

Влияние условий имплантации на перераспределение эрбия при твердофазной эпитаксиальной кристаллизации кремния

© О.В. Александров, Ю.А. Николаев, Н.А. Соболев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 2 июля 1998 г. Принята к печати 6 июля 1998 г.)

Исследовалось влияние дозы, энергии и температуры имплантации ионов эрбия и соимплантации ионов кислорода на концентрационные профили Er при твердофазной эпитаксиальной кристаллизации аморфизованного слоя кремния и параметры сегрегационной модели — ширину переходного слоя L и координатную зависимость коэффициента сегрегации $k(x)$. Увеличение дозы, уменьшение энергии и температуры имплантации Er сопровождается уменьшением ширины L и увеличением скорости роста коэффициента сегрегации k на начальном этапе твердофазной эпитаксиальной кристаллизации, что объясняется повышением дефектности аморфизованного имплантированного слоя. Дополнительная имплантация кислорода приводит к аналогичным изменениям значений L и $k(x)$, что связывается с образованием комплексов Er–O.

Введение

Одним из способов создания светоизлучающих структур на основе Si:Er является имплантация ионов Er с последующим термическим отжигом [1]. Для повышения концентрации оптически и электрически активных центров перспективным является использование доз, превышающих порог аморфизации [2]. В процессе отжига аморфный α -слой превращается в монокристаллический c -слой по механизму твердофазной эпитаксиальной (ТФЭ) кристаллизации. При этом исходный концентрационный профиль имплантированной примеси претерпевает существенное изменение, обусловленное сегрегацией примеси на движущейся α/c -границе [3]. Детальных исследований перераспределения Er при изменении условий имплантации ранее не проводилось. В работе [4] нами была предложена сегрегационная модель перераспределения примеси Er в процессе ТФЭ кристаллизации аморфизованных имплантацией слоев кремния. Параметрами модели являются ширина переходного слоя и коэффициент сегрегации, зависящий от координаты.

Цель настоящей работы — исследование влияния условий ионной имплантации на характер перераспределения Er в процессе ТФЭ кристаллизации и на параметры сегрегационной модели.

Экспериментальные условия

Имплантация проводилась в полированные пластины кремния ориентации (100) на установке "High Voltage Engineering Europe B2K". Энергия ионов Er изменялась от 0.5 до 2 МэВ, доза варьировалась от $4 \cdot 10^{14}$ до $3.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Температура мишени при имплантации составляла 77 или 300 К. Совместно с ионами Er проводилась имплантация ионов O с энергиями от 70 до 280 кэВ и дозами от $4 \cdot 10^{15}$ до $3.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Энергии ионов O подбирались таким образом, чтобы их пробеги

совпадали с пробегами ионов Er. Термические отжиги проводились при температурах 620 и 900° в течение времени от 0.5 до 3 ч в хлорсодержащей атмосфере, представляющей собой смесь 1 мол.% четыреххлористого углерода в потоке кислорода [4].

Профили распределения концентрации примесей по глубине до и после термоотжига измерялись методом вторичной ионной масс-спектрометрии на установке "Camesa IMS 4F". Изменения профилей в результате ТФЭ кристаллизации анализировались с помощью сегрегационной модели [4]. В модели координатная зависимость коэффициента сегрегации описывается выражением

$$k(x) = k_0 k_s / \left\{ k_0 + (k_s - k_0) \exp[-(x_a - x)/L] \right\}, \quad (1)$$

где k_0 и k_s — начальное и максимальное значения коэффициента сегрегации соответственно, x_a — положение минимума на изломе концентрационного профиля Er, появляющегося после термоотжигов, x — текущая координата, отсчитываемая от поверхности образца, L — ширина переходного слоя. Параметры k_s и L определялись, исходя из наилучшего соответствия расчетных профилей с экспериментальными. Начальное значение коэффициента сегрегации определялось как

$$k_0 = C(x_a)L / \int_0^L C_0(y)dy, \quad (2)$$

где $C(x_a)$ — концентрация примеси в перекристаллизованном слое при $x = x_a$, $C_0(y)$ — начальное распределение примеси после имплантации, $y = x_a - x$ — текущая толщина перекристаллизованного слоя.

