

УДК 621.315.59

Фотоэлектрические свойства гетероперехода $(p)\text{InSb}-(n)\text{CdTe}$

Л. А. Матевосян, К. Э. Авджян, С. Г. Петросян, А. В. Маргарян

*Разработана лазерная технология изготовления фотоприемника ближнего и среднего инфракрасного диапазона длин волн на основе гетероперехода $(p)\text{InSb}-(n)\text{CdTe}$. Приведены результаты исследований фотоэлектрических свойств гетероперехода. Реализованное значение обнаружительной способности на максимуме спектральной чувствительности составляет $D^*_\lambda(4,8; 2000; 1) \approx 1,8 \times 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$, что не уступает фотонным приемникам на основе $p-n$ -переходов.*

PACS: 07.57. Kp, 81.15. Fg, 85.60. Dw, 85.60. Gz.

Ключевые слова: гетеропереход, лазерно-импульсное осаждение, инфракрасный фотоприемник, антимонид индия, теллурид кадмия, спектральная характеристика чувствительности.

Введение

Благодаря уникальным электрофизическим параметрам и наиболее узкой ширине запрещенной зоны среди полупроводниковых соединений A_3B_5 антимонид индия (InSb) является важным материалом, который широко используется для изготовления фотодетекторов среднего инфракрасного (ИК) диапазона длин волн [1].

Фотодиоды на основе InSb обычно изготавливаются с применением процессов диффузии примесей [2], ионной имплантации [3] с последующим отжигом или методом молекулярно-пучковой эпитаксии [4].

Целью данной работы было создание простого по техническому исполнению и технологии изготовления (исключающие процессы имплантации, диффузии и отжига) фотоприемника на основе гетероперехода (ГП) $(p)\text{InSb}-(n)\text{CdTe}$ и исследование его характеристик.

Известно, что использование ГП улучшает характеристики фотоприемников и фотопреобразователей. Наличие широкозонного окна для фотонов, энергия которых больше ширины запрещенной зоны одного материала и меньше ширины запрещенной зоны другого, обеспечивает эффективное фотопреобразование, так как место генера-

ции фотоносителей и область, где они разделяются (область пространственного заряда), совмещены. Кроме того, обеспечивается высокое быстродействие, исключаются рекомбинационные потери на поверхности раздела, а также реализуется выход рекомбинационного излучения без поглощения.

Для обеспечения перечисленных преимуществ при выборе полупроводниковых пар для ГП существенную роль играют совпадение их кристаллических структур и постоянных решеток. Совершенным может быть ГП между InSb и CdTe . Обе они имеют кубическую кристаллическую решетку и почти идеальное совпадение параметров решеток ($\alpha_{\text{InSb}} = 6,479 \text{ \AA}$, $\alpha_{\text{CdTe}} = 6,477 \text{ \AA}$). Расчеты показывают, что ожидаемая плотность состояний на границе раздела ГП $\text{InSb}-\text{CdTe}$ не должна превышать величину $N_s = 6,2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ [5]. При практической реализации такого количества пограничных состояний можно получить переходы, близкие к идеальным. Заметим, что коэффициенты термического расширения InSb ($\alpha_T = 4,9 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) и CdTe ($\alpha_T = (5,0-5,5) \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) тоже находятся в хорошем соответствии. Кроме того, без применения специальных антиотражающих покрытий, из-за низкого значения коэффициента преломления CdTe по сравнению с InSb , потери, связанные с отражением от широкозонного слоя в области длин волн 2—7 мкм, в случае ГП $\text{InSb}-\text{CdTe}$ будут меньше, чем для $p-n$ -перехода на основе InSb .

Детали эксперимента

Для изготовления ГП $(p)\text{InSb}-(n)\text{CdTe}$ нами был использован метод лазерно-импульсного осаждения [6], который обеспечивает эпитаксиальный рост пленок CdTe на пластинах InSb при довольно низких температурах ($T = 200-225 \text{ }^\circ\text{C}$), благодаря чему практически исключается взаимная диффузия компонент полупроводников в про-

Матевосян Ленрик Аршалуйсович, научный сотрудник.
Авджян Карапет Эдуардович, научный сотрудник.
Петросян Степан Григорьевич, зав. отделением, ведущий научный сотрудник.

