилых и производственных помещений. Основное преимущество СИД перед лампами накаливания состоит в высоком коэффициенте полезного действия и светоотдаче.

Контрольные вопросы

1. За счет какого процесса происходит излучение света полупроводником?
2. Как возникает инжекционная электролюминесценция?
3. Как устроен светоизлучающий диод?
4. Что называется внутренним квантовым выходом?
5. Какие химические соединения в настоящее время используются при производстве светоизлучающих диодов?
6. В чем преимущество светоизлучающих диодов по сравнению с традиционными лампами при использовании для освещения?

1.2. Гетероструктуры

Коэффициент усиления диодного лазера меняется обратно пропорционально толщине активной области. Поэтому выгодно уменьшать эту толщину насколько возможно. Размер активной области определяется диффузионной длиной неосновных носителей по обе стороны перехода. Концепция двойной гетероструктуры состоит в формировании потенциальных барьеров по обе стороны p - n -перехода; получается потенциальная яма, ограничивающая расстояние, на которое могут диффундировать неосновные носители заряда. Барьеры определяют область пространства, в которой оказываются запертыми неосновные носители, что позволяет получать активные области малой толщины $l = 0,1$ мкм. Еще более тонкие активные слои, до $\approx 0,01$ мкм, получают с помощью квантовых ям.

Одновременно может быть достигнуто и электромагнитное удержание усиливаемого оптического пучка, если материал активного слоя подобрать так, чтобы его показатель преломления был немного больше окружающих слоев. Тогда структура ведет себя как оптический волновод.

Таким образом, для изготовления двойной гетероструктуры требуется три слоя из различных, но согласованных по решетке материалов, как показано на рис. 1.3:

слой 1: p -тип, ширина запрещенной зоны E_{g1} , показатель преломления n_1 ;

слой 2: p -тип, ширина запрещенной зоны E_{g2} , показатель преломления n_2 ;

слой 3: n -тип, ширина запрещенной зоны E_{g3} , показатель преломления n_3 .

Материалы подбираются так, чтобы E_{g1} и E_{g3} были больше, чем E_{g2} , что обеспечивает удержание носителей заряда, и, одновременно, чтобы n_1 и n_3 были немного меньше n_2 , что обеспечивает удержание фотонов. Активный слой (слой 2) делается очень тонким (0,1–0,2 мкм) для минимизации плотности инжекционного тока, обеспечивающего прозрачность, и, следовательно, достижения наибольшего пикового коэффициента усиления. Вынужденное испускание наблюдается в p - n -переходе между слоями 2 и 3.

Преимущества, получаемые при использовании двойной гетероструктуры, следующие.

Повышение усиления при заданной плотности тока инжекции в результате уменьшения толщины активного слоя. Инжектируемые неосновные носители удерживаются в тонком активном слое между двумя барьерами, создаваемыми гетеропереходами и предотвращающими диффузию в окружающие слои.

Повышение усиления за счет удержания фотонов внутри активного слоя, имеющего больший показатель преломления. Активная среда ведет себя как волновод.

Понижение потерь в результате неспособности слоев 1 и 3 поглощать удерживаемые волноводом фотоны, так как ширины запрещенных зон этих слоев E_{g1} и E_{g3} больше энергии фотонов ($h\nu = E_{g2} < E_{g1}, E_{g3}$).

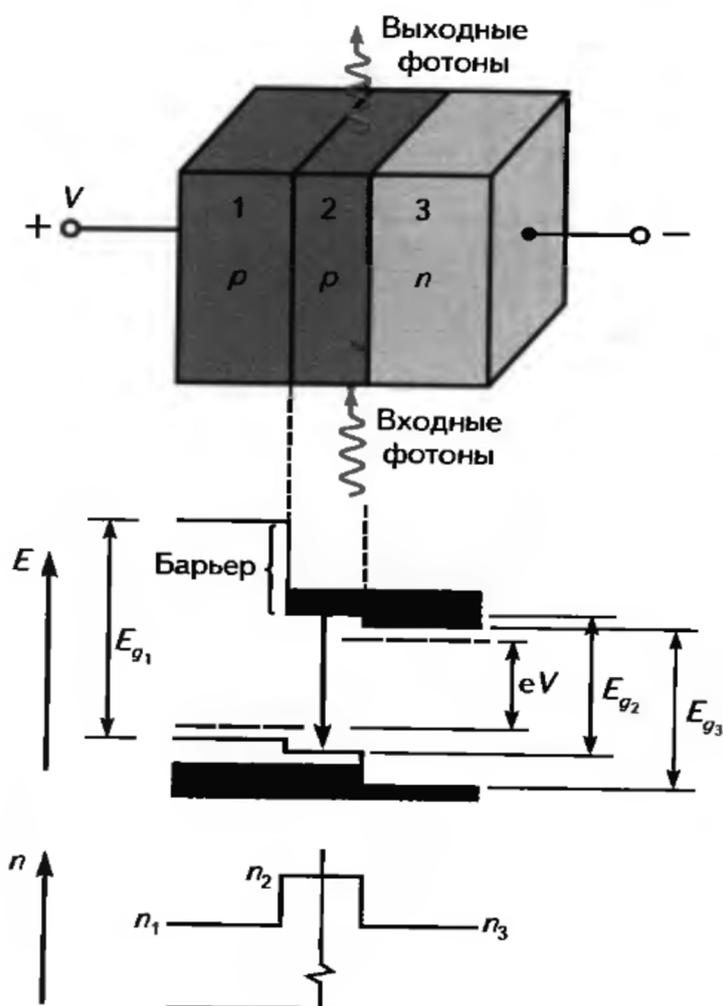


Рис. 1.3. Схема энергетических зон и профиль показателя преломления для ПОУ с двойной гетероструктурой

Приведем два примера полупроводниковых оптических усилителей с двойной гетероструктурой.

Усилительный лазерный диод с двойной гетероструктурой InGaAsP/InP. Активный слой $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ окружен слоями InP. Параметры состава x и y выбраны так, чтобы постоянные решетки материалов совпадали. Таким образом, рабочий интервал параметров x и y определяется требованием соответствия E_{g2} длине волны, лежащей в полосе 1,1–1,7 мкм.

Усилительный лазерный диод с двойной гетероструктурой GaAs/AlGaAs. Активный слой (слой 2) изготавливается из GaAs ($E_{g2} = 1,42$ эВ, $n_2 = 3,6$). Окружающие слои (1 и 3) изготовлены из $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с $E_g > 1,43$ эВ и $n < 3,6$ (на 5–10 %). Этот усилитель обычно работает в полосе длин волн 0,82–0,88 мкм при значениях параметра состава x от 0,35 до 0,5.

Контрольные вопросы

1. Почему при создании диодных лазеров стремятся уменьшить толщину активной области?
2. Как работает двойная гетероструктура?
3. Из чего изготавливается двойная гетероструктура?
4. Какие преимущества дает использование двойной гетероструктуры?
5. Какие полупроводниковые материалы могут быть использованы для изготовления гетероструктур?

1.3. Лазерные диоды

Лазерный диод представляет собой полупроводниковый оптический усилитель с оптической обратной связью. Полупроводниковый оптический усилитель основан на прямосмещенном сильно легированном p – n -переходе из прямозонного полупроводникового материала. Ток инжекции достаточно велик для обеспечения оптического усиления. Оптическая обратная связь обеспечивается зеркалами, которые обычно создаются путем раскалывания полупроводникового материала вдоль его кристаллических плоскостей. Резкий скачок показателя преломления на границе раздела полупроводника и окружающего воздуха обуславливает отражающее действие поверхностей скола кристалла. Полупроводниковый кристалл

одновременно служит и усиливающей средой, и оптическим резонатором Фабри – Перо, как показано на рис. 1.4.

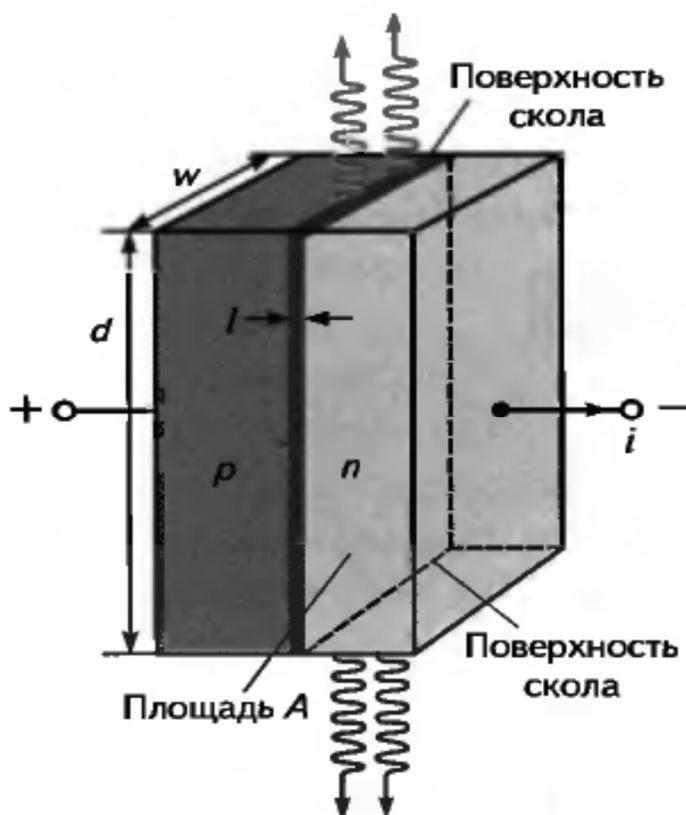


Рис. 1.4. Лазерный диод – прямосмещенный p – n -переход с двумя параллельными поверхностями, действующими как резонатор

При условии достаточно высокого коэффициента усиления обратная связь превращает усилитель в генератор, т. е. лазер. Устройство называется лазерным диодом, или диодным лазером (иногда употребляется также термин «полупроводниковый инжекционный лазер»).

Свет, излучаемый СИД, возникает благодаря спонтанному излучению (люминесценции), а излучение ЛД происходит за счет вынужденной генерации.

Лазерные диоды имеют ряд преимуществ по сравнению с другими типами лазеров: высокую мощность, высокий коэффициент полезного действия, малые размеры, совместимость с элементной базой электроники,

легкость накачки и модуляции через ток инжекции. Однако большая спектральная ширина и более низкая когерентность излучения могут быть препятствием для использования ЛД в некоторых приложениях.

Эффективность лазерного диода характеризуется четырьмя параметрами [2]:

1) внутренний квантовый выход $\eta_i = \frac{r_{\text{рад}}}{r} = \frac{\tau}{\tau_{\text{рад}}}$, учитывающий то, что

не все акты электронно-дырочной рекомбинации являются радиационными;

2) коэффициент вывода η_e , учитывающий то, что используется только часть света, теряемого в резонаторе;

3) внешний дифференциальный квантовый выход $\eta_d = \eta_e \eta_i$, учитывающий оба вышеупомянутых эффекта;

4) коэффициент преобразования мощности (коэффициент полезного действия) η , представляющий собой отношение мощности излучаемого света к электрической мощности, потребляемой прибором.

Полезной рабочей характеристикой является также дифференциальная чувствительность R_d (Вт/А).

Как видно из сравнения спектральных характеристик излучения СИД, сверхлюминесцентного диода (СЛД) и ЛД, изготовленных на основе структур InGaAsP/InP и работающих на длине волны 1 600 нм (рис. 1.5), СИД имеет широкий спектр, ЛД – узкий, а СЛД – промежуточный.

