

Дата поступления в редакцию
30.03—18.11 2004 г.

К. т. н. В. В. РЮХТИН, к. т. н. Ю. Г. ДОБРОВОЛЬСКИЙ

Украина, г. Черновцы, ЦКБ «Ритм», НПФ «Тензор»
E-mail: rhythmrs@chv.ukrpack.net

Оппоненты к. т. н. А. А. МЕРЖВИНСКИЙ
(Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова, г. Киев),
А. А. ВОРОНЬКО (Центр оптоэлектронных
технологий, г. Киев)

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ТЕРМОСТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ГЕРМАНИЕВЫХ ФОТОДИОДОВ

Рассмотрены подходы к конструированию лавинных и нелавинных германиевых фотодиодов с применением эпитаксиальных структур и термоэлектрического охлаждения.

Развитие систем оптической связи предусматривает использование различных длин волн оптического излучения, в том числе ближнего инфракрасного диапазона. К широко используемым длинам волн относятся и длина волны 1,5 мкм, соответствующая максимуму поглощения германия, поэтому для регистрации оптического излучения этой длины волны используются, как правило, германиевые фотодиоды.

В настоящей работе рассмотрены подходы к конструированию лавинных и нелавинных германиевых фотодиодов.

Одним из основных параметров фотодиодов является порог чувствительности ($\Phi_{\text{п}}$) — величина, обратная обнаружительной способности, определяющая уровень светового потока, при котором среднеквадратичное значение сигнала равно среднеквадратичному значению шума. Чем ниже значение этого параметра, тем выше качество фотодиода.

Низкий порог чувствительности может быть получен, если избыточные шумы уменьшены до минимума, т. е. имеются только дробовые шумы. Средне-

квадратическое значение флуктуации тока дробовых шумов $I_{\text{ш}}^2$ фотодиода определяется как [1, с. 64]:

$$\overline{I_{\text{ш}}^2} = 2qI\Delta f, \quad (1)$$

где q — заряд электрона;
 I — ток через p - n -переход;
 Δf — полоса частот.

С другой стороны, согласно определению порога чувствительности, для монохроматического излучения [1, с. 64]

$$\Phi_{\text{п}} S_{I_{\lambda}} = \sqrt{I_{\text{ш}}^2}, \quad (2)$$

где $S_{I_{\lambda}}$ — токовая монохроматическая чувствительность;
 $I_{\text{ш}}$ — плотность тока шума в единичной полосе частот.

Отсюда

$$\Phi_{\text{п}} = [2q(I_t + I_{\text{ф}})\Delta f]^{1/2} S_{I_{\lambda}}^{-1}, \quad (3)$$

где I_t — темновой ток фотодиода;
 $I_{\text{ф}}$ — фототок фотодиода.

При обнаружении слабых световых сигналов, промодулированных с высокой частотой, зависимость пороговой чувствительности от темнового тока, который в данном случае определяет генерационно-рекомбинационный шум, усиливается.

Таким образом, для получения низких значений пороговой чувствительности в полосе частот, где преоб-

Таблица 1

Обозначение фотодиода, предприятие-изготовитель, страна	Диаметр фоточувствительного элемента, мм	Темновой ток, мкА	Токовая монохроматическая чувствительность, А/Вт	Рабочая длина волны, мкм	Рабочее напряжение, В	Рабочая температура, °С	Источник информации
B1918-01 , Hamamatsu, Япония	1	2	0,8	1,55	0,01	20	[2]
B1720-02 , Hamamatsu, Япония	1	0,3	0,8	1,55	0,01	20	[2]
B2538 , Hamamatsu, Япония	5	0,09	0,8	1,55	0,01	-10	[2]
ФД-351 , ГНЦ РФ ГУП «НПО «Орион», Россия	1	10	0,5 0,55	1,06 1,55	0,01	20	[3]
ФДГ-500СТ , ФГУП НИИ «Полус», Россия	0,8	0,05	0,9	1,5	0,01	5	[4]
ФД-312 , ОАО «Кварц», Украина	0,1	0,4	0,5	1,3	8	20	[5]

ладают дробовые шумы, необходимо обеспечивать минимально возможные значения темновых токов и максимально возможные значения токовой монохроматической чувствительности. Обе величины зависят от температуры, однако темновой ток с изменением температуры меняется больше, чем чувствительность.

