

УДК 621.383.52:546.48'49'24

Исследование планарных фотодиодных структур на пленках InSb, полученных на сапфире методом продольной кристаллизации

В. П. Астахов, В. В. Карпов, В. В. Крапухин
ОАО «Московский завод "Сапфир"», Москва, Россия

А. Д. Максимов
Московская государственная академия тонкой химической технологии им. М. В. Ломоносова (ТУ),
Москва, Россия

А. Г. Падалко, О. Н. Пашкова
Институт физико-химических проблем керамических материалов, Москва, Россия

Е. Б. Якимов
Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН,
г. Черноголовка, Московская обл., Россия

Приведены результаты исследования методами наведенного тока планарных фотодиодных структур на основе эпитаксиальных пленок InSb, полученных продольной кристаллизацией на сапфире, с применением имплантации ионов Be^+ и анодной оксидной пленки с последующим нанесением пленки SiO_x для защиты поверхности. Представлен сравнительный анализ результатов в случае применения серийных монокристаллов разных марок и кристаллов на основе эпитаксиальных пленок.

Исследовались планарные фотодиодные структуры с топологией 64-элементных фотодиодных линеек серийного фотоприемного устройства. Материалом служили эпитаксиальные пленки n -типа проводимости с концентрацией электронов $(3-4) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью $(8-9) \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{с}$ при $T = 77 \text{ К}$, полученные на сапфире методом продольной кристаллизации [1, 2]. Исходные пленки имели толщину в среднем около 0,5 мм с высокоразвитым рельефом поверхности, не позволяющим изготавливать малоразмерные ($0,015 \times 0,015 \text{ мм}$) фоточувствительные площадки. Поэтому пленки последовательно механически шлифовали и полировали, а затем подвергали химико-динамической полировке. Конечная толщина пленок составляла 0,065—0,080 мм. Приборные структуры линеек планарных фотодиодов с размерами $150 \times 150 \text{ мкм}$ изготавливали по серийной технологии [2] с применением имплантации ионов бериллия и анодного окисления с последующим нанесением пленки SiO_x для защиты поверхности. Контактной системой служила пленка $Cr+Au$.

На площадках (p^+-n -переходах) изготовленных фотодиодных кристаллов измерялись прямые и обратные ветви ВАХ и проводилось их исследование методиками наведенного тока (НТ), применявшимися в работе [3]. Затем производились сборка кристаллов в корпуса серийных фотодиодов и их стыковка с предварительными усилителя-

ми серийного фотоприемного устройства (ФПУ). При этом предусматривалась засветка кристаллов как традиционная — как со стороны поверхности полупроводника, так и со стороны сапфировой подложки. В составе ФПУ измерялись фотоэлектрические параметры p^+-n -переходов: напряжения сигналов (U_s) и шумов (U_n) и определялись значения пороговой чувствительности по стандартным методикам [3].

Исследования фотодиодов методами НТ проводились в электронном микроскопе JSM 840 при энергии электронного пучка 10—38 кэВ, токе пучка $\sim 10^{-10} \text{ А}$ и температуре образцов $\sim 90 \text{ К}$. При этом к измерительной цепи подсоединялись вывод одной из площадок и базовый электрод; выводы остальных площадок были разомкнуты. Изображения фотодиодов в НТ получали при энергии электронов 38 кэВ. Для оценки диффузионной длины неравновесных носителей заряда измерялись зависимость НТ от энергии пучка в соответствии с методикой работ [4, 5] и спад НТ при удалении пучка от планарной границы p^+-n -перехода в соответствии с методикой работ [6, 7]. В первом из указанных методов измерения проводились при сканировании электронного пучка диаметром $\sim 30 \text{ нм}$ по площади порядка 200 мкм^2 , при токах пучка не выше 10^{-10} А . Полученные значения тока нормировались по произведению тока и энергии пучка. Для моделирования полученных

