

# Лавинные светодиодные структуры на основе монокристаллического Si:Ho:O, работающие при комнатной температуре

© Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, Ю.А. Николаев

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

(Получена 13 апреля 1999 г. Принята к печати 15 апреля 1999 г.)

Впервые наблюдалась электролюминесценция ионов  $\text{Ho}^{3+}$  при комнатной температуре в диодных структурах на основе монокристаллического кремния, легированного гольмием и кислородом. Для режима лавинного пробоя определено произведение времени жизни первого возбужденного состояния ионов  $\text{Ho}^{3+}$  на эффективное сечение их возбуждения.

## Введение

Впервые фотолюминесценция (ФЛ) и инжекционная электролюминесценция (ЭЛ) при протекании прямого тока через  $p-n$ -переход ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в полупроводниках наблюдалась в структурах на основе Si:Ho:O при температурах  $4.2 \div 150 \text{ K}$  [1,2]. Переходы электронов во внутренней  $4f$ -оболочке с первого возбужденного состояния ( $^5I_7$ ) в основное состояние ( $^5I_8$ ) ионов  $\text{Ho}^{3+}$  сопровождаются появлением в спектре люминесценции линии вблизи длины волны  $\lambda = 2 \text{ мкм}$ . Максимальная интенсивность как ФЛ, так и инжекционной ЭЛ в Si:Ho:O зарегистрирована при  $\lambda \approx 1.96 \text{ мкм}$ . В настоящей работе впервые обнаружена и исследована ЭЛ ионов  $\text{Ho}^{3+}$  при комнатной температуре в режиме лавинного пробоя диодных структур на основе Si:Ho:O.

## Экспериментальные условия

Имплантация ионов гольмия (с энергиями  $E = 2.0$  и  $1.6 \text{ МэВ}$  и дозами  $D = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) и кислорода ( $E = 0.28$  и  $0.22 \text{ МэВ}$ ,  $D = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ) в кремниевые пластины  $n$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , ориентированные в плоскости (111), сопровождалась аморфизацией приповерхностного слоя. Отжиг при температурах /временах  $620^\circ\text{C}/1 \text{ ч} + 900^\circ\text{C}/0.5 \text{ ч}$  приводил к перекристаллизации аморфного слоя по механизму твердофазной эпитаксии и образованию гольмийсодержащих оптически и электрически активных центров донорного типа в  $n^+$ -слое. Структуры  $p^{++}-n^+$  формировались имплантацией ионов бора ( $E = 40 \text{ кэВ}$ ,  $D = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ). Образовавшиеся при имплантации бора дефекты исчезали при отжиге в режиме  $900^\circ\text{C}/0.5 \text{ ч}$ . Контакты изготавливались напылением Al. Меза-диоды имели рабочую площадь  $5.3 \text{ мм}^2$ . ЭЛ возбуждалась прямоугольными импульсами тока длительностью  $8 \text{ мс}$  на частоте  $32 \text{ Гц}$ . Излучение диодных структур фокусировалось линзовой системой на входную щель монохроматора МДР-23. Излучение на выходе монохроматора регистрировалось InGaAs-фотоприемником (в области  $\lambda = 1.0 \div 1.6 \text{ мкм}$  с разрешением  $7 \text{ нм}$ ) и PbS-фотоприемником (в области

$\lambda = 1.6 \div 2.4 \text{ мкм}$  с разрешением  $14 \text{ нм}$ ). При измерениях с PbS-фотоприемником спектр ЭЛ не корректировался на функцию спектральной чувствительности регистрирующего ЭЛ устройства, но масштабировался таким образом, чтобы интенсивности ЭЛ при  $\lambda = 1.6 \text{ мкм}$ , измеренные в относительных единицах различными фотоприемниками, совпадали. Ток фотоприемника регистрировался с использованием селективного усилителя.

## Экспериментальные результаты и обсуждение

Обратная ветвь вольт-амперной характеристики (ВАХ) одной из диодных структур при различных температурах показана на рис. 1. Напряжение пробоя, полученное экстраполяцией линейного участка к нулевому току, при комнатной температуре составляет  $\sim 8 \text{ В}$ . Наблюдается уменьшение напряжения пробоя при уменьшении температуры. Величина напряжения пробоя и ее температурная зависимость свидетельствуют, что в исследованных диодных структурах при  $300 \text{ K}$  имеет место лавинный пробой. Спектр ЭЛ в диоде, смещенном в обратном направлении, при  $300 \text{ K}$  и токе  $300 \text{ мА}$  показан на рис. 2. Помимо излучения в области

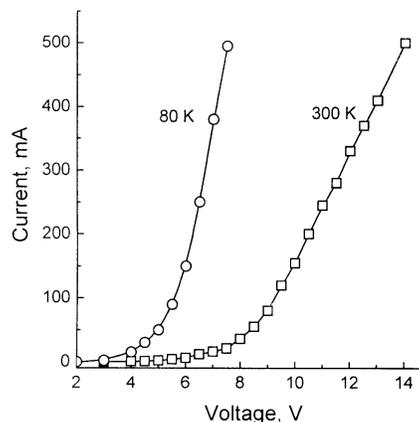


Рис. 1. Обратная ветвь ВАХ диода при температурах  $300$  и  $80 \text{ K}$ .

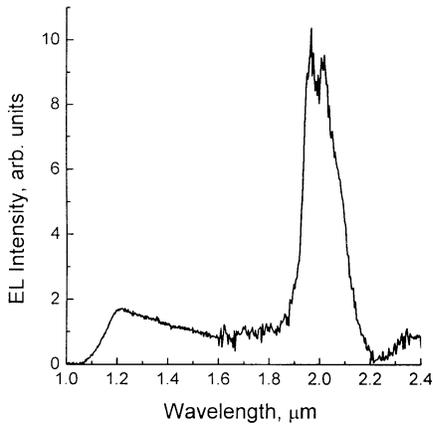


Рис. 2. Спектр электролюминесценции (EL) в диоде, смещенном в обратном направлении при 300 К и 300 мА.

