

Изопериодические гетеропереходы Pb_{1-x}Sn_xTe(In)/PbTe_{1-y}Se_y, полученные в сверхвысоком вакууме

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

На сверхвысоковакуумной ($\leq 3-5 \cdot 10^{-9}$ мм рт. ст.) установке в квазиравновесных условиях методом "горячей стенки" в едином технологическом цикле получены фоточувствительные изопериодические гетеропереходы (ГП) Pb_{1-x}Sn_xTe(In)/PbTe_{1-y}Se_y. Подложками служили полированные пластины (100) и свежесколотые грани BaF₂ (111). 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 $\lambda_{\max} = 11,6$ мкм.

Полупроводниковые эпитаксиальные структуры нашли широкое применение и играют все возрастающую роль в современной электронике. Полупроводниковая электронная техника требует получения эпитаксиальных пленок и структур со стабильными характеристиками. Это достигается выращиванием структурно совершенных пленок, свободных от различного рода нежелательных поверхностных состояний, с заданными свойствами. Большой интерес представляют гетероэпитаксиальные структуры. Для изготовления фоточувствительных гетероструктур важную роль сыграет разработка технологии получения пленок контактирующих пар с оптимальными значениями концентрации и подвижности носителей заряда и с резко изменяющимися свойствами либо на границах раздела, либо в пределах каждого слоя. Возможности получения пленок с заданными электрофизическими и фотоэлектрическими свойствами обуславливают интенсивное внедрение различных методов эпитаксиального выращивания. В настоящее время для выращивания эпитаксиальных пленок полупроводников типа A^{IV}B^{VI} и структур на их основе, наряду с методами жидкостной и молекулярно-лучевой эпитаксии, также успешно применяется эпитаксия в камере с горячими стенками (ЭГС). Метод ЭГС позволяет получать пленки с совершенной структурой и высокими значениями электрофизических и фотоэлектрических параметров.

Согласно литературным данным [1–9], с помощью указанных методов выращены эпитаксиальные пленки полупроводников типа A^{IV}B^{VI} и созданы различные структуры на их основе.

Для получения эпитаксиальных структур с параметрами, удовлетворяющими требованиям современной электроники, большими перспективами обладают эпитаксиальные пленки, выращенные в сверхвысоком вакууме.

В связи с вышеизложенным целью настоящей работы является получение пленок p-Pb_{1-x}Sn_xTe(In) ($x = 0,2$), n-PbTe_{1-y}Se_y ($y = 0,08$) с заданными свойствами и в едином технологическом цикле, создание на их основе фоточувствительных, изопериодических гетеропереходов Pb_{1-x}Sn_xTe(In)/PbTe_{1-y}Se_y в сверхвысоком вакууме ($\leq 3-5 \cdot 10^{-9}$ мм рт. ст.). ГП методом ЭГС на сверхвысоковакуумной установке с безмасляной откачкой, разработанной и внедренной в Институте фотоэлектроники НАН Азербайджана [10].

В качестве источника использовались заранее синтезированные и легированные индием образцы Pb_{1-x}Sn_xTe(In) и PbTe_{1-y}Se_y. Введение примеси индия в количестве 1 ат. % In, приводящей к образованию в Pb_{1-x}Sn_xTe квазилокального уровня [11], обеспечивало стабилизацию электрофизических свойств нижнего слоя. Подложками служили полированные пластины (100) и свежесколотые грани BaF₂ (111). Структурное совершенство пленок контролировалось электронно-графическим, рентгенодифрактометрическим и электронно-микроскопическим методами.

