

1. Presting H., Konle J., Hepp M., Kibbel H., Thonke K., Sauer R., Corbin E., Jaros M. // Optical Engineering. 2000. V. 39. № 10. P. 2624—2641.

2. Машанов В. И., Чистохин И. Б., Зайцев Б. А., Пчеляков О. П., Соколов Л. В., Тишковский Е. Г., Фомин Б. И., Черепов Е.

И. // Микроэлектроника. 1998. Т. 27. № 6. С. 412—418.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

Photoelectric and noise properties of $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ heterostructures

A. V. Voitsekhovskiy, A. P. Kokhanenko, S. N. Nesmelov
SPHTI at TSU, Tomsk, Russia

S. I. Lyapunov
"Matrix Technologies", Moscow, Russia

V. A. Yuryev
Institute of general physics Russian Academia Science, Moscow, Russia

The opportunities of optimization of the threshold performances of $p^+-\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/p\text{-Si}$ -detectors in spectral range $8\text{--}12\ \mu\text{m}$ by controlling of barrier height were considered. The photoelectric and noise properties of MBE GeSi/Si heterostructures were experimental investigation.

УДК 621.383

Эпитаксиальные, фоточувствительные гетеропереходы $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}(\text{In})/\text{PbSe}_{1-x}\text{S}_x$, полученные в сверхвысоком вакууме

Э. Ю. Салаев, А. М. Назаров, С. И. Гаджиева
Институт физики НАН Азербайджана, г. Баку, Азербайджан

В квазиравновесных условиях, в едином технологическом цикле методом “горячей стенки” на подложках BaF_2 в сверхвысоком ($\leq 5 \cdot 10^{-7}$ Па) вакууме получены фоточувствительные изопериодические гетеропереходы (ГП) $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}(\text{In})/\text{PbSe}_{1-x}\text{S}_x$. В структурном отношении компоненты ГП представляют идеально согласованную для эпитаксии пару. Сняты вольт-амперные и спектральные характеристики ГП. Прямая ветвь ВАХ при малых смещениях подчиняется экспоненциальному закону $J = J_0 \exp(eU/\beta kT)$. При 77 К коэффициент β изменяется в интервале 1,5—2, что характерно для генерационно-рекомбинационного механизма протекания тока через область пространственного заряда. Максимальная фоточувствительность наблюдается при $\lambda_{\text{max}} = 12\ \mu\text{m}$. Увеличение температуры при изготовлении ГП приводит к смещению максимума фоточувствительности в коротковолновую область, что объясняется заметной диффузией олова из основного слоя в растущий слой, в результате чего ГП приобретает характеристики варизонной структуры.

В настоящее время эпитаксиальные пленки полупроводников типа $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ широко применяются при изготовлении различных приборов ИК-техники на область спектра 3—5 и 8—14 мкм. Полупроводниковая электронная техника требует получения совершенных эпитаксиальных пленок, свободных от различного рода нежелательных поверхностных состояний и структур со стабильными характеристиками. Интенсивное внедрение различных методов эпитаксиального выращивания позволило получить пленки с заданными электрофизическими и фотоэлектрическими свойствами.

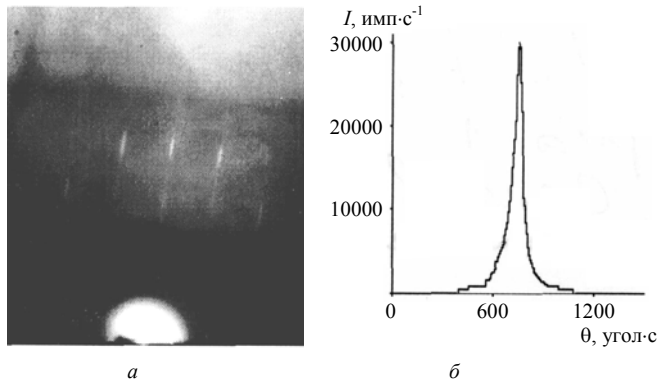
ми.

Так, наряду с методами жидкостной и молекулярно-лучевой эпитаксии, эпитаксиальные пленки полупроводников типа $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ и структуры на их основе были получены в камере с горячими стенками (ЭГС). Характерной особенностью метода ЭГС является то, что рост эпитаксиальных пленок с совершенной структурой и высокими значениями электрофизических параметров происходит в условиях, максимально близких к термодинамическому равновесию при минимальных потерях материала.

