

Д. т. н. Л. Ф. ПОЛИТАНСКИЙ, В. В. ЛЕСИНСКИЙ

Украина, Черновицкий нац. университет им. Юрия Федьковича
E-mail: politansky@chnu.cv.ua

Дата поступления в редакцию
30.06 2008 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
(ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ КОММУТАТОР НА ДМОП-ТРАНЗИСТОРАХ

Разработана математическая модель приемопереключающих элементов оптронной пары «ДМОП-транзистор—фотодиоды». Предложена интегральная схема коммутатора, управляемого фотосигналом, на кремниевой структуре с диэлектрической изоляцией.

Вопросам интеграции фотоприемных элементов и электронных схем обработки посвящено множество работ [1—5]. В работах [6—8] описываются приборы с оптическим управлением фотодиодов и полевых транзисторов, использующих внешние источники питания. Однако в них не рассматривается математическая модель приемопереключающих элементов, учитывающая влияние конструктивных и электрофизических параметров элементов оптоэлектронной пары «полевой транзистор — фотодиоды» на ее электрические параметры. Кроме этого, не рассматриваются вопросы интеграции фотоприемных элементов с МОП-транзисторами с двойной диффузией (ДМОП-транзисторы), обладающими малым сопротивлением в открытом состоянии.

Целью данной работы является разработка математической модели переключающих элементов «ДМОП-транзистор—фотодиоды», устанавливающей взаимосвязь между их электрическими, конструктивными и электрофизическими параметрами, а также создание интегрального оптоэлектронного коммутатора на ДМОП-транзисторах, управляемого оптическим сигналом.

Выходная характеристика ДМОП-транзистора [9] имеет вид

$$I_c = \mu_n C_0 \frac{W}{L} \left[(U_{зи} - U_{пор}^*) U_{си} - 1/2 U_{си}^2 \right],$$

где I_c — ток стока;
 μ_n — подвижность электронов в канале;
 C_0 — удельная емкость подзатворного диэлектрика;
 W и L — ширина и длина канала, соответственно;
 $U_{зи}$ — напряжение на затворе относительно истока;
 $U_{пор}^*$ — эффективное пороговое напряжение транзистора, величина которого определяется концентрацией примеси доноров в исходной подложке, а также характером распределения акцепторов в p -канальной области прибора;
 $U_{си}$ — напряжение сток-исток.

Очевидно, что образованием индуцированного канала и током стока структуры можно управлять с помощью положительного потенциала, создаваемого при освещении последовательно включенных между стоком и истоком фотодиодов, работающих в фотогальваническом режиме.

Напряжение холостого хода фотодиода с учетом того, что величина фототока значительно больше темнового, равно

$$U_{xx} \cong \varphi_T \ln \frac{I_\Phi}{I_T}, \quad (1)$$

где φ_T — температурный потенциал;
 I_Φ — фототок;
 I_T — темновой ток.

Если длина p - и n -областей намного меньше диффузионной длины носителей $l \ll L_n, L_p$, то темновой ток фотодиода определяется следующим выражением [10, с. 356]:

$$I_T = q A_\Phi (n_{po} D_n + p_{no} D_p) / l, \quad (2)$$

где q — заряд электрона;
 A_Φ — площадь p - n -перехода;
 n_{po}, p_{no} — концентрации неосновных равновесных носителей;
 D_n, D_p — коэффициент диффузии электронов и дырок, соответственно;
 l — длина p - и n -областей.

Фототок фотодиода записывается в виде [2, с. 161]

$$I_\Phi = q \lambda \eta \Phi A_\Phi / (hc), \quad (3)$$

где λ — длина волны падающего светового излучения;
 η — квантовый выход;
 Φ — мощность падающего на элемент потока излучения;
 h — постоянная Планка;
 c — скорость света.