Таким образом, уменьшение темнового тока германиевого фотодиода и повышение его чувствительности являются актуальной задачей, решение которой способно существенно увеличить пороговые характеристики фотоприемника, определяющие его качество.

Решением поставленной задачи заняты разработчики в разных странах. Нами рассмотрены результаты, полученные одним из ведущих мировых производителей фирмой Hamamatsu, ведущими российскими производителями и отечественным производителем (табл. 1) [2—5]. Анализ показывает, что для обеспечения необходимого технического уровня разрабатываемый фотодиод должен иметь темновой ток на уровне десятков нА, а токовую монохроматическую чувствительность — на уровне не менее 0,8 А/Вт на длине волны 1,55 мкм.

Как правило, проблема снижения темнового тока и повышения чувствительности решается как путем технологических и конструктивных подходов, так и путем снижения температуры кристалла фотодиода.

Как известно [6, с. 95—100], зависимость темнового тока генерационного происхождения от температуры приближенно определяется из соотношения $I_d \approx e^{-E_g/kT}$, а диффузионного — $I_d \approx e^{-E_g/2kT}$, где E_g — ширина запрещенной зоны полупроводника, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура. Отсюда следует очевидный вывод о том, что охлаждение германиевого фотодиода могло бы способствовать уменьшению темнового тока.

В случае германиевых фотодиодов наблюдается довольно большая зависимость обратного тока от температуры, поскольку ширина запрещенной зоны германия составляет 0,69 эВ при 300 К, что существенно влияет на температурную зависимость генерации неосновных носителей заряда в нем. На рис. 1, а приведена зависимость темнового тока от температуры для двух видов германиевых фотодиодов — изготовленных из монокристаллического германия *p*-типа проводимости и изготовленных на основе эпитаксиальной структуры. Результаты получены на фотодиодах с площадью фоточувствительного элемента 2 мм².

Как видно на рисунке, при комнатной температуре величина темнового тока составляет примерно $8 \cdot 10^{-5}$ А для фотодиода на базе эпитаксиальной структуры и около $1 \cdot 10^{-4}$ А для фотодиода на базе монокристаллического германия *p*-типа проводимости. Понизив температуру кристалла фотодиода до -10°C можно достичь значения темнового тока 10^{-5} А в первом случае и $3 \cdot 10^{-6}$ А во втором. Изменение чувствительности в этом случае незначительно. Как видно на рис. 1, б, на длине волны 1,3 мкм значения чувствительности составляют 0,71 А/Вт при 20°C и 0,73 А/Вт при -10°C для фотодиодов, изготовленных на основе эпитаксиальной структуры, и соответственно 0,72 и 0,74 А/Вт для фотодиодов, изготовленных на основе монокристаллического германия. Таким образом, с

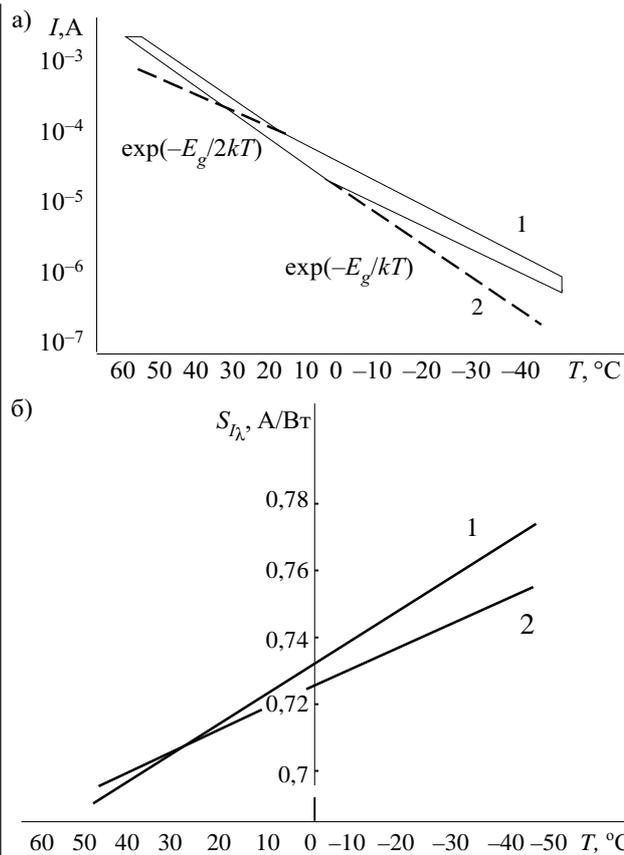


Рис. 1. Зависимость темнового тока (а) и токовой монохроматической чувствительности (б) германиевого фотодиода от температуры:

