

Солегиrowание эрбием и кислородом кремниевых слоев в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии

© В.Г. Шенгуров, С.П. Светлов[¶], В.Ю. Чалков, Г.А. Максимов, З.Ф. Красильник*,
Б.А. Андреев*, М.В. Степихова*, Д.В. Шенгуров*, L. Palmethofer⁺, H. Ellmer⁻

Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета,
603600 Нижний Новгород, Россия

* Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603600 Нижний Новгород, Россия

⁺ Institute for Semiconductor and Solid State Physics, University Linz,
A-4040 Linz, Austria

⁻ Institute of Experimental Physics, University Linz,
A-4040 Linz, Austria

(Получена 10 января 2001 г. Принята к печати 16 января 2001 г.)

Эпитаксиальные слои кремния, солегиrowанные эрбием и кислородом, были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии с использованием сублимирующего кремниевого источника. Для выращивания легиrowанных эрбием кремниевых слоев мы использовали два вида источников примеси: 1) пластины кремния, легиrowанного эрбием, как источник потоков атомов Er и Si; 2) пластины металлического эрбия в качестве источника паров примеси в сочетании с сублимирующим кремниевым источником. При использовании газообразного кислорода для солегиrowания эрбием и кислородом *in situ* достигнуты концентрации в области от 10^{18} до 10^{20} см⁻³. Когда в камере роста находится кислород, то эффективность захвата эрбия слоем существенно возрастает. При окислении подавляется и поверхностная сегрегация эрбия.

1. Введение

Одна из актуальных задач полупроводниковой оптоэлектроники заключается в создании светоизлучающих структур на кремнии, легиrowанном редкоземельными элементами и, в частности, эрбием [1]. В спектре люминесценции центра, содержащего трехзарядный ион эрбия, наблюдается узкая температурно-независимая линия на длине волны 1.54 мкм, соответствующая минимуму потерь и дисперсии в кварцевых волокнах. Это позволяет создавать оптоэлектронные приборы на основе Si:Er и использовать их в системах волоконно-оптических линий связи.

Согласно оценкам [2], для создания светодиодов на основе структур кремний-эрбий концентрация этой примеси должна превышать величину 10^{18} см⁻³. Вместе с тем введение большего количества примеси эрбия не должно ухудшить кристаллическую структуру легиrowанного кремния.

Эрбий можно ввести в кремниевую матрицу, используя различные методы, такие как ионная имплантация [3], усиленное плазмой химическое осаждение из газовой фазы [4] и молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) [5–10].

При легиrowании кремния эрбием с помощью ионной имплантации используются ионы с высокой энергией (0.5–5 МэВ). Это приводит к образованию дефектов, которые сохраняются частично даже после продолжительного отжига. Высокие дозы имплантированных ионов и последующий отжиг (вплоть до 900°C) вызывает формирование нарушенных слоев с дефектами двойникового типа, приводят к преципитации редкоземельной примеси

и образованию преципитатов силицидного типа [3,11]. В результате взаимодействия атомов эрбия и кремния формируются оптически неактивные силицидные соединения типа ErSi₂, что резко ухудшает эффективность фотолюминесценции (ФЛ) структур.

Для улучшения характеристик легиrowанного эрбием кремния необходимо подавить, насколько возможно, процессы образования преципитатов и силицидов. Ключом для преодоления этой проблемы является снижение температуры процесса легиrowания и проведения *in situ* легиrowания слоев кремния эрбием и кислородом без деградации качества слоев. Кроме того, солегиrowание кислородом является важным фактором для формирования оптически активных центров, включающих ион эрбия [1].

