

# Структурные и фотолюминесцентные свойства гетероэпитаксиальных слоев кремния на сапфире

© С.П. Светлов, В.Ю. Чалков, В.Г. Шенгуров, Ю.Н. Дроздов\*, З.Ф. Красильник\*, Л.В. Красильникова\*, М.В. Степихова\*, Д.А. Павлов\*\*, Т.В. Павлова\*\*, П.А. Шиляев\*\*, **А.Ф. Хохлов\*\***

Научно-исследовательский физико-технический институт  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

\* Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
603950 Нижний Новгород, Россия

\*\* Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: svetlov@phys.unn.ru

Приводятся первые результаты изучения эпитаксиального выращивания легированных эрбием слоев кремния на сапфировых подложках с использованием метода сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии. Приведены данные структурного анализа, обсуждаются люминесцентные свойства слоев. Показано достаточно высокое совершенство гетероэпитаксиальных слоев кремния на сапфире, выращенных при температурах  $T_s = 600\text{--}700^\circ\text{C}$ . В фотолюминесцентном отклике структур обнаружен сигнал на длине волны  $1.54\ \mu\text{m}$ , связываемый с внутрицентровыми переходами редкоземельного иона  $\text{Er}^{3+}$ .

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 01-02-16439 и 02-02-16773) и МНТП „Фундаментальная спектроскопия“ (проект № 08.02.043).

Одним из перспективных направлений развития современной микро- и нанoeлектроники является создание приборов и структур „кремний на изоляторе“, к которым относятся и гетероэпитаксиальные пленки кремния на сапфире (КНС). К преимуществам этих структур относятся их повышенная стойкость к радиационным воздействиям, термостойкость, низкое энергопотребление интегральных микросхем [1]. При возможности реализации на сапфировых подложках многофункциональных микропроцессорных схем и общей тенденции к повышению уровня интеграции возникает естественная необходимость в разработке схем для оптоэлектроники. В этой связи представляют интерес структуры на основе кремния, легированного редкоземельными элементами [2].

Доминирующим методом изготовления КНС-структур является кристаллизация из газовой фазы с участием химических реакций [3]. Однако высокая температура осаждения ( $\sim 1000^\circ\text{C}$ ) приводит к появлению в слоях кремния напряжений сжатия из-за достаточно больших различий в величинах коэффициентов линейного расширения кремния и сапфира. Для повышения кристаллографического совершенства выращивание КНС-структур проводят методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [4]. При низких температурах роста сводится к минимуму влияние разницы коэффициентов термического расширения этих материалов и уменьшается плотность дефектов в эпитаксиальных слоях.

Целью данной работы является исследование возможности выращивания методом сублимационной МЛЭ легированных эрбием слоев кремния на сапфире, люминесцирующих на длине волны  $1.54\ \mu\text{m}$ .

## 1. Методика эксперимента

Подложками служили пластины сапфира с ориентацией  $(1\bar{1}02)$ . Перед осаждением слоев кремния пластины отжигались при температуре  $1200\text{--}1400^\circ\text{C}$  в течение  $30\text{--}90\ \text{min}$  непосредственно в ростовой камере. Потoki атомов Si и Er формировались при нагреве до  $\sim 1330^\circ\text{C}$  сублимирующего источника, вырезанного из кремниевого слитка, легированного этой примесью. Источник разогревался электрическим током [5]. В ряде опытов на сапфире выращивались нелегированные слои Si, при этом в качестве источника использовался кремний марки КДБ-15, нагретый до  $\sim 1380^\circ\text{C}$ . Скорость осаждения слоев составляла  $0.08\text{--}0.1\ \text{nm/s}$ . Температура подложки варьировалась от  $500$  до  $800^\circ\text{C}$ . Давление остаточных газов в процессе роста слоев не превышало  $1 \cdot 10^{-7}\ \text{Torr}$ . Выращивались слои кремния с толщиной от  $0.25$  до  $0.75\ \mu\text{m}$ .

