

ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ ОТ СТЕХИОМЕТРИИ НА СВОЙСТВА ДИФФУЗИОННЫХ $p-n$ -ПЕРЕХОДОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

Андреев А. П., Виолин Э. Е., Левин В. И.,
Таиров Ю. М., Цветков В. Ф., Яременко И. Е.

Приведены результаты исследования быстродействия, фоточувствительности в прямом смещении, а также параметров структуры карбид-кремниевых $p-n^*-n$ -переходов, полученных диффузией бора в кристаллы с отклонением от стехиометрии. Обнаружена однозначная корреляция между фоточувствительностью в ближней ИК области спектра при $\lambda \approx 0.9$ мкм и отклонением от стехиометрии. Обнаружено, что введение избыточных углеродных вакансий увеличивает инерционность $p-n^*-n$ -структур, вероятно, вследствие модуляции заряда глубоких ловушек в базовой области.

О важной роли вакансий углерода в карбиде кремния неоднократно упоминалось в работах, связанных с исследованием борной и дефектной люминесценции [1-3], а также катодолюминесценции кристаллов, имплантированных Al и Ag [4]. Показано, что такие вакансии играют определяющую роль в люминесцентных свойствах материала, оказывая сильное влияние на интенсивность спектров борной люминесценции, особенно для кристаллов, полученных при низких температурах синтеза ($T < 1900$ °C) [2]. Кроме того, существует предположение о решающей роли дефектов в механизме диффузионного распределения бора, например, в виде комплексов «бор+дефект» [5].

Таким образом, из перечисленных работ видно, что присутствие в кристаллах SiC углеродных вакансий во многом определяет не только люминесцентные свойства карбида кремния как материала, но и электрические свойства диффузионных $p-n$ -переходов на его основе. К настоящему времени в многочисленных работах (см., например, [6]) показано, что структура диффузионных $p-n$ -переходов широкозонных полупроводников существенно неоднородна и состоит по крайней мере из трех различных по свойствам слоев: p -, n^* - и n -типа электропроводности, где n^* — компенсированный слой, примыкающий непосредственно к p -типу. От параметров n^* -области в основном зависят вид ВАХ диода и его быстродействие, ограниченное, как правило, процессами модуляции сопротивления базовой области. Кроме того, наличие высокоомных областей в базе диода может приводить к заметной фоточувствительности прямо смещенных диодов как в собственной, так и в примесной областях спектра [7]. В настоящей работе рассматриваются свойства $p-n$ -переходов, полученных диффузией бора в кристаллы с отклонением от стехиометрии. Некоторые из таких свойств, как, например, ток-яркостные и электролюминесцентные характеристики, рассмотрены в [1]. Весь технологический цикл изготовления образцов с изменением отклонения от стехиометрии вдоль оси C и последующей диффузией повторял технологический цикл, изложенный в [1]. Такое воспроизведение всех режимов нами соблюдалось намеренно для уменьшения неоднозначности в интерпретации результатов. Частично исследовались образцы, использованные в работе [1], а также образцы промышленного изготовления — получаемые по методу Лели монокристаллы и эпитаксиальные пленки, выращенные сублимационным методом. Концентрация некомпенсированных до-

Параметры компенсированных слоев

№ диода	Δ , мкм	ρ , Ом·см	d , мкм	C , пФ	$R_{\text{посл.}}$, кОм
1	0.24	$2 \cdot 10^6$	0.15	118	14
2	0.25	$7.6 \cdot 10^5$	0.6	29	23
3	0.25	$1.2 \cdot 10^6$	0.7	25	44
4	0.25	10^6	1.0	18	50
5	0.24	$1.3 \cdot 10^6$	1.2	15	80
6	0.21	$1.1 \cdot 10^6$	1.8	9.5	98
7	0.21	$1.4 \cdot 10^6$	0.3	55	24
8	0.22	$2.5 \cdot 10^6$	0.17	100	22

норов во всех образцах находилась в пределах $(2 \div 7) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Распределение отношения $N_{\text{Si}}/N_{\text{C}}$ вдоль оси C для одного из образцов $4H\text{-SiC}$ показано на рис. 1. Здесь же точками обозначено расположение исследуемых диодов (1—8). Глубина залегания p — n -переходов Δ для рассматриваемых диодов измерялась по развитой в [8] методике анализа диаграммы направленности светодиода при торцевом выводе излучения. Для этого кристалл сошлифовывался до контактов и торец тщательно полировался. Кроме того, глубина залегания p — n -переходов контролировалась по интегральному сигналу катодолюминесценции. Несмотря на то что точность последнего метода, по нашему мнению, ниже, наблюдалось удовлетворительное согласие экспериментальных результатов. Такие параметры компенсированных областей, как удельное сопротивление ρ , протяженность d , измерялись методом линейных диаграмм. С учетом небольших значений емкостей C для n -слоев использовались измерители импеданса с последовательной схемой замещения ВМ-507 и измеритель импеданса и передачи ВЧВМ-538 с рабочей частотой до 100 МГц. В ряде случаев для повышения

