

## ОБРАЗОВАНИЕ ПОЗИТРОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ДЕФЕКТОВ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМООБРАБОТКИ КРЕМНИЯ В ХЛОРСОДЕРЖАЮЩЕЙ АТМОСФЕРЕ

Арутюнов Н. Ю., Соболев Н. А. Трацаков В. Ю., Шек Е. И.

Проведены измерения угловых распределений аннигиляционных фотонов (УРАФ) для кристаллографических направлений  $\langle 111 \rangle$ ,  $\langle 110 \rangle$  и  $\langle 100 \rangle$  бездислокационного бестигельного кремния, подвергнутого термообработке при 1050 и 1250 °С в хлорсодержащей атмосфере (ХСА). Обнаружено образование позитронно-чувствительных дефектов. На основе полученных результатов выдвинута гипотеза об образовании дефектов вакансионного типа, в состав которых могут входить атомы кислорода. Полученные данные измерений УРАФ, по-видимому, можно рассматривать как «прямое» подтверждение существования обогащенной вакансиями приповерхностной области кремния, образующейся в процессе его термообработки в ХСА.

Термообработка в хлорсодержащей атмосфере (ХСА) широко используется для улучшения качества монокристаллического кремния и приборов на его основе [1]. Положительный эффект связывают с генерацией на границе раздела кремний—двуокись кремния вакансий, образующихся при добавлении в окислительную атмосферу хлорсодержащих компонентов. Утверждение об образовании вакансионных дефектов базируется на интерпретации данных по подавлению в процессе термообработки в ХСА окислительных дефектов упаковки и окислительно-ускоренной диффузии элементов III и V групп таблицы Менделеева [2, 3] и поэтому нуждается в подтверждении с помощью «прямых» методов. К их числу относится метод, основанный на эффекте изменения параметров процесса аннигиляции позитронов в области твердого тела с повышенным содержанием вакансионных дефектов [4]. В настоящей работе представлены результаты исследования процесса дефектообразования в кремнии при термообработке в ХСА, выполненного впервые с помощью метода аннигиляции позитронов.

За исходный материал взят бездислокационный кремний *n*-типа проводимости с удельным сопротивлением 240—290 Ом·см и временем жизни дырок 100—400 мкс, выращенный в направлении  $\langle 111 \rangle$  методом бестигельной зонной плавки. Полированные в травителе СР-4 пластины толщиной 1 мм и диаметром 10 мм, ориентированные вдоль направлений  $\langle 111 \rangle$ ,  $\langle 110 \rangle$  и  $\langle 100 \rangle$ , отжигались в ХСА при температурах 1050 и 1250 °С в течение 4 ч. В качестве ХСА использовалась смесь кислорода и аргона, насыщенного парами четыреххлористого углерода с молярной концентрацией 2 %. Образование позитронно-чувствительных дефектов контролировалось по изменению параметров угловых распределений аннигиляционных фотонов (УРАФ) [4, 5]. Спектры УРАФ измерялись при комнатной температуре с помощью точечно-линейной схемы детектирования гамма-излучения [5]. В качестве источника позитронов использовался изотоп  $^{22}\text{Na}$  на танталовой подложке с активностью  $\approx 20$  мК. Статистическая погрешность измерения величины скорости счета пар гамма-квантов  $I(\theta)$  в области максимума УРАФ не превышала 0.7 %.

Угловые зависимости интенсивности аннигиляционного излучения электронно-позитронных пар характеризуют распределение импульсной плотности аннигилирующих электронов. В результате измерений кривых УРАФ для исходного материала (рис. 1) была зарегистрирована такая анизотропия, которая

характерна для кристаллической решетки типа алмаза [5, 6]. Минимумы в направлениях  $\langle 110 \rangle$  и  $\langle 100 \rangle$  при  $\theta = 0$  мрад, резкий спад кривой УРАФ при  $\theta \geq 6$  мрад в направлении  $\langle 110 \rangle$  и ее параболообразная форма для оси  $\langle 111 \rangle$  обусловлены главным образом аннигиляцией позитронов на валентных электронах и характеризуют анизотропию распределения их импульсной плотности [6, 7]. Аннигиляция позитронов с электронами внешних оболочек ион-