Структура выращенных слоев анализировалась методами дифракции электронов и рентгеновских лучей. Использовался электронограф ЭМР-102 в режиме „на отражение“ при скользящем угле падения и ускоряющем напряжении  $100\ \text{kV}$ . Рентгенодифракционные спектры регистрировались на дифрактометре ДРОН-4 с монохроматором  $\text{Ge}(400)$  на  $\text{CuK}\alpha_1$ -излучении. Морфология поверхности слоев изучалась с помощью атомно-силовой микроскопии на приборе ТМХ-2100 „Accurex“. Фотолюминесцентные измерения проводились на модернизированной установке КСВУ-23 с базовым монохроматором МДР-23. Сигнал возбуждался аргоновым лазером (линия  $514.5\ \text{nm}$ ) с мощностью накачки  $\sim 100\ \text{mW}$ . Для регистрации спектров фотолюминесценции (ФЛ) использовались высокочувствительный охлаждаемый гер-

маниевый детектор модели EO-817A и стандартная техника „lock-in“ детектирования. Спектры измерялись при температурах 77 и 300 К с разрешением  $\sim 6$  nm.

## 2. Результаты и обсуждение

а) Структура выращенных слоев. Исследовалось влияние температуры предэпитаксиального отжига подложки и температуры роста на структуру выращенных слоев кремния. Испарение кремния осуществлялось из нелегированного источника. После отжига подложки при высокой температуре ( $\sim 1400^\circ\text{C}$ ) в течение 30 min на электронограммах слоя кремния наблюдались Кикучи-линии и Кикучи-полосы (рис. 1), что свидетельствует о высоком структурном совершенстве приповерхностной области слоя Si. С повышением температуры роста резкость Кикучи-картин увеличивалась, т.е. структура эпитаксиального слоя улучшалась. В то же время для исходной подложки сапфира они были едва заметны. По-видимому, сказывается наличие нарушенного слоя на поверхности сапфира, возникающего при механической полировке.

Выращенные на отожженных при  $1400^\circ\text{C}$  подложках слои кремния имеют достаточно гладкую поверхность (рис. 2, а), а на отожженных при  $1200^\circ\text{C}$  подложках поверхность эпитаксиального слоя выглядит более грубой (рис. 2, б). Вероятно, в последнем случае температура оказалась недостаточно высокой для удаления с поверхности сапфира углеродных и кислородных загрязнений.

На подложках, отожженных при  $1400^\circ\text{C}$ , происходит послойное наращивание. По данным рентгеновской дифракции при низких температурах роста ( $500\text{--}550^\circ\text{C}$ ) слои кремния имели преимущественную ориентацию (110), а начиная с  $600^\circ\text{C}$  и выше — ориентацию (100). Максимальная интенсивность пика рентгеновской дифракции с такой ориентацией наблюдалась в слоях, выращенных при  $700^\circ\text{C}$ . Типичная кривая качания, полученная для слоя Si(100), приведена на рис. 3.

После проведения исследований эпитаксии нелегированных слоев кремния на сапфире были выращены слои кремния, легированные эрбием. Температура роста

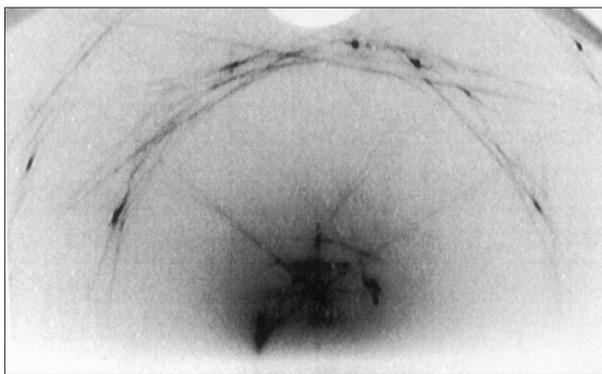


Рис. 1. Электронограмма „на отражение“ структуры КНС.

