

Фотоэлектроника: элементная база и технология

УДК 535.247

Фотодиоды из антимонида индия с эффектом Мосса—Бурштейна на основе жидкофазных гомоэпитаксиальных структур

В. П. Астахов, В. В. Карпов, В. В. Крапухин, В. Ф. Чишко, А. А. Шлёнский

Изготовлены и исследованы 64-элементные линейки фотодиодов на жидкофазных гомоэпитаксиальных структурах антимонида индия типа n (пленка) — n^+ (подложка) по базовой имплантационной технологии ОАО «Московский завод "САПФИР"». Показана возможность применения таких фотодиодов с одинаковым успехом при облучении как со стороны эмиттера (p^+ -слоя), так и со стороны подложки.

PACS: 85.60.-q

Ключевые слова: фотодиод, антимонид индия, линейка, пленка, эпитаксия.

Введение

Для ряда применений, в частности, для формирования матричных фотоприемных устройств спектрального диапазона 3—5 мкм требуются планарные фотодиоды из антимонида индия, облучаемые со стороны базы. Поэтому толщина базы у таких фотодиодов должна соответствовать или быть меньше диффузионной длины неосновных носителей заряда, которая составляет не более 15—20 мкм для обычно применяемых монокристаллов n -типа проводимости марки ИСЭ-0, ИСЭ-1, ИСЭ-2.

Для изготовления таких фотодиодов целесообразно применять эпитаксиальные структуры с пленкой InSb на достаточно толстой и прочной подложке, прозрачной в спектральном диапазоне 3—5 мкм. Этому способствует наличие устойчивой базовой промышленной технологии изготовления планарных фотодиодов из антимонида индия с любыми размерами, количеством и расположе-

нием p^+ — n -переходов, использующей при этом локальную имплантацию ионов бериллия.

В настоящее время стало возможным получать совершенные тонкие монокристаллические пленки антимонида индия методом жидкофазной гомоэпитаксии, т. е. на подложке из антимонида индия. Такой технологией владеет ОАО "Гиредмет". В этом случае для обеспечения пропускания излучения с длинами волн поглощения InSb требуется использовать сильнолегированные подложки, реализующие эффект Мосса—Бурштейна. Считается [1], что наилучшим образом эффект обеспечивается при концентрациях донорных центров $\sim 10^{18}$ см⁻³. При этом эффективная запрещенная зона $E_{\text{эфф}}$ расширяется до необходимой величины, определяемой соотношением $\lambda_{01} = 1,24/E_{\text{эфф}}$ (где λ_{01} — требуемое значение левой границы спектральной полосы пропускания подложки), вырождение еще не наступает, а дефектность, обусловленная примесными центрами, еще не приводит к заметному широкополосному рассеянию излучения.

Цель данной работы — отработка технологии с использованием жидкофазной гомоэпитаксиальной структуры InSb.

Технология и результаты

В данной работе для формирования планарных p^+ — n -переходов использовались жидкофазные гомоэпитаксиальные структуры InSb n^+ — n -типа с пленкой, выращенной на стороне А (индиевая сторона) подложки с кристаллографической ориентацией (111). Концентрация теллура в подложке со-

Астахов Владимир Петрович, зам. начальника ЦКБ.
Карпов Владимир Владимирович, главный конструктор — начальник ЦКБ.

Крапухин Вячеслав Всеволодович, начальник отдела.

Чишко Владимир Федорович, начальник отдела.

ОАО «Московский завод "САПФИР"».

Россия, 117545, Москва, Днепропетровский пр., 4а.

Тел. 315-73-68. E-mail: ko-ckb@mail.ru

Шлёнский Алексей Александрович, зав. лабораторией.

ОАО "Гиредмет".

Россия, 119017, Москва, Б. Толмачевский пер., 5.

Статья поступила в редакцию 15 августа 2011 г.

© Астахов В. П., Карпов В. В., Крапухин В. В., Чишко В. Ф., Шлёнский А. А., 2012

ставляла $\sim 1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, в пленке — $(3\text{—}4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Толщина пленки $\sim 16 \text{ мкм}$, толщина подложки $\sim 350 \text{ мкм}$.

Поверхность подложки проходила стандартную химико-механическую обработку. Поверхность пленки имела в основном гладкий рельеф с локальными "наплывами" в виде ступеньки $0,3\text{—}0,5 \text{ мкм}$. Вместе с тем, на отдельных участках поверхности пленки наблюдаются дефекты протяженностью $\sim 10 \text{ мкм}$ с высотой рельефа $1\text{—}3 \text{ мкм}$ и с поверхностной плотностью $\sim 10 \text{ см}^{-2}$, а также единичные крупные дефекты протяженностью до 100 мкм с высотой рельефа $\sim 10 \text{ мкм}$.

