

УДК 620.91

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГЕТЕРОПЕРЕХОДНЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНО НАРАЩЕННЫХ ТЕРМОФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

**В.М. АРУТЮНЯН¹, Г.Ш. ШМАВОНЯН², О.А. ЗАДОЯН²,
К.М. ГАМБАРЯН¹, А.М. ЗАДОЯН^{2*}**

¹Ереванский государственный университет, Армения

²Государственный инженерный университет Армении, Ереван

*e-mail: toshazad@mail.ru

(Поступила в редакцию 25 июня 2014 г.)

Методом химического осаждения из паров металло-органических соединений эпитаксиально выращены эффективные образцы $\text{InAs}/p\text{-GaSb}/n\text{-GaSb}/n\text{-GaAs}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Ge}/\text{Si}(113)$ фотовольтаических элементов и исследованы их фотоэлектрические свойства. Экспериментально обоснована целесообразность применения в термофотовольтаических элементах качественных гетеропереходных диодных структур.

1. Введение

В настоящее время серьезное внимание уделяется термофотовольтаическим элементам, которые способны превратить в электрическую энергию не только солнечную, но и бесцельно теряющуюся тепловую энергию любого другого источника, излучающего инфракрасное (ИК) излучение. Находящийся в достаточной близости от излучающего источника термофотовольтаический элемент обеспечивает поглощение излучения мощностью от 5 до 80 Вт/см² [1,2]. Термофотовольтаическое производство электроэнергии имеет место после подогрева материала эмиттера до температуры 1000-2000°C [3]. Большая часть энергии, излученной из теплового источника, находится в ИК области спектра ($\lambda \geq 1$ мкм), поэтому разработка термофотовольтаических элементов, действующих в ИК области, является актуальной задачей.

Использование существующих гомопереходных термофотовольтаических элементов несколько ограничено, так как они, в основном, изготавливаются из дорогих монокристаллов GaSb [4-9]. Кроме того, площадь подложки из GaSb меньше, а механическая прочность выше, по сравнению с кремниевой. Более эффективные (дешевые, с большей площадью и механической прочностью) термофотовольтаические элементы могут быть получены на кремниевой монокристаллической подложке с применением гетеропереходных структур. Однако, в этом случае появляются новые трудности, обусловленные решеточной несовместимостью кристаллических материалов, из-за чего появляются микро- и нанодфекты, ухудшающие качественные показатели приборов. Одним из путей преодоления трудностей является применение многоэлементных

гетеропереходов вместо двухэлементного, созданных современными нанотехнологическими методами с использованием метода несимметричного роста слоев (относительно поверхности) или косой резки монокристалла под небольшим углом, формирующей за счет этого на поверхности подложки косой рельеф. Однако, разработка термофотовольтаических элементов с подобными структурами требует реализации комплекса экспериментальных работ.

Целью настоящей работы было создание эпитаксиально наращенных на поверхности подложки Si многослойных A^3B^5 гетероструктур, а также исследование их фотоэлектрических свойств и обоснование целесообразности использования их в термофотовольтаических элементах.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

В настоящее время росту слоев эпитаксиальными методами и исследованию наноструктурных термофотовольтаических элементов уделяется большое внимание, так как с их использованием становится возможным переход к новым типам полупроводниковых оптоэлектронных приборов с улучшенными характеристиками. Уменьшение линейных размеров электронных элементов до нескольких нанометров требует создания гетероструктур с атомно-масштабными границами между двумя материалами. Однако, для получения высококачественных гетероструктур необходимо формирование почти идеального гетероперехода без нанодефектов [10-12].

На рис.1 приведена структура и внешний вид спроектированного, эпитаксиально наращенного гетеропереходного термофотовольтаического элемента с промежуточными слоями на решеточно несовместимой (разница решеточ-

