поликристаллические полупроводники. М.: Наука, 1987. 484 с. 3. *Шур М.* Физика полупроводниковых приборов. В 2-х кн. М.: Мир, 1992. 4. *Блад П., Ортон Дж. В.* Методы измерения электрических параметров полупроводников // Зарубежная электроника. 1991. Вып. 2. С. 3-49. 5. *Kunst M., Muller G., Schmidt R.* Surface and Volume Processes in Semiconductor Studied by Contactless Transient Photoconductivity Measurements // J. Appl. Phys. A. 1988. Vol. 46. P. 77-85. 6. *Использование* емкостной связи для бесконтактного контроля электрофизических параметров полупроводниковых пластин большого диаметра / Е.С. Горнев, Л. Н. Кравченко, М.П. Поджилков, В.Н. Подшивалов, Г.К. Чиркин // Микроэлектроника. 1999. Т. 28, №1. С. 68 -73. 7. *Рау Э.И., Шичу Чжу.* Бесконтактный электронно-зондовый метод измерения диффузионной длины и времени жизни неосновных носителей в полупроводниках // Физика и техника полупроводников. 2000. Т. 35. Вып. 6. С. 749-753. 8. *Бородин Б.Г., Гордиенко Ю.Е., Рябухин А.А.* Фотомодуляционная диагностика полупроводниковых структур // Радиотехника. 1999. Вып. 111. С.7-13. 9. *Gordienko E., Borodin B.G., Smuglii V.I.* Microwave Photomodulation Method for the Study of Recombination Processes in Semiconductors // Telecommunication and Radio Engineering. 1998. Vol. 52, N 2. P. 47 - 52.

Поступила в редколлегию 02.11.2002

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Айзацкий Н.И.

Гордиенко Юрий Емельянович, д-р физ.-мат. наук, професор, зав. кафедрой микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: микроэлектроника, неразрушающий контроль материалов и изделий. Адрес: Украина, 61166,Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (0572) 40-93-62, 32-12-76.

Бородин Борис Григорьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: контроль параметров полупроводниковых материалов. Адрес: Украина, 61166,Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (0572) 40-93-62, 32-12-76.

Бабыченко Сергей Васильевич, стажер-исследователь кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: микроэлектроника, неразрушающий контроль материалов и изделий. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (0572) 40-93-62, 32-12-76.

Абу Анзех Ияд, аспирант кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: микроэлектроника, неразрушающий контроль материалов и изделий. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (0572) 40-93-62, 32-12-76.

УДК 621.362:621.383

ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИОДНЫХ P-I-N ФОТОСТРУКТУР

СЛИПЧЕНКО Н.И., ПИСЬМЕНЕЦКИЙ В.А., СУПРУН Ж.М.

Рассматриваются основные свойства и параметры p-i-n фотодиодов. Исследуется влияние температуры и освещенности на фотоэлектрические характеристики кремниевых солнечных элементов. Приведенные результаты экспериментальных исследований подтверждают корректность предложенных математических моделей.

К числу основных фотодиодных конструкций, перспективных для использования в оптоэлектронных приборах, следует отнести кремниевую p-i-n структуру, которая все активнее вытесняет приборы с p-n переходом. В последнее время из-за резкого расширения производства средств связи и, в частности, носимых переговорных устройств специального назначения постоянно увеличивается спрос на p-i-n диоды. По данным одного из ведущих зарубежных производителей, годовой прирост потребности в p-i-n диодах в последние 5 лет достигает 17-33%, а по отдельным типономиналам – до 50%. Подобная тенденция наблюдается и в нашей стране, причем характерно, что p-i-n диоды находят все большее применение не только в специальной аппаратуре, но и в коммерческой.

Широкое распространение p-i-n диоды получили в ВЧ и СВЧ электронике для управления уровнем и фазой СВЧ сигналов. Их можно использовать в качестве СВЧ переключателей с практически постоянной барьерной емкостью и высокой нагрузочной способностью. P-i-n диоды применяют также для защиты радиотехнической аппаратуры от случайных СВЧ импульсов, для стабилизации СВЧ мощности. Применение коммутаторов на p-i-n диодах значительно сокращает время на переключение с приема на передачу, что особенно важно при работе с цифровыми видами связи. Благодаря высокому сопротивлению p-i-n диодов в закрытом состоянии и весьма низкому – в открытом, стало возможным их применение в качестве элементов затухания и переключения. При выборе излучателей и фотоприемников принимаются во внимание не только обеспечиваемые ими в линиях дальнодействие и быстродействие, но и долговечность, простота применения, стоимость. P-i-n диоды широко применяют как источники энергии. Кроме того, их можно использовать в качестве управляемого аттенюатора, сопротивление которого почти линейно зависит от прямого тока, а также в модуляторах, ограничителях, фазовращателях.

