

Низкотемпературная фотолюминесценция кремния, легированного гольмием

© Б.А. Андреев*, Н.А. Соболев, Д.И. Курицын[#], М.И. Маковийчук[†], Ю.А. Николаев, Е.О. Паршин[†]

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

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

[#] Институт химии высокочистых веществ Российской академии наук,
603600 Нижний Новгород, Россия

[†] Институт микроэлектроники Российской академии наук,
150007 Ярославль, Россия

(Получена 28 декабря 1998 г. Принята к печати 29 декабря 1998 г.)

Исследована фотолюминесценция кремния, имплантированного ионами гольмия с энергиями $1 \div 2$ МэВ и дозами $1 \cdot 10^{13} \div 3 \cdot 10^{14}$ см⁻² и отожженного при температурах $620 \div 900^\circ\text{C}$ в течение $0.5 \div 1$ ч. Для увеличения концентрации электрически и оптически активных центров проводилась дополнительная имплантация ионов кислорода с энергиями $0.14 \div 0.29$ МэВ и дозами $1 \cdot 10^{14} \div 3 \cdot 10^{15}$ см⁻². Наблюдалось несколько линий фотолюминесценции, обусловленных переходами электронов с первого возбужденного состояния ионов Ho^{3+} (5I_7) в основное состояние (5I_8). Амплитуда наиболее интенсивных линий с переходами на частотах 5119 и 5103 см⁻³ уменьшается более чем на порядок величины в диапазоне температур $4.2 \div 78$ К. Интенсивность линий фотолюминесценции ионов гольмия возрастает при увеличении концентрации введенных ионов редкоземельного элемента и кислорода.

Кремний, легированный редкоземельными элементами (РЗЭ), привлекает все большее внимание исследователей как перспективный материал для оптоэлектроники. Основное преимущество такого материала обусловлено тем, что переходы электронов во внутренней f -оболочке РЗЭ характеризуются независимостью частоты излучения от температуры и малой шириной спектральной линии [1]. Практически каждый год проводятся конференции, на которых рассматриваются свойства полупроводников, легированных РЗЭ [2–4]. Наибольший интерес вызывает примесь эрбия, поскольку излучение именно этого РЗЭ на длине волны 1.54 мкм используется в волоконно-оптических линиях связи. До настоящего времени легирование кремния другими РЗЭ использовалось в основном с целью установить общие закономерности процессов образования структурных дефектов и электрически активных центров, обусловленных их введением. Так, в [5] впервые было показано, что введение примесей Ho и Dy приводит к формированию донорных центров и концентрация этих центров растет при увеличении концентрации кислорода в исходном материале или его дополнительной имплантации. Оказалось, что после имплантации РЗЭ Ho, Dy, Er и Yb и последующего отжига в запрещенной зоне кремния образуются кислородсодержащие термодоноры и донорные центры, содержащие РЗЭ [6]: а) концентрация кислородсодержащих мелких термодоноров с энергией ионизации, распределенной в диапазоне $E_c - (20 \div 40)$ мэВ, не зависит от типа РЗЭ и пропорциональна дозе имплантации; б) каждый РЗЭ входит в состав двух донорных центров с дискретной энергией ионизации вблизи $\sim E_c - 70$ мэВ и $\sim E_c - 140$ мэВ, при этом энергия ионизации доноров возрастает в последовательности расположения РЗЭ в Периодической

таблице элементов Д.И. Менделеева. Свойства структурных дефектов и особенности обусловленной их образованием так называемой дислокационной люминесценции также практически одинаковы при введении в кремний Ho, Dy и Er [7,8]. Слабая зависимость структурных и электрических свойств кремния от типа введенных РЗЭ обусловлена практически одинаковыми их геометрическими размерами и строением наружных электронных s - и p -оболочек. Основное различие РЗЭ состоит в структуре их $4f$ -оболочки, которая и определяет оптические и магнитные свойства материала. Насколько нам известно, до настоящего времени исследования таких свойств в легированном гольмием кремнии (Si:Ho) не проводились. Цель настоящей работы заключается в изучении оптических свойств Si:Ho, полученного методом ионной имплантации.

