

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОТКЛИК НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ SiC/Si

© 2016 г. Р.А. ЗАКАМСКИЙ, А.В. СОЛНЫШКИН, О.Н. СЕРГЕЕВА, С.А. КУКУШКИН*,
Н.А. ФЕОКТИСТОВ**, И.П. ПРОНИН**, Г.М. НЕКРАСОВА***

Тверской государственный университет,

*Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург,

** Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург,

***Тверская государственная сельскохозяйственная академия

Пленки карбида кремния, сформированные на кремнии (SiC/Si), используются в качестве буферных слоев для формирования гетероструктур на основе широкозонных полупроводников, таких, как нитрид алюминия (AlN), нитрид галлия (GaN), оксид галлия (Ga₂O₃) и т.д. [1-3]. Это обусловлено тем, что рассогласование решеток, карбида кремния и, например, нитрида алюминия, составляет ≈ 1%, в результате чего на подложке SiC/Si удается сформировать эпитаксиальные слои AlN и GaN, на базе которых могут быть созданы высокоэффективные оптоэлектронные устройства [3-4]. Вместе с тем, представляют интерес и исследования фотоэлектрических свойств самой структуры SiC/Si [4-7]. Предполагается также, что некубические полярные (например, гексагональные) модификации тонкопленочного карбида кремния должны обладать пироэлектрическими свойствами и могут оказаться перспективными материалами для инфракрасной техники [8].

Выращивание монокристаллических тонких слоев карбида кремния на кремниевой подложке является достаточно сложной как физической, так и технологической задачей, что, в частности, связано с сильным рассогласованием параметров кристаллических решеток SiC и Si, превышающим 20%. Одним из перспективных методов выращивания монокристаллических пленок SiC является метод твердофазного замещения, позволяющий получать практически ненапряженные тонкие слои SiC на (111)-Si-подложке толщиной порядка 100 нм [4,7]. Демпфирование механических напряжений в выращенных структурах может быть связано как с образованием пор на границе раздела SiC/Si, так и с тем фактом, что 4 параметра решетки кремния практически соответствуют 5 параметрам решетки карбида кремния. Исследование фотоэлектрических свойств таких пленок показало, что максимум фоточувствительности SiC/Si-структуры приходится на ультрафиолетовую область, однако и в видимой области наблюдается относительно высокая фотоактивность [5]. В настоящей работе представлены результаты исследования фотовольтаических свойств гетероструктур SiC/Si в оптическом диапазоне и в области ближнего ИК-излучения.

Тонкие слои карбида кремния толщиной 80-100 нм были выращены методом твердофазной эпитаксии на подложках из кремния. Исследовались два типа SiC/Si-структур. В первом случае тонкие слои SiC осаждались на (111)-подложку монокристаллического кремния, легированного фосфором (КЭФ), во втором случае – легированного бором (КДБ). Соответственно, подложки характеризовались либо примесной электронной, либо дырочной проводимостью. На поверхность SiC наносились платиновые электроды размером 300*300 и 500*500 мкм. Диаметр падающих пучков, излучаемых светодиодами, составлял порядка 500-1000 мкм. Вторым (нижним) электродом служила серебряная паста, нанесенная на свежий скол кремниевой подложки.

Для исследования фотовольтаических откликов использовался динамический метод, при котором (111)SiC/(111)Si-структура облучалась периодически модулированными импульсами прямоугольной формы электромагнитного излучения в красном и ближнем ИК диапазонах длин волн (632 и 980 нм) на частоте модуляции 10 Гц.

Экспериментальные данные откликов, полученные в режиме короткого замыкания (фототок короткого замыкания или ФТКЗ), представлены на рис. 1-3 для SiC/Si-структур с р-типом проводимости подложки. Из (рис. 1, а) видно, что под воздействием оптического (и одновременно теплового) строба (нижние кривые на всех диаграммах) наблюдался стационарный электрический отклик. Для идентификации природы отклика осуществлялась дополнительная подсветка белым светом (рис. 1, б), которая приводила к увеличению сигнала в момент оптического воздействия, благодаря чему сделано предположение, что электрический отклик носит стационарный фотовольтаический характер (фототок короткого замыкания- ФТКЗ). Величина этого сигнала возрастала с ростом удельного сопротивления кремниевой пластины. В структурах, где использовался в качестве подложки кремний, легированный фосфором, сигнал ФТКЗ практически отсутствовал.

