

УДК 621.383

Планарный германиевый $p-n$ -фотодиод большой площади

Ю. М. Деготь, О. Н. Забенькин, Н. Н. Кичина, Н. В. Кравченко, А. В. Кулыманов, Ю. М. Лобиков, О. В. Огнева, М. А. Тришенков, П. Е. Хакушешев, И. В. Чинарева
ФГУП «НПО «Орион»», Москва, Россия

Представлены основные результаты разработки и изготовления одноэлементного германиевого фотодиода (ФД) с диаметром фоточувствительной площадки 1,1 мм, предназначенного для регистрации излучения лазера с диапазоном длин волн 0,8–1,6 мкм и прежде всего лазеров на 1,06 и 1,55 мкм. Фоточувствительная область создавалась имплантацией ионов бора. Все процессы ионной имплантации выполнялись через маску в фоторезисте. В качестве защитного и просветляющего покрытий использовалась пленка двуокиси кремния, осаждаемая из газовой фазы. Омические контакты создавались напылением в вакууме двухслойной системы титан–золото.

Выбор исходного материала

Традиционно фотодиоды для спектрального диапазона 1,0–1,6 мкм изготавливаются на основе либо германия, либо гетероструктур соединений в системе InGaAsP/InP. В нашем случае при разработке прибора большой площади указанные гетероструктуры не могут быть использованы из-за их высокой неоднородности, отсутствия отечественного промышленного выпуска этого материала. В то же время германий является более дешевым и освоенным полупроводниковым материалом для требуемого диапазона. Ряд технических преимуществ Ge ФД по сравнению с InGaAs ФД для лазерных систем с мощной прямой засветкой отмечен в [1].

Вследствие больших коэффициентов поглощения германия в спектральном диапазоне 1,0–1,5 мкм поглощение фотонов происходит, главным образом, в приповерхностной области приборной структуры (области базы). Следовательно, квантовая эффективность германиевых фотодиодов определяется интенсивностью рекомбинации носителей при их диффузии из высоколегированной приповерхностной области к переходу. Диффузионная длина электронов в p^+ -слое больше, чем диффузионная длина дырок в n^+ -слое, поэтому можно полагать, что сборание в ФД с p^+ - n -структурой должно быть лучше, чем для ФД с n^+ - p -структурой.

В качестве исходного материала для изготовления разрабатываемого ФД был выбран германий монокристаллический n -типа проводимости марки ГЭС 0,35/Г/6, выпускаемый по ТУ 48-4-293 с концентрацией носителей $N_n = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Область p^+ -типа создается методом ионной имплантации, поскольку для германия не существует технологически применимых диффузанта-акцепторов.

Создание локального $p-n$ -перехода и стоп-кольца

Фотодиод изготавливался по планарной технологии с использованием стоп-канала, ограничивающего величину диффузионного тока из n -подложки, который протекает в приповерхностном слое, и охранного кольца, предохраняющего от раннего пробоя из $p-n$ -перехода по периферии. При этом фоточувствительная область (p -область) должна создаваться имплантацией ионов бора, охранное кольцо (p^+ -область) — имплантацией ионов бериллия, а область стоп-канала (n^+ -область) — имплантацией ионов мышьяка. На основании литературных данных [1, 2] были выбраны следующие условия ионной имплантации:

- для бора — энергия ионов $E = 40 \text{ кэВ}$, доза $D = 10^{15} \text{ см}^{-2}$;
- для мышьяка — энергия ионов $E = 130 \text{ кэВ}$, доза $D = 10^{13} \text{ см}^{-2}$;
- для бериллия — энергия ионов $E = 100 \text{ кэВ}$, доза $D = 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

Процессы имплантации должны проводиться через пленку SiO_2 , которая обеспечивает защиту поверхности германия от деструкции под воздействием ионной бомбардировки. Толщину пленки следует оптимизировать в целях создания в ней минимальной плотности микропор при достаточной проницаемости пленки для имплантируемых ионов. Оптимальная толщина пленки SiO_2 — 800 \AA .

Все процессы ионной имплантации проводились через маску фоторезиста.

Для обеспечения полной активации ионов всех типов должен выполняться отжиг имплантированных слоев при температуре 600–700 °С. Перед отжигом на поверхность экранирующей пленки SiO_2 , а также на обратную сторону приборной структуры наносится дополнительный

слой SiO_2 . В результате отжига не возникает механических деформаций германия, связанных с различием термических коэффициентов расширения SiO_2 и Ge, предотвращается возникновение в последнем структурных дефектов и минимизируется темновой ток по таким дефектам.