Таким образом, в предположении что $n_{po} D_n \gg p_{no} D_p$, напряжение холостого хода можно записать в следующем виде:

$$U_{xx} = \varphi_T \ln \frac{\lambda \eta \Phi l}{h c n_{po} D_n}. \quad (4)$$

Тогда напряжение между затвором и истоком, создаваемое фотодиодами в количестве N , равно

$$U_{зи} = N U_{xx} = N \varphi_T \ln \frac{\lambda \eta \Phi l}{h c n_{po} D_n}.$$

Следовательно, математическая модель вольт-амперной характеристики (ВАХ) приемопереключающего элемента системы «фотодиоды—МОП-транзистор» имеет следующий вид:

$$I_{\text{си}} = \mu_n C_0 \frac{W}{L} \times \left[\left(N\phi_T \ln \frac{\lambda \eta \Phi l}{h c n_{\text{po}} D_n} - U_{\text{пор}} \right) U_{\text{си}} - \frac{1}{2} U_{\text{си}}^2 \right]. \quad (5)$$

Как следует из полученного выражения, ВАХ оптоэлектронного приемопереключающего элемента «фотодиоды—МОП-транзистор» определяется электрофизическими и конструктивными параметрами фотодиода ($n_{\text{po}}, D_n, L_n, l, N$) и МОП-транзистора ($\mu_n, C_0, U_{\text{пор}}, W, L$), параметрами светового излучения (λ, Φ) и квантовым выходом η .

Чувствительность тока стока приемопереключающего элемента к изменению мощности падающего на фотодиоды потока излучения

$$\frac{dI_{\text{си}}}{d\Phi} = \mu_n C_0 \frac{W}{L} N\phi_T \frac{1}{\Phi} U_{\text{си}}. \quad (6)$$

Сопротивление $R_{\text{си отк}}$ переключающего элемента при $N\phi_{\text{xx}} - U_{\text{пор}} > U_{\text{си}}$ равно

$$R_{\text{си}} = \frac{dU_{\text{си}}}{dI_{\text{си}}} = \frac{L}{W} \frac{1}{\mu_n C_0 \left[N\phi_T \ln \frac{\lambda \eta \Phi l}{h c n_{\text{po}} D_n} - U_{\text{пор}}^* \right]}. \quad (7)$$

Следует отметить, что управлять выходным током $I_{\text{си}}$ можно также напряжением, подаваемым на затвор от источника постоянного тока через фотодиоды. В зависимости от полярности подключения фотодиодов напряжение на затворе ДМОП-транзистора может увеличиваться или уменьшаться на величину фото-эдс, возникающей под воздействием светового излучения.

При этом выходную ВАХ системы «ДМОП-транзистор—фотодиоды» можно записать следующим образом:

$$I_{\text{си}} = \mu_n C_0 \frac{W}{L} \times \left[\left(U_{30} \pm N\phi_T \ln \frac{\lambda \eta \Phi l}{h c n_{\text{po}} D_n} - U_{\text{пор}} \right) U_{\text{си}} - \frac{1}{2} U_{\text{си}}^2 \right], \quad (8)$$

где U_{30} — напряжение источника постоянного тока, подаваемое на затвор через фотодиоды.

Введя понятие порогового напряжения системы

$$U_{\text{пор с}} = U_{\text{пор}} \mp N\phi_T \ln \frac{\lambda \eta \Phi l}{h c n_{\text{po}} D_n}, \quad (9)$$

ВАХ приемопереключающей оптоэлектронной пары можно записать как

$$I_{\text{си}} = \mu_n C_0 \frac{W}{L} \left[(U_{30} - U_{\text{пор с}}^*) U_{\text{си}} - \frac{1}{2} U_{\text{си}}^2 \right]. \quad (10)$$

Чувствительность порогового напряжения системы к изменению мощности падающего на группу фотодиодов потока излучения будет равна

$$\frac{dU_{\text{пор с}}}{d\Phi} = \frac{N\phi_T}{\Phi}. \quad (11)$$

Экспериментальные исследования ВАХ, спектральной и передаточной характеристик приемопереключающих элементов системы «арсенид-галлиевые фотодиоды — ДМОП-транзистор» показали, что выходные ВАХ носят обычный характер зависимостей, который имеет место для n -канальных МОП-транзисторов с индуцированным каналом. Зависимость $I_{\text{си}}(\lambda)$ имеет такой же характер, как спектральные зависимости фототока, возникающего в последовательно соединенных p - n -переходах. При этом ток $I_{\text{си}}$ значительно больше фототока, что указывает на увеличение интегральной и спектральной чувствительности оптоэлектронного элемента «фотодиоды—ДМОП-транзисторы» по сравнению с чувствительностью фотоэлементов.