Ионы гольмия имплантировались в кремний, выращенный по методу Чохральского, $Cz\text{-Si} \langle 100 \rangle$ n - и p -типа проводимости с энергиями $E_{\text{Ho}} = 1.0, 1.6, \text{ и } 2.0$ МэВ в дозах $D_{\text{Ho}} = 1 \cdot 10^{13}, 1 \cdot 10^{14}$ и $3 \cdot 10^{14}$ см⁻². В некоторые образцы дополнительно имплантировались ионы кислорода с энергиями E_{O} , при которых проецированный пробег ионов обоих типов совпадал, а доза (D_{O}) на порядок превышала дозу гольмия. Отжиг образцов, имплантированных неаморфизирующими дозами гольмия ($D_{\text{Ho}} = 1 \cdot 10^{13}$ см⁻²), проводился при температуре 900°C в течение 0.5 ч. Отжиг аморфизованных слоев ($D_{\text{Ho}} \geq 1 \cdot 10^{14}$ см⁻²) проводился в два этапа: $620^\circ\text{C}/1 \text{ ч} + 900^\circ\text{C}/0.5 \text{ ч}$. На первом этапе происходила кристаллизация аморфного слоя по механизму твердофазной эпитаксии, а на втором — формирование оптически и электрически активных центров, содержащих РЗЭ [9].

Для фотовозбуждения кремния использовали непрерывное излучение криптонового лазера (длина волны $\lambda = 647$ нм) мощностью до 300 мВт. Возбуждающее излучение (обычный уровень мощности на входе в криостат $50 \div 80$ мВт) поступало через отверстие в зеркале, фокусирующем вторичное излучение нормально к поверхности со стороны имплантированного слоя. Мощность излучения контролировали с помощью фотоэлектрического измерителя мощности ИМО-4С. Относительные изменения мощности за время регистрации спектра (< 15 мин) не превышали 10%. Образцы размещали в гелиевой ванне оптического криостата с кварцевыми окнами для ввода и вывода излучения. Отраженное и рассеянное излучение с $\lambda = 647$ нм ослабляли оптическим фильтром на входе спектрометра. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) регистрировали с разрешением до 0.5 см^{-1} на вакуумном фурье-спектрометре "Bomem DA3" в диапазоне $3000 \div 12000 \text{ см}^{-1}$ с кварцевым делителем луча в интерферометре и приемником InSb (удельная обнаружительная способность — не менее $4 \cdot 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ при рабочей температуре 78 К и холодном фильтре).

После имплантации ионов гольмия с дозой $D_{\text{Ho}} = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и отжига не наблюдалось линий ФЛ, связанных с $4f$ -переходами электронов в ионе РЗЭ. Однако в образцах, в которых проводилась имплантация кислорода, появляется сигнал ФЛ иона Ho^{3+} при температуре жидкого гелия