Анализ работ по p-i-n фотодиодам позволяет сформулировать следующие их основные достоинства:

– сочетание высокой чувствительности (на длине волны $\lambda \approx 0.90$ мкм практически достигнут теоретический предел $S_0 \approx 0.7$ А/Вт) и высокого быстродействия;

– малая барьерная емкость;

– линейность характеристик в широком диапазоне изменения мощности облучения;

– высокая эффективность при малых обратных напряжениях (в частности в вентильном режиме);

– малые значения паразитных параметров (токи утечки, емкости);

– высокая температурная стабильность характеристик и хорошие эксплутационные свойства;

– высокое дифференциальное сопротивление p-i-n фотодиодов открывает возможности для создания высококачественных усилителей.

Целью настоящей работы является анализ и исследование основных параметров p-i-n фотоструктур: выходная мощность, фототок, эксплутационные параметры: напряжение холостого хода $U_{x.x.}$, ток короткого замыкания $I_{к.з.}$ КПД для максимальной мощности, коэффициент заполнения ВАХ.

Величина $U_{x.x}$ может быть выражена через фототок $I_ф$, ток насыщения I_0 и параметр a [5]:

$$U_{x.x.} = \frac{akT}{e}\ln\left(\frac{I_ф}{I_0}+1\right) \approx \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{I_ф}{I_0}\right), \qquad (1)$$

где a – параметр, который определяется природой тока через p-i-n переход и может быть равным 1-3.

Следовательно, при заданном токе $I_ф$ напряжение холостого хода логарифмически возрастает при уменьшении тока насыщения I_0. Значение фототока короткого замыкания определяется соотношением [5]:

$$I_{к.з.} = \frac{SW}{1+\frac{R_П}{R_{p-i-n}}}, \qquad (2)$$

здесь S – интегральная чувствительность фотодиода; W – мощность потока лучистой энергии; $R_П$ – последовательное сопротивление; R_{p-i-n} – сопротивление p-i-n перехода.

Выходная мощность равна [3]:

$$P = IU = I_ф U\left(\exp\left(\frac{eU}{kT}\right)-1\right) - I_ф U. \qquad (3)$$

Условие максимума мощности получим, положив dP/dU=0. Тогда максимальная выходная мощность определяется выражением:

$$P_m = I_m U_m \approx I_ф\left[\frac{1}{\beta}\ln(1+U_m\beta)-\frac{1}{\beta}\right] = I_ф\left(\frac{E_m}{e}\right), \qquad (4)$$

где $\beta = e/kT$, $E_m = e\left[U_{xx} - \frac{1}{\beta}\ln(1+U_m\beta)-\frac{1}{\beta}\right]$ – ширина запрещенной зоны.

Зависимость максимальной мощности от изменения фототока при максимальном напряжении U_m=26В показана на рис. 1

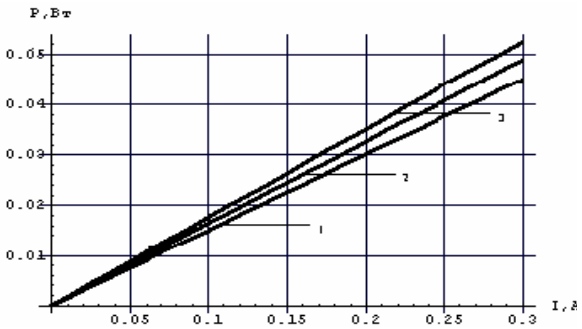

Рис. 1. Зависимость максимальной мощности P_m от изменения фототока $I_ф$ при максимальном напряжении U_m: 1 – при 20^0C; 2 – 50^0C; 3 – 80^0C

Зависимость максимальной мощности от изменения максимального напряжения при фототоке $I_ф$ = 0-13А представлена на рис. 2.