зависимостей рассчитывалась вероятность собирания [8] путем численного решения диффузионного уравнения, которая сворачивалась с функцией, описывающей зависимость скорости генерации неравновесных носителей заряда от глубины. Подробно эта процедура описана в работе [4]. Распределение скорости генерации неравновесных электронно-дырочных пар по глубине, необходимое при моделировании полученных зависимостей, рассчитывалось методом Монте-Карло с использованием стандартной программы. Этот метод дает более надежные результаты, однако в исследованных структурах он позволяет измерять диффузионную длину только в тех случаях, когда она не превышает 8—10 мкм. При использовании второго метода зависимость НТ от расстояния до края *p-n*-перехода рассчитывалась по формулам, приведенным в работе [8], при этом пространственное распределение генерации аппроксимировалось точечным источником. Точность этого метода ниже, чем первого, что определяется в основном влиянием заряда диэлектрической пленки под электронным пучком на измеряемый профиль сигнала НТ.

Результаты исследований методом наведенного тока и измерений ВАХ и фотоэлектрических параметров *p⁺-n*-переходов в составе серийного ФПУ выявили следующие характерные отличия изготовленных фотодиодных структур от структур-аналогов, изготовленных на монокристаллах марки ИСЭ-2в по аналогичной технологии. Значительно худшие параметры по обратной ветви ВАХ при аналогичной прямой ветви: пробивное напряжение 0,2—0,4 В (~3—5 В у аналога), дифференциальное сопротивление 25—65 кОм (более 50 МОм у аналога). Вдвое больший уровень шумов и меньший уровень сигналов в составе ФПУ:

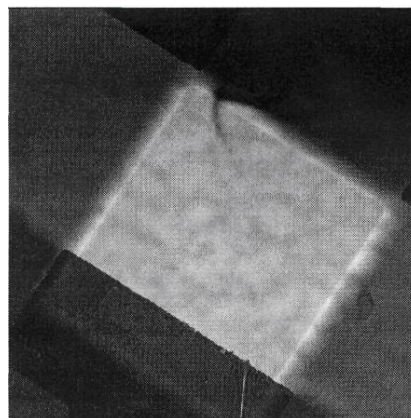
$$U_n = 30—160 \text{ мкВ} \text{ (} 18—20 \text{ мкВ — у аналога);}$$

$$U_s = 180—220 \text{ мкВ} \text{ (} 280—420 \text{ мкВ — у аналога),}$$

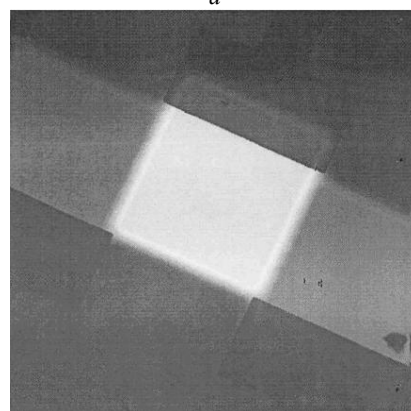
в результате чего пороговая чувствительность в 3—6 раз хуже, чем у аналога: $(3—6) \cdot 10^{-10} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ ($(0,8—1) \cdot 10^{-10} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ — у аналога).

В соответствии с картиной наведенного тока (см. рисунок, *а*) это объясняется зернистостью пленки InSb (размер зерна 10—30 мкм) и меньшей продольной и поперечной диффузионными длинами дырок в таких структурах: менее 5 мкм (более 10 мкм — у аналога), что может быть обусловлено механическими напряжениями в пленке, которая может полностью отслаиваться от подложки при механических ударах. При этом картины наведенного тока имеют качественное соответствие с картинами структур-аналогов (см. рисунок, *б* и *в*).

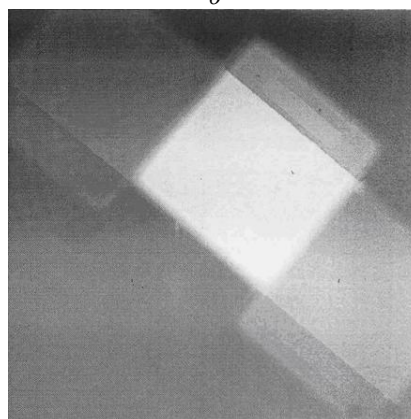
При засветке с обратной стороны сигнал не превышал уровня шума (~25 мкВ), что соответствует результатам оценки диффузионной длины и свидетельствует о необходимости существенного уменьшения толщины пленки при таком виде засветки.



