

02;05;06.2;06.3

Легирование слоев кремния из сублимирующего источника эрбия в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии

© С.П. Светлов, В.Ю. Чалков, В.Г. Шенгуров, Е.А. Ускова,
Г.А. Максимов, Б.А. Андреев, З.Ф. Красильник,
М.В. Степихова, Н. Ellmer

Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Поступило в Редакцию 6 августа 1999 г.

Статья посвящена задаче получения светоизлучающих структур на кремнии, легированном примесью редкоземельных элементов (Er). Предложена новая методика легирования кремния эрбием в процессе выращивания слоев методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

В последнее десятилетие у исследователей возрос интерес к кремнию, легированному эрбием, связанный с возможностью создания излучателей на длине волны $1.54 \mu\text{m}$, т.е. в области минимальных потерь в кварцевых волоконных световодах [1]. Для получения высокоэффективных приборов концентрация оптически активных центров, связанных с эрбием, по приведенным в литературе оценкам должна быть не ниже $1 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$. Вместе с тем введение большого количества примеси эрбия не должно ухудшать кристаллическую структуру слоев легированного кремния.

Эрбий можно ввести в кремниевую матрицу, используя различные методы, такие как ионная имплантация [2], усиленное плазмой химическое осаждение из газовой фазы [3], молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) [4,5]. Однако при ионной имплантации эрбия используют ионы с высокой энергией (0.5–5 MeV). Они вызывают значительные нарушения в кристаллической решетке кремния, которые не устраняются полностью при последующем длительном отжиге. При усиленном плазмой химическом осаждении из газовой фазы легированные эрбием эпи-

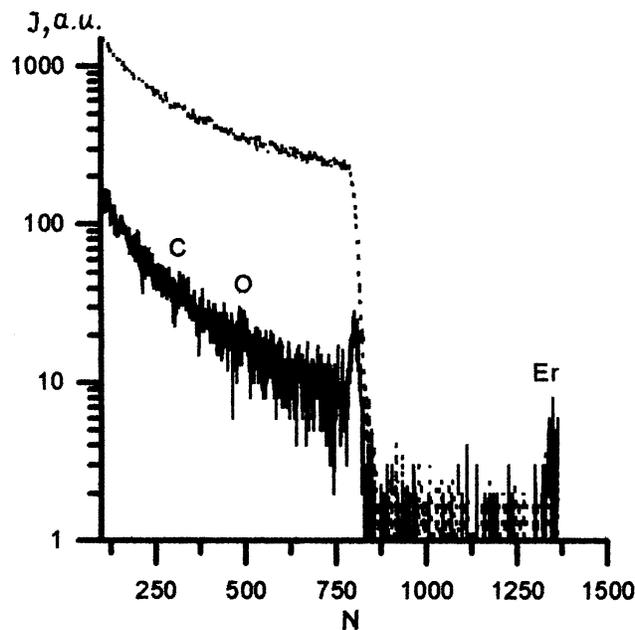


Рис. 1. Спектры POP ионов ^4He , падающих на легированные эрбием слои Si, полученные при температуре источника Er — 850°C (— $\langle 100 \rangle$; - - - произвольное), N — номер канала регистрации.

таксиальные слои кремния содержат высокую концентрацию углерода, что отрицательно сказывается на их фотолюминесценции. Соиспарение эрбия и кремния в процессе МЛЭ дает возможность выращивать толстые легированные эрбием слои, исключая стадию рекристаллизации, обязательную для метода ионной имплантации. В традиционной МЛЭ для испарения эрбия, как и для большинства других примесей, применяется эффузионная ячейка. Совершенная эффузионная ячейка — сложный узел установки МЛЭ. Кроме того, в паре испаряемого из ячейки материала не исключено образование кластеров, что может оказывать влияние на качество эпитаксиальных слоев и на процесс вхождения примеси [6].

$T_{\text{Er}}, ^\circ\text{C}$	Концентрация электронов, cm^{-3} , при методе измерений	
	$C-V$	Холла
800	—	$(2.5-5) \cdot 10^{15}$
850	$2 \cdot 10^{16}$	$1.5 \cdot 10^{16}$
900	$2 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{17}$

Целью данной работы являлось исследование возможности легирования эпитаксиального слоя (ЭС) кремния в процессе его наращивания молекулярным потоком Er, создаваемым резистивно нагреваемой полоской этого металла (впервые, насколько нам известно по литературе), а также исследование структуры, состава, электрических и оптических характеристик ЭС Si.

Эпитаксиальные кремниевые слои были выращены методом сублимационной МЛЭ [5]. Источником потока атомов Si служил прямоугольный брусок, вырезанный из высокоомного слитка кремния и нагреваемый пропусканием тока до 1380°C . Поток атомов эрбия создавали путем его сублимации из полоски, нагреваемой резистивно до температуры $800-950^\circ\text{C}$. Подложками служили пластины $p\text{-Si}$ с удельным сопротивлением 12 и $0.005 \Omega \cdot \text{cm}$, ориентированные по плоскости (100) с отклонением $\sim 0.15^\circ$.

Для удаления с поверхности подложки слоя естественного окисла кремния ее прогревали при температуре 1250°C в течение 10 min. Затем после снижения температуры подложки до 1000°C проводили рост буферного слоя Si толщиной $0.2 \mu\text{m}$. Наращивание легированного эрбием слоя начиналось в момент снижения температуры подложки до $550-550^\circ\text{C}$. Толщина выращенных слоев составляла $4-6 \mu\text{m}$.