В методе МЛЭ при соиспарении эрбия и кремния можно выращивать достаточно толстые слои, исключая стадию рекристаллизации, обязательную для метода ионной имплантации. При увеличении температуры источника эрбия от 800 до 1200°C получали слои с концентрацией эрбия от 10^{18} до 10^{22} см⁻³ [6]. Однако максимальная интенсивность ФЛ наблюдалась в слоях с концентрацией эрбия порядка 10^{18} см⁻³. Исследования структуры выращенных слоев кремния методом просвечивающей электронной микроскопии показали, что увеличение концентрации эрбия выше значения 10^{18} см⁻³ приводит к образованию дефектов [6]. Одной из причин этого, вероятно, могло быть загрязнение слоев за счет термического испарения и газового транспорта из нагретых до высокой температуры узлов ростовой камеры, в том числе и эффузионной ячейки. По этой причине, по-видимому, фоновое легиrowание эпитаксиальных слоев в установ-

[¶] E-mail: svetlov@phys.unn.runnet.ru

ках МЛЭ, предназначенных для выращивания легированных эрбием слоев кремния, составляло $8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ [6].

С другой стороны, слои, выращенные методом сублимационной МЛЭ, имеют низкую фоновую концентрацию электрически активных центров в кремниевых слоях (менее $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) [12]. Отличительной особенностью этого метода от традиционной МЛЭ кремния является использование резистивного нагрева при пропускании тока через источник, вырезанный в виде прямоугольного бруска из монокристалла Si. Использование других греющихся металлических деталей (кроме самого источника паров кремния) в этом методе практически исключено. Для легирования слоев испаряют кремниевый источник, легированный заданной примесью. Этим методом были выращены совершенные по структуре слои, легированные широким спектром традиционных примесей (В, Al, Ga, P, As, Sb) до высоких концентраций [13–15]. Цель данной работы — исследование возможности выращивания методом сублимационной МЛЭ совершенных по структуре эпитаксиальных слоев кремния, легированных эрбием до высоких концентраций (выше 10^{18} см^{-3}), а также солегиrowанных кислородом в процессе роста.

2. Методика эксперимента

Выращивание эпитаксиальных слоев кремния, легированных эрбием, осуществлялось с помощью устройства, описанного в [16]. Сверхвысоковакуумная установка сублимационной МЛЭ кремния была разработана и изготовлена в НИФТИ ННГУ. Установка включает вакуумную камеру с системой откачки, построенной по так называемой квазибезмасляной схеме: вакуум $\sim 5 \cdot 10^{-9}$ Торр обеспечивается безмасляными средствами откачки — 4 титановыми геттерно-ионными насосами (ГИН-0.5), а предварительная откачка и откачка во время обезгаживания камеры и ГИН-ов осуществляется паромасляным диффузионным насосом (Н-5С) с высокоэффективной азотной ловушкой и форвакуумным насосом (ВН-2МГ). Общее давление в рабочей камере контролируется ионизационным вакуумметром ВИ-14 с датчиком ИМ-27, а парциальный состав его — монополярным масс-спектрометром АПДМ-1 с датчиком ММС-2. Состав газовой среды в рабочей камере можно задавать с помощью системы напуска.

В качестве источников паров кремния был использован прямоугольный брусок, вырезанный из монокристалла кремния с высоким удельным сопротивлением (марки КДБ-15). Легирующую примесь (эрбий) испаряли либо из кристаллического кремния, легированного эрбием, либо из полоски чистого металлического эрбия, нагреваемых резистивно. Подложками служили пластины кремния, вырезанные по плоскости (100). В некоторых опытах использовались подложки, покрытые слоем термического окисла. Подложки подготавливались по стандартной технологии, включая химико-механическую полировку, финишную очистку в толуоле, перекиси

водорода и аммиаке. После помещения подложки в ростовую камеру установки и откачки ее до давления $\sim 5 \cdot 10^{-9}$ Торр проводился отжиг подложки, а также источников паров кремния и эрбия при максимальных температурах в течение 10 мин.

После отжига подложки ее температура снижалась до $\sim 1000^\circ\text{C}$, затем открывался экран и проводилось наращивание буферного нелегированного слоя толщиной ~ 0.1 мкм. После снижения температуры подложки до $450\text{--}700^\circ\text{C}$ выключались ГИН-ы и проводилось наращивание легированного эрбием слоя кремния при давлении в ростовой камере менее $2 \cdot 10^{-8}$ Торр. В некоторых случаях в процессе наращивания легированного эрбием слоя проводился напуск кислорода в ростовую камеру до давления $3 \cdot 10^{-8}\text{--}5 \cdot 10^{-6}$ Торр. В случае использования подложек в виде пластин кремния, покрытых термически выращенным слоем оксида кремния, температура подложки в процессе отжига не превышала $750\text{--}850^\circ\text{C}$.