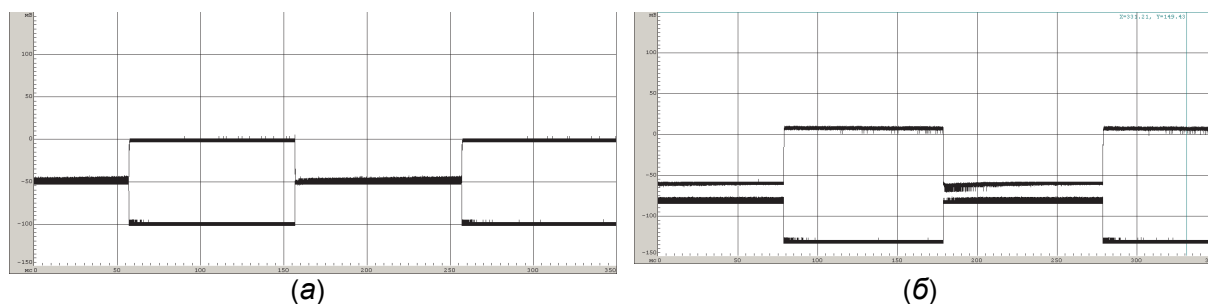


Рис. 1. Электрический отклик гетероструктуры Pt/SiC/Si на воздействие модулированного ИК-излучения: а – без подсветки, б – при подсветке белым светом. Съём сигнала производился в конденсаторной геометрии.

Наряду со стационарным эффектом имела место несколько иная форма ФТКЗ, которая сопровождалась пичками (рис. 2, а). Эти пички наблюдались на переднем и заднем фронтах фотоотклика, причем время из релаксации составляло лишь 5-7 мкс. Наиболее явно они проявлялись в случае, когда падающее излучение попадало на край полупрозрачного платинового электрода

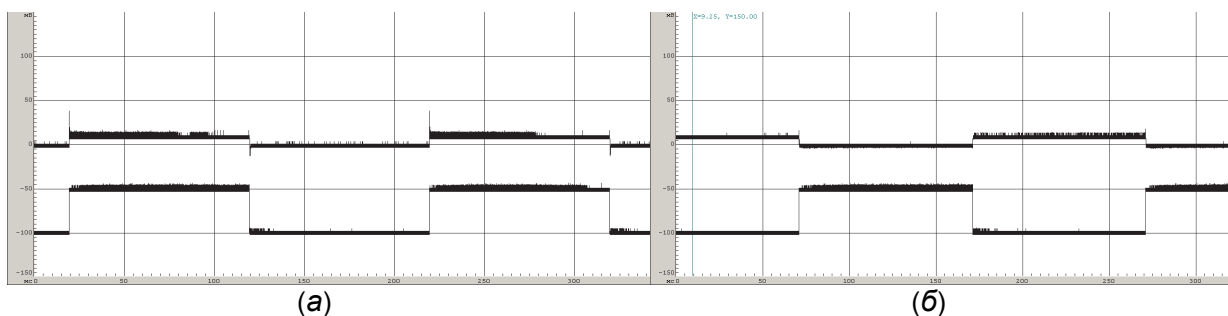


Рис. 2. Электрический отклик гетероструктуры Pt/SiC/Si на воздействие модулированного ИК-излучения при его попадании на край Pt-электрода: а – без подсветки, б – при подсветке белым светом. Съём сигнала производился в конденсаторной геометрии.

При подсветке структуры белым светом пички было обнаружено, что пички исчезли, а направление ФТКЗ изменилось на противоположное (рис. 2, б).

В планарной геометрии, когда съём сигнала осуществлялся с двух соседних Pt электродов, а падающее излучение попадало в пространство между электродами) имел место стационарный отклик, представленный на рис. 3, амплитуда которого зависела от взаимного расположения электродов и площади SiC пленки, облучаемой источником света.

Анализ полученных в работе результатов позволяет сделать несколько выводов. С учетом предположения, что проводимость карбида кремния (SiC) определяется электронными носителями заряда [xx], стационарный сигнал ФТКЗ формируется на р-п переходе, сформированном на границе раздела SiC/Si. Этот сигнал устойчиво наблюдается при использовании кремния, легированного акцепторной примесью (В), и прак-

тически отсутствует в структурах, в которых используется кремний с электронным типом проводимости. Сигнал ФТКЗ наблюдался как при облучении структуры красным светом, так и светом ближнего ИК диапазона.