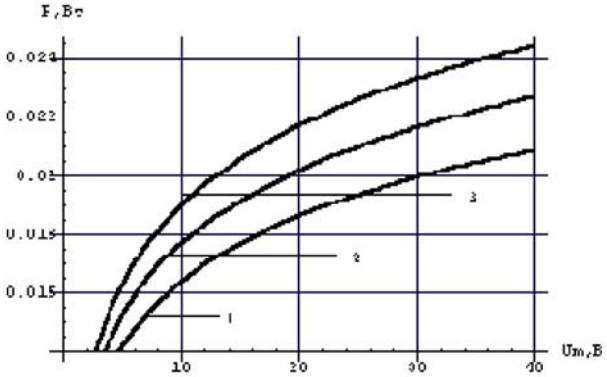

Рис. 2. Зависимость максимальной мощности P_m от изменения максимального напряжения Um при $I_ф$: 1 – при 20^0C; 2 – 50^0C; 3 – 80^0C

Эффективность преобразования (КПД) η элемента определяется выражением:

$$\eta = \frac{P_m}{P_и} = \frac{AU_{xx}I_ф}{P_и}, \qquad (5)$$

где $P_и$ – внешняя мощность (мощность падающего излучения); A – коэффициент заполнения ВАХ фотодиодов, или отношение максимальной мощности фотодиода к произведению $U_{x.x.}I_{к.з.}$.

Коэффициент A заполнения ВАХ отражает степень приближения ВАХ к прямоугольной [3] и равен:

$$A = \frac{I_m U_m}{I_ф U_{xx}}. \qquad (6)$$

При соответствующем подборе нагрузочного сопротивления вырабатываемая энергия может достигать 80% произведения $U_{x.x.}I_{к.з}$.

Как следует из соотношения (5), для получения максимального КПД необходимо добиться максимальных значений всех трех сомножителей в правой части равенства.

Для преобразователей солнечной энергии в электрическую высокий КПД определяется крутизной прямой ветви ВАХ.

Будем полагать, что фотоэлемент имеет идеальную ВАХ [3]:

$$I = I_0\left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right)-1\right] - I_ф, \qquad (7)$$

где I – ток через внешнюю нагрузку.

Ток насыщения диода определяется так:

$$I_0 = j_0 \cdot S = eN_C N_V \times$$
$$\times\left(\frac{1}{N_A}\sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_D}\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}}\right)\exp\left(\frac{-E_0}{kT}\right), \qquad (8)$$

здесь j_0 – плотность обратного тока насыщения; S – площадь фотодиода; N_c – эффективная плот-

ность состояния в зоне проводимости; N_v – эффективная плотность состояния в валентной зоне; N_A – концентрация акцепторов; D_n, D_p – коэффициенты диффузии; τ_n, τ_p – время жизни носителей.

В соответствии с соотношением (7) для идеальной ВАХ получим зависимость [3], представленную на рис.3.

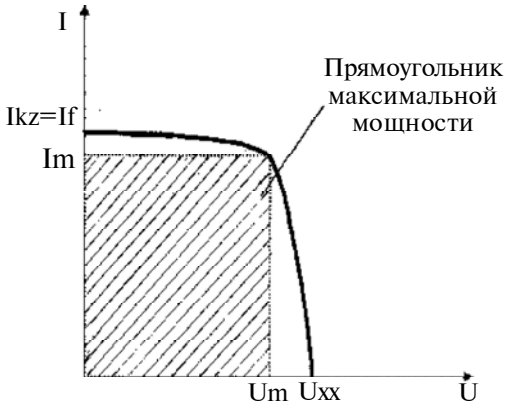

Рис. 3. Вольт-амперная характеристика освещенного солнечного элемента

С помощью зависимости $I = f(U)$ на рис. 3 можно определить величины I_m и U_m – значения тока и напряжения, при которых реализуется максимальная выходная мощность P_m, численно равная площади наибольшего прямоугольника, который вписывается в вольт-амперную характеристику. Чем ближе форма ВАХ к прямоугольной, тем больше КПД. Как следует из соотношения (1), напряжение холостого хода линейно уменьшается с повышением температуры, в то время как ток короткого замыкания линейно возрастает. Изменение напряжения холостого хода может быть объяснено быстрым увеличением тока насыщения при повышении температуры. Однако ток короткого замыкания с нарастанием температуры увеличивается медленнее, чем падает напряжение холостого хода, и это приводит к тому, что отдаваемая мощность имеет отрицательную температурную зависимость.

Для реальных ФЭ следует учитывать последовательное сопротивление $R_п$, обусловленное омическим падением напряжения на лицевом контакте, и шунтирующее параллельное сопротивление $R_ш$, обусловленное токами утечки.

Учет этих сопротивлений приводит к развернутому выражению для ВАХ:

$$I = I_0\left(\exp\frac{e(U - IR_П)}{kT} - 1\right) - I_ф + \frac{U - IR_П}{R_Ш}. \quad (9)$$

Из приведенной формулы следует, что шунтирующее сопротивление сравнительно мало влияет на форму ВАХ. В то же время небольшие изменения последовательного сопротивления (например от 1 до 5 Ом) приводят к резкому ухудшению формы ВАХ и значительному снижению выходной мощности [2].

