

ки, лежащие левее пиков и отвечающие протонам, потерявшим часть энергии в стенках каналов.

Понятно, что качество коллиматора определяется в первую очередь тем, в какой степени искажается энергетический спектр коллимируемых частиц в пределах угла пропускания. Из наших измерений следует, что с точностью до энергетического разрешения ППД (в нашем случае 18–20 кэВ) уширения линии протонов первичной энергии в пределах угла пропускания не происходит.

Суммируя содержание настоящей работы можно сказать следующее.

1. Схема расчета коллимационных свойств МКП, развитая в работе [2], представляется корректной.

2. Не исключено, что коллиматоры на основе МКП могут оказаться полезными при изучении параметров горячей плазмы.

3. Для коллимации быстрых протонов предпочтительнее выбирать МКП с более толстой стенкой между каналами, что ведет при сохранении заданного угла пропускания к использованию МКП с большим диаметром канала и соответственно большей толщиной.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

[1] H e i d b r i n k W.W., S t r a c h a n J.D. // Rev. Sci. Instr. 1981. V. 56. P. 501.
[2] К а р у л и н Н.Е., К о н о в а л о в С.В., П у т в и н с к и й С.В. // ЖТФ. 1986. Т. 56. С. 904.

Поступило в Редакцию
7 апреля 1989 г.
В окончательной редакции
5 ноября 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 4 26 февраля 1990 г.

06.3; 12

© 1990

НЕОХЛАЖДАЕМЫЕ ФОТОДИОДЫ НА ОСНОВЕ $InAs/InAsSb_p$ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 2–3,5 МКМ

И.А. А н д р е е в, М.А. А ф р а и л о в,
А.Н. Б а р а н о в, М.П. М и х а й л о в а,
К.Д. М о и с е е в, И.Н. Т и м ч е н к о,
В.Е. Ш е с т н е в, В.Е. У м а н с к и й,
Ю.П. Я к о в л е в

Спектральный диапазон 2–4 мкм интересен с точки зрения практических применений, поскольку в этом интервале лежат полосы поглощения воды и многих промышленных вредных газов [1]. Поэтому актуальной задачей является разработка для этого диапазона

источников света и фотоприемников как элементной базы оптических датчиков влажности и газов для целей экологии и охраны окружающей среды. До сих пор в литературе этому вопросу уделяется мало внимания — основной упор в исследованиях делается на создание и перспективы использования источников света и фотодетекторов в диапазоне 2–2.5 мкм для задач ИК-ВОЛС III поколения [2–4].

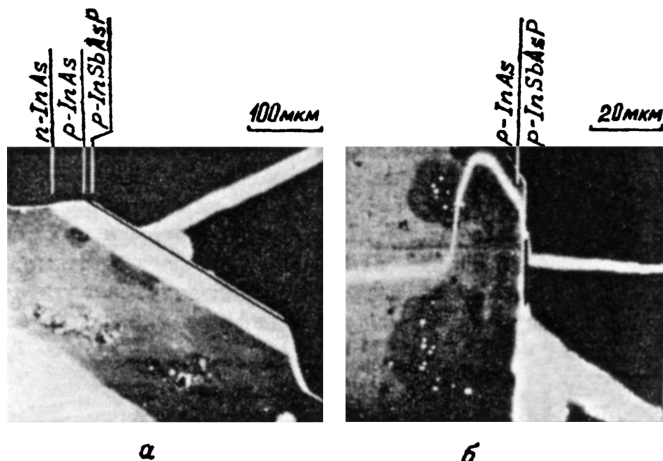
Для диапазона 2–3.5 мкм в течение многих лет известны фотоприемники на основе $InAs$ и его твердых растворов [5–7], обладающие высокой чувствительностью при охлаждении ($T=78 - 195$ К). Однако из-за малой ширины запрещенной зоны этих материалов и высокой проводимости имеются известные трудности при создании фотодетекторов, работающих без охлаждения в спектральном диапазоне свыше 2.5 мкм (низкое дифференциальное сопротивление, большие темновые токи и т.п.). Для снижения темнового тока в длинноволновых фотодиодах перспективно, например, использование гетероструктур, в которых нефотоактивные области выполнены из широкозонных материалов.

Целью настоящей работы явилось создание фотодиодов на основе $InAs/InAsSbP$ с высоким значением дифференциального сопротивления ($R_D > 100$ Ом, $T=300$ К), работающих при комнатной температуре.

