

УДК 535.247

О возможности повышения рабочей температуры и улучшения параметров пороговых фотодиодов из антимонида индия

В. П. Астахов, Г. С. Соловьёва, А. В. Артамонов

Исследованы температурные зависимости темновых токов и параметров пороговых фотодиодов на основе «низкоомных» и «высокоомных» кристаллов антимонида индия. Обнаружена смена механизма протекания темнового тока при температуре вблизи 90 К. Показаны и обоснованы преимущества пороговых фотодиодов на основе «низкоомных» кристаллов.

PACS: 85.60.-q

Ключевые слова: пороговый фотодиод, антимонид индия, рабочая температура, температурные зависимости параметров.

Введение

Рабочей температурой пороговых фотодиодов (ФД) из антимонида индия является температура в диапазоне 80 ± 2 К. При этом в ряде случаев к ФД предъявляются такие специфические требования по температурным режимам, как достижение рабочей температуры в течение 2—5 секунд, обеспечение рабочего состояния в течение десятков секунд при отключённой системе охлаждения, длительные (сотни и тысячи часов) наработки при отсутствии возможности отвода избыточного тепла и пониженных энергопотреблениях системы охлаждения. Всё это свидетельствует об особой актуальности решения задачи повышения рабочей температуры ФД.

Решению указанной задачи, безусловно, способствует определение принципиальных возможностей повышения рабочей температуры фоточувствительного кристалла при сохранении его пороговых параметров, определяемых отношением сигнал/шум. При этом повышение рабочей температуры даже на 1 К может заметно снизить требования к системе охлаждения и повысить надёжность ФД.

Серийная базовая технология изготовления планарных фотодиодов из антимонида индия основана на формировании p^+n -переходов в кристаллах n -типа проводимости локальной имплантацией ионов бериллия и последующим отжигом с

капсулирующей плёнкой. Защита поверхности осуществляется в две стадии: анодное окисление и последующее нанесение плёнки SiO_x . Характеристики ФД, изготовленных по этой технологии, представлены в периодической литературе [1, 2], и они относятся к ФД, изготавливаемым в серийном производстве из кристаллов сравнительно высокоомных марок ИСЭ-2в, ИСЭ-2, ИСЭ-2у с концентрацией легирующих атомов теллура $(0,2 \div 3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Применение более высокоомных исходных кристаллов марки ИСЭ-0 или ИСЭ-1 с концентрацией теллура $10^{13} \div 10^{14} \text{ см}^{-3}$, как и ожидалось авторами работы [3], привело к повышению токовой чувствительности ФД за счёт увеличения диффузионной длины неосновных носителей заряда вблизи p^+n -перехода. При этом, вопреки ожиданиям, не улучшились пороговые характеристики из-за увеличения уровня шумов пропорционально возросшему уровню сигналов. Это свидетельствует о возросшем уровне темновых токов при рабочем напряжении ФД (минус $10 \div 50$ мВ) за счёт возросших поверхностных утечек.

На основании изложенного можно предположить, что при переходе к более низкоомным исходным кристаллам (по сравнению с кристаллами марки ИСЭ-2) вместе с сигналами уменьшатся и темновые токи, обусловленные утечками по поверхности базы, однако при этом не исключена возможность увеличения отношения сигнал/шум. Из этого следует, что целесообразно опробовать в качестве исходного материала для изготовления ФД из антимонида индия кристаллы n -типа проводимости с концентрацией примесных атомов более $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, когда должно уменьшиться влияние поверхности и, следовательно, можно ожидать уменьшение токов утечки. Кроме того, если судить по модельному материалу — кремнию, то повышение уровня легирования базы может при-

Астахов Владимир Петрович, главный специалист.
Соловьёва Галина Сергеевна, ведущий инженер-технолог.
Артамонов Антон Вячеславович, инженер.
АО «Швабе-Фотосистемы».
Россия, 117545, Москва, Днепропетровский пр., 4а.
Тел. (495) 315-73-68. E-mail: ko-ckb@mail.ru

Статья поступила в редакцию 5 августа 2015 г.

© Астахов В. П., Соловьёва Г. С., Артамонов А. В., 2015

вести к повышению предельной рабочей температуры ФД.

Целью данной работы является проверка высказанных предположений путем исследования температурной зависимости темновых токов и пороговых параметров фотодиодов на основе «низкоомных» и «высокоомных» кристаллов антимонида индия

Методики проведения экспериментов и измерений

В рамках данной работы по серийной имплантационной технологии ОАО «Швабе-Фотосистемы» изготовлены в едином производственном цикле две партии 64-элементных линеек ФД с размерами площадок 150×150 мкм. Одна — экспериментальная — на исходных кристаллах с концентрацией теллура $(5 \div 8) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (условно такой материал отнесён к марке ИСЭ-3), и вторая — контрольная — на исходных кристаллах марки ИСЭ-2в. После капсулирования линеек на отдельных ФД обеих партий измеряли прямые и обратные ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ), токовую чувствительность и фоновые токи при $T = 77 \text{ К}$, а также температурные зависимости обратных токов.

