

- [12] Nakashima N., Sumitani M., Ohmine I., Yoshihara K. - Journ. Chem. Phys., 1980, v. 72, N 4, p. 2226-2230.
- [13] Suijker J.L.G., Varma C.A.G.O. - Chem. Phys. Lett., 1983, v. 97, N 6, p. 513-520.
- [14] Suijker J.L.G., Varma C.A.G.O., Huizer A.H. - Chem. Phys. Lett., 1984, v. 107, N 6, p. 496-501.

Поступило в Редакцию
6 июня 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 21

12 ноября 1988 г.

ГЕНЕРАЦИЯ РЕШЕТОЧНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ КРЕМНИЯ В ХЛОРСОДЕРЖАЩЕЙ АТМОСФЕРЕ

А.И. Курбаков, Э.Э. Рубинова,
Н.А. Соболев, А.А. Стук,
И.Н. Трапезникова, В.А. Трунов,
Е.И. Шек

Геттерирование дефектов в процессе термообработки (ТО) в хлорсодержащей атмосфере (ХСА) широко используется для улучшения качества кремния [1, 2] и параметров изготавливаемых из него приборов [3, 4]. Согласно существующей модели [1, 4], геттерирование связано с уходом из объема кремния к границе раздела $Si-SiO_2$ междоузельных атомов кремния и примесных атомов. При этом междоузельные атомы аннигилируют с избыточными вакансиями, создающимися вышеуказанной ТО на границе раздела. Примесные атомы образуют летучие хлорсодержащие соединения или электрические неактивные комплексы в слое SiO_2 . Прямые эксперименты по наблюдению вакансий, генерированных при ТО в ХСА, отсутствуют. В [5, 6] показано, что для исследования слабых искажений решетки, создаваемых дефектами, может быть применена дифракция монохроматических γ -квантов с длиной волны $\lambda = 0.03 \text{ \AA}$ ($\Delta\lambda/\lambda \leq 10^{-6}$) методом ω -сканирования в геометрии на прохождение. Поскольку используется хорошо сфокусированный пучок γ -квантов с высокой проникающей способностью, падающий практически параллельно поверхности кристалла, γ -дифракция является эффективным методом контроля как объема, так и поверхностного слоя кристаллов [7].

Исследовался бездислокационный кремний, выращенный в направлении $\langle 111 \rangle$ методом бестигельной зонной плавки и облученный на номинал удельного сопротивления 180-250 Ом·см в канале ре-

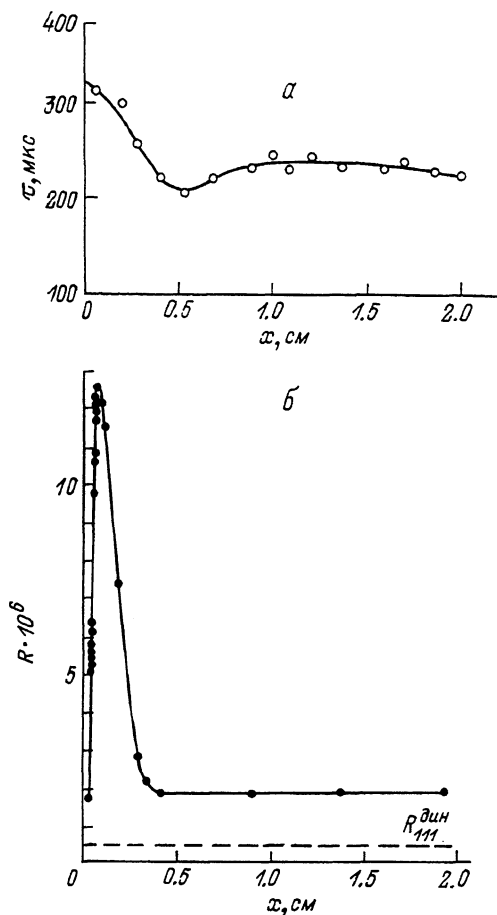


Рис. 1. Распределения времени жизни неосновных носителей заряда (а) и интегрального коэффициента отражения брэгговского рефлекса (III) (б), измеренные вдоль оси роста кристалла после отжига в течение 4 час при $T = 1050^\circ\text{C}$. $x = 2$ см соответствует середине кристалла.

