

Д. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ, к. т. н. В. Н. ГОДОВАНЮК,
Ю. Г. ДОБРОВОЛЬСКИЙ, к. т. н. В. В. РЮХТИН,
И. С. РОМАНЮК

Дата поступления в редакцию
10.09 1998 г.
Оппоненты д. ф.-м. н. З. Д. КОВАЛЮК,
д. ф.-м. н. В. Б. ЯРЖЕМБИЦКИЙ

Украина, г. Черновцы, ЦКБ «Ритм», Гос. ун-т им. Ю. Федьковича

ОПТИМИЗАЦИЯ НАДЕЖНОСТИ КРЕМНИЕВЫХ $p-i-n$ -ФОТОДИОДОВ ПО ТЕМНОВОМУ ТОКУ

Предложены технические решения, обеспечивающие низкий уровень темновых токов и высокую надежность кремниевых $p-i-n$ -фотодиодов.

The engineering decision which provides low level of dark currents and high reliability of silicon $p-i-n$ -photocells have been proposed.

Фотодиоды на основе кремния, в частности $p-i-n$ -фотодиоды, используются в качестве датчиков излучения ближней инфракрасной области (0,6...1,1 мкм). Поскольку излучатели на длину волны 0,8–1,0 мкм (что соответствует максимуму спектральной характеристики кремния) существенно дешевле, чем с большей длиной волны, интерес к кремниевым фотодиодам не только сохраняется, но и растет.

Проблема повышения надежности фотодиодов непосредственно связана с увеличением длительности их работы. Одним из основных факторов, оказывающих влияние на надежность приборов, является величина темнового тока. Уменьшение исходного значения темнового тока и, таким образом, улучшение пороговых характеристик является одной из основных задач при разработке и изготовлении фотоприемников.

Для изготовления инфракрасных $p-i-n$ -фотодиодов на основе кремния в силу ряда причин (в основном, из-за сложности технологии получения высокоомного кремния n -типа) применяется высокоомный кремний p -типа проводимости с удельным сопротивлением от единиц до десятков кОм с концентрацией неосновных носителей заряда на уровне $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Рабочее напряжение при этом составляет от нескольких десятков до сотен вольт, что позволяет расширить область пространственного заряда (W_i) на глубину поглощения принимаемого излучения (более высокое напряжение ведет к увеличению быстродействия). W_i , как известно [1], определяется соотношением

$$W_i = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0 (U_{bi} - U)}{qN_a}},$$

где ε_s — диэлектрическая проницаемость кремния;
 ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума;
 q — заряд электрона;
 U_{bi} — высота потенциального барьера;
 U — рабочее напряжение;
 N_a — концентрация примеси.

Оптимальной является конструкция фотодиода, в которой толщина кристалла равна глубине поглощения принимаемого излучения [1, с. 354]. Для прибора, работающего на длине волны 1,06 мкм, эта величина составляет около 1 мм. Обычно для обеспечения максимального сбора фотогенерированных носителей тока в кристаллах, работающих на длине волны 1,06 мкм, используется двойной ход лучей. Это означает, что при толщине кристалла 500 мкм оптическое излучение, проникая через $p-n$ -переход, достигает металлического контакта с тыльной стороны и, отражаясь от него, вновь достигает $p-n$ -перехода. Напряжение подбирается таким образом, чтобы W_i было равно толщине кристалла. Таким образом, достигается увеличение чувствительности фотодиода на указанной длине волны.

При вырезании сформированного кристалла из кремниевой пластины образуются (вследствие механических нарушений кристаллической структуры) центры, генерирующие носители тока при темновом режиме работы фотодиода. Это увеличивает диффузионную и генерационную составляющие темнового тока. Кроме того, наличие инверсионных слоев на границе раздела «кремний — окись кремния» приводит к возникновению поверхностных токов утечки. С другой стороны, это способствует «затягиванию» генерированных носителей тока из торцевой части кристалла в область выхода $p-n$ -перехода на его поверхность.