Диэлектрические покрытия

Неорганические диэлектрические покрытия должны использоваться для пассивации и защиты поверхности $p-n$ -перехода в качестве экрана и термокомпенсирующего слоя при имплантации ионов, а также для интерференционного просветления фоточувствительной области.

Наиболее серьезной проблемой при изготовлении германиевых фотодиодов является пассивация поверхности, так как собственные окислы GeO и GeO_2 нестабильны и не могут служить единственным пассивирующим покрытием. В этом состоит одно из отличий германиевых приборов от кремниевых, где имеется стабильная и эффективная природная собственная окисная пленка SiO_2 . Для Ge-фотодиодов с p^+-n -структурой наиболее подходит для пассивации та же пленка SiO_2 [1, 3], но, естественно, для Ge она не является собственной и осаждается при низкотемпературном пиролизе. Она имеет положительный заряд и, притягивая электроны к поверхности, препятствует росту p -каналов, что снижает вероятность процессов генерации в этом слое. Для повышения надежности фотодиода и стабильности его характеристик необходимо обеспечить плотность поверхностных состояний на границе раздела Ge- SiO_2 на уровне $10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$. Для этого потребуются введение специальной химической обработки поверхности германия и отжиг пассивирующей пленки в атмосфере кислорода.

Контактная система

Среди основных требований к металлургическим свойствам контакта, от которых зависят

параметры прибора, следует отметить малую глубину проникновения в полупроводник, хорошую адгезию к поверхности и совместимость с полупроводником и материалом внешнего токоотвода.

Поскольку трудно подобрать металлическое покрытие, отвечающее всем требованиям, обычно применяют многослойные контактные системы. При изготовлении германиевого фотодиода предполагается использовать двухслойную систему Ti-Au, где Ti — собственно контактный слой с малой растворимостью в германии и хорошей адгезией, а Au — хорошо совмещается с материалом контактного слоя и внешним токоотводом.

Для нанесения слоя Au выбран метод вакуумного напыления с резистивным нагревом металла. Для нанесения тугоплавкого Ti необходимо применять магнетронное распыление в тлеющем разряде. Оба этих метода гарантируют высокую чистоту металлических пленок и малую глубину проникновения контактного материала в полупроводник.

Для получения омического контакта к Ge n -типа с удельным сопротивлением $0,35 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ использовалось подлегирование в виде имплантации ионов As с последующим отжигом. Режимы ионной имплантации такие же, как и для формирования стоп-кольца.

Для улучшения адгезии контактного покрытия и свойств контактной системы после нанесения контактных пленок должна проводиться их термообработка в атмосфере азота при температуре $350\text{--}400 \text{ }^\circ\text{C}$.

Параметры и характеристики

Параметры разработанного ФД были типичными для данного класса приборов. Спектральная характеристика показана на рис. 1. Монохроматическая чувствительность на длине волны $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$ составляла $0,4\text{--}0,5 \text{ А/Вт}$, а на $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$ — $0,5\text{--}0,7 \text{ А/Вт}$.

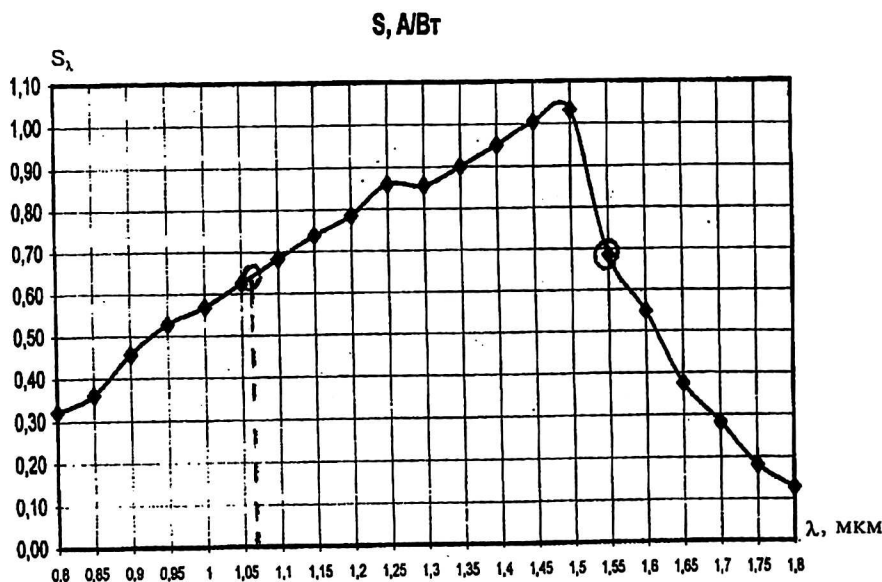


Рис. 1. Спектральная характеристика:
 $S_{\lambda = 1,06} = 0,6$; $S_{\lambda = 1,55} = 0,7$