Результаты эксперимента и обсуждение

Влияние температуры имплантации на сегрегационное перераспределение Er исследовалось для ионов с энергией 0.5 МэВ. На рис. 1 представлены концентрационные

профили эрбия при температурах имплантации $T_i = 77$ К (кривые 1 и 2) и $T_i = 300$ К (кривая 4), измеренные как до ТФЭ кристаллизации при 620°C (кривая 1), так и после нее (кривые 2 и 4). Как видно из рисунка, при увеличении температуры мишени наблюдается, во-первых, уменьшение начальной толщины аморфизованного слоя от 0.24 до 0.17 мкм и, во-вторых, изменение характера перераспределения Er вблизи поверхности. При $T_i = 77$ К концентрация Er спадает к поверхности, тогда как при $T_i = 300$ К напротив — возрастает. Расчетные зависимости 3 и 5 хорошо описывают соответствующие экспериментальные профили при следующих значениях параметра L : 31 нм при $T_i = 77$ К и 42 нм при $T_i = 300$ К. Соответствующие зависимости коэффициента сегрегации от глубины залегания слоя $k(x)$ представлены на рис. 2 (кривые 1 и 2). Как видно из рисунка, при $T_i = 77$ К (кривая 1) коэффициент сегрегации при приближении к поверхности превосходит 1, тогда как при $T_i = 300$ К (кривая 2) он ее не достигает, т. е. уменьшение концентрации Er вблизи поверхности в первом случае связано с его сегрегационным захватом перекристаллизованным s -слоем, а накопление Er у поверхности во втором случае — с его сегрегационным оттеснением.

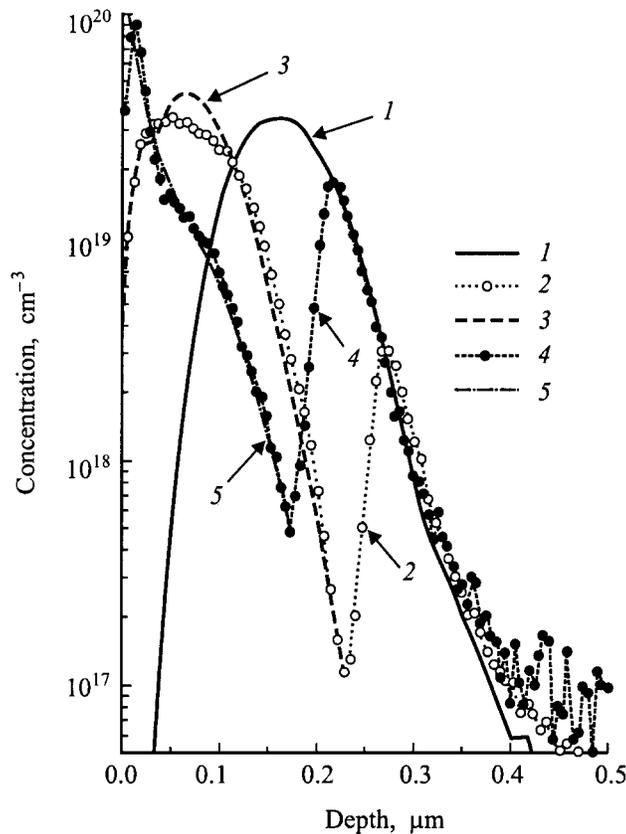


Рис. 1. Влияние температуры имплантации ионов эрбия ($E_{Er} = 0.5$ МэВ, $D_{Er} = 4 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$) на концентрационные профили Er до (1) и после отжига (2 и 4) при температуре $T_a = 620^\circ\text{C}$ в течение $t_a = 60$ мин. Температура имплантации T_i , К: 1, 2 — 77, 4 — 300. Параметры расчетных кривых 3 и 5: $k_s = 2.5$; L , нм: 3 — 31, 5 — 42.

