

А. И. Астайкин, М. К. Смирнов

# ОСНОВЫ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ



А.И. Астайкин, М.К. Смирнов

# **Основы оптоэлектроники**

Саров, 2001 г.

ББК 32.847

А91

УДК 621.383(075)

Основы оптоэлектроники/А. И. Астайкин, М.К. Смирнов.

– Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001.– 260 с., 189 рисунков. 21 таблица

ISBN 5-85165-625-5

Книга российских авторов Астайкина А.И. и Смирнова М.К. “Основы оптоэлектроники” написана на основе курса лекций по “Оптоэлектронике”, читаемых в течение ряда лет в СарФТИ МИФИ для студентов групп электронных специальностей. В книге рассматриваются основные типы оптоэлектронных приборов, применяемых в современной радиоэлектронной аппаратуре. В трех основных разделах приводится информация о фоточувствительных, светоизлучающих и оптронных приборах, соответственно. В четвертом разделе излагаются особенности построения и расчета электронных схем с использованием оптоэлектронных приборов. Основные разделы посвящены вопросам, связанным с физическими явлениями, лежащими в основе принципа действия оптоэлектронных приборов. Также здесь рассматривается конструктивное устройство и основные параметры приборов различных типов. В книге приводится много иллюстраций в виде таблиц, графиков и рисунков, что способствует улучшению понимания изложенного материала. Большое количество практических схем показывает возможности использования оптоэлектронных приборов в различных областях электронной техники и облегчает начинающим разработчикам РЭА решение задач, связанных с их применением. Краткость изложения и тщательно отобранный минимум необходимого материала являются достоинством книги и приближают ее к справочнику по широкому кругу вопросов, связанных с оптоэлектроникой.

Книга может быть использована в качестве учебного пособия для студентов и аспирантов соответствующих специальностей и будет полезна инженерно-техническим и научным работникам, занимающимся разработкой и применением радиоэлектронных устройств.

#### Рецензенты:

зам. декана факультета радиофизики ННГУ им. Лобачевского,  
д-р физ.-мат. наук, профессор А.В. Якимов;

зав. кафедрой МЭИ, д-р техн. наук, профессор Пермяков В.А.;

зав. кафедрой МГУ им. Огарева,

д-р физ.-мат. наук, профессор Горюнов В.А.

ISBN 5-85165-625-5

© Российский федеральный  
ядерный центр – ВНИИЭФ, 2001

Список сокращений . . . . .	7
Список принятых обозначений . . . . .	8
Введение . . . . .	17
1. Основы фотометрии . . . . .	21
1.1. Свет и его основные свойства . . . . .	21
1.2. Энергетическая фотометрия . . . . .	22
1.3. Визуальная фотометрия . . . . .	26
2. Приемники оптического излучения . . . . .	28
2.1. Классификация приемников излучения . . . . .	28
2.2. Параметры и характеристики ФПМ . . . . .	28
2.2.1. Параметры напряжений, сопротивлений и токов ФПМ . . . . .	28
2.2.2. Параметры чувствительности фотоэлектронных приборов . . . . .	30
2.2.3. Пороговые и шумовые параметры ФПМ . . . . .	30
2.2.4. Параметры спектральной характеристики ФПМ . . . . .	31
2.2.5. Геометрические параметры ФПМ . . . . .	31
2.2.6. Параметры инерционности ФПМ . . . . .	32
2.2.7. Спектральные характеристики ФПМ . . . . .	32
2.2.8. Основные характеристики зависимости параметров ФПМ . . . . .	33
2.3. Явление фотопроводимости и внутренний фотоэффект . . . . .	33
2.4. Фоторезисторы . . . . .	40
2.4.1. Принцип действия ФР . . . . .	40
2.4.2. Основные характеристики ФР . . . . .	43
2.4.3. Конструкции ФР . . . . .	50
2.4.4. Основные достоинства и недостатки ФР . . . . .	51
2.4.5. Типовые параметры ФР . . . . .	51
2.5. Фотодиоды . . . . .	53
2.5.1. Воздействие света на $p$ - $n$ -переход . . . . .	53
2.5.2. Устройство $p$ - $i$ - $n$ -фотодиода . . . . .	56
2.5.3. Режимы работы фотодиода . . . . .	57
2.5.4. Основные параметры и характеристики ФД . . . . .	60
2.5.5. Основные достоинства и недостатки $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодов . . . . .	65
2.5.6. Фотодиоды с барьером Шотки . . . . .	65
2.5.7. Гетерофотодиоды . . . . .	68
2.5.8. Лавинные фотодиоды . . . . .	70

