

05;07;12

## **Иницируемая лазерным воздействием аномальная диффузия кислорода в обогащенном дефектами поверхностном слое кремния**

© А.Ф. Банишев, В.С. Голубев, А.Ю. Кремнев

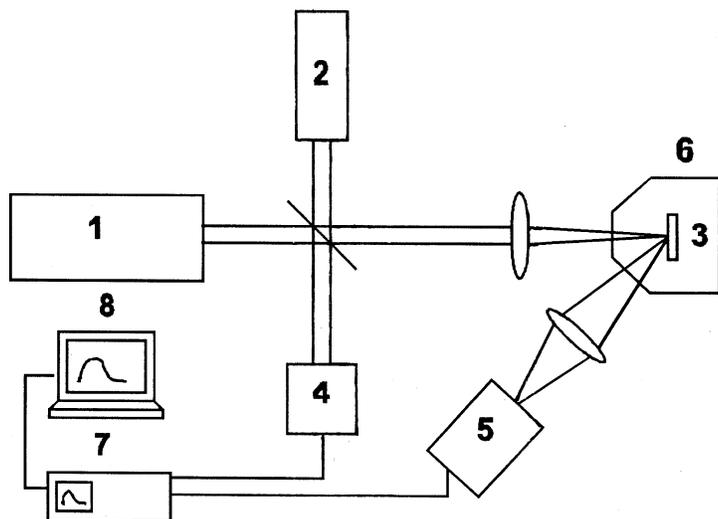
Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Шатура

Поступило в Редакцию 5 июля 1999 г.

Обнаружен и описан эффект аномально медленной релаксации деформации поверхности кремния после воздействия лазерного импульса. Наблюдаемая деформация поверхности не связана с термодформациями. Этот эффект интерпретируется "холодной" диффузией кислорода в обогащенном дефектами поверхностном слое.

Лазерное излучение широко используется во многих технологических процессах обработки материалов [1–4], в частности в микроэлектронике для нанесения тонких окисных слоев заданной формы и толщины на поверхность полупроводников [1–3], где лазерное излучение выполняет роль термического активатора скорости окисления поверхности. Однако при воздействии лазерных импульсов на поверхность кристаллических твердых тел возможна генерация в поверхностном слое структурных дефектов типа вакансий и междоузлий [5–9], концентрация которых в течение лазерного импульса может меняться по сравнению с исходной на несколько порядков и достигать значений  $10^{18} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Поэтому окисление поверхности в этом случае представляет собой довольно сложный процесс диффузии кислорода в поверхностный слой материала, в котором температура и концентрация дефектов быстро меняются во времени. Генерация значительной концентрации дефектов может существенно и неконтролируемо изменить скорость и даже механизм окисления поверхностного слоя, что является нежелательным при нанесении тонких окисных слоев заданной толщины.

Можно ожидать, что наличие в поверхностном слое повышенной концентрации собственных дефектов и кислорода приведет к изменению упругих и термоупругих коэффициентов материала (сжатия, сдвига,

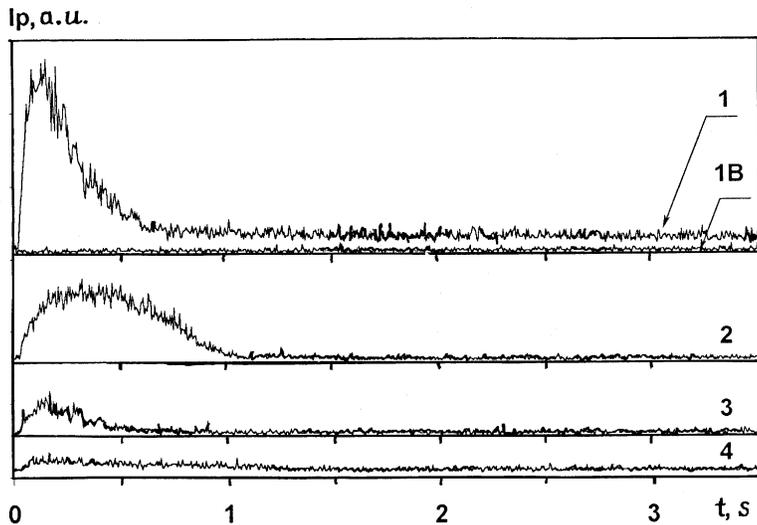


**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 — YAG:Nd лазер, 2 — He-Ne лазер, 3 — образец, 4 — фотоприемник, 5 — монохроматор, 6 — вакуумная камера ( $P \approx 10^{-2}$  Торг), 7 — осциллограф, 8 — компьютер.

температурного расширения и теплопроводности) и, как следствие, к изменению динамических характеристик деформационного отклика поверхности на внешнее воздействие.