Контрольные вопросы

1. Чем отличается лазерный диод от светоизлучающего диода?
2. Что играет роль резонатора в диодном лазере?
3. В чем преимущества лазерных диодов по сравнению с лазерами других типов?
4. Каковы основные недостатки диодного лазера?
5. Перечислите основные характеристики эффективности диодного лазера.
6. Чем отличаются друг от друга спектры излучения светоизлучающего диода, сверхлюминесцентного диода и лазерного диода?

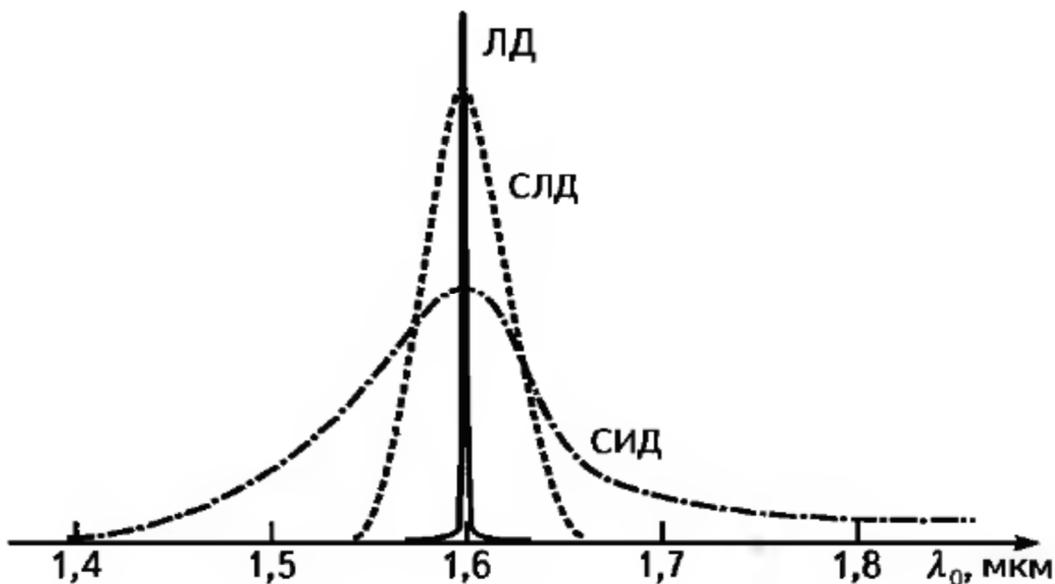


Рис. 1.5. Нормированная спектральная интенсивность для светоизлучающего диода (СИД), сверхлюминесцентного диода (СЛД) и лазерного диода (ЛД)

1.4. Квантово-размерные лазеры

Квантово-размерные лазеры, в которых носители заключены в областях с размерами меньше длины волны де Бройля теплового электрона (50 нм в GaAs), имеют превосходные рабочие характеристики и являются самыми распространенными из всех полупроводниковых лазерных диодов. Удержание носителей в одном, двух и трех измерениях соответствует конфигурациям типа квантовой ямы, квантового проволоки и квантовой точки (рис. 1.6).

Носители заряда удерживаются в активной области ограничивающими слоями, а брэгговские отражатели служат зеркалами.

С уменьшением размерности полупроводниковой структуры спектральный контур коэффициента усиления, как правило, становится выше и уже, обеспечивая меньший пороговый ток, больший внешний дифференциальный квантовый выход и более узкую линию излучения. Однако в то же время уменьшается объем области взаимодействия, что приводит к снижению выходной мощности лазеров на квантовых проволоках и квантовых точках [2].

Полупроводниковые лазеры работают на длинах волн, область которых простирается от среднего ультрафиолета до дальнего инфракрасного

диапазона, а выходные мощности могут быть от нановатт до киловатт (для матриц лазерных диодов). По существу, все полупроводниковые лазеры, используемые в настоящее время, имеют активные области с квантово-размерными структурами.

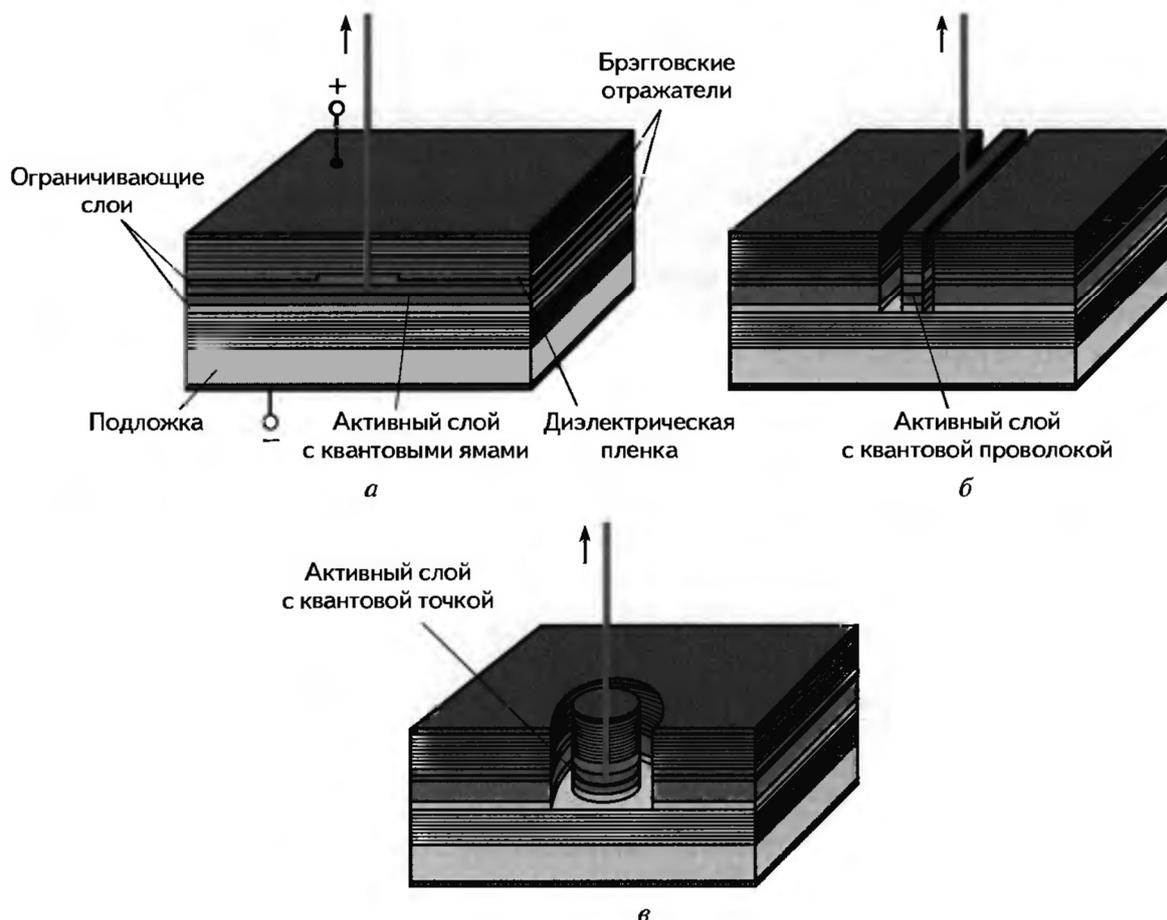


Рис. 1.6. Схема квантово-размерных лазерных структур с квантовой ямой (а), квантовой проволокой (б), квантовой точкой (в)

Контрольные вопросы

1. Что означает термин «квантово-размерный лазер»?
2. В чем заключается разница между квантовой ямой, квантовой проволокой и квантовой точкой?
3. Что играет роль зеркал резонатора в квантово-размерном лазере?
4. Как влияет размерность лазера на спектр излучения и на выходную мощность?

1.5. Перспективы развития квантово-размерных источников фотонов

В настоящее время одним из наиболее актуальных направлений является разработка источников одиночных фотонов. Активные усилия прилагаются по повышению надежности процесса однофотонной генерации. Надежные источники одиночных фотонов необходимы, к примеру, для реализации такого перспективного направления в области защиты информации, как квантовая криптография.

Продемонстрирована возможность [3] формирования в гетероструктурах GaAs/AlGaAs/InGaP квантовых точек InGaP(As) путем замещения элементов 5-й группы непосредственно в процессе эпитаксиального роста методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) с оценочной плотностью $1,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. В настоящее время, в связи с развитием квантовых оптических информационных технологий, растет потребность в создании истинных генераторов одиночных фотонов (ГОФ). Наиболее перспективным способом получения монолитного ГОФ с электрической накачкой представляется подход на основе использования микрорезонатора, в котором при помощи эпитаксиальных технологий сформированы активные квантовые точки (КТ). Принципиальной задачей формирования такого ГОФ является достижение минимально возможной плотности КТ по поверхности полупроводниковой пластины с сохранением эффективной фотолюминесценции от КТ, поэтому получение ансамбля КТ с поверхностной плотностью $\sim 10^{10} \text{ см}^{-2}$ и менее в системах материалов АЗВ5 является крайне актуальной задачей для изготовления однофотонных приборов [4].

Идея создания двухфотонных лазеров, в которых релаксация электронов между квантовыми уровнями с инверсией населенностей происходит за счет одновременного излучения двух фотонов, была высказана еще в 1960-х гг. [5]. Такие лазеры имеют огромный потенциал для приложений в частотной метрологии, квантовых гироскопах, квантовой криптографии, квантовых вычислениях и для генерации запутанных пар фотонов в дополнение ко многим обычным частотнозависимым применениям лазеров. Однако на сегодняшний день потенциал двухфотонных лазеров остается в значительной степени неисследованным, поскольку их экспериментальная реализация является сложной задачей [6].

Разработана и реализована конструкция микрорезонаторов для излучателей одиночных фотонов на основе $Al_xGa_{1-x}As$ зеркал и $Al_yIn_{1-y}As$ КТ [7]. С использованием интерферометра Хэнбери Брауна – Твисса исследована статистика излучения одиночных $Al_yIn_{1-y}As$ КТ.

Квантово-криптографические линии связи обеспечивают безопасность передаваемой информации, основываясь на законах квантовой механики. После передачи поляризованных одиночных фотонов по оптоволоконному или атмосферному каналу связи отправитель и получатель генерируют секретный двоичный ключ. С помощью данного ключа отправитель зашифровывает свое сообщение и пересылает его получателю по открытому каналу связи [8]. В работе [9] для генерации «просеянного» квантового ключа на расстоянии 10 м между передатчиком и приемником температура лавинных фотодиодов была понижена до $-20\text{ }^\circ\text{C}$, а эффективность однофотонной регистрации увеличена до 40 %. В результате скорость генерации «просеянного» квантового ключа составила 9 кбит/с, а уровень ошибочных битов в ключе – 7 %.

Практический интерес представляют также разработки новых перспективных источников ИК-излучения.

Одним из вариантов решения проблемы создания источников излучения ближнего ИК-диапазона на кремнии являются структуры с наноструктурами $Ge(Si)$. Будучи совместимыми с технологией интегральных схем, такие структуры излучают в диапазоне длин волн 1,2–1,6 мкм, в том числе и при комнатной температуре. Увеличение люминесцентного отклика таких структур возможно в двумерных фотонных кристаллах (ФК) [10].