Исследуемые структуры создавались методом ЖФЭ. На подложках из нелегированного $InAs$ ($n = 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³) выращивался более широкозонный слой твердого раствора $InAsSbP$ ($E_g \approx \approx 0.5$ эВ, $T=300$ К), легированный акцепторной примесью Zn . Широкозонное „окно“, как известно [8], приводит к снижению скорости поверхностной рекомбинации, а также позволяет избежать проблем, связанных с инверсным слоем на поверхности $p-InAs$ [9].

Фоточувствительные структуры создавались методом фотолитографии в виде меза-диодов с диаметром чувствительной площадки 300–450 мкм. Исследовались вольтамперные и вольтфарадные характеристики $InAs/InAsSbP$ диодов в интервале температур 78–300 К, спектральные характеристики фотоответа, быстродействие и шумы фотодиодов, а также распределение тока, индуцированного электронным зондом.

При разработке и оптимизации конструкции неохлаждаемых гетерофотодиодов важно знать положение $p-n$ -перехода в структуре и геометрические параметры областей, из которых происходит сбор разделяемых $p-n$ -переходом носителей тока. Это возможно осуществить с помощью растрового электронного микроскопа в режиме тока, индуцированного электронным зондом. Ранее такие исследования не проводились, так как при комнатной температуре трудно реализовать этот режим для узкозонных материалов типа $InAs$. Хорошее качество полученных структур позволило использовать метод индуцированного тока. На рис. 1, а представлено изображение скола мезафотодиода $InAs/InAsSbP$ в режиме отраженных электронов (яркостная модуляция). Светлая область шириной 40 мкм вблизи поверхности представляет собой слой, из которого осуществляется сбор разделяемых переходом неравновесных



а

б

Рис. 1. Изображение меза-диода $InAs/InAsSbP$ полученное в растровом электронном микроскопе, а - наложено изображение в режиме тока, индуцированного электронным зондом (яркостная модуляция); б - то же - амплитудная модуляция.

носителей тока. Его ширина складывается из ширины ОПЗ, которая в нашем случае менее 1 мкм и диффузионных длин неосновных носителей тока в прилегающих к переходу р- и п-областях. Вид координатной зависимости индуцированного тока, а также его зависимость от технологических условий получения структур, свидетельствует о том, что р-п-переход расположен, как правило, на дальнем от поверхности крае области сбора носителей на расстоянии от 5 до 40 мкм (в зависимости от условий выращивания структур). При этом ток р-п-перехода определяется неравновесными электронами, генерируемыми в р-области $InAs$ в пределах диффузионной длины, которая всегда превышала глубину залегания р-п-перехода. Диффузионная длина в широкозонном слое значительно меньше, о чем свидетельствует характерный излом на кривой индуцированного тока вблизи гетерограницы (рис. 1, б). При толщине слоя твердого раствора свыше 3 мкм практически исключался вклад в ток носителей, генерируемых на поверхности структуры.

Измерения вольт-фарадных характеристик показали, что полученные р-п-структуры были резкими ($C^{-2} \sim V$), а концентрация примесей в слаболегированной области составила $n = (8-10) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ($T=78 \text{ K}$). При комнатной температуре ток в обратной ветви в интервале 0,1-1 В определялся диффузионным механизмом $J = J_s (\exp \frac{qV}{kT} - 1)$, где $J_s = (0,1-0,2) \text{ A/cm}^2$ (рис. 2, а). При более низких температурах (200-78 K) и небольших обратных напряжениях (до 2 В) ток определялся генерационно-рекомбинационным механизмом с энергией