В данной работе исследуется деформационный отклик поверхности монокристаллического кремния на воздействие коротких лазерных импульсов на воздухе и в вакууме  $P \approx 10^{-2}$  Торг. Обнаружено аномально продолжительное по времени изменение рельефа поверхности при облучении на воздухе. Деформацию поверхности регистрировали по рассеянию пробного луча He-Ne лазера.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Образец из монокристаллического кремния с зеркально обработанной и ориентированной вдоль кристаллографического направления (100) поверхностью помещался в вакуумную камеру, давление в которой могло меняться в пределах  $10^{-2}$  Торг — 1 atm. Поверхность образца облучалась импульсами YAG:Nd лазера с энергией в импульсе  $E \approx 0.5-1$  мДж и



**Рис. 2.** Изменение рассеяния пробного луча He–Ne лазера на поверхности кремния при последовательном воздействии одиночных импульсов YAG:Nd лазера ( $I = 2.5 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^2$ ): 1–4 — число импульсов (воздух), 1В — рассеяние пробного луча при облучении в вакууме  $P \approx 10^{-2} \text{ Торг}$ .

длительностью  $\tau \approx 3 \cdot 10^{-7} \text{ s}$ . Лазерное излучение фокусировалось на поверхность образца в пятно размером  $d \approx 0.3\text{--}1 \text{ mm}$ . Облучение проводилось импульсами с плотностью мощности ниже порога плавления поверхности. Зондирование облученного участка поверхности осуществлялось лучом пробного He–Ne лазера. Рассеянное излучение пробного лазера регистрировалось под углом  $\alpha \approx 45^\circ$  к поверхности образца.

На рис. 2 показаны изменения интенсивности сигнала рассеянного излучения пробного He–Ne лазера от поверхности кремния, облучаемого импульсами YAG:Nd лазера на воздухе и в вакууме. Как видно из рисунка, в результате действия импульса YAG:Nd лазера происходит скачкообразное увеличение рассеяния, причем длительность сигнала рассеяния составляет  $t \approx 0.2\text{--}0.5 \text{ s}$ , что почти на шесть порядков больше длительности воздействия импульса YAG:Nd лазера на поверхность,

и максимум сигнала рассеяния смещен относительно импульса YAG: Nd лазера. Последующее облучение этого же участка поверхности приводит к быстрому уменьшению амплитуды сигнала рассеяния (рис. 2). При уменьшении давления в вакуумной камере интенсивность рассеянного излучения быстро падает и при  $P \approx 10^{-1}$  Торг сигнал практически полностью исчезает.

Увеличение рассеяния указывает на изменения рельефа поверхности (первоначально плоской и зеркально гладкой) в результате воздействия импульса YAG: Nd лазера. Основными причинами изменения рельефа поверхности могут быть термодформация, генерация значительной концентрации структурных дефектов в поверхностном слое и окисление поверхности. Термодформация обусловлена нагревом поверхностного слоя, а поскольку температура поверхности быстро падает после окончания лазерного импульса, то также быстро должна исчезать и термодформация. Поэтому существование такого продолжительного по времени сигнала рассеяния трудно объяснить термодформациями поверхности. Изменения рельефа поверхности, связанные с генерацией дефектов и их последующей медленной рекомбинацией, вероятно, также не могут быть причиной существования сигнала рассеяния по той же причине, что температура поверхности быстро падает и рекомбинация дефектов прекращается (оставшиеся дефекты закаляются в образце). Наиболее вероятной причиной существования сигнала рассеяния может быть окисление обогащенного дефектами поверхностного слоя. При этом существование повышенной концентрации дефектов в поверхностном слое, как нам представляется, является принципиально важным условием, которое может привести к значительному уменьшению энергии миграции кислорода и, как следствие, активировать его диффузию в остывшем поверхностном слое. В результате увеличивается продолжительность изменения рельефа поверхности, связанная с окислением поверхностного слоя, что, вероятно, и наблюдается в эксперименте. В пользу данного предположения свидетельствуют также отсутствие сигнала рассеяния в вакууме и уменьшение амплитуды сигнала рассеяния при многократном получении одного и того же участка поверхности на воздухе.

Действительно, в первом случае не происходит окисления поверхностного слоя, поэтому нет и изменений рельефа поверхности, а во втором случае наблюдается насыщение поверхностного слоя кислородом, что приводит к уменьшению изменений рельефа поверхности при последующих импульсах облучения.

## Список литературы

- [1] Вейко В.П., Метев С.М. Лазерные технологии в микроэлектронике, София: Изд-во Болгарской академии наук, 1991. 363 с.
- [2] Веденов А.А., Гладуи Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 207 с.
- [3] Bauerle D. Laser Processing and Chemistry. Springer-Verlag, New York, 1996.
- [4] Карпов С.Ю., Ковальчук Ю.В., Погорельский Ю.В. // Итоги науки и техники. Сер. Физические основы лазерной и пучковой технологии. 1988. Т. 1. С. 5–48.
- [5] Бойко В.И., Лукьянчук Ю.С., Царев Е.Р. // Труды ИОФАН. 1991. Т. 30. С. 6–83.
- [6] Lauzera J., Walgraef D., Ghoniem N.M. // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 79. N 14. P. 2706–2709.
- [7] Володин Б.Л., Емельянов В.И., Шлыков Ю.Г. // Квантовая электроника. 1993. Т. 20. С. 57–60.
- [8] Banishev A.F., Emeľyanov V.I., Novikov M.M. // Laser Physics. 1992. V. 2. N 2. P. 178–190.
- [9] Вейко В.П., Имас Я.А., Либенсон М.Н. и др. // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1985. Т. 49. С. 1236–1240.