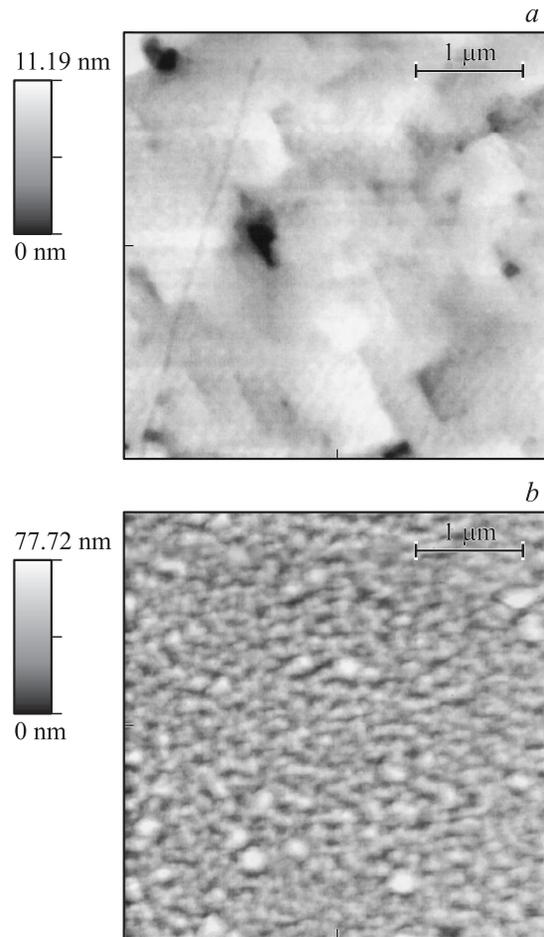


Рис. 2. Атомно-силовое изображение поверхности слоев Si, выращенных на подложках из сапфира, прошедших предварительный отжиг при  $1400^\circ\text{C}$  (а) и  $1200^\circ\text{C}$  (б).

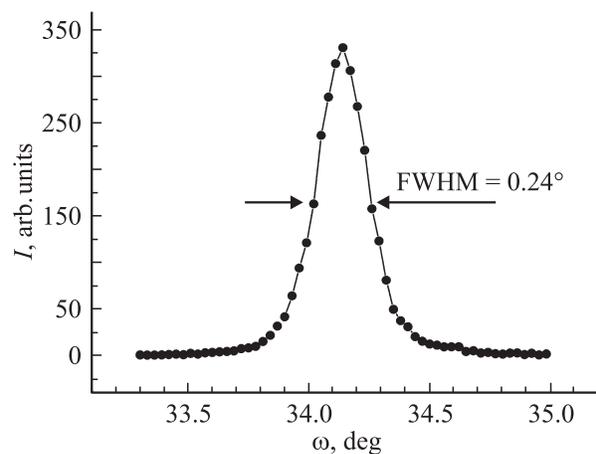
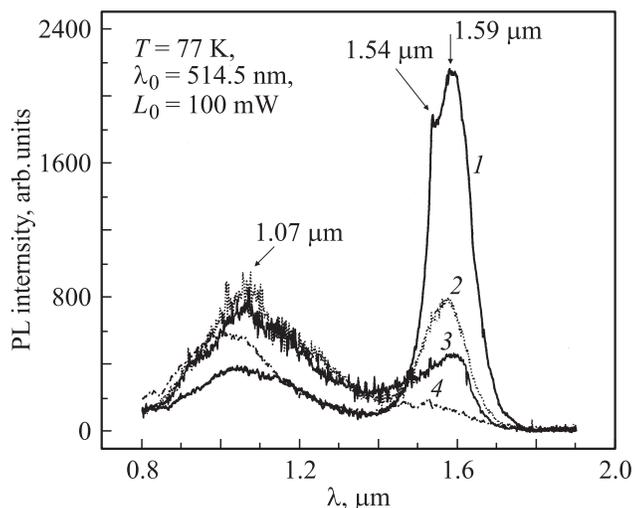


Рис. 3. Рентгенодифракционная кривая качания слоя Si, выращенного при  $T_s = 700^\circ\text{C}$ . Отражение (400)Si.

слоев составляла  $600^\circ\text{C}$ . Эта температура специально была выбрана несколько ниже оптимальной температуры получения структурно совершенных слоев ( $700^\circ\text{C}$ ) для того, чтобы избежать образования силицидных со-



**Рис. 4.** Спектральные зависимости фотолюминесценции КНС-структур. 1 — для слоя кремния, легированного эрбием, 2, 3 — для нелегированных слоев кремния разного структурного совершенства, выращенных на подложках, предварительно отожженных при 1200 и 1400°C соответственно, 4 — для сапфировой подложки.