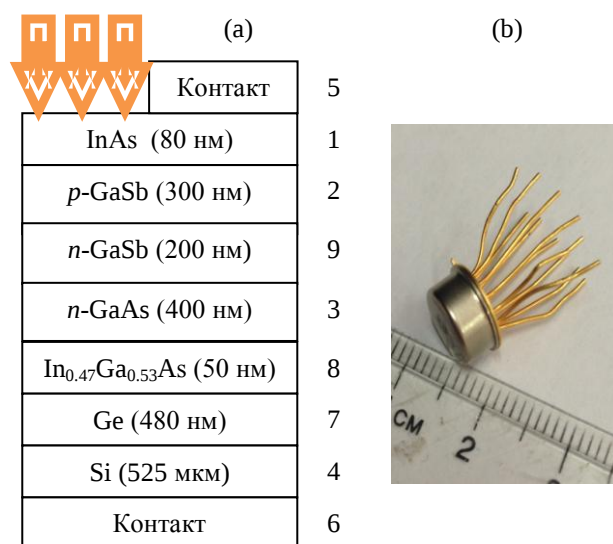


Рис.1. (а) Структура и (б) внешний вид гетеропереходного термофотовольтаического элемента. 1 – верхний слой, 2 и 3 – поглощающие слои, 4 – подложка, 5 и 6 – омические контакты, 7-9 – промежуточные слои.

ных постоянных полупроводниковых материалов, формирующих гетерограницу, больше 1 %) поверхности Si(113), нарезанного под углом 6° к поверхности. Предпочтение отдано эпитаксиально наращенному методу химического осаждения из паров металло-органических соединений, который вместе с молекулярно-лучевой эпитаксией является одним из самых перспективных методов нанотехнологии.

Изготовленный термофотовольтаический элемент состоит из семи слоев: Si(113)-подложки, срезанной по отношению к поверхности под углом 6° (4), двух *p*-GaSb (концентрация акцепторной примеси 10^{16} см^{-3}) (2) и *n*-GaAs (концентрация донорной примеси 10^{15} см^{-3}) (3) слоев, формирующих гетеропереход и поглощающих ИК излучение, верхнего слоя (InAs) (1) и трех промежуточных слоев, из которых два (Ge (7) и $\text{In}_{0.47}\text{Ga}_{0.53}\text{As}$ (8)) находятся непосредственно на подложке, а другой (*n*-GaSb) (9) – между двумя слоями (2 и 3), поглощающими ИК излучение. Между узкозонным с *n*-типом и широкозонным с *p*-типом проводимости полупроводниковыми слоями создается *n*-GaAs/*p*-GaSb гетеропереход. Термофотовольтаический элемент такой структуры, имеющий кремниевую подложку вместо GaSb, дешевле, механически прочнее и имеет большую площадь. Использование промежуточных слоев, а также срезание Si(113) под некоторым углом по отношению к поверхности способствуют уменьшению нанодфектов, обусловленных решеточной несовместимостью на границе гетероперехода.

Термофотовольтаический элемент $\text{InAs}/p\text{-GaSb}/n\text{-GaSb}/n\text{-GaAs}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Ge}/\text{Si}(113)$ работает на основе следующего принципа. Лучи из источника ИК излучения, проходя через верхний слой (1), поглощаются в двух слоях (2 и 3), в результате чего через термофотовольтаический элемент проходит ток, который регулируется приложенным напряжением к омическим контактам (5 и 6), расположенным на верхнем слое (1) и подложке (4). Формирующие гетеропереход полупроводниковые материалы с узкой (0.726 эВ) и широкой (1.424 эВ) запрещенными зонами поглощают соответственно длинноволновые (1-3 мкм) и коротковолновые (0.8-1.8 мкм) ИК лучи, благодаря чему фоточувствительность термофотовольтаического элемента существенно увеличивается.

На рис.2 приведены темновые вольт-амперные характеристики (ВАХ) образцов, сформированных шестью разными участками наращенной структуры. Как видно из рисунка, они имеют традиционный вид ВАХ *p-n* переходов и достаточно близко расположены друг к другу, что свидетельствует об однородности составов диодных структур и высокой степени качества.

Для оценки эффективности использования гетеропереходной структуры $\text{InAs}/p\text{-GaSb}/n\text{-GaSb}/n\text{-GaAs}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Ge}/\text{Si}(113)$ в качестве термофотовольтаического элемента были реализованы следующие шаги. Из световых и темновых ВАХ шести образцов термофотовольтаических элементов при 3000 К теплового источника (рис.2 и 3), согласно предложенной в работе [13] методике, были определены обратные токи насыщения $I_{s.c.}$ и коэффициенты идеальности n (табл.1). Из зависимости $\ln J = f(eU/kT)$ (рис.3), определены величины $I_{s.c.}$ и n (котангенс угла прямой с осью абсцисс eU/kT) (табл.1).