Маргарян Арцун Варужанович, аспирант.
Институт радиофизики и электроники НАН РА
Армения, 0203, Аштарак, ул. Бр. Алиханян, 1.
Тел. 8 (+374) 1028-78-50. E-mail: office@irphe.am ;
lermatevosyan@yahoo.com

Статья поступила в редакцию 21 июля 2014 г.

© Матевосян Л. А., Авджян К. Э., Петросян С. Г.,
Маргарян А. В., 2014

цессе роста. В качестве подложек использованы полированные пластины (*p*)InSb с концентрацией акцепторов $N_A = 4,17 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Омические контакты к обеим областям ГП сформированы с помощью термического напыления металлического индия (In) после лазерного осаждения слоя CdTe (толщина слоя CdTe варьировалась в диапазоне 0,1—1,2 мкм). Слой In со стороны *p*-InSb покрывает всю поверхность подложки, а со стороны *n*-CdTe имеет вид точечного контакта диаметром не более 1 мм (в зависимости от площади перехода).

Измерения проводились в режиме фотоЭДС по схеме синхронного детектирования. Электрические и фотоэлектрические свойства ГП исследованы при температуре жидкого азота. Измерения чувствительности были проведены на длине волны $\lambda = 3,39 \text{ мкм}$ с помощью He—Ne-лазера, работающего в непрерывном режиме. Определение постоянной времени проведено с помощью лазерного импульса с длиной волны $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$ и с длительностью 30 нс, который одновременно был направлен на ГП и на ФЭУ-62 с постоянной времени нарастания сигнала $\tau \approx 4 \text{ нс}$.

Шумовые характеристики ГП исследовались при $T = 78 \text{ К}$ спектроанализатором, причем после предварительного усиления сигнала усилителем с коэффициентом усиления $K = 350$ и со спектральной плотностью собственных шумов $U_{ш} = 1,4 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$.

Измерение обнаружительной способности гетеропереходного фотоприемника проводились в режиме короткого замыкания под действием фонового излучения ($T = 300 \text{ К}$) с помощью селективного нановольтметра «Унипан232В» при частоте модуляции $f = 2000 \text{ Гц}$.

Результаты исследований

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) полученных ГП, снятые при температуре жидкого азота ($T = 78 \text{ К}$), показывают значительное уменьшение как прямых, так и обратных токов структуры с увеличением толщины слоя *n*-CdTe (см. рис. 1). Известно, что величина напряжения токовой отсечки $U_{cut\ off}$ для гетероперехода по своему численному значению равна величине суммарной контактной разности потенциалов в *n*- и *p*-областях, т. е. $U_{cut\ off} = \Delta\phi_0 = \phi_n + \phi_p$. Поэтому из семейства прямых ветвей ВАХ гетеропереходов экстраполяцией прямолинейных участков были определены значения $U_{cut\ off}$ для каждого перехода. Зависимость $U_{cut\ off}$ от толщины слоя CdTe (см. рис. 2) имеет вид кривой, которая выходит на постоянное значение $U_{cut\ off} = 0,45 \text{ В}$ при толщине пленки *n*-CdTe $d = 0,4 \text{ мкм}$. Дальнейшее увеличение толщины слоя *n*-CdTe не приводит к росту $U_{cut\ off}$. Таким образом, можно заключить, что полная контактная разность потенциалов у полученного гетеропере-

хода составляет $\Delta\phi_0 = 0,45 \text{ В}$, а ширина области объемного заряда в слое *n*-CdTe равна $l_n = 0,4 \text{ мкм}$. Используя это значение, можно оценить концентрацию донорной примеси в эпитаксиальном слое, что составляет $N_D = 1,13 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Имея $\Delta\phi_0$, l_n и N_D , можно вычислять и другие параметры ГП.

