

А. И. Астайкин, М. К. Смирнов

КВАНТОВЫЕ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА

ФГУП

«Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ»

А. И. Астайкин, М. К. Смирнов

КВАНТОВЫЕ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА

Учебное пособие

Под редакцией доктора технических наук, профессора,
заслуженного деятеля науки РФ А. И. Астайкина

Саров

2011

ББК 32.86
А 91
УДК 621.38

Астайкин А. И., Смирнов М. К. Квантовые и оптоэлектронные приборы и устройства: Учебное пособие. Саратов: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011, 343 с.

ISBN 978-5-9515-0159-2

Рассматриваются теоретические основы квантовых и оптоэлектронных приборов различных типов. Изучаются их основные технические характеристики, а также приводятся методы расчета и проектирования оптоэлектронных устройств. Книга содержит большое количество справочной информации и примеры электронных схем с использованием различного типа квантовых и оптоэлектронных приборов.

Учебное пособие предназначено для подготовки дипломированных специалистов по направлению 210100 «Электроника и микроэлектроника» по специальности 210105 «Электронные приборы и устройства» и может использоваться при подготовке магистров остальных специальностей этого направления, а также дипломированных специалистов по направлению 654200 «Радиотехника» по специальности 200700 «Радиотехника»; по направлению 551900 «Оптотехника» при подготовке бакалавров всех специальностей этого направления; по направлению 654400 «Телекоммуникации» по специальности 071700 «Физика и техника оптической связи».

Книга может быть полезна аспирантам, инженерам и научным сотрудникам соответствующих специальностей.

Рецензенты:

доктор физико-математических наук В. А. Терехин, РФЯЦ-ВНИИЭФ;
доктор физико-математических наук, профессор, декан радиофизического факультета ННГУ им. Н. И. Лобачевского А. В. Якимов

ISBN 978-5-9515-0159-2

© ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011

Содержание

Список сокращений и обозначений	5
Введение	8
1. Физические основы квантовой электроники	11
1.1. Оптическое излучение	11
1.2. Фотометрия	20
1.3. Генерация оптического излучения	28
2. Фоточувствительные приборы и устройства	31
2.1. Классификация фоточувствительных приборов и устройств	31
2.2. Основные параметры и характеристики ФПУ	32
2.3. Явление фотопроводимости и внутренний фотоэффект	37
2.4. Фоторезисторы	45
2.5. Фотодиоды	64
2.6. Фотодиоды с барьером Шотки	81
2.7. Фотодиоды на гетероструктурах	84
2.8. Лавинные фотодиоды	87
2.9. Биполярные фототранзисторы	97
2.10. Фототиристоры	108
2.11. Полевые фототранзисторы	112
2.12. Фоточувствительные МДП-приборы	115
2.13. Тепловые приемники оптического излучения	127
2.14. Фотоприемники на основе внешнего фотоэффекта ..	138
3. Светоизлучающие диоды	158
3.1. Принцип действия светодиода	158
3.2. Внутренняя квантовая эффективность	162
3.3. Внешняя квантовая эффективность	166
3.4. Параметры и характеристики светоизлучающих диодов	167
3.5. Современные излучающие диоды	174
3.6. Многоцветные и белые светодиоды	181
3.7. Конструкция излучающих диодов	183
3.8. Перспективы развития излучающих диодов	185

4. Основы теории оптических резонаторов	187
4.1. Принцип действия открытого резонатора	187
4.2. Свойства открытого резонатора	192
4.3. Методы расчета открытых резонаторов	196
4.4. Устойчивость оптических резонаторов	203
4.5. Селекция мод в резонаторах	206
4.6. Кольцевые резонаторы	208
5. Генерация лазерного излучения	212
5.1. Условия возникновения лазерной генерации	212
5.2. Вынужденное излучение и лазерное усиление	213
5.3. Лазерная генерация и порог возбуждения	219
5.4. Свойства лазерного излучения	221
6. Разновидности квантовых генераторов	223
6.1. Газовые лазеры	223
6.2. Твердотельные лазеры	238
6.3. Лазеры на основе оптических волокон	247
6.4. Полупроводниковые лазеры	250
6.5. Лазеры на растворах органических соединений	285
6.6. Пучковые квантовые генераторы	290
7. Устройства для управления параметрами лазерного излучения	295
7.1. Электрооптические, магнитооптические и пьезооптические эффекты	295
7.2. Методы модуляции оптического излучения	301
7.3. Оптические дефлекторы	305
8. Оптроны и оптронные микросхемы	308
8.1. Классификация оптронов	308
8.2. Основные параметры оптопар	311
8.3. Резисторные оптопары	318
8.4. Диодные оптопары	321
8.5. Транзисторные оптопары	326
8.6. Тиристорные оптопары	330
8.7. Оптоэлектронные микросхемы	332
8.8. Конструкции оптронов	338
Список литературы	342

