

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ ВДОЛЬ ОСИ РОСТА СЛИТКОВ КРЕМНИЯ, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСКОГО

В.В.Литвинов, Ю.М.Покотило, В.И.Уренев

Белорусский государственный университет,
220050, Минск
(Поступило в Редакцию 28 сентября 1993 г.)

Внедрение примесей в растущий кристалл определяется эффективным коэффициентом сегрегации, величина которого зависит от скорости вращения тигля и/или слитка, скорости роста, температуры и конвекции в расплаве [1]. В то время как скорости вращения и вытягивания, а также градиент температуры могут быть заданы с высокой степенью точности, развитие конвективной неустойчивости в расплаве происходит неконтролируемым образом и изучено недостаточно. Последнее, однако, представляет значительный практический интерес для решения проблемы выращивания однородных промышленных слитков кремния. В настоящей работе изучаются характеристики движения потоков расплава и сценарий развития конвективной неустойчивости в реальной ростовой системе Чохральского при выращивании слитков кремния большого (больше 100 мм) диаметра.

В основе нашего исследования лежит идея о прямой связи однородности распределения междоузельного кислорода, характеризующегося единичным коэффициентом сегрегации [1], с конвекцией расплава в процессе роста. Для измерения распределения концентрации кислорода вдоль оси роста слитков кремния нами используется новый неразрушающий метод [2], основанный на регистрации ИК-поглощения в области полосы междоузельного кислорода при 5.81 мкм, являющейся фоновым повторением антисимметричного валентного колебания квазимолекулы Si_2O в кремнии. Использование при измерениях трех аналитических длин волн и спектральной зависимости коэффициентов фонового поглощения свободными носителями заряда в кремнии [3] допускает одновременное определение и концентрации легирующих примесей. Измерения профилей распределения примесей проведены на слитках кремния типа КЭФ-4.5 диаметром 100 мм, полученных методом Чохральского из шихты массой 18–20 кг. Частота вращения кристалла 3–5 об/мин, тигель не вращался, скорость вытягивания 0.8–1.2 мм/мин.

На рис. 1 приведены профили распределения концентрации кислорода (1) и основной легирующей примеси фосфора (2) вдоль оси роста слитка с началом отсчета координаты от затравочного конца. Отметим ранее наблюдаемое другими авторами [4] снижение концентрации кислорода при увеличении доли закристиллизовавшегося расплава, обусловленное уменьшением площади его контакта с материалом тигля. Из рис. 1 также видно, что распределение обеих примесей существенно неоднородно и имеет ярко выраженный квазипериодический

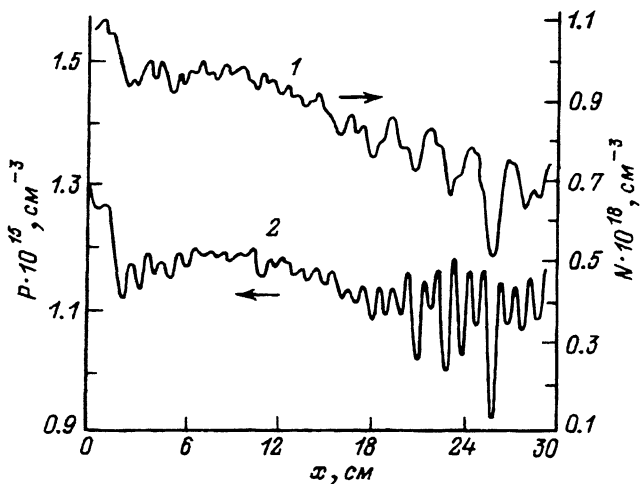


Рис. 1. Профили распределения концентрации кислорода (1) и фосфора (2) вдоль оси роста слитка кремния типа КЭФ-4.5 диаметром 100 мм.