2.6.	Фоточувствительные МДП-приборы . . . . .	77
2.6.1.	Принцип действия фото-МДП-структур (ФМДП) . . . . .	77
2.6.2	Основные режимы работы ФМДП-приборов . . . . .	80
2.6.3.	ФМДП-структуры со сквозным током . . . . .	81
2.6.4.	ФМДП-диоды на основных носителях заряда. . . . .	84
2.6.5.	Переключающие ФМДП-структуры . . . . .	85
2.6.6.	Лавинные ФМДП-диоды . . . . .	86
2.7.	Фототранзисторы . . . . .	86
2.7.1.	Принцип действия биполярного фототранзистора . . . . .	86
2.7.2.	Основные параметры и характеристики ФТ . . . . .	88
2.7.3.	Полевые фототранзисторы с $p-n$ -переходом . . . . .	91
2.7.4.	Фототранзисторные структуры с широкозонным эмиттером .	93
2.7.5.	Разновидности приборов ФТГ . . . . .	95
2.8.	Фототиристорные структуры . . . . .	98
2.9.	Тепловые приемники оптического излучения . . . . .	100
2.9.1.	Болометры . . . . .	102
2.9.2	Термоэлементы . . . . .	104
2.9.3.	Пирозлектрические фотоприемники . . . . .	106
2.10.	Фотоприемники на основе внешнего фотоэффекта . . . . .	109
2.10.1.	Физические основы внешнего фотоэффекта . . . . .	109
2.10.2.	Свойства фотокатодов . . . . .	110
2.10.3.	Вакуумный фотоэлемент . . . . .	112
2.10.4.	Газонаполненные фотоэлементы . . . . .	115
2.10.5.	Фотоумножители . . . . .	116
3.	Полупроводниковые источники оптического излучения . . . . .	121
3.1.	Виды генерации оптического излучения . . . . .	121
3.2.	Инжекционная люминесценция . . . . .	122
3.3.	Внутренняя квантовая эффективность полупроводникового излучателя . . . . .	125
3.4.	Внешняя квантовая эффективность . . . . .	129
3.5.	Светодиоды . . . . .	132
3.5.1.	Основные параметры и характеристики светодиодов . .	132
3.5.2.	Сравнительные параметры некоторых отечественных и импортных промышленных типов светодиодов . . . . .	136
3.5.3.	Конструкция светодиодов . . . . .	140
3.5.4.	Перспективы развития и применения излучающих диодов	142
3.6.	Инжекционные полупроводниковые лазеры . . . . .	143
3.6.1.	Условия возникновения лазерной генерации . . . . .	143