Исследование дефектности выращенных ЭС проводилось на оптическом микроскопе после травления в селективном травителе, о структурном совершенстве судили по электронограммам на отражение. Концентрация эрбия определялась методом резерфордского обратного рассеяния (РОР) ионов ^4He с энергией 600 keV . Концентрацию и распределение носителей заряда в слоях измеряли при комнатной температуре по эффекту Холла и $C(V)$ -характеристикам соответственно. Спектры фотолюминесценции регистрировались с разрешением до 1 cm^{-1} с

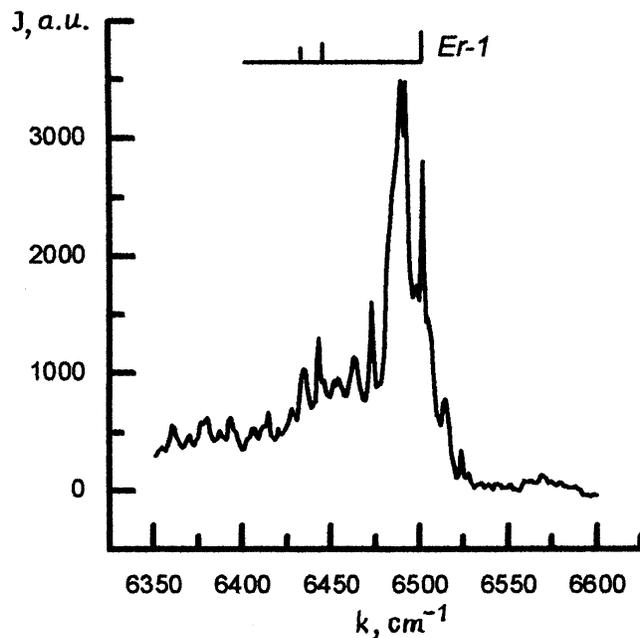


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции эпитаксиального слоя кремния, легированного эрбием до концентрации $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (k — волновое число).

помощью вакуумного Фурье-спектрометра "Bomem DA3" в диапазоне $3000\text{--}12000 \text{ cm}^{-1}$.

В результате проведенных исследований нами установлено, что в слоях, выращенных при температуре источника Er 850 и 950°C , концентрация эрбия составляет (по данным POP) $5 \cdot 10^{18}$ и $\sim 1 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ соответственно. Типичный POP спектр ЭС Si, легированного эрбием до концентрации $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, приведен на рис. 1. Выращенные слои имели, как правило, достаточно высокое кристаллическое совершенство: минимальный выход вблизи поверхности равен 0.033, что соответствует теоретическим оценкам для бездефектного кремния. Исключение составлял слой с концентрацией эрбия $\sim 1 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, где степень кристалличности ухудшается (минимальный выход — 0.33).

Это подтверждается данными электронографии: для первого образца наблюдается Кикучи-картина, а на втором — мозаичная структура.

Более детальное исследование реальной структуры выращенных ЭС показало, что на поверхности совершенных монокристаллических пленок ($N_{\text{Er}} \leq 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) наблюдается низкая (10^2 cm^{-2}) плотность точечных дефектов. В слоях с концентрацией Er, превышающей $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, плотность дислокаций составляет 10^2 – 10^3 cm^{-2} , а плотность дефектов упаковки — 10^3 – 10^4 cm^{-2} .

Согласно результатам электрических измерений, полученные структуры имели *n*-тип проводимости (см. таблицу). Повышение температуры источника Er в интервале 800–900°C приводило к увеличению концентрации электронов в ЭС от $2 \cdot 10^{15}$ до $4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Дальнейшее увеличение T_{Er} до 920–950°C приводило к изменению величины концентрации носителей со сменой знака типа проводимости — $p > 4 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Подобные изменения концентрации в ЭС, легированных Er, наблюдались также при изменении других технологических условий роста, например намеренном увеличении давления в рабочей камере. Отметим, что измеренная концентрация носителей тока на 1–3 порядка ниже величины концентрации атомов эрбия в слое.

На рис. 2 в качестве примера приведен спектр фотолюминесценции (ФЛ) эпитаксиальной структуры, легированной эрбием при температуре источника Er, равной 850°C. Наблюдалась интенсивная ФЛ при низкой температуре (4,2 К) в области $1.54 \mu\text{m}$ (6400 – 6550 cm^{-1}), связанной с внутриатомными переходами $I_{13/2} \rightarrow I_{15/2}$ в *4f*-оболочке иона Er^{3+} . Интенсивная низкотемпературная ФЛ наблюдалась также в слое с максимально достигнутой нами концентрацией эрбия ($\sim 1 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$), правда после соответствующего отжига (800°C) в атмосфере азота.

Таким образом, предложен новый метод легирования слоев Si эрбием из металлического источника в процессе сублимации, что позволило получить эпитаксиальные слои Si с высоким структурным совершенством, излучающие в области $1.54 \mu\text{m}$. При температуре источника эрбия 800–950°C концентрацию Er в слоях кремния можно контролируемо изменять в диапазоне 10^{18} – 10^{21} cm^{-3} .

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 98–02–16619 и 99–03–32757) и МНТП "Фундаментальная спектроскопия" (проект 08.02.043).

Список литературы

- [1] *Соболев Н.А.* // ФТП. 1995. Т. 29. В. 7. С. 1153–1177.
- [2] *Polman A.* // J. Appl. Phys. 1997. V. 82. N 1. P. 1–39.
- [3] *Rogers I.L., Andry P.S., Varhue W.J.* // Appl. Phys. 1995. V. 78. N 2. P. 6241.
- [4] *Stimmer J., Rettinger A., Abstreiter G.* et al. // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 1996. V. 422. P. 15–20.
- [5] *Шенгуров В.Г., Светлов С.П., Павлов Д.А.* и др. // Изв. АН. Сер. физическая. 1999. Т. 63. № 2. С. 406–410.
- [6] *Ченга Л., Плога Л.* Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры. М.: Мир, 1989. 584 с.