

05.1;06.1; 06.2;09;11

©1994

## ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА В ПОЛЕ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСТАТОЧНУЮ ДЕФОРМАЦИЮ И ПРИМЕСНЫЙ СОСТАВ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ

*В.И.Паиков, В.А.Перевощиков, В.Д.Скупов*

О последствиях воздействия высокочастотного электромагнитного излучения на параметры примесных центров в полупроводниках сообщалось ранее в [1,2]. В частности, было показано [2], что даже кратковременный СВЧ отжиг при  $T \leq 0.5T_{пл}$  может сопровождаться гетерированием примесей и дефектов в кристаллах. Важность этой проблемы, прежде всего для современного полупроводникового материаловедения, диктует необходимость глубоко экспериментального и теоретического изучения эффекта низкотемпературного гетерирования. В настоящей работе приводятся новые экспериментальные факты о влиянии СВЧ отжига на примесно-дефектный состав кремния, его особенностях и отличиях от результатов традиционной термообработки кристаллов в вакууме или газовых средах.

Объектами исследований служили пластины монокристаллического кремния марки КЭФ-0.005 толщиной 0.35–0.40 мм с ориентацией поверхности [111]. Использовались образцы с нарушенными приповерхностными слоями после резки алмазными кругами “АКВР” и после двухстороннего химико-динамического полирования на глубину не менее 30 мкм. СВЧ обработка пластин на воздухе проводилась в рабочей камере гиротрона [2] излучением частотой 37 ГГц и мощностью 0.1 кВт при различных длительностях облучения и нагревом образцов в интервале температур 670–1010 К. Контрольные измерения выполнялись на кристаллах, подвергавшихся обычному отжигу в вакууме или на воздухе.

Влияние термообработок на остаточную деформацию структурно-нарушенных слоев кристаллов после резки исследовалось на рентгеновском трехкристальном спектрометре, работавшем в режиме симметричной брэгговской дифракции по схеме (3–3.3). Примесный состав образцов контролировался на ИК спектрометре Specord-M80 по спектрам пропускания и методом масс-спектрометрии вторичных ионов на установке MIQ-256. Распыление анализируемой по-

верхности со скоростью 1.2 нм/с осуществлялось ионами кислорода с энергией 7 кэВ.

Как показали рентгеновские измерения, оба вида отжига приводят к релаксации остаточной деформации в структурно-нарушенном резкой слое. Однако кинетика релаксации в кристаллах, отжигавшихся традиционным способом в вакууме и в поле СВЧ излучения, существенно различаются. В первом случае изменение деформации в зависимости от длительности отжига  $t$  описывается выражением

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\infty} + (\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}) \exp(-t/\tau),$$

где  $\tau$  — характерное время релаксации,  $\varepsilon_0 = (18.5 \pm 0.4) \cdot 10^{-5}$  и  $\varepsilon_{\infty}$  — исходное и релаксировавшее значения деформации соответственно. Параметры  $\varepsilon_{\infty}$  и  $\tau$  зависят от температуры и для указанного диапазона могут быть определены формулами:  $\varepsilon_{\infty} = 2.1 \cdot 10^{-4} \cdot (1 - T/2361)$  и  $\tau = 3.3 \cdot 10^2 \cdot \exp(U/kT)$ , где  $U = 0.11 \pm 0.02$  эВ. Согласно [3], такая величина энергии активации указывает на преимущественную релаксацию остаточной деформации за счет процессов консервативной перестройки дислокационной структуры нарушенного слоя.

После СВЧ отжига изотермические релаксационные кривые деформации имеют более сложный вид: они приобретают осциллирующий характер с явно выраженным атермическим участком (энергия активации  $\leq 0.065$  эВ) при временах облучения до 1 мин. Закономерности уменьшения деформации, свойственные контрольным образцам, на кристаллах после СВЧ отжига выявляются при длительностях облучения более 3–5 мин. На сегодня не удалось обнаружить закономерностей в возникновении осцилляций на кинетических зависимостях, и это будет предметом дальнейших исследований. Однако сам факт их существования и наличие практически безактивационного изменения остаточной деформации в момент “включения” СВЧ поля свидетельствуют о протекании в кристаллах процессов, отличных по своей природе от обычного скольжения и выхода на поверхность дислокаций в нарушенном слое.

На рис. 1 приведены ИК спектры (коэффициент пропускания  $T$  в зависимости от волнового числа  $K$ ) кристаллов до (кривая 1) и после СВЧ отжига при 670 К в течение 3 мин с нарушенными резкой слоями (кривая 2), и после их травливания (кривая 3), а также контрольных пластин (кривая 4), отжигавшихся с нарушенным слоем в тех же режимах на воздухе. Из этих данных видно, что термообработка в СВЧ поле увеличивает содержание в образцах растворенного углерода (пик поглощения при  $K \simeq 607 \text{ см}^{-1}$ ), кислорода ( $1105 \text{ см}^{-1}$ ) и приводит к образованию термодод-

