

УДК 535.376

Метод неразрушающего контроля надежности PIN-фотодиодов по вольт-амперным характеристикам

В. С. Кондратенко, А. В. Куроедов, И. В. Рыжиков

Метод диагностики PIN-фотодиодов с охранным кольцом, основанный на анализе вольт-амперных характеристик и дифференциальных m - и n -параметров, был разработан для установления механизмов деградации при испытаниях на длительную наработку (life time) и контроля надежности "идеальных" и "неидеальных" фотодиодов с дефектами, приводящими к параметрическому отказам.

PACS: 41.60.-m

Ключевые слова: "идеальный" и "неидеальный" PIN-фотодиод, охранный кольцо, параметрический отказ, вольт-амперная характеристика, m - и n -параметры, диагностика, надежность.

Введение

Надежность фотодиодов (ФД), как и других полупроводниковых приборов, определяется по результатам испытаний на работоспособность, длительную наработку и сохраняемость.

В настоящей работе исследовались вопросы надежности одно-, четырех- и восьмисегментных (Краснополь) PIN-ФД с охранным кольцом, изготовленных на основе высокоомного кремния дырочной проводимости. Фотодиоды до начала 90-х годов прошлого века выпускались заводом "Кварц" (г. Черновцы), а после перестройки в ограниченном количестве малым предприятием на основе данного завода. Основные экспериментальные результаты были получены при исследовании параметров серийных и опытных ФД до и после проведения испытаний на работоспособность и длительную наработку четырехсегментных фотодиодов ФДК-141 и ФДК-146 завода "Кварц".

Проведенные в форсированном режиме (100 °С, 1000 ч) испытания на безотказность показали, что основной причиной параметрических отказов является рост темнового тока (dark current) кольца (I_{dc}) со временем наработки, приводящий к его выходу за пределы норм, предусмотренных ТУ.

В партии фотодиодов до испытаний, соответствующих нормам ТУ ФДК-146 ($I_{dc}^{20} \leq 100$ мкА, $I_{dc}^{85} \leq 1300$ мкА при напряжении 135 В), после форсированных испытаний до 30 % не отвечали этим нормам. В то же время 80 % отказавших ФД соответствовали нормам ТУ ФДК-141 ($I_{dc}^{20} \leq 500$ мкА, $I_{dc}^{85} \leq 1500$ мкА при напряжении 120 В).

Поэтому актуальной и экономически целесообразной задачей являлась разработка неразрушающего экспресс-метода контроля надежности, который позволял бы отсеивать потенциально ненадежные приборы, а оставшиеся разбивать на группы, соответствующие нормам ТУ ФДК-141 и ФДК-146.

Экспресс-метод диагностики и неразрушающего контроля был разработан по заказу завода "Кварц" в ходе выполнения пяти хозяйственных НИОКР с ОКБ завода "Кварц" и ОАО "Орион".

Данный метод основан на использовании классических теорий генерации-рекомбинации носителей в области пространственного заряда, канальной проводимости, монополярной и двойной инжекции при анализе интегральных и дифференциальных вольт-амперных характеристик (ВАХ) (m - и n -параметров), изменяющихся при проведении испытаний на работоспособность и длительную наработку.

Элементы технологии и конструкции

В качестве основных объектов исследования были выбраны четырехсегментные PIN-ФД с охранным кольцом типа ФДК-141 и ФДК-146, конструкция которых позволяет оценить вклад объемной и поверхностной компоненты в общий ток и влияние параметров исходного материала и технологии на электрические характеристики, параметры и надежность приборов (рис. 1).

Кондратенко Владимир Степанович, профессор, зав. кафедрой.

Куроедов Александр Вениаминович, доцент.

Рыжиков Игорь Вениаминович, профессор.

Московский государственный университет приборостроения и информатики.

Россия, 107996, Москва, ул. Стромынка, 20.

Тел. (499) 269-46-88.

E-mail: precisetech@mail.ru; ond491@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 2 июня 2009 г.