Влияние времени и температуры отжига на параметры сегрегационной модели ($E_{Er} = 0.5$ МэВ, $D_{Er} = 4 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$)

Номер образца	T_i , К	T_a , $^\circ\text{C}/t_a$, мин	x_a , мкм	k_0	k_s	L , мкм
104	300	620/30	0.215	$5.4 \cdot 10^{-3}$	2.5	27
98	300	620/60	0.24	$4.7 \cdot 10^{-3}$	2.5	27
141	300	620/180	0.22	$1.2 \cdot 10^{-2}$	2.5	31
320	77	620/60 + 900/30	0.23	$6.0 \cdot 10^{-3}$	2.5	32
102	300	620/60 + 900/30	0.21	$1.9 \cdot 10^{-2}$	2.5	35

Изменение времени отжига от 0.5 до 3 ч при температуре 620°C , а также последующий отжиг при 900°C практически не оказывали влияния на характер перераспределения Er, на параметры k_0 и k_s координатной зависимости $k(x)$ и ширину переходного слоя L (см. таблицу). Эти результаты свидетельствуют о том, что время прохождения фронта кристаллизации от $x = x_a$ до поверхности много меньше времени отжига. Согласно данным работы [5] время прохождения фронта кристаллизации составляет примерно 3 мин. Отсутствие влияния дополнительного отжига при 900°C

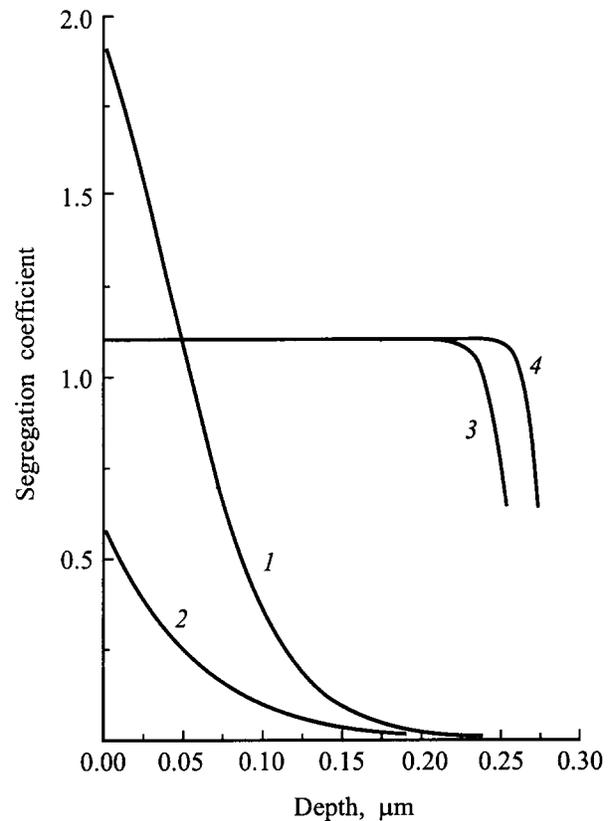


Рис. 2. Зависимость коэффициента сегрегации от глубины слоя ($E_{Er} = 0.5$ МэВ, $T_a = 620^\circ\text{C}$, $t_a = 60$ мин). Температура имплантации T_i , К: 1 — 77, 2–4 — 300. Доза ионов Er, см $^{-2}$: 1–3 — $4 \cdot 10^{14}$, 4 — $8 \cdot 10^{14}$; доза ионов O, см $^{-2}$: 1, 2 — 0, 3 — $4 \cdot 10^{15}$, 4 — $8 \cdot 10^{15}$.

объясняется малой величиной коэффициента диффузии E_{Er} в перекристаллизованном слое ($\sim 10^{-15}$ см²/с при 900°C по оценкам [6]). Этим же объясняется и неизменность при отжигах той части профиля E_{Er} , которая располагается в монокристаллической подложке (см. рис. 1).

Влияние дозы имплантации на характер перераспределения E_{Er} и параметры сегрегационной модели исследовалось при энергии ионов 1.0 МэВ. Концентрационные профили E_{Er} до и после отжига для доз имплантации $4 \cdot 10^{14}$ и $8 \cdot 10^{14}$ см⁻² представлены на рис. 3, а зависимости $k(x)$ — на рис. 4 (кривые 1–4). Как видно из рис. 3, с увеличением дозы имплантации растет скорость подъема концентрации E_{Er} на начальном этапе ТФЭ кристаллизации (кривые 2 и 5). Это обусловлено увеличением скорости нарастания зависимости $k(x)$ на этом этапе в предположении, что скорость ТФЭ кристаллизации постоянна (см. рис. 4, кривые 1 и 2). При увеличении дозы ионов E_{Er} от $4 \cdot 10^{14}$ до $3.2 \cdot 10^{15}$ см⁻² параметр L уменьшается от 65 до 40 нм. При приближении к поверхности коэффициенты сегрегации превосходят 1 и выходят на постоянный уровень $k(x) \approx k_s = 1.3–1.7$.