Используя исходные, справочные и расчетные параметры для *p*-InSb и *n*-CdTe, удалось построить диаграмму энергетических зон ГП (*p*)InSb—(*n*)CdTe, которая отображена на рис. 3. Как видно из этой диаграммы, на границе раздела стороны InSb образуется инверсный n^+ -слой.

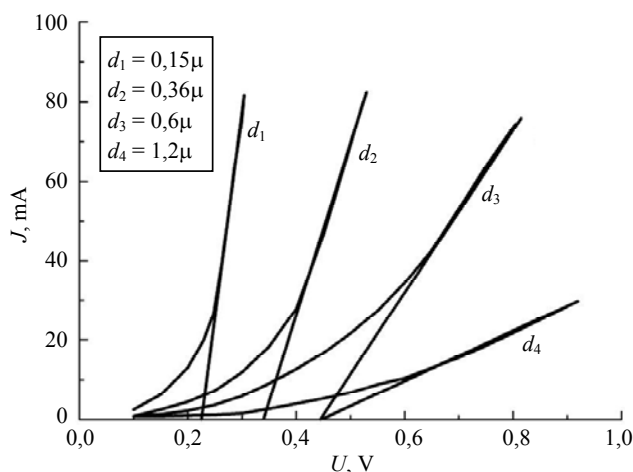


Рис. 1. ВАХ ГП (*p*)InSb—(*n*)CdTe

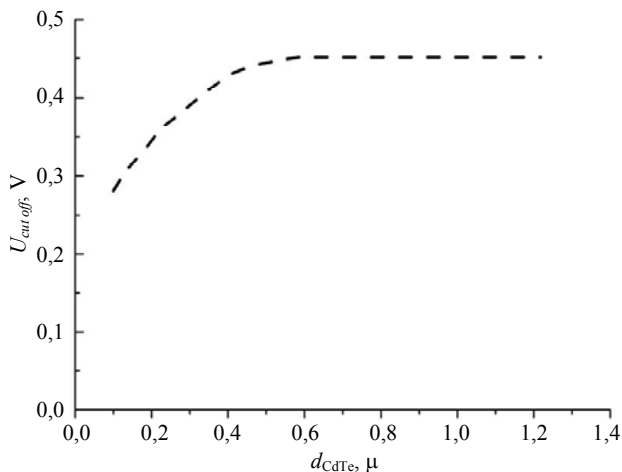


Рис. 2. Зависимость $U_{cut\ off}$ от толщины слоя CdTe

Фотоэлектрические свойства ГП (*p*)InSb—(*n*)CdTe были исследованы при температуре жидкого азота и при нормальном падении монохроматического излучения со стороны широкозонного CdTe, который служит оптическим окном для излучения с энергией фотонов $\hbar\omega < 1,6 \text{ эВ}$. Измерения проводились в режиме фотоЭДВ по схеме синхронного детектирования. Спектральное распределение фотоотклика U_{ph} структуры приведено на рис. 4. Ширина спектра на уровне 0,1 составляет 0,7—5,8 мкм, а максимум фотоответа соответ-

стует длине волны $\lambda = 4,8$ мкм, что хорошо объясняется на основе приведенной диаграммы энергетических зон гетероперехода [7].