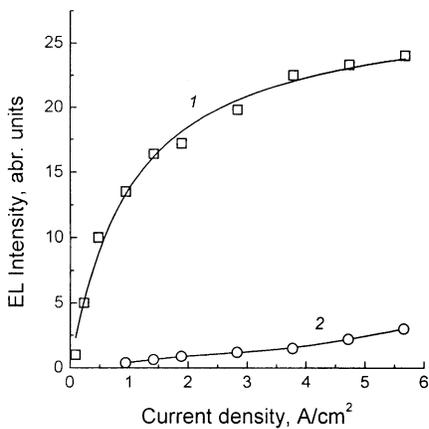


Рис. 3. Зависимость интенсивности электролюминесценции (EL) гольмия (1) при  $\lambda = 1.96$  мкм и излучения диода при  $\lambda = 1.75$  мкм (2) от плотности тока.

$\lambda \approx 1.85 \div 2.15$  мкм с максимумом при  $\lambda \approx 1.96$  мкм, обусловленного излучательными переходами электронов между расщепленными в кристаллическом поле уровнями  $^5I_7$  и  $^5I_8$  ионов  $\text{Ho}^{3+}$ , в области прозрачности кремния наблюдается относительно слабое излучение, обусловленное переходами "горячих" электронов внутри зоны проводимости кремния (так называемая "горячая" ЭЛ) [3]. При пропускании прямого тока 300 мА при 300 К ЭЛ не наблюдалась. Эти результаты позволяют предположить, что именно горячие носители ответственны за ударный механизм возбуждения ЭЛ ионов гольмия.

Зависимости интенсивности гольмиевой ЭЛ при  $\lambda = 1.96$  мкм и горячей ЭЛ при  $\lambda = 1.75$  мкм от плотности обратного тока, протекающего через диодную структуру при 300 К, представлены на рис. 3. Согласно [4], при ударном механизме возбуждения ионов редкоземельных элементов зависимость интенсивности ЭЛ ( $I_{\text{EL}}$ ) от плотности тока ( $j$ ) описывается

выражением

$$I_{\text{EL}}/I_{\text{EL}}^{\text{max}} = (\sigma\tau j/q)/(\sigma\tau j/q + 1), \quad (1)$$

где  $I_{\text{EL}}^{\text{max}}$  — максимальная интенсивность ЭЛ,  $q$  — заряд электрона,  $\tau$  — время жизни ионов  $\text{Ho}^{3+}$  в первом возбужденном состоянии,  $\sigma$  — эффективное сечение возбуждения ЭЛ ионов гольмия. Для кривой 1, аппроксимирующей экспериментальные результаты на рис. 3,  $\sigma\tau \approx 1.5 \cdot 10^{-19}$  см<sup>2</sup>·с. Для сравнения отметим, что в лавинных диодных структурах на основе Si:Er:O величина  $\sigma\tau$  для ЭЛ ионов  $\text{Er}^{3+}$  при  $\lambda = 1.54$  мкм и 300 К составляла  $8.7 \cdot 10^{-20}$  см<sup>2</sup>·с [5], т.е. была в  $\sim 1.7$  раза меньше.

## Заключение

Таким образом, в режиме лавинного пробоя диодных структур на основе Si:Ho:O при комнатной температуре помимо горячей ЭЛ наблюдается ЭЛ в области  $\lambda \approx 1.85 \div 2.15$  мкм с максимумом при  $\lambda \approx 1.96$  мкм, обусловленная переходами ионов  $\text{Ho}^{3+}$  из первого возбужденного состояния в основное. Величина  $\sigma\tau$  для гольмиевой ЭЛ в исследованных структурах составила  $1.5 \cdot 10^{-19}$  см<sup>2</sup>·с.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант 99-02-17750).

## Список литературы

- [1] Б.А. Андреев, Н.А. Соболев, Д.И. Курицын, М.И. Маковийчук, Ю.А. Николаев, Е.О. Паршин. ФТП, **33**, 420 (1999).
- [2] Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, Р.Н. Кютт, Ю.А. Николаев, Е.И. Шек, О.В. Александров, А.О. Захарьин, В.И. Вдовин, М.И. Маковийчук, Е.О. Паршин, А.Н. Якименко. *Матер. совещ. "Нанопотоника"* (Нижний Новгород, 1999) с. 71.
- [3] F.G. Chynoweth, K.G. McKay. Phys. Rev., **102**, 369 (1956).
- [4] G. Franzo, S. Goffa, F. Priolo. J. Appl. Phys., **81**, 2784 (1997).
- [5] N.A. Sobolev, Yu.A. Nikolaev, A.M. Emel'yanov, K.F. Shtelmakh, P.E. Khakushev, M.A. Trishenkov. J. Luminesc., **80**, 315 (1999).

Редактор Л.В. Шаронова

## Avalanching light-emitting diodes based on monocrystalline Si:Ho:O and working at room temperature

N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, Yu.A. Nikolaev

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Electroluminescence of  $\text{Ho}^{3+}$  ions has been firstly observed in diode structures based on monocrystalline silicon doped with holmium and oxygen. The product of the effective cross-section for excitation of  $\text{Ho}^{3+}$  ions by the lifetime of the excited state was determined under the avalanche breakdown.

Fax: (812) 2471017 (Sobolev)

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