Для уменьшения диффузионной составляющей темнового тока с тыльной стороны кремниевого кристалла *формируется слой p^+ -типа проводимости* толщиной до 9 мкм [2]. Предлагаемая глубина залегания обеспечивает локализацию активных генерационных центров в тыльной стороне пластины [3], что способствует уменьшению удельного значения темнового тока. Указанная толщина слоя достигается определенной последовательностью технологических операций, длительность которых в общем не превышает длительности обычного технологического процесса.

Для защиты фоточувствительного элемента от поверхностных токов утечки, генерируемых периферией кристалла, вокруг него *сформировано охранное кольцо*. Оно изотипно с фоточувствительным элементом и выполняет такую же роль. В свою очередь для защиты охранного кольца формируется область ограничения каналов утечки того же типа проводимости, что и подложка. При этом удаленность указанной области от охранного кольца составляет величину не меньше отношения рабочего напряжения к напряженности пробоя, а именно — 17 мкм [4].

Защиту фоточувствительного элемента от токов утечки, генерируемых на поверхности на границе раздела «кремний — окись кремния», обеспечивает *изоляция контакта* областью того же типа проводимости, что и область, ограниченная $p-n$ -переходом (базовая область) [5].

Очевидно, что для локализации генерационных центров, находящихся на торцевой части кристалла, необходимо торцы кристалла легировать бором, создавая область p -типа проводимости. Однако до настоящего времени технологическое решение такой задачи методами диффузионной технологии не представлялось возможным. Частично проблема решается путем формирования узких углублений с лицевой стороны кристалла с последующей диффузией примеси в них и разделением на отдельные кристаллы путем ломки [6]. При таком способе изолируется не вся генерирующая поверхность, а лишь ее часть, пусть и большая. Кроме того, наличие глубоких прорезей на лицевой стороне кремниевой пластины резко ухудшает ее механическую прочность.

Кристаллы, изготавливаемые из пластин кремния диаметром 25 мм, имеют размеры (18...20)×(18...20) мм. Это позволяет проводить с ними все необходимые технологические операции по формированию фотодиодов.

Для фотодиодов указанного типа авторами предложена следующая технология изоляции всей торцевой поверхности кристалла.

Кремниевые пластины с удельным сопротивлением $\rho > 10$ кОм после резки (формирования габаритных размеров кристалла фотодиода) подвергаются азотно-перекисной, аммиачно-перекисной отмывкам и химико-динамической полировке в растворе $(\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH}:\text{HF}) = (2:9:4)$. Затем на пластинах при температуре 1423 К в течение 20 мин выращивается слой окиси кремния толщиной 0,26 мкм. После защиты лицевой стороны пластины лаком ХВ-784 с ее тыльной и торцевых сторон с помощью фтористоводородной кислоты стравливается слой окиси кремния. После удаления лака и проведения аммиачно-перекисной и азотно-перекисной отмывок проводится диффузия бора при температуре 1223 К в течение часа. Источником бора служат диски, напыленные борным ангидридом. После стравливания окиси кремния и боросиликатного стекла во фтористоводородной кислоте и проведения аммиачно-перекисной и азотно-перекисной отмывок пластины окисляются в атмосфере сухого и влажного кислорода при температу-

ре 1423 К в течение 3 ч. Затем проводится операция фотолитографии с защитой обратной и торцевых сторон лаком ХВ-784. Диффузия фосфора проводится при температуре 1323 К. В качестве источника фосфора используются POCl_3 , PCl_4 . После защиты лицевой стороны лаком ХВ-784 проводят стравливание окиси кремния с тыльной и торцевых сторон во фтористоводородной кислоте. Удалив лак с лицевой стороны и проведя аммиачно-перекисную и азотно-перекисную отмывки, на пластинах еще раз проводится диффузия бора при температуре 1223 К в течение 1 ч. Металлические контакты формируют путем напыления золота с подслоем хрома.

Совмещение габаритных размеров кристалла с топологией его лицевой стороны — стороны фоточувствительного элемента — производится с помощью способа обратной фотолитографии [7]. Способ заключается в совмещении габаритных линий кристалла с метками фотомаски для последующих технологических операций. При этом соблюдается точность совмещения до 2 мкм, что удовлетворяет требованиям к операциям совмещения и экспонирования при изготовлении $p-i-n$ -фотодиодов на кремнии.

