

# Изменение характеристик оксидных пленок гадолиния, титана и эрбия на поверхности $n$ -6H-SiC под воздействием сверхвысокочастотной обработки

© Ю.Ю. Бачериков, Р.В. Конакова, В.В. Миленин, О.Б. Охрименко<sup>†</sup>, А.М. Светличный\*, В.В. Поляков\*

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины,  
03028 Киев, Украина

\* Таганрогский государственный радиотехнический университет,  
Таганрог, Россия

(Получена 6 ноября 2007 г. Принята к печати 14 ноября 2007 г.)

Методами оптического поглощения и фотолюминесценции исследовано влияние сверхвысокочастотного (СВЧ) воздействия на свойства пленок оксидов Ti, Gd, Er, осажденных на карбиде кремния. Проведен анализ атомарного состава исследуемых пленок в зависимости от времени сверхвысокочастотной обработки. Показано, что сверхвысокочастотное воздействие приводит к появлению дополнительной полосы в спектрах фотолюминесценции исследуемых структур. Установлено, что длительная сверхвысокочастотная обработка приводит к росту коэффициента пропускания образцов, что является свидетельством улучшения интегральных характеристик структуры.

PACS: 68.35.Dv, 61.82.Fk, 78.68.+m, 81.40.Wx

## 1. Введение

Условия эксплуатации полупроводниковой элементной базы определяют требования к уровню ее устойчивости к различного рода воздействиям. Поэтому одной из важнейших задач современной микроэлектроники является изучение влияния различного типа внешних воздействий на свойства полупроводниковых материалов и приборов, создаваемых на основе карбида кремния, с целью выявления механизмов эволюции (деградации) свойств этих материалов и приборов при данном воздействии, а также поиск новых технологических методов целенаправленного управления их свойствами. В частности, актуальным является исследование влияния микроволнового излучения на приборные структуры на основе карбида кремния.

Именно состояние дефектов собственного или примесного происхождения в значительной степени определяет эксплуатационные и деградационные характеристики полупроводниковых приборов. Известно, что сверхвысокочастотное (СВЧ) излучение, воздействуя на приборные структуры и готовые изделия (диоды, транзисторы, интегральные схемы), приводит в ряде случаев к их катастрофическим отказам [1]. С другой стороны, в литературе есть данные, в которых указывается на стимулированные СВЧ излучением эффекты геттерирования дефектов и структурной релаксации в полупроводниковых материалах [2–4]. Кроме того, наличие диэлектрических пленок на поверхности полупроводника может приводить к уменьшению дефектообразования, вызванного СВЧ воздействием [5], что способствует улучшению качества приборных структур. Так, высокая термическая устойчивость, большие значения диэлектрической проницаемости и относительная простота технологических процессов выращивания

пленок ряда оксидов редкоземельных элементов делают их перспективными для получения изолирующих слоев, используемых в технологии ряда полупроводниковых приборов и интегральных схем (ИС). Такие пленки эффективно применяются в качестве просветляющих покрытий кремниевых фотоэлектрических приборов [6]. Кроме того, в работе [6] показано, что нанесение пленок оксида эрбия на кремний приводит к увеличению времени жизни неравновесных носителей заряда и уменьшению скорости поверхностной рекомбинации, что указывает на высокую эффективность и перспективность использования диэлектрических пленок оксида эрбия в качестве пассивирующих покрытий кремниевых активных элементов и ИС.

Цель данной работы заключается в исследовании влияния сверхвысокочастотной обработки на оптические свойства тонких оксидных слоев титана, гадолиния и эрбия, полученных с использованием быстрого термического отжига (БТО) на поверхности монокристаллов  $n$ -6H-SiC, выращенных методом Лели.

## 2. Образцы и методы исследования

Пленки редкоземельных металлов наносились на SiC термическим методом распыления. Оксидные пленки металлов получали окислением тонких пленок Ti, Er и Gd в среде сухого кислорода на вакуумной импульсной термической установке ИТО-18МВ [7] при  $T = 623$  К в течение 1, 3 и 5 с. Толщина собственно карбида кремния составляла  $530 \pm 10$  мкм.

