

**ФОТОИНДУЦИРОВАННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ SiC/Si  
В ДИАПАЗОНЕ ВИДИМОГО СВЕТА И БЛИЖНЕГО ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ**

© 2017 г. С.А. ГУДКОВ<sup>1</sup>, А.В. СОЛНЫШКИН<sup>1</sup>, О.Н. СЕРГЕЕВА<sup>1,4</sup>,  
С.А. КУКУШКИН<sup>2</sup>, Н.А. ФЕОКТИСТОВ<sup>3</sup>, И.П. ПРОНИН<sup>3</sup>,  
С.В. СЕНКЕВИЧ<sup>3</sup>, Г.М. НЕКРАСОВА<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Тверской государственной университет,

<sup>2</sup>Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург,

<sup>3</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург,

<sup>4</sup>Тверская государственная сельскохозяйственная академия

В последние годы резко вырос интерес к тугоплавким широкозонным полупроводникам, таким как карбид кремния (SiC), нитрид галлия (GaN), нитрид алюминия (AlN), оксида цинка (ZnO) и т.д. Высокая подвижность электронов, большая величина электрического поля пробоя в сочетании с прекрасными термохимическими характеристиками обуславливают огромные перспективы использования этих материалов для изготовления полупроводниковых приборов различного назначения [1,2]. Пленки карбида кремния, сформированные на подложках из монокристаллического кремния (SiC/Si), используются, в основном, в качестве буферных слоев для формирования гетероструктур на основе AlN, GaN, ZnO для создания высокоэффективных оптоэлектронных устройств [2-5]. В связи с этим исследование отклика на световое воздействие структуры SiC/Si является актуальной физической задачей.

Объектами исследования в работе являлись эпитаксиальные пленки широкозонного полупроводника карбида кремния (политипа 3C-SiC), изготовленные методом замещения углеродом атомов кремния в монокристаллических кремниевых подложках [6]. Использовались подложки легированные ионами фосфора (КЭФ), обладающие *n*-типом проводимости, и ионами бора (КДБ) с проводимостью *p*-типа [6,7]. Толщина слоя карбида кремния составляла порядка 100 нм. На свободную поверхность пленки SiC осаждалась сетка платиновых электродов, в качестве нижнего электрода использовалось серебро, нанесенное на свежий скол кремниевой подложки. Таким образом, исследуемые объекты представляли собой конденсаторные структуры, вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики которых исследовались с помощью универсального измерителя иммитанса Е7-20. Фотовольтаические свойства исследовались в динамическом режиме, когда структуры SiC/Si облучались периодически модулированным излучением с длиной волны 980 нм импульсами прямоугольной формы на частоте 10 Гц [8,9], и в статическом – при исследовании спектральной зависимости стационарного фотоотклика в диапазоне длин волн от 400 до 980 нм. Качество поверхности контролировалось с помощью атомно-силового микроскопа “Смена”, выпущенного компанией НТ-МДТ города Зеленограда (НИИФТ).

В результате проведенных исследований обнаружено, что при облучении пленок SiC, сформированных на подложках КДБ, модулированным лазерным излучением с длиной волны 980 нм формы фотовольтаических откликов зависят от удельного сопротивления  $\rho$  самой пленки [8]: Для структур с высокоомным слоем карбида кремния ( $\rho \sim 1 \text{ МОм}\cdot\text{м}$ ) фотоотклик имеет ярко выраженный начальный импульс тока (1) с последующей релаксацией в течение 10 мс до некоторого стационарного состояния, совпадающего по фазе с опорным сигналом (2). В момент выключения освещения начальный выброс тока направлен в противоположную сторону, релаксация отклика про-

исходит быстрее и практически до нулевого значения (рис. 1, а). В этом случае вольт-амперная зависимость имеет нелинейный (диодный) характер (рис. 1, б). Данные пленочные образцы характеризовались достаточно гладкой поверхностью (рис. 1, в) с незначительной шероховатостью в 20 нм.

