

05;06;07

Особенности фотолюминесценции монокристаллических и пористых слоев кремния, легированных эрбием

© Л.К. Орлов, С.В. Ивин, Д.В. Шенгуров, Э.А. Штейнман

НИФТИ Нижегородского государственного университета
им. Н.И. Лобачевского
Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка

Поступило в Редакцию 1 июля 1998 г.

Обсуждаются особенности спектров фотолюминесценции монокристаллических и пористых слоев Si:Er, полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии.

В последние годы в связи с потребностями оптоэлектроники в литературе активно обсуждается проблема оптических переходов в атомах эрбия, внедренных различными способами в матрицу кремния. На сегодняшний день детально изучены свойства кремния, легированного эрбием либо непосредственно в процессе эпитаксиального роста [1,2], либо с использованием методов ионной имплантации и диффузии [3]. Для повышения эффективности излучательной способности эрбия в кремнии было предложено также использовать пористый кремний [4], где эрбий вводился в систему из раствора в процессе электрохимического травления. В последнем случае, однако, эрбий, вероятнее всего, остается либо на поверхности пор, образуя там светоизлучающие на длине волны $1.54 \mu\text{m}$ комплексы, либо диффундирует в приповерхностные слои окисленного кремния. Эффективность излучения комплексов Er в этом случае повышается за счет увеличения площади поверхности, но механизм излучения остается традиционным для Er. Вследствие этого трудно ожидать, что эффективность фотолюминесценции эрбия в пористом кремнии может сравниться с эффективностью его излучения в обычных стеклах. Остается, однако, неясной роль объемных эффектов в пористом кремнии, и в частности, способствует ли электронная структура пористого кремния повышению эффективности излучательных переходов Er в кремнии.

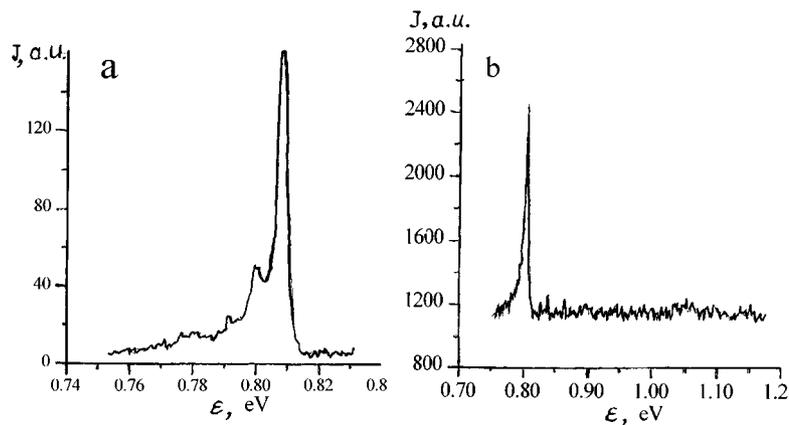


Рис. 1. Спектры фотолуминесценции двух монокристаллических образцов Si:Er.

В настоящей работе нами была предпринята попытка ответить на последний вопрос путем сопоставления фотолуминесцентных свойств эпитаксиальных и изготовленных на их основе слоев кремния, легированных эрбием. Для выращивания автоэпитаксиальных кремниевых структур, легированных эрбием, мы использовали метод молекулярно-пучковой эпитаксии (МВЕ) кремния с сублимирующими твердофазными источниками [5,6]. Источниками потоков атомов кремния и эрбия в реакторе установки служили высокорезистивные бруски кремния, легированного эрбием непосредственно в процессе их изготовления методом бестигельной зонной плавки. Указанный метод выращивания эпитаксиальных слоев кремния, легированных эрбием, был предложен и применен нами первыми. Масс-спектрометрические исследования распределения эрбия в источнике показали, что он градиентным образом распределен вдоль длины источника в диапазоне концентраций $N_{Er} \sim 10^{17} \div 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Используя указанный метод эпитаксии, нами были выращены при температуре роста $T_p \approx 600^\circ\text{C}$ монокристаллические пленки легированного эрбием кремния толщиной до $2.0 \mu\text{m}$. Содержание атомов кислорода в эпитаксиальных пленках кремния задавалось давлением остаточных газов в реакторе на уровне $\sim 1 \cdot 10^{-6} \text{ Torr}$. Структура