Далее ФД обеих партий последовательно стыковали с одной и той же группой усилителей на основе микросхемы 744 УД и измеряли напряжения сигнала U_c от АЧТ (100 °С, 800 Гц, 180 Гц) и шума $U_{ш}$ в полосе частот 180 Гц при фиксированных температурах в диапазоне $77 \div 140 \text{ К}$. Производили также измерения порога чувствительности при температуре 77 К ФД, изготовленных в серийном производстве на основе кристаллов марок ИСЭ-0, ИСЭ-1, ИСЭ-2в. Все измерения выполняли в соответствии с ГОСТ 17772-88.

Экспериментальные результаты

Из результатов измерений при $T = 77 \text{ К}$ следует, что при переходе от исходного материала ИСЭ-2в к ИСЭ-3 проявляются следующие особенности ВАХ:

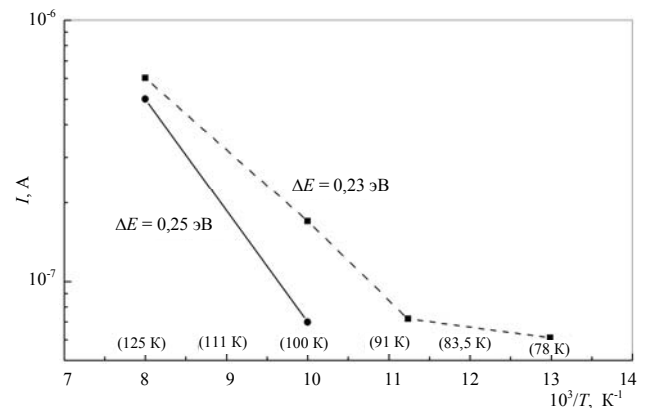
- пробивное напряжение снижается от $\sim 4 \text{ В}$ до $0,6 \text{ В}$, что соответствует имеющему место увеличению концентрации теллура в базе в ~ 50 раз;

- исчезает эффект «электротренировки» — сдвиг напряжения «загиба» на обратной ветви ВАХ в сторону больших напряжений за счёт возрастающего напряжения смещения, прикладываемого к $p^+ - n$ -переходу при измерении; данный эффект обусловлен компенсацией положительного поверхностного заряда электронами, инжектированными в защитный диэлектрик над поверхностью n -базы полем $p^+ - n$ -перехода, и в серийных приборах он увеличивает пробивное напряжение

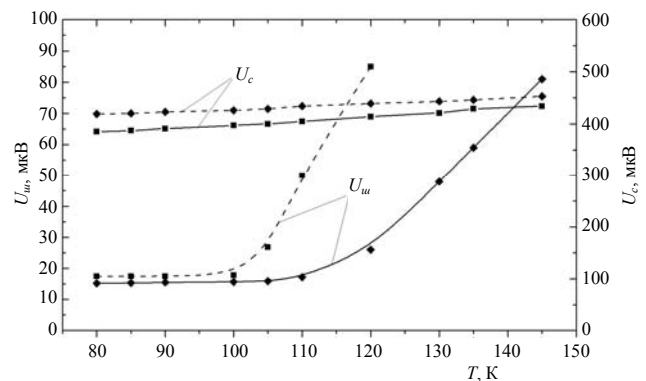
от $\sim 4 \text{ В}$ до $\sim 5 \text{ В}$, а в случае использования исходных кристаллов марки ИСЭ-0 и ИСЭ-1 — до $9 \div 12 \text{ В}$ [3].

В остальном при переходе от «высокоомного» к «низкоомному» материалу ВАХ при $T = 77 \text{ К}$ не изменяются следующие параметры: коэффициент неидеальности и напряжение отсечки, определяемые из прямой ветви, причем они составляют соответственно $\sim 1,7$ и $0,12 \div 0,14 \text{ В}$. Показатель степени n обратной ветви ВАХ, аппроксимируемой зависимостью вида $I \sim U^n$, равен $\sim 0,68$.

