

Влияние режимов роста на фотолюминесценцию слоев кремния, легированных эрбием в процессе сублимационной МЛЭ

© В.Г. Шенгуров, С.П. Светлов, В.Ю. Чалков, Б.А. Андреев*, З.Ф. Красильник*, Д.И. Крыжков*

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

E-mail: svetlov@phys.unn.ru

Приведены результаты выращивания эпитаксиальных слоев кремния, легированных эрбием, с использованием двух разных режимов роста: обычной молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и твердофазной эпитаксии (ТФЭ). Показано, что легированный эрбием слой кремния при его осаждении методом ТФЭ на холодную подложку и последующем отжиге проявляет более интенсивную фотолюминесценцию на длине волны $1.54 \mu\text{m}$, чем слои, выращенные методом МЛЭ.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 01-02-16439 и 02-02-16773) и Минпромнауки РФ (госконтракты № 40.020.1.1.1161 и 40.020.1.1.1159).

Рост числа исследований кремния, легированного эрбием, связан с возможностью использования этого материала для создания кремниевых оптоэлектронных приборов на длине волны $1.54 \mu\text{m}$ [1]. Одним из условий успешной реализации кремниевых приборных структур является достижение высокого содержания оптически активных центров, связанных с эрбием. При легировании кремния эрбием с помощью ионной имплантации используются ионы с высокой энергией ($0.5\text{--}5 \text{MeV}$). Это приводит к образованию дефектов, которые сохраняются частично даже после продолжительного отжига и приводят к преципитации редкоземельной примеси [2]. При ионной имплантации, как и в иных методах легирования, в результате взаимодействия атомов эрбия и кремния формируются оптически неактивные силицидные соединения. Было установлено, что для подавления образования преципитатов эрбия и силицидов эрбия необходимо осуществлять процесс легирования при пониженных температурах и слои кремния солегировать кислородом для формирования оптически активных центров, включающих ионы Er^{3+} [3].

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) при соиспарении кремния и эрбия удается выращивать слои с общей концентрацией эрбия вплоть до 10^{22}cm^{-3} [4]. Однако интенсивность фотолюминесценции в слоях с концентрацией эрбия, большей 10^{18}cm^{-3} , начинает ослабевать, что связано, вероятно, с образованием дефектов кристаллической структуры [4,5].

Другой метод, позволяющий выращивать сильно легированные слои кремния, — твердофазная эпитаксия (ТФЭ). Процесс выращивания в нем осуществляется в две стадии: осаждение слоя при низких температурах, когда сегрегация примеси кинетически подавлена, и последующий отжиг пленки аморфного кремния [6].

Цель настоящей работы — исследование возможности выращивания сильно легированных эрбием слоев кремния методом ТФЭ, проявляющих фотолюминесценцию на длине волны $1.54 \mu\text{m}$.

1. Методика эксперимента

Выращивание легированных эрбием слоев кремния осуществлялось в сверхвысоковакуумной установке МЛЭ с использованием устройства, изображенного на рис. 1 [7]. Испарение Si проводилось из сублимационного источника в виде прямоугольного бруска, разогреваемого прохождением тока, а испарение Er — также из сублимационного источника, вырезанного из металлической фольги. Подложкой служила прямоугольная пластина кремния, вырезанная по плоскости (100) или (111) из монокристаллического кремния марки КДБ-12. Она, как и источники, нагревалась пропусканием тока. После отжига подложки при $T = 1250^\circ\text{C}$ в течение 10 min проводилось выращивание слоев кремния либо

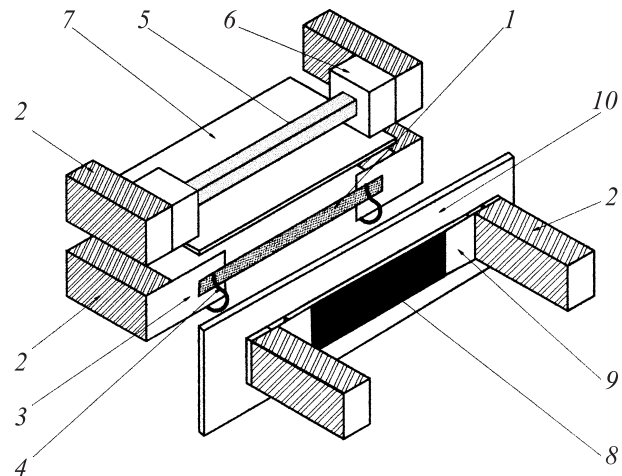


Рис. 1. Схематическое изображение устройства для выращивания слоев Si:Er. 1 — эрбиевая пластина, 2 — тоководы, 3 — молибденовые пружины, 4 — молибденовые скрепки, 5 — кремниевый брусок, 6 — кремниевые прокладки, 7 — неподвижный экран, 8 — подложка, 9 — молибденовые зажимы, 10 — подвижный экран.