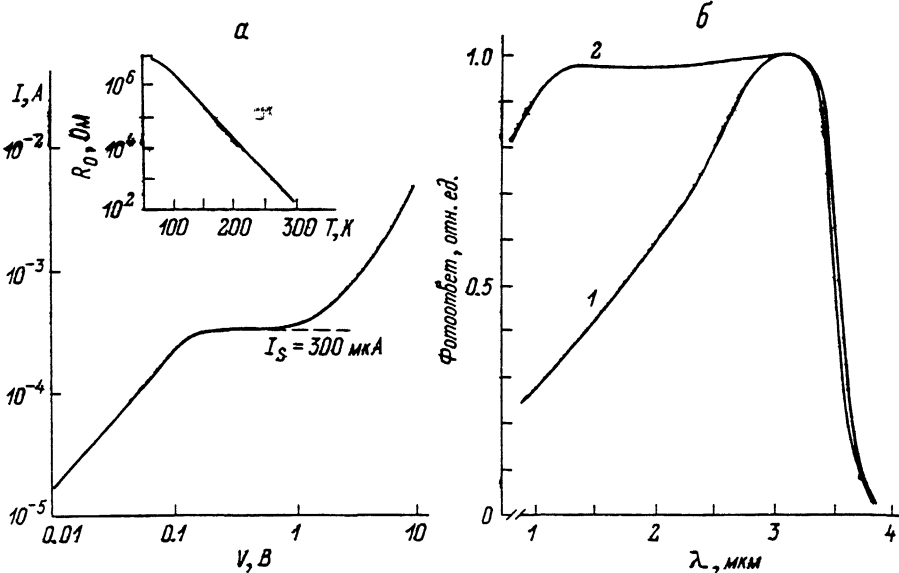


Рис. 2. а – вольтамперная характеристика $InAs/InAsSbP$ фото-диода при $T=300$ К. Пунктир – диффузионный ток. На вставке: тем-пературная зависимость дифференциального сопротивления R_0 в ну-ле смещений для одного из типичных диодов, б – спектральная ха-рактеристика фоточувствительности $InAs/InAsSbP$ фотодиода при $T=300$ К. 1 – при толщине широкозонного $InAsSbP$ слоя $d=3$ мкм, 2 – при толщине $InAsSbP$ слоя 1.5 мкм.

активации $E_t \approx 0.2$ эВ $\approx E_g/2$ (в $InAs$ $E_g = 0.42$ эВ при 78 К). Напряжение пробоя исследуемых диодов лежало в интервале 8–12 В при $T=300$ К ($i_B = 5$ мА) и $V_B = 27$ –30 В при 78 К. Величина дифференциального сопротивления при нулевом смещении $R_0 = \frac{dV}{dI}$, значение которой важно для работы фотоприемника, при комнатной температуре составила 160–600 Ом. На рис. 1, а (вставка) по-казана температурная зависимость R_0 в диапазоне 78–300 К для одного из $InAs/InAsSbP$ диодов. Видно, что при $T=250$ –195 К величина R_0 возрастает до $5 \cdot 10^3$ – 10^4 Ом, что говорит о пер-спективе заметного увеличения чувствительности таких фотоприем-ников при использовании термоэлектрического охлаждения.

Спектральное распределение фоточувствительности $InAs/InAsSbP$ фотоприемника представлено на рис. 2, б. Квантовая эффективность на длине волны $\lambda=3$ мкм составила $\eta \approx 1.2$ А/Вт. Шумы фотодио-дов, как показали измерения и расчеты, ненамного превышали теп-ловые при нулевом смещении, а при $V \approx 2$ В соответствовали дроб-новым шумам темнового тока. При модулированной монохромати-ческой засветке ($\lambda=3$ мкм, $P \approx 1 \cdot 10^{-7}$ Вт) отношение сигнал/шум при $T=300$ К составило 10^2 – 10^3 . Характерное время спада им-пульса фототовета при освещении излучением лазера с $\lambda=1.3$ мкм

($InGaAsP$) и $\lambda = 2.0$ мкм ($GaInAsSb$) было при $V=0$ $\tau \approx \approx 0.17$ мкс и определялось временем жизни неосновных носителей тока, а при $V=1.5$ В $\tau \approx 50$ нс. По оценкам, это время соответствовало скорее диффузионной составляющей, чем емкостной.

В заключение необходимо отметить еще одну перспективу применения исследуемых структур — возможность создания на их основе лавинных фотодиодов, работающих при неглубоком охлаждении, что важно для использования их, например, в системах ИК-ВОЛС на основе разрабатываемых в настоящее время фторидных и халькогенидных стекол для диапазона 2–4 мкм [10]. Ранее было установлено, что в материалах типа $InAs$, $GaSb$ и их твердых растворах, в которых имеется „резонанс“ зон $E_g = \Delta_0$ (Δ_0 — величина спин-орбитального расщепления валентной зоны), можно получить высокое отношение коэффициентов ударной ионизации дырок и электронов $\alpha/\alpha \gg 1$, и низкие избыточные шумы лавинных фотодиодов [11–12]. В настоящей работе мы наблюдали лавинное умножение фототока в $InAs/InAsSbP$ фотодиодах уже при комнатной температуре с коэффициентами умножения $M \approx 5$. Это умножение, вероятно, ответственно также за возрастание темнового тока при $V > 1$ В. Результаты исследования лавинного умножения в таких фотодиодах при температурах, близких к комнатной, будут опубликованы.