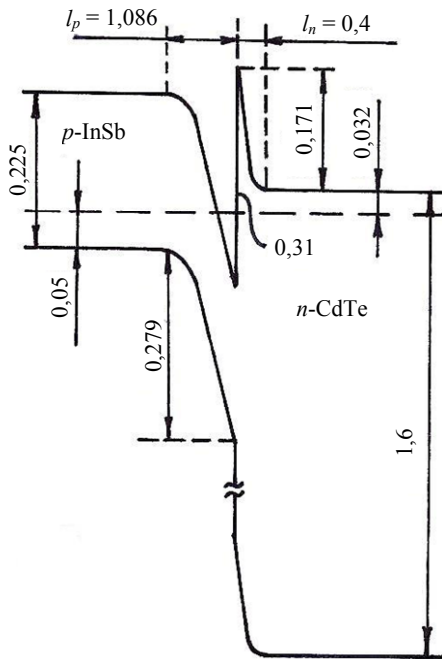


Рис. 3. Диаграмма энергетических зон ГП (p)InSb-(n)CdTe

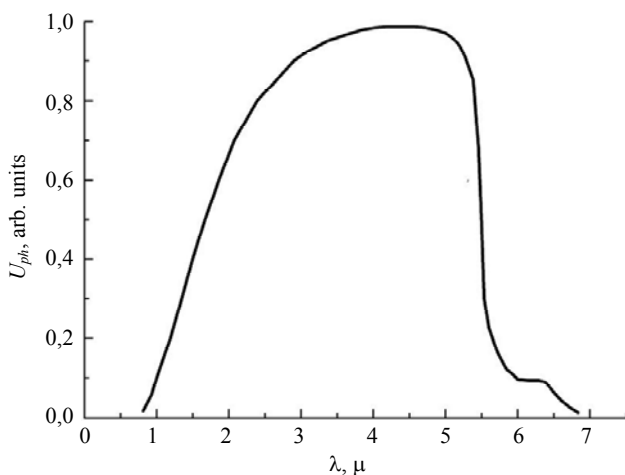


Рис. 4. Фотоотклик ГП (p)InSb-(n)CdTe

Можно выделить три области поглощения падающего излучения. В области фундаментального поглощения InSb ($\hbar\omega \geq E_{gp}$) максимум фотосигнала приходится на частоту $\hbar\omega = E_{gp} + (\Delta E_c - e\phi_p) = 0,256$ эВ ($\lambda = 4,8$ мкм). Разделение фотогенерированных электронно-дырочных пар при $\hbar\omega \geq 0,256$ эВ обусловлено надбарьерным переходом электронов из (p)InSb в n-CdTe с последующей релаксацией ко дну зоны проводимости CdTe. Дырки же локализуются в валентной зоне p-InSb, поскольку их проникновению в (n)CdTe препятствует большой потенциальный барьер ($\Delta E_v = 1,515$ эВ), имеющий высоту порядка ширины запрещенной зоны CdTe.

С уменьшением длины волны излучения в область $\lambda < 4,8$ мкм ($\hbar\omega > 0,256$ эВ) фотосигнал монотонно падает из-за постепенного уменьшения области возбуждения в (p)InSb, в то время как из-за малой толщины пленки поглощение в самом (n)CdTe мало. При толщинах слоя CdTe порядка 1 мкм и более, когда поглощение в нем становится ощутимым, наблюдается подъем спектральной кривой в коротковолновой части спектра. При энергиях же фотона $E_{gp} \leq \hbar\omega \leq E_{gp} + (\Delta E_c - e\phi_p)$ электрон валентной зоны InSb, поглощая фотон, переходит в зону проводимости и совершает последующее подбарьерное туннелирование в зону проводимости CdTe. Величина фотосигнала в этой области частот будет сильно зависеть от ширины потенциального барьера, образованного в широкозонном полупроводнике. И, наконец, за областью фундаментального поглощения ($\hbar\omega \leq E_{gp}$) хвост фотосигнала обусловлен поглощением излучения свободными электронами в инверсионном n^+ -слое InSb с последующим надбарьерным переходом или подбарьерным туннелированием после активации. Максимум такого фотосигнала приходится на частоту $\hbar\omega \approx 0,2$ эВ ($\lambda \approx 6,2$ мкм).

Под действием естественного фонового излучения при частотах модуляции $f > 2$ кГц спектральная плотность шумов системы усилитель—фотоприемник составила 2,6 нВ/Гц^{1/2}. Динамическое сопротивление в нулевой точке ВАХ для ГП с площадью 0,15×0,15 мкм составляет порядка 300 Ом. Время переключения, оцененное из сравнения откликов ГП и ФЭУ от лазерного импульса, составило $\tau < 15$ нс.