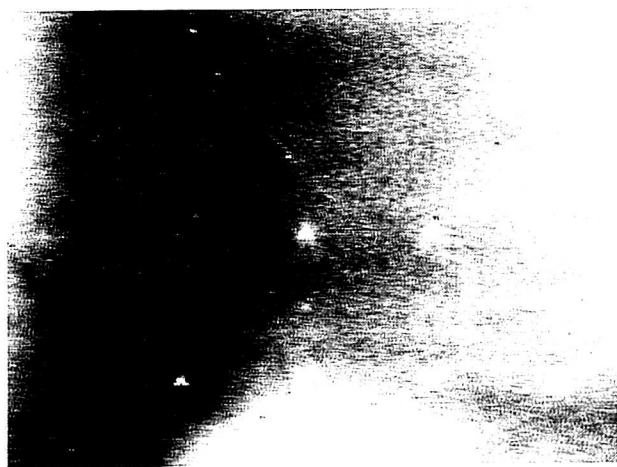
Выращивание пленок Pb_{1-x}Sn_xTe(In) проводилось при технологических условиях, описываемых в [12]. Были получены эпитаксиальные пленки с совершенной кристаллической структурой ($W_{1/2} = 100\%$; рис. 1, а, б) без включения второй фазы и со следующими значениями

электрофизических параметров: подвижность $\mu_p(77\text{ K}) = 2,5\text{--}3 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, концентрация носителей заряда $8 \cdot 10^{16}\text{--}4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. В проводимых исследованиях в качестве источника были использованы $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})$ стехиометрического состава и с избытком халькогена. Пленки, полученные путем использования в качестве источника синтезированных материалов с указанными составами, имели проводимости p -типа. Однако следует отметить, что более совершенные пленки без включения второй фазы получались во втором случае, т. е. при использовании в качестве источника материалов с избытком халькогена. На поверхностях пленок, полученных от источника стехиометрического состава, при малых

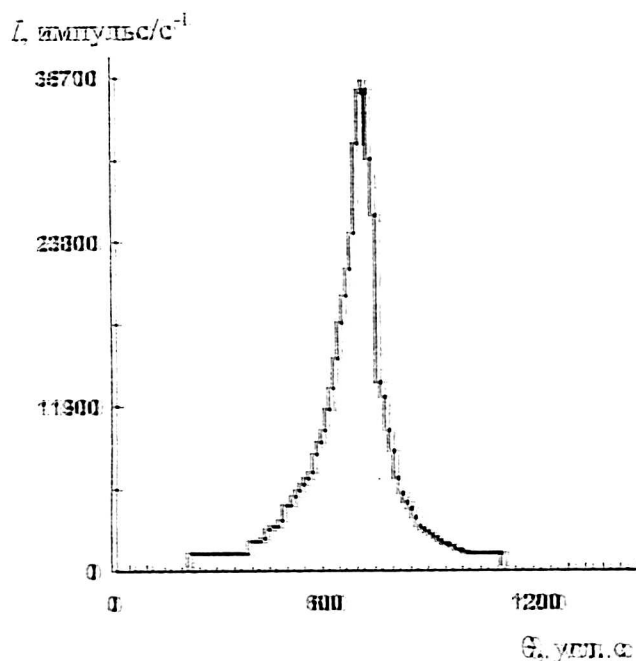
скоростях конденсации ($1\text{--}2 \text{ \AA}/\text{с}$), в незначительном количестве наблюдались микровключения, приводящие к уменьшению подвижности носителей заряда. Для получения гетероперехода $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})/\text{PbTe}_{1-y}\text{Se}_y$ в едином технологическом цикле на пленках $p\text{-Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})$ ($x = 0,2$) были выращены эпитаксиальные слои $n\text{-PbTe}_{1-y}\text{Se}_y$ ($y = 0,08$). В структурном отношении компоненты гетероперехода представляют идеально согласованную для эпитаксии пару. Параметры решеток контактирующих пар имеют

одиноковое значение, и гетеропереход является изопериодическим.

Концентрация носителей заряда в слоях $\text{PbTe}_{1-y}\text{Se}_y$ оценивалась по результатам измерений коэффициента Холла в контрольных образцах, полученных на BaF_2 , и составляла $n = 6 \cdot 10^{17}\text{--}3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Выращивание эпитаксиального слоя $n\text{-PbTe}_{1-y}\text{Se}_y$, т. е. изготовление ГП, производилось при температуре $250 \text{ }^\circ\text{C}$. Для исследования электрофизических и фотоэлектрических свойств и дальнейшего практического использования полученных $p\text{-}n$ -гетероструктур на их основе изготавливались элементы размером $(0,3 \times 0,3) \text{ мм}^2$. С этой целью была использована специальная конструкция держателя-нагревателя подложек с передвижной магнитоуправляемой маской-заслонкой и двумя системами взаимно перпендикулярных щелей шириной $0,3 \text{ мм}$, которая фиксируется при помощи магнита, приближаемого к ампуле извне с боковой стороны [13, 14]. Такая конструкция дала возможность получения матрицы, состоящей из нескольких элементов $p\text{-}n$ -гетероструктур в едином технологическом цикле без нарушения вакуума. Изготовленные элементы обладают выпрямляющими свойствами (рис. 2).