Для фотодиодов важно знание обратной ветви ВАХ. Величина обратного темнового тока определяет порог чувствительности фотодиода. Чем она меньше, тем выше порог чувствительности и тем эффективнее фотодиод, особенно при низких освещенностях.

При разработке конструктивно - технологических решений ФП необходимо оптимизировать геометрические размеры фронтальной контактной токосъемной сетки. При этом следует учитывать как электрические характеристики по контактному сопротивлению, так и механическую прочность контакта. Качество и форма контактов влияют на ВАХ фотопреобразователя. Известно [1, 4], что омические потери на последовательном сопротивлении устройства значительно снижают выходную мощность и КПД преобразователя. Последовательное сопротивление ФП складывается из сопротивления тыльного контакта R_T и сопротивления фронтального слоя (сопротивление растекания R_P) [1,4]. Если тыльное сопротивление ФП можно сделать очень малым (легирование тыльного контакта, применение материалов с высокой электропроводностью), то снизить сопротивление растекания возможно лишь путем уменьшения длины ФП. Однако при этом сокращается и полезная (не закрытая контактом) поверхность.

На рис. 4 приведена конструкция контактной сетки фронтальной поверхности ФП, с помощью которой можно оптимизировать условия преобразования для получения максимально высокого КПД [6].

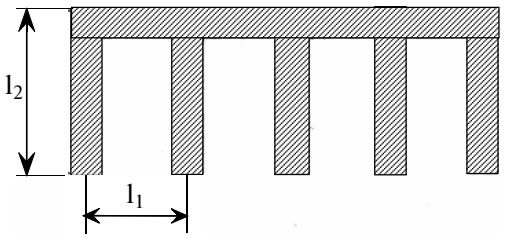

Рис. 4. Токосъемная контактная сетка

Сопротивление растекания контактной сетки фронтальной поверхности можно определить, рассматривая его как параллельное сопротивление П-образных контактов [4]:

$$R_P = \frac{1}{\omega}\cdot\frac{256}{\pi^2}\cdot\frac{\rho}{x_i}\cdot\frac{l_1 l_2}{4l_1^2 + l_2^2}, \quad (10)$$

где ω – количество П – образных контактов; ρ – удельное сопротивление контактного слоя; x_i – глубина залегания p-i-n перехода; l_1 – расстояние между центрами полос; l_2 – длина токосъемной полосы.

Увеличивая число токосъемных полос и делая контактную сетку более густой, можно уменьшить последовательное сопротивление, однако при этом уменьшается полезная поверхность ФП. При разработке конструкции ФП важно получить максимальную мощность с единицы поверхности в соответствии с выражением:

$$P_{уд} = \frac{I_m U_m}{S}. \qquad (11)$$

Напряжение U_m определяется по формуле:

$$U_m = \frac{kT}{e} \ln\left[\frac{j_{кз}(S - S_K) - I}{j_0 S} + 1\right] - R_P I, \qquad (12)$$

где S_K – площадь токосъемных контактов.

Если ввести обозначение

$$\frac{I}{I_ф} = \frac{I}{j_{кз}(S - S_R)} = \frac{I}{J_{кз} S(1 - S_R \setminus S)} = m, \qquad (13)$$

то с учетом предыдущего выражения формулу для удельной мощности можно записать так:

$$P_{уд} = j_{кз} m(1 - S_K / S)\left[\frac{kT}{e} \ln\left(\frac{j_{кз}(1-m)(1 - S_K / S)}{j_0} + 1\right) - \right.$$
$$\left. - R_p m j_{кз}(1 - S_K / S)\right]. \qquad (14)$$

Далее определим, при каких размерах контактной сетки и каком значении m удельная мощность принимает максимальное значение, считая, что ширина контактных полос g на поверхности ФП задана и является малой с учетом базовой технологии. Дифференцируя (14) по m и приравнивая производную нулю, получаем уравнение, определяющее оптимальное значение m. Если пренебречь в этом уравнении величиной S_K/S по сравнению с единицей и падением напряжения на фронтальном слое по сравнению с напряжением ФП, получим соотношение вида:

$$f(m) = \frac{m}{1 - m} - \ln(1 - m) = \ln \frac{j_{RP}}{j_0}. \qquad (15)$$

Для экспериментальной проверки основных соотношений в работе методом нагрузочных световых ВАХ при T=20 °C исследовались диодные параметры изготовленных на основе монокристаллического кремния марки КДБ-10 тестовых структур единичных фотопреобразователей: ток насыщения I_0, коэффициент идеальности диода, последовательное сопротивление $R_П$ и эксплутационные параметры – ток короткого замыкания $I_{КЗ}$, напряжение холостого хода U_{XX}, коэффициент заполнения ВАХ, максимальная выходная мощность, КПД. Экспериментально полученные световые ВАХ ФП размером 24×15 мм с расстоянием между соседними параллельными полосчатыми элементами токосъемного контакта L приведены на рис.5.