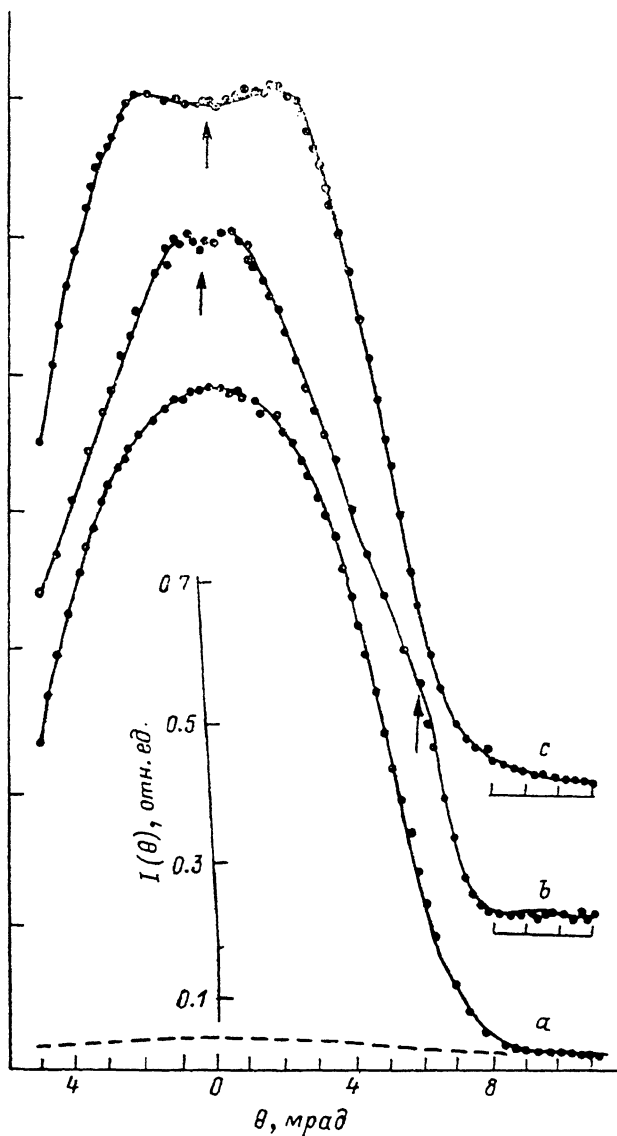


Рис. 1. УРАФ в бестигельном кремнии.

Кристаллографическое направление:  $a - \langle 111 \rangle$ ,  $b - \langle 110 \rangle$ ,  $c - \langle 100 \rangle$ . Стрелками показаны седлообразные участки и другие особенности УРАФ, штриховой линией выделен широкий компонент для направления  $\langle 111 \rangle$ . Кривые сдвинуты друг относительно друга; они нормированы к значению  $I(\theta=0)$ .

ных островов решетки кремния дает заметный вклад в кривые УРАФ в области «хвостов» распределения при  $\theta > 7$  мрад и характеризуется так называемым широким компонентом УРАФ [5]. Кривые УРАФ, представленные на рис. 1, использовались в качестве эталонных, характеризующих бездефектный кристалл. Отметим, что в отличие от исследованного нами бестигельного кристалла в работе [6] в выращенных методом Чохральского исходных кристаллах наблюдалось незначительное, но хорошо заметное увеличение интенсивности аннигиляционного излучения при углах регистрации  $\theta \geq 3$  мрад для направ-

ления  $\langle 111 \rangle$ , которое, по-видимому, обусловлено процессом аннигиляции позитронов с электронами, принадлежащими ростовым структурным дефектам.

Кривые УРАФ, полученные после термообработки в ХСА, представлены на рис. 2. В них наблюдаются следующие характерные особенности: появляются слабоинтенсивный пик при  $\theta=0$  мрад в кристаллографическом направлении