Кристалличность приповерхностных слоев исследовали на электронографе ЭМР-102, а рельеф поверхности слоев — методом реплик на электронном микроскопе. Дефектность в объеме слоев определяли методом спектроскопии рассеяния ионов (РИ) и методом металлографии с использованием предварительной обработки в травителе Шиммеля. Концентрацию эрбия в слоях определяли методом РИ, а распределение концентрации его и других примесей (кислород и углерод) по глубине слоя — методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС). В первом методе слои облучались ускоренными ионами ^4He с энергией 600 кэВ, а во втором — ионами кислорода или Cs с энергией 1.3 кэВ.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

3.1. Выращивание слоев из легированного эрбием источника кремния

При выращивании слоев из источника кремния, легированного эрбием, его концентрация была достаточно низкой ($\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$), что связано с ограничением его содержания в источнике из-за низкой растворимости данной примеси.

На рис. 1, а приведен профиль распределения эрбия по толщине слоя, выращенного при температуре 450°C . Видно, что распределение концентрации эрбия носит немонотонный характер: в начале роста слоя у подложки она увеличивается, а затем несколько убывает, после этого вновь следует увеличение и убывание концентрации. Вблизи поверхности слоя ее величина меньше 10^{17} см^{-3} . Наблюдаемое на рис. 1, а изменение концентрации эрбия по толщине слоя кремния связано, вероятно, с встраиванием эрбия в слой по мере его накопления на поверхности до критического значения, после которого происходит захват примеси глубинными слоями. Такие колебания концентрации легирующей примеси наблю-

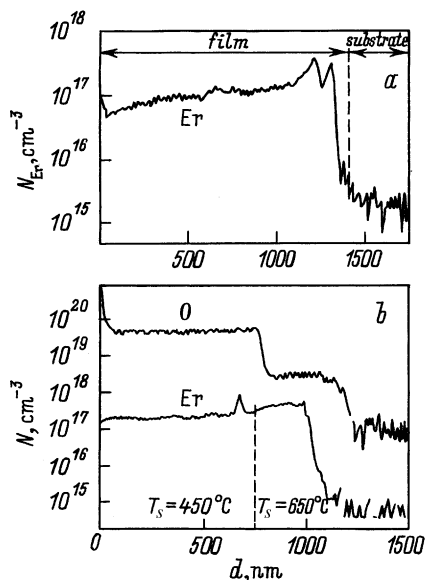


Рис. 1. Послойный анализ методом вторично-ионной масс-спектрометрии легированных эрбием эпитаксиальных слоев кремния, выращенных при температуре подложки, T_s , °C: *a* — 450, без приложения потенциала; *b* — 650 и 450, с приложением постоянного потенциала $V = -200$ В.

дались ранее при использовании достаточно больших потоков других примесей (например, Sb [17]).

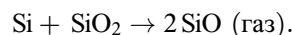
На рис. 1, *b* приведены данные ВИМС о распределении эрбия по толщине двухслойной структуры, выращенной с приложением к подложке постоянного потенциала $V = -200$ В. Первый слой выращен при температуре подложки, равной 650°C, а второй — 450°C. Из рисунка видно, что концентрация эрбия в обоих слоях выше, чем в предыдущем опыте, а концентрация кислорода в слое увеличивается ступенчато при изменении температуры подложки. В момент понижения температуры подложки до 450°C на профиле наблюдается пик концентрации эрбия и почти постоянное значение ее на всей толщине слоя.