Планарные p^+ — n -переходы размером $150 \times 150 \text{ мкм}$ в виде 64-элементной линейки с шагом 180 мкм создавались на поверхности пленки по серийной технологии ОАО «МЗ "САПФИР"», использующей локальную имплантацию ионов бериллия, последующий отжиг с капсулирующей пленкой SiO_2 в потоке смеси аргона с водородом, анодное окисление и нанесение пленки SiO_x для защиты поверхности, а также нанесение системы $\text{Cr}+\text{Au}$ для создания контактов к p^+ -областям и базе фотодиодов [2]. Несмотря на перепады высоты поверхности эпитаксиальной пленки при глубине залегания p^+ — n -перехода $\sim 0,8 \text{ мкм}$ и толщинах наносимых пленок SiO_x и Au , соответственно, $0,5$ и $0,8 \text{ мкм}$, получены линейки, в которых p^+ — n -переходы соответствуют требованиям по ВАХ и токовой чувствительности, предъявляемым к фотодиодам данного типа.

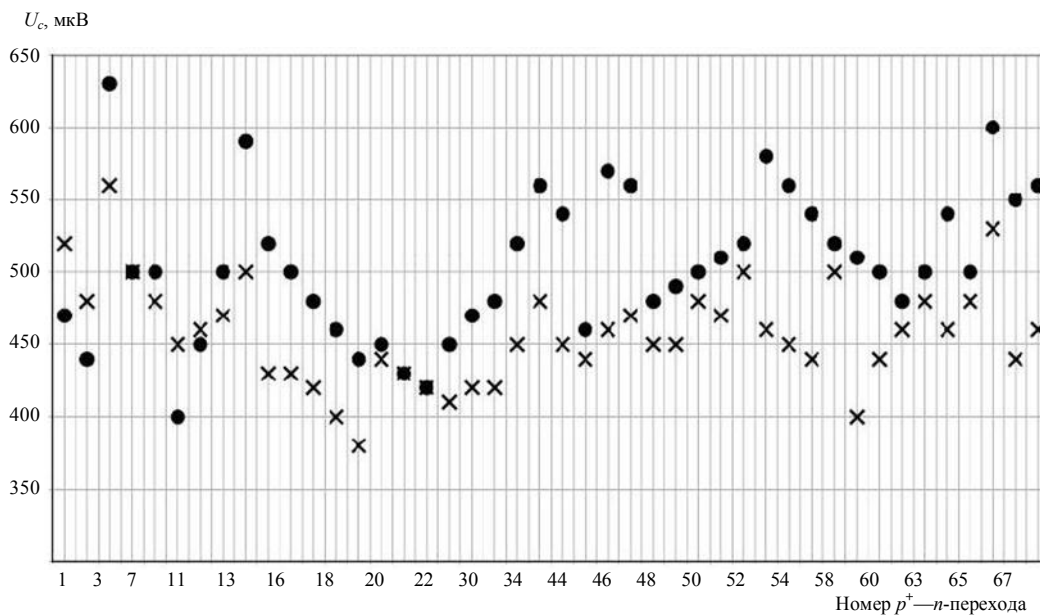
Линейки фотодиодов были собраны в капсулы, на элементах которых при заливке жидким азотом оценивался ряд характеристик, а именно, ВАХ, напряжение отсечки, дифференциальное сопротивление на начальном участке обратной ветви ВАХ и пробивное напряжение. Капсулы приклеивались на держатель либо традиционно, т. е. так, чтобы облучение производилось со стороны p^+ -слоя, либо в перевернутом виде, когда облучение производилось через подложку эпитаксиальной структуры. Затем производилась сборка с баллоном, герметизация фотодиода и его последующая стыковка с усилителями серийного фотоприемного устройства (ФПУ) типа ФУЛ-132-04. В собранных ФПУ по методикам ГОСТ 17788—88 при охлаждении дроссельным микроохладителем измерялись напряжения шума и сигнала p^+ — n -переходов от АЧТ с температурой 500 К (частота модуляции — 800 Гц , полоса — 150 Гц). В обоих случаях (при традиционно приклеенной и перевернутой капсулах) стыковка производилась с одной и той же

группой усилителей. Параллельно измерялись те же параметры на серийных ФПУ (с другими усилителями). Изменялись также спектральные характеристики p^+ — n -переходов как с фильтром из просветленного арсенида индия при температуре $T = 300 \text{ К}$ (как в ФПУ ФУЛ-132), так и без фильтра.