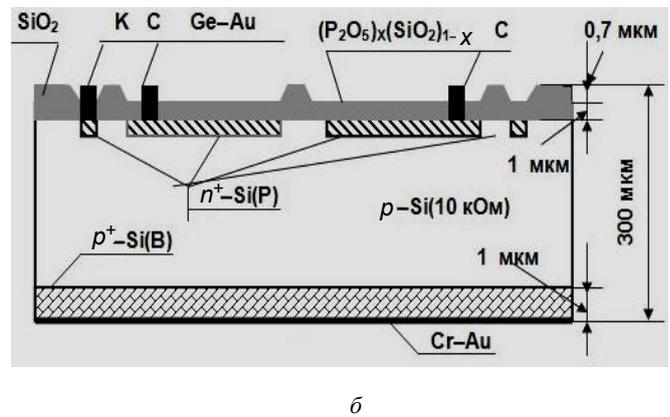
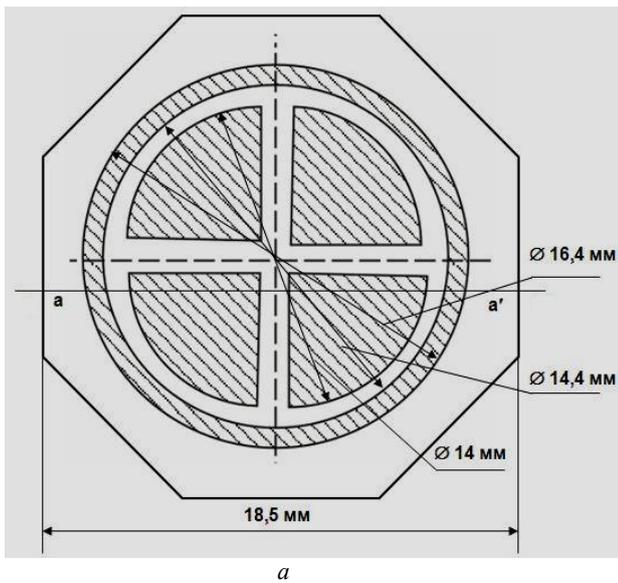


Рис. 1. Фотодиодная структура:

а — эскиз лицевой стороны; б — поперечного сечения (а-а'); С — сегмент; К — кольцо

P-n-переходы сегментов и кольца получали загонкой фосфора из газовой фазы и последующей разгонкой. Омические контакты *p*⁺-типа изготовляли диффузией бора из борного ангидрида. Металлические контакты получали последовательным напылением слоев хрома (500—1000 Å) и золота (0,5—1,0 мкм).

Площадь сегмента составляла 0,38, кольца — 0,44 см².

Толщина *p*-области, равная 300—400 мкм, обеспечивала эффективное поглощение инфракрасного излучения твердотельного лазера из алюмоиттриевого граната ($\lambda = 1,04$ мкм).

Измерение ВАХ и испытания на безотказность проводили при подключении всех четырех сегментов и кольца.

ВАХ, *m*- и *n*-параметры "идеальных" ФД

"Идеальными" условно будем считать ФД, у которых прямая и обратная ВАХ, *m*- и *n*-параметры сегментов находились в согласии с классическими теориями Шокли—Нойса—Саа и Холла, а величина темного тока кольца при температуре 20 °С и напряжении 135 В не превышала 10 мкА (200 мкА при 85 °С).

Прямые ВАХ сегментов и колец идеальных ФД в интервале токов 10⁻⁸—10⁻² А состояли из двух экспоненциальных участков:

$$j = j_{S1} \exp(eU/m_1kT) + j_{S2} \exp(eU/m_2kT),$$

показанных на рис. 2 совместно с экспериментальной зависимостью *m*(*U*) (рис. 3). Значения коэффициента *m*₁, определенные в районе первого экстремума, примерно у половины сегментов составляли 1,93—2,05, у остальных *m*₁ = 1,4—1,7.

У всех колец *m*₁ = 1,50—1,65. Значения коэффициентов *m*₂ у сегментов и колец практически не различались и составляли 1,95—2,06.