Профили распределения концентрации эрбия и кислорода по толщине слоев, приведенные на рис. 1, *b*, можно объяснить следующим образом. При наращивании эпитаксиального слоя эрбий и кислород, как и большинство других примесей, оттесняются поверхностью роста и накапливаются на ней. Приложение в процессе роста слоя к подложке отрицательного постоянного потенциала приводит к ускорению ионов Si^+ , имеющихся в потоке атомов Si, по направлению к поверхности подложки. Ионы Si^+ воздействуют на адатомы эрбия и кислорода, усиливая их поверхностную диффузию. Это способствует захвату атомов примеси растущим слоем кремния. Однако из-за малой плотности ионов Si^+ при сублимации кремния ($\sim 10^{12}$ ион/(см²·с)) не все адатомы примеси подвергаются воздействию ионов и часть их оттесняется растущим слоем. В результате эффективность легирования слоев остается еще недостаточной.

3.2. Выращивание слоев из легированного эрбием источника кремния на подложках окисленного кремния

Увеличение концентрации кислорода и эрбия в слоях кремния было достигнуто также методом подпитки кислородом из оксида, нанесенного на рабочую сторону подложки. На рис. 2 приведены профили концентраций эрбия и кислорода в эпитаксиальном слое, который был выращен из легированного эрбием источника кремния на подложку, покрытую пленкой оксида толщиной ~ 0.1 мкм и нагретую до 850°C. Видно, что концентрация эрбия в слое выше, чем в предыдущем случаях (см. рис. 1, *a*). Причем увеличение ее наблюдается как в начале роста (т.е. вблизи границы слой-подложка), так и у поверхности слоя. Концентрация эрбия изменяется синхронно с изменением концентрации кислорода по глубине слоя.

Такое распределение примесей в слое можно объяснить следующим образом. При повышенной температуре подложки воздействие потока атомов кремния на пленку оксида приводит к разложению этой пленки по реакции [18]



В результате в пленке оксида образуются пустоты. Оставшиеся островки оксида покрываются кремнием и подпитывают кислородом растущую пленку кремния. Вначале эта подпитка идет интенсивно, а затем из-за оттеснения кислорода растущим слоем к поверхности она снижается. Накопленный при оттеснении кислород захватывается приповерхностной частью слоя.

Однако следует отметить, что выращенные данным методом слои характеризуются повышенной плотностью дефектов упаковки и дислокаций. По-видимому, создание более качественной границы раздела оксид-подложка, например, путем окисления *in situ* атомарно-чистой поверхности подложки в камере роста, должно способствовать наращиванию более совершенного слоя кремния.

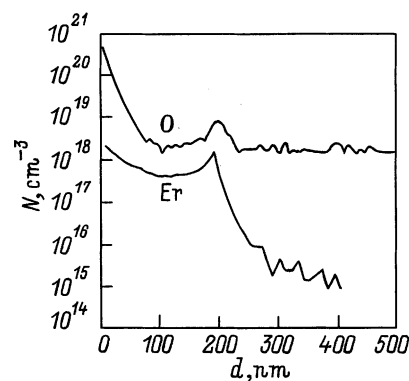


Рис. 2. Профили распределения концентраций эрбия и кислорода в эпитаксиальном слое, полученном осаждением кремния на термически окисленную подложку, нагретую до 750°C. Метод вторично-ионной масс-спектрометрии.

3.3. Выращивание слоев кремния легированных из независимого сублимирующего источника эрбия

В результате проведенных исследований установлено, что с использованием разработанного нами металлического источника паров эрбия, нагреваемого резистивно, можно контролируемо изменять концентрацию эрбия в слоях от $5 \cdot 10^{18}$ до $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ путем изменения температуры источника от 850 до 950°C. Выращенные слои имели, как правило, достаточно высокое структурное совершенство: минимальный выход вблизи поверхности слоя по данным метода РИ составлял 3.3%. Исключение составляли слои с концентрацией эрбия $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$: они имели мозаичную структуру. Отметим, что почти такой же уровень легирования эрбием слоев кремния в традиционной МЛЭ был достигнут при более высоких температурах эффузионной ячейки [6].

