

06;07;09;11;12

Влияние сверхвысокочастотного отжига на структуры двуокись кремния—карбид кремния

© Ю.Ю. Бачериков,¹ Р.В. Конакова,¹ А.Н. Кочеров,² П.М. Литвин,¹ О.С. Литвин,¹
О.Б. Охрименко,¹ А.М. Светличный²

¹ Институт физики полупроводников НАН Украины,
03028 Киев, Украина,
e-mail: olga@isp.kiev.ua

² Таганрогский государственный радиотехнический университет,
Таганрог, Россия
e-mail: svetlich@tsure.ru

(Поступило в Редакцию 24 июля 2002 г.)

Методами атомно-силовой микроскопии и спектроскопии оптического поглощения исследовано влияние СВЧ воздействия на свойства структур SiO₂/SiC, полученных методами быстрого термического отжига и обычного термического окисления в парах воды. На основании анализа зависимостей изменения оптической плотности образцов от суммарного времени СВЧ воздействия сделан вывод о том, что наиболее устойчивыми к СВЧ воздействию являются структуры, полученные методом быстрого термического отжига. Показано, что длительное СВЧ воздействие приводит к выравниванию поверхности пленок окисла на наноуровне независимо от способа окисления карбида кремния.

Введение

Наличие локализованных состояний в диэлектрическом слое и на границе диэлектрик–полупроводник в значительной степени определяет стабильность и надежность приборов на основе структур металл–диэлектрик–полупроводник. Особенно существенным этот фактор является для карбидкремниевых структур, которые используются в приборах, рассчитанных на работу при более высоких температурах, чем кремниевые и арсенидгаллиевые.

Наряду с традиционными радиационными факторами все возрастающий интерес для разработчиков элементной базы и изделий электронной техники представляет воздействие сверхвысокочастотного излучения. СВЧ воздействие может приводить к флуктуациям неоднородности распределения легирующих примесей, дефектов на поверхности и в объеме структуры [1]. Указанные физические эффекты в ряде случаев могут являться причиной изменения электрических и функциональных характеристик полупроводниковых элементов. В качестве неразрушающих способов изучения влияния СВЧ воздействия на полупроводниковые структуры могут быть использованы оптические методы и атомно-силовая микроскопия.

Целью данной работы являлось исследование влияния СВЧ облучения на структуры SiO₂/SiC.

Образцы и методы исследования

В настоящей работе исследовались спектры оптического пропускания, а также морфология поверхности структур SiO₂/SiC, полученных путем окисления карбида кремния *n*-типа (политип 6H-SiC), выращенного

методом Лэли с концентрацией свободных электронов $2-3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Пленки SiO₂ выращивались на карбиде кремния двумя методами. Первый — метод обычного термического окисления (ОТО) в парах воды при температуре 1373 К, время окисления от 30 до 180 min. В качестве второго метода окисления карбида кремния использовался метод быстрого термического отжига (БТО) в атмосфере сухого кислорода при температуре 1273 К. Время окисления составляло от 60 до 180 s. Перед выращиванием SiO₂ образцы карбида кремния подвергались химической очистке по стандартной технологии. Окисление осуществлялось одновременно на гранях (0001) и (000 $\bar{1}$). Толщина собственно карбида кремния была $450 \pm 5 \mu\text{m}$. Толщина пленок окисла, оцененная с помощью эллипсометрии, составляла приблизительно 6–10 nm.

Был проведен сравнительный анализ оптических характеристик и морфологии поверхности структур SiO₂/SiC, подвергнутых многократному СВЧ отжигу в рабочей камере магнетрона с частотой $f = 2.45 \text{ GHz}$, удельной мощностью 1.5 W/cm^2 , в зависимости от метода получения пленки SiO₂ на карбиде кремния. Время однократного СВЧ отжига составляло 10 s.