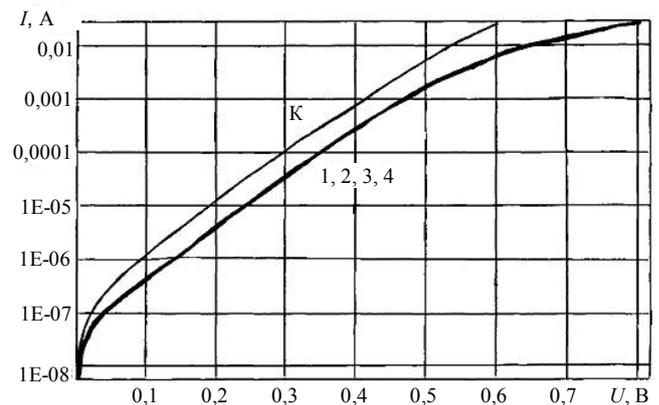


Рис. 2. Прямая ветвь ВАХ четырех (1—4) сегментов и кольца (К) типичного идеального PIN-ФД

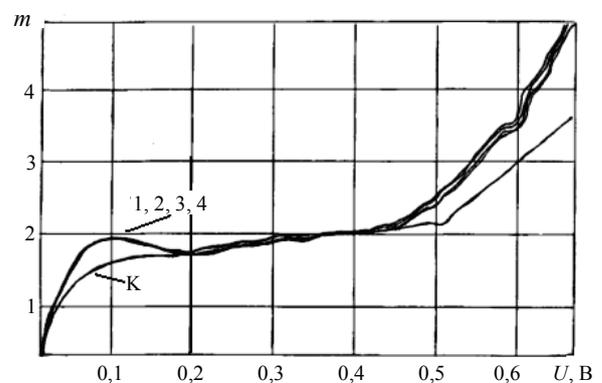


Рис. 3. Фактор "неидеальности" *m* прямой ветви ВАХ ФД:

1—4 — сегментов; К — кольца

Первый участок ВАХ с *m*₁ ≈ 2,0 и *I*_{S1} = (0,7—0,9)·10⁻⁷ А объясняется рекомбинацией носителей

в области пространственного заряда (ОПЗ) в объеме полупроводника. В соответствии с теорией Шокли—Нойса—Саа [1]

$$I_{S_1} \cong \frac{(kT/eE_{\max})}{\tau_0} \cdot en_i S_C, \quad (1)$$

где e — заряд электрона;

k — постоянная Больцмана;

n_i — концентрация носителей в полупроводнике с собственной проводимостью;

τ_0 — время жизни в ОПЗ;

$$E_{\max} = 2(U_k - U)/W = 3,5 \cdot 10^2 \text{ В/см при } U_k \cong 0,5 \text{ В и } U \cong 0,1 \text{ В (} U_k \text{ — контактная разность потенциалов).}$$

Подставляя в (1) известные параметры и $S_C \cong 0,38 \text{ см}^2$ и используя экспериментальные значения тока I_{S_1} , получаем $\tau_0 = (2-5) \cdot 10^{-6} \text{ с}$, что примерно на два порядка ниже, чем в исходном кремнии.

Ток кольца на первом участке ВАХ в среднем был в 2—3 раза выше, а $m_1 \cong 1,50-1,65$, что отвечает неклассической зависимости, по-видимому, вследствие рекомбинации носителей на многозарядных центрах на поверхности полупроводника [2, 3]. Действительно, кольца и сегменты изготавливаются по одинаковой технологии, в ходе единого технологического цикла, имеют примерно одинаковую площадь $p-n$ -перехода и отличаются только отношением периметра к площади (20 — у кольца и 1,6 — у сегмента). Поэтому естественным является предположение о преобладании у первых рекомбинации на поверхности в отличие от объемной рекомбинации у большей части сегментов.

