

Кремниевая фоточувствительная *pin*-линейка для регистрации быстропротекающих процессов

М.Р.Айнбунд¹, В.И.Зубков^{1,2}, Д.Е.Миронов¹, А.В.Пашук¹, В.В.Забродский³, А.В.Соломонов²

¹АО «ЦНИИ «Электрон»

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

³Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Аннотация: Для гибридного фотодетектора ИК-излучения разработана линейка из 12 кремниевых *pin*-диодов, регистрирующая фотоэлектроны с энергией 1–5 кэВ. Проведен расчет распределения концентрации свободных носителей заряда и потенциала в исследуемой *pin*-структуре. По результатам исследований фронта импульсной характеристики показано, что при напряжении на диоде –270 В на приборе достигнута длительность фронта сигнала на всех каналах 5–9 нс.

Ключевые слова: гибридный фотоэлектронный прибор, электронно-чувствительная *pin*-линейка, ИК-фотоприемник

1. Введение

В последние десятилетия в области полупроводниковых фотоприемных устройств (ФПУ) особое внимание уделяется разработке многоэлементных линейных и матричных структур. С применением микроэлектронных схем опроса и обработки такие многоэлементные фотоприемные устройства становятся эффективной альтернативой существующим телевизионным приемным устройствам [1–3].

Линейные ФПУ представляют собой одномерную линейку чувствительных к излучению датчиков; они применяются там, где требуется сверхскоростная (единицы-десятки нс) регистрация изменений в окружающей обстановке с соответствующей отработкой реакции (в первую очередь летательные аппараты) [4].

На пути миниатюризации и увеличения плотности фотоприемных элементов принципиальной проблемой становится доля экспонируемой площади фотоприемника из-за повышенной плотности металлических проводников. Поэтому в последнее время популярной становится перевернутая архитектура фотоприемного устройства – когда чувствительной стороной становится обратная сторона кристалла, на которой нет металлической разводки и структурных покрытий [2, 5].

В таких перевернутых структурах падающие на обратную поверхность фотоны в результате поглощения выбивают электронно-дырочные пары (внутренний фотоэффект), которые далее в приложенной разности потенциалов двигаются к чувствительным ячейкам на противоположной стороне. Недостатком данной конструкции является то, что один фотон генерит одну электронно-дырочную пару. Более перспективной рассматривается архитектура прибора, состоящего из отдельных катода и анода. В нем отдельно функционирующий фотоприемный катод служит детектором падающих фотонов нужной длины волны, а перевернутый кристалл с линейкой регистрирующих пикселей облучается выбиваемыми в фотокатоде электронами (внешний фотоэффект). В таком случае путем приложения ускоряющего поля между катодом и анодом можно достичь энергии фотоэлектронов в несколько кэВ. Эти электроны, бомбардируя поверхность полупроводникового *p-n*-анода, обеспечивают рождение сотен электронно-дырочных пар, таким образом обеспечивая высокий коэффициент усиления прибора [4, 5].

2. Структура изготовленной кремниевой линейки pin-фотоприемников

Для гибридного ИК-детектора разработана линейка из кремниевых *pin*-диодов, которая регистрирует фотоэлектроны с энергией 1–5 кэВ. В качестве базы выбран кремний *p*-типа электропроводности с удельным сопротивлением 2000 Ом·см.