Кристалл $p-i-n$ -фотодиода (рис. 1) формировался на кремниевой подложке p -типа проводимости марки БДМ И1 (ТУ48-4-363—88). Рабочая длина волны — 1,06 мкм. Толщина кремниевой пластины 1 составляла 500 мкм. Фоточувствительный элемент 2 и охранное кольцо 3 формировались диффузией фосфора в кремниевую пластину с лицевой стороны через маску окисла кремния 4. При этом в области фоточувствительного элемента формировался слой защитного и просветляющего

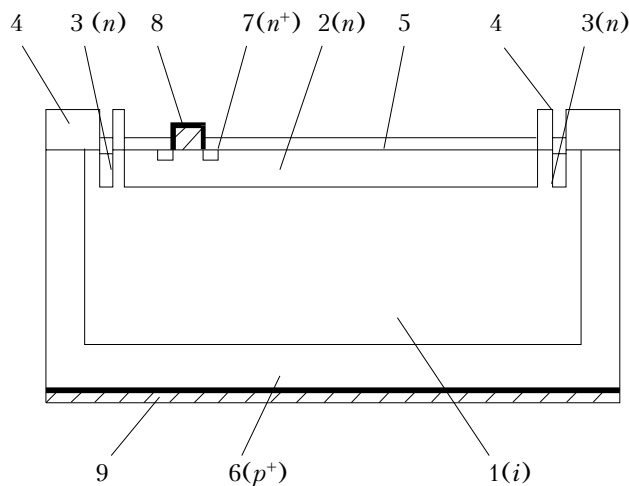


Рис. 1. Схематический разрез кристалла $p-i-n$ -фотодиода

окисла 5, необходимая толщина которого формировалась во время разгонки фосфора. Для обеспечения омического контакта с тыльной стороны подложки и для изолирования торцевой стороны кристалла от рабочего объема сформирована область 6 p^+ -типа проводимости с глубиной залегания около 9 мкм. Слой 7 — область n -типа проводимости — обеспечивает защиту охранного кольца фоточувствительного элемента. Контакты к кристаллу фотодиода с лицевой 8 и тыльной 9 сторон выполнены методом вакуумного напыления слоя золота тол-

щиной 0,6 и 1 мкм, соответственно, с подслоем хрома толщиной менее 0,1 мкм.

Были определены удельные значения темнового тока фоточувствительных элементов изготовленной партии фотодиодов (28 шт.). При 300 К они составили 0,024–0,06 мкА, среднее удельное значение тока – 0,036 мкА. Для серийно выпускаемых фотодиодов ФДК-142-01 темновой ток по техническим условиям (АДБЗ.368.227 ТУ) может достигать 10 мкА при 300 К и площади фоточувствительного элемента ~0,5 см², что соответствует 20 мкА удельного значения темнового тока. Для 48 фотодиодов ФДК-142-01, изготовленных по серийной технологии, было получено 0,6–16 мкА со средним удельным значением 0,9 мкА.

Кроме низкого значения темнового тока, предлагаемые технологические и конструктивные решения для *p-i-n*-фотодиодов обеспечивают более высокий (47%) выход годных изделий по сравнению с серийными (25,4%).

Проводились испытания на наработку в условиях повышенной рабочей температуры (358 К) в течение 1000 ч при освещенности от 1000 до 10000 лк. Темновой ток в процессе испытаний измерялся при нормальных условиях через 125, 250, 500 и 1000 ч наработки.

Усредненные зависимости темнового тока от времени наработки (τ) для контрольной партии серийных (1) и разработанных (2) фотодиодов, имеющих аналогичную топологию, приведены на **рис. 2**. Изменение технологии не приводит к изменению значений токовой монохроматической чувствительности и характеристик инерционности в пределах точности измерений.