Список сокращений и обозначений

A	— площадь поверхности
c	— скорость света в вакууме
C	— электрическая емкость
D	— обнаружительная способность, амплитуда вектора электрического смещения
E	— освещенность, энергия, напряженность электрического поля, амплитуда вектора электрического поля
e_0	— заряд электрона
f	— частота, фокусное расстояние
h	— постоянная Планка
H	— экспозиционная доза, амплитуда вектора магнитного поля
I	— сила света, сила электрического тока
k	— постоянная Больцмана, волновое число
L	— яркость, индуктивность, длина
M	— светимость, плотность потока излучения, коэффициент лавинного умножения ЛФД, коэффициент усиления ФЭУ
МOCVD	— метод металлоорганического химического вакуумного нанесения
n	— показатель преломления среды, концентрация электронов
NA	— числовая апертура оптоволокна
p	— концентрация дырок
P	— мощность
Q	— добротность, резонатора, скважность, энергия излучения
R	— электрическое сопротивление, радиус кривизны, коэффициент отражения
$R_{отр}$	— коэффициент отражения по интенсивности
S	— чувствительность
S_I	— токовая чувствительность
T	— температура
t	— время
t_{01-09}	— время нарастания импульса
t_{09-01}	— время спада импульса

анты конструкций оптронов и оптоэлектронных микросхем приведены на рис. 8.23. Конструкции двух вариантов бескорпусных оптопар приведены на рис. 8.23,*а* и 8.23,*б* соответственно. В первом варианте механическая и оптическая связь излучателя 1 и фотоприемника 2 обеспечивается заливкой оптическим компаундом 3, а во втором – путем приклеивания специальным оптическим клеем кристаллов излучателя 1 и фотоприемника 2 на разные стороны прозрачной диэлектрической пластины 3, которая является иммерсионной средой. Бескорпусные оптопары могут применяться в составе гибридных микросхем или в электронной аппаратуре, которая подвергается общей герметизации. Вариант конструкции оптрона, помещенной в полимерный корпус, приведен на рис. 8.23,*в*. Здесь кристаллы излучателя 1 и фотоприемника 2 предварительно закрепляют на жестких металлических выводах 4. Для улучшения оптической связи между излучателем 1 и фотоприемником 2 помещают каплю оптического полимера 3, который является иммерсионной средой, далее всю конструкцию устанавливают в пластмассовый корпус 6. Иногда для улучшения изолирующих свойств оптрона между источником и приемником излучения помещают фторопластовую пленку, которая обеспечивает отличную высоковольтную изоляцию и малые токи утечки между входом и выходом. В отдельных областях применения, где требуется повышенная стойкость к воздействию механических и климатических факторов, которую не могут обеспечить пластмассовые корпуса оптронов, используют герметичные металлические и керамические корпуса, аналогичные тем, которые применяются для других электронных компонентов. Стойкость оптронов к механическим и климатическим воздействиям в этом случае не уступает стойкости остальных электронных компонентов.

Следует отметить, что во всех трех разновидностях оптронов, рассмотренных выше, применяется нетрадиционная для планарной микроэлектроники сборка по вертикали. Частично этот недостаток преодолен в конструкции, показанной на рис. 8.23,*г*, которая часто применяется в гибридных оптоэлектронных микросхемах. В этой конструкции все кристаллы расположены на одной стороне подложки, что позволяет использовать одно и то же оборудование при изготовлении гибридных и оптоэлектронных микросхем.