1 — фотодиод из монокристаллического германия *p*-типа проводимости; 2 — фотодиод на эпитаксиальной структуре

применением охлаждения можно уменьшить темновой ток германиевого фотодиода практически на порядок при небольшом увеличении чувствительности.

Изготовление германиевых фотодиодов для оптических систем связи, в т. ч. лавинных фотодиодов, обладает рядом особенностей. Кроме особенностей технологического характера, таких как использование медленного охлаждения кристалла фотодиода после термических операций, подготовка поверхности (отмывка ее перед началом каждого технологического этапа) и других, необходимо учитывать физическую природу поглощения электромагнитного излучения в германии, а также природу генерации темнового тока в нем, величина которого сказывается на величине шума фотодиода и, соответственно, на его пороговых характеристиках.

На рис. 2 приведен профиль распределения концентраций легирующей примеси по толщине пластины в фотодиоде на основе монокристаллического германия с исходной концентрацией примеси неосновных носителей заряда $N_D \approx 10^{16}$ см⁻³. На рис. 3 видно, что основная часть излучения с рабочей длиной волны $\lambda=1,3$ мкм (как и 1,5 мкм) поглощается в области высоких концентраций. Это приводит к уменьшению чувствительности таких фотоприемников за счет высокого уровня рекомбинации фотогенерированных носителей заряда. С другой стороны, уменьшение кон-

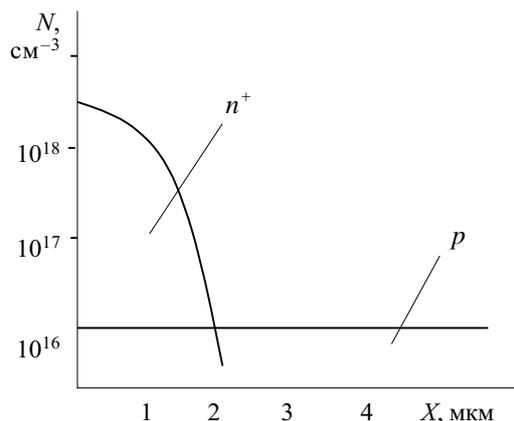


Рис. 2. Распределение концентрации легирующей примеси для фотодиода на основе германия p -типа проводимости

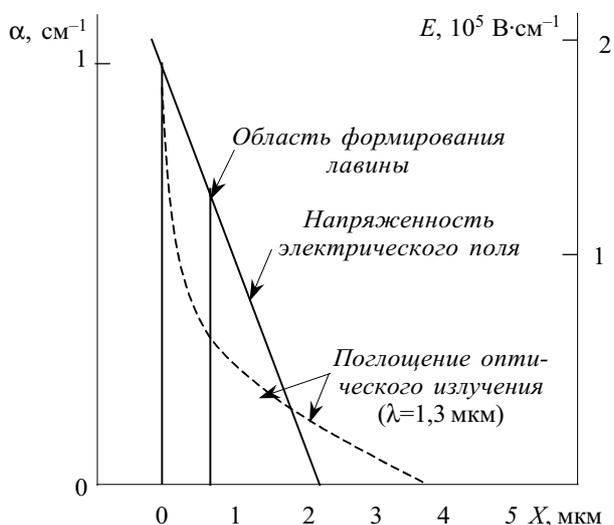


Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля E и поглощения оптического излучения α по глубине структуры X лавинного фотодиода на основе германия p -типа проводимости

центрации доноров при создании p - n -перехода способствует одновременному увеличению диффузионной составляющей темнового тока.

Исследование различных вариантов конструкции фотодиодов показало, что снижение диффузионной составляющей возможно, если в качестве подложки (исходного германиевого материала) использовать эпитаксиальные структуры p - p^+ или n - n^+ с концентрацией носителей в $p^+(n^+)$ -области 10^{17} — 10^{18} см^{-3} . При толщине $p^+(n^+)$ -области $h_p(h_n) \cong W$ (области пространственного заряда) объемный темновой ток в таких условиях должен определяться генерационной составляющей.