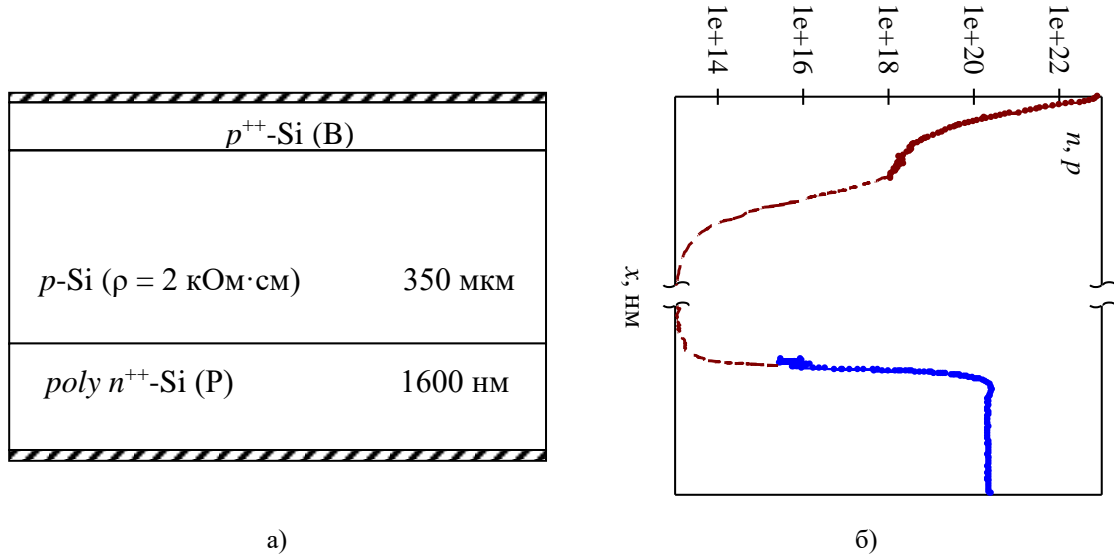


Рисунок 1. а) Последовательность слоев кремниевой *pin*-структуры, б) распределение концентрации примесей в ней (масштаб по оси x условный). Пунктиром указана область концентраций, недоступная для измерений методом ВИМС.

Эффективная регистрация электронов с энергией ~ 2 кэВ обеспечивается за счет использования изотипного p^{++} -*p* перехода, сформированного диффузией бора с поверхностной концентрацией $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Диффузия бора проводилась методом CVD при температуре 900° С. Тянущее поле, в свою очередь, формируется в области объемного заряда (ООЗ) между p^{++} - и n^{++} -слоями. Для создания n^{++} -области проводилась диффузия фосфора при температуре 950° С. Последовательность слоев *pin*-структуры приведена на рисунке 1а.

Профиль примеси бора измерялся методом ВИМС. Как показали ВИМС измерения, сформированный диффузией фосфора n^{++} -*p* переход располагается на глубине ~ 1600 нм, рисунок 1б.

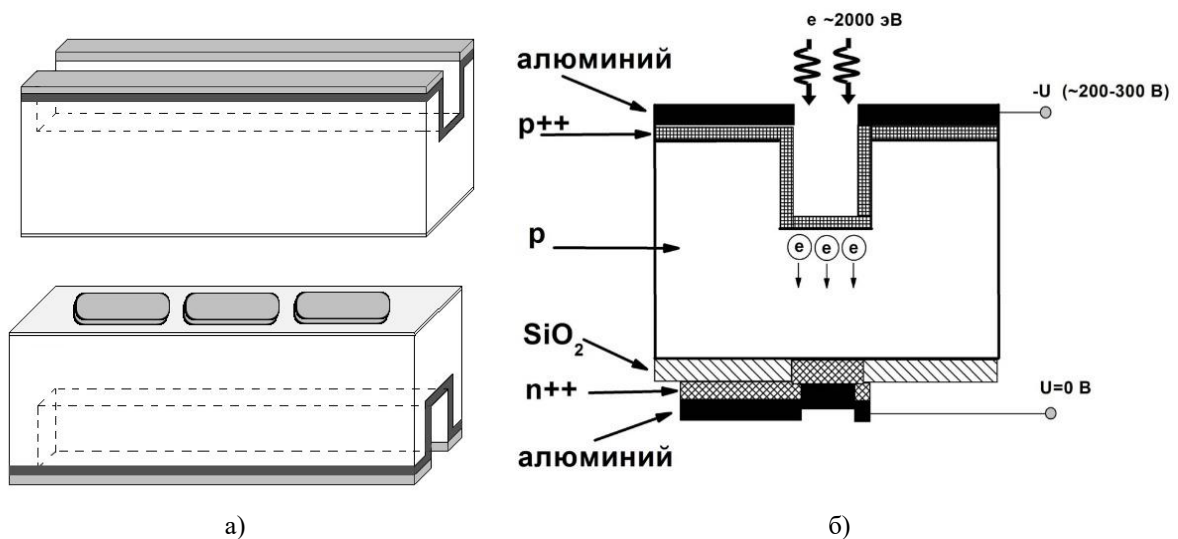


Рисунок 2. Принципиальная конструкция активной области (а) линейки и ее поперечный срез (б).