Уменьшение коэффициента m с напряжением и появление минимума m -кривой объясняется началом инжекции электронов в исходную пластинку кремния, когда в соответствии с теорией Шокли в режиме малого уровня инжекции $m \rightarrow 1$ [4]. Однако вследствие высокого удельного сопротивления материала режим малого уровня (при напряжении 0,30—0,35 В) должен сменяться высоким уровнем, когда согласно теории Холла [5] $m_2 \cong 2,0$, что и объясняет появление второго растянутого максимума m -кривой (см. рис. 3). Величина "тока насыщения" на данном участке ВАХ согласно [6] выглядит так:

$$I_{S_2} \cong \frac{2e\sqrt{D_p}dn_i}{\sqrt{\tau_p}\sqrt{\gamma_p}} \cdot S_C,$$

где D_p — коэффициент диффузии;

τ_p — время жизни дырок в базе;

d — ширина базы;

γ_p — коэффициент захвата дырок ловушками.

Так как величина произведения $\tau_p\gamma_p \gg \tau_0$, то это свидетельствует о сильном захвате дырок центрами прилипания.

Ток кольца на данном участке ВАХ также описывался теорией Холла.

Темновые токи сегментов большинства "идеальных" ФД лежали в пределах $10^{-8}-10^{-7} \text{ А}$ и практически не зависели от напряжения до 300 В (рис. 4).

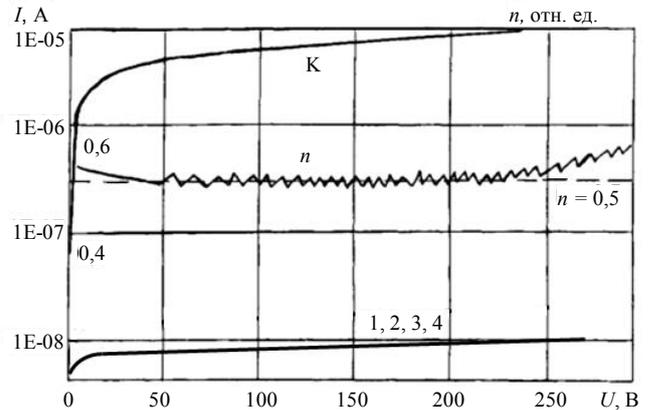


Рис. 4. Обратная ВАХ сегментов (1—4), кольца (К) и показатель степени n кольца

Расчет ширины ОПЗ (W) по формуле для резкого $p-n$ -перехода [4]:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(U - U_K)}{eN_A}}, \quad (2)$$

при $N_A \cong (2-4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $U = 150 \text{ В}$ дает $W \cong 300-350 \text{ мкм}$, т. е. ОПЗ при номинальном значении напряжения заполняет всю базу ФД и темновой ток сегмента равен:

$$I_{TS} = \frac{en_i^2 d}{\tau_p N_U \exp\left(-\frac{E_R}{kT}\right)} \cdot S_C. \quad (3)$$

В формулах (2) и (3) $\epsilon = 11,9$ — относительная диэлектрическая постоянная кремния;

ϵ_0 — диэлектрическая постоянная вакуума;

N_U — эффективная плотность состояний в валентной зоне;

E_R — энергия ионизации центра генерации, которую нетрудно оценить из температурной зависимости тока сегмента ($E_R = 0,39-0,46 \text{ эВ}$).

Ток кольца при напряжении 100—250 В составил $(0,3-1) \cdot 10^{-5} \text{ А}$, превышая в среднем на три порядка ток сегмента, и имел иную зависимость от напряжения: $I_{dr} = BU^n$ с $n \cong 0,4-0,6$. Как уже отмечалось выше, единственным отличием кольца от сегмента является отношение периметра к площади и темновой ток кольца связан с чисто поверхностными эффектами — каналами n -типа,

увеличивающими эффективную площадь перехода, и вкладом поверхностной генерации.

Если считать, что темновой ток кольца определяется генерацией носителей на поверхности с внешней стороны кольца, то

$$I_{dr} = eS n_i A_{ef,r},$$

где S — скорость поверхностной генерации;

D_r — внешний диаметр кольца (см. рис. 1);

$A_{ef,r} = \pi D_r \Delta_{ef,r}$, а $\Delta_{ef,r}$ — эффективная ширина канала.

Увеличением ширины канала объясняется рост темнового тока кольца с напряжением.