актора ВВР-ц с соотношением тепловых и быстрых нейтронов 20:1 флюенсом тепловых нейтронов $\sim 10^{17}$ см $^{-2}$. Отжиг после облучения проводился в ХСА при температуре $T = 850\text{--}1250^\circ\text{C}$ в течение 4–40 часов. В качестве ХСА использовалась смесь кислорода и аргона, насыщенного парами четыреххлористого углерода, молярная концентрация последнего составляла 1% [8]. После облучения и отжига измерялись вдоль оси роста кристалла распределения времени жизни неосновных носителей заряда τ методом модуляции

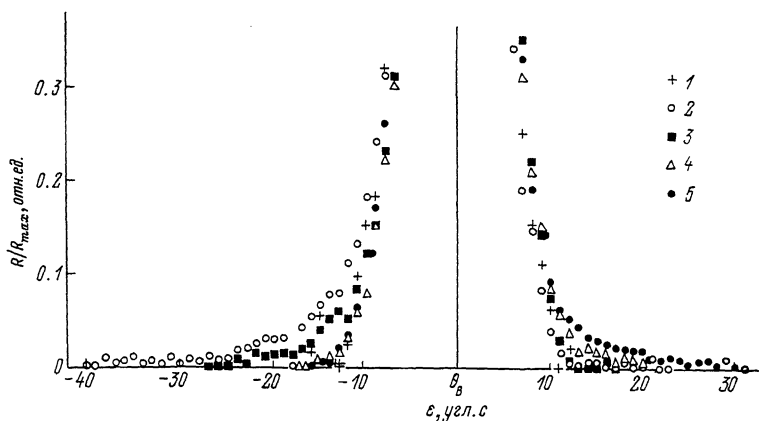


Рис. 2. Крылья кривых качания брэгговского рефлекса $(111)R$. 1 - центр образца, 2 - край образца, точки 3, 4, 5 - шаг 0.1 мм в глубину образца.

проводимости в точечном контакте и параметров процесса дифракции монохроматических γ -квантов.

Проведенные исследования показали, что в облученном кремнии после отжига в ХСА значения τ на поверхности и в объеме не совпадают. Размер переходной области может достигать (3-6) мм. Кроме того, в определенном температурно-временном интервале режима отжига наблюдалось существенное увеличение τ в приповерхностной области. Для иллюстрации сказанного на рис. 1,а приведен характерный профиль распределения τ в кристалле после 4 часов отжига при $T = 1050$ °С. На рис. 1,б приведено распределение интегрального коэффициента отражения брэгговского рефлекса (111) , измеренного на вышеуказанном кристалле вдоль оси роста. Как следует из приведенных результатов, объем кристалла слабо искажен (R в объеме незначительно отличается от динамического значения $R_{111}^{кин}$). При этом приповерхностная область кристалла сильно искажена - значения R сравнимы с кинематической величиной $R_{111}^{кин} = 25 \cdot 10^{-6}$ [5]. Следует отметить, что наблюдаемые слабые объемные искажения не уширяют измеренную кривую качания. Ее полуширина ($\omega = 9$ угл.с) равна угловой расходимости падающего на образец γ -пучка. Приповерхностные искажения также практически не изменяют измеренную ω на торце слитка.

При измерении кривых качания в приповерхностной области толщиной до 3 мм на брэгговском пике наблюдались диффузные крылья.

На рис. 2 приведены крылья кривых качания, измеренных в приповерхностной области с шагом 0.1 мм от поверхности в глубину кристалла, а также в центре образца. Как видно из рисунка, для кривой, характерной для центральной области (кр. 1), диффузные крылья отсутствуют. При измерении приповерхностных областей наблюдается постепенная перекачка интенсивности рассеяния из об-

ласти $\varepsilon < 0$ (кр. 2) в область $\varepsilon > 0$ (кр. 5), где $\varepsilon = \theta - \theta_0$ - отклонение от точного брегговского положения. Это связано с изменением типа собственных точечных дефектов в исследуемом слое [9]. В приповерхностной области толщиной ~ 200 мкм наблюдается пересыщение кремния вакансиями (кр. 2, 3). На большей глубине доминируют междоузельные атомы (кр. 4, 5). Наблюдаемые скопления собственных решеточных дефектов приводят к появлению градиента деформации и увеличению интегрального коэффициента отражения в приповерхностной области толщиной до 3 мм (рис. 1,б).