На рисунке 2 приведена принципиальная конструкция активной области линейки электронно-чувствительных кремниевых диодов (показаны три элемента) и поперечный срез. Облучение электронами осуществляется со стороны p^{++} -слоя. Регистрируемые частицы поглощаются в области изотипного p^{++} - p перехода и высокоомной базы p -типа и движутся к p - n^{++} переходу в дрейфовом режиме, обеспечиваемом обратным смещением 200-300 В. С целью увеличения эффективности сбора электронов в средней части линейки вводилось утонение с 350 мкм до 150 мкм. Ширина канавки – 200 мкм.

Геометрия элементов (пикселей) формируется со стороны n^{++} -областей, т.е. где находятся n^{++} - p -переходы. Длина одного элемента линейки – 2.0 мм, ширина – 0.2 мм. Расстояние между элементами определяется расстоянием между соседними окнами в SiO_2 – 60 мкм.

3. Расчет характеристик кремниевой линейки pin -фотоприемников

Проводился расчет распределения концентрации свободных носителей заряда и потенциала в исследуемой pin -структуре при различных приложенных напряжениях с использованием пакета одномерного моделирования SimWin [6] и пакета TCAD Synopsys. Параметры полупроводника, необходимые для расчета (толщины слоев и концентрация внедренной примеси) соответствуют рисунку 1. Переход n^{++} - p принят практически резким, а профиль концентрации в p^{++} -слое аппроксимирован экспонентой. Расчет проведен для участка канавки, где толщина всей структуры составляет 150 мкм.

В структуре при отсутствии смещения ООЗ занимает менее 15 мкм. Приложение смещения отрицательной полярности приводит к расширению ООЗ, появлению в ней электрического поля и небольшого обратного тока. При $U = -100$ В ООЗ расширяется практически на всю структуру. Ее граница оказывается размазанной по Дебаю в диапазоне 139...149 мкм. Электрическое поле занимает весь полупроводник, создавая тянущее поле для носителей заряда; его напряженность изменяется от $1.7 \cdot 10^2$ до $1.3 \cdot 10^4$ В/см. Известно, что ширина ООЗ сублинейно возрастает с ростом U , так что для обеднения структуры толщиной 350 мкм необходимо приложить напряжение уже около 320 В.

Для более полной характеристики линейки pin -диодов далее проводился 3D-расчет структуры в пакете моделирования TCAD Synopsys, вычисления выполнялись в квазидвумерном приближении.

Из анализа следует, что при неглубокой канавке на ее дне обеспечивается потенциал, практически равный приложенному к металлу на поверхности p^{++} -слоя

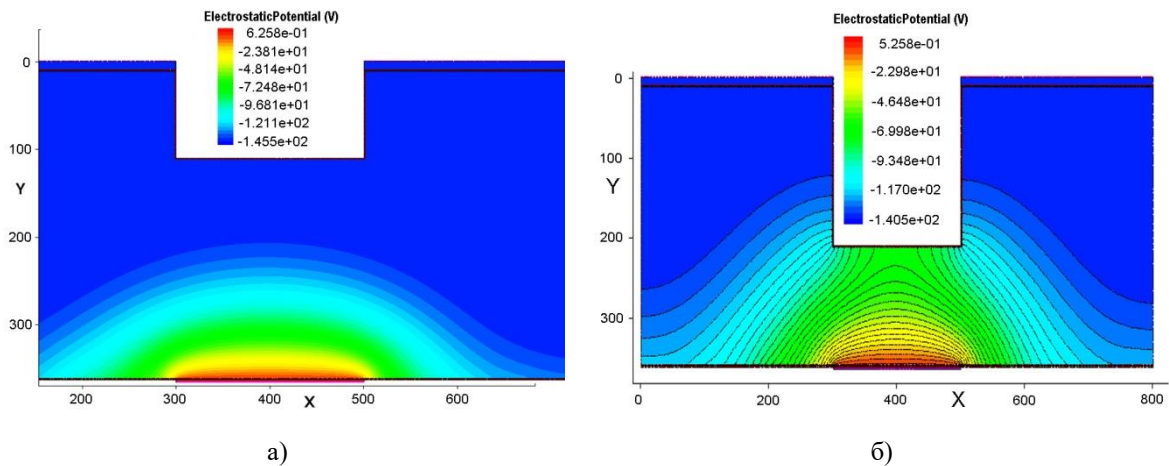


Рисунок 3. Распределение электростатического потенциала и ООЗ в структурах с различной глубиной канавки d : а) $U = 145$ В, $d = 100$ мкм; б) $U = 140$ В, $d = 200$ мкм.