Значительное различие в ширине запрещенной зоны для $GaSb$ (0,812 эВ) и GaP (2,35 эВ) [11] позволяет варьировать излучение $GaSb/GaP$ гетероструктур от ближнего инфракрасного до видимого диапазона длин волн. В работе [12] изучалась фотолюминесценция (ФЛ) квантовых ям (КЯ) $GaSbP$, сформированных в матрице GaP . Обнаружено, что интенсивность ФЛ гетероструктуры с КЯ примерно в сто раз больше, чем интенсивность ФЛ в эпитаксиальном слое GaP .

Проводится работа с целью создания новых излучательных систем с применением новых материалов и исследования люминесценции в квантово-размерных структурах. Разработка и исследование новых

светоизлучающих структур пониженной размерности представляет высокий практический интерес для получения высокоэффективных оптоэлектронных устройств. Особый интерес представляют люминесцентные материалы, в которых вариация технологических параметров получения позволяет изменять спектральное положение излучательных полос за счет проявления квантово-размерного эффекта. Одними из таких материалов, который активно исследуется в последние годы, являются кристаллы галогенидных перовскитов [13]. Благодаря своим уникальным люминесцентным и оптическим свойствам отмеченные кристаллы исследуются для применения в лазерах, солнечных элементах, сцинтилляторах и конверторах излучения [14, 15].

В работах [10, 16] показано, что использование 2D фотонных кристаллов позволяет значительно, на порядки, увеличить интенсивность сигнала люминесценции SiGe структур при комнатной температуре. В работе [17] для структур с Ge(Si) самоформирующимися наноостровками реализована электрическая накачка ФК за счет формирования латеральных p^+-i-n^+ диодов с Ge(Si) КТ.

Получение электролюминесцентного (ЭЛ) материала в прозрачном для оптоволоконных линий спектральном диапазоне 1,5 мкм по технологии, совместимой с кремниевой, откроет возможность гибридизации оптической системы передачи данных с электронными системами обработки информации на уровне процессоров и позволит развить элементную базу оптических коммуникационных систем. В работе [18] рассматривается альтернативный общепринятому АЗВ5 класс материалов: легированные редкоземельными элементами оксиды, а именно пленки $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Er}$ на кремнии. Было осуществлено апробирование гетероперехода $\text{Si}/\text{In}_2\text{O}_3:\text{Er}$ для получения ЭЛ. Исследовались пленки $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Er}$, магнетронно напыленные на подложку кремния. Микроскопическая структура пленок варьируется в зависимости от режима напыления: от пучков кристаллических нанонитей, сплетенных в отдельные наностолбцы [57], до плотно прилегающих кристаллических наностолбцов.

В работе [19] сообщается о создании лабораторного образца спинового светоизлучающего диода. Образец представляет комбинацию излучающей структуры (КЯ $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ со спиновым инжектором CoPd)

и спинового клапана, сформированного путем напыления тонких слоев Cr/Co₉₀Fe₁₀/Cu/Co₉₀Fe₁₀. Выращенный образец имеет четыре независимо изменяемых состояния (излучение высокой/низкой интенсивности с правой/левой циркулярной поляризацией), которые соответствуют наличию продольных и поперечных компонент магнитного поля.

Гетероструктуры на основе InGaAs/GaAs с ферромагнитным инжектором CoPt используются для изготовления спиновых светоизлучающих диодов (ССИД), испускающих циркулярнополяризованный свет [20]. При этом величина степени циркулярной поляризации в таких диодах зависит как от эффективности спиновой инжекции из намагниченного слоя CoPt, так и от спиновой релаксации, возникающей в процессе переноса спин-поляризованных носителей от ферромагнитного инжектора к активной области ССИД. В работе [21] представлены результаты исследования модификации пленки CoPt облучением ионами He⁺ на циркулярную поляризацию ССИД. В работе показана возможность управления степенью циркулярной поляризации спиновых светоизлучающих диодов с CoPt инжектором путем воздействия на готовые диоды ионным облучением He⁺ небольшой энергии и дозы.

Полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором (ЛВР) относятся к числу наиболее миниатюрных лазерных излучателей, разработанных к настоящему времени, их характерные размеры – единицы микрометров. Лазерный чип ЛВР имеет размер 300 × 300 мкм².

Длинноволновые вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) 1,55 мкм представляют интерес для реализации оптической передачи данных не только на дальние дистанции, но и на сверхкороткие расстояния (в пределах для гибридной интеграции с кремниевыми оптическими и электронными схемами) [22]. Для получения генерации ВИЛ в спектральном диапазоне 1,55 мкм, в работе [23] использовалась конструкция ВИЛ, совмещающая в себе активную область на основе твердых растворов, выращенных на подложке InP (InAlGaAs/InP) и высокоэффективные брэгговские отражатели на основе AlGaAs/GaAs.

В последнее время активно ведутся исследования микродисковых лазеров. Высокая добротность, вывод излучения в латеральном направлении и малые размеры делают их перспективными для использования в фотонных интегральных схемах. Применение в активной области микролазеров квантовых

точек (КТ) позволяет получить непрерывную работу прибора при повышенных температурах, малые пороговые токи, а также высокие скорости модуляции. Для дальнейшего увеличения скорости передачи данных возможно использование нескольких длин волн. В лазерах на КТ наблюдается эффект двухуровневой генерации [24], когда она протекает одновременно через основной и возбужденный оптические переходы КТ. В работе [25] исследованы, в зависимости от температуры и диаметра микролазера, возможность реализации в микродисковых лазерах на основе КТ различных режимов генерации – через основной переход, через первый возбужденный или двухуровневой генерации, что расширяет возможности кодирования информации с их помощью.

Контрольные вопросы

1. С чем связана актуальность проблемы создания надежных генераторов одиночных фотонов?
2. Что является наиболее сложной проблемой при создании однофотонных источников на квантовых точках?
3. Что такое двухфотонные лазеры и где они применяются?
4. Для чего могут быть использованы структуры с наноостровками Ge(Si)?
5. Что позволяет создание двумерных фотонных кристаллов на основе SiGe структур?
6. Какие возможности дает использование GaSb/GaP гетероструктур с квантовыми ямами?
7. Для чего могут быть использованы новые электролюминесцентные материалы, излучающие вблизи длины волны 1,5 мкм?
8. Какие материалы и структуры могут быть использованы для создания спиновых светоизлучающих диодов?
9. Каковы характерные размеры лазеров с вертикальным резонатором?
10. Для чего могут быть использованы вертикально-излучающие лазеры с длиной волны 1,55 мкм?
11. Какие материалы могут быть использованы для создания вертикально-излучающих лазеров?
12. Каковы отличительные особенности и перспективы применения микродисковых лазеров на квантовых точках?

2. ПРИЕМНИКИ ФОТОНОВ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

2.1. Фотодиоды

Фотоприемник (ФП) – прибор, позволяющий измерять поток поглощенных фотонов или оптическую мощность, преобразуя ее в сигнал другой физической природы, доступный для измерения. Действие фотоэлектрических приемников основано на фотоэлектрическом эффекте (фотоэффект). Фотоэффект бывает двух видов: внешний и внутренний.

Многие ФП, как правило, работают на основе внутреннего фотоэффекта, когда при поглощении фотона возникает электронно-дырочная пара, которая остается внутри объема образца. Фотодиод (ФД) представляет собой структуру с p – n -переходом с обратным электрическим смещением. Обратный ток обусловлен тем, что локальное внутреннее электрическое поле заставляет электроны и дырки двигаться в противоположных направлениях.

Фотогенерированные электроны в n -слое двигаются и рекомбинируют с дырками в p -слое. Это приводит к повышению напряженности встроенного электрического поля, то есть на ФД создается фото-ЭДС, пропорциональная количеству фотонов. Подобный подход используется в солнечных фотоэлементах с целью преобразования энергии света в электрическую энергию.

В 1969 г. был создан лазер на основе гетероструктуры (Ж. И. Алферов, Н. Kroemer) [26].

В 1970 г. L. Esaki и R. Tsu предложили квантово-размерные структуры [27], которые определили дальнейшее направление развития фотоэлектроники.

Чтобы увеличить количество поглощенных ФП фотонов, необходимо, чтобы свет взаимодействовал с фоточувствительным элементом, многократно проходя через него. Это реализуется, когда ФП помещают в полость

отражающего резонатора, что приводит к повышению квантовой эффективности.

ФП в виде $p-i-n$ -светодиода включает $p-n$ -переход со слоем слаболегированного полупроводника между p - и n -слоями (рис. 2.1).

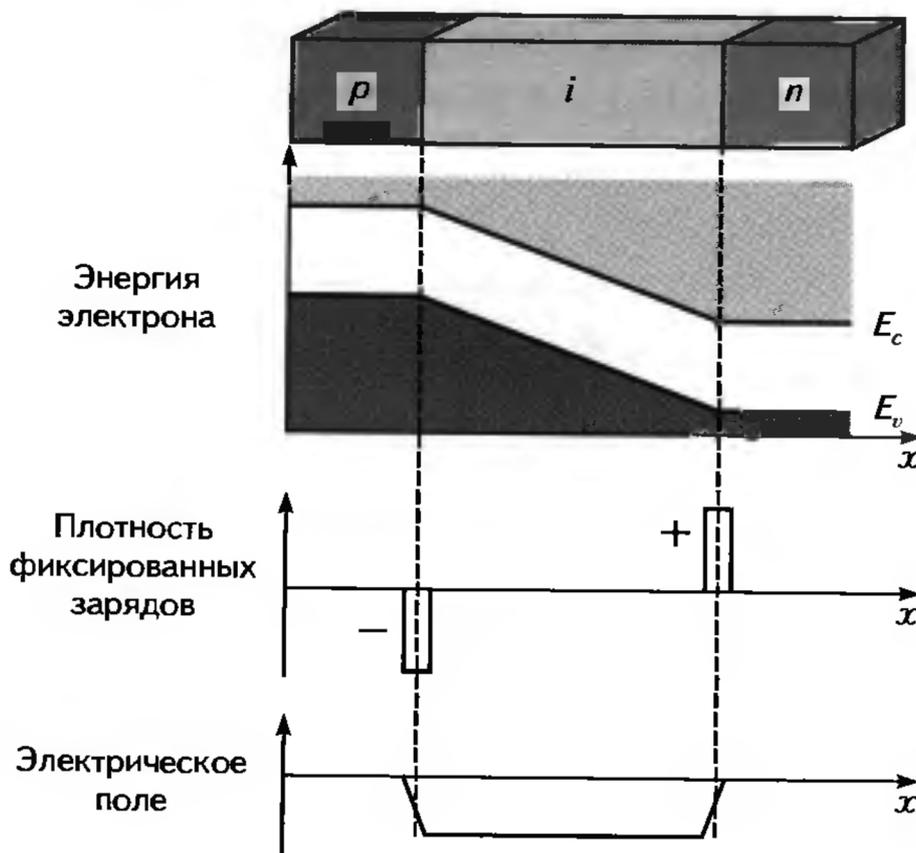


Рис. 2.1. Схема $p-i-n$ -светодиода

В этой структуре увеличивается объем средней области, где есть электрическое поле. Это обуславливает преимущество $p-i-n$ -фотодиода перед $p-n$ -фотодиодами: увеличивается объем, где поглощается больше фотонов; фотогенерируемые носители переносятся более быстрым дрейфом в электрическом поле, чем медленным диффузионным.