Типичная вольт-амперная характеристика показана на рис. 2. Рабочее напряжение было выбрано 10 В и имело большой запас относительно пробивного напряжения, которое составляло 50–60 В. Минимальное значение темнового тока получено на уровне 3 мкА, что соответствовало модели Шокли генерации в подложке. Об этом свидетельствовал и большой участок насыщения на вольт-амперной характеристике. У ряда приборов наблюдались темновые токи 5–7 мкА, что свидетельствует о вкладе дополнительных механизмов генерации прежде всего поверхностного слоя. Технология позволяла устранить избыточные фликкер-шумы начиная с частот 110 кГц.

В рабочей области частот шумы ФД определяются дробовым шумом его темнового тока. Это позволяет получить обнаружительную способность в отсутствие засветки в максимуме спектральной чувствительности $(5-7) \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$. Достигнутое весьма высокое пробивное напряжение способствовало уменьшению избыточных фликкер-шумов при рабочем напряжении 10 В.

Вольт-емкостная характеристика показана на рис. 3. Она также имела типовой вид. Емкость ФД падает с напряжением пропорционально $(U + \varphi_k)^{1/2}$. При рабочем напряжении 10 В емкость ФД составляла 70–80 пФ.

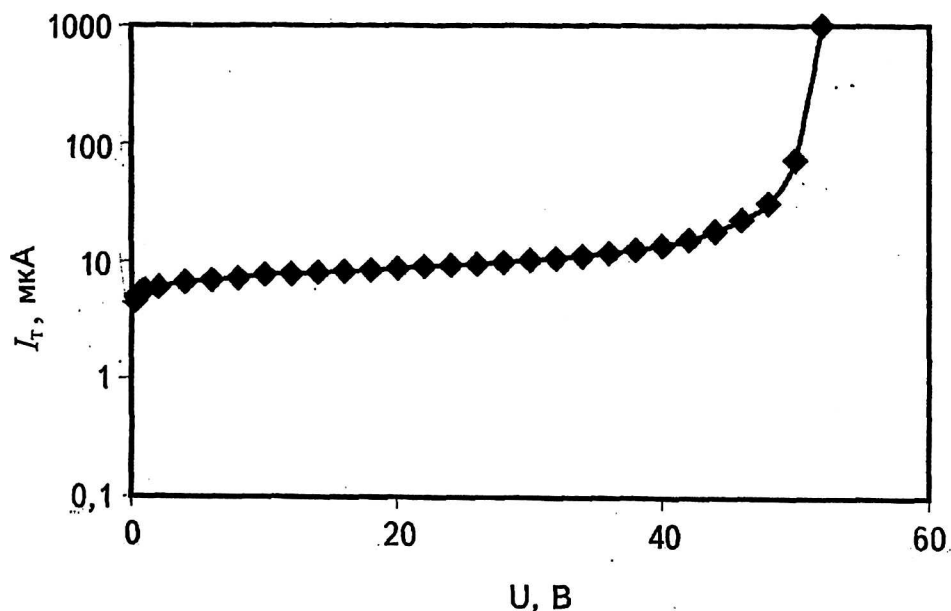


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика

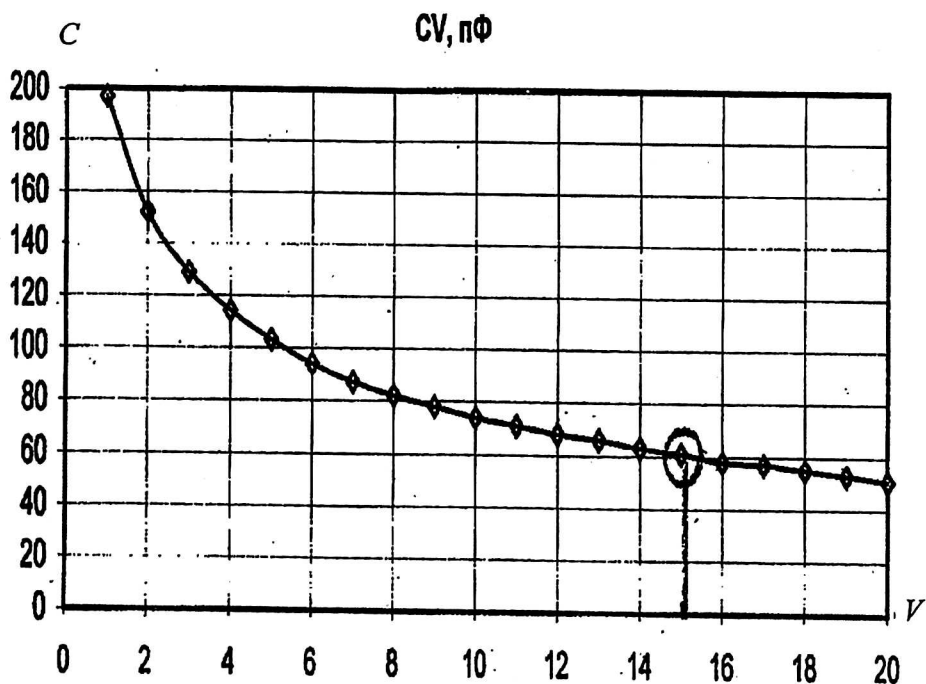


Рис. 3. Вольт-емкостная характеристика

Нормы параметров имели запас относительно реально достигнутых значений и приведены ниже:

Спектральный диапазон, мкм.....	0,8—1,6
Диаметр фотоприемной площадки, мм.....	1,1
Токовая монохроматическая чувствительность при нормальных климатических условиях, А/Вт, не менее:	
S_1 на длине волны 1,06 мкм.....	0,4
S_2 на длине волны 1,55 мкм.....	0,5
Рабочее напряжение, В.....	10
Темновой ток I_T при нормальных климатических условиях, мкА, не более.....	10
Темновой ток I_T при повышенной рабочей температуре 50 °С, мкА, не более.....	100