(рисунок 3а, глубина канавки 100 мкм). Но если канавка достаточно глубокая, то даже p^{++} -слой с концентрацией $>10^{20} \text{ см}^{-3}$ не обеспечивает эквипотенциальность и на ее дне оказывается лишь половина приложенной к структуре разности потенциалов (рисунок 3б, канавка 200 мкм). При этом само наличие канавки не существенно модифицирует потенциальный рельеф структуры, создаваемый в первую очередь металлическими контактами, а она как бы “погружается” в имеющееся электрическое поле.

Далее проводился расчет напряженности электрического поля и заряда в продольной геометрии структуры. Предметом анализа было распределение электрического поля между металлическими контактами и как оно зависит от расстояния между контактами, которое задавалось от 40 до 80 мкм. Помимо того исследовалось, как расстояние между ними влияет на смыкание ООЗ соседних диодов.

На рисунке 4а изображено рассчитанное распределение потенциала под канавкой, в целом равномерное на подавляющей части глубины структуры. Неравномерность оказывается существенной на последних 20 мкм. Расчет также показал, что расстояние между нижними металлическими контактами слабо влияет на ширину ООЗ в данном случае. В случае большого зазора (80 мкм) наблюдается ее некоторое “провисание”, рисунок 4б, которое следует считать незначительным.

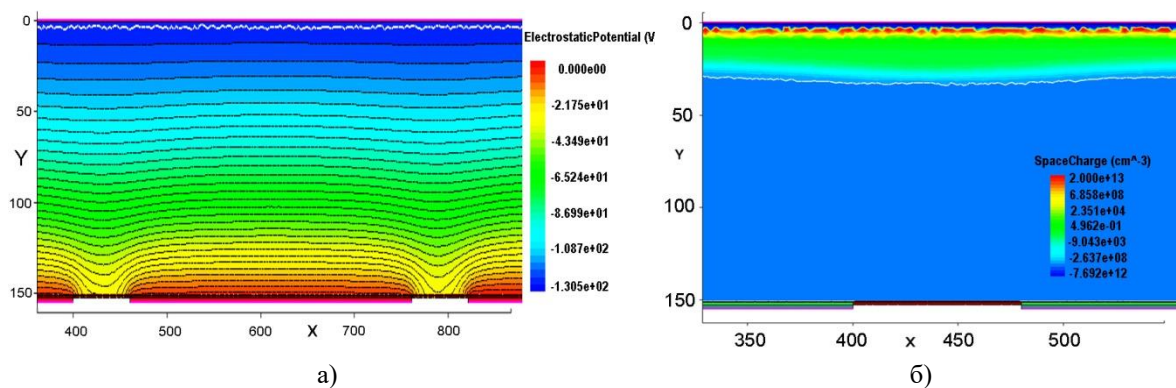


Рисунок 4. Распределение потенциала (а) и ООЗ (б) в продольном сечении структуры. Расстояние между Ме-контактами: а) 60 мкм; б) 80 мкм. Глубина канавки 200 мкм.

4. Тестирование гибридного ИК-прибора на базе pin-линейки

После изготовления партии диодных линейек её образцы проходили тестирование. Производилось определение фронта (времени нарастания) импульсной характеристики. В этих измерениях отдельный диод линейки облучался световыми импульсами от светодиода с длиной волны излучения 1310 нм, который располагался на расстоянии 1 см от входного окна прибора. Питание светодиода осуществлялось от генератора Г5-56 импульсами напряжения отрицательной полярности амплитудой 3.0 В. Частота следования световых импульсов 2 Гц, длительность импульса генератора 10 нс, фронт и спад импульса по 5 нс. На электрод фотокатода было подано напряжение смещения $U_{см.фк}=+2.4$ В. Включенный последовательно резистор 680 Ω ограничивал ток через структуру фотокатода величиной 1 мА. Высокое напряжение на фотокатод $U_{фк} = -2600$ В относительно линейки диодов подавалось через $R_{бал} = 25$ ГОм.