Согласно литературным данным, методом ЭГС получены пленки со сверхрешеткой на основе структуры PbTe/Pb_{1-x}Sn_xTe [1, 2]. Авторам работ [3, 4] удалось изготовить двухслойные гетероструктуры для инжекционных лазеров с длиной волны 8—10 мкм. В работах [5, 6] сообщается о создании детектора излучения на основе эпитаксиальных пленок Pb_{1-x}Sn_xSe, выращенных на подложках из ВаF₂. Особый интерес представляют эпитаксиальные пленки и гетероэпитаксиальные структуры, полученные в сверхвысоком вакууме.

В связи с вышеизложенным целью настоящей работы явились получение пленок *p*-Pb_{1-x}Sn_xSe(In) (*x* = 0,07), *n*-PbSe_{1-x}S_x (*x* = 0,12) с заранее заданными свойствами в сверхвысоком вакууме ($\leq 3\text{--}5 \cdot 10^{-7}$ Па) с безмасляной откачкой [7] и создание на их основе в едином технологическом цикле фоточувствительных, изопериодических гетеропереходов (ГП) Pb_{1-x}Sn_xSe(In)/PbSe_{1-x}S_x.

В качестве источника использовались заранее синтезированные и легированные индием ($N_{\text{In}} \leq 1$ ат. %) образцы Pb_{1-x}Sn_xSe(In) (*x* = 0,07) и PbSe_{1-x}S_x (*x* = 0,12).



Введение примеси индия в количестве ≤ 1 ат. % в соответствии с [8—9] приводило к снижению концентрации носителей заряда и обеспечивало стабилизацию электрофизических свойств Pb_{1-x}Sn_xSe. Подложками служили полированные пластины (100) и свежесколотые грани (111) ВаF₂. Структурное совершенство пленок контролировалось электронно-графическим, рентгенодифрактометрическим и электронно-микроскопическим методами.

Рост пленок Pb_{1-x}Sn_xSe(In) (*x* = 0,07) происходил при технологических условиях, описанных в [10]. Были получены эпитаксиальные пленки с совершенной кристаллической структурой ($W_{1/2} = 90\text{--}100$) без включения второй фазы с параметром кристаллической решетки $a = 6,10 \text{ \AA}$ (рис. 1, *a*, *b*, *c*) и следующими значениями электрофизических параметров: подвижность $\mu_p(77 \text{ K}) = 2,5\text{--}3 \cdot 10^4 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{c})$; концентрация носителей заряда $p(77 \text{ K}) = 2\text{--}5 \cdot 10^{16}\text{--}1\text{--}2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

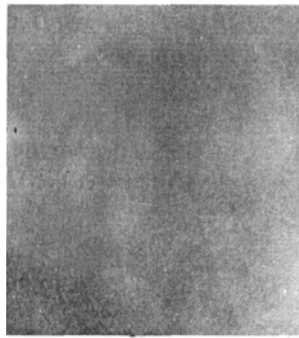


Рис. 1. Пленка Pb_{1-x}Sn_xSe(In) (*x* = 0,07):
a – электронограмма;
b – кривая качания рентгеновской дифракции;
c – электронно-микроскопический снимок ($\times 10000$)

Для получения ГП Pb_{1-x}Sn_xSe(In)/PbSe_{1-x}S_x в едином технологическом цикле на пленках *p*-Pb_{1-x}Sn_xSe(In) (*x* = 0,07) были выращены эпитаксиальные слои *n*-PbSe_{1-x}S_x (*x* = 0,12). Учитывая частичное разложение исследуемых материалов в процессе испарения регулированием скорости конденсации, т. е. температуры источника с избытком халькогена, удалось получить эпитаксиальные пленки с требуемым химическим составом и типом проводимости. Из расчета электронограмм и кривой качания рентгеновской дифракции были вычислены параметры кристаллических решеток и на их основе определены соответствующие химические составы полученных пленок.

В структурном отношении компоненты ГП представляют собой идеально согласованную для эпитаксии пару. Параметры решеток контактирующих пар имеют одинаковое значение ($a_{\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}} = a_{\text{PbSe}_{1-x}\text{S}_x} = 6,10 \text{ \AA}$), и ГП является изопериодическим.

Концентрация носителей заряда в слоях PbSe_{1-x}S_x оценивалась по результатам измерений коэффициента Холла в контрольных образцах, полученных на ВаF₂, и составляла $n(77 \text{ K}) = 5 \cdot 10^{17}\text{--}2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

Изготовление ГП производилось при температурах подложки, т. е. *p*-слоя 500 и 600 К.

