

*В.А. АНТОНОВА, канд. техн. наук, В.Н. БОРЩЕВ, д-р техн. наук,
А.М. ЛИСТРАТЕНКО, Н.И. СЛИПЧЕНКО, канд. техн. наук*

К ВОПРОСУ О НОВЫХ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЯХ ПРИ СОЗДАНИИ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ БОЛЬШОЙ ПЛОЩАДИ

Ключевым элементом в приборах регистрации излучений является детектор излучений, чувствительность и избирательность которого определяют характеристики прибора в целом. В настоящее время твердотельные кристаллические детекторы — практически единственный тип датчиков, обеспечивающий как обнаружение ионизирующих излучений, так и установление типа и спектра излучения. Наиболее распространенными и высокоэффективными являются комбинированные детекторы на основе системы сцинтиллятор — фотоприемник. Они широко применяются для регистрации рентгеновского и различных видов ионизирующих излучений: в космических исследованиях, в медицинских и промышленных томографах, рентгенотелевизионных интроскопах для таможенного досмотра, в системах оптической связи, в дозиметрии и спектрометрии ионизирующих излучений [1 — 7].

В качестве фотоприемников наиболее часто используются фотодиоды (ФД) [3; 5; 7]. К основным параметрам, обуславливающим перспективы развития устройств на основе ФД, относятся квантовый выход, быстродействие и область спектральной чувствительности. Детекторы сцинтиллятор — фотодиод имеют малые габаритные размеры и массу, не требуют высоковольтного питания, устойчивы к старению, обладают повышенной надежностью и стабильностью, характеризуются линейностью люксамперных характеристик в широком динамическом диапазоне интенсивности излучения (8...10 порядков), работоспособны в энергетическом диапазоне 0,01...10 МэВ, в том числе в сильных магнитных полях. При использовании современных оксидных и полупроводниковых сцинтилляторов они не нуждаются в дополнительной защите от воздействия окружающей среды. Для создания детектора сцинтиллятор — фотодиод с необходимыми габаритными размерами, максимальной чувствительностью, энергетическим разрешением, динамическим диапазоном и устойчивостью к внешним воздействиям зачастую приходится решать противоречивые задачи. Поэтому материал сцинтиллятора, тип ФД и общая конструкция детектора выбираются в соответствии с конкретным назначением. Однако существуют и проблемы, которые присущи собственно сцинтилляционному де-

тектированию. Их решение обеспечивает дальнейшее улучшение характеристик комбинированных детекторов.

Согласование спектров излучения сцинтиллятора и фоточувствительности диода обуславливает долю излучаемой сцинтиллятором энергии, которая преобразуется в генерируемые светочувствительной поверхностью ФД носители заряда, т. е. определяет эффективность преобразования детектора сцинтиллятор — фотодиод. Основной характеристикой при этом служит коэффициент использования излучения $K_{и}$ [4]. Он представляет собой отношение эффективного для данного приемника потока излучения $\Phi_{эф}$ к полному потоку излучений Φ :

$$K_{и} = \frac{\Phi_{эф}}{\Phi} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

где λ — длина волны излучения; $\Phi(\lambda)$ — функция относительной спектральной плотности потока, создаваемого излучателем; $S(\lambda)$ — относительная спектральная чувствительность фотоприемника. Из выражения (1) следует, что максимального значения $K_{и}$ достигает лишь в том случае, когда во всем диапазоне излучения сцинтиллятора $S(\lambda) \equiv 1$, что выполнимо только для идеального фотоприемника.

Параметр $K_{и}$ связан с такими важнейшими характеристиками комбинированного детектора, как конверсионная эффективность η и разрешение детектора $\delta_{1/2}$.

Конверсионная эффективность η детектора представляет собой число носителей заряда, образованное в ФД, на единицу поглощенной в сцинтилляторе энергии частицы [5]:

$$\eta = Q/(eE), \quad (2)$$

где Q — заряд, образованный в ФД; e — заряд электрона; E — поглощенная энергия излучения.

Разрешение детектора сцинтиллятор — фотодиод определяется соотношением [6]

$$\delta_{1/2} = 2,36 \Delta E_{ш} / (E_0 \eta E), \quad (3)$$

где $\Delta E_{ш}$ — среднеквадратичное значение шумов ФД и усилительных устройств; E_0 — средняя энергия, идущая на образование пары носителей в полупроводнике.