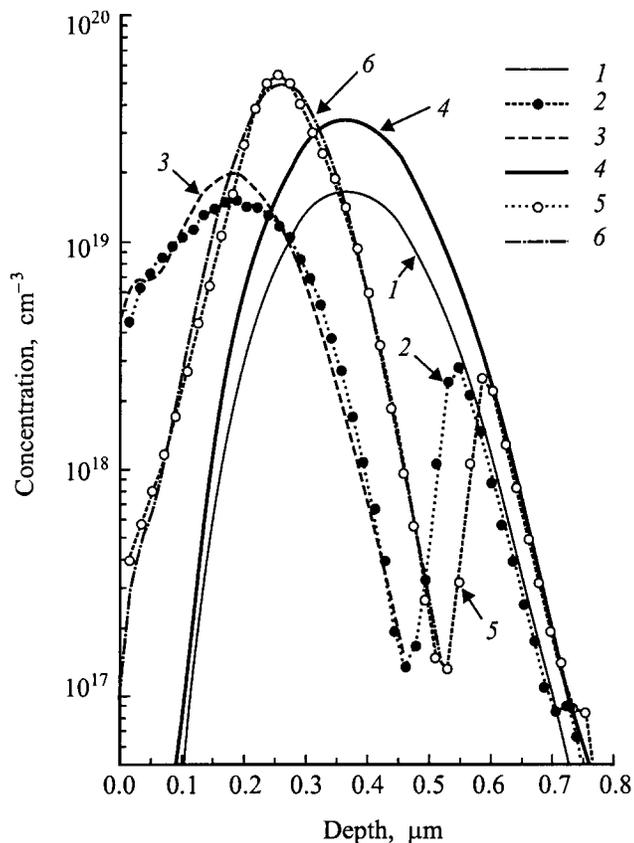


Рис. 3. Влияние дозы имплантации ионов эрбия ($E_{\text{Er}} = 1$ МэВ, 300 К) на концентрационные профили E_{Er} до (1 и 4) и после отжига (2 и 5) при температуре $T_a = 620^\circ\text{C}$ в течение $t_a = 60$ мин. Доза ионов E_{Er} , см⁻²: 1, 2 — $4 \cdot 10^{14}$; 4, 5 — $8 \cdot 10^{14}$. Параметры расчетных кривых 3 и 6: L , мкм: 3 — 65, 6 — 52; k_s : 3 — 1.3, 6 — 1.7.