Для этого температура подложки 700 К в соответствии с [10] после выращивания пленок *p*-Pb_{1-x}Sn_xSe(In) (*x* = 0,07) снижалась соответственно до 500 и 600 К, и в едином технологическом цикле на них при указанных температурах получались слои *n*-PbSe_{1-x}S_x (*x* = 0,12) без нарушения вакуума.

Электрофизические и фотоэлектрические свойства полученных *p-n*-гетероструктур исследовались на элементах размером (0,3×0,3) мм. Для изготовления этих элементов была использована специальная конструкция держателя-нагревателя подложек с передвижной магнитоуправляемой маской-заслонкой и двумя системами взаимно перпендикулярных щелей шириной 0,3 мм, которая фиксируется с помощью магнита, приближаемого к ампуле извне с боковой стороны [11, 12]. Такая конструкция дала возможность получения матрицы, состоящей из нескольких элементов *p-n*-гетероструктур. Изготовленные элементы обладают выпрямляющими свойствами (рис. 2).

Прямая ветвь ВАХ при малых смещениях подчиняется экспоненциальному закону $J = J_0 \exp(eU/\beta kT)$. При температуре 77 К коэффициент β изменяется в интервале 1,5—2, что характерно для генерационно-рекомбинационного механизма протекания тока через область пространственного заряда. Большинство изготовленных *p-n*-гетеропереходов оказались фоточувствительными в области спектра 8—4 мкм. Спек-

гетероперехода $p\text{-Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}(\text{In})$ ($x = 0,07$)/ $n\text{-PbSe}_{1-x}\text{S}_x$ ($x = 0,12$), изготовленного при 500 К, представлена на рис. 3. Форма кривой соответствует типичной спектральной характеристике гетеропереходов; $\lambda_{\text{max}} = 12$ мкм, что близка к рассчитанному значению — $\lambda_{\text{max}} = 12,4$ мкм. Исследования показывают, что в полученных ГП сигнал фотоЭДС (S) достигает наибольших значений при определенных значениях концентраций дырок и электронов: $p = 4 \cdot 10^{16} \text{—} 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$; $n = 8 \cdot 10^{17} \text{—} 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

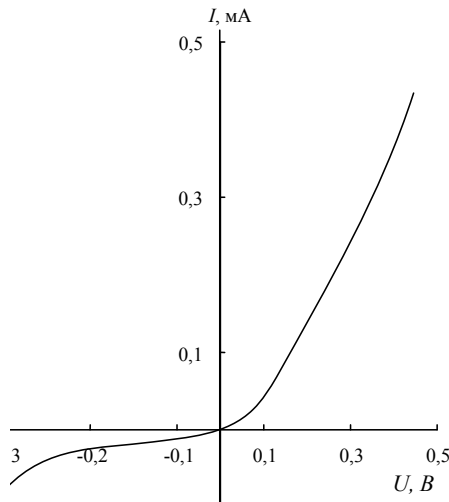


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика ГП $p\text{-Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}(\text{In})$ ($x = 0,07$)/ $n\text{-PbSe}_{1-x}\text{S}_x$ ($x = 0,12$)

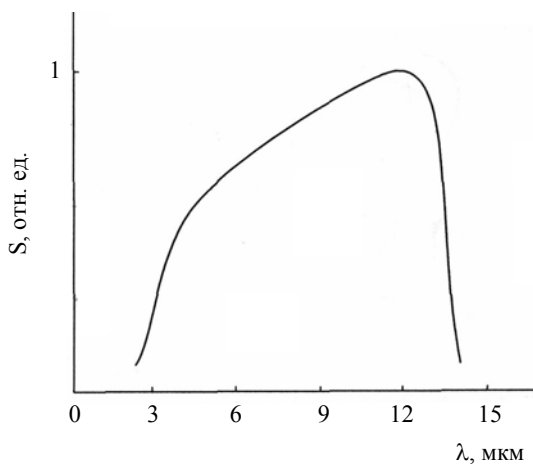


Рис. 3. Спектральная характеристика ГП $p\text{-Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}(\text{In})$ ($x = 0,07$)/ $n\text{-PbSe}_{1-x}\text{S}_x$ ($x = 0,12$)

С увеличением температуры изготовления ГП происходит смещение максимума фоточувствительности в коротковолновую область. На спектральных характеристиках ГП, изготовленных при 600 К, максимум фоточувствительности наблюдается в коротковолновой области ($\lambda_{\text{max}} = 10$ мкм), что объясняется заметной диффузией олова

из основного слоя $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$ в растущий слой $\text{PbSe}_{1-x}\text{S}_x$ с увеличением температуры изготовления в соответствии с [13, 14]. В результате этого ГП приобретает характеристики варизонной структуры, что и приводит к указанному смещению максимума фоточувствительности.