Аналитическая обработка нагрузочных световых ВАХ по ранее описанной методике позволила определить $I_Ф$, U_{XX}, P_m, A, η. Значения этих параметров составили: напряжение U = 84 мВ, максимальное напряжение U_m=26 В, напряжение холостого хода U_{XX}=0,59–0,62В, величина фототока $I_Ф$=0,12–0,15 А. С помощью соотношений (1), (3)-(6), (9) рассчитаны параметры исследуемых образцов, значения которых составили: фототок $I_Ф$=0,13 А, максимальная мощность P_m = 51,95 мВт, внешняя мощность P=282,3 мВт, напряжение холостого хода U_{XX}=0,6 В. Реальный КПД у кремниевых ФП с p-i-n структурой при однократной освещенности составляет 18%. В кремниевых ФП, предназначенных для концентрированного солнечного освещения, достигнут КПД = 20% [1]. Коэффициент заполнения ВАХ A = 0,66-0,68. Последовательное сопротивление $R_п$ = 0,1-0,21 Ом, шунтирующее сопротивление $R_ш$ =18-27 Ом. Коэффициент идеальности диода = 1,2-1,11. Плотность тока короткого замыкания $J_{КЗ}$=39-41мА/см^2. Диодный ток насыщения I_0=1,7·10^{-9}-4,3·10^{-11} А.

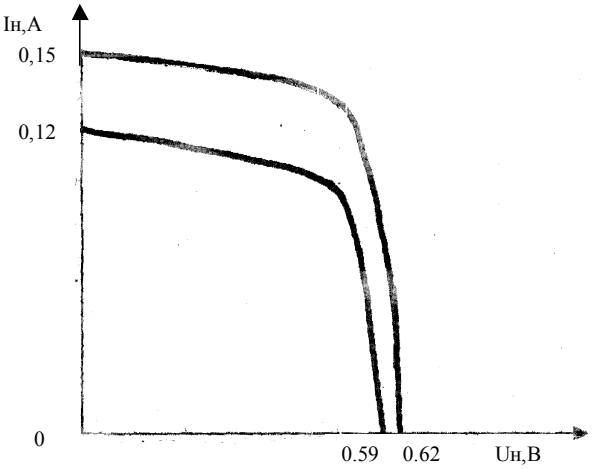

Рис. 5. Нагрузочные световые ВАХ ФП

Сравнительная оценка экспериментальных и расчетных значений параметров ФП подтверждает справедливость предложенных математических моделей.

Литература: 1. *Фаренбух А., Бьюб Р.* Солнечные элементы: Теория и эксперимент: Пер. с англ. / Под ред. М.М. Колтуна. М.: Энергоатомиздат, 1987. 280с.2. *Колтун М.М.* Солнечные элементы. М.: Наука, 1987. 192 с. 3. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн.2.: Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 456с. 4. *Васильев А.М., Ландсман А.П.* Полупроводниковые фотопреобразователи. М.: Сов. радио, 1971. 248с. 5. *Бузанова Л.К., Глиберман А.Я.* Полупроводниковые фотоприемники. М.: Энергия, 1976. 63 с. 6. *Антонова В.А., Борщев В.Н., Золотарев В.А., Листратенко А.М., Слипченко Н.И.* Оптимизация кремниевых солнечных элементов на основе n^+-p-p^+ структур // Радиотехника. 2001. Вып. 120. С. 155-161.

Поступила в редколлегию 30.11.2002

Рецензент: д-р. физ.-мат. наук, проф. Чурюмов Г.И.

Слипченко Николай Иванович, канд. техн. наук, профессор, проректор по научной работе ХНУРЭ. Научные интересы: радиофизика и электроника. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр.Ленина,14, тел. (0572) 40-90-20.

Письменецкий Виктор Александрович, канд. техн. наук, профессор ХНУРЭ. Научные интересы: разработка устройств обработки сигнала. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр.Ленина,14, тел. 40-93-43.

Супрун Жанна Михайловна, аспирантка ХНУРЭ. Научные интересы: анализ диодных структур и их характеристики. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр.Ленина, 14, тел. 40-94-13.