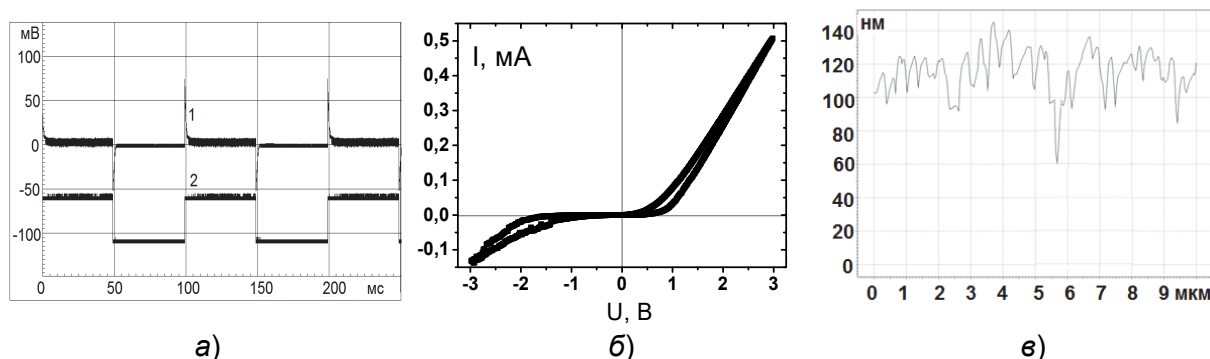


Рис. 1. Фотовольтаический отклик на модулированное ИК-излучение (а); вольт-амперная зависимость (б); профиль поверхности по данным АСМ-измерений (в) высокоомной структуры SiC/Si (КДБ).

Для низкоомных слоев карбида кремния (с сопротивлением  $\sim 4,8$  кОм·м) фотовольтаический отклик принимает стационарную форму (кривая 1 на рис. 2, а), свойственную для полупроводниковых структур, и за счет более развитого рельефа поверхности вольт-амперные характеристики (рис. 2, б) имеют более линейную зависимость с перегибом в нулевом значении (рис. 2, в).

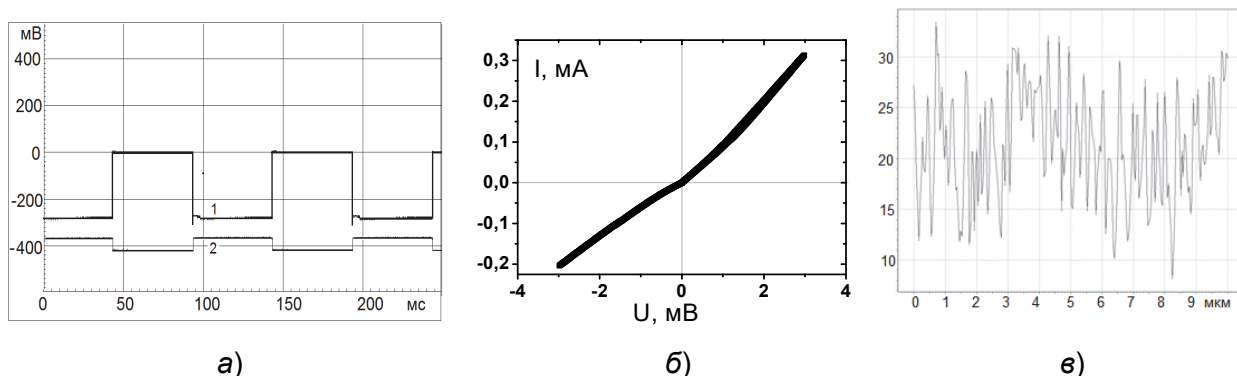


Рис. 2. Фотовольтаический отклик на модулированное ИК-излучение (а); вольт-амперная характеристика (б); профиль поверхности по данным АСМ-измерений (в) низкоомной структуры SiC/Si (КДБ).

При воздействии модулированным излучением на пленки SiC ( $\rho \sim 4$  кОм·м), эпитаксиально выращенные на кремниевых подложках, легированных ионами фосфора (КЭФ) возникает стационарный фотовольтаический отклик (кривая 1 на рис. 3, а), сопровождающийся в момент начала и конца освещения острыми пиковыми выбросами тока, которые совпадают по фазе с опорным сигналом (кривая 2 на рис. 3, а), воспроизводящим форму модулированного ИК-излучения. Как и в случае низкоомных слоев SiC на подложке с *p*-типом проводимости (рис. 2) вольт-амперная характеристика имеет также практически линейную зависимость с изломом в нулевом поле (рис. 3, б) и развитый рельеф поверхности пленки (рис. 3, в).

Спектральные зависимости стационарного фотоотклика пленок SiC, выращенных на подложках с различным типом проводимости, представлены на рис. 4. Как видно из представленных зависимостей, в исследованном интервале длин волн 400 – 700 нм наблюдается рост фототока, однако, в случае низкоомной пленки на подложке КДБ, его направление противоположно, представленным на рис. 4, а и в, а величина на порядок больше.