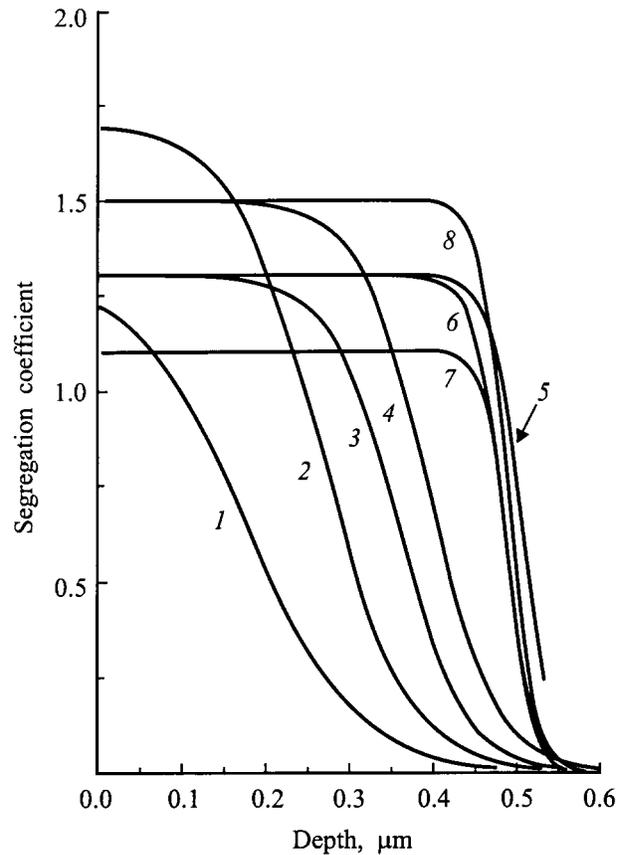


Рис. 4. Зависимость коэффициента сегрегации от глубины ($E_{\text{Er}} = 1$ МэВ, $E_0 = 135$ кэВ, $T_a = 620^\circ\text{C}$, $t_a = 60$ мин). Доза ионов E_{Er} , см⁻²: 1, 5 — $4 \cdot 10^{14}$, 2, 6 — $8 \cdot 10^{14}$, 3, 7 — $1.6 \cdot 10^{15}$, 4, 8 — $3.2 \cdot 10^{15}$; доза ионов O, см⁻²: 1–4 — 0, 5 — $4 \cdot 10^{15}$, 6 — $8 \cdot 10^{15}$, 7 — $1.6 \cdot 10^{16}$, 8 — $3.2 \cdot 10^{16}$.

Влияние дополнительной имплантации кислорода на перераспределение ионов E_{Er} , имплантированных с энергиями 0.5 и 1 МэВ, исследовалось при дозах кислорода, на порядок превышающих дозу эрбия. Концентрационные профили E_{Er} после имплантации ионов O и последующей ТФЭ кристаллизации представлены на рис. 5, а соответствующие зависимости $k(x)$ — на рис. 2 (кривые 3 и 4) и рис. 4 (кривые 5–8). Как видно из рисунков, соимплантация кислорода приводит, как правило, к увеличению k_0 и всегда — к резкому увеличению скорости нарастания концентрации E_{Er} и коэффициента сегрегации на начальных этапах ТФЭ кристаллизации. При дальнейшей ТФЭ кристаллизации перераспределение E_{Er} удовлетворительно описывается коэффициентом сегрегации, не зависящим от координаты $k(x) \approx k_s = 1.1–1.5$. Параметр L уменьшается от 48 до 9 нм при $E_{\text{Er}} = 0.5$ МэВ и от 40–65 нм до 14–18 нм при $E_{\text{Er}} = 1$ МэВ. Отметим, что соимплантация ионов O практически не изменяет положение α/c -границы, соответствующей положению максимума на изломе концентрационного профиля E_{Er} .