3.6.2. Понятие инверсной населенности . . . . .	145
3.6.3. Лазерное усиление . . . . .	146
3.6.4. Условие лазерной генерации и порог возбуждения . . . .	148
3.6.5. Направленность лазерного излучения . . . . .	149
3.6.6. Свойства гетероструктур . . . . .	150
3.6.7. Полупроводниковый лазер на двойной гетероструктуре .	153
3.6.8. Конструкции полупроводниковых лазеров . . . . .	155
3.6.9. Основные параметры и характеристики полупроводниковых лазеров . . . . .	157
3.6.10. Динамические одномодовые лазерные структуры . . . .	163
3.6.11. Влияние температуры на параметры полупроводниковых лазеров . . . . .	168
3.6.12. Схема управления полупроводниковым лазером . . . .	169
3.6.13. Современные полупроводниковые лазеры . . . . .	171
3.7. Разновидность лазеров . . . . .	174
3.7.1. Газовые лазеры . . . . .	174
3.7.2. Твердотельные лазеры . . . . .	176
3.7.3. Полупроводниковые лазеры с электронным возбуждением .	180
4. Оптроны и оптронные микросхемы . . . . .	182
4.1. Классификация оптронов . . . . .	182
4.2. Основные параметры оптронов . . . . .	185
4.2.1. Входные параметры оптронов . . . . .	185
4.2.2. Выходные параметры оптронов . . . . .	186
4.2.3. Передаточные параметры оптопар. . . . .	188
4.2.4. Параметры изоляции . . . . .	189
4.3. Резисторы оптопары . . . . .	190
4.4. Диодные оптопары . . . . .	192
4.5. Транзисторные оптопары . . . . .	196
4.6. Тиристорные оптопары . . . . .	200
4.7. Оптоэлектронные микросхемы . . . . .	202
4.8. Конструкция оптронов . . . . .	204
5. Использование фоточувствительных приборов в электронных схемах . . . . .	207
5.1. Схемы включения фоторезисторов . . . . .	207
5.2. Практические схемы с фоторезисторами . . . . .	215
5.3. Коррекция характеристик фоторезисторов . . . . .	221

5.4. Схемы включения фотодиодных датчиков оптического излучения . . . . .	227
5.5. Особенности применения лавинных фотодиодов . . . . .	245
5.6. Схемы на фототранзисторах . . . . .	250
5.7. ФПУ на пироэлектрических приемниках излучения . . . . .	252
Список литературы . . . . .	255

18. Пароль Н.В., Кайдалов С.А. Фоточувствительные приборы и их применение: Справочник. М.: Радио и связь, 1991.
19. Беликова И.Н., Белоногова Е.К., Дьякова Ю.Г. и др. Фотоприемники. Обзор отечественного рынка // Лазерная техника и оптоэлектроника. 1994. Вып. 1–2. С. 83–99.
20. Шарупич Л.С., Тугов Н.М. Оптоэлектроника. М.: Энергоатомиздат, 1984.
21. Виглеб Г. Датчики: Пер. с нем. М.: Мир, 1989.
22. Приемные устройства ИК-систем / Под ред. В.И. Сидорова. М.: Радио и связь, 1987.
23. Величко А.А., Окомельченко И.А. Интегральные ИК-фотоприемные устройства на основе узкозонных полупроводников // Электронная промышленность, 1993. Вып. 4. С. 15–21.
24. Отечественный рынок компонентов ВОСП // Сборник докладов семинара-выставки. М.: Ассоциация волоконно-оптической техники, 1991.
25. Келдыш Л.В. // ЖЭТФ, 1960, № 10.
26. Emmons R.B. / Journal of Applied Physics. 1967. Vol. 38. P. 1705.
27. McIntyre R.J. Multiplication noise uniform diodes / IEEE Trans. on Electron Devices. 1966. ED -13, 164 – 8.
28. Свечников Г.С. Интегральная схема. Киев: Наукова думка.
29. Амбарцумян М.А., Белоногова Е.К., Дьякова Ю.Г. и др. Волоконно-оптические линии связи - становление отечественного рынка // Лазерная техника и оптоэлектроника. 1992. Вып. 3–4. С. 6–30.
30. Ковтунюк Н.Ф., Сальников Е.Н. Фоточувствительные МДП-приборы для преобразования изображений. М.: Радио и связь, 1990.
31. Вуль Ф.Я., Дидейкин Ф.Т., Козырев С.В. Фотоприемники на основе структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) // Фотоприемники и фотопреобразователи. Л.: Наука. 1986. С. 105–130.
32. Green M.A. The Short-Wavelength Response of MIS Solar Cells // Journal of Applied Physics. 1979. Vol. 50, № 2. P. 1116–1122.
33. Герасимов А.П., Гуткин А.А., Седов В.Е. Влияние обратного смещения на фототок контактов Au-окисел-*n*-GaAs при  $\psi > E_g$  // Физика и техника полупроводников. 1980. Т.14, № 3. С. 550–552.
34. Малахов Б.А., Покаякин В.И., Степанов Г.В. О переключении в структуре металл – туннельно-прозрачный слой двуокиси кремния – *p-n*-переход // Микроэлектроника. 1980. Т. 9. Вып. 3. С. 241–258.
35. Васильев А.А., Касасент Д., Компанец И.Н., Парфенов А.В. Пространственные модуляторы света. М.: Радио и связь, 1987.