Заряд, образованный в ФД, определяется чувствительностью последнего и потоком излучения из сцинтиллятора с учетом согласования их спектральных характеристик. При этом выражение (2) приобретает вид

$$\eta = K_{и} * S_{max} \tau_c \eta_{сц} / e, \quad (4)$$

где S_{\max} – наибольшая спектральная чувствительность ФД; τ_c – эффективность светособирания; $\eta_{\text{сц}}$ – энергетический выход сцинтиллятора. Тогда разрешение системы

$$\delta_{1/2} = 2,36 \Delta E_{\text{ш}} e / (E_0 K_{\text{н}} * S_{\max} \tau_c \eta_{\text{сц}} E). \quad (5)$$

Следовательно, эффективность преобразования световой энергии в электрическую в системе сцинтиллятор — фотодиод существенно зависит также от уровня шумов и чувствительности фотоприемника.

Одна из проблем сцинтилляционного фотодетектирования заключается в выборе полупроводникового фотоприемника, используемого в системах сцинтиллятор — фотодиод. В настоящее время в комбинированных детекторах в качестве фотоприемников используются поверхностно-барьерные, кремниевые, арсенид-галлиевые ФД и диоды на основе соединений $A^{II}B^{VI}$ [5]. Каждая разновидность имеет свои преимущества и недостатки, однако кремниевые диффузионные ФД в силу отработанности технологии и относительно низкой стоимости распространены наиболее широко.

К сожалению, сцинтилляторы, применяемые в твердотельных детекторах, имеют не очень высокие коэффициенты $K_{\text{н}}$ при использовании с кремниевыми ФД. Так, в случае использования сцинтиллятора на основе ZnSe (Te) с $\lambda_{\text{max}} = 0,63$ мкм и типичного (серийного кремниевого) ФД обычно $K_{\text{н}} = 65\%$ [7], в то время как для сцинтиллятора на CsI (Tl) с $\lambda_{\text{max}} = 0,555$ мкм коэффициент $K_{\text{н}} \leq 30\%$. Следовательно, весьма актуален поиск решений, позволяющих улучшить спектральное согласование пар сцинтиллятор — фотодиод. С этой целью проводятся работы по улучшению геометрии сцинтилляторов и оптических характеристик среды, промежуточной между сцинтиллятором и ФД. Несколько улучшить соответствие спектральных характеристик позволяет также использование мелкозалегающих $p-n$ -переходов в кремниевых ФД и нанесение просветляющих покрытий на их фотоприемную поверхность. Это улучшение достигается путем повышения спектральной чувствительности кремниевых ФД в интервале длин волн $0,5 \dots 0,6$ мкм, в котором лежат максимумы спектрального излучения наиболее широко применяемых сцинтилляторов.

Как уже отмечалось выше, эффективность преобразования световой энергии в электрическую в системе сцинтиллятор — фотодиод существенно зависит от уровня шумов ФД. Поэтому, кроме улучшения спектрального согласования, актуально снижение собственных шумов ФД. Как известно [8], ФД относятся к фотоприемникам без внутреннего усиления, поэтому в системах сцинтиллятор — фотодиод наблюдается низкий уровень выходного сигнала ($10^{-15} \dots 10^{-12}$ Кл); пригодный для регистрации сигнал может быть получен лишь после значительного усиления ($10^3 \dots 10^4$). Соот-

ветственно возрастают требования к чувствительности и уровню шумов входных каскадов усилителя.

Для снижения уровня шумов необходимо уменьшать собственные емкости и силы темновых токов ФД, а во входных каскадах усилителей нужно использовать полевые транзисторы с высокой крутизной и малыми токами утечки [9; 10]. Выбрав оптимальное обратное смещение, можно получить требуемое сочетание емкости и сил токов утечки ФД для обеспечения низкого уровня шумов. Однако в основном выходная емкость и ток утечки $p - n$ -переходов определяются выбором параметров исходных кремниевых пластин, конструкцией и технологией изготовления ФД.