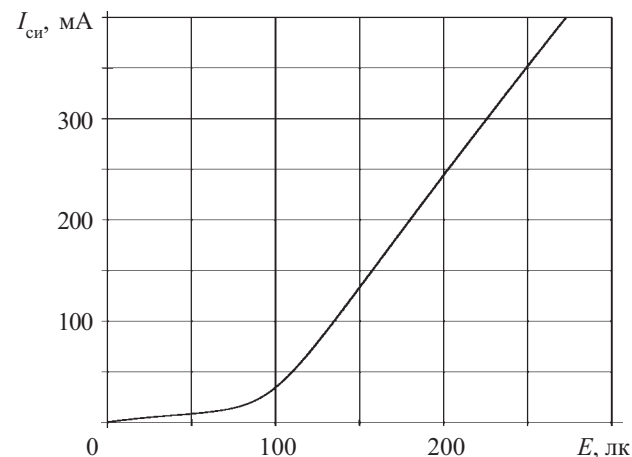


Рис. 1. Передаточная характеристика системы «ДМОП-транзистор — последовательно соединенные фотодиоды», работающей в фотогальваническом режиме

Передаточная характеристика исследуемой зависимости приведена на **рис. 1**. Из этой зависимости следует, что порог срабатывания элемента (минимальное значение освещенности E_0 , при котором открывается транзистор) зависит от величины порогового напряжения ДМОП-транзистора и определяется из условия

$$NU_{\text{од}}(E_0) = U_{\text{итд}}. \quad (12)$$

При воздействии световым излучением на батарею фотодиодов в зависимости от полярности их включения в схему управления элементов от внешнего источника питания можно уменьшать или увеличивать ток стока $I_{\text{си}}$ (**рис. 2**)

Зависимость тока $I_{\text{си}}$ от освещенности E при несовпадении полярностей напряжения источника питания и фото-эдс фотодиодов, освещенных световым излучением ламп накаливания, приведена на **рис. 3**.

Зависимость чувствительности элементов от длины волны падающего излучения аналогична спек-

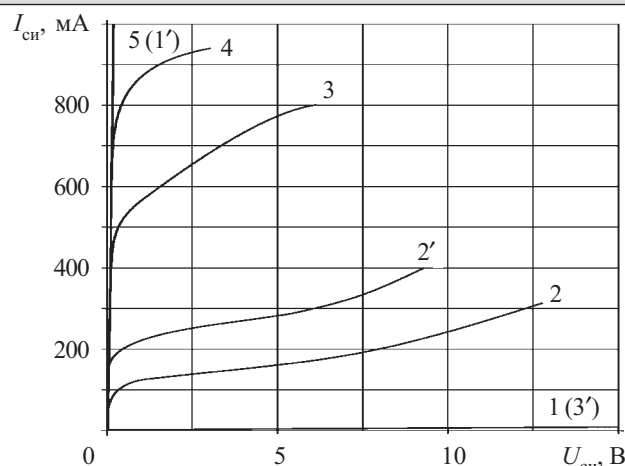


Рис. 2. Выходные ВАХ при прямом (1—5) и обратном (1'—3') включении фотодиодов при разных значениях освещенности (в лк):