36. Киселев В.К., Оболенский С.В., Морозов Д.С. / Исследование эффектов переключения в фотоуправляемом полупроводниковом переключателе на GaAs // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Н. Новгород: Изд-во ННГУ. С. 148–156.

37. Carasso F., Tchang W., Bethea C.G., Hutchinson A.L., Levine B.F. Appl. Phys. Lett., 1983. Vol. 42. P. 93.

38. Sakal S., Naitoh M., Kobayashi m., Umeno M // IEEE Trans. Electron Devices, 1983. ED-30, 404.

39. ГОСТ 20332–84. Тиристоры. Термины, определения и буквенные обозначения параметров.

40. Замятин В.А., Кондратьев Б.В., Петухов В.М. Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры: Справочник. М.: Радио и связь, 1988.

41. Павлов А.В. Оптоэлектронные приборы. (Основы теории и расчета). М.: Энергия, 1974.

42. Полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы: Справочник / Под общей ред. Н.Н. Горюнова. М.: Энергия, 1982.

43. Иванов В.И., Аксенов А.И., Юшин А.М. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1988.

44. Коган Л.М., Ковыкин С.М., Родкин В.С., Андреев Ю.П. Новые светоизлучающие диоды // Электронная промышленность. 1990. Вып. 9. С. 22–23.

45. Гейг С., Эванс Д., Ходапп М., Соренсен Х. Применение оптоэлектронных приборов: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1981.

46. Hewlett-Packard Optoelectronic Components. LED Technology-Exceptionally Bright: Catalogy, 1993.

47. Мухитдинов М., Мусаев Э.С. Светоизлучающие диоды и их применение. М.: Радио и связь, 1988.

48. Вилисов А.А., Поспелова Е.Т., Купцова Т.А., Ничипуренко Б.А. Измерительный излучающий диод АЛ 154 // Электронная промышленность, 1991. Вып. 4. С. 93.

49. Коган Л.М., Гальчина Н.А., Родкин В.С. Излучающие ИК-диоды с повышенной мощностью излучения на основе двойных гетероструктур // Электронная промышленность. 1993. Вып. 10. С. 71–75.

50. Дмитриев В.А., Коган Л.М., Морозенко Я.В., и др. Фиолетовый SiC-4H-светодиод // Физика и техника полупроводников. 1988. Т. 22. Вып. 4. С. 664–669.

51. Вишневская Б.И., Дмитриев В.А., Коган Л.М. и др. Синие SiC-6H-светодиоды // Физика и техника полупроводников. 1988. Т. 22. Вып. 4. С. 669–670.