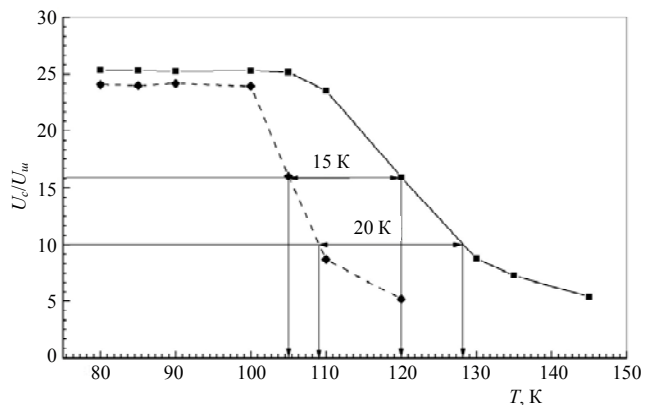
На рис. 1, а представлены температурные зависимости обратных токов ФД экспериментальной и контрольной партий.



а



б



в

Рис. 1. Температурные зависимости темнового тока (а), U_c и $U_{ш}$ (б) и отношения $U_c/U_{ш}$ (в) для ФД, изготовленных из кристаллов марки ИСЭ-3 (сплошные линии) и ИСЭ-2в (пунктирные линии)

Из данных рисунка следует, что в обоих случаях при температурах выше 90÷100 К энергия активации темнового тока соответствует ширине запрещенной зоны антимонида индия и, следовательно, при этих температурах темновой ток обусловлен генерацией зона—зона.

На рис. 1, б для ФД обеих партий представлены температурные зависимости величин U_c и $U_{ш}$. Из рисунка видно, что в исследованном диапазоне температур для ФД обеих партий сигнал незначительно и почти линейно возрастает с увеличением температуры. В то же время напряжение шума является минимальным и практически не возрастает в диапазоне температур 80—100 К, а затем очень резко начинает возрастать при температуре ~ 100 К для контрольных кристаллов и при температуре ~ 110 К для экспериментальных кристаллов. При этом крутизна роста шума для экспериментальных кристаллов значительно меньше, чем для контрольных. Эти данные представлены также на рис. 1, в в виде зависимости отношения сигнал/шум от температуры ФД. Из данных рис. 1, в следует, что с уменьшением значений отношения сигнал/шум разница температур охлаждения возрастает в пользу экспериментальных ФД и при значениях $U_c/U_{ш} = 16$ и 10 эта разница составляет соответственно 15 и 20 К.

Обсуждение результатов

Представленные результаты свидетельствуют о принципиальной возможности повышения рабочей температуры пороговых ФД из антимонида индия, которую можно объяснить на основе температурной зависимости темнового тока ФД (рис. 1, а) следующим образом.

Как известно, при температурах вблизи 77 К обратная ветвь ВАХ $p^+ - n$ -перехода на антимониде индия определяется теорией Шокли-Нойса-Саа [4] в соответствии с формулой:

$$j = \frac{e \cdot n_i \cdot W}{\tau}, \quad (1)$$

где j — плотность обратного (темнового) тока, e — элементарный заряд, n_i — концентрация носителей заряда в собственном антимониде индия, W — ширина области пространственного заряда (ОПЗ) $p^+ - n$ -перехода, τ — время жизни носителей заряда в этой ОПЗ. При этом температурная зависимость темнового тока определяется температурной зависимостью величины n_i :

$$n_i \sim T^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}}, \quad (2)$$

откуда следует, что при температурах вблизи 77 К энергия активации темнового тока составляет ве-

личину, равную $E_g/2$, т. е. ~ 0,125 эВ. В этом случае возможность снижения уровня темнового тока и, следовательно, уровня шумов связана только с увеличением величины τ , которая определяется уровнем технологии формирования металлургической границы $p^+ - n$ -перехода.

Согласно данным рис. 1, а, при температурах выше 90 К энергия активации темнового тока ФД соответствует E_g . Это означает, что при данном условии температурная зависимость обратного тока ФД соответствует температурной зависимости n_i^2 , откуда следует, что величина обратного тока определяется диффузионной теорией и формулой:

$$j = e \cdot n_i^2 \cdot \frac{D_p}{L_p \cdot n_n} \cdot \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right), \quad (3)$$

где D_p и L_p — соответственно коэффициент диффузии и диффузионная длина дырок в базе, n_n — концентрация основных носителей заряда в базе, V — приложенное напряжение.

Из формулы (3) и данных рис. 1 следует, что снижения уровня темнового тока ФД при повышенных температурах можно достигнуть, увеличивая степень легирования базы, определяющего величину n_n .

При переходе от «высокоомного» материала серийной технологии к «низкоомному» выявились также следующие характерные особенности при $T = 80 \pm 2$ К:

- токовая чувствительность снизилась от 0,16÷0,18 А/Вт до 0,13÷0,15 А/Вт, а фоновые токи — от 0,17 до 0,14 мкА, т. е. на ~ 15 %, и при этом смещения спектральной зависимости чувствительности не произошло; в совокупности эти результаты соответствуют уменьшению времени жизни дырок в базе из-за бóльшей степени легирования исходных кристаллов, вследствие чего упала квантовая эффективность на всей глубине области генерации фотоносителей;

- напряжение шума снизилось на ~ 25 %, что свидетельствует о снижении уровня поверхностных утечек в ~ 1,8 раза;

- за счёт изменения величин указанных параметров улучшился порог чувствительности ФД, о чём свидетельствуют данные гистограмм, представленных на рис. 2, т. е. возросла ценность ФД как порогового прибора.