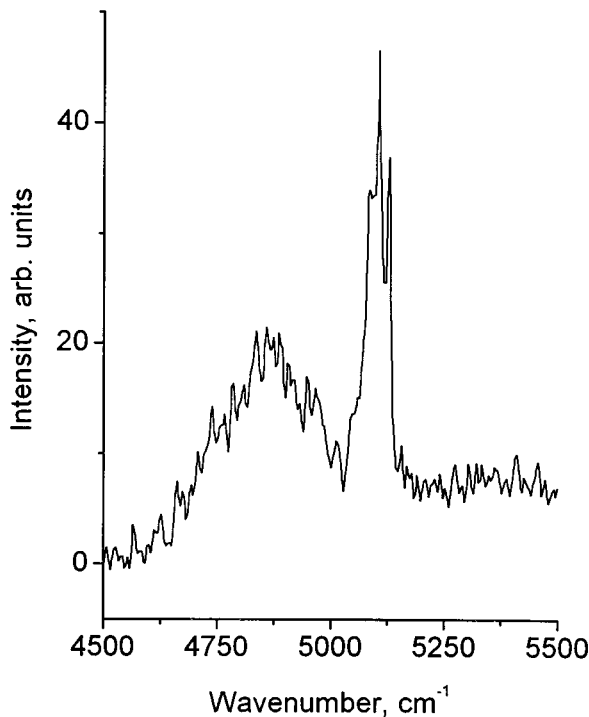


Рис. 1. Спектр ФЛ Si:Ho:O при 4.2 К после имплантации гольмия и кислорода с энергиями $E_{\text{Ho}} = 1 \text{ МэВ}$ и $E_{\text{O}} = 0.14 \text{ МэВ}$ и дозами $D_{\text{Ho}} = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и $D_{\text{O}} = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Разрешение в спектре 10 см^{-1} .

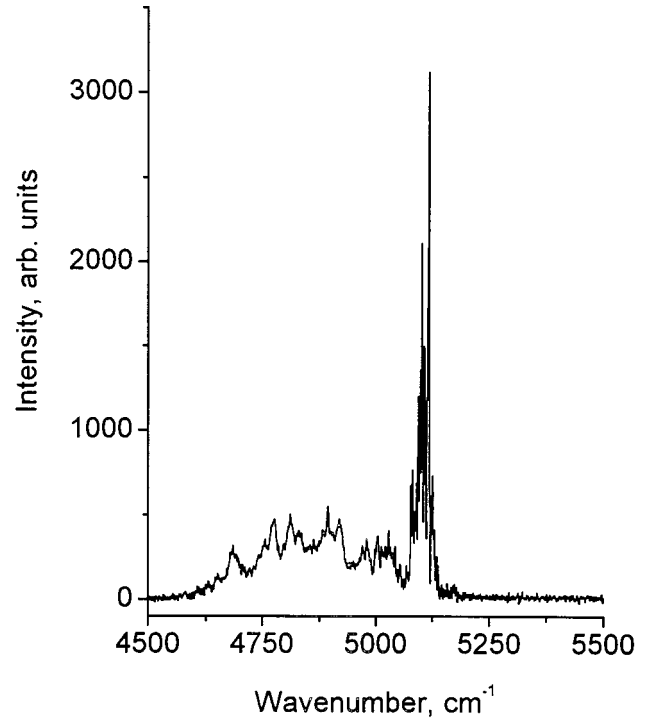


Рис. 2. Спектр ФЛ Si:Ho:O при 4.2 К после имплантации гольмия и кислорода с энергиями $E_{\text{Ho}} = 1 \text{ МэВ}$ и $E_{\text{O}} = 0.14 \text{ МэВ}$ и дозами $D_{\text{Ho}} = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и $D_{\text{O}} = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Разрешение в спектре 1 см^{-1} .

(рис. 1). Наиболее интенсивные линии наблюдаются на частотах 5119 и 5103 см^{-1} . Появление линий обусловлено расщеплением гольмиевых термов 5I_7 и 5I_8 в кристаллическом поле кремниевой матрицы. Ионы кислорода способствуют формированию оптически активных гольмийсодержащих центров и, возможно, входят в состав этих центров. Отметим, что положение доминирующих линий в переходе $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ ионов Ho^{3+} в полупроводниковой матрице смещено в область более коротких волн по сравнению с положением доминирующих линий в диэлектриках [10].

Увеличение дозы имплантации гольмия и кислорода на порядок сопровождается появлением дополнительных линий и значительным ростом интенсивности ФЛ ионов Ho^{3+} при 4.2 К (рис. 2). Однако линии 5119 и 5103 см^{-1} продолжают доминировать в спектре. Дальнейшее увеличение дозы имплантации до $D_{\text{Ho}} = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и $D_{\text{O}} = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ приводит к некоторому снижению интенсивности ФЛ Ho^{3+} , что, по-видимому, связано с появлением дополнительных каналов безызлучательной рекомбинации.