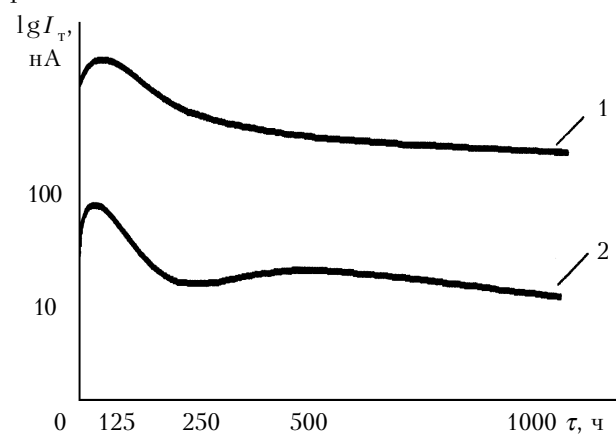


Рис. 2

Результаты испытаний показывают, что предложенные технические решения обеспечивают большую устойчивость *p-i-n*-фотодиодов в процессе работы по сравнению с серийными. Полученные результаты подтверждают наше предположение о том, что на величину генерационного тока существенное влияние оказывают торцевые (боковые) поверхности кристалла фотодиода, которые являются источниками генерационных центров. Анали-

зируя удельные значения темнового тока серийных фотодиодов и фотодиодов, изготовленных по предложенной технологии, можно допустить, что влияние этих центров приводит к увеличению темнового тока как минимум на полтора порядка.

Одним из очевидных методов снижения темнового тока фотодиодов является их *охлаждение*, т. к. зависимость тока от температуры приближенно определяется с помощью соотношения

$$I \sim \exp(-E_g/kT),$$

где E_g – ширина запрещенной зоны;

k – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура.

Для охлаждения кристаллов кремниевых *p-i-n*-фотодиодов был применен трехкаскадный термоэлектрический охладитель (ТЭО) на основе теллурида висмута [8].

В режиме термостабилизации (потребляемая мощность 1,1 Вт) температуру кристаллов фотодиодов удалось понизить до 213 К. При этом средние значения темнового тока фотодиодов ФДК-142-01 составили менее 0,25 мкА, а у разработанных фотодиодов – менее 0,01 мкА.

Результаты измерений показывают, что параметры серийных *p-i-n*-фотодиодов, полученные с применением ТЭО, примерно соответствуют параметрам фотодиодов, изготовленных с учетом предложенных технических решений. Это, по нашему мнению, говорит о том, что разработанный конструктивно-технологический метод способствует снижению генерационной составляющей темнового тока, поскольку она в большей мере, чем другие, зависит от температуры.

Величину темнового тока кремниевых фотодиодов в некоторых случаях [9] удается уменьшить до 30% путем *обработки готового прибора или его кристалла комбинацией неоднородного магнитного поля*, сориентированного некоторым образом относительно постоянного электрического поля. (В литературе такие поля называют торсионными или спинарными, обусловленными фазовыми состояниями физического вакуума [10]. Под изменением фазового состояния подразумевается спиновая поляризация фитонов, составляющих пространственную структуру. Инверсия спинов в процессе воздействия осуществляется у всех фитонов в окружающем пространстве одновременно и в дальнейшем удерживается в этом состоянии стационарно, т. е. воздействие фиксируется подобно стоячей волне с определенной структурой.)

В рассматриваемом в [9] случае напряженность электрического поля составляла 50–1500 В/см, а неоднородное магнитное поле имело тороидальную форму. Судя по вольт-амперным характеристикам, снимаемым с фотодиода в процессе обработки, время эффективного воздействия в описанных условиях составляет несколько минут, хотя длительность воздействия достигала от десятков минут до не-

скольких часов. Полученные результаты стабильны во времени. Более того, «плавущие» параметры некоторых фотодиодов стабилизировались после обработки.

Описанный метод коррекции темнового тока был применен к $p-i-n$ -фотодиодам на основе кремния. Темновой ток уменьшился в первые несколько минут обработки. Однако степень снижения тока зависит от рабочего напряжения. Приборы, работающие при напряжении свыше 100 В, показали уменьшение темнового тока не более чем на 20%, а работающие при напряжении 30–50 В — до 30%. Достигнутые параметры стабильны во времени. Очевидно, что с повышением рабочего напряжения структура кристалла фотодиода на основе кремния становится менее подверженной влиянию торсионного поля с приведенными выше параметрами.