Из световых ВАХ для элемента с площадью 1 см^2 получены следующие

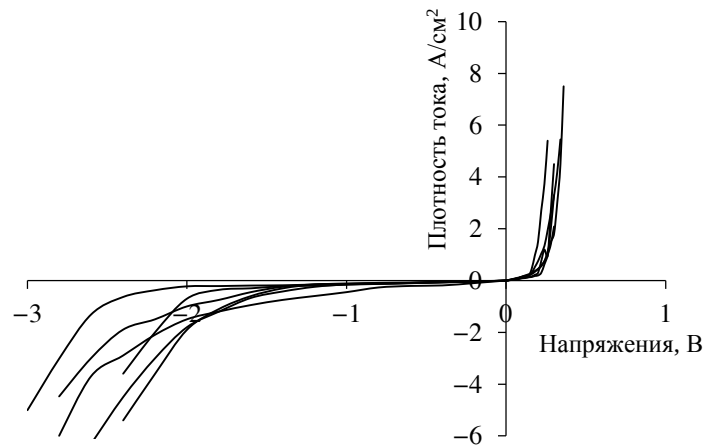


Рис.2. Темновые ВАХ шести фотовольтаических образцов.

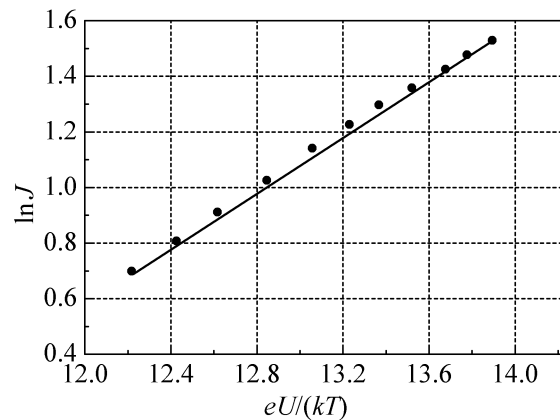


Рис.3. Зависимость $\ln J = f(eU/kT)$.

средние параметры: ток короткого замыкания $I_{sh.c.} = 2A$, напряжение холостого хода $U_{id.} = 0.23 V$, а при максимальной мощности значений тока и напряжения $I_{max} = 1.5 A$, $U_{max} = 0.18 V$, соответственно. В результате, для фактора насыщенности получается значение, равное 0.587.

Полученный коэффициент идеальности исследуемых диодных структур $InAs/p-GaSb/n-GaSb/n-GaAs/In_xGa_{1-x}As/Ge/Si(113)$ оказывается близким к двум, что свидетельствует о генерационно-рекомбинационном характере тока, а низкие значения токов насыщения – о высоком качестве диодных структур.

Напряжение пробоя диодных структур определено путем проведения касательной к обратной ветви ВАХ. Точка пересечения касательной с осью напряжения соответствует напряжению пробоя (табл.1). Максимальное отклонение величины напряжения пробоя от среднего значения напряжения пробоя $U_{b.a.} = -2.4798 V$ не превышает 8.8%, что свидетельствует о высокой степени повторяемости параметров.

Табл.1. Параметры термофотовольтаических элементов

Термофотовольтаический элемент	Ток насыщения $I_{s.c.}$, мкА	Коэффициент идеальности n	Контактное сопротивление, R_c , Ом	Шунтирующее сопротивление, R_{sh} , кОм	Напряжение пробоя, U_b , В
1	3.49	1.80	15.0	30.31	-2.46
2	3.23	1.91	17.0	22.26	-2.31
3	3.26	1.78	15.0	19.35	-2.61
4	2.72	1.89	17.7	24.98	-2.70
5	4.17	1.98	16.8	19.67	-2.38
6	4.42	2.01	13.0	26.38	-2.42
Среднее значение	3.54	1.91	15.75	23.83	-2.48

Определены также контактное и шунтирующее сопротивления диодных гетероструктур (табл.1). Шунтирующее сопротивление оказывается на три порядка выше контактного сопротивления, что свидетельствует о высоком качестве диодных структур.