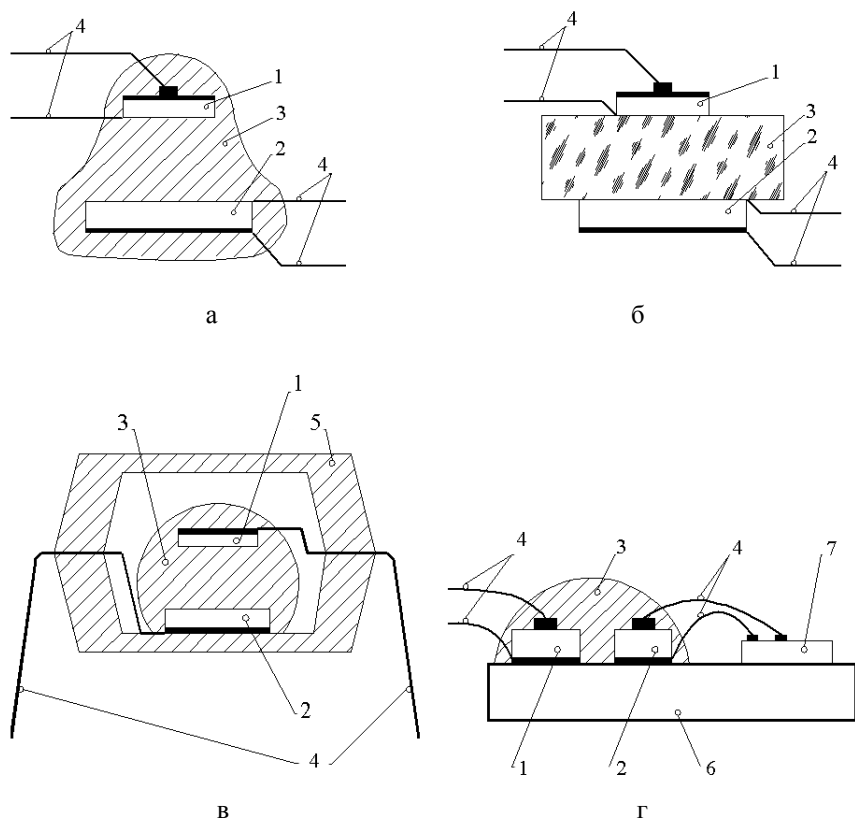


Рис. 8.23. Варианты конструкций оптронов и оптоэлектронных микросхем: а – бескорпусная с прозрачным компаундом; б – вертикальная сборка на прозрачной пластине; в – размещение оптрона в полимерном корпусе; г – плоская сборка оптрона, используемая в микросхемах; 1 – ИК-диод; 2 – фотоприемник; 3 – иммерсионная среда; 4 – выводы; 5 – пластмассовый корпус; 6 – подложка; 7 – кристалл усилителя

Недостатком такой технологии является ухудшение оптической связи в оптопаре.

Современные ОИС выполняются в виде гибридных сборок в двух вариантах:

1) бескорпусный светодиод и интегральная фотоприемная схема, содержащая выполненные по интегральной технологии фотоприемник и электронную схему;

2) бескорпусная оптопара и бескорпусная интегральная микросхема.

Все вышеприведенные конструкции характерны для оптронов с внутренним (закрытым) оптическим каналом. Оптроны с открытым оптическим каналом изготавливаются двух типов:

- 1) работающие на просвет;
- 2) работающие на отражение.

Конструктивно наиболее удобны оптопары, работающие на отражение, в которых одностороннее расположение излучателя и фотоприемника позволяет встраивать их практически в любую аппаратуру. Существенного улучшения параметров отражательной оптопары можно добиться при введении в ее конструкцию еще одного, идентичного с первым фотоприемника, расположенного симметрично излучателю. Это позволяет реализовать принцип дифференциального считывания информации, что существенно повышает возможность распознавания полезного сигнала. Оптопары, работающие на просвет, широкого распространения не получили. Обычно в аппаратуре их заменяют двумя отдельными элементами – источником излучения на основе светодиода и полупроводниковым фотоприемником.

Объединение в конструкции излучателя, фотоприемника и оптического световода привело к созданию так называемых длинных оптронов, или волстронов. Оптический канал волстроны может быть выполнен либо в виде жесткого световода длиной около 10 см (такие волстроны применяются в качестве управляющих устройств в цепях высокого напряжения свыше 10 кВ), либо в виде отрезка гибкого волоконно-оптического кабеля длиной до нескольких десятков метров (эти приборы применяются вместо локальных ВОЛС и выгодно отличаются от них отсутствием разъемных соединителей, что позволяет улучшить надежность такой линии и уменьшить стоимость). Серийно выпускаемые отечественной промышленностью волстроны 01ВЦ06А-2 и 02ВЦ075А-1 с оптическим каналом длиной 1 м совместимы по уровням управляющих сигналов с ТТЛ микросхемами и имеют быстродействие 50 нс.

Список литературы

1. Астайкин А. И., Смирнов М. К. Основы оптоэлектроники: Учебное пособие. М.: Высшая школа, 2007.
2. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника. М.: Техносфера, 2006.
3. Дудкин В. И., Пахомов Л. Н. Квантовая электроника. Приборы и их применение: Учебное пособие. М.: Техносфера, 2006.
4. Пихтин А. Н. Оптическая и квантовая электроника. М.: Высшая школа, 2001.
5. Гитцевич А. Б., Зайцев А. А., Мокряков В. В. и др. Полупроводниковые приборы. Диоды высокочастотные, импульсные, оптоэлектронные приборы: Справочник / Под ред. А. В. Голомедова. М.: КУБК-а, 1997.
6. Мартынов В. Н., Кольцов Г. И. Полупроводниковая оптоэлектроника: Учебное пособие. М.: МИСИС, 1999.
7. Гребнев А. К., Гридин В. Н., Дмитриев В. П. Оптоэлектронные элементы и устройства / Под ред. Ю. В. Гуляева. М.: Радио и связь, 1998.

**Астайкин Анатолий Иванович,
Смирнов Михаил Константинович**

**Квантовые и оптоэлектронные
приборы и устройства**

Учебное пособие

Редактор *Н. П. Мишкина*
Корректор *Н. Ю. Костюничева*
Компьютерная подготовка оригинала-макета
Н. В. Мишкина

Подписано в печать 15.03.2011. Формат 60×90/16
Печать офсетная. Усл. печ. л. ~22. Уч.-изд. л. 20
Тираж 300 экз. Зак. тип. 1075-2010.

Отпечатано в ИПК ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
607188, г. Саров Нижегородской обл.