Поверхность слоев с концентрацией эрбия $N_{\text{Er}} \leq 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ была совершенно ровная при исследовании их методом реплик в электронном микроскопе. Однако в более легированных слоях на поверхности слоев появлялся четкий рельеф, свидетельствующий об образовании мелкоблочной структуры поверхности слоя с высокой плотностью блоков. Реальная структура слоев также изменялась с повышением уровня их легирования. При концентрации эрбия $N_{\text{Er}} \geq 10^{19} \text{ см}^{-3}$ на поверхности эпитаксиального слоя после кратковременного травления его в избирательном травителе выявлялась двумерные дефекты, похожие на дефекты упаковки, возникающие при окислении. Они имеют вид прямых "линий" на поверхности слоя (рис. 3). Для подложки с ориентацией (100) дефекты лежат в плоскости (111) и их следы на поверхности располагаются вдоль перпендикулярных направлений (110). Поскольку дефекты упаковки в кремнии имеют всегда межузельную природу [19], вероятно, что они образовались за счет формирования комплексов межузельных атомов. Отметим, что в слоях кремния, выращенных с напуском кислорода в ростовую камеру, этих дефектов не наблюдалось.

Данные ВИМС подтверждают наличие поверхностной сегрегации эрбия в слоях кремния, выращенных без напуска кислорода. На рис. 4 представлены профили распределения примесей (Er, O, C) в эпитаксиальных слоях кремния. Можно видеть, что в отсутствие легирования эрбием концентрация углерода остается практически на уровне ее в подложке. Концентрация кислорода в приграничной с подложкой части слоя почти такая же, как и в подложке (за исключением небольшого пика на границе), и лишь к поверхности слоя она медленно начинает возрастать.

Рост слоя кремния при нагревом до 900°C источнике паров эрбия характеризуется иным распределением примесей по толщине (рис. 4, b). Уровень концентрации углерода остается почти такой же, как и в подложке. Концентрация кислорода резко возрастает на границе с

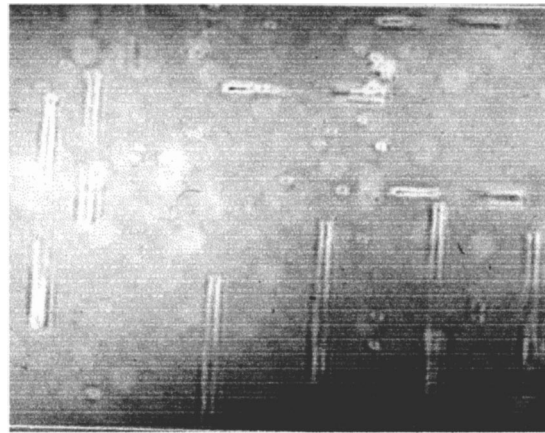


Рис. 3. Микрофотография поверхности эпитаксиального, легированного эрбием слоя кремния после травления в селективном травителе (увеличение $\times 500$).

подложкой и остается постоянной по всей толщине слоя. Концентрация эрбия ступенчато возрастает в момент начала наращивания слоя, а затем снижается. В дальнейшем ее увеличение чередуется с понижением. Такое распределение концентрации эрбия аналогично распределению его, изображенному на рис. 1, a, и связано, по-видимому, также с поверхностной сегрегацией этой примеси.

Напуск кислорода в камеру до парциального давления $\sim 5 \cdot 10^{-8}$ Торр в процессе наращивания слоя способствует более однородному распределению концентрации эрбия по толщине слоя и резкому увеличению концентрации вблизи границы с подложкой (рис. 4, c). Отметим, что концентрация эрбия в слое достигает того же уровня ($\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$), что и в предыдущем случае, хотя поток примеси на поверхность роста был ниже (температура источника $T_{\text{Er}} = 870^\circ\text{C}$). Это означает, что введение в камеру роста кислорода способствует более интенсивному захвату атомов эрбия растущим слоем. Введение в камеру роста большего количества кислорода (до парциального давления $\sim 10^{-7}$ Торр) способствует дальнейшему увеличению в слоях концентрации эрбия. Однако структурное совершенство слоев при этом заметно ухудшается.

Следует отметить, что напуск воздуха в камеру роста также способствует увеличению концентрации эрбия в слое. Об этом свидетельствуют профили распределения концентраций эрбия, кислорода и углерода по глубине слоя (рис. 4, d), выращенного при давлении $5 \cdot 10^{-6}$ Торр и температуре источника $T_{\text{Er}} = 870^\circ\text{C}$. Видно, что вблизи границы с подложкой концентрация эрбия достигает $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Однако плотность дефектов в таких слоях высокая.