I' — 0; 1 — 230; 2, 2' — 450; 3, 3' — 1340; 4 — 2300; 5 — 3500

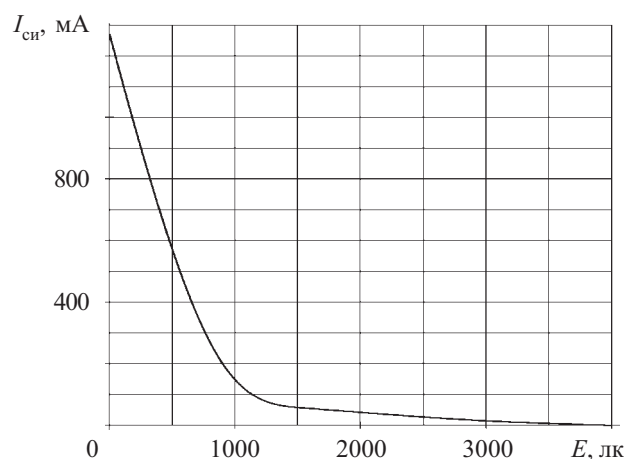


Рис. 3. Передаточная характеристика элементов при обратном включении фотодиодов

ральной характеристике фотодиодов. При этом их выходные токи могут превышать токи фотодиодов на несколько порядков.

Микроэлектронное исполнение оптоэлектронных переключающих элементов «фотодиоды—ДМОП-транзисторы» возможно на кремниевых структурах с диэлектрической изоляцией (КСДИ), позволяющих осуществлять планарное расположение контактов к областям ДМОП-структуры.

Очевидно, что для обеспечения удовлетворительных значений длительности фронтов выходных импульсов, а также возможности подключения исполнительных устройств к шинам разной полярности, необходимо использование дополнительных устройств согласования выходного электрического сигнала батареи фотодиодов, работающих в фотогальваническом режиме с емкостью переключающего ДМОП-транзистора. Это реализовано в предложенном нами интегральном оптоэлектронном коммутаторе на ДМОП-транзисторах с использованием в качестве исходной подложки монокристаллического кремния КЭФ-4,5(100), принципиальная электрическая схема которого приведена на рис. 4.

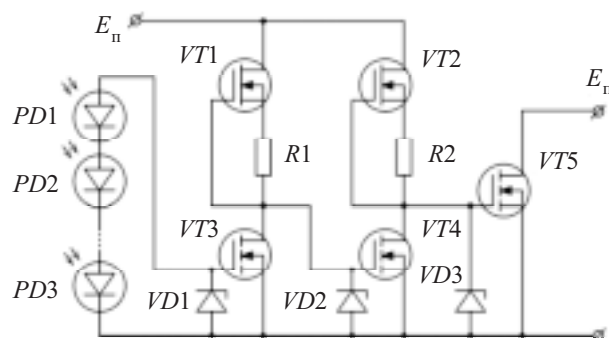


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема оптоэлектронного коммутатора в интегральном исполнении

При этом ДМОП-транзисторы и фотодиоды изготавливались в отдельных изолированных окислом карманах. С целью уменьшения сопротивления тела стока ДМОП-транзисторов, а также сопротивления n -области фотодиодов исходная монокристаллическая пластина легировалась сурьмой. При этом сформированный диффузионный слой, играющий роль скрытого слоя, имел поверхностное сопротивление $10 \text{ Ом}/\square \pm 20\%$ и толщину 5 мкм.

Снижение емкости фотодиодов обеспечивалось выполнением их p -области в виде сетки по методике, предложенной в [11]. Количество последовательно включенных фотодиодов $N=15$ выбиралось из условия, что напряжение фотогальванической батареи должно превышать значение порогового напряжения транзистора VT3 (рис. 4).

На рис. 5 приведен фрагмент поперечного сечения структуры интегрального коммутатора.

С целью уменьшения сопротивления тела стока ДМОП-транзистора в открытом состоянии формировалась n^+ -область под контакты стока на глубину залегания скрытого слоя. Аналогичным образом формировались контакты к n -области фотодиода со скрытым слоем.