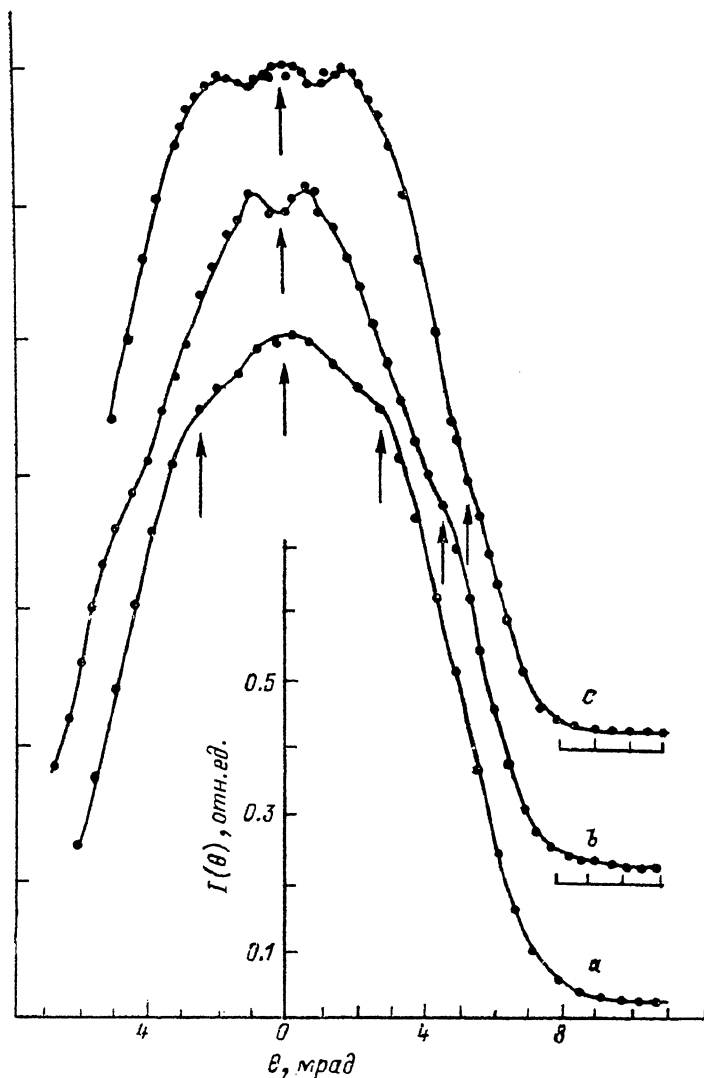


Рис. 2. УРАФ в бестигельном кремнии, подвергнутом термообработке в ХСА при  $1050^\circ\text{C}$  в течение 4 ч.

Стрелками показаны характерные особенности в кривых, связанные с захватом позитронов появившимися термодфектами.

нии  $\langle 100 \rangle$ , для осей  $\langle 110 \rangle$  и  $\langle 100 \rangle$  — некоторое увеличение производной интенсивности  $dI(\theta)/d\theta$  в интервале углов регистрации аннигиляционных гамма-квантов  $\Delta\theta=5-7$  мрад, соответствующее изменению граничного импульса приблизительно на  $0.3-0.4$  (в единицах  $mc$ , где  $m$  — масса электрона,  $c$  — скорость света), для направления  $\langle 111 \rangle$  — дополнительный компонент в центральной области УРАФ с соответствующими ему так называемыми «боковыми пиками» [6] и увеличение полуширины кривой УРАФ (рис. 3). Возникающие особенности связаны с появлением по крайней мере одного нового «канала» аннигиляции позитронов в исследованном кремнии вследствие термообработки. Этот канал обусловлен процессом аннигиляции позитронов с электронами, принадлежащими образовавшимся термодфектам.

Поскольку известно, что волновая функция позитрона в твердом теле стремится к локализации в областях с отрицательным эффективным зарядом и увеличенным свободным объемом, экспериментально наблюдаемые изменения параметров времени жизни позитронов и кривых УРАФ связывают с образованием дефектов именно вакансионной природы [7, 8]. Это заключение коррелирует с данными работы [9] по диффузному рассеянию гамма-квантов с длиной волны 0.003 нм, свидетельствующими об относительном пересыщении вакансиями при термообработке в ХСА приповерхностной области кремния толщиной до 200 мкм.

При изменении температуры отжига образцов в ХСА характерные особенности УРАФ сохранялись. Увеличение температуры отжига в ХСА также сопровождалось слабым ростом интенсивности широкого компонента УРАФ ( $\theta > 7$  мрад), вклад которого в результирующее распределение удобно характеризовать параметром  $P$  [10], и незначительным изменением размерного па-