В зависимости от времени и температуры отжига в ХСА изменяются распределения времени жизни неосновных носителей заряда и собственных точечных дефектов. Наблюдаемая корреляция между их распределениями, по-видимому, свидетельствует о важной роли собственных дефектов в формировании рекомбинационных центров. Увеличение τ в приповерхностной области можно объяснить уменьшением степени пересыщения кремния собственными междоузельными атомами кремния вследствие их аннигиляции с вакансиями и даже сменой типа дефектов, ответственных за процесс рекомбинации: вместо дефектов междоузельного типа начинают доминировать дефекты вакансионного типа.

Таким образом, впервые непосредственно показано, что термообработка в хлорсодержащей атмосфере сопровождается генерацией вакансий в приповерхностной области кремния. Обнаружено, что при определенных условиях отжига значения τ в приповерхностной области кремния могут превышать значения в объеме слитка, что, по-видимому, связано с влиянием собственных точечных решеточных дефектов на процесс образования рекомбинационных центров.

Л и т е р а т у р а

- [1] Shiraki H. - Jap. J. Appl. Phys. 1975, v. 14, N 6, p. 747-752.
- [2] Соболев Н.А., Шек Е.И., Дудавский С.И., Кравцов А.А. - ЖТФ, 1985, т. 55, в. 7, с. 1457-1459.
- [3] Moukowskii I.R. - Sol. St. Techn., 1981, v. 24, N 7, p. 44-51.
- [4] Sobolev N.A., Shel'nikov V.E. - Proc. 2nd Internat. Autumn School GADEST, GDR. Ed. H. Richter, 1987, p. 179-184.
- [5] Курбаков А.И., Рубинова Э.Э., Соболев Н.А. и др. - Кристаллография, 1986, т. 31, в. 5, с. 979-985.
- [6] Курбаков А.И., Трунов В.А., Дмитриев Р.П. и др. - ЛИЯФ АН СССР, Препринт-1307. Л., 1987. 60 с.
- [7] Курбаков А.И., Рубинова Э.Э., Трунов В.А. Физика и технология обработки поверхности металлов: Материалы тематического сборника / ФТИ АН СССР, Л., 1984, с. 104-105.

[8] Воронов И.Н., Гресевков И.М., Гринштейн П.М. и др. - Письма в ЖТФ, 1984, т. 10, в. 11, с. 645-649.

[9] Thomas J.E., Baldwin J.O., Derichs P.H. - Phys. Rev. B., 1971, v. 3, N 4, p. 1167-1173.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию
4 августа 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 21 12 ноября 1988 г.

ЭЛЕКТРОГРАФИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ФРОНТА СКОЛЬЗЯЩЕГО РАЗРЯДА

О.А. Журавлев, А.В. Кислицев,
А.П. Кусочек, А.Л. Муркин

Скользющий по поверхности диэлектрика разряд (СР) нашел широкое применение в сильноточной коммутационной аппаратуре [1], системах накачки газовых лазеров [2]. Развиваясь в условиях резко-неоднородного электрического поля с преобладанием нормальной составляющей к поверхности диэлектрика, СР характеризуется многообразием и сложностью физических механизмов. Наименее изучена начальная стадия разряда, отличающаяся нерегулярным развитием ионизационных процессов [3], где дискретный характер рождения электронов должен приводить к формированию двухмерных ионизирующих волн пространственного заряда [4]. Локализация распространяющихся волн ионизации в приповерхностной области диэлектрика приводит к определяющим развитию СР эффектам, обусловленным сильным искажением внешнего поля за счет экранировки его составляющих поверхностным зарядом на границе газа с диэлектриком и объемным зарядом в слое плазмы.

Рассматривая распространение фронта СР как уединенной волны ионизации, в [5] показано, что для описания динамики процесса необходимо иметь пространственно-временное распределение электрического поля и концентрации электронов на границе газа с диэлектриком. Оптические методы регистрации пространственно-временного распределения изолиний светимости в зоне волны ионизации требуют применения светосильной оптики и затруднены в связи с интенсивной засветкой от последующей ступени лидера СР [3].

Электрические зонды, являясь контактными методом, нашли распространение [6] лишь для определения усредненной скорости развития волны ионизации СР на участке диэлектрической подложки.

В работе предложено применение электрографического метода [7] для исследования пространственно-временной структуры фронта вол-