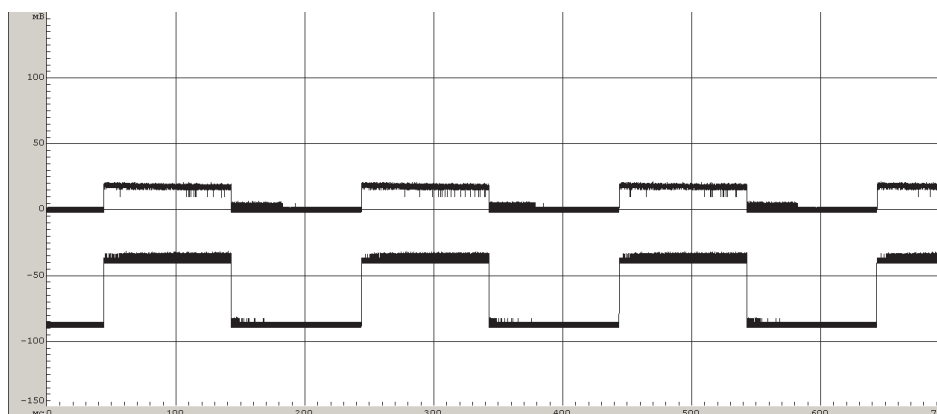


Рис. 3. Электрический отклик гетероструктуры Pt/SiC/Si на воздействие модулированного ИК-излучения при его попадании между Pt-электродами. Съем сигнала производился в планарной геометрии.

Наличие пиков, наблюдаемых на диаграммах ФТКЗ, может свидетельствовать как об их тепловой природе, так и об изменении эквивалентной электрической цепи, когда часть сигнала ФТКЗ дифференцируется емкостью слоя карбида кремния при величине его поверхностного сопротивления порядка 10^4 Ом.

Существование сигнала ФТКЗ, наблюдаемого в планарной геометрии (между соседними электродами) позволяет предполагать наличие существенной структурной неоднородности тонких слоев SiC по его поверхности, что, например, реально проявляется в наличии высокой концентрации пор на границе раздела SiC/Si. Однако надежность проявления как этого, так и других наблюдаемых эффектов в исследуемых структурах будет связана с более тщательной характеристикой структурных свойств сформированных SiC/Si структур, так и статистическим накоплением данных, касающихся их фотоэлектрических свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессолов В.Н., Гращенко А.С., Коненкова Е.В., Мясоедов А.В., Осипов А.В., Редьков А.В., Родин С.Н., Рубец В.П., Кукушкин С.А. Эффект воздействия n- и p-типа проводимости подложки Si(100) с буферным слоем SiC на механизм роста и структуру эпитаксиальных слоев полуполярных AlN и GaN. // ФТТ. 2015. Т. 57. Вып. 10, с. 1916-1921.
2. Кукушкин С.А., Николаев В.И., Осипов А.В., Осипова Е.В., Печников А.И., Феоктистов Н.А. Эпитаксиальный оксид галлия на подложках SiC/Si. // ФТТ. 2016. Т. 58, вып. 9, с. 1812-1817.
3. Kukushkin S.A., Osipov A.V. Theory and practice of SiC growth on Si and its applications to wide-gap semiconductor films. // J Phys D: Appl Phys. 2014. V.47. 313001 (41pp).
4. Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А., Калинина Е.В., Константинов О.В., Константинов А.О., Hallen A. Температурная зависимость квантовой эффективности фотодиодов Шоттки на основе 4H-SiC. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 18, с. 43-49.
5. Беляев А.П., Кукушкин С.А., Осипов А.В., Рубец В.П., Гордеев С.К., Корчагин С.Б.. Исследование оптико-электрических свойств карбидосодержащих тонких пленок на основе кремния. // Письма в ЖТФ. 2006. Т.32. вып.10, с. 1-6.
6. Кукушкин С.А., Осипов А.В. Новый метод твердофазной эпитаксии карбида кремния на кремнии: модель и эксперимент. // ФТТ. 2008. Т. 50. Вып.6, с. 1188-1195.
7. Семенов А.В., Козловский А.А., Пузиков В.М. Фотоэлектрические свойства гетеропереходов n-SiC/nSi. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2012. Вып. 5, с. 27-30.
8. Parsons J.D. IR radiation sensing with SiC. // US Patent, US 6239432 B1. May 29, 2001.