Наилучшие характеристики кремниевых ФД реализованы на так называемых $p - i - n$ -структурах. ФД с $p - i - n$ -структурой имеют высокую чувствительность (предельная расчетная чувствительность в отсутствие отражения для $\lambda = 500; 600; 900$ нм составляет 0,40; 0,48; 0,725 А/Вт), значительное быстродействие (0,1...1 нс) и малую барьерную емкость. На основе таких структур созданы кремниевые ФД большой площади ($S \geq 1$ см²) с самыми малыми значениями токов утечки и выходной емкости при рабочих напряжениях [1; 11].

Однако в существующих кремниевых $p - i - n$ -фотодиодах не достигнут компромисс между быстродействием и чувствительностью; для повышения данных показателей необходима оптимизация параметров структуры. В связи с этим по-прежнему актуальны поиск новых конструктивных решений и разработка нетрадиционных технологических маршрутов, позволяющих создавать еще более эффективные кремниевые ФД большой площади. Далее предложены некоторые решения, направленные на достижение этой цели.

В качестве аналога нами выбран кремниевый $p - i - n$ -фотодиод разработки японской фирмы "Хамамачу" ("Hamamatsu"), типа S 3590-08. На сегодняшний день он обладает наилучшими технико-экономическими характеристиками и наиболее широко применяется в детекторной технике. При рабочем напряжении 50 В этот диод имеет выходную емкость не более 40 пФ, силу темнового тока 2...5 нА при размерах фотоприемной площадки 10 × 10 мм. Спектральная чувствительность на длине волны $\lambda = 0,555$ мкм составляет около 0,3 А/Вт.

Цель описываемой работы — проведение топологического расчета кремниевых $p - i - n$ -фотодиода большой площади с размерами активной фоточувствительной поверхности 10 × 10 мм, обеспечивающего возможность использования новых конструктивно-технологических решений и создание отечественных ФД, по характеристикам не уступающих лучшим мировым образцам.

Известно, что максимальной чистоты объема кремния достигают при выращивании слитков методом плавающей зоны с многократно повто-

ряющимися циклами очистки [1; 12]. При этом получают слитки с временем жизни неосновных носителей заряда $\tau > 1$ мс. Однако кремний, произведенный методом зонной плавки и легированный традиционными способами, имеет существенный недостаток: возможен чрезмерный разброс радиального сопротивления, обусловленный неравномерностью проникновения легирующей примеси (максимальная амплитуда колебаний составляет ± 25 %). Поэтому целесообразно использовать кремний, полученный методом легирования за счет нейтронной ядерной реакции, поскольку он характеризуется колебаниями удельного сопротивления около ± 5 %.

Для обеспечения малой выходной емкости при больших размерах активной светочувствительной площади ФД необходимо применять высокоомные кремниевые пластины. Так как на поверхности высокоомных полупроводников возникают инверсионные слои, что особенно часто наблюдается на кремнии *p*-типа, для изготовления кремниевых ФД большой площади с высокой пороговой чувствительностью необходимо использовать высокоомный кремний *n*-типа с удельным сопротивлением $4 \dots 8$ кОм · см.

При определении чувствительности ФД $S(\lambda)$ нужно учитывать, что в реальных приборах существенную роль играют потери на отражение и рекомбинация носителей [13]:

$$S(\lambda) = (1 - R) T \gamma \eta_0 \lambda / 1,24, \quad (6)$$

где R — коэффициент отражения; T — коэффициент пропускания входного окна; γ — коэффициент сбора с учетом скорости поверхностной рекомбинации; η_0 — квантовый выход.

Коэффициент отражения R может быть уменьшен при использовании просветляющего покрытия толщиной $\lambda/4$. Для длины волны $\lambda = 0,555$ мкм просветляющий слой SiO_2 должен иметь толщину около 0,08 мкм. Коэффициент сбора γ с учетом скорости поверхностной рекомбинации при существующем уровне технологии для $\lambda = 0,555$ мкм может достигать значения $\gamma = 0,8$ [14]. В случае применения бескорпусного *p* — *i* — *n*-фотодиода допустимо не учитывать потери на входном окне корпуса и считать коэффициент пропускания $T = 1$. Расчет по формуле (6) с использованием приведенных данных показывает, что при высоком качестве исходного кремния и коэффициенте сбора неосновных носителей заряда $\gamma \geq 0,8$ разрабатываемый ФД может на длине волны $\lambda = 0,555$ мкм обеспечивать фоточувствительность $S(\lambda) \approx 0,32$ А/Вт. При этом излучение проникает в кремний на глубину 0,9...1 мкм. Значит, глубина *p* — *n*-перехода не должна превышать 1 мкм.