Кроме того, изготовлены многоэлементные фоточувствительные гетеропереходы с высокими техническими параметрами: $R_0A = 1,0\text{—}1,2 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$; $\lambda_{\text{max}} = 12,0$ мкм; $D^*_\lambda = (1\text{—}1,5) \cdot 10^{10} \text{ см}\cdot\text{Гц}^{1/2}\cdot\text{Вт}^{-1}$, сравнимые с аналогичными величинами, приведенными в литературе для различных структур на основе $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$.

Л и т е р а т у р а

1. Kinoshita H., Fujiyasu H. $\text{PbTe} - \text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ Superlattices prepared by a hot-wall technique// J. Appl. Phys. 1980. V. 51. № 11. P. 5845—5846.
2. Kinoshita H., Sakashita T., Fujiyasu H. $(p/n)\text{PbTe}$ multilayer films prepared by a hot-wall technique// Ibid. 1981. V. 52. № 4. P. 2869—2871.
3. Clemens H., Fantner E., Bauer G. Hot-wall epitaxy system for the growth of multilayer IV—VI compound heterostructures// Rev. Sci. Instrum. 1983. V. 5. № 6. P. 685—689.
4. Вяткин К. В., Шотов А. П., Уреики В. В. Тонкие слои $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$, выращенные методом “горячей стенки”// Изв. АН СССР. Сер. Неорг. материалы. 1981. Т. 17. № 1. С. 24—27.
5. Schoolar R. B., Jensen J. D. Narrowband detection at long wavelengths with epitaxial $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}$ films// Appl. Phys. Lett. 1977. V. 31. № 8. P. 536—538.
6. Hohke D. K., Holloway H., Yeung K. F., Hurley M. Thin-film $(\text{PbSn})\text{Se}$ photodiodes for 8—12 μm operation// Ibid. 1979. V. 29. № 2. P. 98—100.
7. Нуриев И. Р., Набиев Р. Н., Ахмедов Э. А. Сверхвысоковакуумная установка для выращивания эпитаксиальных пленок в квазиравновесных условиях// Электронная техника. 1991. Сер. 7. Вып. 3(166).
8. Салаев Э. Ю., Нуриев И. Р., Назаров А. М., Гаджиева С. И. Изопериодические гетеропереходы $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})/\text{PbTe}_{1-y}\text{Se}_y$, полученные в сверхвысоком вакууме// Прикладная физика. 2003. № 4. С. 91—94.
9. Ерасова Н. А., Ефимова Б. А. и др. Примесные состояния In в некоторых твердых растворах на основе PbTe // Изв. АН СССР. Сер. Неорг. материалы, 1978. Т. 14. № 5. С. 870—874.
10. Нуриев И. Р., Абдуллаев М. И., Назаров А. М., Гаджиева С. И. Эпитаксиальные пленки $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x(\text{Te},\text{Se})$, выращенные в сверхвысоком вакууме// Сб. докл. 12-го Международного симпозиума “Тонкие пленки в электронике”. — Харьков, Украина, 23—27 апреля 2001. С. 210—212.
11. Нуриев И. Р., Набиев Р. Н., Ахмедов Э. А. Устройства для изготовления $p\text{-}n$ -переходов в едином технологическом цикле: А. с. 299120. 1989.
12. Нуриев И. Р., Набиев Р. Н., Ахмедов Э. А., Омаров И. Е. Подложкодержатель с магнитоуправляемыми маской и заслонкой: А. с. 330688. 1990.
13. Гаврикова Т. А., Зыков В. А. Электрические и фотоэлектрические свойства анизотропного гетероперехода $\text{Pb}_{0,93}\text{Sn}_{0,07}\text{Se}/\text{PbSe}$ // ФТП. 1997. Т. 31. № 11. С. 1342—1345.
14. Nuriev I. R., Jalilova Kh. D., Faradjev N. V., Nazarov A. M. Isoperiodic heterojunctions based on $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$, $\text{PbSe}_{1-x}\text{S}_x$ epitaxial films// Fizika. 2001. V. VII. № 4. P. 33—35.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

Epitaxial photosensitive $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}(\text{In})/\text{PbSe}_{1-x}\text{S}_x$ heterojunctions obtained in the ultrahigh vacuum