В целом очевиден положительный результат от применения исходных кристаллов с повышенным уровнем легирования, и он связан с переходом к иному механизму протекания тока через $p - n$ -переход при повышенных температурах и значительным уменьшением или полным устранением поверхностных утечек при температурах

вблизи 80 К. Последнее с избытком компенсирует потерю токовой чувствительности, вызванную меньшими величинами времени жизни носителей заряда в этих кристаллах, за счёт более значительного снижения уровня темновых токов, проявляющегося в снижении уровня шумов.

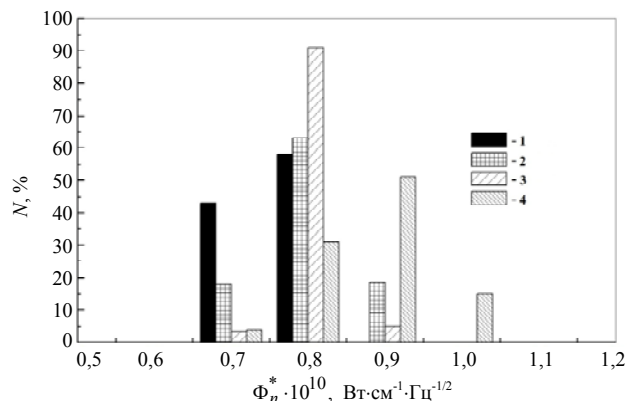


Рис. 2. Гистограммы значений порога чувствительности ФД из «низкоомных» (ИСЭ-3) и «высокоомных» (ИСЭ-0, ИСЭ-1, ИСЭ-2в) кристаллов: 1 — ИСЭ-3; 2 — ИСЭ-2; 3 — ИСЭ-1; 4 — ИСЭ-0

Заключение

При температурах выше 90 К ВАХ ФД из антимонида индия соответствуют диффузионной теории выпрямления. Из этого следует, что при повышенных температурах снижение уровня тем-

новых токов и, как следствие, уровня шумов может быть достигнуто за счёт применения исходных кристаллов с повышенным уровнем легирования.

Повышение уровня легирования исходных кристаллов антимонида индия от $(0,2\div 3)\cdot 10^{15}$ см⁻³ до $(5\div 8)\cdot 10^{15}$ см⁻³ позволяет:

- значительно снизить или полностью устранить поверхностные токи утечки при рабочих температурах вблизи 80 К и за счёт этого улучшить основной параметр пороговых фотодиодов;
- повысить рабочую температуру пороговых ФД на 15 К, а при уменьшении отношения сигнал/шум повысить рабочую температуру в ещё большей мере.

Авторы выражают благодарность Л. К. Мануйловой за изготовление фотодиодных кристаллов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астахов В. П., Гиндин Д. А., Карпов В. В. и др. // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 73.
2. Астахов В. П., Гиндин Д. А., Карпов В. В. и др. // Прикладная физика. 2002. № 1. С. 56.
3. Астахов В. П., Гиндин Д. А., Карпов В. В. и др. // Прикладная физика. 2003. № 3. С. 68.
4. Шокли В., Нойс Р., Саа К. // Успехи физических наук. 1962. Т. 77. Вып. 3. С. 327.

About possibility of increasing the operating temperature and improving the parameters for the threshold InSb photodiodes

V. P. Astakhov, G. S. Solovjova, and A. V. Artamonov

Shvabe-Fotosistemy
4a Dnepropetrovsky av., Moscow, 117545, Russia
E-mail: ko-ckb@mail.ru

Received August 5, 2015

Temperature dependences of a dark current and parameters of threshold photodiodes, based on low-resistance and high-resistance indium antimony chips, have been investigated. The dark current is revealed to change its flow mechanism at the 90 K temperature. Advantages of threshold photodiodes, based on low-resistance chips, are discussed and obtained.

PACS: 85.60.-q

Keywords: threshold photodiode, indium antimony, operating temperature, parameters, temperature dependences.

REFERENCES

1. V. P. Astakhov, D. A. Gindin, V. V. Karpov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 73 (1999).
2. V. P. Astakhov, D. A. Gindin, V. V. Karpov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 56 (2002).
3. V. P. Astakhov, D. A. Gindin, V. V. Karpov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 68 (2003).
4. V. Shockly, R. Nois, and K. Saa, *Phys. Usp.* 77, 327 (1962).