Разработанная конструкция $p-i-n$ -фотодиодов характеризуется повышенной технологичностью изготовления с одновременным улучшением параметров, в частности, темнового тока и процента выхода годных. Кроме того, эти фотодиоды характеризуются большей надежностью и устойчивостью при работе в условиях повышенной рабочей температуры.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Зи. С. Физика полупроводниковых приборов: Т. 2. — М.: Мир, 1984.
2. Ащеулов А. А., Годованюк В. М., Добровольский Ю. Г. Технологичный метод зменшення темнового струму кремнієвих $p-i-n$ -фотодіодів // Науковий віс-

ник Чернівецького університету. Фізика. — 1998. — Вип. 32. — С. 136.

3. Рюхтин В. В., Товстюк К. Д., Данилевич О. И. Генезис дислокаций в кремниевых фотодиодах // Оптоэлектроника и ее применение. — 1985. — Вып. 7. — С. 21–24.

4. Годованюк В. М., Добровольский Ю. Г., Омелянчук В. П. Дослідження кремнієвого $p-i-n$ -фотодіоду підвищеної надійності // Науковий вісник Чернівецького університету. Фізика. — 1998. — Вип. 29. — С. 170–172.

5. Ascheulov A. A., Dobrovolskiy U. G., Godovanjuk V. N. Optimization of epitaxial structures parameters for radiational stability of photodiodes, on their base // Physical problems in material science of semiconductors. Book of abstracts: Chernovtsy. — 1997. — P. 317.

6. Пат. 2 095 897 Великобритании. Semiconductor manufacture / T. Smith. — Оpubл. в ИЗР, 1981, № 4.

7. А. с. 1720438 СССР. Способ получения топологического рисунка на обратной стороне полупроводниковой пластины, совмещенного с рисунком на ее лицевой стороне / Ю. Г. Добровольский. — Оpubл. в Б. И., 1990, № 7.

8. Романюк И.С. О возможности получения монокристаллического теллурида висмута / Электроника и связь. — Киев: КПИ. — 1998. — Вып. 4, ч. 3. — С. 442.

9. Ащеулов А. А., Добровольский Ю. Г., Романюк И.С. Дослідження впливу певних комбінацій електричного та магнітного полів на властивості напівпровідникових приладів // Науковий вісник Чернівецького університету. Фізика. — 1998. — Вип. 29. — С. 174.

10. Акимов А. Е., Бойчук В. В., Тарасенко В.Я. Дальнедействующие спиновые поля // Физические модели. — Киев: ИПМ, 1989. (Препринт № 4.)



планар

КБТЭМ-ОМО

НАУЧНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ЦЕНТРЫ СНГ

ГНПП «КБТЭМ-ОМО»

Республика Беларусь, 220763, г. Минск, пр. Партизанский, 2

УСТАНОВКА РЕМОНТА ТОПОЛОГИИ НА ФОТОШАБЛОНАХ ЭМ-5001АМ

Предназначена для ремонта и устранения дефектов фотошаблонов, используемых в производстве ИС, ГИС и полупроводниковых приборов.

Устранение *непрозрачных* дефектов осуществляется путем воздействия сфокусированного лазерного излучения на маскирующее покрытие фотошаблона, устранение *прозрачных* дефектов — путем лазерно-стимулированного осаждения металлоорганического соединения.



Максимальные размеры рабочего поля	153×153 мм
Размеры устраняемых дефектов	
<i>прозрачных</i>	Ø2...25 мкм
<i>непрозрачных</i>	от 1×1 до 25×25 мкм
Типоразмеры шаблонов	3×3" (76×76 мм) 4×4" (102×102 мм) 5×5" (127×127 мм) 6×6" (153×153 мм) 7×7" (178×178 мм)
Габаритные размеры, масса	
оптико-механическое устройство	1440×1320×1400 мм, 1300 кг
стойка питания лазеров	684×632×1625 мм, 250 кг
стойка управления	570×800×1800 мм, 250 кг