Толщина пленок оксида, оцененная с помощью многолучевой эллипсометрии, составляла приблизительно 35–65 нм для пленок оксида титана, 45–70 нм для пленок оксида гадолиния и 100–145 нм для пленок оксида эрбия [8].

<sup>†</sup> E-mail: olga@isp.kiev.ua

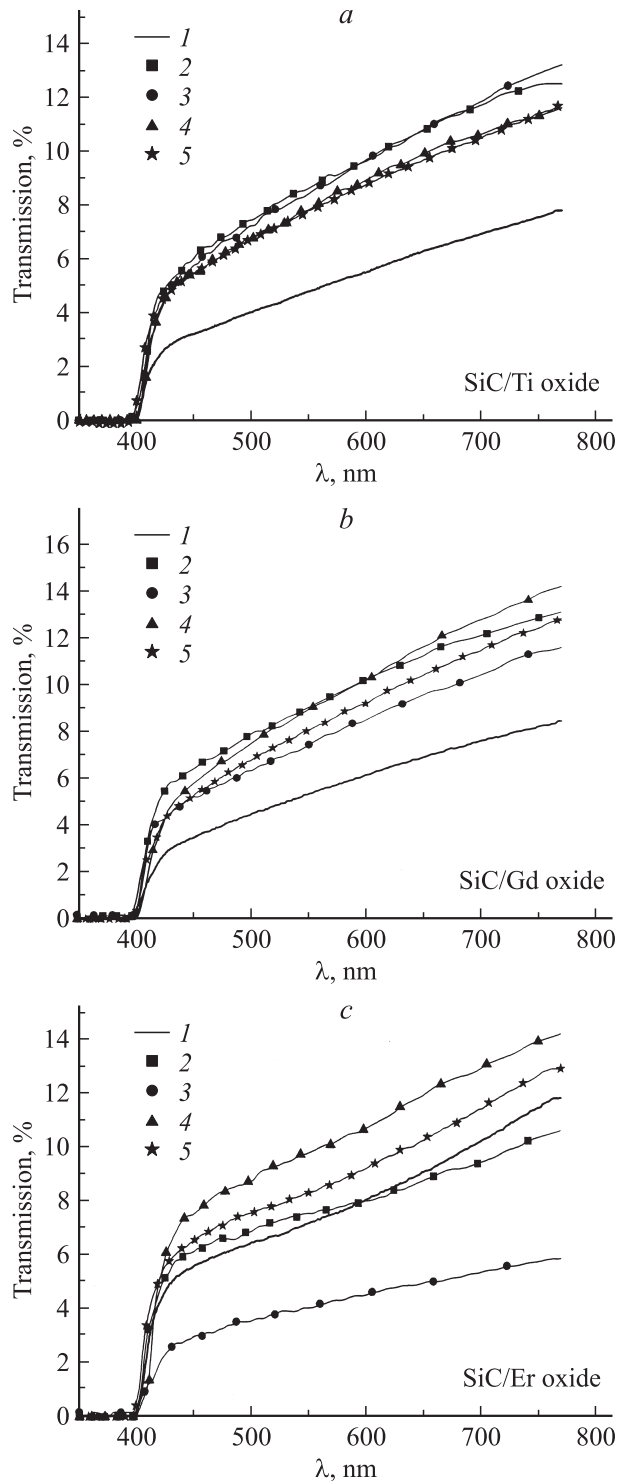
Для всех образцов в области  $\lambda = 370\text{--}800$  нм были получены спектры пропускания и фотолюминесценции (ФЛ). Спектры ФЛ были получены со стороны оксидной пленки и регистрировались на установке СДЛ-2. В качестве источника для возбуждения спектров ФЛ использовалось излучение азотного лазера ( $\lambda_{\text{exc}} = 337$  нм). Спектры поглощения были получены на установке SPECORD UV VIS. Все оптические измерения проводились при комнатной температуре.

СВЧ обработка производилась в рабочей камере магнетрона с частотой  $f = 2.45$  ГГц, удельной мощностью  $0.04$  Вт/см<sup>3</sup>. Суммарное время СВЧ отжига составляло 8 с. Длительность однократного СВЧ облучения образца составляла от 1 до 5 с.