E. Yu. Salaev, A. M. Nazarov, S. I. Gadjieva

Institute of Physics of Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Republic of Azerbaijan

Photosensitive isoperiodical heterojunctions (HJ) $Pb_{1-x}Sn_xSe(In)/PbSe_{1-x}S_x$ were obtained in the ultrahigh vacuum ($\leq 5 \cdot 10^{-7}$ Pa) at quasi-equilibrium conditions by the method of the "hot wall" in the unified technological cycle on substrates BaF_2 . In structural relation HJ components are ideally coordinated pair for the epitaxy. Volt-ampere and spectral characteristics of the HJ were recorded. Straight branch of the volt-ampere characteristics satisfies to the exponential law $J = J_0 \exp(-eU/\beta kT)$ at small displacements. At 77 K the coefficient β changes in the interval 1.5—2 that is typical for the generation-recombination mechanism of the current leakage through the region of the space charge. Maximum photosensitivity was observed at $\lambda_{max} = 12.0 \mu m$. The increase of the temperature of the HJ manufacture leads to the shift of the photosensitivity maximum to the short-wave region, that is explained by the noticeable tin diffusion from the ground layer to the growing layer and as a result the HJ acquires characteristics of the varyzone structure.

УДК 621.384

Болометрические структуры на основе соединения титана

А. Г. Жуков, А. Н. Бажинов, В. Н. Рябов, Э. Б. Ворович
ФГУП «НПП "Исток"», г. Фрязино, Россия

Получены болометрические структуры на основе Ti. Температурный коэффициент резистивного материала составляет 1,3 %. Достигнуты значения обнаружительной способности болометров и их постоянной времени, равные соответственно, $(6 \dots 8) \cdot 10^7 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ (700 K, 30 Гц) и 0,1...—0,01 с (в зависимости от возможных вариаций технологии изготовления и давления внутри корпуса). Область спектральной чувствительности болометров находится в интервале длин волн 6—14 мкм.

© Жуков А. Г., Бажинов А. Н., Рябов В. Н., Ворович Э. Б., 2006

Основной тенденцией в развитии неохлаждаемых болометрических многоэлементных приемников излучения в настоящее время является создание крупноформатных матриц на 320×240 элементов и более. Эти матрицы используются в дорогостоящих тепловизионных приборах обнаружения, наведения, навигации. Наряду с этим существует ряд задач, где требуются неохлаждаемые, относительно недорогие приемники излучения с существенно меньшим количеством приемных элементов для применений в малоформатных ИК-камерах теплового контроля, в устройствах дистанционного определения температуры.

В ФГУП «НПП "Исток"» начата разработка малоформатных болометрических линеек и матриц. В качестве термочувствительного материала болометра выбрано соединение Ti, хорошо согласующееся с Si-технологией и имеющее температурный коэффициент сопротивления около 1,3 %/K.

Слой термочувствительного материала располагается в мембране из SiO_2 , закрепленной на кремниевой подложке. В мембранах линеек и матриц предусмотрены отверстия, через которые производится вытравливание "жертвенного" слоя с образованием полости под мембраной. В мембране над термочувствительным слоем располагается поглощающий излучение слой из Mo ($R \approx 200 \text{ Ом}$).

Приемные ячейки линейки устроены традиционным способом: мембрана крепится к подложке на двух держателях. Внутри последних расположены электроды из

Mo, которые соединяют термочувствительный слой мембраны с контактными площадками из Al, нанесенными на подложку. Контактные площадки из Al со-

единены с помощью алюминиевых проволочек с электродами корпуса приемного модуля.

Приемные ячейки матриц устроены аналогичным образом. На мембранах и подложке матрицы нанесена разводка, обеспечивающая электрический выход через корпус приемного модуля. Величины сопротивлений болометров составляют 150...200 кОм, разброс величин сопротивлений не превышает 5 % от средней величины.

Из электрических и частотных измерений определены значения обнаружительной способности (D^*) и постоянной времени (τ). Для D^* достигнуты значения $(6 \dots 8) \cdot 10^7 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ (700 K, 30 Гц). В зависимости от возможных вариаций технологии изготовления болометров и давления в корпусе были получены значения τ , равные 0,1...—0,01 с.

Тепловая проводимость от болометрических площадок к местам их закрепления для различных технологических исполнений составила $(4 \dots 13) \cdot 10^{-7} \text{ Вт/К}$.

Область спектральной чувствительности болометрических структур с указанным порядком расположения резистивной и поглощающей пленки находится в