В результате проведенных исследований в ЦКБ «Ритм» были разработаны принципы конструирования термостабилизированных лавинных и нелавинных германиевых фотодиодов для метрологических задач. В частности, реализована конструкция лавинного фотодиода.

На рис. 4 приведено распределение концентраций и напряженности электрического поля в p^+n - n^-n^+ -

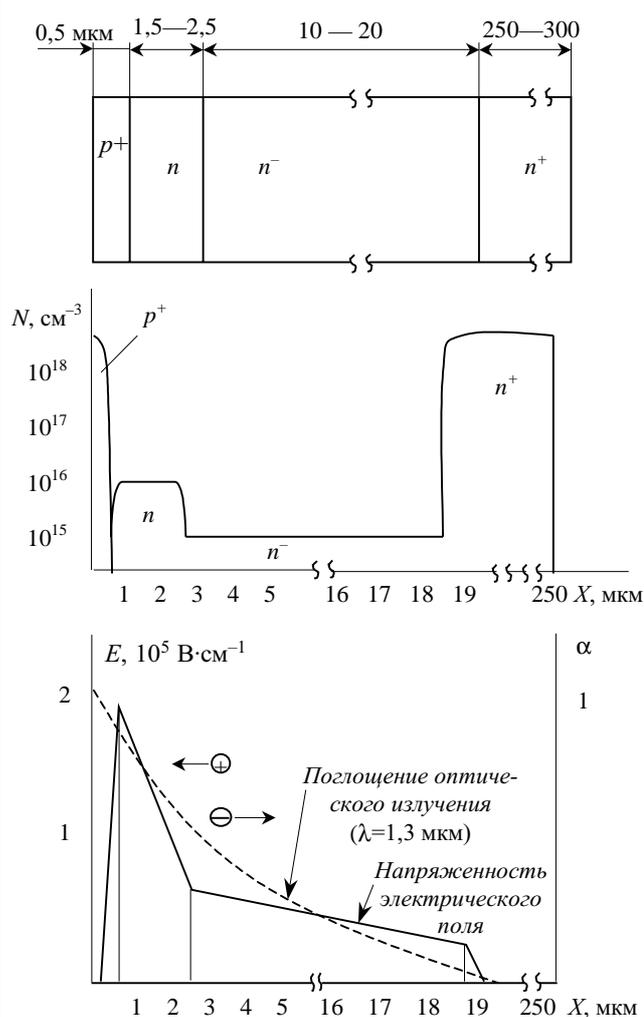


Рис. 4. Распределение концентраций N и напряженности электрического поля E в p^+n - n^-n^+ -структуре германиевого фотодиода

структуре германиевого лавинного фотодиода, изготовленного с учетом полученных результатов. Разработанный фотодиод обладает токовой монохроматической чувствительностью 10—20 А/Вт (в зависимости от величины рабочего напряжения), в то время как у его прямого аналога — лавинного фотодиода ФД 312Л [6] она составляет 5—7 А/Вт.

Аналогичная конструкция, за исключением области формирования лавины (область n -типа проводимости на рис. 4), реализована и для обычных германиевых фотодиодов. Одно из таких изделий — германиевый фотодиод с термоэлектрическим охлаждением «Призма 3», предназначенный для комплектации тестеров оптического излучения, проходящего по волоконно-оптическим линиям связи, оптимизированным на диапазон длин волн оптического излучения 0,6 — 1,85 мкм.

Конструктивно фотодиод выполнен в металлоглазном корпусе. Для термостабилизации кристалла фоточувствительного элемента использован однокаскадный термоэлектрический модуль, выполненный в слаботочном исполнении. Потребляемый ток модуля составляет 0,1—0,5 А. Суммарная холодопроизво-

длительность не менее 0,05 Вт при охлаждении фотодиода на 40°C (ток потребления 0,5 А). Площадь холодного спая 2,8×2,8 мм², площадь горячего спая 2,8×3,3 мм², высота модуля 2,6 мм.