Таким образом, введение кислорода в ростовую камеру приводит к подавлению сегрегации Er и увеличению его концентрации в слое. Подавление сегрегации Er кислородом на Si (100) наблюдалось и в других работах

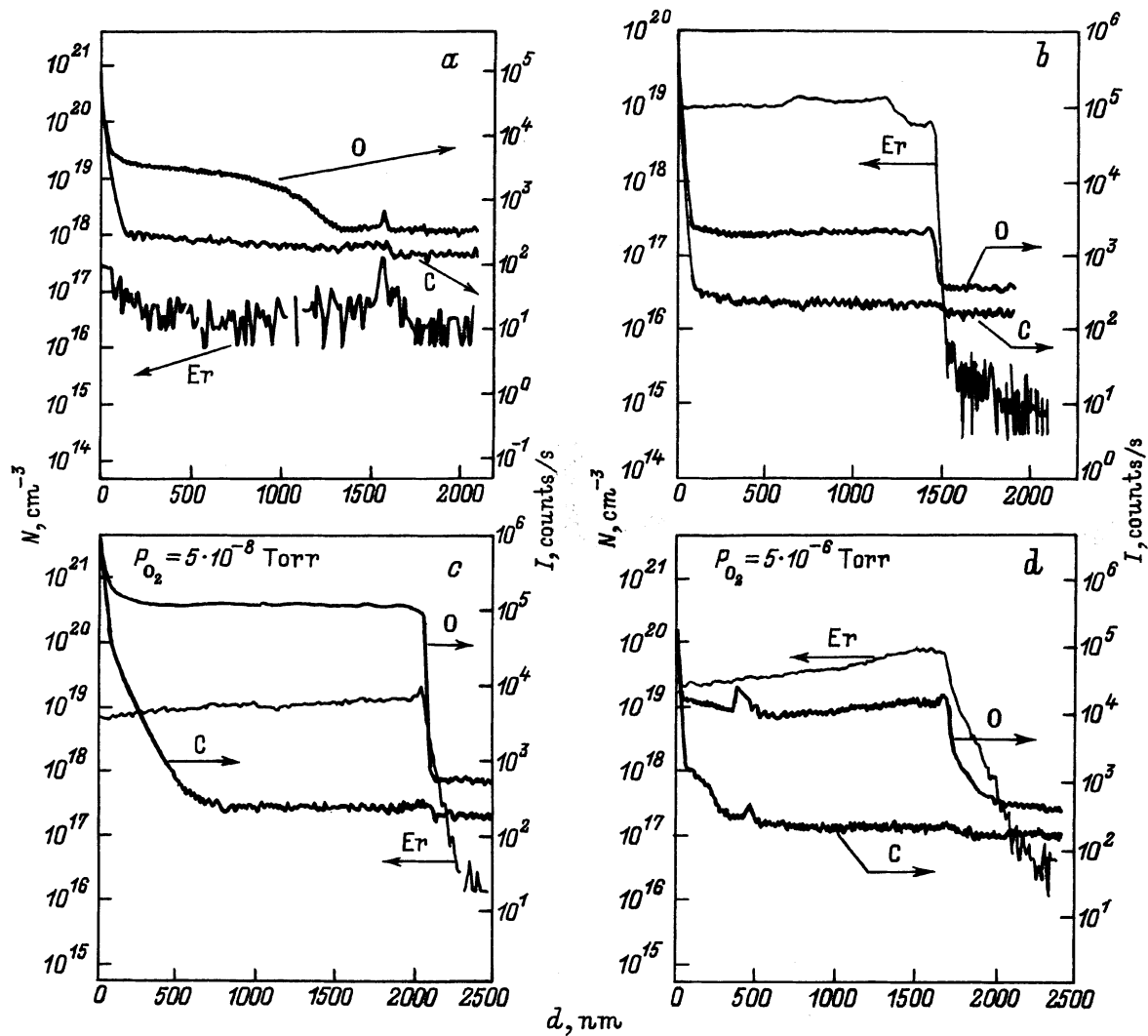


Рис. 4. Профили распределения концентрации Er, O и C по толщине слоя Si:Er, выращенного при температуре источника эрбия. $T_{Er}, ^\circ\text{C}$: a — 0; b — 900; c, d — 870 и при парциальном давлении кислорода P_{O_2}, Torr : c — $5 \cdot 10^{-8}$, d — $5 \cdot 10^{-6}$. Данные получены методом вторично-ионной масс-спектрометрии.