единений в слое кремния. Концентрация эрбия в слоях составляла порядка  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

б) Фотолюминесцентные особенности КНС-структур. Результаты фотолюминесцентных исследований нелегированных и легированных эрбием КНС-структур приведены на рис. 4. При температуре измерений 77 К в спектре ФЛ КНС-структуры с легированным эрбием слоем наблюдается достаточно интенсивный сигнал в области длин волн 1.5–1.7  $\mu\text{m}$ , спектр которого представлен двумя составляющими с максимумами на 1.54 и 1.59  $\mu\text{m}$  (рис. 4). По положению пика и узости спектральной линии фотолюминесцентный отклик на длине волны 1.54  $\mu\text{m}$  естественно связать с переходами из возбужденного в основное состояние в 4*f*-оболочке редкоземельного иона  $\text{Er}^{3+}$  (переходы  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ). Вторая, более интенсивная линия в спектре с максимумом на 1.59  $\mu\text{m}$  значительно уширена и, судя по положению линии и соотношению интенсивностей, очевидно, не связана с внутрицентровыми переходами редкоземельной примеси. Наиболее вероятно (учитывая форму и ширину линии), что этот люминесцентный отклик в структуре обусловлен дефектными комплексами в напряженном слое кремния либо комплексами примесных центров, в частности известными дефектными комплексами в кремнии, включающими в себя атомы углерода и кислорода (люминесцентные линии *C* и *P* [6]), содержание которых может быть велико в эпитаксиальных слоях. Действительно, линия ФЛ с максимумом на 1.59  $\mu\text{m}$  присутствовала также в спектрах КНС-структур, не легированных редкоземельной примесью (при отсутствии сигнала на 1.54  $\mu\text{m}$ ), причем интенсивность линии возрастала

с ухудшением структурного совершенства слоев. Для сравнения на рис. 4 приведены спектральные зависимости слоев кремния на сапфире, выращенных на подложках, предварительно отожженных при 1200 и 1400°C. Данные рентгеновской дифракции для этих образцов дают значения полуширины кривых качания Si(400) в 400 и 3400 относительных единиц соответственно. Видно, что линия ФЛ на 1.59  $\mu\text{m}$  непосредственно коррелирует с параметрами структурного совершенства слоев. Фотолюминесцентный отклик самой сапфировой подложки в КНС-структурах проявляется лишь в незначительном сигнале в области длин волн 0.9–1.2  $\mu\text{m}$  (зависимость 4 на рис. 4), присутствующем также в спектрах эпитаксиальных слоев. Отметим, что в спектрах ФЛ исследованных структур практически отсутствовали характерные линии дислокационной люминесценции (известная серия линий *D1–D4* [7]), наблюдаемые, как правило, в кремнии с большим содержанием дислокаций и структурных дефектов. Сигнал ФЛ КНС-структур в диапазоне 1.5–1.7  $\mu\text{m}$  значительно уменьшался при увеличении температуры измерений и практически не детектировался при 300 К.

Таким образом, в данной работе показано, что метод сублимационной МЛЭ позволяет выращивать структурно совершенные тонкие ( $\sim 0.5 \mu\text{m}$ ) слои кремния на сапфире, в том числе слои, легированные эрбием и люминесцирующие на длине волны 1.54  $\mu\text{m}$ .

## Список литературы

- [1] D. Mead, J. Hine. Rep. Progr. Phys. **8**, 3, 327 (1987).
- [2] Н.А. Соболев. ФТП **29**, 1153 (1995).
- [3] В.С. Панков, М.Б. Цыбульников. Эпитаксиальные кремниевые слои на диэлектрических подложках и приборы на их основе. Энергия, М. (1979).
- [4] E.D. Richmond, J.G. Pelligrino, M.E. Twigg et al. Thin Solid Films **192**, 287 (1990).
- [5] С.П. Светлов, В.Ю. Чалков, В.Г. Шенгуров. ПТЭ **4**, 141 (2000).
- [6] W. Kuerner, R. Sauer, A. Doerner, K. Thonke. Phys. Rev. B **39**, 18 13 327 (1989).
- [7] R. Sauer, J. Weber, J. Stolz. Appl. Phys. A **36**, 1 (1985).