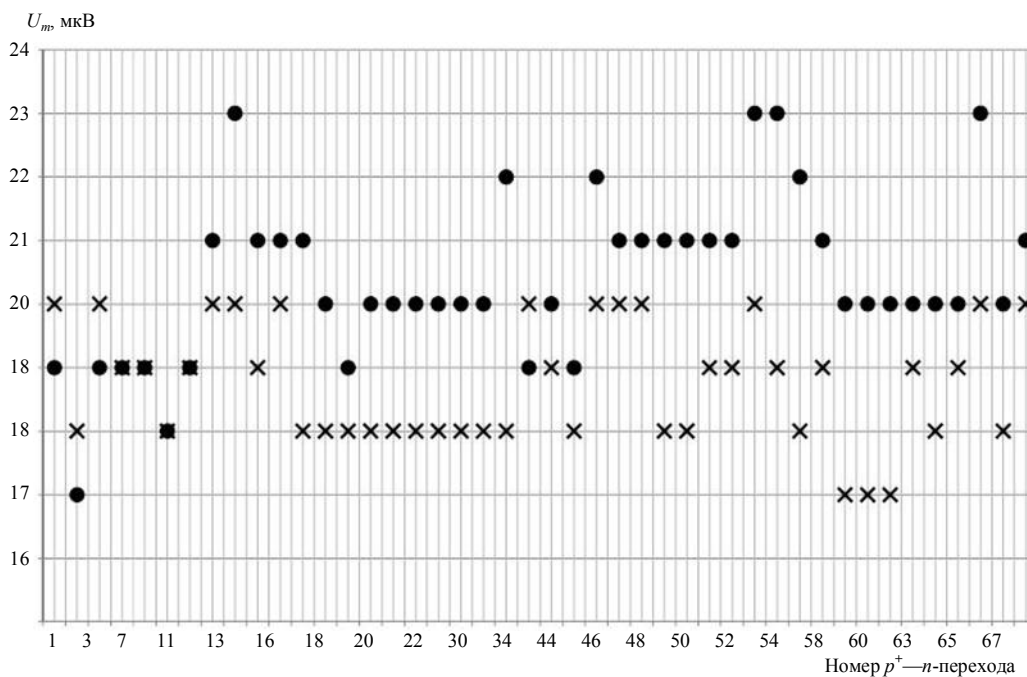
Результаты измерений ВАХ показали, что они идентичны ВАХ серийно производимых p^+ — n -переходов на кристаллах марки ИСЭ-2 с ориентацией (100). При этом напряжение отсечки составляет $\sim 0,12 \text{ В}$, дифференциальное сопротивление — более 10 мОм , пробивное напряжение — $1,5\text{—}3,5 \text{ В}$. Отличие заключается только в том, что измеряемые на экспериментальных линейках пробивные напряжения не требуют для их определения электротренировки, как на серийных образцах, когда требуется медленное увеличение обратного смещения, чтобы "загиб" ВАХ успел сместиться до предельного значения. Это свидетельствует о наличии отрицательного встроенного заряда на поверхности экспериментальных p^+ — n -переходов, что противоположно положительному встроенному заряду в случае серийных линеек. В этом сказывается отличие кристаллографической ориентации поверхности исходного материала.

На рис. 1, *a* и *б* представлены значения напряжений сигнала и шума для p^+ — n -переходов экспериментальных линеек, облучаемых либо через фильтр и p^+ -слой, либо без фильтра через подложку. Из рисунков следует, что при обоих вариантах облучения отличие величин каждого из параметров не превышает $6\text{—}7 \%$. Несколько большие сигналы и большие шумы свойственны облучению через фильтр и p^+ -слой при почти одинаковом их отношении для обоих вариантов. Значения пороговой чувствительности в максимуме спектральной характеристики в обоих случаях колеблются в интервале $P_{\lambda \text{ max}} = (0,8\text{—}0,9) \cdot 10^{-11} \text{ Вт}$, что соответствует среднему уровню этого параметра для серийных приборов.

