

## Создание и фоточувствительность гетероструктур на основе анодизированного карбида кремния

© А.А. Лебедев, А.А. Лебедев, В.Ю. Рудь\*, Ю.В. Рудь

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

\*Санкт-Петербургский государственный технический университет,  
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 24 февраля 1997 г. Принята к печати 5 марта 1997 г.)

Гетеропереходы получены путем механического прижима анодированных пластин  $6H$ -SiC к пластинам слоистых полупроводников  $A^{III}B^{VI}$  (InSe и GaSe) при 300 К. Благодаря высокому совершенству поверхностей сколов образуется прочный и достаточно совершенный электрический контакт. Спектр фотоэда гетеропереходов имеет вид широкой полосы. Длинноволновый ее край обусловлен узкозонной компонентой, коротковолновый — поглощением в SiC.

В ходе изучения возможностей анодного травления карбида кремния было обнаружено, что в определенных условиях на поверхности пластин  $6H$ -SiC образуются слои, которые скалываются в виде тонких пластин в плоскости (0001) с зеркально-гладкими поверхностями, с параметрами кристаллической решетки, соответствующими исходному веществу [1]. Однако уже первые исследования показали, что по своим физическим свойствам эти слои отличаются от исходного объемного кристалла. В частности, в работе [2] было установлено, что подобно пористому кремнию [3], для полученных таким образом слоев (слоев анодизированного карбида кремния) характерно воспроизводимое увеличение (до 30 раз) эффективности фотолюминесценции без существенных изменений ее спектрального распределения, что может быть использовано в приборах коротковолновой люминесцентной электроники. В данной работе мы представляем результаты первых исследований фоточувствительности гетероструктур, созданных путем соединения через оптический контакт пластин анодизированного SiC с поверхностью сколов слоистых полупроводников  $A^{III}B^{VI}$  — InSe и GaSe.

Для получения анодизированного карбида кремния использовались выращенные методом Лели [4] пластины  $6H$ -SiC с кристаллической ориентацией (0001) и концентрацией свободных электронов порядка  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  при  $T = 300 \text{ К}$ . Исходные кристаллы обладали типичной для SiC высокой твердостью, и царапание корундом не оставляло на их поверхности какого-либо следа. После травления [1] этих кристаллов в смеси  $2\text{HF} + 3\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 0.1\text{HNO}_3$  (указаны объемные части) в течение  $40 \div 120$  мин при плотности тока  $20 \div 120 \text{ мА/см}^2$  при комнатной температуре на их поверхности образовывалась область золотистого цвета. В некоторых случаях наблюдалось отделение анодизированного слоя и на поверхность травителя всплывали прозрачные бесцветные пластинки. Однако в большинстве случаев после травления с поверхности объемного кристалла с помощью металлической иглы удавалось скалывать пластинки с совершенными зеркальными гранями и средними

размерами  $4 \times 4 \times 0.05 \text{ мм}^3$ . Дальнейшее уменьшение толщин этих пластин достигалось расщеплением их под микроскопом с помощью острого лезвия. Таким образом удалось получить пластины толщиной до 10 мкм без микросколов по всей поверхности. Получение пластин карбида кремния с весьма совершенными плоскостями послужило предпосылкой для изучения возможности создания гетероструктур путем приведения в прямой контакт этих пластин со слоистыми полупроводниками класса  $A^{III}B^{VI}$  — InSe и GaSe. Для этих веществ свойство образовывать совершенные плоскости сколов уже давно известно и связывается с тем, что между слоями действуют силы Ван-дер-Ваальса [5]. Благодаря этому для гетероструктур кристаллов InSe и GaSe удастся легко получать тонкие пластинки с совершенными плоскостями (0001) [6,7].

Для создания гетероструктур использовались электрически однородные специально не легированные монокристаллы  $n$ -InSe (удельное сопротивление перпендикулярно слоям  $\rho_{\perp} \simeq 10 \div 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , концентрация электронов  $n \simeq 10^{13} \div 10^{14} \text{ см}^{-3}$  при 300 К) и  $n$ -GaSe ( $\rho_{\perp} \simeq 10^4 \div 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ,  $n \simeq 10^{13} \text{ см}^{-3}$  при 300 К), которые выращивались методом направленной кристаллизации из близких к стехиометрии расплавов при вертикальном расположении кварцевого тигля. Полученные скалыванием на воздухе пластины с зеркальными плоскостями (0001) имели толщины  $20 \div 50 \text{ мкм}$ . Для создания гетероструктур из материала  $A^{III}B^{VI}$  и SiC каждая из пластин снабжалась с одной стороны омическим контактом, а другой они приводились в контакт между собой. В специальном держателе обеспечивался равномерный по всей площади механический прижим пластин друг к другу. После снятия давления пластина InSe или GaSe оставалась в плотном контакте с SiC и для их разъединения требовалось примерно такое же усилие, как и при скалывании самих пластин  $A^{III}B^{VI}$  из слитка. Это обстоятельство указывает на то, что получены достаточно стабильные контакты InSe/SiC и GaSe/SiC. Какого-либо влияния кристаллографической полярности на процедуру образования такого контакта не обнаружено.