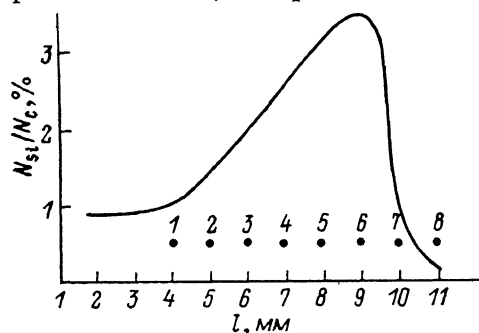


Рис. 1. Распределение отклонения от стехиометрии по длине слитка $4H\text{-SiC}$ и номера диодов (1—8), изготовленных из различных частей слитка.

достоверности значение последовательного сопротивления контролировалось после пробы p — n -переходов на омическом участке ВАХ. В обоих случаях достигалось удовлетворительное согласие экспериментальных данных. Рассчитанные значения исследуемых параметров сведены в таблицу. Как видно, наблюдается однозначная корреляция между отклонением от стехиометрии и протяженностью компенсированных областей. Такой эффект при приблизительно одинаковых значениях удельного сопротивления компенсированных областей приводит к существенному увеличению последовательного сопротивления. По нашему мнению, этот результат свидетельствует об эффективном участии вакансий углерода в диффузии бора по крайней мере с учетом Δ на переходном участке диффузионного распределения между поверхностной и объемной ветвями, где протяженные компенсированные слои могут образовываться с большей вероятностью. Быстродействие диодов оценивалось по длительности фронта импульса тока $t_{\text{ф}}$ между уровнями 0.1 и 0.9 при питании от генератора напряжения.

На рис. 2 представлен график зависимости времени фронта восьми диодов от протяженности компенсированной области. Амплитуда ступеньки напряжения питания подбиралась экспериментально для реализации высокого уровня инжекции, когда реакция всех диодов имела индуктивный характер. В нашем случае амплитуда равнялась 10 В. Насыщение времени фронта при увеличении длины компенсированной области, по всей видимости,

связано с конечным значением диффузионной длины неосновных носителей. Условием для насыщения в этом случае будет $l_p \ll d$, где $l_p = (2b/b+1)^{1/2} L_p$ [8], L_p — диффузионная длина при высоком уровне инжекции, $b = \mu_n/\mu_p$. Полагая $b=5$ [9], получим $L_p \approx 0.5$ мкм, что близко к оценкам, проведенным в [10]. При этом большие значения времени фронта свидетельствуют о том, что процессы в базе по времени ограничены прилипанием основных носителей в компенсированных областях. На это указывает тот факт, что форма импульсов тока при питании одиночными импульсами напряжения близка к S -образной. Это свидетельствует о сильном заполнении уровней прилипания на начальных стадиях нарастания тока [11]. Дополнительным свидетельством прилипания электронов на уровни ловушек является примесная фоточувстви-

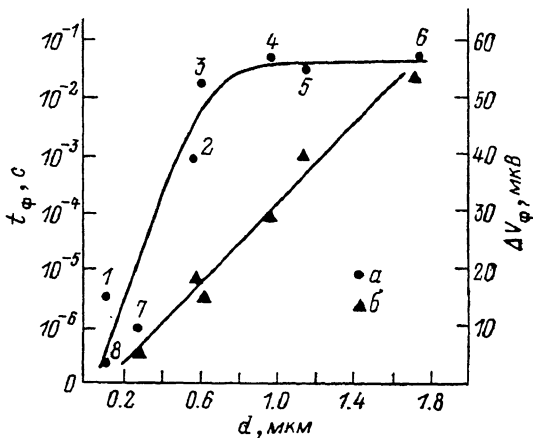


Рис. 2. Зависимость времени фронта (а) и фоточувствительности (б) от длины компенсированной области.

1—8 — то же, что и на рис. 1.