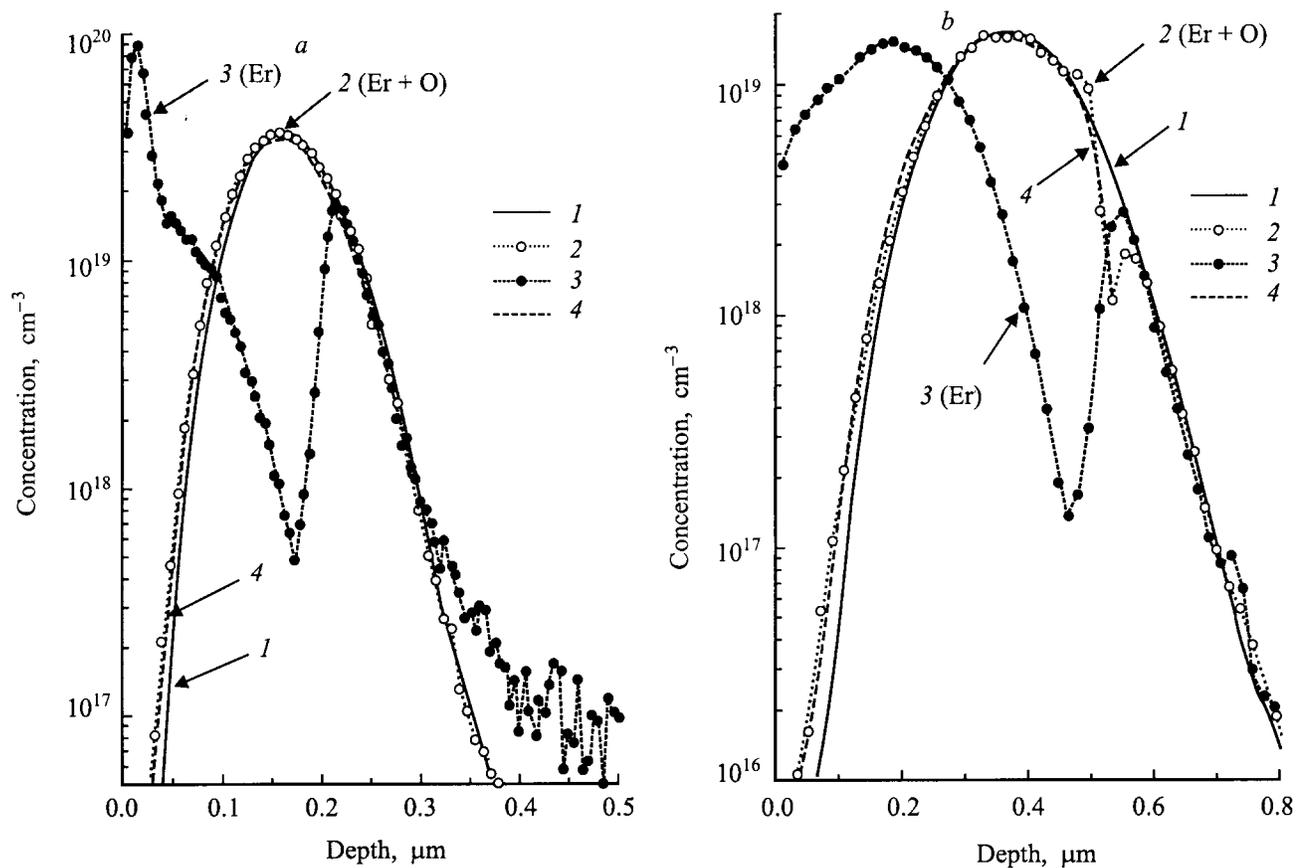


Рис. 5. Влияние соимплантации ионов кислорода на концентрационные профили Er до (1) и после отжига (2 и 3) при температуре $T_a = 620^\circ\text{C}$ в течение $t_a = 60$ мин. Доза ионов O, cm^{-2} : 1, 3 — 0, 2 — $4 \cdot 10^{15}$. Условия опытов: а — $E_{\text{Er}} = 0.5$ МэВ, $D_{\text{Er}} = 4 \cdot 10^{14} \text{cm}^{-2}$, $E_{\text{O}} = 70$ кэВ (кривая 4 рассчитана при $L = 7$ нм, $k_s = 1.1$); б — $E_{\text{Er}} = 1$ МэВ, $D_{\text{Er}} = 4 \cdot 10^{14} \text{cm}^{-2}$, $E_{\text{O}} = 280$ кэВ (кривая 4 рассчитана при $L = 18$ нм, $k_s = 1.3$).

При одинаковых дозах имплантации выявляется влияние энергии имплантируемых ионов на профили перераспределения эрбия. С увеличением энергии ионов Er от 0.5 до 1 МэВ параметр L увеличивается от 27–48 нм до 52–65 нм. Соимплантация кислорода приводит к уменьшению ширины переходного слоя, однако тенденция его увеличения с ростом энергии эрбия сохраняется. Ширина слоя составляет примерно 9 нм при $E_{\text{Er}} = 0.5$ МэВ, 16 нм при $E_{\text{Er}} = 1.0$ МэВ и 31 нм при $E_{\text{Er}} = 2.0$ МэВ. Заметного влияния величина энергии ионов на начальное и конечное значения коэффициента сегрегации не оказывает.

Все исследованные параметры процесса ионной имплантации оказывают существенное влияние на характер сегрегационного перераспределения Er: изменяется скорость нарастания концентрации Er на начальном этапе и может меняться характер распределения примеси вблизи поверхности на конечном этапе ТФЭ кристаллизации. Все эти изменения хорошо описываются в рамках сегрегационной модели [4] и объясняются изменением ширины переходного слоя L , определяющей скорость нарастания коэффициента сегрегации, с толщиной перекристаллизованного слоя и с величиной максималь-

ного значения коэффициента сегрегации k_s , контролирующего характер сегрегации вблизи поверхности. Ширина переходного слоя уменьшается при уменьшении температуры, увеличении дозы и уменьшении энергии имплантации. Все перечисленные параметры процесса имплантации влияют на изменение степени дефектности имплантированного слоя: увеличение дозы и уменьшение энергии и температуры имплантации сопровождается увеличением локальной концентрации имплантационных дефектов, вводимых в монокристаллическую подложку. При достижении порога аморфизации имплантированный слой аморфизуется. Последующее увеличение дозы имплантации приводит к росту дефектности уже аморфизованного слоя. Об этом свидетельствуют, например, появление и рост плотности состояний поперечных акустических фононов в области волновых чисел порядка 200cm^{-1} в спектрах рамановского рассеяния света при увеличении дозы [7].