Фотоэлектрические параметры гетероструктур на основе пластин анодизированного карбида кремния при 300 К

	$\Delta a$ , %	$\Delta c$ , %	$s$ , эВ <sup>-1</sup>	$S_{ii}^m$ , В/Вт	$\delta_{1/2}$ , эВ	$h\nu_m$ , эВ
InSe/SiC	27	-11.2	40	10	1.7	2.2 ÷ 2.9
GaSe/SiC	19.9	-5.3	115	100	0.8	3.1

Примечание.  $\Delta a$ ,  $\Delta c$  — расхождение параметров решеток для условий эпитаксиального формирования гетерограницы согласно [8],  $h\nu_m$  — энергия максимума фоточувствительности.

При освещении гетероструктур возникает фотовольтаический эффект, имеющий большую величину при освещении со стороны SiC. Знак фотонапряжения не зависит ни от энергии падающих фотонов, ни от места локализации светового зонда (диаметр 1 мм) на поверхности структур, что позволяет связать возникающий фотоэффект с существованием в таких структурах только одной активной области, обеспечивающей разделение неравновесных носителей. Для определения относительной квантовой эффективности структур  $\eta$  фотонапряжение измерялось на линейном участке люкс-вольтовой характеристики и полученные значения нормировались на число падающих фотонов. Типичные спектральные зависимости  $\eta(h\nu)$  при 300 К и освещении со стороны SiC приведены на рисунке, а некоторые параметры структур — в таблице. Главные закономерности проведенных исследований можно суммировать следующим образом.

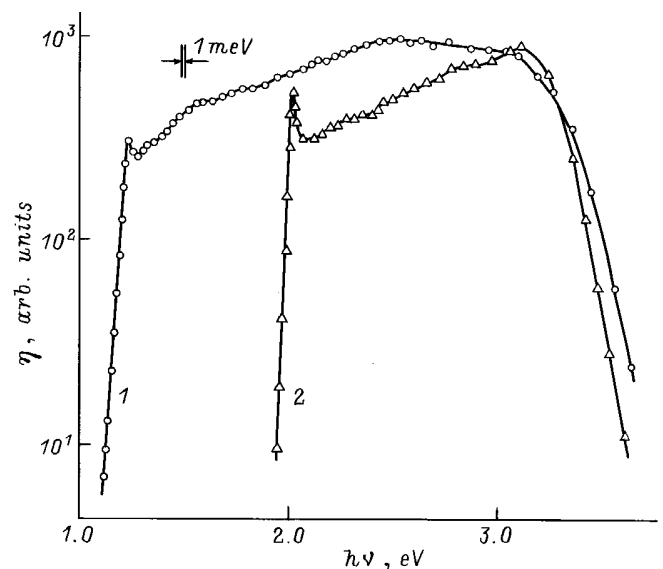
При освещении гетероструктур со стороны SiC, как следует из рисунка, возникает широкополосный фотовольтаический эффект [8]. Экспоненциальный ход  $\eta(h\nu)$ , спектральное положение длинноволновой границы фоточувствительности и ее крутизна  $s = d(\ln \eta)/d(h\nu)$  могут быть связаны с прямыми межзонными переходами в узкозонных компонентах гетероструктур. Обращает на себя внимание наличие узкого пика на длинноволновом крае спектральных зависимостей  $\eta$  обеих гетероструктур. Такие пики ранее наблюдались в спектрах фоточувствительности InSe и GaSe и приписывались экситонному поглощению [9]. Сам факт проявления экситонных пиков в спектрах фоточувствительности гетероструктур свидетельствует о том, что приведение слоистых полупроводников A<sup>III</sup>B<sup>VI</sup> в механический контакт с SiC не приводит к сколь-нибудь заметным нарушениям их структуры в окрестности гетерограницы. Поэтому есть основания считать, что метод приведения в контакт полупроводников с высоким качеством поверхности позволяет существенно "ослабить" известные условия образования совершенных гетеропереходов [10], а различия в типе кристаллической решетки и параметрах не считать критичными при создании эффективных фотопреобразователей.