Исследование морфологии поверхности методом атомно-силовой микроскопии проводилось с помощью серийного микроскопа NanoScope IIIa в контактном режиме сканирования.

Спектры пропускания регистрировались на установке СДЛ-2 при комнатной температуре в области 400–800 nm. В качестве источника непрерывного спектра использовалась спектральная лампа СИРШ-200.

Использование атомно-силовой микроскопии в совокупности с исследованием оптического пропускания позволяет получить информацию как о влиянии СВЧ

воздействия на поверхность пленок окисла, так и о процессах, происходящих под действием СВЧ в объеме образца.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Исследование поверхности пленок окисла показало, что, как характерно для роста пленок окислов [2,3], при окислении образцов рост пленки окисла начинается на центрах зарождения, которыми, как правило, являются протяженные прямолинейные дефекты на поверхности карбида кремния. После образования сплошной пленки окисла на поверхности были обнаружены так называемые кристаллические щетки конусообразной формы диаметром до $10 \mu\text{m}$. Кроме того, на поверхности образцов,

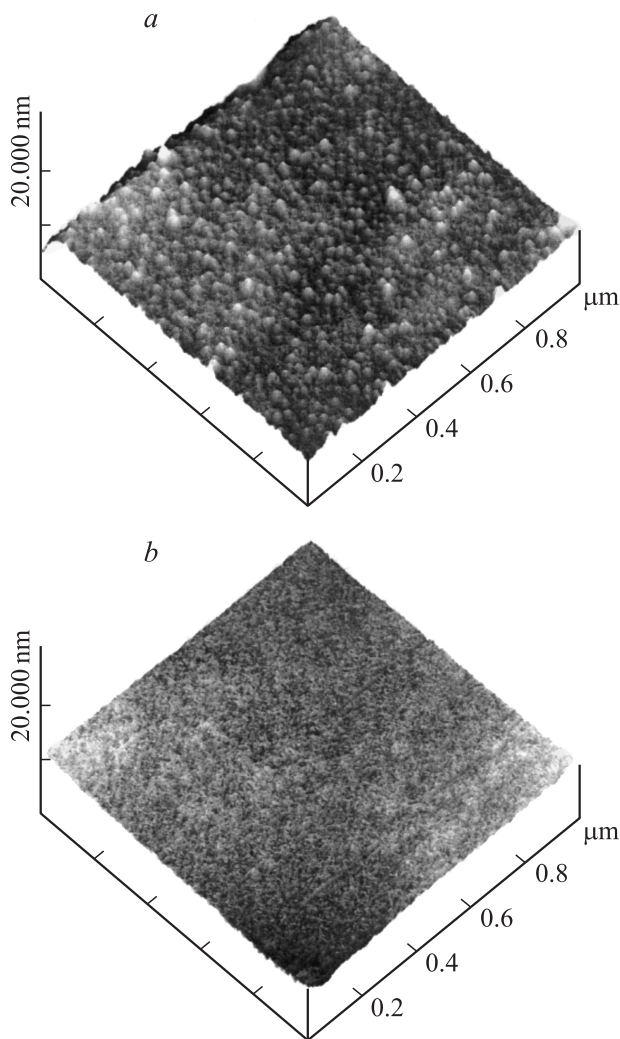


Рис. 1. Изменение микрорельефа поверхности образца, полученного методом обычного термического окисления в парах воды. Температура 1373 K , время окисления 120 min . *a* — морфология поверхности до облучения; *b* — морфология поверхности СВЧ воздействия (суммарное время СВЧ воздействия 30 s).