Как видно из световых ВАХ (рис.4), разработанные решеточно-несовместимые термофотовольтаические элементы имеют низкие токи потерь. Последнее свидетельствует о низкой плотности нанодфектов на границе гетероперехода. Кроме этого, термофотовольтаические элементы поглощают в достаточно широком спектральном диапазоне 1.0-3.2 мкм (рис.5). Спектр фототклика разработанных термофотовольтаических элементов шире спектра фототклика гомопереходного n -GaSb/ p -GaSb термофотовольтаического элемента (0.9-1.8 мкм) (табл.2).

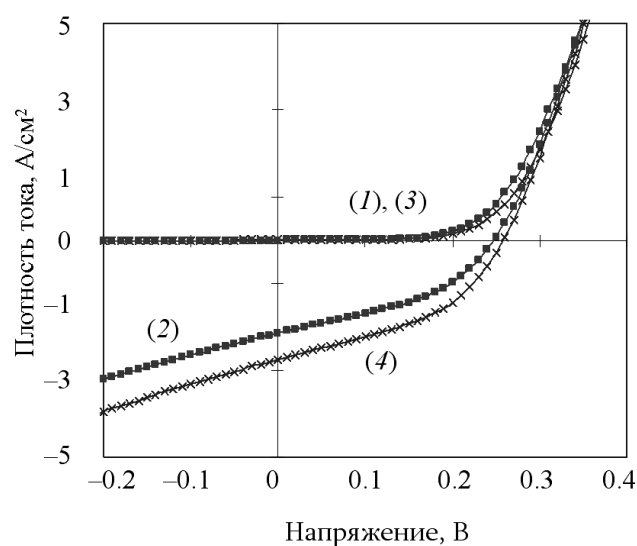


Рис.4. Темновые (1 и 3) и световые (2 и 4) ВАХ двух термофотовольтаических образцов InAs/ p -GaSb/ n -GaSb/ n -GaAs/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ /Ge/Si(113).

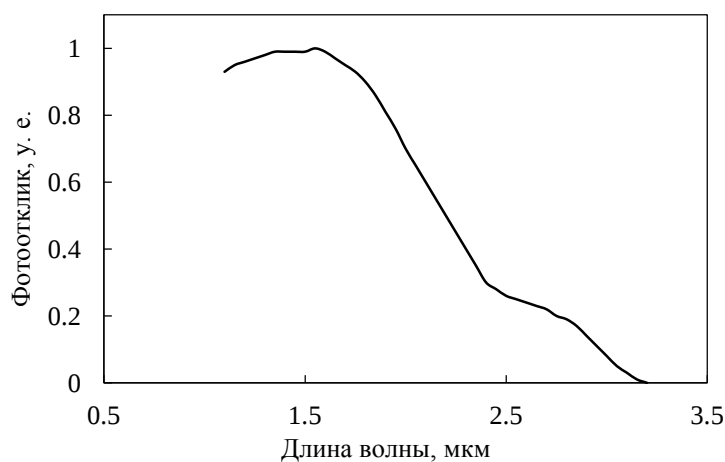


Рис.5. Зависимость фоточувствительности термофотовольтаического элемента $p\text{-GaAs}/n\text{-GaSb}/n\text{-GaAs}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Ge}/\text{Si}(113)$ от длины волны ИК излучения.

Табл.2. Сравнение параметров $\text{InAs}/p\text{-GaSb}/n\text{-GaSb}/n\text{-GaAs}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Ge}/\text{Si}(113)$ с другими термофотовольтаическими элементами, исследованными в идентичных условиях.

Параметр	$p\text{-GaSb}/n\text{-GaSb}$ (JX Crystals) [4]	$p\text{-GaSb}/n\text{-GaAs}$ [5]	$\text{InAs}/p\text{-GaSb}/n\text{-GaSb}/n\text{-GaAs}$ [6]	$\text{InAs}/p\text{-GaSb}/n\text{-GaSb}/n\text{-GaAs}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Ge}/\text{Si}$
$I_{\text{sh.c.}}, \text{mA}/\text{cm}^2$	0.90	0.43	0.28	0.13
$U_b, \text{В}$	0.40	0.20	0.20	0.23
Фактор насыщенности	0.89	0.63	0.75	0.59
$P_{\text{max}}, \text{мВт}$	0.60	0.25	0.30	0.27
Фототклик, мкм	0.9-1.8	0.9-1.8	0.9-1.8	1.0-3.2