Одним из важнейших параметров ФД является его выходная емкость, для оценки которой используется выражение

$$C = A_{\text{п}} \left[\frac{\varepsilon \varepsilon_0 e N_d}{2(V_{\text{к}} + V)} \right]^{1/2} \quad (7)$$

Здесь $A_{\text{п}}$ — площадь p - n -перехода; ε — диэлектрическая проницаемость кремния; ε_0 — электрическая постоянная, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; N_d — концентрация примеси в исходной кремниевой пластине; $V_{\text{к}}$ — контактная разность потенциалов; V — напряжение смещения.

Для значительного уменьшения выходной емкости нами разработана сетчатая конструкция диффузионных слоев фотоприемной области, которая обеспечивает при рабочем смещении 30 В и суммарной площади фотоприемной поверхности диода (10×10) мм² выходную емкость ФД $C \approx 13$ пФ.

Для базового кремния n -типа с временем жизни неосновных носителей $\tau \leq 1000$ мкс целесообразно оценить теоретически возможные значения обратных темновых токов ФД при рабочем смещении V . Сила темнового тока складывается из диффузионной ($I_{\text{диф}}$), генерационной ($I_{\text{ген}}$) и поверхностной ($I_{\text{пов}}$) составляющих.

Диффузионная составляющая силы темнового тока описывается выражением [7]

$$I_{\text{диф}} = \frac{en_i^2 L_p}{N_d \tau_p} A_{\text{п}}, \quad (8)$$

где $n_i = 1,5 \cdot 10^{10}$ см⁻³ — собственная концентрация носителей в Si при $T = 300$ К; L_p , τ_p — диффузионная длина и время жизни неосновных носителей заряда; N_d — концентрация донорной примеси; $A_{\text{п}}$ — площадь p - n -перехода. Приняв коэффициент диффузии дырок в кремнии $D_p = 12,5$ см²/с [7] и $\tau_p = 1000$ мкс, для диффузионной длины L_p получим $L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = 1120$ мкм. Согласно (8) для пластин из монокристаллического кремния с удельным сопротивлением $\rho = 4000$ Ом·см ($N_d = 10^{12}$ см⁻³) и $A_{\text{п}} = 1,0$ см² составляющая $I_{\text{диф}} = 4$ нА.

Генерационную составляющую силы темнового тока определим из выражения [15]

$$I_{\text{ген}} = e \frac{p_{\text{п}0}}{\tau_p} W_i A_{\text{п}}. \quad (9)$$

Здесь $p_{\text{п}0}$ — концентрация носителей заряда в условиях тепловой генерации, $p_{\text{п}0} = n_i^2 / N_d = 10^8$ см⁻³; W_i — ширина, мкм, области пространственного заряда, $W_i = 18 \sqrt{\rho_v V}$ [16], где ρ_v — удельное сопротивление пластины, кОм·см; V — рабочее смещение, В. При $V = 30$ В имеем $W_i = 200$ мкм и согласно (9) $I_{\text{ген}} = 0,3$ нА.

Сила тока поверхностной генерации [15]

$$I_{\text{пов}} = \frac{1}{2} en_i s A_s, \quad (10)$$

где s — скорость поверхностной генерации, $s \approx 1$ см/с; A_s — эффективная площадь поверхностной генерации (площадь зоны объемного заряда). Подставив значения величин в выражение (10), получим $I_{\text{пов}} = 1$ нА. Следовательно, суммарная расчетная сила темнового тока разрабатываемого ФД при рабочем напряжении $V_p = 30$ В

$$I_T = I_{\text{диф}} + I_{\text{ген}} + I_{\text{пов}} = 4 \cdot 10^{-9} + 3 \cdot 10^{-10} + 1 \cdot 10^{-9} = 5,3 \cdot 10^{-9} \text{ А} = 5,3 \text{ нА.}$$

Таким образом, из проведенного расчета видно, что предлагаемая нами топология кремниевого $p-i-n$ -фотодиода обеспечивает оптимальные конструктивно-технологические решения, позволяющие более чем в три раза снизить выходную емкость и достигнуть таких же значений темнового тока и спектральной чувствительности, как у аналога при рабочем напряжении $V_p = 30$ В.