Гетероструктурные фотодиоды изготавливаются из двух полупроводниковых материалов с разной шириной запрещенной зоны, а диоды на $p-n$ -переходах — из одного материала. Примером использования гетероструктуры [2] является инфракрасный ФП на квантовых ямах (рис. 2.2).

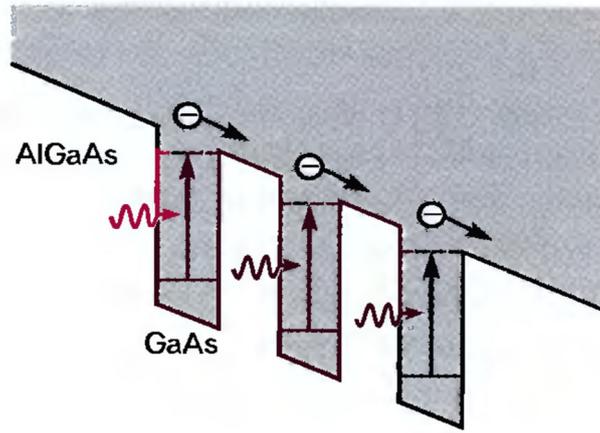


Рис. 2.2. Генерация подвижных носителей заряда при поглощении фотонов в квантовых ямах

Падающие инфракрасные фотоны переводят электроны из дискретного квантового связанного состояния в квантовой яме в свободное состояние, что приводит к увеличению удельной электропроводности материала – фотопроводимости.

Фотодиоды на структурах «металл – полупроводник», называемые фотодиодами на барьерах Шоттки, работают на основных носителях и, следовательно, имеют исходно быстрый отклик большую ширину рабочей полосы.

Лавинный фотодиод (ЛФД) работает на принципе поглощения регистрируемого фотона с рождением электронно-дырочной пары и последующим порождением в нем каскадного размножения пар свободных носителей заряда. В лавинном фотодиоде приложено сильное обратное электрическое смещение, достаточное для приобретения носителями заряда большой энергии, что вызывает развитие процесса ударной ионизации.

Как правило, в оптических системах связи используются два типа детекторов для фотоприема: $p-i-n$ -фотодиод и лавинный фотодиод.

Контрольные вопросы

1. На каком физическом явлении основан принцип действия большинства фотоприемников?

2. Что представляет собой фотодиод и как он действует?
3. Что используется для повышения квантовой эффективности фотодиодов?
4. Как устроен $p-i-n$ -светодиод?
5. Что представляет собой гетероструктурный фотодиод?
6. В чем отличительные особенности фотодиодов на барьерах Шоттки?
7. В чем состоит принцип действия лавинного фотодиода?
8. Какие фотоприемники в основном используются в системах оптической связи?

2.2. Матричные детекторы фотонов

Матричный фотоприемник (МФП) состоит из большого числа ФП и может в реальном времени регистрировать потоки фотонов во множестве точек пространства. МФП содержит большое число фотодетектирующих элементов – пикселов, в виде фотосопротивлений, фотодиодов, лавинных фотодиодов, либо тепловых приемников. Двумерная матрица фотоэлементов предназначена для записи изображения в виде матрицы видеопреобразования и работает по технологиям приборов с зарядовой связью (ПЗС) или комплементарных металлооксидных полупроводников (КМОП).

Кремниевые фотоматрицы с зарядовой связью широко используют производители фото- и видеоаппаратуры. В видеокамере ПЗС-фотоматрица формата 576×768 работает в реальном масштабе времени с телевизионной кадровой частотой 25 Гц. В предназначенной для фотокамеры фотоматрице с восемью мегапикселями из-за большого числа пикселов опрос может продолжаться до секунды.

В перспективе, по своим возможностям матрицы встанут в один ряд с человеческим глазом. Число «ячеек – пикселов» в сетчатке глаза (палочки и колбочки) порядка 10^8 , что сравнимо с числом пикселей в ПЗС-матрице, в настоящее время выпускаемой фирмой Philips для астрономических наблюдений ($0,63 \cdot 10^8$). А по быстродействию, по диапазону спектральной чувствительности кремниевые фото-ПЗС со времени начала их выпуска превосходили человеческий глаз [28].

Еще один тип кремниевых фоточувствительных матриц – КМОП матрицы. Их производство начало развиваться с середины 1990-х гг., и в настоящее время их выпускают больше, чем фото-ПЗС [29]. Эти матрицы содержат матрицу фотоприемников (обычно – фотодиодов) и микросхему опроса и обработки сигнала этих фотоприемников. Одним из преимуществ таких матриц является возможность их выпуска по массовой унифицированной технологии, подобной технологиям цифровых и аналоговых микросхем.

Оптимизация конструкции $p-i-n$ -фотодиодов из кремния обеспечила высокую квантовую эффективность во всем спектральном диапазоне от 0,2 до 1,1 мкм.

Тройное соединение КРТ (кадмий – ртуть – теллур) с молярным составом кадмия 0,7 широко используется для изготовления матриц в системах ночного видения при естественной освещенности. Эти матрицы работают в спектральном диапазоне 0,9÷1,7 мкм [28]. В настоящее время проводятся работы по созданию двухдиапазонных ИК-матриц на основе гетеросистем КРТ, а также на квантово-размерных структурах. Требования, которые предъявляются к фокальным матрицам нового поколения, – чувствительность по крайней мере в двух (а лучше – в трех) спектральных диапазонах. Такие матрицы позволяют идентифицировать объекты с разной температурой.

Достигнуты успехи при разработке двухдиапазонных фокальных матриц на основе множественных квантовых ям. Подобные двухдиапазонные фокальные матрицы форматом 1024 × 1024 и шагом 30 мкм были изготовлены сотрудниками Jet Propulsion Lab [30].

Двухдиапазонные матрицы на сверхрешетках на основе InAs/GaSb фотодиодов, чувствительных в спектральных областях 3÷4 мкм и 4÷5 мкм были изготовлены сотрудниками AIM (Германия) [31].

Появляются матрицы, которые способны формировать не только плоскостное, двумерное изображение, но и объемное (трехмерное, 3D) изображение [28].

Активно ведется разработка смотрящих ИК-матриц больших форматов для диапазонов спектра 3÷5 мкм, 8÷12 мкм (окна прозрачности атмосферы) и создание на их основе тепловизоров, позволяющих вести боевые действия в неблагоприятных метеоусловиях. Тепловизоры, по сравнению

с приборами ночного видения на основе электронно-оптических преобразователей (ЭОП), повышают дальность обнаружения цели примерно вдвое. В настоящее время ЭОП, вакуумные приборы ночного видения вытесняются приборами на основе твердотельных ИК-матриц.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой матричный фотоприемник?
2. Какие основные типы фотоматриц изготавливаются на основе кремния?
3. Для чего используются ПЗС-матрицы?
4. В чем основное преимущество КМОП-матриц?
5. Для чего используется соединение кадмий – ртуть – теллур (КРТ)?
6. Почему тепловизоры на основе ИК-матриц вытесняют приборы ночного видения на основе ЭОП?

2.3. Фотоприемники ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазонов

Ультрафиолетовое излучение лежит в диапазоне длин волн от 0,01 мкм до верхней границы видимого света ($\approx 0,38$ мкм). Ультрафиолетовые фотоприемники (УФ-ФП) в основном (кроме космоса) предназначены для работы в околоземных условиях. Такие фотоприемники можно разделить на два типа: «солнечно-слепые» и «видимо-слепые». Озоновый слой атмосферы Земли поглощает излучение с длиной волны меньше 0,28 мкм. ФП, которые являются видимо-слепыми, излучение видимой области оптического спектра ($0,38 \div 0,76$ мкм) не воспринимают. Солнечно-слепые УФ-ФП не могут «видеть» ни небо, ни цели на фоне неба, но видят, к примеру, часть УФ-люминесцентного излучения в факеле ракеты. Выстрел из легкого стрелкового оружия при сильном солнечном дневном освещении трудно обнаружить, однако применение подобных ФП позволяет зарегистрировать вспышку от выстрела.

Из двух десятков широкозонных полупроводников, на основе которых изготавливают УФ-ФП, к основным можно отнести: GaP, GaN, AlN, $Al_xGa_{1-x}N$, карбид кремния – SiC [32].

В последние десятилетия наблюдается «нитридный бум». Это связано с обнаружением изделий с УФ-излучением. УФ-ФП изготавливают на основе нитрида галлия GaN, нитрида алюминия AlN и их твердых растворов $Al_xGa_{1-x}N$.

ФП на основе еще более широкозонных материалов (например, алмаз) являются солнечно-слепыми и позволяют регистрировать вакуумный ультрафиолет ($0,1 \div 0,2$ мкм) и детектировать рентгеновское излучение, а также ядерные частицы.

УФ-ФП широко применяются для экологического мониторинга, например, контроль разлива пятен нефти, определение содержания различных веществ в атмосфере, обнаружение возгораний и пожаров и т. д.

С 1990-х гг. в мире начали разрабатывать матрицы на ультрафиолетовый диапазон. Изготовлены матрицы, которые имеют высокую однородность: разброс чувствительности не более 8 % (у лучших – 2,5 %), количество неработающих пикселей $0,6 \div 1,5$ % от общего числа пикселей [32]. Квантовый выход лежит в диапазоне $30 \div 65$ %, получена высокая обнаружительная способность.

Фотоприемники на диапазон длин волн $0,38 \div 2$ мкм включают видимую область оптического спектра ($0,38 \div 0,76$ мкм) и ближний ИК-диапазон ($0,76 \div 2$ мкм). На указанную спектральную область приходится большая часть интегральной энергетической светимости естественных источников излучения на Земле – Солнца, дневного и ночного неба.

Первый фотодиод был изготовлен на германии, но в итоге наиболее применимым стал кремний. В каталог фирмы Hamamatsu включено более 100 разновидностей кремниевых ФД [33]. Это фотодиоды с *p-n* и *p-i-n* структурой. *p-i-n*-ФД предназначены для регистрации коротких лазерных импульсов. Создание лавинного фотодиода, подобно счетчику Гейгера, является важнейшим успехом в разработке фотодиодов на основе кремния.

Фотоприемники для средневолнового и длинноволнового ИК-диапазонов, как правило, необходимо охлаждать для уменьшения тепловой генерации носителей, так как они выполнены на основе узкозонных полупроводников. Предназначены они, в основном, для регистрации собственного или отраженного теплового излучения тел на длинах волн более 2 мкм.

Малоэлементные фоторезисторы и в настоящее время изготавливаются на основе PbS, на котором был открыт внутренний фотоэффект. Материалы PbS и PbSe применялись на первом этапе становления современной фотоэлектроники. В 1990–2000-х гг. ФД изготавливались по современной эпитаксиальной технологии [34] из четверных соединений GaInAsSb/GaAlAsSb, InGaAsP/GaAlAsSb. Изменение мольного состава вещества в растворе позволяло изменять чувствительность в диапазонах 2÷3 и 3÷5 мкм. ФД на основе указанных материалов могут работать при комнатной температуре.

В настоящее время изготавливаются ИК-матрицы с гибридной сборкой, то есть такая ФП-матрица соединяется с микросхемой обработки и опроса фотосигнала, формируемого в кремниевом кристалле.