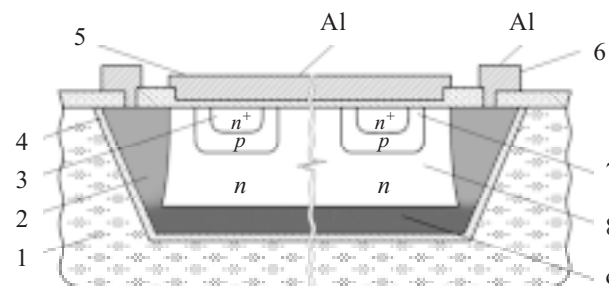


Рис. 5. Фрагмент поперечного сечения кристалла ИС интегрального коммутатора:

1 — поликристаллический кремний; 2 — n^+ -область под контакт стока; 3 — исток; 4 — изолирующий слой окиси кремния; 5 — затвор; 6 — контакт к стоку; 7 — p -канальная область; 8 — сток; 9 — скрытый слой

P -канальные области нагрузочных активных и переключающих МОП-транзисторов формировались методом ионного легирования. Их поверхностные сопротивления составляли 600—800 и 650—700 $\text{Ом}/\square$, соответственно. P -области диодных структур с поверхностным сопротивлением $R_s = 150—200 \text{ Ом}/\square$ так-

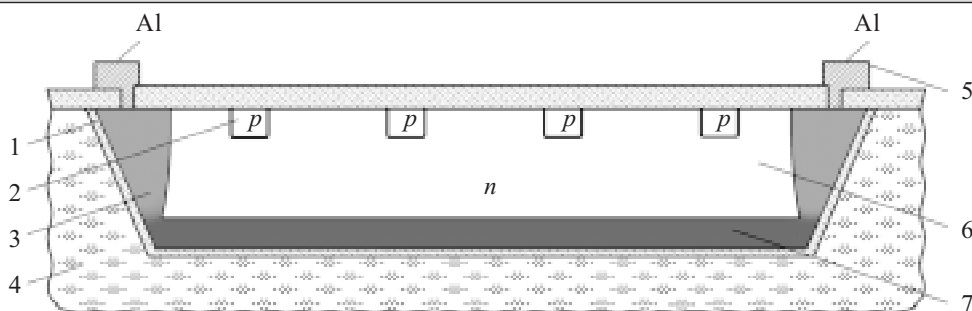


Рис. 6. Фрагмент поперечного сечения фотодиода ИС интегрального коммутатора:

1 — изолирующий слой окиси кремния; 2 — p -область; 3 — n^+ -область под контакт; 4 — поликристаллический кремний; 5 — контакт; 6 — n -область; 7 — скрытый слой

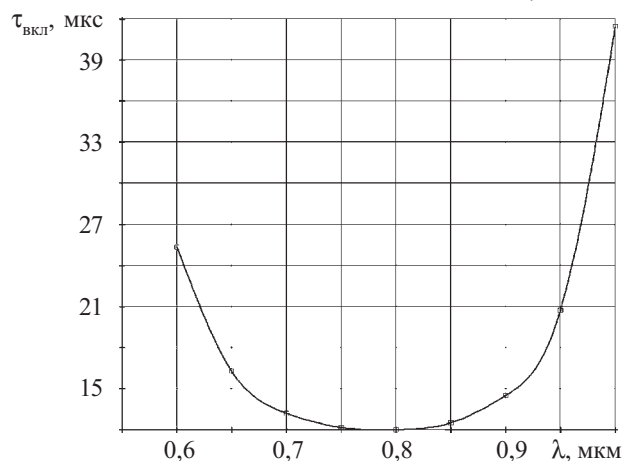


Рис. 7. Зависимость времени включения микросхемы от длины волны оптического излучения

же формировались ионным легированием. Глубина залегания p - n -перехода составляла 1,0 мкм.

На рис. 6 приведена топология p -областей сетчатой структуры фотодиодов интегрального коммутатора.

На рис. 7 приведена зависимость времени включения $\tau_{вкл}$ коммутатора от длины волны падающего излучения. Минимальное значение $\tau_{вкл}$ составляет 12 мкс при освещении оптическим излучением с длиной волны 0,77 мкм и возрастает как при уменьшении, так и при увеличении длины волны излучения.