характер. Это является причиной образования полос в распределении генерируемых термообработкой кислородосодержащих термодонов и преципитатов, а также страт в распределении легирующих примесей [5]. Полученные нами результаты (рис. 1) подтверждают и качественные особенности полосчатой неоднородности распределения примесей, выявленной ранее упомянутыми косвенными методами. Так, профили концентрации кислорода и основной легирующей примеси, как правило, не совпадают, причем кислородные страты толще, а частота их повторения ниже, чем примесных. Для установления природы этих различий и доказательства связи примесных полос с конвекцией расплава кремния был проведен Фурье-анализ экспериментальных профилей (рис. 1), которые были предварительно преобразованы во временные зависимости изменения концентрации кислорода и фосфора

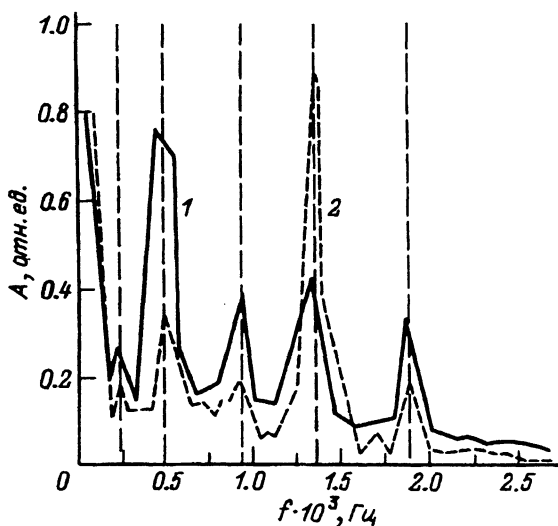


Рис. 2. Амплитудный спектр Фурье квазипериодических колебаний концентрации кислорода (1) и фосфора (2) в процессе кристаллизации. Штриховыми вертикальными линиями указаны частоты бифуркаций.

в процессе кристаллизации с учетом скорости вытягивания. Результаты быстрого Фурье-преобразования квазипериодических колебаний примесей кислорода (1) и фосфора (2) в ходе кристаллизации приведены на рис. 2. Из анализа полученных амплитудных спектров Фурье следует, что значения частот для амплитудных составляющих взаимозависимы в соответствии с последовательностью $f_0, f_0/2, 3f_0/4, f_0/8$, где $f_0 = 1.9 \cdot 10^{-3}$ Гц. Такая же последовательность частот экспериментально наблюдалась для хаотических осцилляций температурного поля при конвекции расплава олова в реакторе Бриджмена [6]. Это свидетельствует о том, что и в нашем случае в основе механизма формирования неоднородного распределения обеих примесей вдоль оси роста слитков лежит конвективная неустойчивость расплава кремния в реакторе Чохральского, развитие которой в процессе кристаллизации происходит по сценарию Фейгенбаума через бифуркации удвоения периода [7]. Причем речь идет о процессе тепловой, а не принудительной конвекции, так как полученное значение первичной частоты f_0 более чем на порядок меньше частоты вращения слитков. Тепловая конвекция расплава приводит не только к осцилляциям температуры и микроскопической скорости кристаллизации, но и к флуктуациям переноса кислорода от стенок тигля. Так как низкочастотные составляющие колебаний охватывают большие области расплава, то они более эффективны для переноса кислорода от стенок тигля к фронту кристаллизации. Этим объясняется, на наш взгляд, различие в относительных вкладах низкочастотных и высокочастотных составляющих амплитудного спектра Фурье (рис. 2) для распределения кислорода и фосфора.

Список литературы

- [1] Zulehner W. // Defect Control in Semiconductors / Ed. K. Sumino. North-Holland, 1990. P. 143-155.
- [2] Литвинов В.В., Петух А.Н., Покотило Ю.М., Уренев В.И. Современные проблемы лазерной физики и спектроскопии. Гродно, 1993. С. 250-252.
- [3] Litvinov V.V., Pokotilo Yu.M., Urenev V.I. // Intern. Conf. on Optical Characterization of Semicond. Sofia, 1990. P. 31.
- [4] Series R.W. // J. Cryst. Growth. 1989. Vol. 97. P. 85-91.
- [5] Catos H.C. Defect Control in Semiconductors / Ed. K. Sumino. North-Holland, 1990. P. 3-15.
- [6] Knuteson D.J. et al. // J. Cryst. Growth. 1991. Vol. 109. P. 127-132.
- [7] Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. Введение в синергетику. М.: Наука, 1990. 270 с.