по выращиванию легированных эрбием слоев кремния методом МЛЭ [20]. Природу этого явления в работе [20] связывают с селективным окислением атомов азота. В то же время в работе [7] возрастание встраивания эрбия в слой кремния связывают с двумя причинами: с возможным изменением механизма роста слоев, например, за счет снижения подвижности адатомов или изменения энергетического барьера переползания ступеней на поверхности слоя, а также за счет образования комплексов при взаимодействии кислорода с эрбием, которые легко могут встраиваться в растущий слой.

Исследование фотолюминесценции (ФЛ) в легированных эрбием и кислородом слоях кремния показало, что наибольшая интенсивность ее наблюдалась в слоях, выращенных при напуске в камеру кислорода до наименьшего давления ($\sim 3 \cdot 10^{-8}$ Торр). С повышением парциального давления кислорода интенсивность ФЛ в слоях снижалась [21].

4. Заключение

Показано, что методом сублимационной МЛЭ возможно легирование слоев кремния эрбием испарением этой примеси либо из кремния, либо из независимого источника путем сублимации при резистивном нагреве полоски из этого материала. Рассмотрены три варианта солегирования слоев Si:Er кислородом: за счет бомбардировки поверхности роста низкоэнергетическими (~ 200 эВ) ионами Si^+ ; подпитки из оксида, нанесенного на рабочую поверхность подложки, а также дозированного напуска кислорода в ростовую камеру.

Максимальная концентрация эрбия в слоях кремния, выращенных испарением источника из кремния, легированного этой примесью, не превышала величину $\sim 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ даже при приложении потенциала к подложке.

Осаждение кремния на окисленных подложках, нагретых до 750–850°C, приводит к росту эпитаксиальных слоев, концентрация эрбия в которых возрастает по сравнению с ростом в "бескислородной" среде.

Использование для легирования слоев кремния независимого источника паров эрбия в виде резистивно нагреваемой полоски из этого металла позволило повысить концентрацию примеси в слоях до величины $5 \cdot 10^{18} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$ в зависимости от температуры источника. Однако даже при низких температурах роста (450–650°C) эрбий имеет тенденцию к поверхностной сегрегации. Кроме того, его встраивание в кристаллическую решетку кремния ограничено и сопряжено с формированием достаточно протяженных дефектов упаковки, природа которых связана, вероятно, с формированием комплексов межузельных атомов. При напуске в ростовую камеру кислорода в процессе роста эти дефекты не выявляются. При этом существенно подавляется поверхностная сегрегация эрбия, а так же увеличивается его концентрация в слоях.

Авторы выражают благодарность Ю.А. Карпову за предоставление слитков кремния, легированного эрбием, из которых были изготовлены источники паров кремния и эрбия.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 98-02-16619 и № 99-03-32757), программы МНТП "Фундаментальная спектроскопия" (проект 08.02.043), а также проектов INTAS 99-1872 и INCAS 00-2-01/(МЦФПИН 2000 № 00-2-01).