### 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

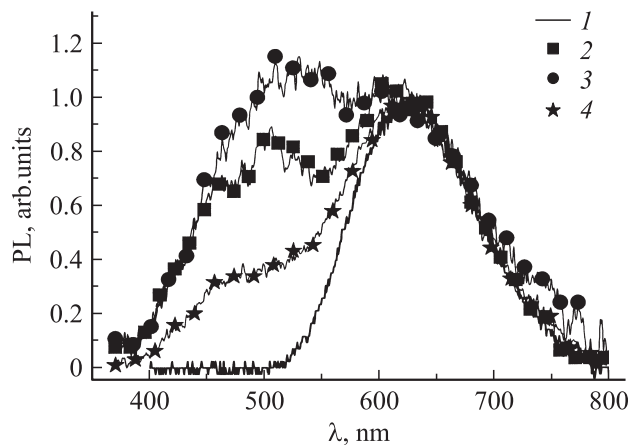
На рис. 1 приведены спектры пропускания исследуемых структур. Как видно из рис. 1, после СВЧ облучения, когда суммарное время СВЧ обработки составляло 8 с, наблюдалось увеличение коэффициента пропускания для всех образцов. Аналогичный эффект роста коэффициента пропускания после СВЧ воздействия наблюдается для структур SiC/SiO<sub>2</sub> [9]. Однако, при общей тенденции к росту коэффициента пропускания при увеличении времени СВЧ обработки, в спектрах пропускания структур SiC/оксидная пленка имеются особенности, обусловленные составом оксидной пленки. Спектры пропускания для структур с оксидными пленками Ti и Gd (рис. 1, *a, b*) имеют качественно подобные зависимости спектров от времени СВЧ воздействия, и увеличение пропускания для структур с пленками Ti и Gd наблюдается уже при минимальном времени СВЧ облучения. Зависимость спектров пропускания структур SiC/(оксидная пленка Er) от времени СВЧ облучения имеет немонотонный характер (рис. 1, *c*).

На рис. 2 приведены спектры ФЛ, зарегистрированные со стороны окисленной металлической пленки, до (рис. 2, кривая 1) и после СВЧ воздействия (рис. 2, кривые 2–4), суммарное время СВЧ воздействия составляло 8 с. Для удобства спектры нормированы по максимуму полосы ФЛ. Спектральная характеристика ФЛ всех образцов до СВЧ облучения одинакова (рис. 2, кривая 1). Как видно из рис. 2, в спектрах ФЛ как до, так и после СВЧ обработки присутствует полоса, максимум которой находится в области  $\lambda = 630$  нм. Такая полоса ФЛ связывается в литературе [10–12] с излучательными переходами в центрах примесь–дефект. В работе [13] эту полосу связывают с рекомбинационными процессами, обусловленными наличием дефектов вблизи поверхности кристалла карбида кремния. СВЧ обработка приводит к появлению в спектре ФЛ исследуемой структуры дополнительной широкой полосы. Как видно из рис. 2, положение максимума этой полосы зависит от состава пленки оксида. Так, для структуры SiC/(пленка оксида Ti) максимум данной полосы находится в области 520 нм (рис. 2, кривая 2), для структуры

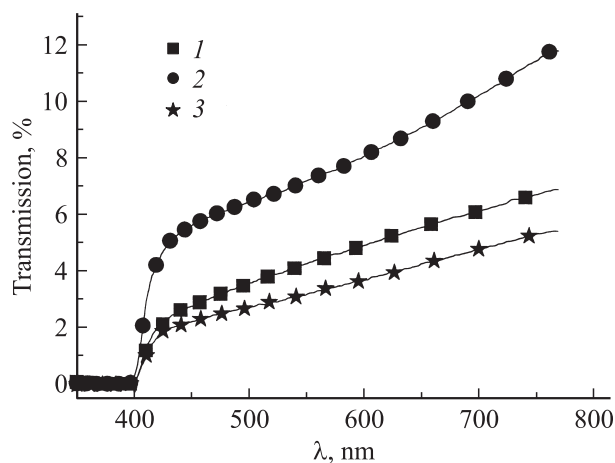


**Рис. 1.** Спектры пропускания структур SiC/пленка оксида: *a* — окисел Ti, *b* — окисел Gd, *c* — окисел Er. 1 — исходный образец; 2 — суммарное время СВЧ обработки, с: 2 — 1, 3 — 2, 4 — 3, 5 — 8.