методом МЛЭ при температуре подложки 500°C , либо методом ТФЭ на нагретую подложку с последующим отжигом *in situ*.

Спектры ФЛ структур измерялись при температуре 77 K с помощью Фурье-спектрометра BOMEM DA3 с разрешением 1 cm^{-1} при накачке излучением Ar^+ лазера (с длиной волны $\lambda = 514.5\text{ nm}$) мощностью 80 mW со стороны эпитаксиального слоя. Структура слоев исследовалась методом электронографии.

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Режим МЛЭ. После отжига подложки проводилось выращивание буферного нелегированного слоя кремния толщиной $\sim 0.1\text{ }\mu\text{m}$ при температуре 1050°C . Затем температуру снижали до $T_s = 550^{\circ}\text{C}$, в камеру напускался кислород до давления $9.5\text{--}10^{-8}\text{ Torr}$ и осаждался легированный эрбием слой кремния толщиной $\sim 0.5\text{ }\mu\text{m}$. Измеренная методом $C\text{--}V$ -профилометрии концентрация электронов в этом слое составляла $\sim 10^{17}\text{ cm}^{-3}$. Спектр фотолюминесценции от этой структуры, измеренный при температуре жидкого азота, приведен на рис. 2. Широкая полоса с максимумом при 6500 cm^{-1} характерна для ФЛ иона Er^{3+} в структурах Si:Er/Si , полученных методом сублимационной МЛЭ с металлическим источником эрбия и содержащих более высокую (по сравнению с содержанием эрбия) концентрацию кислорода и углерода.

2.2. Режим ТФЭ. Выращивание слоя аморфного кремния, легированного эрбием, проводилось при $T_s \approx 150^{\circ}\text{C}$. Во время роста в камеру периодически производился напуск кислорода до давления $5 \cdot 10^{-5}\text{ Torr}$. При этом рост пленки приостанавливали. После выращивания слоя толщиной $\sim 50\text{ nm}$ температуру подложки поднимали до 800°C и отжигали в течение 30 min . На рис. 3 приведены электронограммы, полученные

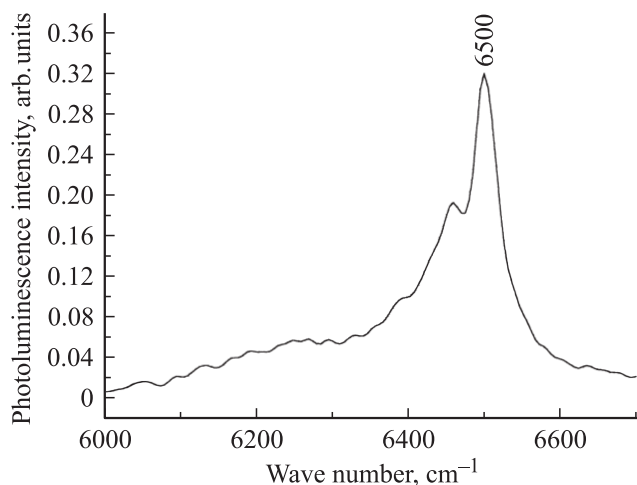


Рис. 2. Спектр ФЛ структуры, выращенной в процессе МЛЭ. Спектр записан при $T = 77\text{ K}$ и мощности накачки аргонового лазера $P = 80\text{ mW}$.

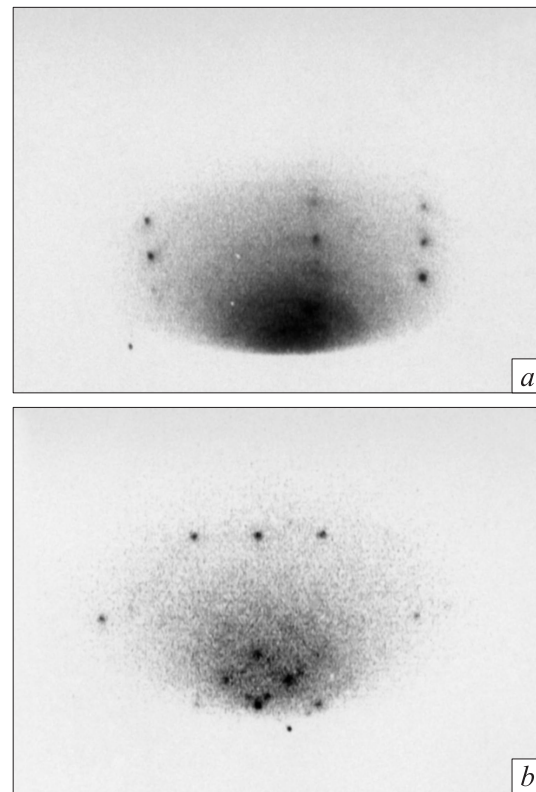


Рис. 3. Электронограммы от поверхностей слоев, выращенных на подложках с ориентациями: a — (111) и b — (100).