Термоэлектрический модуль, которым снабжен фотодиод, обеспечивает перепад температуры между горячей и холодной гранями до 40°C, однако в соответствии с требованиями, выдвинутыми потребителем фотодиода, устанавливается рабочая температура около 10°C. Мощность, которую потребляет при этом охладитель, не превышает 0,25 Вт при токе 0,5 А. В корпус фотодиода встроен датчик температуры на базе транзистора КТС 395А (или его аналога КТ-129) в диодном включении. Выводы всех элементов устройства изолированы друг от друга и от корпуса. Минимальная наработка на отказ разработанных фотодиодов составляет не менее 10000 часов.

Схематическое изображение разработанного фотодиода приведено на рис. 5, где 1 — цоколь; 2 —

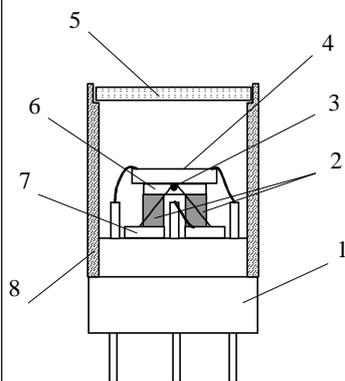


Рис. 5. Схематическое изображение конструкции фотодиода «Призма 3»

ветви термоэлектрического модуля; 3 — транзистор для контроля температуры; 4 — кристалл фотодиода; 5 — стеклянное входное окно; 6 — верхняя коммутационная пластина; 7 — нижняя коммутационная пластина; 8 — крышка.

Следует отметить, что конструкция разработанного фотодиода позволяет использовать его как в фотодиодном, так и в фотовольтаическом режимах. Однако в данной работе, согласно техническому заданию, все параметры нормированы для фотодиодного режима работы при температуре кристалла фотодиода 10°C.

В табл. 2 приведены основные характеристики фотодиода «Призма 3». Сравнение параметров разработанного охлаждаемого германиевого фотодиода и известных аналогов (табл. 1) показывает, что новый фотодиод по уровню параметров не уступает им.

Выводы

В результате исследований зависимости темнового тока германиевого фотодиода от температуры и изучения особенностей детектирования оптического излучения различными конструкциями фотодиодов разработаны подходы к конструированию лавинных и нелавинных германиевых фотодиодов.

Показано, что наиболее приемлемой является конструкция на основе эпитаксиальной структуры *p-p⁺*- или *n-n⁺*-типа проводимости с концентрацией носителей в *p⁺(n⁺)*-области 10¹⁷—10¹⁸ см⁻³. Толщина *p⁺(n⁺)*-области должна быть соизмеримой с шириной области пространственного заряда. Разработан охлаждаемый германиевый фотодиод с темновым током до 80 нА и токовой монохроматической чувствительностью до 0,85 А/Вт, что соответствует существующему уровню аналогичной техники.

Разработана конструкция лавинного фотодиода, которая обеспечивает увеличение токовой монохроматической чувствительности с 5—7 до 10—20 А/Вт.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Полупроводниковые фотоприемники: ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра / И. Д. Анисимова, И. М. Викулин, Ф. А. Заитов, Ш. Д. Курмашев.— М.: Радио и связь, 1984.
2. <http://www.sensor.al.ru/IGNIS/indiode.html>
3. Филачев А. М., Пономаренко В. П., Таубкин И. И. и др. Фотоприемники и фотоприемные устройства для приема импульсного излучения в спектральном диапазоне 0,3—11 мкм // Прикладная физика.— 2002.— № 6.— С. 55.
4. <http://www.polyus.msk.ru/RU/phdiodr.html>
5. Фотоприемники и фотоприемные устройства / Каталог ОАО «Кварц».— 2000—2001.— С. 61.
6. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1.— М: Мир, 1984.

Таблица 2

Параметр	Среднеизмеренное значение
Рабочее напряжение, В, не более	0,01
Темновой ток, мкА, не более	0,08
Токовая монохроматическая чувствительность на длине волны 1,55 мкм, А/Вт	0,85
Порог чувствительности, Вт·Гц ^{1/2} , не более	6·10 ⁻¹³
Нелинейность энергетической характеристики, %, при мощности падающего излучения:	
10 ⁻⁶ —10 ⁻³ Вт, не более	1
10 ⁻³ —3·10 ⁻³ Вт, не более	2
Температура кристалла фотодиода, °С, не более	10