Очевидно, что зависимость $\tau_{вкл}$ обусловлена спектральной характеристикой чувствительности $S=S(\lambda)$ фотобатареи (рис. 8).

Время выключения ИС определяется линейным сопротивлением активного транзистора VT4 (рис. 4), через который происходит разрядка входной емкости ключевого транзистора VT5, и составляет 0,5 мкс.

Следует отметить, что напряжение холостого хода U_{xx} фотодиодов батареи изменялось от 0,462 до 0,475 В (рис. 9) в диапазоне длины волны оптического излучения 0,6—1,0 мкм. Такое изменение U_{xx} несущественно влияет на выходной электрический сигнал батареи фотодиодов, являющийся уровнем отпираания транзистора VT3.

Сопротивление ключевого транзистора VT5 (рис. 4) и максимальная величина коммутируемого тока при комнатной температуре составляли 1,2 Ом и 0,6 А, соответственно. Напряжение коммутации $E_{ком}$ может изменяться в пределах 0—50 В.

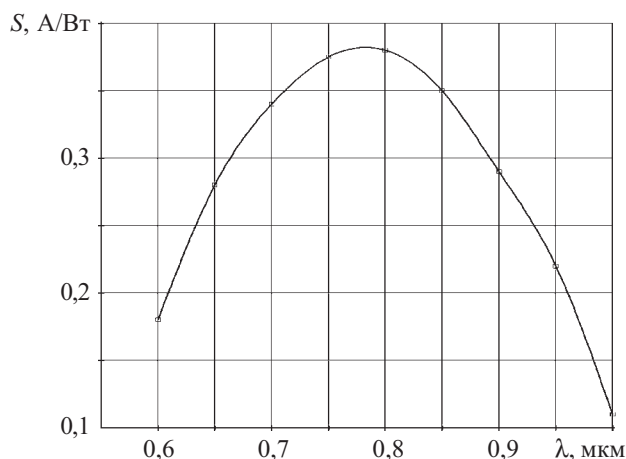


Рис. 8. Спектральная характеристика чувствительности фотовольтаической батареи

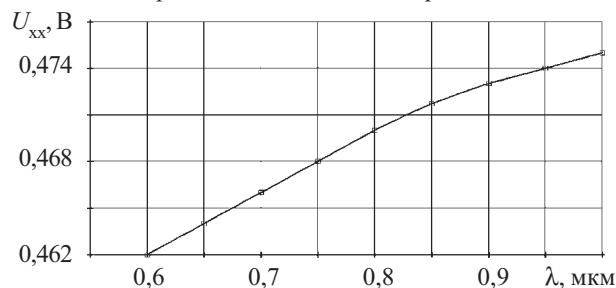


Рис. 9. Спектральная зависимость напряжения холостого хода диодов фотовольтаической батареи

Выводы

1. Разработана математическая модель переключающих элементов системы «ДМОП-транзисторы — фотодиоды», которая устанавливает взаимосвязь между их электрическими, конструктивными и электрофизическими параметрами.

2. Разработана конструкция и технология изготовления интегрального оптоэлектронного коммутатора на ДМОП-транзисторах на пластинах монокристаллического кремния КЭФ-4,5(100) с изоляцией элементов диэлектрической пленкой SiO_2 (КСДИ).

3. Оптоэлектронный коммутатор позволяет осуществлять управление исполнительными устройствами, подключаемыми к положительным и отрицательным шинам питания.