ВАХ, m - и n -параметры "неидеальных" ФД

"Неидеальными" будем считать ФД, у которых ВАХ, а также m - и n -параметры отличаются от "идеальных", описываемых классическими теориями Шокли—Нойса—Саа и Холла. Отклонения от идеальности имеют место вследствие наличия различного рода дефектов n^+ - p -перехода, омического контакта, объема и поверхности полупроводника, пленки диоксида кремния, которые могут являться причиной нестабильности и параметрических отказов.

Темновые токи сегментов и колец "неидеальных" ФД в несколько раз превышали темновые токи "идеальных" приборов, а темновые токи колец быстро росли со временем наработки.

При измерении прямого и обратного токов, m - и n -параметров были выявлены следующие отклонения от "идеальных" характеристик:

- Прямые ВАХ "неидеальных" ФД I типа имели повышенный разброс тока сегментов и близкие значения токов сегментов и колец до напряжения 0,3 В. Показатель "неидеальности" $m = 3,1—4,1$, а темновые токи сегментов на два порядка превосходили темновые токи сегментов "идеальных" ФД (рис. 5, 6).

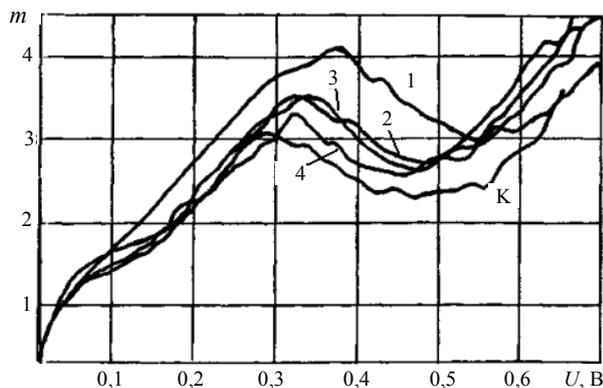


Рис. 5. Показатель m ФД I типа: 1—4 — сегментов; К — кольца

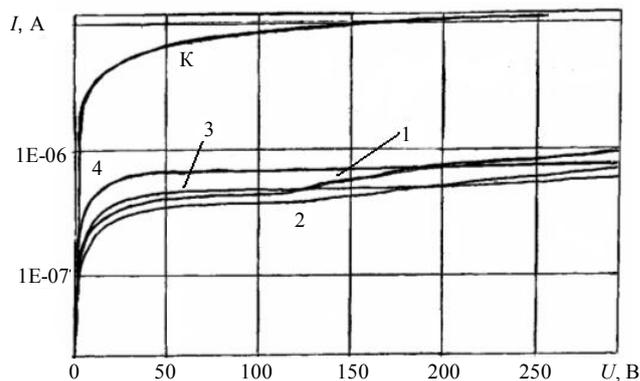


Рис. 6. Обратные ВАХ "неидеального" ФД I типа: 1—4 — токи сегментов; К — ток кольца

Экспериментальные ВАХ, у которых $m = 3,1—4,1$, отвечают модели канальной проводимости, для которой теория дает следующее выражение для тока (для канала n -типа) [4]:

$$I = 4eW_K L_K \sqrt{\frac{D_n n_i n_S}{\tau_0}} \left[\exp\left(\frac{eU}{4kT}\right) - 1 \right],$$

где W_K — ширина канала;

L_K — периметр сегмента;

n_S — концентрация носителей в канале.

Полагая $W_K = 200$ мкм, $L_K = 7$ мм (см. рис. 1) при $I = 10^{-4}$ А имеем $n_S = 10^{14}—10^{15}$ см $^{-3}$, т. е. каналы шунтируют промежутки между сегментами и кольцами, увеличивая на один—два порядка темновые токи сегментов.

- У "неидеальных" ФД II типа параметры m сегментов равнялись 2,3—2,4 при напряжении 0,2 В и токе 10^{-5} А. При меньших токах показатель m сегментов и кольца равнялся 1,5—1,6, а в интервале напряжений 0,25—0,45 В параметр m имел стандартное значение, равное двум. По-видимому, в данном случае преобладала поверхностная рекомбинация в ОПЗ на многозарядных центрах или нескольких центрах различной химической природы [2, 3].