Инфракрасные фотоприемные модули являются основным элементом военных систем изображения. Особенно востребованы ИК-матрицы на диапазон 8÷14 мкм. Это объясняется тем, что при температуре объектов, близкой к 300 К, максимум спектральной плотности энергетической светимости теплового излучения тела приходится на длины волн, попадающие в этот диапазон. Кроме того, в этом диапазоне находится окно пропускания атмосферы, т. е. ИК-излучение на этих длинах волн поглощается слабо.

Для регистрации ИК излучения широко применяют тройное соединение КРТ, $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, где x – мольный состав Cd. В последнее время также используются охлаждаемые матрицы на основе монокристаллического InSb, работающие в диапазоне 3÷5 мкм.

Контрольные вопросы

1. Что означают термины «солнечно-слепые» и «видимо-слепые» УФ-фотоприемники?
2. Какие широкозонные полупроводниковые материалы используются для изготовления УФ-фотоприемников?
3. Каковы области применения УФ-фотоприемников?
4. Какие значения параметров УФ-фотоматриц достигнуты в мире?
5. Почему большинство фотоприемников для среднего и дальнего ИК-диапазонов нуждаются в охлаждении?

6. Какие материалы используются для изготовления ИК-фотодиодов, работающих при комнатной температуре?
7. Что такое фотоматрица с гибридной сборкой?
8. Для каких целей используются ИК-матрицы на диапазон $8\div 14$ мкм?

2.4. Перспективы создания и совершенствования приемников фотонов

В последнее время появляются матрицы с высокими характеристиками на основе структур, выращенных из полупроводниковых соединений. Многие из таких матриц работают в ИК-диапазоне в пассивном режиме (тепловидение) и при дополнительной лазерной подсветке – активная оптическая локация.

Среди всего спектра тепловизионной техники охлаждаемые детекторы ИК излучения обладают наиболее высокими характеристиками с точки зрения квантовой эффективности, величины шума и производных характеристик, таких как температурная чувствительность, обнаружительная способность и быстродействие. Особое место среди материалов охлаждаемых детекторов продолжает занимать соединение $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ), которое позволяет создавать приборы с предельными характеристиками в любом поддиапазоне ИК-спектра от 2 до 12 мкм. Необходимость охлаждения, однако, является основным недостатком таких приборов, и актуальной задачей является повышение рабочей температуры детекторов для его компенсации. В настоящее время в России на базе ИФП СО РАН имеются все основные элементы цикла разработки и изготовления охлаждаемых ИК ФП на основе КРТ [35]. Собственные разработки ИФП в этой области позволили создать схемы считывания с кадровой частотой до 1000 Гц для матричных приемников, а также линейчатые детекторы с частотой считывания до 50 кГц для диапазонов $3\div 5$ и $8\div 10$ мкм. Задача снижения массогабаритных характеристик ФП и его энергопотребления тесно связана с конструктивом вакуумной криостатируемой части, где размещается фотоприемник.

Использование полупроводниковых твердых растворов теллуридов кадмия и ртути, а также арсенидов индия и галлия обеспечило

к настоящему времени создание нескольких поколений высокочувствительных матричных фотоприемников, в том числе мегапиксельного формата для коротковолновой инфракрасной области спектра. В настоящее время наибольшего успеха с точки зрения создания матричных фотоприемников достигло направление, использующее коллоидные квантовые точки (ККТ) в качестве фоточувствительных материалов [36]. В рамках указанного подхода становится возможным исключить при изготовлении наиболее сложные операции и снять ограничения на пространственную разрешающую способность благодаря отказу от индиевых микроконтактов [37]. В работе [38] рассмотрены основные принципы создания фотоприемников на основе нанодисперсных материалов с ограниченной размерностью и ключевые особенности их функционирования. В частности, такие исследования проводятся в АО «НПО «Орион» и МФТИ.

Оптико-электронные системы (ОЭС) все более широко внедряются как в изделия военной техники, так и в гражданские технологии. Уровень современных ОЭС определяется развитием технологий матричных фотоприемных устройств (МФПУ) новых поколений на все спектральные диапазоны оптического излучения, в первую очередь, инфракрасного. Новые поколения МФПУ, особенно инфракрасных систем 3-го поколения, усиленно разрабатываются в последние годы многими фирмами США, Франции, Англии, Китая и ряда других стран. Можно выделить две основные тенденции развития инфракрасных фотоприемных устройств (ФПУ) [39]:

- увеличение формата фотоприемника и уменьшение размера пикселя;
- снижение массогабаритных характеристик и стоимости ИК ФПУ.

Увеличение формата фотоприемника и уменьшение размера пикселя является всеобщим трендом практически для всех мировых разработчиков и производителей ИК МФПУ. В последнее время интенсивно развиваются ИК детекторы, работающие при повышенных температурах. Повышение рабочей температуры приводит к уменьшению массогабаритных характеристик ИК ФПУ и потребляемой мощности без изменения чувствительности. Такие ФПУ значительно расширяют области применения вплоть до использования в носимых системах, в прицелах для стрелкового оружия, на малых беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) и т. д.

МФПУ на основе фотодиодов из InSb наиболее востребованы для применения в средневолновом ИК-диапазоне. В АО НПО «Орион» серийно выпускаются МФПУ на основе объемного InSb разных форматов. Продолжаются работы по совершенствованию конструкции и технологии изготовления МФПУ, улучшающие линейность фотоотклика, однородность спектральных характеристик элементов, качество просветляющих покрытий фоточувствительного элемента, входного окна и оптического фильтра, технологию чернения диафрагмы. В работе [40] представлены результаты исследований МФПУ, в которых фоточувствительный элемент изготовлен в эпитаксиальном слое InSb как с выращенным $p-n$ -переходом, так и $p-n$ -переходом, полученным имплантацией ионов Be, исследуется возможность существенного повышения температуры криостатирования МФПУ до 140 К без ухудшения фотоэлектрических характеристик.

Появляются работы, связанные с исследованиями на классических кремнии и германии с применением новых технологий. Также расширяется перечень материалов, на основе которых изготавливаются ФП. В работе [41] был обнаружен новый физический эффект сильной низкотемпературной широкополосной ИК-фотопроводимости в $p-n$ -переходе кремния, сформированном n -сверхлегированным слоем на p -легированной подложке. Это позволило впервые реализовать плавную по спектру и хорошо выраженную по амплитуде широкополосную ($400-10\ 000\ \text{см}^{-1}$) перестройку спектра фотопроводимости с помощью выбора температурного режима работы фотоэлемента. В результате фотоэлемент на базе сверхлегированного кремния является универсальным для широкого круга практических задач – солнечной энергетики, тепловидения и биовизуализации.

Недавно разработанные гибридные структуры InGaAs «Квантовые Яма-Точки» (КЯТ), выращиваемые на подложках GaAs, сочетают в себе некоторые свойства как квантовых ям (КЯ), так и квантовых точек (КТ). В частности, КЯТ демонстрируют высокий уровень поглощения или усиления, не уступая КЯ, но и обладают подавленной латеральной диффузией носителей заряда и возможностью бездислокационного складирования более 20 слоев, что свойственно КТ, но недоступно для КЯ InGaAs/GaAs. Благодаря этим свойствам КЯТ хорошо себя показали в таких полупроводниковых приборах, как фотоэлектрические преобразователи GaAs

с расширенной за счет КЯТ областью поглощения, мощные полупроводниковые торцевые лазеры, а также микродисковые лазеры. В работе [42] анализируется динамика носителей заряда посредством исследования фотолюминесценции (ФЛ) с субпикосекундным временным разрешением. Полученные результаты могут быть полезны при проектировании и моделировании приборов на основе КЯТ.

Коллоидные квантовые точки селенидов металлов являются перспективными материалами для фотосенсорики в ближнем и среднем ИК-диапазонах [43, 44]. Их свойства уже сейчас позволяют использовать коллоидные [45] квантовые точки селенидов для создания устройств, работающих в диапазоне от видимой области до дальнего ИК на основе внутризонных и межзонных переходов. Так CdSe и PbSe успешно применяются в солнечных батареях [44], а HgSe для сенсоров SWIR [46].

Материал GeSiSn совместим с кремниевой технологией и перспективен для создания устройств фотоники коротковолнового инфракрасного диапазона [47]. Одним из эффективных подходов для усиления фотоотклика структур является применение метаматериалов, позволяющих локализовать и усилить электромагнитное поле в активной области [48]. В работе [49] продемонстрирована возможность усиления сигнала фотолюминесценции и фототока множественных квантовых ям GeSiSn/Si, сопряженных с плазмонами наноматериалами и двумерными фотонными кристаллами.

В работе [50] показано, что фотомемристы на основе графена, оксида графена, дисульфидов переходных металлов, а также ван-дер-ваальсовых гетероструктур с квантовыми точками, полученными методом эксфолиации, могут быть использованы для интеллектуальной визуализации в широком УФ-ИК диапазоне с предварительной обработкой информации в самом детекторе. Интеллектуальные детекторы со встроенными нейронными сетями, подобными сетчатке глаза человека, можно изготавливать из гибких биосовместимых материалов и использовать в самых разных приложениях. Использование фотомемристивных низкоразмерных материалов является перспективным подходом к созданию энергоэффективных интеллектуальных автономных систем распознавания образов.

Несомненно, актуальным на протяжении последних десятилетий является создание солнечных батарей с высоким КПД превращения лучистой

энергии в электрическую. На сегодняшний день фотоэлектрические преобразователи на АЗВ5 гетероструктурах являются абсолютными «рекордсменами» среди полупроводниковых приборов по эффективности реализации процессов прямого перевода лучистой (солнечной или лазерной) энергии в электричество. в диапазонах длин волн 450–650 нм (GaInP ФП), 700–900 (GaAs ФП), 900–1300 нм (ФП на основе метаморфных GaInAs структур) и 1350–1700 нм (GaSb, Ge и GaInAs согласованный по параметру решетки с InP). В ФТИ им. А. Ф. Иоффе [51] разработаны технологии изопериодических GaAs и метаморфных GaInAs структур для ФП мощного лазерного излучения с КПД более 60 % и 55 %, соответственно для длин волн излучения 809 и 1064 нм.

В настоящее время очевидна необходимость повышения энергомасштабных характеристик солнечных батарей для космических аппаратов. Основными путями решения этой проблемы являются повышение эффективности и снижение веса солнечных элементов (СЭ). Практически все космические солнечные элементы изготавливаются на основе соединений III-V, с КПД, достигающим в настоящее время 30 % (в следующем десятилетии ожидается 35 % [52]). Предлагаемый в [53] метод позволяет без существенных дополнительных затрат освоить производство сверхтонких СЭ и купонов на их основе на любых III-V/Ge гетероструктурах предложенным способом. Производители серийных гетероструктур III-V/Ge могут изготавливать утонченные СЭ по стандартной технологии, только добавив химическое травление гетероструктур на TH-REVALPHA и переноса напыления тыльных контактов на конец процесса, не меняя последовательности других операций. При дальнейшей (малозатратной) разработке такие гибкие, сверхлегкие СЭ на III-V/Ge могут применяться для уменьшения веса солнечных батарей с традиционными типами каркасов.

Контрольные вопросы

1. Какая проблема наиболее актуальна при совершенствовании охлаждаемых ИК-детекторов на основе КРТ?
2. Каковы основные тенденции развития ИК фотоприемных устройств?
3. Использование каких материалов и структур наиболее перспективно для создания современных матричных фотоприемников?