В эксперименте рабочая поверхность фотокатода напротив диодов линейки была ограничена диафрагмой 2 x 25 мм², которая была установлена непосредственно на входном окне. При исследовании сигнала указанного диода остальные диоды линейки заземлялись. На общий электрод линейки от источника постоянного тока Б5-10 подавалось напряжение отрицательной полярности U_d , постоянный темновой ток в цепи I_d контролировался с помощью микроамперметра. Режим питания для всех диодов: $U_d = -270$ В. Осциллограммы измерений представлены на рисунке 5. На всех

осциллограммах сигнал показан с вычитанием помех (красная линия, отрицательной полярности, полоса частот 150 МГц, нагрузка 50 Ом). По результатам исследований при $U_d = -270$ В на приборе достигнута требуемая длительность фронта сигнала на всех каналах (5–9 нс).

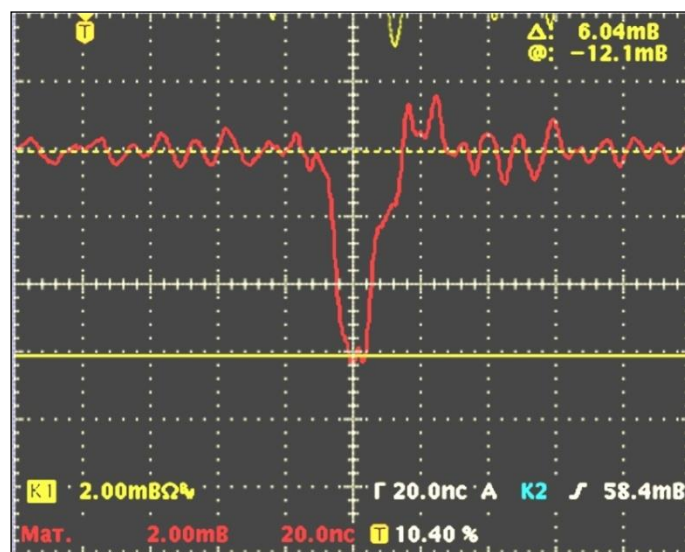


Рисунок 5. Осциллограмма импульсной характеристики диода линейки, $I_d = 4.9$ мкА, полоса частот 150 МГц. Сигнал показан красным цветом, фронт сигнала < 5 нс.

3. Заключение

Для гибридного ИК-детектора разработана линейка из кремниевых *pin*-диодов, которая регистрирует фотоэлектроны с энергией 1–5 кэВ. Проведен расчет распределения концентрации свободных носителей заряда и потенциала в исследуемой *pin*-структуре. В процессе испытаний диоды линейки выдержали максимальные напряжения $U_{фк} = -3.5$ кВ, $U_{см.фк} = +3.0$ В и способны выдерживать ток в импульсе 150 мкА и более. Рекомендуемые значения $U_{фк} = -2.2 \dots -2.8$ кВ, $U_{см.фк} = +2.0 \dots 2.5$ В.

Список литературы

1. Балясный, Л. М. Высокочувствительный гибридный фотоприемный модуль на основе фотокатодов с отрицательным электронным средством и матриц ПЗС (КМОП) с электронной бомбардировкой тыльной стороны / Л. М. Балясный, [и др.] // Прикладная физика — 2018. — № 4. — С. 74–78.
2. Rogalski, A. Progress in focal plane array technologies / A. Rogalski // Progress in Quantum Electronics — Vol. 2012. — 36. — P. 342–473.
3. Brunkov, P. N. P-InAsSbP/n-InAs single heterostructure back-side illuminated 8 x 8 photodiode array / P. N. Brunkov, [et al.] // Infrared Physics & Technology — 2016. — Vol. 78. — P. 249–253.
4. Айнбунд, М. Р. Гибридный многоканальный фотоприемник для спектрального диапазона 1–1,6 мкм / М. Р. Айнбунд, [и др.] // Прикладная физика — 2018. — № 6. — С. 54–59.
5. Айнбунд, М. Р. Гибридные фотоэлектронные приборы (обзор) / М. Р. Айнбунд, [и др.] // Успехи прикладной физики — 2018. — Т. 6. — № 5. — С. 401–407.
6. Winston, D. Physical simulation of optoelectronic semiconductor devices. Thesis for the Doctor of Philosophy degree. University of Colorado — 1996.