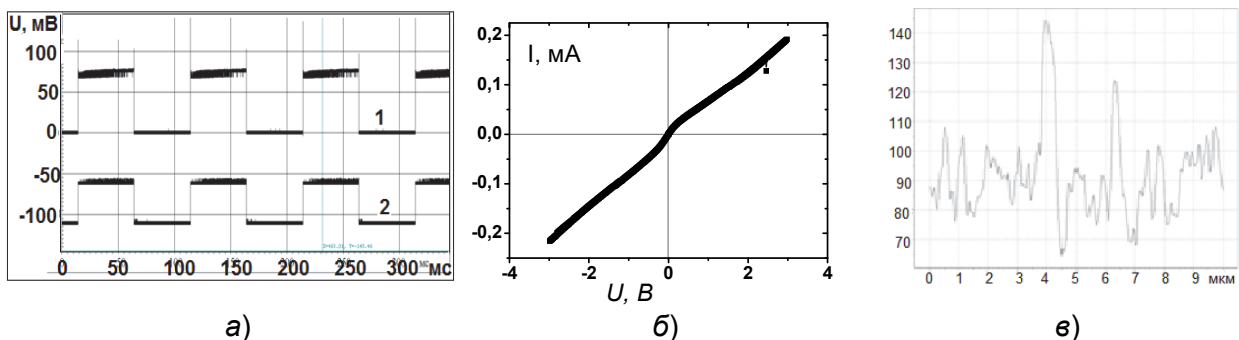


Рис. 3. Фотовольтаический отклик на модулированное ИК-излучение (а); вольт-амперная характеристика (б); профиль поверхности по данным АСМ-измерений (в) структуры SiC/Si (КЭФ).

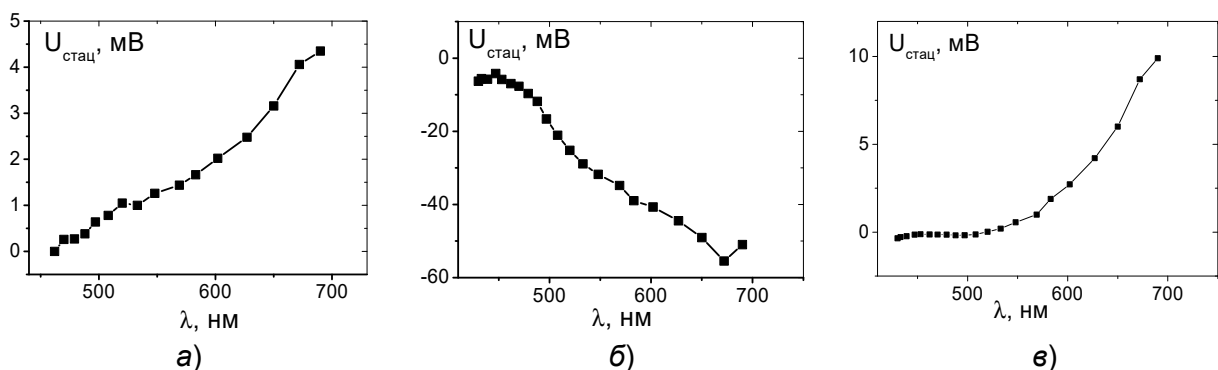


Рис. 4. Спектральные зависимости фототока: а – для высокоомной структуры SiC/Si (КДБ); б – низкоомной (КДБ); в – низкоомной на подложке КЭФ.

Фотопроводимость в слоях карбида кремния в диапазоне длин волн 400-980 нм может возникнуть за счет примесных донорно-акцепторных уровней, находящихся в запрещенной зоне вблизи дефектов или пор, а также за счет возникновения в самой пленке карбида кремния р-п перехода из-за различного проникновения углерода в слои карбида кремния при ее эпитаксиальном росте.