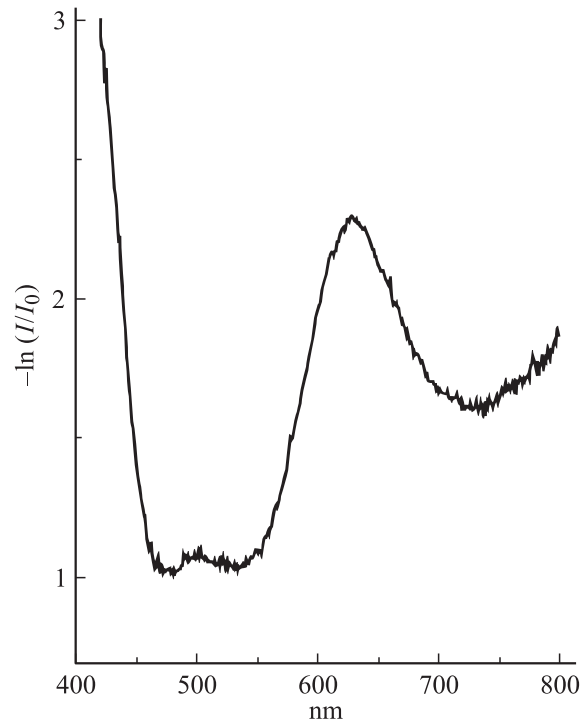


Рис. 2. Характерный вид зависимости оптической плотности ($-\ln(I/I_0)$) структуры SiO_2/SiC от длины волны при температуре $T = 300 \text{ K}$ для исходного образца.

полученных методом ОТО со временем окисления от 60 до 120 min , а также для образца, полученного методом БТО, время отжига которого составляло 180 s , на фоне макрорельефа наблюдался микрорельеф — наноостровки, вероятнее всего, SiO_x различного размера и плотности в зависимости от способа окисления (рис. 1, *a*).

Вид спектров оптического поглощения (рис. 2) подобен у всех образцов независимо от способа окисления карбида кремния.

Следует отметить, что спектр поглощения в области $400\text{--}800 \text{ nm}$ структуры SiO_2/SiC является своего рода интегральной характеристикой системы, т.е. результирующий спектр обусловлен как поглощением в объеме SiC , так и поглощением в пленке окисла и на границе раздела $\text{SiO}_2\text{--SiC}$. Основной вклад в суммарный спектр поглощения такой сложной системы дает элемент с наиболее сильным поглощением в данной спектральной области. В настоящем случае таким элементом является собственно карбид кремния.

Характерной особенностью приведенного спектра является широкая полоса в области 630 nm (рис. 2), которую в литературе связывают с основным состоянием донорных центров, обусловленных наличием в кристаллах карбида кремния примеси азота [4–7]. Отметим, что данная полоса наблюдается на общем широком фоне. Авторы [7] наличие фонового поглощения объясняют тем, что широкая полоса с максимумом в области 630 nm частично перекрывается двумя полосами