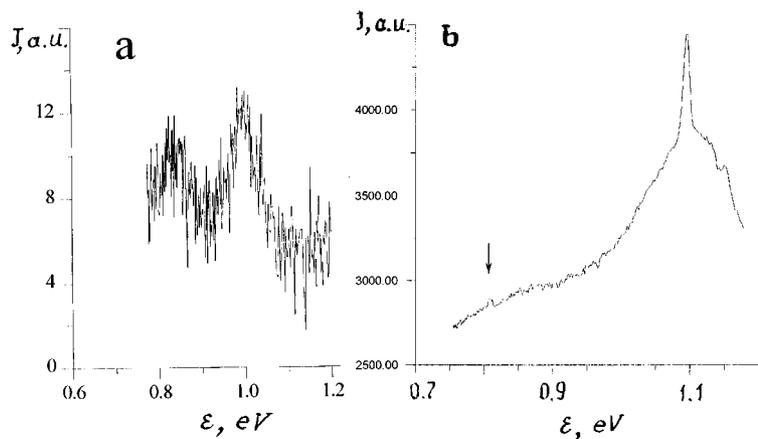


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции соответствующих образцов пористого Si:Er.

поверхности эпитаксиального слоя в этом случае имела вид апельсиновой кожуры, а металлографический анализ выявил наличие наклонных дислокаций, прорастающих от подложки к поверхности (до $6 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}$). Данный факт свидетельствует об эффективном встраивании атомов эрбия в растущий слой (концентрация эрбия в слое по данным масс-спектрометрии достигала величины $\sim 1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$). Наличие эрбия в образцах подтверждается также измерениями профиля структуры CV-методом и методом эффекта Холла. В общем случае атомы эрбия в Si могут давать как *n*-, так и *p*-тип проводимости, при этом концентрация электрически активных состояний в структуре составляет единицы процентов от полного числа атомов эрбия в слое. Исходный источник Si:Er, как уже упоминалось, имел *p*-тип проводимости и был достаточно высокоомным ($p < 10^{14} \text{ cm}^{-3}$).

Типичный спектр фотолюминесценции, снятый при $T = 4.2 \text{ K}$ на двух выращенных образцах, представлен на рис. 1. Видно, что достаточно эффективная излучательная рекомбинация через состояния атомов эрбия (линия на длине волны $1.54 \mu\text{m}$) практически полностью подавила излучательные переходы D_1 и D_2 на скоплениях дислокаций в слое.

На базе выращенных эпитаксиальных структур Si:Er методом электрохимического травления были приготовлены слои пористого кремния, в которых в отличие от работы [4] атомы эрбия находились не на поверхности пор, а в объеме монокристаллитов. На рис. 2 приведены его спектры фотолюминесценции. Видно, что после электрохимического травления роль эрбия в излучательной рекомбинации резко уменьшилась: интенсивность линии на длине волны $1.54 \mu\text{m}$ сильно ослабла, одновременно увеличилась эффективность излучательной рекомбинации с участием оптического фонона. Данный эффект, возможно, обусловлен тем, что травление образца в основном происходит по наклонным дислокациям, прорастающим от подложки к поверхности, в окрестности которых, вероятнее всего, наблюдается максимальная концентрация как эрбия, так и кислорода. Вытравливание этих областей при формировании пористой структуры существенно понижает концентрацию эрбия в оставшейся части кремниевой матрицы, а электронные, в частности низкоразмерные, эффекты не компенсируют этого уменьшения и не приводят к каким-либо заметным особенностям.

Работа выполнена при поддержке МНТП "Физика твердотельных наноструктур" (грант 97-2023).

Авторы благодарят также М.Г. Мильвидского и Н.А. Соболева, инициировавших постановку и выполнение данной задачи, а также Ю.А. Карпова за приготовление источников Si:Er.

Список литературы

- [1] *Stimmer J., Reitinger A., Nutz J.F., Abstreiter G., Holzbrecher H., Buchal C. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68. P. 3290.*
- [2] *Binetti S., Donghi M., Pizzini S., Castaldini A., Cavallini A., Fraboni B., Sobolev N.A. // Solid State Phenomena. 1997. V. 57–58. P. 197.*
- [3] *Соболев Н.А. // ФТП. 1995. Т. 29. С. 1153.*
- [4] *Przybylinska H., Jantsch W., Suprun-Belevitch Yu., Stepikhova M., Palmetshofer L., Hendorfer G., Kozanecki A., Wilson R.J., Sealy B.J. // Phys. Rev. 1996. B. 54. P. 2532.*
- [5] *Толомасов В.А., Абросимова Л.Н., Горшенин Г.Н. // Кристаллография. 1970. Т. 15. С. 1233.*