- "Неидеальные" ФД III типа имели близкие по величине прямые токи сегментов и колец и повышенные темновые токи сегментов (на два порядка по сравнению с "идеальными"). Вероятной причиной этого являлось снижение времени жизни исходного кремния в результате проведения высокотемпературных технологических операций.

- Темновые токи сегментов "неидеальных" ФД IV типа имели резкую степенную зависимость от напряжения, начиная с напряжения 80—100 В (рис. 7).

Ток кольца также возрастал с напряжением, но в меньшей степени, и, начиная с определенного напряжения токи сегментов и колец сравнивались по величине. Показатель степени n зависимости $I = BU^n$ у сегментов лежал в пределах 5—32, а у кольца приближался к 2,0 (рис. 8).

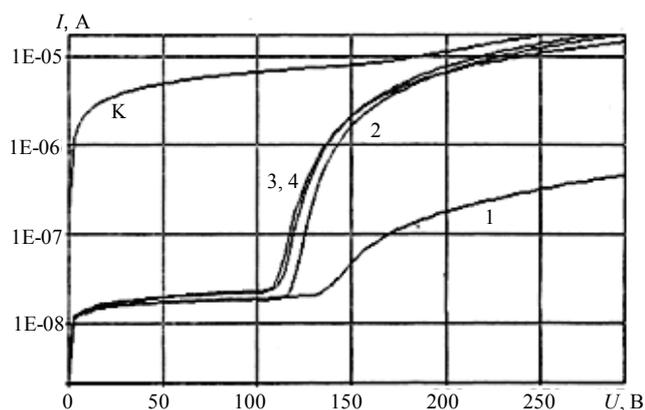


Рис. 7. Обратные ВАХ "неидеальных" ФД IV типа: 1—4 — токи сегментов; К — ток кольца

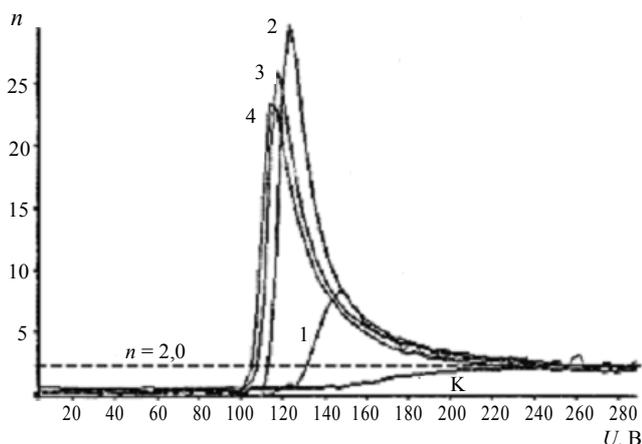


Рис. 8. Показатель степени n степенной зависимости обратного тока "неидеальных" ФД IV типа: 1—4 — токи сегментов; К — ток кольца

Данные зависимости отвечают модели монополярного тока электронов, ограниченного пространственным зарядом точечного контакта (ТОПЗ), в качестве которого выступают проводящие включения второй фазы на границе областей n^+ - и p -типа проводимости.

Аномально быстрый рост темнового тока сегментов с напряжением объясняется заполнением электронных ловушек [7].

В предельном случае их полного заполнения через контакт протекает безловушечный ТОПЗ, аналитическая зависимость которого в полусферической системе координат выглядит следующим образом [7]:

$$I = \frac{3\pi}{4} \epsilon \epsilon_0 \mu_n \frac{U^2}{r_a}; \quad I_b = I \left(\frac{r_c}{r_a} \right)^2, \quad (4)$$

соответственно, для случаев, когда проводящее включение является катодом, через который протекает монополярный ток инжекции электронов, и анодом — при обратном включении точечного контакта.

В формуле (4) μ_n — подвижность электронов; r_c — радиус проводящего включения, шунтирующего n^+ - p -переход;

r_a — радиус анода (при прямом включении), который примерно равняется ширине базы.