На основе проведенных исследований гетеропереходную структуру (p)InSb-(n)CdTe можно предложить в качестве быстродействующего ИК-фотоприемника со следующими основными параметрами:

1. Спектральный диапазон на уровне 0,1.....	0,7—5,8 мкм
2. Спектральная чувствительность ($\lambda = 3,39$ мкм).....	1000 В/Вт
3. Обнаружительная способность, $D^*_\lambda(4,8; 2000; 1)$	$1,8 \times 10^{11}$ см·Гц ^{1/2} ·Вт ⁻¹
4. Время переключения, τ	< 15 нс
5. Рабочая поверхность, S	до (0,5×0,5) см ²
6. Рабочая температура, T	78 К

Заключение

При помощи простой низкотемпературной технологии на базе лазерно-импульсного осаждения (что исключает процессы имплантации, диффузии и отжига) получены гетеропереходные (p)InSb-(n)CdTe быстродействующие фотоприемники, чувствительные в ближнем и среднем ИК-диапазонах (0,7—5,8 мкм) оптического спектра, кото-

рые обладают параметрами, не уступающими традиционным гомопереходным фотоприемникам на основе InSb.

Литература

1. Gaussorgues G. *La Thermographie Infrarouge (Principes-Technologie-Applications)*. — Technique et Documentation (Lavoisier), 1984.
2. Tu S. L., Hunag K. F. and Yang S. J. // *Japanese Journal of Applied Physics* 1990. V. 29. No. 3. P. 463.

3. Rosbeck J. P. and Kasai I. // *IEEE IEDM* 1981. V. 81. P. 161.
4. Udayashankar N. K. and Bhat H. L. // *Bull. Mater.Sci.* 2001. V. 24. No. 5. P. 445.
5. Milnes A. G. and Feucht D. L. *Heterojunctions and Metal-Semiconductor Junctions*. — Academic Press, N Y and London, 1972.
6. Алексанян А. Г., Казарян Р. К., Матевосян Л. А. // *Электронная промышленность*. 1981. № 1(107), С. 55.
7. Alexanian A. G., Alexanian Al. G., Kazarian R. K., et al. // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 1993. V. 14. No. 10. P. 2203.

Photoelectrical properties of (p)InSb–(n)CdTe heterojunction

L. A. Matevosyan, K. E. Avjyan, S. G. Petrosyan, A. V. Margaryan

Institute of Radiophysics and Electronics, NAS of Armenia
1 Brs. Alikhanyan str., Ashtarak, 0203, Armenia
E-mail: office@irphe.am; lermatevosyan@yahoo.com

Received July 21, 2014

Laser technology of manufacturing of near and mid-infrared photodetector based on (p)InSb–(n)CdTe heterojunction was developed. The results of studies of heterojunction photovoltaic properties are presented. Realized value of detectability at the maximum of spectral sensitivity is D_{λ}^* (4.8; 2000; 1) $\approx 1.8 \times 10^{11}$ cm Hz^{1/2}W⁻¹, which does not yield the photon detectors based on p–n junctions.

PACS: 07.57.Kp, 81.15.Fg, 85.60.Dw, 85.60.Gz.

Keywords: heterojunction, pulsed laser deposition, infrared photodetector, indium antimonide, cadmium telluride, spectral sensitivity response.

References

1. G. Gaussorgues, *La Thermographie Infrarouge (Principes-Technologie-Applications)*. (Technique et Documentation, Lavoisier, 1984).
2. S. L. Tu, K. F. Hunag, and S. J. Yang, *Japanese Journal of Applied Physics* **29**, 463 (1990).
3. J. P. Rosbeck and I. Kasai, *IEEE IEDM* **81**, 161 (1981).
4. N. K. Udayashankar and H. L. Bhat, *Bull. Mater.Sci.* **24**, 445 (2001).

5. A. G. Milnes and D. L. Feucht, *Heterojunctions and Metal-Semiconductor Junctions*. (Academic Press, N Y and London, 1972).
6. A. G. Aleksanian, R. K. Kazarian, and L. A. Matevosyan, *Elektronnaya Promyshlennost'*, No. 1(107), 55 (1981).
7. A. G. Alexanian, Al. G. Alexanian, R. K. Kazarian, et al., *International Journal of Infrared and Millimeter Waves* **14**, 2203 (1993).