SiC/(пленка оксида Gd) — в области 500 нм (рис. 2, кривая 3), а для структуры SiC/(пленка оксида Er) — в области 470 нм (рис. 2, кривая 4). Появление в спектрах ФЛ карбида кремния дополнительной полосы в



**Рис. 2.** Спектры фотолуминесценции структур SiC/пленка окисла металла до (спектр 1 — исходная структура) и после СВЧ обработки (2 — SiC/окисел Ti, 3 — SiC/окисел Gd, 4 — SiC/окисел Er). Суммарное время СВЧ обработки 8 с.



**Рис. 3.** Спектры пропускания структур SiC/окисел после СВЧ обработки в течение 8 с: 1 — SiC/окисел Ti, 2 — SiC/окисел Gd, 3 — SiC/окисел Er.

области 400–500 нм в литературе связывают с наличием центров люминесценции, обусловленных собственными дефектами [14] или нарушением стехиометрии кристаллов карбида кремния [15]. Авторы [16] рассматривают центр, обуславливающий появление коротковолновой полосы ФЛ ( $\lambda_{\max} \approx 500$  нм), как комплекс дефектов. Как видно из рис. 2, относительная интенсивность дополнительной коротковолновой полосы по отношению к интенсивности основной полосы ФЛ (полосы с максимумом в области 630 нм) зависит от состава пленки окисла, причем интенсивность данной полосы пропорциональна пропусканию пленки (рис. 3).

Спектры поглощения и ФЛ анализируемых структур являются своего рода интегральными характеристиками структуры. Поскольку в исследуемой области пленки окислов эрбия, гадолиния и титана являются прозрачными [17–19], а глубина проникновения возбуждающего излучения лазера для монокристаллов *n*-SiC состав-

ляет порядка 10 нм, можно считать, что спектр ФЛ в основном обусловлен вкладом карбида кремния на границе раздела SiC/(пленка окисла). Следовательно, особенности изменений в спектрах ФЛ всей структуры будут в первую очередь обусловлены изменениями свойств оксидной пленки и карбида кремния на границе раздела SiC/(пленка окисла металла), возникающими за счет СВЧ облучения. В то же время спектр пропускания будет отражать как поверхностные, так и объемные характеристики всей структуры. Так, в спектрах поглощения образцов край поглощения каждого отдельного образца будет определяться тем компонентом структуры, который в данной области имеет максимальный коэффициент поглощения.

Для того чтобы оценить степень теплового воздействия СВЧ излучения на образец, оценим изменение температуры  $\Delta T$  в результате такого воздействия. Поскольку слой окисла не поглощает СВЧ излучения [20], образец может нагреваться только за счет поглощения СВЧ излучения в полупроводнике. Предположим, что образец полностью поглощает СВЧ излучение, тогда максимально возможную температуру нагрева образца можно рассчитать по формуле