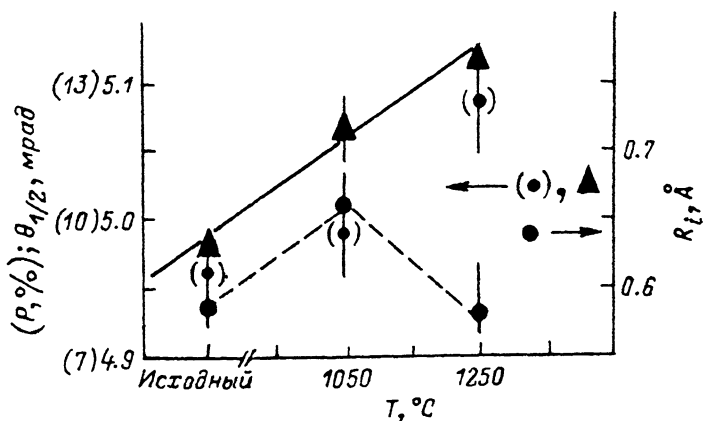


Рис. 3. Зависимость параметров УРАФ от температуры термообработки в ХСА в течение 4 ч.  $\theta_{1/2}$  — полуширина кривой УРАФ для направления  $\langle 111 \rangle$ ,  $P$  — вклад широкого компонента в результирующее УРАФ,  $R_i$  — характеристическое расстояние от ядра до позитрона, аннигилирующего с электроном внешней оболочки ионного остова.

раметра  $R_i$  [10, 11], характеризующего среднее эффективное расстояние от ядра до электронов внешней оболочки ионных остовов, аннигилирующих с позитронами (рис. 3). Такая «эволюция» параметров УРАФ, по-видимому, связана с локализацией позитронов в области расширения кристаллической решетки и свидетельствует об образовании позитронно-чувствительных дефектов вакансионного типа в приповерхностной области термообработанного в ХСА кремния.

Интересно отметить, что термообработка бестигельного кремния в ХСА при  $T=1050$  и  $1250$  °C сопровождается тем же типом изменений анизотропии УРАФ, что и термообработка при  $T=600-1000$  °C кремния, выращенного методом Чохральского [6]. Проведенный в [6] анализ позволил предположить, что характерные особенности УРАФ обусловлены процессом аннигиляции позитронов с электронами, принадлежащими термодфектам, в состав которых входит кислород. Исходя из наших экспериментальных условий (времени, температуры и среды термообработки) и имеющихся литературных данных по процессу диффузии кислорода в кремнии [12], можно утверждать, что термообработка в ХСА бестигельного кремния с малой исходной концентрацией кислорода ( $< 1 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ ) приводит к увеличению концентрации последнего в приповерхностной области до значений  $(1-7) \cdot 10^{17}$  см $^{-3}$ . Поэтому в наших образцах продиффундировавший кислород может участвовать в образовании позитронно-чувствительных дефектов.

Таким образом, в настоящей работе впервые экспериментально показано, что термообработка в ХСА бездислокационного кремния, выращенного методом бестигельной зонной плавки, приводит к образованию позитронно-чувствительных дефектов. Процесс аннигиляции позитронов с электронами, локализован-

ными в указанных дефектах, приводит к возникновению особенностей на анизотропных кривых УРАФ. Обнаруженные позитронно-чувствительные дефекты являются дефектами вакансионного типа, в состав которых могут входить атомы кислорода.

#### Список литературы

- [1] Sobolev N. A., Chelnokov V. E. // Proc. 2 Int. Autumn. School GADEST / Ed. by H. Richter. GDR, 1987. P. 179—184.
- [2] Nabeta Y., Uno T., Kubo S., Tsukamoto H. // J. Electrochem. Soc. 1976. V. 123. N 9. P. 1416—1417.
- [3] Shiraki H. // Japan. J. Appl. Phys. 1975. V. 14. N 6. P. 747—752.
- [4] Гольданский В. И. Физическая химия позитрона и позитрония. М., 1968. 174 с.
- [5] Арутюнов Н. Ю., Балтенков А. С., Гиллерсон В. Б., Тращакон В. Ю. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 10. С. 1753—1757.
- [6] Arutyunov N. Yu., Trashchakov V. Yu. // Sol. St. Phenomena. 1989. V. 6-7. P. 435—442.
- [7] Dannefaer S. // Rad. Eff. Def. Sol. 1989. V. 111-112. N 1-2. P. 65—76.
- [8] Puska M. J., Makinen S., Manninen M., Neiminen R. M. // Phys. Rev. B. 1989. V. 39. N 11. P. 7666—7679.
- [9] Курбаков А. И., Рубинова Э. Э., Соболев Н. А. и др. // Письма ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 21. С. 1929—1933.
- [10] Arutyunov N. Yu. // Proc. Int. Positron Workshop. Munchen, 1989. Pt B. P. 146—166.
- [11] Čížek A., Šob M., Krasensky K. // Phys. St. Sol. (b). 1976. V. 73. N 1. P. K1—K4.
- [12] Mikkelsen J. C., Jr. // Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 1985. V. 59. P. 19—30.

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

Получена 16.05.1990

Принята к печати 18.06.1990