а



б

Рис. 2. Пленка $\text{Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}(\text{In})$ ($x = 0,2$).

а — электронномикроскопия; б — профиль интенсивности рентгеновской дифракции.

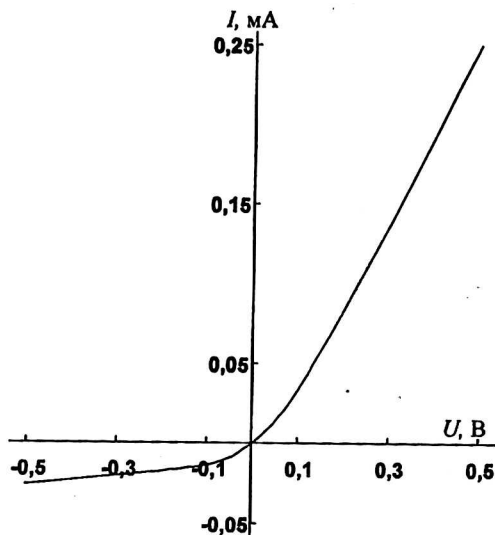


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика ГП $p\text{-Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})$ ($x = 0,2$)/ $n\text{-PbTe}_{1-y}\text{Se}_y$ ($y = 0,08$)

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) полученных гетеропереходов показывают, что утечки в них сильно зависят от структурного совершенства p -слоя. 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. Большинство изготовленных p - n -гетеропереходов оказались фоточувствительными в области спектра 8–14 мкм. Их спектральная характеристика представлена на рис. 3. Форма кривой соответствует типичной спектральной характеристике гетеропереходов; $\lambda_{\text{max}} = 11,6$ мкм, что близко к рассчитанному значению ($\lambda_{\text{max}} = 12,4$ мкм). В исследованных ГП сигнал фото-ЭДС (S) достигает наибольших значений при определенных значениях концентраций дырок и электронов: $p = 9 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$; $n = 1 - 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

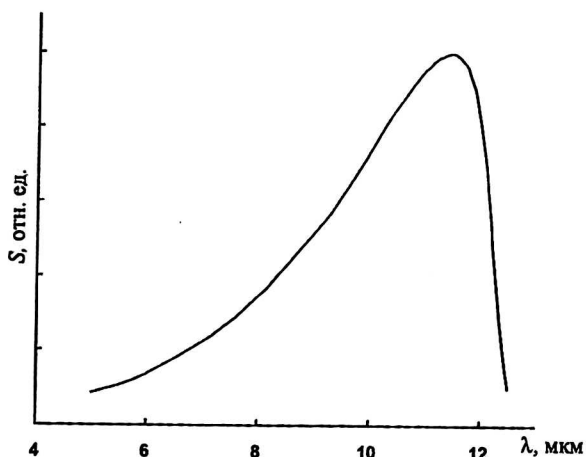


Рис. 3. Спектральная характеристика ГП $p\text{-Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})$ ($x = 0,2$)/ $n\text{-PbTe}_{1-y}\text{Se}_y$ ($y = 0,08$)

Понижение концентрации носителей заряда в n -слоях приводит к появлению в спектральных характеристиках ГП максимума фоточувствительности в коротковолновой области спектра.

Анализ литературных данных показывает, что для длины волны, соответствующей максимальной фоточувствительности этих гетеропереходов, приводятся различные значения спектральной характеристики ($\lambda_{\text{max}} = 6 - 10,5 \text{ мкм}$).

