

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, светонзлучающих 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 <i>p-n</i> -переход	53
2.5.2. Устройство <i>p-i-n</i> -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 <i>p-i-n</i> -фотодиодов	65
2.5.6. Фотодиоды с барьером Шотки	65
2.5.7. Гетерофотодиоды	68
2.5.8. Лавинные фотодиоды	70

	А
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 <i>p-n</i> -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

	А	
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., Покалякин 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., Tsang W., Bethea C.G., Hutchinson A.L., Levine V.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 InGeN/GaAlN 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. /AGaAs-Al&Ga1-xAs 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.