Удельная обнаружительная способность в максимуме спектральной чувствительности D^* , Вт ⁻¹ ·см·Гц ^{1/2}	3·10 ¹⁰
Емкость, пФ, не более.....	100
Длительность фронта нарастания и спада переходной характеристики, нс.....	40
Динамический диапазон при длительности импульса 100 нс, не менее.....	10 ⁷

Авторы выражают благодарность В. С. Варгановой, М. А. Вороновой, М. А. Захаровой, С. Ю. Максимова, Т. Н. Мищенковой, В. Н. Патрину, А. Г. Титову, А. Е. Трошкову, В. И. Фамицкому, З. В. Чижовой за помощь в разработке прибора

Литература

1. Техника оптической связи. Фотоприемники: Книга/ Под ред. У. Тсанга. — М.: Мир, 1988.
2. Свойства структур металл—диэлектрик—полупроводник: Книга/ Под ред. А. В. Ржанова. — М.: Наука, 1976.
3. Трищенко М. А., Фример А. И. Фотоэлектрические полупроводниковые приборы с *p-n*-переходами// Полупроводниковые приборы и их применение/ Под ред. Я. Я. Федотова. — М.: Советское радио. 1971. Вып. 25. С. 159—203.

Large area planar Ge *p-n*-photodiodes

Yu. M. Degot, O. N. Zabenkin, N. N. Kichina, N. V. Kravchenko, A. V. Kulymanov, Yu. V. Lobilov, O. V. Ogneva, M. A. Trishenkov, P. E. Khakuashev, I. V. Tchinareva, ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

*We describe the fabrication and performance of Ge *p-n*-photodiodes that have photosensitive areas with diameters of 1.1 mm. The photodiodes have high sensitivity at 1.06 and 1.55 μm. The substrates used in this work are n-type wafers with a carrier concentration of 5·10¹⁵ cm⁻³. Boron ions are implanted to form a *p-n*-junction. To prevent edge breakdown the diode is surrounded by a guard ring produced by berillium implantation. All implantations are performed with photoresist masks through the passivation layer, which acts as a screening oxide. Ti and Au are used as contacts. Typical responsivity is over 0.4 A/W at 1.06 μm, 0.7 A/W at 1.55 μm. At 20 °C, -10 V, the capacitance is 80 pF, dark current is 5 μkA.*