тельность, значение которой зависит от протяженности компенсированной области. Для предотвращения возникновения токовой положительной обратной связи при освещении базы диода все образцы питались от генератора тока. Освещение производилось со стороны базы с расстояния 5 мм. Образцы находились при $T_{ком}$. В качестве источника света использовался GaAs-светодиод типа АЛ-107Б с мощностью излучения 10 мВт на длине волны $\lambda=0.95$ мкм. Сигналом фотоответа в данном случае являлось изменение напряжения на структуре. Зависимость фоточувствительности ΔV_ϕ от протяженности компенсированной области показана на рис. 2. Подробное рассмотрение фоточувствительности диодных структур в ближней ИК области в зависимости от режимов импульсного питания представлено в [12]. Аналогичные измерения фоточувствительности были про-

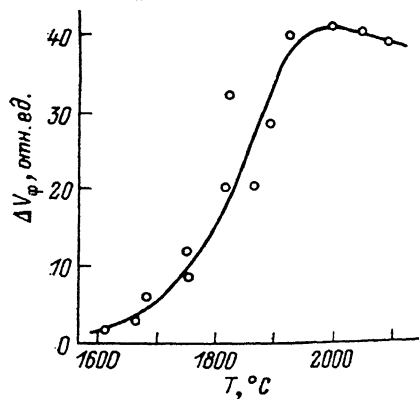


Рис. 3. Зависимость фоточувствительности от температуры диффузии для диодов на основе эпитаксиального 6H-SiC с $N_D - N_A = (2 \div 6) \cdot 10^{18}$ см⁻³.

Для всех температур время диффузии 1 ч.

ведены для диодных структур на основе монокристаллов и эпитаксиальных слоев 6H-SiC. Установлено, что существенное влияние на фоточувствительность оказывает температура диффузии бора. Причем эта зависимость во многом определяется тем, выращен ли образец по методу Лели или получен сублимацией при более низкой температуре. Исследовались эпитаксиальные пленки и монокристаллы с $N_D - N_A = (2 \div 6) \cdot 10^{18}$ см⁻³. При изменении температуры диффузии от 1600 до 2200 °C для образцов, выращенных по методу Лели, наблюдалась слабая фоточувствительность с токовой чувствительностью $S_I = (1 \div 5) \cdot 10^{-3}$ А/Вт, причем прослеживалась слабая тенденция к увеличению фоточувствительности с увеличением температуры диффузии. Иначе обстояло дело с эпитаксиальными пленками. Здесь наблюдался заметный максимум фоточувствительности с S_I , достигающей 0.5 ÷ 1.0 А/Вт для температур диффузии 2000 ÷ 2100 °C (рис. 3). Все образцы, обладающие значительной фоточувстви-

тельностью, имели $t_{\phi} = (1 \div 20) \cdot 10^{-3}$ с для $V_{III} = 5$ В при $T_{комн.}$. При изменении $N_D - N_A$ в пределах $(2 \div 6) \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$ различий в поведении фоточувствительности не наблюдалось.

Таким образом, полученные результаты подтверждают предположение, изложенное в [3], о различной, с точки зрения электрической активности, природе дефектов типа углеродных вакансий для низкотемпературных и высокотемпературных образцов. При этом наличие вакансий приводит к изменению не только люминесцентных свойств карбида кремния, но и структуры электронно-дырочных переходов, полученных диффузией бора, что проявляется в изменении протяженности компенсированных слоев и приводит к существенному изменению фоточувствительности таких структур. Указанные особенности находят практическое применение при разработке фоточувствительных структур на основе SiC для приемников длинноволнового диапазона спектра.

Список литературы

- [1] Левин В. И., Тайров Ю. М., Цветков В. Ф. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 7. С. 1194—1198.
- [2] Водаков Ю. А., Жумаев Н., Зверев Б. П. и др. // ФТП. 1977. Т. 11. В. 2. С. 373—378.
- [3] Водаков Б. А., Гончаров Е. Е., Ломакина Г. А. и др. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 2. С. 207—211.
- [4] Одинг В. Г., Водаков Ю. А., Калинина Е. В. и др. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 4. С. 700—703.
- [5] Константинов А. О. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 1. С. 164—168.
- [6] Водаков Ю. А., Мохов Е. Н., Рейфман М. В. // ФТТ. 1966. Т. 8. В. 6. С. 1298—1299.
- [7] Виолина Г. Н., Холуянов Г. Ф. // Радиотехн. и электрон. 1966. Т. 11. В. 11. С. 2034—2038.
- [8] Виолин Э. Е., Воронов А. И., Яременко Е. И. // Тез. докл. III Всес. совещ. «Физика и технология широкозонных полупроводников». Махачкала, 1986. С. 102.
- [9] Литвин Д. П., Мальцев А. А., Наумов А. А. и др. // Письма ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 20. С. 1247—1251.
- [10] Мохов Е. Н., Рамм М. Г., Роенков А. Д. и др. // Техн. средств связи. Серия ОТ. 1982. № 25. С. 28—36.
- [11] Рывкин С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М., 1963. 494 с.
- [12] Виолин Э. Е., Яременко И. Е. // Изв. ЛЭТИ. Л., 1989. № 414. С. 36—41.

Ленинградский
электротехнический институт
им. В. И. Ульянова (Ленина)

Получена 19.10.1989
Принята к печати 2.01.1990