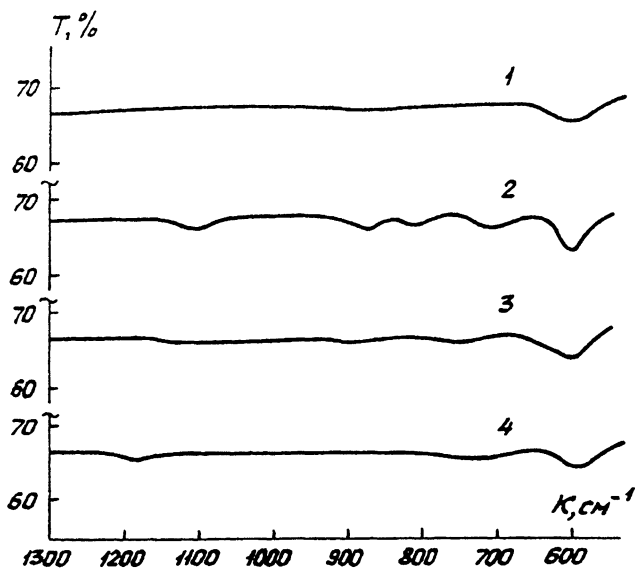


Рис. 1. ИК спектры кристаллов кремния до (1) и после (2-4) термообработки при 670 К в течение 3 мин. (Остальные пояснения в тексте).

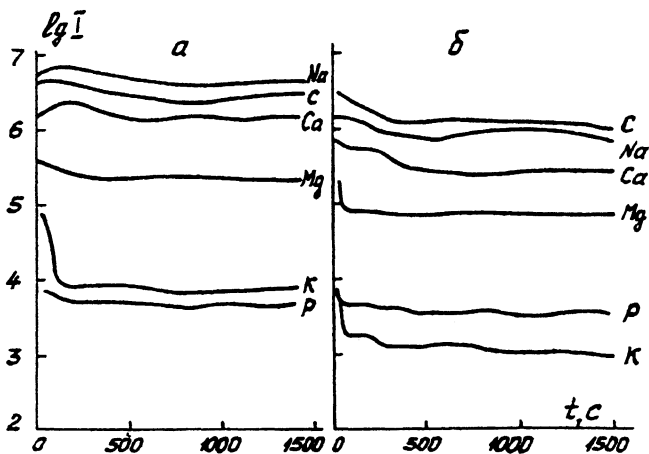


Рис. 2. Зависимости тока вторичных ионов от длительности распыления поверхности кристаллов кремния ионами кислорода после обычного отжига на воздухе (а) и в СВЧ поле (б) при 670 К, 3 мин.

норов ( $\sim 700 \text{ см}^{-1}$ ) и А-центров ( $830$  и  $880 \text{ см}^{-1}$ ) [4]. Сопоставление спектров 2 и 3 показывает, что процессы изменения примесно-дефектного состава образцов локализованы главным образом в пределах структурно-нарушенного слоя

и, как следует из сравнения спектров 2 и 4, инициированы именно СВЧ излучением. Последнее подтверждают и профили распределения примесей в приповерхностном слое контрольных и СВЧ облученных кристаллов. На рис. 2 представлены зависимости интенсивности тока вторичных ионов от длительности распыления образцов с химически сполированным перед измерениями нарушенным слоем после обычного отжига (рис. 2, а) при 670 К в течение 3 мин и после СВЧ обработки в тех же режимах (рис. 2, б). Видно, что гетерирование нарушенным слоем более эффективно при СВЧ облучении по сравнению с обычным отжигом, который при указанных режимах практически не влияет на концентрацию и профили распределения примесей.

Необходимым условием для наблюдаемого по ИК спектрам комплексообразования и гетерирования как диффузионного процесса является наличие в кристалле повышенной концентрации неравновесных собственных точечных дефектов материала. Их источником может служить сам нарушенный слой, в котором сосредоточены возникшие при абразивной обработке комплексы вакансий и междоузельных атомов [5]. Можно предположить, что при СВЧ облучении диссоциация таких комплексов дополнительно интенсифицируется изменением их зарядового состояния [1], а также действием нестационарных полей упругих напряжений [6], возникающих при локальном и практически мгновенном разогреве дефектных областей кристаллической решетки из-за диэлектрических потерь. Для окончательного вывода о механизмах структурных превращений в полупроводниках при СВЧ нагреве требуются дальнейшие исследования, на необходимость проведения которых указывают полученные к настоящему времени экспериментальные факты, имеющие, прежде всего, явное позитивное значение для технологии изготовления приборов.

#### Список литературы

- [1] *Абдурагимов Д.Е., Вагидов Ф.Ш., Верещагин В.Л. и др. // Микроэлектроника. 1991. Т. 20. В. 1. С. 21–25.*
- [2] *Быков Ю.В., Еремеев А.Г., Пашков В.И., Перевощиков В.А., Скупов В.Д. Гетерирование примесей и дефектов в кремнии при обработке в СВЧ поле. Деп. ВИНТИ. 1991. № 2322–В91. 14 с.*
- [3] *Дороничева Н.И., Ладочкин А.А., Мейлер Б.Л. и др. // Кристаллография. 1984. Т. 29. В. 2. С. 337–342.*

- [4] *Вавилов В.С., Киселев В.Ф., Мукашев Б.Н.* Дефекты в кремнии и на его поверхности. М., 1990. 216 с.
- [5] *Первощиков В.А., Скупов В.Д.* Особенности абразивной и химической обработки поверхности полупроводников. Н. Новгород: Нижегородск. ГУ. 1992. 198 с.
- [6] *Скупов В.Д., Тетельбаум Д.И.* // ФТП. 1987. Т. 21. В. 8. С. 1495-1497.

Поступило в Редакцию  
29 января 1994 г.

---