При прямом включении n^+ - p -перехода и точечного контакта реализуется первая зависимость. Подставляя в (4) параметры: $\epsilon = 11,9$, $\mu_n = 10^3 \text{ см}^2/\text{Вс}$, $r_a = d = 300 \text{ мкм}$, получаем:

$$I = 0,83 \cdot 10^{-7} U^2, \text{ А,}$$

и при $U = 0,3—1,0 \text{ В}$ ток монополярной инжекции электронов через точечный контакт существенно меньше инжекционной составляющей прямого тока.

При обратном включении n^+ - p -перехода и точечного контакта, когда последний является анодом, реализуется вторая зависимость, при которой ток монополярной инжекции существенно превосходит генерационную составляющую обратного тока.

Как следует из графиков рис. 8, в диапазоне напряжений 220—280 В темновой ток определяется безловушечным ТОПЗ и у трех сегментов и кольца $I_r = I_b \approx 10^{-5} \text{ А}$, а у одного сегмента $I_r = 3 \cdot 10^{-7} \text{ А}$ при напряжении 250 В. Данные значения являются типичными для всех ФД IV группы. Согласие между экспериментальными и рассчитанными значениями темнового тока имеют место, если $r_c = 14,2 \text{ мкм}$ в первом случае и $r_c = 2,5 \text{ мкм}$ — во втором.

Таким образом, причиной аномально больших темновых токов сегментов и колец ФД IV группы является шунтирование n^+ - p -перехода проводящими частичками второй фазы с линейными размерами, лежащими в указанных выше пределах.

Отметим, что у "неидеальных" ФД IV типа при напряжении свыше 200 В темновые токи сегментов и колец близки по величине, имеют одинаковую зависимость от напряжения и температуры и определяются одним механизмом — безловушечным ТОПЗ. Это позволяет использовать n -параметры сегментов для контроля надежности "неидеальных" ФД IV типа.

Результаты проведения форсированных испытаний ФД с "идеальными" ВАХ и различными отклонениями от идеальности (I—IV типа)

Для проверки экспресс-метода контроля надежности из большой партии ФД (100 шт.) методом случайной выборки было отобрано несколько приборов с "идеальными" ВАХ, которые были от-

несены к 0 группе, и 4—5 приборов с отклонениями от идеальности различного типа (см. выше).

После диагностики по ВАХ, m - и n -параметрам были проведены испытания на наработку в форсированном режиме при температуре 100 °С и напряжении 135 В в течение 1000 ч с контролем темного тока сегментов и колец после каждых 100 ч наработки при 20 и 85 °С и напряжении 120 и 135 В. Токи сегментов практически не менялись, а темновые токи колец выросли в 4—9 раз. Значения тока колец после форсированных испытаний представлены в таблице.

Если за критерий отказа принять нормы ТУ на ФДК-146 ($I_{dc}^{20} > 100$ мкА, $I_{dc}^{85} > 1300$ мкА при 135 В), то можно отметить, что по результатам измерений при комнатной температуре после форсированных испытаний не отказал ни один прибор 0, I, II и III группы и отказали три прибора IV группы. По результатам измерений при 85 °С отказали все приборы IV группы. Приборы I группы находились на грани отказа, и после наработки в течение 1100 ч они вышли из строя.

Если за критерий отказа принять нормы ТУ ФДК-141 ($I_{dc}^{20} > 500$ мкА, $I_{dc}^{85} > 1500$ мкА при 120 В), то из таблицы следует, что отказали три ФД IV группы.

Результаты измерений тока колец

№ группы	№ в группе	20 °С		85 °С	
		120 В	135 В	120 В	135 В
0	1	11	13	226	236
	2	17	19	355	388
	3	17	18	280	313
I	4	50	55	1140	1250
	5	85	37	1180	1280
	6	87	96	1100	1190
	7	77	87	1160	1300
II	8	57	66	843	700
	9	50	54	635	664
	10	39	43	880	790
	11	32	38	520	637
III	12	54	59	909	956
	13	57	62	955	1040
	14	36	42	640	909
	15	56	61	940	1050
	16	72	78	1100	1200
IV	17	70	77	1410	1460
	18	106	121	1760	1870
	19	108	122	1560	1700
	20	104	121	1300	1500

Таким образом, предложенный метод может быть использован как для отбраковки потенциально ненадежных приборов I и IV групп и повышения надежности партии ФД в целом, так и для разделения приборов, имеющих одинаковую конструкцию, на две группы — ФДК-141 и ФДК-146, что представляется целесообразным с экономической точки зрения.