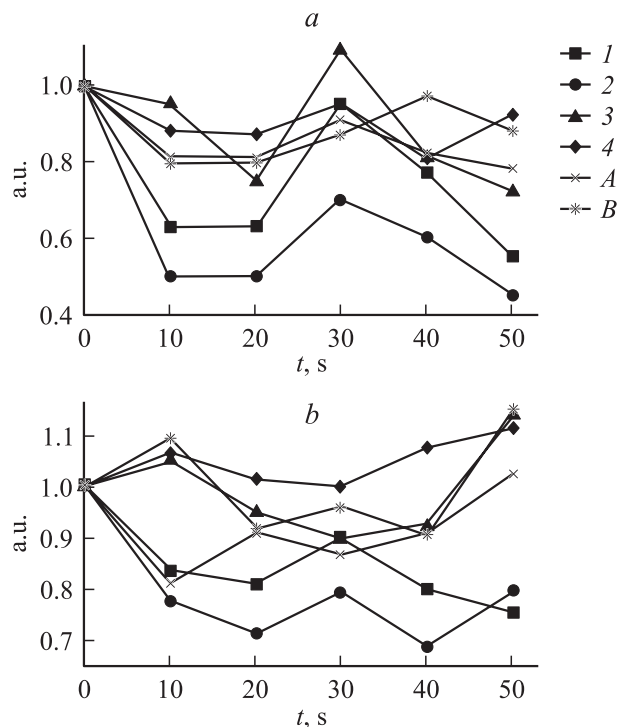


Рис. 3. Относительное изменение оптической плотности (*a*) и полуширины (*b*) полосы с максимумом 630 нм в зависимости от суммарного времени (*t*) СВЧ воздействия. За 1 принято значение оптической плотности (*a*) и полуширины (*b*) данной полосы для исходного образца. 1–4 — данные для образцов, полученных методом обычного термического окисления в парах воды при температуре 1373 К. Время окисления, min: 1 — 30, 2 — 60, 3 — 120, 4 — 180. А, В — данные для образцов, полученных методом быстрого термического отжига в атмосфере сухого кислорода при температуре 1273 К при времени отжига 60 и 180 с соответственно.

поглощения: более интенсивной и широкой прикраевой полосой, а также полосой инфракрасного поглощения, с коротковолновым хвостом, которые обусловлены фотоионизацией азота с переходом электронов в различные минимумы зоны проводимости.

Как видно из рис. 3, *a*, в зависимости от способа окисления карбида кремния суммарная доза СВЧ облучения по-разному влияет на изменение оптической плотности исследуемых структур в диапазоне 400–800 нм.

При начальных дозах СВЧ облучения для всех образцов независимо от способа получения структуры наблюдается уменьшение оптической плотности полосы поглощения с максимумом в области 630 нм (рис. 3, *a*). При повторном СВЧ воздействии оптическая плотность данной полосы поглощения либо остается практически неизменной, либо незначительно уменьшается. При таких дозах СВЧ воздействия в морфологии структуры не наблюдается никаких изменений. Следующая доза СВЧ обработки (суммарное время СВЧ воздействия 30 с) приводит к возрастанию оптической плотности полосы поглощения (рис. 3, *a*) и к исчезновению наноостровков

на всех образцах, где они были обнаружены ранее, хотя при этом макрорельеф пленки SiO₂ не претерпевает изменений (рис. 1, *b*). Указанное изменение микрорельефа поверхности для отдельных образцов, позволяет предположить, что при суммарном времени СВЧ воздействия 30 с для этих образцов произошло фазовое или структурное изменение пленки окисла, что проявилось в выравнивании поверхности на наноуровне до шероховатости порядка 0.3 нм. Дальнейшее увеличение суммарного времени СВЧ воздействия приводит к тому, что оптическая плотность полосы поглощения вновь падает, при этом изменений как в макрорельефе, так и в микрорельефе пленок не наблюдается. Однако сделать вывод об однозначной связи изменений оптической плотности структуры и изменений нанорельефа пленок окисла на поверхности карбида кремния в настоящей работе не представляется возможным.

Исключение из описанных выше закономерностей поведения оптической плотности структуры SiO₂/SiC составляют образцы с максимальным временем окисления (рис. 3, *a*). Так, для образца, полученного методом БТО при времени отжига 180 с суммарной дозе СВЧ облучения 40 с, наблюдается незначительный рост поглощения, а для образца, полученного методом ОТО при времени окисления 180 min, наблюдается возрастание оптической плотности при суммарном времени СВЧ воздействия 50 с.

В отличие от оптической плотности в поведении полуширины полосы поглощения с максимумом в области 630 нм в зависимости от суммарного времени СВЧ воздействия нельзя выделить общую тенденцию. Зависимость полуширины данной полосы от суммарной дозы СВЧ воздействия носит немонотонный характер.

Изменение уровня фонового поглощения находится в полном соответствии с изменением величины оптической плотности в максимуме полосы 630 нм. Этот результат согласуется с данными работы [7], где отмечается, что фон, на котором наблюдается полоса с максимумом в области 630 нм, и сама полоса имеют единую химическую природу и обусловлены наличием примеси азота в карбиде кремния.