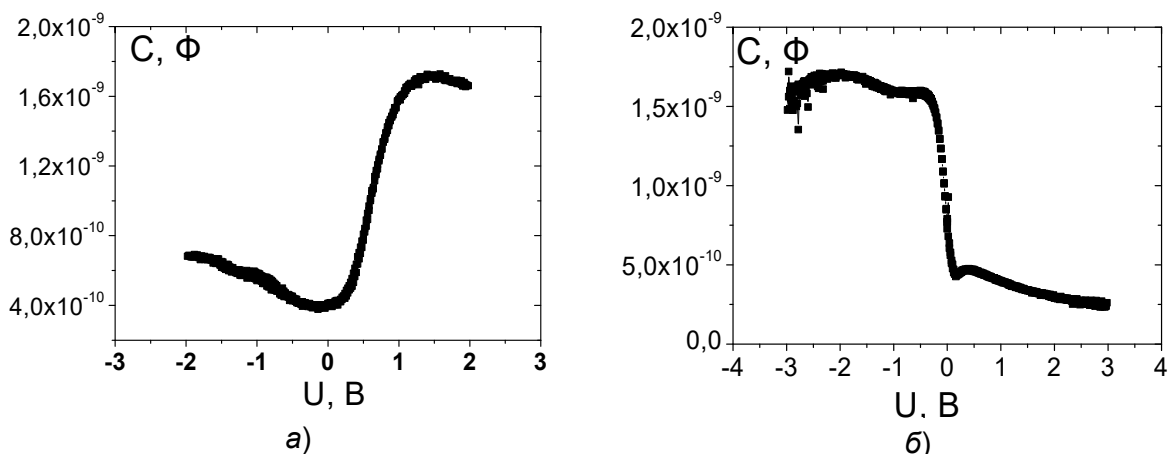


Рис. 5. Вольт-фарадные характеристики для низкоомных слоев SiC, выращенных на кремниевых подложках: а – с *p*-типом проводимости (КДБ); б – с *n*-типом проводимости (КЭФ).

Альтернативным механизмом возникновения фотоэдс может быть и гетеропереход SiC/Si [10], когда излучение поглощается в слое кремния, либо на самой границе раздела слоев за счет наличия потенциальных барьеров в контактной области, связанных с разрывами энергетических зон. Возможным подтверждением этому может быть наличие скачка на C-V характеристиках исследованных структур (рис. 5).

Природа «короткого» (~ 10 микросекунд) нестационарного отклика, возникающего в начале и конце воздействия светового импульса с длиной волны 980 нм, в пленках SiC/КЭФ (рис. 3, а) может быть связана с наличием мелких ловушек и вакансий, возникших в процессе твердофазной эпитаксии карбида кремния на легированных подложках кремния [11, 12].

Таким образом, обобщая полученные в работе результаты, можно заключить, что в гетероструктурах SiC/Si в области видимого диапазона длин волн и ближнего ИК-излучения возникают фотоиндуцированные явления, а наилучшими фотовольтаическими свойствами обладают структуры с низкоомными слоями SiC, эпитаксиально выращенными на кремниевых подложках с *p*-типом проводимости (КДБ).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C.F. Klingshirn, B.K. Meyer, A. Waag, A. Hoffmann, J. Geurts. *Zinc Oxide*. // Springer, Berlin 2010. 374 p.
2. "U. "O zg"ur, Ya.I. Alivov, C. Liu, A. Teke, M.A. Reshchiikov, S. Do"gan, V. Avrutin, S.-J. Cho, H. Morko\_s, J. A comprehensive review of ZnO materials and devices // *Appl. Phys.* 2005. V. 98, 041 301.
3. 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.
4. С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, А.И. Романычев Эпитаксиальный рост оксида цинка методом молекулярного наслаивания на подложках SiC/Si // *Физика твердого тела*. 2016. Т. 58. Вып. 7, с. 1398-1407.
5. 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.
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. 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).
8. Закамский Р.А., А.В. Солнышкин А.В., Сергеева О.Н., Кукушкин С.А., Феоктистов Н.А., Пронин И.П., Некрасова Г.М. Электрический отклик на электромагнитное излучение оптического диапазона гетероструктур на основе SiC/Si. // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*, Т.17, ч.2, с.205-207, М., Энергоатомиздат, 2016.
9. Сергеева О.Н., Закамский Р.А., Солнышкин А.В., Кукушкин С.А., Феоктистов Н.А., Сенкевич С.В., Некрасова Г.М. Фотовольтаический отклик в пленках SiC, эпитаксиально выращенных на кремниевых подложках с проводимостью *p*-типа. // *Материалы XIV Межд. конф. «Физика диэлектриков» (Диэлектрики-2017)*, 29 мая - 2 июня 2017. Т. 1, с. 253-255.
10. Семенов А.В., Козловский А.А., Пузиков В.М.. Фотозлектрические свойства гетеропереходов *n*-SiC/*n*Si. // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2012. Вып. 5, с. 27-30.
11. Брюшинин, А.А. Петров, Р.В. Писарев, И.А. Соколов Нестационарная фотоэдс в широкозонном диэлектрике MnO // *Физика твердого тела*. 2015. Т. 57. Вып. 5, с. 892-897.
12. Брюшинин М.А., Куликов В.В., Мокрушина Е.В., Мохов Е.Н., Петров А.А., Соколов И.А. Нестационарная фотоэдс в кристаллах SiC, облученных реакторными нейтронами // *Физика твердого тела*, 2014. Т.56. Вып. 10, с. 1879-1885.