Данные исследования легли в основу разработки алгоритмов и программ экспресс-метода отбраковки потенциально ненадежных приборов и разделения партии ФД на две группы, соответствующих ТУ ФДК-141 и ФДК-146.

Хотя основные исследования были выполнены на основе четырехсегментных ФД, они также были использованы при исследовании надежности одно- и восьмисегментных PIN-ФД с охранным кольцом на основе высокоомного p -кремния.

Заключение

Разработан метод диагностики PIN-фотодиодов с охранным кольцом, основанный на анализе вольт-амперных характеристик, дифференциальных m - и n -параметров "идеальных" ФД, ВАХ которых описываются классическими теориями Шокли, Шокли—Найса—Саа и Холла, и с отклонениями от идеальности четырех типов.

В результате проведения форсированных испытаний после диагностики показано, что потенциально ненадежными являются "неидеальные" ФД I типа, у которых в прямом и обратном (темновом) токе преобладала канальная проводимость, и IV типа, у которых при напряжении свыше 100 В в темновом токе преобладал ток монополярной инжекции, ограниченный пространственным зарядом, через проводящие включения второй фазы размером 2,5—14 мкм, шунтирующие n^+ - p -переход.

Предложены и прошли успешную апробацию путем проведения опытных партий на заводе "Кварц" следующие конструктивно-технологические способы повышения качества и надежности ФД:

легирование лицевой стороны бором с внешней стороны кольца;

замена однослойной диэлектрической пленки диоксида кремния с внешней стороны кольца на двухслойную — диоксид кремния-фосфорно-силикатное стекло;

облучение готовых структур нейтронами или гамма-квантами [8].

Литература

1. Sah S. T., Noyce R. N., Shockley W. Carrier generation and recombination in p - n -junctions and p - n -junction characteristics//Proc. IRE. 1957. V. 45. P. 1228—1235.
2. Евстропов В. В., Киселев К. В., Петрович И. Л., Царенков Б. В. Ток, обусловленный рекомбинацией через многоуровневый центр в слое объемного заряда p - n -структуры//ФТП. 1984. Т. 18. Вып. 10. С. 1852—1858.
3. Евстропов В. В., Киселев К. В., Петрович И. Л., Царенков Б. В. Скорость рекомбинации через многоуровневый (многозарядный) центр//Там же. С. 902—912.
4. Шокли В. Теория электронных полупроводников. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1953. — 714 с.

5. Hall R. N. Power rectifiers and transistors.//Proc. TRE. 1952. P. 1512—1518.

6. Карагеоргий-Алкалаев П. М., Лейдерман А. Ю. Глубокие примесные уровни в широкозонных полупроводниках. — Ташкент: "Фан". Узбекской ССР, 1971. — 204 с.

7. Ламперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. — М.: Мир, 1973. — 416 с.

8. Куроедов А. В. Повышение надежности PIN-фотодиодов с охранным кольцом путем облучения нейтронами и гамма-квантами//Информационные технологии в науке, технике и образовании. — М.: МГУПИ, 2006. Т. 1. С. 87—92.

Method of reliability control PIN-photodiodes on voltage-current characteristics

V. S. Kondratenko, A. V. Kuroedov, I. V. Ryzhikov
Moscow State University of Engineering and Computer Science,
20 Stromynka str., Moscow, 107996, Russia
E-mail: precisetech@mail.ru; ond491@yandex.ru

The diagnostic method PIN-photodiodes with security rings, based on the analysis voltage-current characteristic and differential m - and n -parameters, was developed for establishing of degradation mechanisms in lifetime test and the control of reliability "ideal" and "nonideal" photodiodes with defects, bringing parametrical refusal.

PACS: 41.60.-m

Keywords: the "ideal" and "nonideal" PIN-photodiode, a security ring, parametrical refusal voltage-current characteristic, m - and n -parameters, diagnostics, reliability.

Bibliography — 8 references.

Received 2 June 2009