В случае соимплантации ионов O наблюдается резкое увеличение $k(x)$ на начальном этапе ТФЭ кристаллизации и уменьшение L . Поскольку соимплантация ионов O не приводит к увеличению толщины аморфизованного слоя, причиной роста k и уменьшения L является, по-

видимому, не столько увеличение дефектности α -слоя, сколько проявление химической природы атомов кислорода, например, их способности образовывать комплексы Er–O [8,9]. Увеличение коэффициента сегрегации Er при соимплантации ионов O ранее наблюдалось в работе [10] и объяснялось либо образованием комплексов Er–O, понижающих энтальпию перехода Er из α - в ϵ -слой, либо уменьшением плотности ловушек Er в аморфном слое.

Таким образом, установлено, что все исследованные условия ионной имплантации: температура, доза и энергия, а также соимплантация ионов O оказывают существенное влияние на сегрегационное перераспределение Er в процессе ТФЭ кристаллизации. В рамках сегрегационной модели это влияние описывается тремя параметрами: шириной переходного слоя L , начальным и конечным значениями коэффициента сегрегации. Уменьшение L связывается с накоплением дефектности в аморфизованном имплантированном слое, а при соимплантации ионов Er и O — с образованием комплексов типа Er–O.

Авторы выражают благодарность Е.О. Паршину и А.В. Шестакову за проведение имплантации и Ю.А. Кудрявцеву за измерение концентрационных профилей.

Работа частично поддержана ISTC (грант 168), CRDF (грант 235) и Российским фондом фундаментальных исследований (грант 96-02-17901).

Список литературы

- [1] H. Ennen, J. Schneider, G. Pomrenke, A. Axmann. Appl. Phys. Lett., **43**, 943 (1983).
- [2] Н.А. Соболев. ФТП, **29**, 1153 (1995).
- [3] W.P. Gillin, Z. Jingping, B.J. Sealy. Sol. St. Commun., **77**, 907 (1991).
- [4] О.В. Александров, Ю.А. Николаев, Н.А. Соболев. ФТП, **32**, 1420 (1998).
- [5] L. Chepregi, E.F. Kennedy, J.W. Mayer, T.W. Sigmon. J. Appl. Phys., **49**, 3906 (1978).
- [6] F.Y.G. Ren, J. Michel, Q. Sun Paduano, B. Zheng, H. Kitagawa, D.C. Jacobson, J.M. Poate, L.C. Kimerling. MRS Symp. Proc., **301**, 87 (1993).
- [7] T. Motooka. Thin Sol. Films, **272**, 235 (1996).
- [8] D.L. Adler, D.C. Jacobson, D.J. Eaglesham, M.A. Marcus, J.L. Benton, J.M. Poate, P.H. Citrin. Appl. Phys. Lett., **61**, 2181 (1992).
- [9] В.Ф. Мастеров, Ф.С. Насрединов, П.П. Серегин, Е.И. Теруков, М.М. Мездрогина. ФТП, **32**, 708 (1998).
- [10] J.S. Custer, A. Polman, H.M. Pinxtern. J. Appl. Phys., **75**, 2809 (1994).

Редактор Т.А. Полянская

The influence of implantation conditions on erbium redistribution during solid phase epitaxial crystallization in silicon

O.V. Aleksandrov, Yu.A. Nikolaev, N.A. Sobolev

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract A study has been done of the influence of dose, energy and temperature of Er-ion implantation as well as O-ion coimplantation on Er concentration profile during solid phase epitaxial (SPE) crystallization of amorphized Si layer as well as on parameters of segregation model i.e. the transition layer width L and the coordinate dependence of segregation coefficient $k(x)$. A dose increase as well as a decrease of the energy and temperature of the implantation are followed by a decrease of L and increase in segregation coefficient at initial stage of SPE crystallization and can be associated with defect accumulation in amorphous layer. An additional O implantation leads to similar changes of L and $k(x)$ due to Er–O complex formation.

Fax: (812) 2471017 (N.A.Sobolev)
E-mail: N.Sobolev@pop.ioffe.rssi.ru