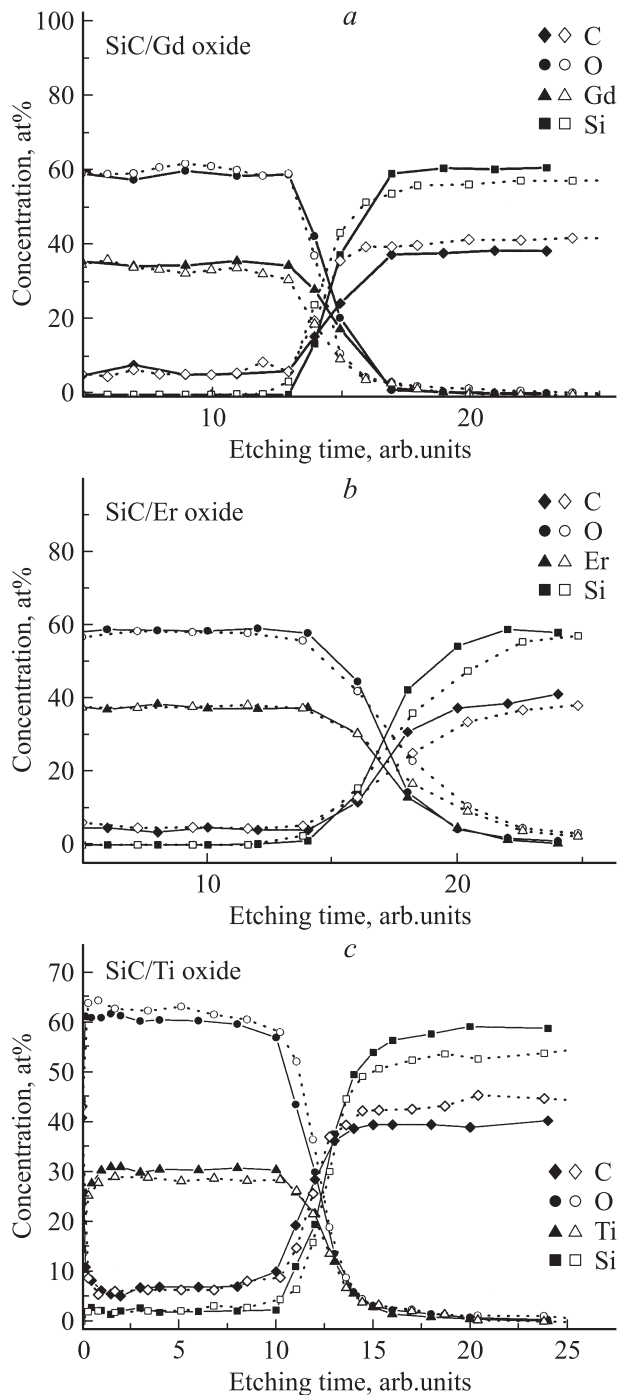
$$\Delta T = \frac{E}{VC\rho},$$

где  $C$  — теплоемкость образца,  $\rho$  — плотность образца,  $V$  — объем образца, в нашем случае средний объем образца  $\bar{V} = 0.0125$  см<sup>3</sup>,  $E = Wt$  — энергия, которую может получить образец за время  $t$ ,  $W = PV$  — мощность СВЧ излучения, приходящаяся на объем образца,  $P$  — удельная мощность СВЧ излучения. Для карбида кремния использовались значения:  $C = (620\text{--}750)$  Дж/(кг · град),  $\rho = 3170$  кг/м<sup>3</sup> [20]. Получаем, что за время облучения 1 с температура образца может измениться на  $\Delta T = 0.02$  К.

Таким образом, вклад теплового механизма в модели для объяснения наблюдаемых изменений свойств оксидной пленки и карбида кремния на границе раздела SiC/(пленка окисла металла), возникающих за счет СВЧ облучения, можно исключить.

Увеличение пропускания образцов после СВЧ обработки можно объяснить несколькими причинами. Первая — под действием СВЧ обработки происходит изменение стехиометрии оксидной пленки, за счет чего уменьшаются потери на рассеяние света на границе раздела (пленка окисла)/SiC. Второй причиной является изменение под действием СВЧ облучения градиента внутренних механических напряжений и уменьшение количества внутренних границ раздела, обусловленных наличием дислокационных плоскостей в объеме карбида кремния, что также может приводить к снижению потерь на рассеяние света внутри образца. Однако для более однозначной трактовки вклада влияния СВЧ воздействия на объемные свойства карбида кремния с целью разграничения эффектов, обусловленных собственно подложкой SiC и напряжениями, возникающими на границе раздела пленка/подложка, необходимо привести дополнительные исследования.

Появление дополнительной примесно-дефектной полосы ФЛ в результате СВЧ облучения оксидной пленки хорошо согласуется с данными оже-спектрометрии. На рис. 4 приведен характерный вид профилей распределения элементов в данных структурах, полученных методом электронной оже-спектроскопии до и после СВЧ обработки. Как видно из рис. 4, для всех исследуемых



**Рис. 4.** Содержание элементов в ат% в образцах. *a* — SiC/окисел Gd, *b* — SiC/окисел Er, *c* — SiC/окисел Ti. Сплошные кривые и темные символы — исходные образцы, пунктирные кривые и светлые символы — образцы после СВЧ обработки.