4. Величины коммутируемого напряжения и тока составляют 0—50 В и 0—0,6 А, соответственно.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Перевертайло В. Л., Елифанов А. А., Каренгин В. Г., Тарасенко Л. И. Интегральные схемы самосканируемых линейных фотоприемников в интроскопии и томографии // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*.— 2005.— № 6.— С. 1—6.
2. Аксёненко М. Д., Бараночников М. Л., Смолин О. В. Микроэлектронные фотоприемные устройства.— М.: Энергоиздат, 1984.
3. Яганов П. О. Мікроелектронні перетворювачі на кремнієвій структурі з діелектричною ізоляцією / Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Київ: НТУУ «КПІ», 2006.
4. Фізичні основи електронної техніки: Навч. посібник / За ред. З. Готри.— Львів: Видавництво НУ „Львівська політехніка”, 2002.
5. Mendis, S. K., Kemeny, S. E., Gee, R. C. et al. CMOS active pixel image sensors for highly integrated imaging systems // *IEEE J. Solid-State Circuits*.— 1997.— Vol. 32, N 2.— P. 187—197.

6. Пат. 4717948 USA 1984 г. Полупроводниковый прибор с оптическим управлением / Реф. журнал „Электроника”.— 1989. № 3.
7. Пат. 4346395 USA 1980 г. Фотодетектор на основе фотодиодов и МДП-транзисторов / Там же.— 1983. № 5.
8. Заявка 59-22360 Японии 1982 г. МОП-транзистор с оптическим управлением / Там же.— 1985. № 9.
9. Политанский Л. Ф., Лихобабин Н. П. Эффективное пороговое напряжение ДМОП-транзисторов // *Электронная техника. Сер. Полупроводниковые приборы*.— 1985.— Вып. 3 (176).— С. 54—56.
10. Пикус Г. Е. Основы теории полупроводниковых приборов.— М.: Наука, 1965.
11. Блынский В. И., Василевский Ю. Г., Малышев С. А., Чиж А. Л. Кремниевый фотодиод с сетчатым *p-n*-переходом // *Физика и техника полупроводников*.— 2007.— Т. 41, вып. 2.— С. 229—232.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: В 2-х томах.— Додэка-XXI, 2008.— 1774 с.

«Полупроводниковая схемотехника» — перевод 12-го издания широкоизвестной книги Ульриха Титце и Кристофа Шенка (в 1982 году издательство «Мир» выпустило перевод 5-го издания этой книги). Это фундаментальный труд, объединяющий принципы устройства полупроводниковых элементов (диоды, биполярные и полевые транзисторы, интегральные микросхемы) и основы создания из этих элементов различных функциональных узлов аналоговой (усилители, модуляторы, фильтры, радиоприемники) и цифровой (спусковые схемы, счетчики, регистры, шифраторы и дешифраторы, устройства памяти и т.д.) техники. Книга состоит из двух томов: первый посвящен основам схемотехники, второй — применениям функциональных узлов при создании более сложных устройств. При изложении материала широко используются эквивалентные схемы как полупроводниковых элементов, так и функциональных узлов, соответствующие работе в области постоянного тока и низких/высоких частот. Особое внимание уделено также переходным процессам цифровых схем. Описание каждого элемента или схемы сопровождается необходимым количеством достаточно элементарных формул, служащих для их инженерного расчета. Энциклопедическая полнота, обилие самых разных схем и доступное математическое обоснование делают книгу полезной широкому кругу читателей: радиолюбителям, техникам ремонтных предприятий, инженерам радиотехники и электроники и научным работникам.

НОВЫЕ КНИГИ



Наундорф У. Аналоговая электроника: основы, расчет, моделирование.— М.: Техносфера, 2008.— 472 с.

Знание основ аналоговой схемотехники является базой практически любой технической специальности. В книге подробно рассмотрены основные электронные элементы и базовые схемы с ними. Особое внимание уделяется нелинейным элементам, которые анализируются посредством соответствующего приближения, с последующим моделированием их характеристик на компьютере для практического усвоения материала. На CD записаны используемые в процессе изучения программы SPICE и GNU PLOT, а также документация и программы-примеры для систем LINUX и Windows. Большое количество упражнений, возможность проверять расчеты посредством компьютерного моделирования, наглядность делают книгу прекрасным современным учебником, особенно полезным студентам первых курсов, изучающим электронику в технических университетах. Книга предназначена также инженерам-практикам, техникам и всем интересующимся электроникой и схемотехникой.