52. Суэмацу Я., Катаока С., Исии О. и др. Основы оптоэлектроники: Пер. с яп. М.: Мир, 1988.
53. Nichia increases blue- led luminance // Electronics, 1994. Vol. 67, № 23. P. 14.
54. Nakamura S., Mukai T., Senoh M. High- brightness InGaN/GaN double-heterostructure blue-green-light-emitting diodes // J. Appl. Phys. 1994. Vol. 76, № 12. P. 8189–8191.
55. Ярив А. Введение в оптоэлектронику: Пер. с англ./Под ред. О.В. Богданкевича. М.: Высшая школа, 1983.
56. Пихтин А.Н. Физические основы квантовой электроники и оптоэлектроники. М.: Высшая школа, 1983.
57. Свечников С.В. Элементы интегральной оптики. М.: Радио и связь, 1987.
58. Полупроводниковые инерционные лазеры. Динамика, модуляция, спектры: Пер. с англ./Под ред. У. Тсанга. М.: Радио и связь, 1990.
59. Алавердян С.А. Оптоэлектронные модули для ВОЛС // Лазерная техника и оптоэлектроника. 1994, Вып. 1–2. С. 66–69.
60. Yonezu H. et al. /AgGaAs-AlGaInAs double heterostructure planar stripe laser//J. Appl. Phys. 1973. Lett 12. P. 1585.
61. Andersson T., Lundqvist S., Eng S.T. // J. Appl. Phys. 1982. Lett 41. P. 14.
62. Дураев В.П., Русаков В.И. / Полупроводниковые лазерные усилители // Лазерная техника и оптоэлектроника, 1994. Вып. 1–2. С. 62–65.
63. Авруцкий И.А., Батукова Л.М., Дианов Е.М. и др. Лазеры с длиной волны излучения 0,98 мкм на основе гетероструктуры InGaP/GaAs/InGaAs, выращенных методом МОС-гибридной эпитаксии // Квантовая электроника. 1994. Т. 21, № 10. С. 921–924.
64. Приборы электронной техники народнохозяйственного назначения: Изделия квантовой электроники / Сб. справочных листов. РД110829.4–94, РНИИ "Электростандарт", 1994. Т. 4.
65. Дураев В.П. Инжекторные лазеры для волоконно-оптических линий связи // Лазерная техника и оптоэлектроника. 1992. Вып. 3–4. С. 40–41.
66. Приборы электронной техники народнохозяйственного значения / Изделия квантовой электроники / Сб. справочных листов. РД110829.3–93, РНИИ "Электростандарт". 1993. Т. 3.
67. Швейкин В.И. Полупроводниковая микроэлектроника в НТЦ "Микролазер" // Лазерная техника и оптоэлектроника. 1992. Вып. 3–4. С. 3–6.

68. Кравцов Н.В., Чирков Л.Е., Поляченко В.Л. Элементы оптоэлектронных информационных систем. М.: Наука, 1970.
69. Проклов В.В., Бушлаков А.У. Оптическая коммутация на основе акустооптических эффектов в  $Ti$  диффузных волноводах  $LiNbO_3$  // Радиотехника и электроника. М.: Наука. 1995. Т. 40. Вып. 7. С. 1136–1145.
70. ГОСТ 27299–87. Приборы полупроводниковые оптоэлектронные. Термины, определения и буквенные обозначения. М.: Изд-во стандартов, 1987.
71. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1977.
72. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: Наука, 1986.
73. Агаханян Т.М. Интегральные микросхемы. М.: Энергоатомиздат, 1983.
74. Войшвилло Г.В. Усилительные устройства. М.: Радио и связь, 1983.
75. Функциональные усилители с большим динамическим диапазоном. Основы теории и проектирования/ Под ред. В.М. Волкова. М.: Сов. радио, 1976.
76. Усилители с полевыми транзисторами / Под. ред. И.П. Степаненко. М.: Сов. радио, 1980.
77. Горшков Б.И. Элементы радиоэлектронных устройств: Справочник. М.: Радио и связь, 1988.
78. Уитсон Дж. 500 практических схем на ИС: Пер. с англ. М.: Мир, 1992.
79. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. Л.: Энергоатомиздат, 1988.
80. Burr-Brown IC. Applications Handbook // Burr-Brown Corporation in USA, 1994.
81. Шевцов Э.А., Белкин М.Е. Фотоприемные устройства волоконно-оптических систем передачи. М.: Радио и связь, 1992.
82. Агаханян Т.М. Линейные импульсные усилители. М.: Связь, 1970.
83. Коган Л.М. Полупроводниковые излучатели с повышенной мощностью излучения//Chip News, декабрь 1999, С. 24–27.
84. Коган Л.М. Современное состояние полупроводниковых излучающих диодов//Электронные компоненты. 2000, № 2. С. 22–27.

## **Основы оптоэлектроники**

А. И. Астайкин, М.К. Смирнов

Редактор Н.П. Мишкина, корректор Е.А. Коваленко  
Компьютерная подготовка оригинал-макета Е.В. Жукова

---

Подписано в печать 14.03.2001      Формат 60×84/16      Печать офсетная  
Усл. печ. л. 16    Уч.–изд. л. 18      Тираж 250 экз.    Зак. тип. № 45–2000  
ПД 00568 от 22.05.2000    ЛР 020651 от 23.10.97.

---

Отпечатано в ИПК ВНИИЭФ, г. Саров Нижегородской обл.