структур после СВЧ обработки наблюдается изменение параметров границы раздела (пленка окисла)—SiC (рис. 4).

В структурах пленка—подложка из-за рассогласования постоянных кристаллических решеток слоя и подложки наблюдается наличие механических напряжений [21]. Другим не менее важным фактором, который вызывает возникновение напряжений в гетероструктурах, является различие коэффициентов теплового расширения оксидного слоя и подложки. Поскольку толщина слоя окисла меньше толщины подложки, особенно существенны будут механические напряжения в слоях. Согласно [22], зоны локальной кривизны на границе раздела подложка—пленка являются концентраторами напряжений. При этом накопление дислокаций в приповерхностном слое оказывается более интенсивным, чем в объеме образца [22]. Тем более при факторах, способствующих увеличению подвижности дислокаций, как, например, СВЧ воздействию.

Наличие напряжений отрицательно сказывается на качестве структур: снижается их прочность, активизируются деградационные процессы в приборах, изготовленных из таких структур.

Появление дополнительной полосы ФЛ (рис. 2), связанной с примесно-дефектным комплексом [14–16], обусловлено локализацией на границе раздела SiC/(пленка окисла) структурных дефектов, стимулированных СВЧ воздействием, и наличием механических напряжений. Изменение положения максимума дополнительной полосы ФЛ является следствием различной величины биаксиальных напряжений на границе раздела SiC/(пленка окисла) и зависит от параметров пленки окисла металла [21]. Причем наблюдаемый незначительный сдвиг дополнительной полосы ФЛ в зависимости от состава пленки окисла указывает на изменение величины напряжений. Поскольку положение максимума дополнительной полосы ФЛ в том случае, когда на поверхность карбида кремния нанесена пленка оксида эрбия, практически совпадает с положением максимума аналогичной полосы ФЛ в карбиде кремния [16], можно считать, что оксидные пленки эрбия создают минимальные напряжения на границе раздела SiC/(пленка окисла). Сдвиг максимума дополнительной полосы ФЛ в сторону больших длин волн (рис. 2) указывает на возникновение напряжений растяжений в том случае, когда на поверхность карбида кремния нанесены пленки оксида титана или гадолиния.

Однако для более однозначного выявления природы дополнительной коротковолновой полосы в спектрах ФЛ требуются дальнейшие исследования. Неизменное положение максимума основной полосы ФЛ ( $\lambda_{\max} = 630$  нм) свидетельствует о локализации центров, обуславливающих эту полосу, в объеме кристалла SiC.

#### 4. Заключение

Таким образом, описанные результаты указывают на существенное влияние СВЧ облучения на параметры структуры SiC/(пленка окисла титана (гадолиния или

эрбия)). При этом, несмотря на появление структурных дефектов на границе раздела SiC/(пленка окисла), о чем свидетельствует появление дополнительной полосы в спектрах ФЛ исследуемых структур, наблюдается тенденция к улучшению интегральных характеристик структуры, что проявляется в росте пропускания образцов.