Список литературы

- [1] Н.А. Соболев. ФТП, **29**, 1153 (1995).
- [2] Y. ho Xie, E.A. Fitzgerald, Y.J. Mii. J. Appl. Phys., **70**, 1153 (1991).
- [3] A. Polman. J. Appl. Phys., **82**, 1 (1997).
- [4] Y.L. Rogers, P.S. Andry, W.J. Varhue et al. J. Appl. Phys., **78**, 6241 (1995).
- [5] H. Ennen, G. Pomrenke, A. Axmann, K. Eisele, J. Haude, J. Schneider. Appl. Phys. Lett., **46**, 381 (1985).
- [6] H. Efeoglu, J.H. Evans, T.E. Jackman et al. Semicond. Sci. Technol., **8**, 236 (1993).
- [7] R. Serna, M. Lohmeier, P.M. Zagviin, E. Vlieg, A. Polman. Appl. Phys. Lett., **66**, 1385 (1995).
- [8] K. Miyashita, Y. Shiraki, D.C. Houdhton, S. Fukatsu. Appl. Phys. Lett., **67**, 235 (1995).
- [9] J. Stimmer, A. Reittinger, G. Abstreiter, H. Holrbrecher, Ch. Buchal. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **422**, 15 (1995).
- [10] А.Ю. Андреев, Б.А. Андреев, М.Н. Дроздов, В.П. Кузнецов, З.Ф. Красильников, Ю.А. Карпов, Р.А. Рубцова, М.В. Степихова, Е.А. Ускова, В.Б. Шмагин, Н. Ellmer, L. Palmetshofer, K. Pilplits, H. Hutter. ФТП, **33**(2), 156 (1999).
- [11] D.J. Eaglesham, J. Michel, E.A. Fitzgerald et al. Appl. Phys., **58**, 2797 (1991).

- [12] В.В. Постников, М.И. Овсянников, Р.Г. Логинова, Р.А. Рубцова, Т.Н. Сергиевская, В.А. Толмасов. ДАН СССР, **175**, 817 (1967).
- [13] В.П. Кузнецов, Р.А. Рубцова, А.Ю. Андреев, Т.Н. Сергиевская, В.А. Толмасов. Кристаллография, **31**, 1180 (1986).
- [14] В.Г. Шенгуров. Поверхность. Физика, химия, механика. **10–11**, 44 (1994).
- [15] В.Н. Кузнецов, В.В. Постников. Кристаллография, **19**, 346 (1974).
- [16] С.П. Светлов, В.Ю. Чалков, В.Г. Шенгуров. ПТЭ, № 4, 141 (2000).
- [17] U. Koing, E. Kasper, Y.J. Herzog. J. Cryst. Growth, **52**, 151 (1981).
- [18] J.J. Lander, J. Morrison. J. Appl. Phys., **33**, 2098 (1962).
- [19] К. Рейви. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии (М., Мир, 1984).
- [20] M. Matsuoka, S. Tohno. J. Appl. Phys., **76**, 275 (1995).
- [21] В.Г. Шенгуров, С.П. Светлов, В.Ю. Чалков, Е.А. Ускова, З.Ф. Красильник, Б.А. Андреев, М.В. Степихова. Изв. РАН. Сер. физ., **64**, 353 (2000).

Редактор Т.А. Полянская

Silicon films grown and co-doped with erbium and oxygen by molecular beam epitaxy

V.G. Shengurov, S.P. Svetlov, V.Yu. Chalkov, G.A. Maksimov, Z.F. Krasil'nik*, B.A. Andreev*, M.V. Stepikhova*, D.V. Shengurov*, L. Palmetshofer⁺, H. Ellmer⁻

Nizhny Novgorod State University,
603600 Nizhny Novgorod, Russia

* Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603600 Nizhny Novgorod, Russia

⁺ Institute for Semiconductor and Solid State Physics,
University Linz,
A-4040 Linz, Austria

⁻ Institute of Experimental Physics, University Linz,
A-4040 Linz, Austria

Abstract Epitaxial growth of erbium- and oxygen-doped silicon films has been performed by means of molecular beam epitaxy using a silicon sublimation source. To grow Er-doped silicon films, we employed two different impurity sources: i) Si plates doped with Er, as a source for both Er and Si fluxes of atoms and ii) metallic Er plates as an impurity source alongside with a silicon sublimation source. In situ erbium–oxygen co-doping with concentrations ranging from 10^{18} to 10^{20} cm^{-3} have been achieved by using gaseous oxygen. The erbium capture efficiency increases significantly when the growth chamber contains oxygen, erbium segregation being suppressed by the oxidation.