а



б



в

Изображения *p⁺-n*-переходов в режиме наведенного тока:

а — образец на эпитаксиальной структуре;

б — образец марки ИСЭ-2; *в* — образец марки ИСЭ-3.

Контраст между площадкой и яркой полосой на периферии площадки соответствует границе легирования площадки

Из картин наведенного тока (см. рисунок) видно, что как и в случае исходных кристаллов марки ИСЭ-2 и ИСЭ-3, наведенный ток, т. е. собирание носителей заряда за пределами планарных границ

p^+ - n -перехода вдоль поверхности, превышает соби-
рание в пределах площадки (p^+ - n -перехода). Об
этом свидетельствует яркая полоса по периферии
площадки, где внутренняя граница этой полосы
соответствует границе легированной области
площадки. Из этого следует, что поверхностные
свойства и их влияние на характер собирания не-
равновесных носителей в случае напряженных
эпитаксиальных слоев, полученных в данной ра-
боте, и монокристаллов марок ИСЭ-2 и ИСЭ-3
аналогичны. Отсюда следует, что избыточные
темновые токи в случае эпитаксиальных пленок
являются не поверхностными, а обуславливаются
избыточным током через металлургическую гра-
ницу p^+ - n -перехода, которая в данном случае су-
щественно уступает по структурному совершенст-
ву p^+ - n -переходам на монокристаллах ИСЭ-2 и
ИСЭ-3 из-за наличия механических напряжений.
По-видимому, усугубляет ситуацию наличие гра-
ниц зерен, пересекающих p^+ - n -переход.

Заключение

Применение эпитаксиальных пленок InSb, по-
лученных продольной кристаллизацией на сапфи-

ре, для изготовления фотодиодов по базовой тех-
нологии на основе применения имплантации ио-
нов Be⁺ и анодной оксидной пленки с последую-
щим нанесением пленки SiO_x для защиты по-
верхности позволяет получать фотодиоды с
вдвое меньшей токовой чувствительностью и
вдвое большим уровнем темновых токов. Эти от-
личия обусловлены зернистостью и механически-
ми напряжениями в эпитаксиальных пленках.

Л и т е р а т у р а

1. Падалко А. Г., Шевченко В. Я., Саныгин В. П.//Неорг. мат. 1978. Т. 14.
2. Технологическая документация ОС5.399.100.
3. ГОСТ 17772-88. Приемники излучения полупроводни-
ковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Мето-
ды измерения фотоэлектрических параметров и определения
характеристик.
4. Якимов Е. Б.//Зав. лаб. 2002. Т. 68. С. 63.
5. Wu C. J., Wittry D. B.//J. Appl. Phys. 1978. V. 49. P. 2827.
6. Астахов В. П., Астахов М. В., Карпов В. В., Якимов Е. Б.//
Поверхность. 2006. № 11.
7. Kuiken H. K., van Opdorp C.//J. Appl. Phys. 1985.V. 57.
P. 2077.
8. Luke K. L.//Ibid. 1989. V. 80. P. 5775.

Статья поступила в редакцию 1 октября 2006 г.

Investigation of planar photodiode structures on InSb crystals obtained on sapphire by linear crystallization

V. P. Astakhov, V. V. Karpov, V. V. Krapukhin

Joint-Stock Company «Moscow Plant "Sapphire"», Moscow, Russia

A. D. Maximov

Moscow State Academy of Fine Chemical Technology Named After M. V. Lomonosov, Moscow, Russia

A. G. Padalko, O. N. Pashkova

The Physical-Chemical Problems Institute of Ceramic Materials, Moscow, Russia

E. B. Jakimov

Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials, Chernogolovka, Moscow region, Russia

*In this paper presented results of planar photodiode structures on epitaxial films of InSb investi-
gation with electron beam induced current method. Epitaxial films obtained on sapphire by linear
crystallization. Photodiodes formed with Be⁺-ions implantations for production p^+ - n -junction and
anodic oxidation for surface defense. Also presented relative analysis of results for serial InSb single
crystals and epitaxially-grown crystals.*