При разработке новых конструкторско-технологических решений необходимо: предусмотреть специальные меры при осуществлении технологических операций и технологического маршрута в целом; обеспечить соблюдение высокой вакуумной гигиены, чистоты реактивов, требований специальных процессов подготовки, очистки и отмычки поверхности кремниевых пластин, а также применение высокоэффективных гетеризирующих процессов. Кроме того, необходимы конструктивные решения, с помощью которых гарантируется защита активной поверхности ФД от утечек (охранные полевые и противоионизирующие стопорные кольца). Практическая реализация таких конструктивно-технологических решений позволит изготовить отечественные кремниевые фотодиоды для детекторов ионизирующих излучений на уровне мировых образцов.

Список литературы: 1. Кристаллы сцинтилляторов и детекторы ионизирующих излучений на их основе / Л.В. Атрошенко, С.Ф. Бурчачас, Л.П. Гальчицкий и др. К.: Наук. думка, 1998. 310 с. 2. Лягидевский В.К. Методы детектирования излучений. М.: Энергоатомиздат, 1987. 405 с. 3. Использование в дозиметрии детектора типа сцинтиллятор — фотодиод в счетном режиме / Е.А. Данилин, Л.А. Пивень, В.Д. Рыжиков, Е.М. Селегенов // ПТЭ. 1991. № 4. С. 67 — 69. 4. Павлов А.В. Опτικο-электронные и ионные приборы. М.: Энергия, 1974. 280 с. 5. Рыжиков В.Д., Стадник П.Е., Яковлев Ю.А. Перспективы развития системы сцинтиллятор — фотодиод // ПТЭ. 1984. № 5. С. 6 — 16. 6. Горн Л.С., Хазанов Б.И. Спектрометрия ионизирующих излучений на космических аппаратах. М.: Атомиздат, 1979. 260 с. 7. Комбинированные детекторы рентгеновского излучения на основе сцинтилляторов и кремниевых фотодиодов / А.Я. Глиберман, Н.И. Ковалев, С.Н. Игнатов и др. // ПТЭ. 1987. № 1. С. 197 — 199. 8. Столярова Е.Л., Дрыгин В.Н., Уйманов В.А. Детекторы сцинтиллятор — фотодиод // Прикладная ядер. спектрометрия. 1975. Вып. 5. С. 111 — 114. 9. Вифанова Л.В., Гурков Л.Н., Ованесов М.В. Эффективный приемник оптического излучения // Электрон. техника. Сер. 2, Полупроводниковые приборы. 1990. Вып. 4. С. 42 — 48. 10. Beck S.A., Carter A.A. Junction depth dependence of breacdown in silicon detector diodes // Nuclear Instrument and Methods. 1996. A

12. *Оптоэлектроника*. М.: Совет. радио, 1977. 232 с. 12. *Полупроводниковая оптоэлектроника*. Ультрафиолетовый видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра. Д. Анисимова, И.М. Викумен, Ф.А. Зайтов, Ш.Д. Курмашев. М.: Радио и связь, 1984. 252 с.
13. *Трищенко М.А., Фример А.И.* Фотоэлектрические полупроводниковые приборы с $p-n$ переходами // *Полупроводниковые приборы и их применение*. 1971. Вып. 25. С. 159 — 203. 14. *Серафин Б.* Преобразователи солнечной энергии. *Вопросы физики твердого тела*. М.: Энергоатомиздат, 1982. 275 с. 15. *Колтун М.М.* Солнечные элементы. М.: Наука, 1987. 275 с. 16. *Чилингаров А.Г.* Координатные полупроводниковые детекторы в физике элементарных частиц. Новосибирск, 1990. 228 с. (Препр. / Новосиб. гос. ун-т; 90 —113).

*Харьковский государственный технический
университет радиоэлектроники
Харьковский научно-исследовательский институт
технологии приборостроения*

Поступила в редколлегию 03.02.99