## Список литературы

- [1] С.Б. Блудов, Н.П. Гадецкий, К.А. Кравцов, Ю.В. Лонин, И.И. Магда, С.И. Найстетер, Е.А. Прасол, Ю.Ф. Прокопенко, С.С. Пушкарев, Ю.В. Ткач, И.В. Харченко, В.И. Чумаков. *Физика плазмы*, **20** (7), 712 (1994).
- [2] А.А. Беляев, А.Е. Беляев, И.Б. Ермолович, С.М. Комирченко, Р.В. Конакова, В.Г. Ляпин, В.В. Миленин, Е.А. Соловьев, М.В. Шевелев. *ЖТФ*, **68** (12), 49 (1998).
- [3] T.G. Kryshtab, P.M. Lytvyn, M.A. Masin, I.V. Prokopenko. *Metal Phys. Adv. Technol.*, **19** (3), 71 (1997).
- [4] Д.Е. Абдурахимов, В.Л. Верещагин, В.П. Калинушкин, В.А. Никитин, М.Г. Плоппа, М.Д. Райзер. *Кр. сообщ. по физике*, **6**, 27 (1991).
- [5] О.Б. Охрименко. *Петербургский журн. электроники*, **1** (42), 27 (2005).
- [6] М.А. Родионов, В.А. Рожков. *Письма ЖТФ*, **31** (3), 55 (2005).
- [7] А.М. Светличный, Д.А. Сеченов, В.М. Бурштейн, Л.В. Воронцов, В.В. Поляков, С.И. Соловьев, О.А. Агеев. *Электронная промышленность*, **3**, 6 (1991).
- [8] Ю.Ю. Бачериков, Н.Л. Дмитрук, Р.В. Конакова, О.С. Кондратенко, О.С. Литвин, В.В. Миленин, О.Б. Охрименко, Л.М. Капитанчук, А.М. Светличный, В.В. Поляков, А.А. Шелкунов. *ЖТФ*, **77** (2), 107 (2007).
- [9] Ю.Ю. Бачериков, Р.В. Конакова, А.Н. Кочеров, П.М. Литвин, О.С. Литвин, О.Б. Охрименко, А.М. Светличный. *ЖТФ*, **73** (5), 75 (2003).
- [10] Г.К. Сафаралиев, Ю.Н. Эмиров, М.К. Курбанов, Б.А. Билялов. *ФТП*, **34** (8), 929 (2000).
- [11] Lyle Patrick, W.J. Choyke. *Phys. Rev. B*, **5** (8), 3253 (1972).
- [12] W.J. Choyke, Lyle Patrick. *Phys. Rev. B*, **4** (6), 1843 (1971).
- [13] И.С. Горбань, С.Н. Рудько. *ФТТ*, **5** (5), 1368 (1963).
- [14] В.В. Макаров. *ФТТ*, **13** (8), 2357 (1971).
- [15] В.И. Левин, Ю.М. Таиров, В.Ю. Цветков. *ФТП*, **18** (7), 1194 (1984).
- [16] A.O. Konstantinov, A. Heryu, C.I. Harris, E. Janzen. *Appl. Phys. Lett.*, **66** (17), 2250 (1995).
- [17] В.А. Рожков, М.А. Родионов. *Письма ЖТФ*, **31** (2), 67 (2005).
- [18] N.K. Sahoo, R.V. Tokas, S. Thakur. *Appl. Surf. Sci.*, **253** (4), 1787 (2006).
- [19] S. Thakur, N.K. Sahoo, M. Senthilkumar, R.V. Tokas. *Opt. Mater.*, **27**, 1402 (2005).
- [20] Ю.К. Ковнеристый, И.Ю. Лазарева, А.А. Раваев. *Материалы, поглощающие СВЧ излучение* (М., Наука, 1982) с. 51.
- [21] Г.П. Пека, В.Ф. Коваленко, В.Н. Куценко. *Люминесцентные методы контроля параметров полупроводниковых материалов и приборов* (Киев, Техника, 1986) с. 131.
- [22] В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, А.В. Панин, Д.Д. Моисеенко. *ЖТФ*, **77** (8), 62 (2007).

Редактор Т.А. Полянская

## The change of the characteristics of the gadolinium, titan and erbium oxide film on the *n*-6H SiC surface under the microwave treatment influence

Yu.Yu. Bacherikov, R.V. Konakova, V.V. Milenin, O.B. Okhrimenko, A.M. Svetlichny\*, V.V. Polyakov\*

Lashkarev Institute of Semiconductor Physics,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
03028 Kiev, Ukraine

\* Taganrog State University of Radio Engineering,  
Taganrog, Russia

**Abstract** The influence of the microwave treatment on the properties of the Ti, Gd, Er oxide films on the silicon carbide by the optical absorption and photoluminescence methods has been investigated. The analysis of atomic structure of the researched films depending on the time of the microwave influence was carried out. It is shown, that the microwave results influence is occurrence to an additional line in the photoluminescence spectra of the researched structures. It is established, that the long-lived microwave processing results to propagation of a transmittance of the samples that is the certificate of improvement of the integrated characteristics of structure.