4. Что позволяют и где могут быть использованы фотоэлементы на базе сверхлегированного кремния?
5. Что представляют собой структуры типа «квантовые яма-точки», каковы их преимущества?
6. Какие материалы могут быть использованы для создания перспективных интеллектуальных УФ-ИК-детекторов?
7. Какие фотоэлектрические преобразователи наиболее эффективны в современной солнечной энергетике?
8. Каковы перспективы улучшения энергомассовых характеристик солнечных батарей?

3. ТРАНСПОРТ ФОТОНОВ

3.1. Волоконно-оптические системы связи

До середины 1970-х гг. передача информации осуществлялась по электрическим кабелям или с использованием радиочастотного и микроволнового излучения (ЭМВ). Использование света для передачи информации было затруднено следующими причинами: сложность изготовления источника света, который можно было с высокой частотой включить и выключить, передавая кодируемую информацию с большой скоростью; свет сильно поглощался в атмосфере – облака, туман, дым.

В 1970 г. создано оптическое кварцевое волокно с малым коэффициентом поглощения как переносчик света. Были изготовлены светоизлучающие диоды (СИД) и соответствующие по длинам волн приемники света – фотодиоды (ФД). Проблема оптической связи первоначально возникла после изобретения лазера в 1960-х гг.

В настоящее время световая связь стала более применяемой для передачи данных, голосовой и видеосвязи, а также интернет-трафика.

Оптическая связь достигает индивидуальных домов через широкополосные системы «волокно в дом».

Важнейшими элементами оптоволоконной системы связи, как показано на рис. 3.1, являются: источник света, параметры которого модулируются электрическим сигналом; оптическое волокно с низкими потерями и малой дисперсией распространяющегося света; фотоприемник, преобразующий оптический сигнал обратно в электрический.

Оптические усилители выполняют функцию компенсации световых потерь в оптоволокне.

Оптическое волокно – цилиндрический диэлектрический волновод, сделанный из материала с низкими потерями, обычно из плавленого кварцевого стекла высокой химической чистоты. У простейшего оптического волокна показатель преломления сердцевины больше, чем у внешней оболочки,

и благодаря полному внутреннему отражению свет направляется вдоль оси волокна. Основные типы оптических волокон представлены на рис. 3.2.



Рис. 3.1. Принципиальная схема оптической волоконной связи

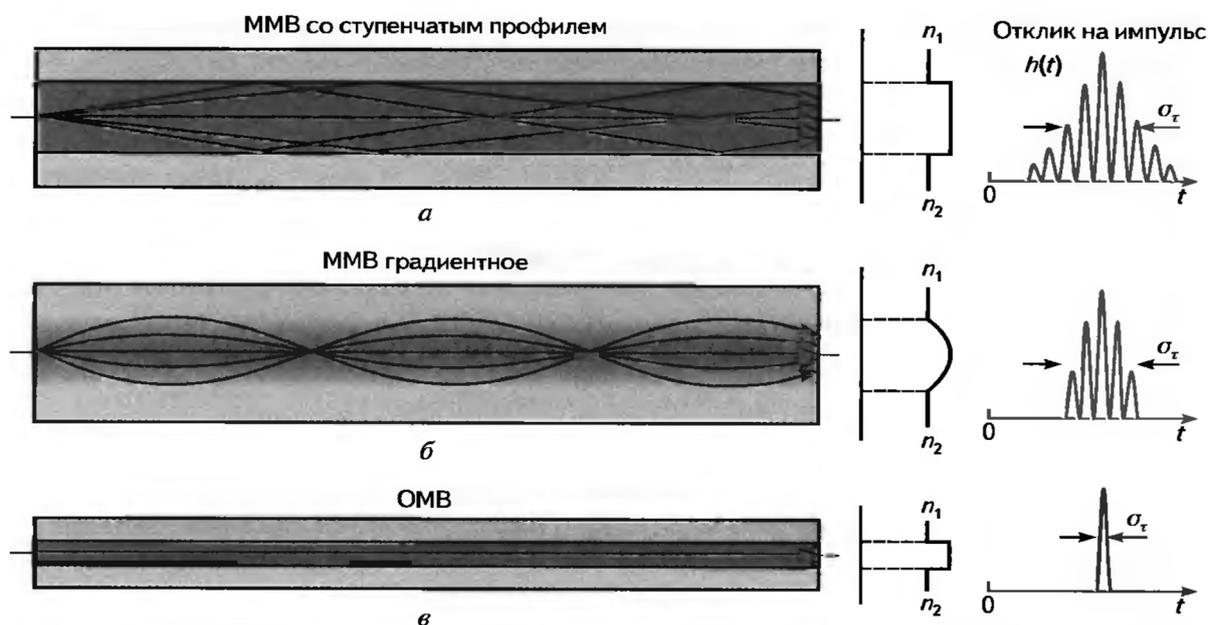


Рис. 3.2. Типы волокон

Многомодовое волокно (ММВ) со ступенчатым профилем показателя преломления (рис. 3.2, а) имеет сравнительно большой радиус сердцевины и однородный, но разный для двух областей показатель преломления в сердцевине и оболочке, расплывание импульса связано с модовой дисперсией. Многомодовое волокно с градиентным показателем преломления (рис. 3.2, б) имеет показатель преломления, который в оболочке меняется плавно, и расширение импульса понижено.

Одномодовое волокно (ОМВ) (рис. 3.2, в) имеет малый радиус сердцевины и ступенчатый профиль показателя преломления; уширение импульса в нем происходит незначительно.

Источники оптических сигналов для дальней и локальной оптической сети характеризуются следующими основными показателями:

а) мощность – должна быть достаточной, чтобы переданный сигнал по волокну можно было точно детектировать;

б) скорость – это возможность модулировать мощность источника с частотой, необходимой для сообщения информации;

в) ширина линии – источник должен иметь узкую спектральную линию, чтобы уменьшать влияние на сигнал в волокне;

г) шум – мощность источника не должна давать случайные флуктуации;

д) другие показатели – прочность, нечувствительность к изменениям окружающей среды, низкая стоимость, длительный срок работы.

В качестве источников для волоконно-оптических систем связи используются светоизлучающие диоды (СИД) и лазерные диоды.

Оптические усилители – необходимая часть современных оптических волоконных систем дальней связи.

Оптические усилители выполняют три функции:

а) повышают оптическую мощность перед ее закачкой в оптическое волокно;

б) *усилители на линии* действуют как повторители, поддерживающие уровень сигнала в процессе его передачи по волокну, компенсируя потери в оптоволокне;

в) *предусилители* обеспечивают усиление перед фотоприемником.

Наиболее применяемыми для волоконной связи [54] являются оптические волоконные усилители и волоконные ВКР усилители.

Существует два типа оптических усилителей лазерного типа: полупроводниковый и волоконный эрбиевый.

Полупроводниковые оптические усилители (ПОУ) для работы в ближней инфракрасной области изготавливаются на основе InGaAsP, InGaAs. Источником питания является электрический ток, применяются они как нелинейно-оптические устройства и оптические переключатели, редко в качестве усилителей на линии.

Полупроводниковый оптический усилитель с множественными квантовыми ямами конструируется в виде оптического волновода. Усилитель

с квантовыми ямами из InGaAsP/InP длиной 1 см, работающий на длине волны 1150 нм, обеспечивает усиление (волокну-волокну) в 13 дБ.

Эрбиевый волоконный усилитель используется в оптических линиях связи с большим уплотнением [55].

Усилители, работающие в диапазоне длин волн 1525–1565 нм называются С-усилителями, в диапазоне 1568–1620 нм – L-усилителями.

Благодаря уникальным свойствам ионов эрбия, изготовленные на его основе усилители имеют преимущества:

- 1) возможность одновременного усиления сигналов с разными длинами волн;
- 2) прямое усиление оптических сигналов без преобразования в электрический сигнал и обратно;
- 3) практически точное соответствие рабочего диапазона усиления области оптических потерь световодов из кварцевого стекла;
- 4) низкий уровень шума и простота включения в волоконно-оптические системы передачи;
- 5) высокая выходная мощность.

Волоконные ВКР-усилители работают на основе вынужденного комбинационного рассеяния. Большая ширина полосы усиления, произвольная рабочая длина волны и совместимость с существующими системами является преимуществом этих усилителей.

Мультиплексор – оптическое устройство, объединяющее несколько спектральных каналов с длинами волн $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ в один оптический канал. Число спектральных каналов может достигать нескольких десятков.

Демльтиплексор – оптическое устройство, разъединяющее оптические каналы на спектральные.

В когерентных оптических системах связи свет используется не как носитель с управляемой мощностью, а как волна с управляемой амплитудой, фазой и частотой. Это существенно увеличивает чувствительность приема сигналов и повышает скорость передачи данных.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные области применения оптической связи?

2. Какие устройства являются основными элементами волоконно-оптической системы связи?
3. Что представляет собой оптическое волокно?
4. Каковы основные типы оптических волокон?
5. Чем градиентное многомодовое волокно отличается от волокна со ступенчатым профилем?
6. Чем одномодовое волокно отличается от многомодового?
7. Каковы основные характеристики источников сигналов для оптической сети?
8. Какие источники фотонов, как правило, используются в оптических сетях?
9. Для чего предназначены оптические усилители?
10. Какие виды оптических усилителей существуют?
11. В чем преимущества эрбиевых оптических усилителей?
12. В чем преимущество усилителей на основе вынужденного комбинационного рассеяния?
13. Что такое мультиплексор и демультиплексор?

3.2. Перспективы прогресса волоконно-оптических систем связи

Можно привести впечатляющие достижения современной фотоэлектроники [28].

Линия со скоростью 2,5 Гбит/с эксплуатируется по одному оптическому волокну, и в этом случае по ней можно передать, например, все центральные вещательные FM и TV станции Москвы.

В начале нынешнего века в лабораториях Японии, США, Франции на экспериментальных оптических линиях получены скорости 1000–2000 Гбит/с. В интервале 1,54–1,6 мкм по одному волокну передавали 10–50 мод. Скорость передачи на каждой моде доведена до 20–160 Гбит/с. Новые технологии кварцевых волокон позволили убрать поглощение в окрестности длины волны 1,4 мкм и получить небывало широкое окно прозрачности ~ 1,2–1,7 мкм.

В будущем фотоэлектроника нацеливается на еще более фантастические скорости передачи информации $\sim 400\,000$ Гбит/с. И на такой огромной скорости можно передавать уже не 50, а около 2500 оптических каналов (мод). Это станет возможно, когда оптический сигнал будет пикосекундной длительности.

В настоящее время лавинные фотодиоды (ЛФД), чувствительные в телекоммуникационном диапазоне (на длинах волн 1300 и 1550 нм), широко используются для коммерческих, специальных и исследовательских применений. Оптоволоконная связь и визуализация объектов стали главным стимулом развития исследований и разработок ЛФД. Основными поглощающими материалами на этих длинах волн являются узкозонные InGaAs и Ge, при этом туннельная составляющая темнового тока в поглощающем слое эффективно устраняется благодаря применению в конструкции ЛФД отдельных областей поглощения света в узкозонном материале и умножения генерированных носителей заряда в слое широкозонного полупроводника. Многократная ударная ионизация приводит к появлению в выходном токе ЛФД избыточного шума, превышающего уровень дробового шума тока такой же величины, и характеризуемого коэффициентом избыточного шума F . В существующих моделях процесса лавинного умножения F связан с отношением k коэффициентов ударной ионизации материала электронами (α) и дырками (β), определяемым как наименьшее из отношений α / β или β / α , причем меньшие значения величины k соответствуют меньшему уровню избыточного шума. Избыточный шум ЛФД ухудшает отношение сигнал-шум, ограничивает чувствительность фотодетекторов и полосу рабочих частот фотоприемника. В последние десятилетия предложены разнообразные подходы для уменьшения величины избыточного шума, генерируемого в слое умножения ЛФД. Определелись три основные возможности добиться низкого уровня шума и высокого усиления при широкой полосе частот:

- выбор в качестве слоя лавинного умножения полупроводникового материала с малой величиной отношения k ;
- использование областей умножения субмикронной толщины;
- применение областей ударной ионизации с использованием сверхрешеток и квантовых ям.