Заключение

Значения максимальной фоточувствительности, приведенные в литературе, смещены в коротковолновую область спектра по сравнению с нашими данными. Это, по-видимому, связано с получением p - n -переходов в наших исследованиях при относительно низких температурах и в сверхвысоком вакууме, с оптимальными значениями концентрации, подвижности носителей заряда и скорости конденсации контактирующих пар, а также повышенной однородностью свойств эпитаксиальных пленок $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ вследствие легирования индием.

Литература

1. Hohke D. K., Holloway H., Yeung K. F., Hurley M. Thin-film (PbSn)Se photodiodes for 8–12 μm operation// Appl. Phys. Lett., 1979. V. 29. № 2. P. 98–100.
2. 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.
3. Мехтиев А. Ш., Николаев М. И., Фараджев Ф. Э., Галандаров Г. А., Алиев Т. И. Изопериодическая гетероструктура $p\text{-Pb}_{0,8}\text{Sn}_{0,2}\text{Te}-n\text{-PbSe}_{0,08}\text{Te}_{0,92}$, полученная методом ЖФЭ// Там же. 1986. Т. 20. № 8. С. 1388–1391.
4. Лидеренко И. С., Дашевский З. М., Котельников В. Ф., Слободчиков В. Ю. Электрические и оптические свойства гетеропереходов $n\text{-Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In}) - p\text{-PbTe}$ // ДАН СССР, 1981. Т. 256. № 3. С. 580–583.
5. 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.
6. Kinoshita H., Fujiyasu H. 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.
7. Kinoshita H., Sakashita T., Fujiyasu H. (p/n) PbTe multilayer films prepared by a hot-wall technique// J. Appl. Phys. 1981. V. 52. № 4. P. 2869–2871.
8. Schoolar R. B., Jensen J. D. Narrowband detection at long wavelengths with epitaxial $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-y}\text{Se}$ films// Appl. Phys. Lett., 1977. V. 31. № 8. P. 536–538.
9. 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.
10. Нуриев И. Р., Набиев Р. Н., Ахмедов Э. А. Сверхвысоковакуумная установка для выращивания эпитаксиальных пленок в квазиравновесных условиях// Электронная техника. 1991. Вып. 3(166). Сер. 7.
11. 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.

12. Нуриев И. Р., Абдуллаев М. И., Назаров А. М., Гаджиева С. И. Эпитаксиальные пленки $Pb_{1-x}Sn_x(Te,Se)$, выращенные в сверхвысоком вакууме// Сб. докл. 12-го Международного симпозиума "Тонкие пленки в электронике". — Харьков, Украина, 23—27 апреля 2001. С. 210—212.

13. Нуриев И. Р., Набиев Р. Н., Ахмедов Э. А. Устройства для изготовления $p-n$ -переходов в едином технологическом цикле: А. с. № 299120. 1989.

14. Нуриев И. Р., Набиев Р. Н., Ахмедов Э. А., Омаров И. Е. Подложкодержатель с магнитоуправляемыми маской и за-слонкой: А. с. № 30688. 1990.

Isoperiodical $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)/PbTe_{1-y}Se_y$ heterojunctions obtained in ultrahigh vacuum

E. Yu. Salaev, I. R. Nuriev, A. M. Nazarov, S. I. Gadjeva

Institute of Photoelectronics National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

On super high-vacuum installation ($\leq 3-5 \cdot 10^{-9}$ mm Hg), in quasi-equilibrium conditions by the method of "hot wall", in a uniform work cycle, photosensitive isoperiodical heterojunctions (HJ) $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)/PbTe_{1-y}Se_y$ have been received. Polished plates (100) and quick-spalled sides of BaF_2 (111) served as substrates. HJ components represent the ideally coordinated pair for the epitaxy in the structural relation. Volt-ampere and spectral characteristics of HJ have been registered. The direct branch of VAC at small displacements submits of the exponential law $J = J_0 \exp(eU/\beta kT)$. At 77 K the coefficient β changes in the interval 1,5—2, that is characteristic for the generation-recombination mechanism of the current flow through the region of the spatial charge. Maximal photosensitivity is observed at $\lambda_{max} = 11,6$ micron.

* * *