На рис. 2 представлены спектральные характеристики токовой чувствительности также для обоих вариантов облучения. Из рисунка следует, что характеристика при облучении через фильтр и p^+ -слой полностью идентична характеристике при облучении через подложку. Из этого следует, что спектральная характеристика пропускания выбранной подложки соответствует спектральной характеристике пропускания просветленного неохлажденного арсенида индия, который в большинстве приборов из антимионида индия используется как основа для фильтров.



a



б

Рис. 1. Распределение напряжений сигнала U_c (а) и шума U_m (б) по p^+ - n -переходам экспериментальной линейки:

× — облучение через подложку без фильтра; • — облучение через фильтр и p^+ -слой

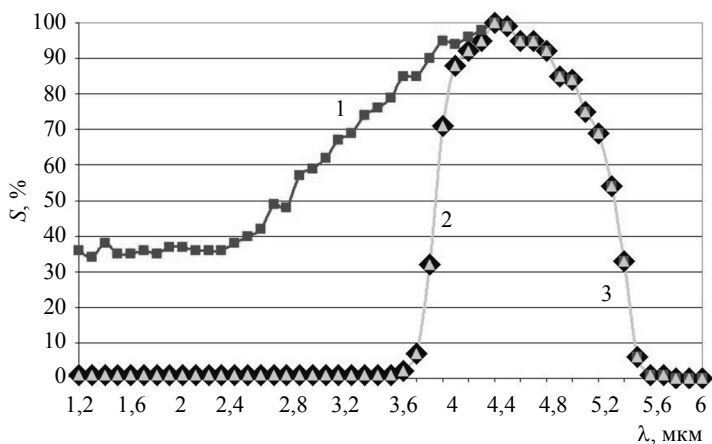


Рис. 2. Спектральные зависимости токовой чувствительности S экспериментальной линейки p^+ - n -переходов для разных вариантов облучения:

- 1 — облучение через p^+ -слой без фильтра;
 - 2 — облучение без фильтра через подложку;
 - 3 — облучение через фильтр и p^+ -слой.
- Кривые 2 и 3 практически совпадают, кривая 1 ложится на них при $\lambda > 4,4$ мкм

Выводы

1. Выращены гомоэпитаксиальные жидкофазные пленки антимонида индия с концентрацией теллура $(3-4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ на подложках с концентрацией донорных центров $\sim 1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и ориентацией (111). Рельеф поверхности пленок на возможных рабочих участках — гладкий с "наплывами" до 0,3—0,5 мкм.

2. С применением серийной технологии ОАО «МЗ "САПФИР"», основанной на имплантации ионов бериллия, на изготовленных эпитаксиальных структурах получены планарные $p^+ - n$ -переходы, идентичные по ВАХ и токовой чувствительности серийным $p^+ - n$ -переходам, производимым на основе пластин марки ИСЭ-2 с симметричной ориентацией (100). Отличие экспериментальных приборов заключается только в отсутствии у них эффекта электротренировки пробивного напряжения, что объясняется наличием отрицательного, а не положительного поверхностного

встроенного заряда, как у серийных приборов. Эта особенность обусловлена отличием кристаллографической ориентации поверхности эпитаксиальных структур.

3. Спектральные характеристики фотодиодов, облучаемых через неохлаждаемый фильтр из просветленного арсенида индия со стороны p^+ -слоя, и приборов, облучаемых без фильтра со стороны подложки, а также уровни напряжения шумов и сигналов приборов аналогичны. Это свидетельствует об обеспечении выбранной подложкой эпитаксиальной структуры эффекта Мосса—Бурштейна практически без потери излучения в спектральном диапазоне 3,6—5,5 мкм.

Литература

1. Djuric Z., Livada B., Jovic V. // Infrared Phys. 1989. V. 29. No. 1. P. 1.
2. Технологическая документация АГЦ7.340.142 МК, АГЦ7.340.143 МК, АГЦ7.340.144 МК. ОАО «МЗ "САПФИР"».

Photodiodes from indium antimonide with Moss—Burshtein effect on basis of liquid-phase homoepitaxial structures

V. P. Astakhov, V. V. Karpov, V. V. Karpukhin, V. F. Chishko
Moscow Plant "Sapfir"
4a Dnepropetrovsky av., Moscow, 117345, Russia
E-mail: ko-ckb@mail.ru

A. A. Shlyonsky
Giredmet
5 Big Tolmachev al., 119017, Moscow, Russia

Photodiodes from indium antimonide with Moss—Burshtein effect on basis of liquid-phase homoepitaxial structures are created and investigated. It is shown that such photodiodes can be applied at irradiation of the emitter (p^+ -layer) — side and substrate — side.

PACS: 85.60.-q

Keywords: photodiode, indium antimonide, bar, film, epitaxy.

Bibliography — 2 references.

Received August 15, 2011