Как отмечалось ранее, согласно [4–7], полоса 630 нм обусловлена фотоионизацией трех неэквивалентных доноров азота с гексагональной и кубической координацией ближайшего окружения и фактически состоит из трех близкорасположенных полос, которые сливаются в одну широкую полосу [7]. СВЧ воздействие, вероятно, приводит к флуктуациям неоднородности распределения легирующих примесей, дефектов на поверхности и в объеме структуры, что в свою очередь приводит к изменению характера межпримесного взаимодействия между центрами поглощения [8] и, как следствие этого, к изменению интенсивности наблюдаемой полосы поглощения. Наблюдаемое изменение полуширины линии поглощения, возможно, объясняется изменением распределения дефектов в структуре образца под действием СВЧ излучения по аналогии с эффектом, наблюдаемым

авторами [9], для полуширин кривых дифракционно-го отражения. Кроме того, появление или исчезновение под действием СВЧ излучения дефектов структуры должно сопровождаться изменением симметрии ближайшего окружения отдельных атомов азота, что влечет за собой перераспределение интенсивностей отдельных полос, составляющих полосу 630 nm, и в конечном итоге вызывает изменение полуширины и интенсивности результирующей полосы.

Наличие трех неэквивалентных центров поглощения позволяет предположить, что они будут проявлять различную степень устойчивости к СВЧ воздействию. Наличие немонотонных зависимостей интенсивности и полуширины полосы поглощения от суммарного времени СВЧ воздействия может быть следствием перераспределения концентрации донорных центров за счет неодинакового взаимодействия с СВЧ излучением. Можно предположить, что наиболее устойчивыми к СВЧ воздействию должны оказаться образцы с преобладающим типом доноров, взаимодействие которых с СВЧ излучением наименьшее, однако для установления типа таких доноров требуются дополнительные исследования. Характер зависимостей интенсивности полосы поглощения с максимумом 630 nm и ее полуширины от суммарного времени СВЧ воздействия указывает на то, что таковыми являются структуры, полученные методом БТО.

Заключение

На основании полученных экспериментальных результатов можно сделать вывод, что наиболее устойчивыми к СВЧ обработке являются структуры, полученные методом быстрого тремического отжига в атмосфере сухого кислорода. Кроме того, как видно из проведенных исследований, определенные дозы СВЧ воздействия (время суммарного СВЧ воздействия 30 s и более) вызывают уменьшение наноразмерных островков в пленках окисла на карбиде кремния вплоть до их исчезновения, а также выравнивания микрорельефа поверхности.

Список литературы

- [1] Антипин В.В., Годовицин В.А., Громов Д.В. и др. // Зарубежная электроника. 1995. № 1. С. 37–53.
- [2] Гегузин Я.Е., Кагановский Ю.С. Диффузионные процессы на поверхности кристалла. М. Энергоатомиздат. 1984. 124 с.
- [3] Палатник Л.С., Фукс М.Я., Косевич В.М. Механизм образования и субструктура конденсированных пленок. М.: Наука, 1972. 320 с.
- [4] Дубровский Г.Б., Радованова Е.И. // ФТТ. 1969. Т. 11. Вып. 3. С. 680–684.
- [5] Горбань И.С., Завада В.П., Скирда А.С. // ФТТ. 1972. Т. 14. С. 3095–3097.
- [6] Горбань И.С., Скирда А.С. // УФЖ. 1981. Т. 26. № 2. С. 228–232.

- [7] Горбань И.С., Крохмаль А.П. // ФТП, 2001. Т. 35. № 11. С. 1299–1305.
- [8] Горбань И.С., Маразуев Ю.А., Скирда А.С. // ФТТ. 1972. Т. 14. Вып. 3. С. 780–783.
- [9] Сорокин Л.М., Трегубова А.С., Щеглов М.П. и др. // ФТТ. 2000. Т. 42. Вып. 8. С. 1384–1388.