3. Заключение

Спроектированы и эпитаксиально наращены решеточно-несовместимые $\text{InAs}/p\text{-GaSb}/n\text{-GaSb}/n\text{-GaAs}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Ge}/\text{Si}(113)$ гетеропереходные эффективные фотовольтаические элементы. Результаты исследования их электрофизических и оптоэлектронных характеристик приводят к заключению, что они могут быть успешно применены для создания преобразователей ИК излучения в спектральном диапазоне 1-3.2 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Геворкян, В.М. Арутюнян, К.М. Гамбарян, А.О. Аракелян, И.А. Андреев, Л.В. Голубев, Ю.П. Яковлев. ЖТФ, 77, 49 (2007).
2. J.Ch. Connolly, D.Z. Garbuzov, V.B. Khalfin, H. Lee, R.U. Martinelli, N.A. Morris.

- US patent No: US6133520, Heterojunction thermophotovoltaic cell, October 17, (2000).
3. **М. Мейтин.** Электроника. Наука, Технология, Бизнес, **6**, 40 (2000).
 4. **C.W. Bumby, P.A. Shields, R.J. Nicholas, G. Shmavonyan, S.K. Haywood.** 4th NREL Thermophotovoltaic Conference, Freiburg, Germany, Paper CP738, June 14-16, (2004).
 5. **G.Sh. Shmavonyan, L. Zheng, S.K. Haywood, N.J. Mason.** Annual Conference of the British Association for Crystal Growth, Manchester, UK, September 17-19, 2000, p. 52.
 6. **C.W. Bumby, P.A. Shields, R.J. Nicholas, Q. Fan, G. Shmavonyan, L. May, S.K. Haywood.** AIP Conference Proceedings, **738**, 353 (2004).
 7. **Q. Fan, L. May, G. Shmavonyan, S.K. Haywood, C.W. Bumby, P.A. Shields, R.J. Nicholas.** Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 178, Paris, June 7-11, 2004, p. 176.
 8. **G.Sh. Shmavonyan.** Low Cost Efficient Thermophotovoltaic Cells, Journal "Proceedings of Engineering Academy of Armenia", **3**, № 2, 2006, p. 294.
 9. **G.Sh. Shmavonyan.** Possible application of p-GaSb/n-GaAs diodes in thermophotovoltaic cells and satellite solar cells, Journal "Proceedings of the NAS RA", Series "Technical Sciences", **57**, 300 (2004).
 10. **G.Sh. Shmavonyan, O.A. Zadoyan.** Efficient thermophotovoltaic solar cells on bent substrates, Bulletin of the American Physical Society, **58**, № 4, Abstract S2.00032, Denver, Colorado, USA, (2013).
 11. **G.Sh. Shmavonyan, O.A. Zadoyan, Gay.Sh. Shmavonyan.** Efficient p-GaSb/n-GaSb/n-GaAs/InxGa1-xAs/Ge/Si thermophotovoltaic cells, Proceedings of the 9th International Conference on "Semiconductor Micro- and Nanoelectronics" (ICSMNE), Yerevan, Armenia 2013, p. 18.
 12. **G.Sh. Shmavonon, O.A. Zadoyan, Gay.Sh. Shmavonyan.** Monolithically integrated III-V/Si thermophotovoltaic cells, Materials of the Young scientists conference on semiconductor physics "Lashkaryov's readings 2013", NAS of Sciences of Ukraine, 2013, p. 197.
 13. **В.П. Афанасьев, Е.И. Теруков, А.А. Шерченков.** Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния, 2-е изд. СПб, ГЭТУ ЛЭТИ, 2011.

INVESTIGATION OF PHOTOELECTRICAL PROPERTIES OF EPITAXIALLY GROWN HETEROJUNCTION TERMOPHOTOVOLTAIC CELLS

V.M. AROUTIOUNIAN, G.SH. SHMAVONYAN, O.A. ZADOYAN,
K.M. GAMBARYAN, A.M. ZADOYAN

Effective heterojunction InAs/p-GaSb/n-GaSb/n-GaAs/InxGa1-xAs/Ge/Si(113) photovoltaic cells' experimental samples have been epitaxy method grown by chemical deposition from metal-organic combination vapors and their photoelectric properties have been investigated. The appropriateness of the application of quality heterojunction diode structures in thermophotovoltaic cells are experimentally proved.