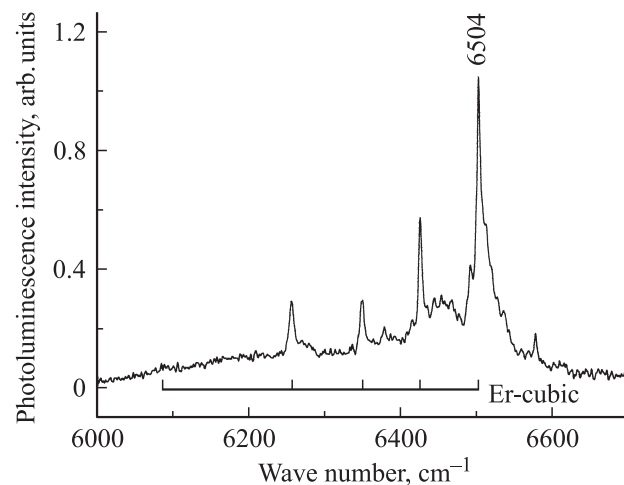


Рис. 4. Спектр ФЛ структуры, выращенной в режиме ТФЭ. Условия регистрации ФЛ такие же, как для спектра на рис. 2.

от поверхностей слоев, выращенных на подложках с ориентациями (111) и (100). Видно, что в случае использования подложки (100) слои формируются с более совершенной структурой.

Спектр фотолюминесценции эрбия в эпитаксиальном слое кремния, выращенном в режиме ТФЭ, приведен на рис. 4. Спектр содержит интенсивную серию уз-

ких линий люминесценции, относящихся к переходу ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ в $4f$ -оболочке иона Er^{3+} в известном изолированном излучающем центре с кубической симметрией [8]. Обычно такой спектр характерен для эрбия в монокристаллическом кремнии при малом (по сравнению с концентрацией эрбия) содержании кислорода. Вместе с тем интегральная интенсивность люминесценции иона Er^{3+} в структуре, полученной в режиме ТФЭ, в 2 раза превышает таковую в структуре, выращенной в процессе МЛЭ.

Согласно существующим представлениям о механизме ТФЭ слоев аморфного кремния, напыленных в вакууме на монокристаллическую подложку, при отжиге происходит движение фронта эпитаксиальной кристаллизации от границы раздела монокристалл/аморфная пленка к поверхности слоя [9]. Если при температуре отжига 600°C кристаллизация аморфного кремния на монокристаллической подложке происходит за счет эпитаксиального упорядочения атомов аморфной фазы вблизи границы раздела монокристалл/аморфная пленка, то при 800°C происходит дополнительно зарождение и рост случайно ориентированных кристаллитов в объеме аморфного кремния. Скорость эпитаксиальной кристаллизации при 80°C составляет $2.2\text{--}10\text{ nm/min}$. Такая высокая скорость кристаллизации приводит к тому, что в конце отжига часть поверхности оказывается занятой монокристаллической фазой, а часть — поликристаллической. О влиянии кислорода на замедление скорости кристаллизации сообщалось в [10]. Однако при напуске кислорода в наших опытах в моменты приостановки процесса роста, вероятно, образуется незначительный по толщине слой адсорбированного газа, который, может быть, лишь частично захватывается растущим слоем. В результате общее количество введенного в слой кислорода незначительно. Это, по-видимому, и вызывает наблюдаемые изменения спектра фотолюминесценции ионов Er^{3+} в слоях кремния, выращенных методом ТФЭ.

Таким образом, метод твердофазной эпитаксии позволяет в напыленной в сверхвысоком вакууме пленке кремния сформировать сильнолегированный эрбием слой, от которого наблюдается более интенсивная фотолюминесценция, чем от слоя, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

Список литературы

- [1] Н.А. Соболев. ФТП **29**, 1153 (1995).
- [2] A. Polman. J. Appl. Phys. **82**, 1 (1997).
- [3] Y.Ho Xie, E.A. Fitzgerald, Y.J. Mii. J. Appl. Phys. **70**, 1153 (1991).
- [4] H. Efeoglu, J.H. Evans, T.E. Jackmann et al. Semicond. Sci. Technol. **8**, 236 (1993).
- [5] R. Serna, M. Lohmeier et al. Appl. Phys. Lett. **66**, 1385 (1995).
- [6] V.G. Zavodiskii, A.V. Zotov. Phys. Stat. Sol. (a). **72**, 391 (1982).
- [7] С.П. Светлов, В.Ю. Чалков, В.Г. Шенгуров. ПТЭ **4**, 141 (2000).
- [8] H. Przybylinska et al. Phys. Rev. B **54**, 2532 (1996).
- [9] I.G. Kaverina, V.V. Korobtsov, V.G. Lifshits. Thin Solid Films **177**, 101 (1984).
- [10] C.W. Noguee, J.C. Bean, C. Foti, J.M. Poate. Thin Solid Films **81**, 1 (1981).