Для сравнения различных конструкций ЛФД, как правило, проводят измерение зависимости коэффициента F от коэффициента умножения и определение значения k , характеризующего процесс генерации избыточного шума. В [56] представлены достигнутые характеристики ЛФД новых конструкций. Рассмотрены ЛФД на основе широко освоенных материалов Ge/Si и гетероструктур InGaAs/InAlAs ($k = 0,27$), выпускаемые коммерческими фирмами. Представлены ЛФД на новых материалах InGaAs/AlGaAsSb и GaAsSb/AlGaAsSb, демонстрирующие очень низкие значения $k = 0,01$. Низкий уровень шума в этих материалах объясняется большей величиной ширины запрещенной зоны и большим отношением эффективных масс дырок и электронов по сравнению с InAlAs. Продемонстрировано, что снижение коэффициента избыточного шума ЛФД может быть достигнуто при использовании слоя лавинного умножения субмикронной толщины. Это обусловлено нелокальным характером ударной ионизации, проявляющимся в различных значениях толщины «мертвого слоя» для электронов и дырок.

Структуры лавинного умножения с гетеропереходами на квантовых ямах обеспечивают также низкий уровень шума ($k = 0,12$) за счет резкого изменения пороговой энергии ударной ионизации при переходе носителей из широкозонных барьеров в узкозонный материал. Носители заряда, получая энергию от электрического поля в материале с широкой запрещенной зоной, близкой к пороговой энергии ионизации в узкозонном полупроводнике, быстро ионизируются при попадании в слой с узкой запрещенной зоной. Так как разрывы зон в валентной зоне и зоне проводимости гетероструктуры отличаются, то и коэффициенты ударной ионизации электронов и дырок существенно отличаются. В случае использования сверхрешеток $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As}$ в области лавинного умножения электроны могут легко достигать своей пороговой энергии для ударной ионизации, в то время как дырки испытывают рассеяние на множестве валентных минизон. Изменяя свойства материала, такие как эффективные массы, ширину запрещенной зоны, коэффициенты ударной ионизации электронов и дырок в зависимости от толщины чередующихся слоев сверхрешеток, можно получить минимальный уровень избыточного шума, близкий к теоретическому пределу с k менее 0,01 [56].

Широко проводятся научные исследования для создания новой элементной базы, обеспечивающей оптическую связь с более высокими характеристиками передачи информации.

Электрооптический модулятор – это ключевой элемент волоконно-оптических линий связи и приборов радиофотоники, используемый для кодирования электрических сигналов и данных в световой сигнал перед его передачей по оптическому волокну. Электрооптические модуляторы могут быть изготовлены на различные спектральные диапазоны. Однако наибольший интерес для исследователей и разработчиков телекоммуникационной и радиофотонной аппаратуры представляют модуляторы *C*-диапазона длин волн (от 1525 до 1565 нм), который характеризуется, во-первых, минимальными оптическими потерями в оптоволокне, составляющими всего 0,2 дБ/км, а во-вторых, соответствует диапазону усиления света в оптоволокне, легированном ионами эрбия [58].

Одним из факторов, вызывающих искажения сигналов, передаваемых по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС), является хроматическая дисперсия (ХД) оптического волокна [59]. Она ограничивает пропускную способность ВОЛС систем передачи данных, снижает точность оптоволоконных систем сравнения и синхронизации шкал времени [60], поэтому контроль ХД оптических волокон ВОЛС является важной задачей. Кроме того, при разработке и испытаниях оптоволоконных систем сравнения и синхронизации шкал времени необходимо измерять ХД оптического волокна катушек, применяемых в качестве имитатора протяженных ВОЛС. Точность синхронизации шкал времени оптоволоконными системами зависит от величины дифференциальной задержки распространения сигнала в оптическом волокне, обусловленной влиянием ХД. Дифференциальная задержка представляет собой отношение разности абсолютных задержек распространения сигнала в оптическом волокне на двух длинах волн к разности этих длин волн.

Для измерения абсолютной и дифференциальной задержки распространения сигнала в оптическом волокне разработана установка [61], в состав которой входят оптический рефлектометр с пикосекундным разрешением и установка для измерения дифференциальной задержки на основе фазосдвигового метода измерения ХД. Спектральный диапазон установки

составляет от 1500 до 1630 нм, погрешность установки длины волны не превышает ± 20 пм, погрешность измерения абсолютной задержки не превышает ± 100 пс. Разработанная установка может использоваться для исследований оптических волокон и оптоволоконных устройств при разработке систем сравнений и синхронизации шкал времени, систем передачи эталонных сигналов времени и частоты по ВОЛС, а также в других областях оптоволоконной техники.

Контрольные вопросы

1. Каковы достигнутые значения скорости передачи данных по оптоволокну и ожидаемые в перспективе?
2. Каковы основные пути совершенствования лавинных фотодиодов, в частности, уменьшения уровня шума?
3. Какие электрооптические модуляторы представляют наибольший интерес для оптоволоконных систем?
4. Почему одной из актуальных проблем совершенствования волоконных линий связи является контроль хроматической дисперсии оптического волокна?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем учебном пособии достаточно кратко рассмотрены основные принципы генерации фотонов, их транспорта и регистрации, а также современное состояние и перспективы развития квантовой электроники и фотоники.

Необходимо отметить, что развитие квантовой электроники и фотоники, как и любых других областей современной науки и техники, продолжается непрерывно, поэтому обучающимся, а впоследствии и специалистам, необходимо постоянно актуализировать свои знания, расширять свой научный кругозор, опираясь на публикации в ведущих периодических изданиях в рассматриваемой области, к примеру [62, 63], и на материалы представительных научных конференций.

Авторы считают, что настоящее учебное пособие может быть интересно и полезно не только для обучающихся по направлению подготовки Фотоника и оптоинформатика, но и по ряду других, таких как Опотехника и Приборостроение.

Авторы благодарят рецензентов: доктора технических наук С. В. Савелькаева и кандидата физико-математических наук Д. Ю. Протасова за внимательное чтение рукописи и полезные замечания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Салех Б. Е. А., Тейх М. К. Оптика и фотоника. Принципы и применения : учеб. пособие: в 2 т. Т. 1. Пер. с англ. В. Л. Дербова. – 2-е изд. – Долгопрудный : Интеллект, 2012. – 759 с.
2. Салех Б. Е. А., Тейх М. К. Оптика и фотоника. Принципы и применения : учеб. пособие: в 2 т. Т. 2. Пер. с англ. В. Л. Дербова. – 2-е изд. – Долгопрудный : Интеллект, 2012. – 780 с.
3. Гладышев А. Г. Исследование оптических и структурных свойств трехмерных островков InGaP(As), сформированных методом замещения элементов пятой группы // Журнал технической физики. – 2020. – Т. 90. Вып. 12. – С. 2139–2142.
4. Влияние состава матрицы и режимов эпитаксиального роста на оптические и структурные свойства квантовых точек InGaP(As), сформированных методом замещения элементов пятой группы / В. В. Андрюшкин, И. И. Новиков и др. // Фотоника-2023 : тезисы докладов. – М. : Перо, 2023. – С. 21.
5. A. M. Prokhorov / Quantum Electronics // Science. – 1965. – Vol. 149. – P. 828–830.
6. В. И. Гавриленко. Двухфотонные квантовые каскадные лазеры терагерцового диапазона // Фотоника-2023 : тезисы докладов. – М. : Перо, 2023. – С. 26.
7. Детекторы и излучатели фотонов для систем квантовой связи и квантовых стандартов частоты / В. В. Преображенский, И. Б. Чистохин и др. // Фотоника-2023 : тезисы докладов. – М. : Перо, 2023. – С. 94.
8. Quantum cryptography / N. Gisin et al. // Rev. of Mod. Phys. – 2002. – Vol. 74. – P. 145–195.
9. Генерация квантового ключа в свободном пространстве с помощью передачи поляризованных одиночных фотонов / А. В. Коляко, Д. Б. Третьяков и др. // Фотоника-2023: тезисы докладов. – М. : Перо, 2023. – С. 130.
10. Photonic bound states in the continuum in Si structures with the self-assembled Ge nanoislands / S. A. Dyakov et al. // Laser Photonics Rev. – 2021. – Vol. 15, iss.7. – P. 2000242.

11. Vurgaftman I., Meyer J. R., Ram-Mohan L. R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys // J. Appl.Phys. – 2001. – Vol. 89. – P. 5815.
12. Т. С. Шамирзаев, М. А. Путьто. Фотолюминесценция в гетеро-структуре с квантовыми ямами Ga(Sb,P)/GaP // Фотоника-2023 : тезисы докладов. – М. : Перо, 2023. – С. 118.
13. Формирование нанокристаллов CsPbBr₃ в боросиликатном стекле / В. А. Клинков, В. Б. Арчелков и др. // Фотоника-2023 : тезисы докладов. – М. : Перо, 2023. – С. 34.
14. CsPbBr₃/Cs₄PbBr₆ NCs glass prepared by a composition regulation strategy for amplification spontaneous emission and white light emitting diode / He Ziyao et al. // Applied Physics Letters 119.16 (2021): 161902.
15. Spectral properties of CsPbI₃ perovskite nanocrystals in borogermanate glass / Kharisova R. et al. // 2022 International Conference Laser Optics (ICLO). IEEE, 2022.
16. Enhancing the photoluminescence response of thick Ge-on-Si layers using photonic crystals / D. V. Yurasov et al. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2022. – Vol. 55. P. 075107.
17. Светодиоды на структурах с Ge(Si) самоформирующимися наноостровками, встроенными в фотонные кристаллы / А. В. Новиков, В. Б. Шмагин и др. // Фотоника-2023 : тезисы докладов. – М. : Перо, 2023. – С. 77.
18. 1,54 мкм электролюминесценция в пленках In₂O₃:Er, магнетронно напыленных на кремнии / К. В. Феклистов, А. Г. Лемзяков и др. // Фотоника-2023: тезисы докладов. – М. : Перо, 2023. – С. 65.
19. Магнитоуправляемый спиновый светоизлучающий диод / М. В. Дорохин, М. В. Ведь и др. // Фотоника-2023 : тезисы докладов. – М. : Перо, 2023. – С. 83.
20. Методы управления спиновой инжекцией в спиновых светоизлучающих диодах InGaAs/GaAs/Al₂O₃/CoPt / М. В. Дорохин, М. В. Ведь и др. // ФТТ. – 2017. – Т. 59. – С. 2135.
21. Спиновые светоизлучающие диоды InGaAs/GaAs/Al₂O₃/CoPt, модифицированные ионным облучением / А. В. Здоровейщев, П. Б. Демина и др. // Фотоника-2023: тезисы докладов / ИФП СО РАН. – М. : Перо, 2023. – С. 133.