В спектрах ФЛ при 4.2 К кроме гольмиевых линий наблюдаются линии экситонов, связанных на центрах легирующих примесей бора и фосфора. Интенсивность линий связанных экситонов примерно на порядок меньше интенсивности линий ионов Ho^{3+} . При увеличении температуры от 4.2 до 78 К наблюдается значительное (более чем на порядок величины) уменьшение интенсив-

ности люминесценции при неизменном положении наиболее интенсивных линий 5119 и 5103 см⁻¹. Наблюдаемое температурное гашение ФЛ Ho³⁺ в области спектра вблизи 5100 см⁻¹ при повышении температуры сопровождается исчезновением линий экситонов, связанных на примесях в кремнии, и появлением доминирующего пика свободного экситона.

Таким образом, в кремнии наблюдалась ФЛ, обусловленная переходами электронов с первого возбужденного в основное состояние ионов Ho³⁺ $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$. Увеличение концентрации имплантируемых ионов гольмия и кислорода приводит к росту интенсивности ФЛ. В диапазоне температур 4.2 ÷ 78 К наблюдается достаточно сильная температурная закалка интенсивности гольмиевой ФЛ.

Авторы благодарны А.М. Емельянову за полезные обсуждения некоторых результатов данной работы.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 96-02-17901 и 96-03-32581).

Список литературы

- [1] Н.А. Соболев. ФТП, **29**, 1153 (1995).
- [2] MRS Symp. Proc., **422** (1996).
- [3] MRS Symp. Proc., **486** (1998).
- [4] J. Luminesc. (1999) [*Proc. European MRS Spring Meeting* (Strasbourg, 1998)].
- [5] О.В. Александров, А.О. Захарьин, Н.А. Соболев, Е.И. Шек, М.И. Маковийчук, Е.О. Паршин. ФТП, **32**, 1029 (1998).
- [6] V.V. Emtsev, V.V. Emtsev Jr, D.S. Poloskin, E.I. Shek, N.A. Sobolev. J. Luminesc. (1999).
- [7] V.I. Vdovin, T.G. Yugova, N.A. Sobolev, E.I. Shek, M.I. Makovijchuk, E.O. Parshin. Nucl. Instrum. Meth. **B147**, 116 (1999).
- [8] Н.А. Соболев, Е.И. Шек, А.М. Емельянов, В.И. Вдовин, Т.Г. Югова. ФТП, **33** (1999).
- [9] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, K.F. Shtel'makh. Appl. Phys. Lett., **71**, 1930 (1997).
- [10] *Справочник по лазерам*, под ред. А.М. Прохорова (М., Сов. радио, 1978) т. 1, ч. II, гл. 11–13.

Редактор Л.В. Шаронова

Low-temperature photoluminescence in holmium-doped silicon

B.A. Andreev*, N.A. Sobolev, D.I. Kuritsin#, M.I. Makovijchuk†, Yu.A. Nikolaev, E.O. Parshin†

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

* Microstructure Physics Institute,
603600 N. Novgorod, Russia

High Purity Material Chemistry Institute,
603600 N. Novgorod, Russia

† Institute of Microelectronics,
150007 Yaroslavl', Russia

Abstract Photoluminescence of silicon implanted with holmium ions at 1 ÷ 2 MeV energies and $1 \cdot 10^{13} \div 3 \cdot 10^{14}$ cm⁻² doses and annealed for 0.5 ÷ 1 h at 620 ÷ 900°C temperatures has been studied. Additional implantation of oxygen ions at 0.14 ÷ 0.29 MeV energies and $1 \cdot 10^{14} \div 3 \cdot 10^{15}$ cm⁻² doses was carried out to increase the concentration of electrically and optically active centers. A few photoluminescence lines related to the transitions of electrons from the first excited state of Ho³⁺ ions (5I_7) to the ground state (5I_8) are observed. The amplitude of the most intensive lines at 5119 and 5103 cm⁻¹ wavenumbers decreases by more than one order of magnitude with increasing temperature from 4.2 to 78 K. An increase of the concentration of the introduced rare-earth and oxygen ions leads to an increase of the intensity of the holmium-related photoluminescence lines.

Fax: (812) 2471017 (N.A. Sobolev)

E-mail: nick@sobolev.ioffe.rssi.ru