При освещении полученных гетероструктур со стороны SiC реализуется широкополосный характер фоточувствительности, что свидетельствует о существовании достаточно совершенной в отношении рекомбинационных процессов гетерограницы. Ширина спектров фоточувствительности гетероструктур на их полувысоте  $\delta_{1/2}$

больше в структурах InSe/SiC (см. рисунок и таблицу) и меньше в GaSe/SiC, где больше ширина запрещенной зоны узкозонной компоненты. Максимальное значение  $\eta$  реализуется в глубине фундаментального поглощения кристаллов A<sup>III</sup>B<sup>VI</sup>. Начало коротковолнового спада  $\eta$  в обеих гетероструктурах наступает при  $h\nu \approx 3.1$  эВ. Этот спад может быть связан с увеличением оптического поглощения в толще пластины SiC. Как видно из рисунка, эффективность фотопреобразования в полученных гетероструктурах падает практически до нуля при достижении энергии фотонов  $\sim 3.7$  эВ. Эту величину можно рассматривать как сделанную впервые оценку ширины запрещенной зоны для полученных анодизированным травлением пластин SiC.

В связи с тем что при образовании анодизированных слоев SiC в них могут возникать направленные деформации, нами проводились также поляризационные измерения фоточувствительности гетероструктур при их освещении вдоль нормали к плоскости пластин SiC. Естественный фотоплекроизм при этом не наблюдался, что связано с распространением линейно поляризованного излучения вдоль изотропного направления контактирующих сред и свидетельствует об отсутствии значительных деформаций в плоскости слоев [11].

Таким образом, приведение в прямой оптический контакт пластин SiC с полупроводниками A<sup>III</sup>B<sup>VI</sup> позволяет реализовать широкополосный фотовольтаический эффект с максимальной чувствительностью  $S_{ii}^m \approx 10 \div 100$  В/Вт при 300 К. Длинноволновая граница фоточувствительности этих гетероструктур определяется прямыми оптическими переходами в A<sup>III</sup>B<sup>VI</sup>, тогда как коротковолновая — запрещенной зоной анодизированного карбида кремния.



Спектральная зависимость относительной квантовой эффективности фотопреобразования гетероструктур InSe/SiC (1) и GaSe/SiC (2). Освещение структур неполяризованным излучением осуществлялось со стороны SiC. Толщины пластин, мм: InSe — 0.05, GaSe — 0.02, SiC — 0.015 (1) и 0.02 (2)

Работа выполнена в рамках программы "Физика твердотельных наноструктур" (проект № 1-079/5) и при частичной поддержке Аризонского университета США.

## Список литературы

- [1] А.А. Лебедев, А.А. Лебедев, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, А.М. Стрельчук. Письма ЖТФ, **22**, вып. 17, 59 (1996).
- [2] А.А. Лебедев, А.А. Лебедев, Ю.В. Рудь. Письма ЖТФ, **21**, вып. 3, 64 (1995).
- [3] L.T. Canham. Appl. Phys. Lett., **57**, 1046 (1990).
- [4] J.A. Lely. Ver. Deut. Ceram. Ges., **32**, 229 (1955).
- [5] В.Л. Бакуменко, В.Ф. Чишко. ФТП, **11**, 2000 (1997).
- [6] В.Л. Бакуменко, З.Д. Ковалюк, Л.Н. Курбатов, В.Г. Тагиев, В.Ф. Чишко. ФТП, **12**, 374 (1978).
- [7] Н.Н. Константинова, И.А. Магомедов, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, **26**, 558 (1992).
- [8] *Физико-химические свойства полупроводниковых материалов*. Справочник (М., Наука, 1978).
- [9] Н.М. Метхийев. Автореф. докт. дис. (ИФ АНА, Баку, 1991).
- [10] A.G. Milnes, D.L. Feucht. *Heterojunctions and Metal-Semiconductor Junctions* (Academic Press, N. Y., 1972).
- [11] Ю.В. Рудь. Изв. вузов. Физика, **29**, № 8, 68 (1986).

Редактор Л.В. Шаронова

## Creation and photosensitivity of anodized SiC-based heterostructures

A.A. Lebedev, A.A. Lebedev, V.Yu. Rud'\*, Yu.V. Rud'

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

\*State Technical University,  
195251 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Heterojunctions are made by mechanical pressing of 6H-SiC anodized wafers to the layer semiconductor A<sup>III</sup>B<sup>VI</sup> wafers (InSe, GaSe) at 300 K. Owing to perfection of cleavage surfaces strong and sufficiently good electrical contact is formed. Photovoltage spectrum of the heterojunctions has a form of a broad band. Its long-wave edge is caused by the narrow-band component, the short-wave one by the absorption in SiC.