Таким образом, в результате проведенных исследований созданы неохлаждаемые высокоэффективные фотодиоды на основе $InAs/InAsSbP$ с высоким дифференциальным сопротивлением при комнатной температуре, работающие в спектральном диапазоне 1–3.6 мкм. Отметим, что по быстродействию эти фотодиоды имеют несомненное преимущество, например, перед фоторезисторами на основе PbS , работающими в той же спектральной области, для которых времена фотоответа составляют миллисекунды [6]. Фотодиоды на основе $InAs/InAsSbP$ могут быть использованы при разработке оптических датчиков влажности и газов, оптической пирометрии, для регистрации лазерного излучения и других задач.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Analytical Chemistry. 1956. V. 28. N 8. P. 219–237.
- [2] Н о r i k o s h i Y. Semicond and Semimetals. V. 22 C. 1985. P. 93–5150.
- [3] Андреев И.А., Афраилов М.А., Баранов А.Н. и др. Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 7. С. 15–19.
- [4] Laser Focus. 1987. Febr. P. 98–102.
- [5] Крузе П., Макглоулин. Основы инфракрасной техники. М.: Воениздат. 1964. 463 с.
- [6] Ушакова М.Б. В сб.: Итоги науки и техники. Электроника и ее применение. 1988. Т. 20. С. 85–128.
- [7] Андрушко А.И., Салихов Х.М., Слободчиков С.В., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н. ФТП. 1986. Т. 20. В. 12. С. 2395–2398.

- [8] Корольков В.И. В сб.: Фотоприемники и фотопреобразователи. Л.: Наука. 1986. С. 6-36.
- [9] Baglee D.A., Ferry D.K., C.W. Wilmsen, H.H. Wieder. J. Vac. Sci. Techn. 1980. N 17. С. 1032-1036.
- [10] Михайлова М.П., Рогачев А.А., Ясников И.Н. ФТП. 1976. Т. 10. Вып. 10. С. 866-875.
- [11] Жингарев М.З., Корольков В.И., Михайлова М.П., Ясников И.Н. Письма в ЖТФ. 1979. Т. 4. Вып. 5. С. 355-360.
- [12] Михайлова М.П., Слободчиков С.В., Смирнова Н.Н., Филаретова Г.М. ФТП. 1976. Т. 10. Вып. 5. С. 978-980.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
24 августа 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 4

26 февраля 1990 г.

05.4

© 1990

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ АЛЮМИНИЯ И ИНДИЯ НА СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ $Bi_2Sr_2CaCu_2O_y$

Е.М. Гололобов, Н.А. Прыткова,
Ж.М. Томило, Д.М. Турцевич,
М.С. Целуевский, Н.М. Шиманская

С открытием высокотемпературной сверхпроводимости, наряду с фундаментальными исследованиями этого явления возникли задачи чисто прикладного характера, в частности, возможности использования сверхпроводящих металлооксидных материалов в микроэлектронике. При изучении этой проблемы в связи с задачей стабильности параметров ВТСП большое внимание уделяется взаимодействию сверхпроводящих металлооксидов с материалами, широко используемыми в микроэлектронике, например, материалами подложек (MgO , ZrO_2 , Al_2O_3 , Si , $SrTiO_3$ и др.), и при изготовлении электроконтактов, поскольку термообработка контактирующих материалов приводит к взаимной диффузии атомов различных элементов, что отражается на свойствах изделий [1-6].

Нами проведено исследование влияния примесных добавок окиси алюминия, часто используемого в качестве подложек в тонкопленочных устройствах, и окиси индия (индий и его сплавы применяются для изготовления электрических контактов в криоустройствах) в металлооксид $Bi_2Sr_2CaCu_2O_y$ ("2212") на его сверхпроводящие свойства. Был проведен синтез и исследованы свойства об-