22. Silicon-Integrated Hybrid-Cavity 850-nm VCSELs by Adhesive Bonding: Impact of Bonding Interface Thickness on Laser Performance / Haglund E., Kumari S. et al. // IEEE Journal Selected Topics Quantum Elect., Vol. 23 (2017). PP(99):1–1.

23. Зависимость частотно-модуляционной характеристики вертикально-излучающих лазеров 1,55 мкм от топологических размеров рабочей области / К. О. Воропаев, И. О. Воропаева и др. // Фотоника-2023 : тезисы докладов / ИФП СО РАН. – М. : Перо, 2023. – С. 40.

24. Output power and its limitation in ridge-waveguide 1.3 μm wavelength quantum-dot lasers / A. E. Zhukov, A. R. Kovsh, D. A. Livshits et al. // Semicond. Sci. Technol., 18(8). – P. 774–781.

25. Двухуровневая лазерная генерация в микродисковых лазерах с InAs/InGaAs квантовыми точками / А. А. Караборчев, И. С. Махов и др. // Фотоника-2023 : тезисы докладов. – М. : Перо, 2023. – С. 134.

26. Ж. И. Алферов. Инжекционные гетеролазеры // Полупроводниковые приборы и их применение. – М. : Советское радио, 1971. – С. 204–225.

27. L. Esaki, R. Tsu. Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors // IBM Journal of Research and Development 14(1). – P. 61–65

28. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Современное состояние и магистральные направления развития современной фотоэлектроники. – М. : Физматкнига, 2010. – 128 с.

29. The key technology and research progress of CMOS image sensor / L. Zhanga, J. Lib, L. Linb et al. // Proceedings of SPIE. – 2009. – 7157, 71571B.

30. Large format multicolor QWIP FPAs / A. Soibel, S. D. Gunapala, S. V. Bandara et al. // Proceedings of SPIE. – 2009. – 7298, 729806.

31. Status of mid-infrared superlattice technology in Germany / R. Rehm, M. Waltner, J. Schmitz et al. // Proceedings of SPIE. – 2009. – 7222, 7222OT.

32. M. B. Rein, P. Lamarre, A. Hairston – Compound semiconductor, 2006, 6, P. 27–30.

33. Hamamatsu: Photodiodes. Catalogue [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/photodiodes.html>.

34. М. Р. Mikhailova, I. A. Andreev. High-speed Avalanche Photodiode for the 2–5 μm Spectral Range // Mid-infrared Semiconductor. – P. 547–592.

35. Разработка высокоскоростных и высокотемпературных охлаждаемых ИК фотоприемных устройств на основе КРТ / Ю. Г. Сидоров, М. В. Якушев и др. // Фотоника-2023: тезисы докладов. – М. : Перо, 2023. – С. 51.
36. Colloidal quantum dot sensor bandwidth and thermal stability: progress and outlook / C. Gregory et al. // Infrared Technology and Applications XLVIII, 2022. – Vol. 12107. – P. 13–20.
37. Extended SWIR high performance and high definition colloidal quantum dot imagers / S. Hinds et al. // Infrared Technology and Applications XLVI, 2020. – Vol. 11407. – P. 11–19.
38. Фотоприемники на основе материалов с ограниченной размерностью / В. С. Попов, В. П. Пономаренко и др. // Фотоника-2023 : тезисы докладов. – М. : Перо, 2023. – С. 43.
39. Состояние и перспективы развития охлаждаемых фотоприемных устройств на основе сложных гетероструктур узкозонных полупроводников / М. В. Якушев, А. В. Латышев и др. // Фотоника-2023 : тезисы докладов. – М. : Перо, 2023. – С. 17.
40. Состояние работ и перспективы матричных фотоприемных устройств на основе антимонида индия / К. О. Болтарь, И. Д. Бурлаков и др. // Фотоника-2023 : тезисы докладов. – М. : Перо, 2023. – С. 16.
41. М. С. Ковалев, С. И. Кудряшов. Сверхлегирование кремния различными примесями с помощью прямой лазерной записи: от фундаментальных исследований к практическим результатам // Фотоника-2023 : тезисы докладов. – М. : Перо, 2023. – С. 23.
42. Исследование динамики носителей заряда в гибридных структурах InGaAs «Квантовые Яма-Точки» методом ап-конверсии фотолюминесценции / А. М. Надточий, К. А. Иванов и др. // Фотоника-2023 : тезисы докладов. – М. : Перо, 2023. – С. 44.
43. Mercury chalcogenide quantum dots: material perspective for device integration / Lhuillier et al // Chem. Rev. 2021, Vol. 121, 7. – P. 3627–3700.
44. I.A. Shuklov, V.F. Razumov / Lead chalcogenide quantum dots for photoelectric devices // Russ. Chem. Rev. – 2020. – Vol. 89. – P. 379–391.
45. И. А. Шуклов, Д. В. Демкин. Получение и свойства золь и тонких пленок коллоидных квантовых точек селенида ртути // Фотоника-2023 : тезисы докладов. – М. : Перо, 2023. – С. 46.

46. A colloidal quantum dot infrared photodetector and its use for intraband detection / Livache C., Martinez B., Goubet N. et al. // Nature Communication 2019. – Vol. 10. – P. 2125.

47. Si–Ge–Sn alloys grown by chemical vapour deposition: a versatile material for photonics, electronics, and thermoelectrics / D. Grützmacher et al. // Appl. Phys. A. 2023. 129. – P. 235.

48. Fabrication of high Aspect-Ratio Si Pillar-based Hybrid plasmonic-phonic Crystal Waveguides for ultra-sensitive Infrared Gas-sensing Applications / G. Stocker et al. // 2021 32nd Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC). 2021. – P.1–4.

49. Усиление фотоотклика множественных квантовых ям GeSiSn/Si, совмещенных с плазмонными наноантеннами и двумерными фотонными кристаллами / И. В. Скворцов, В. А. Тимофеев и др. // Фотоника-2023 : тезисы докладов. – М. : Перо, 2023. – С. 99.

50. Г. Н. Панин, О. О. Капитанова. Фотомемристивные детекторы на основе низкоразмерных материалов для интеллектуальных систем распознавания образов // Фотоника-2023 : тезисы докладов. – М. : Перо, 2023. – С. 70.

51. Гетероструктурные фотопреобразователи солнечного и лазерного излучения / М. З. Шварц, В. М. Андреев и др. // Фотоника-2023 : тезисы докладов. – М. : Перо, 2023. – С. 71.

52. N. A. Pakhanov, V. M. Andreev et al. State-of-the-art Architectures and Technologies of High-Efficiency Solar Cells Based on III-V Heterostructures for Space and Terrestrial Applications. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2018, Vol. 54. – P. 187–202.

53. Н. А. Паханов, М. З. Шварц. Проектирование легких и ультратонких III-V/Ge солнечных элементов для гибких панелей для космических и наземных применений // Фотоника-2023 : тезисы докладов. – М. : Перо, 2023. – С. 138.

54. Никоноров Н. В., Шандаров Н. В. Волноводная фотоника. – СПб. : СПб ГУ ИТМО, 2008 г. – 142 с.

55. Кирчанов В. С. Физические основы нанотехнологий фотоники и оптоинформатики: учеб. пособие. – Пермь. : Перм. нац. иссл. политех. ун-т. – 2019. – 221 с.

56. Малошумящие лавинные фотодиоды для систем связи (обзор) / И. Б. Чистохин, А. М. Гишинский и др. // Фотоника-2023 : тезисы докладов. – М. : Перо, 2023. – С. 63.

57. Nanowired structure, optical properties and conduction band offset of RF magnetron-deposited n-Si/In₂O₃:Er films / K. V. Feklistov et al. // Mater. Res. Express. – 2020. – Vol. 7. – P. 125903–125914.

58. Электрооптические модуляторы С-диапазона на основе InP / Д. В. Гуляев, Д. В. Дмитриев и др. // Фотоника-2023 : тезисы докладов. – М. : Перо, 2023. – С. 36.

59. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. – М. : Мир, 1995. – 325 с.

60. Метод определения разности задержек распространения по оптическому волокну импульсов лазерного излучения систем сравнений и синхронизации шкал времени / О. В. Колмогоров, А. Н. Щипунов и др. // «Фотоника». – С. 696–703.

61. Уменьшение погрешности измерений задержек распространения сигнала с помощью оптического рефлектометра с пикосекундным разрешением / О. В. Колмогоров, А. Н. Щипунов и др. // Измерительная техника. – 2020. – № 1. – С. 30–34.

62. Квантовая электроника [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://quantum-electronics.ru>.

63. Успехи прикладной физики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://advance.orion-ir.ru/>.

Примерные темы рефератов

1. Исторические этапы развития квантовой электроники.
2. Свойства лазерного излучения
3. Пространственная и временная когерентность излучения.
4. Волновая теория открытых резонаторов.
5. Гауссовы пучки.
6. Волноводные резонаторы.
7. Режим модулированной добротности резонатора.
8. Методы селекции продольных типов колебаний.
9. Методы селекции поперечных типов колебаний.
10. Кольцевые лазеры и методы анализа встречных волн.
11. Основные методы управления параметрами лазерного излучения.
12. Газовые лазеры.
13. Гелий-неоновый лазер.
14. Принцип работы и применение лазеров на двуокиси углерода
15. Лазеры на твердом теле.
16. Лазеры на иттрий алюминиевом гранате.
17. Лазеры на красителях.
18. Полупроводниковые лазеры и их применение.
19. Полупроводниковые лазеры на гетероструктурах.
20. Эксимерные лазеры
21. Лазеры на самоограниченных переходах.
22. Твердотельные лазеры с накачкой от диодов полупроводниковых лазеров.
23. Волоконные лазеры.
24. Лазер на свободных электронах.
25. Голография.
26. Применение лазеров в медицине.
27. Лазеры и опорное направление.
28. Лазерные гироскопы.
29. Лазерные высотомеры.

30. Лазерные неразрушающие методы контроля.
31. Лазерные системы записи и хранения информации.
32. Лазерные технологии при обработке различных материалов.
33. Распространение лазерного излучения в атмосфере
34. Лазерные лидары.
35. Лазерные системы связи.
36. Применение лазеров для получения высокотемпературной плазмы.
37. Исторические этапы развития фотоники.
38. Свойства света.
39. Корпускулярно-волновой дуализм.
40. Спектральный состав излучения.
41. Взаимодействие света с веществом.
42. Характеристики источников излучения.
43. Источники некогерентного излучения.
44. Светодиоды.
45. Лазеры.
46. Типы приемников излучения.
47. Характеристики приемников излучения.
48. Фотодиоды.
49. ПЗС-матрицы.
50. КМОП-детекторы.
51. Глаз как приемник оптического излучения.
52. Оптическое волокно.
53. Оптические элементы.
54. MEMS и микроэлектроника.
55. Интерферометры.
56. Оптическая томография.
57. Голография.
58. Приложения интерферометрических измерений.
59. Дисплеи и их эволюция.
60. Методы анализа изображений.
61. Компьютерное зрение.
62. Квантовый компьютер.
63. Квантовая криптография.

Учебное издание

Костюченко Владимир Яковлевич

Карманов Игорь Николаевич

Сырнева Александра Сергеевна

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И ФОТОНИКИ

Редактирование и компьютерная верстка

Ю. С. Мерзликиной

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 29.12.2023. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 3,25. Тираж 96 экз. Заказ 194.

Гигиеническое заключение

№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ

630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ

630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.