

08,03

## Влияние дозы имплантации и длительности отжига на люминесцентные свойства (113) дефектов в Si, имплантированном ионами кислорода

© Н.А. Соболев<sup>1</sup>, А.Е. Калядин<sup>1</sup>, П.Н. Аруев<sup>1</sup>, В.В. Забродский<sup>1</sup>,  
Е.И. Шек<sup>1</sup>, К.Ф. Штельмах<sup>1,2</sup>, К.В. Карабешкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

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

(Поступила в Редакцию 18 мая 2016 г.)

В окончательной редакции 14 июня 2016 г.)

Исследованы фотолюминесцентные свойства (113) дефектов, образующихся в Si-структуре после имплантации ионов кислорода с энергией 350 keV и дозами  $1.7 \cdot 10^{13}$ – $1.7 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> и последующего отжига при 700°C в течение 0.5–2 h в хлорсодержащей атмосфере. Независимо от дозы имплантации и времени отжига в спектрах фотолюминесценции доминирует линия с длиной волны 1.37 μm, принадлежащая (113) дефекту. Зависимости интенсивности линии от дозы имплантации и длительности отжига характеризуются кривыми с максимумами. С ростом температуры измерения в диапазоне 64–120 K интенсивность линии монотонно уменьшается.

Работа Н.А. Соболева и К.В. Карабешкина частично поддержана грантом РФФИ № 14-08-01256, а работа Е.И. Шек — грантом РФФИ № 14-02-00152.

### 1. Введение

Отсутствие инфракрасных светодиодов и лазеров на основе монокристаллического кремния с высокой интенсивностью электролюминесценции при комнатной температуре существенно сдерживает создание интегральных оптоэлектронных схем для кремниевой оптоэлектроники. Долгое время наблюдаемая низкая интенсивность собственной зона-зонной (так называемой краевой или near band edge) люминесценции объяснялась тем обстоятельством, что кремний является не прямозонным полупроводником. Развитие методов инженерии дефектов в кремниевой технологии позволило создать светодиоды с высокими интенсивностью и внешней квантовой эффективностью электролюминесценции (порядка 1%) при комнатной температуре [1]. Однако такое излучение не может распространяться на достаточную глубину в кремнии из-за сильного поглощения. За последние двадцать лет было развито много технологических приемов, использующих как примесные атомы, так и собственные дефекты решетки кремния, для создания люминесцентных центров с длиной волны в диапазоне 1.2–1.7 μm [2]. Наибольшие интенсивность и эффективность электролюминесценции при комнатной температуре были достигнуты в светодиодах с люминесценцией редкоземельных ионов Er<sup>3+</sup> [3,4] и так называемой дислокационной люминесценцией, обусловленной введением протяженных структурных дефектов [5,6]. Максимум длины волны излучения при комнатной температуре находится в области 1.5–1.7 μm. В последнее время предпринима-

лись попытки использовать в качестве люминесцентных центров так называемые (113) дефекты [7], представляющие собой скопления собственных межузельных атомов со структурой, не отвечающей структуре дислокационных диполей и петель, и излучающие на длине волны 1.37 μm [8–11]. Дефекты создавались с помощью имплантации ионов Si<sup>+</sup> и последующих отжигов в инертной атмосфере [8–11]. Фотолюминесценция (ФЛ) (113) дефектов в таких образцах наблюдалась до 40 K. В настоящей работе исследованы люминесцентные свойства (113) дефектов, образующихся в кремнии после имплантации ионов O<sup>+</sup> и последующего отжига, в зависимости от дозы имплантации, длительности отжига, температуры измерения и мощности накачки.

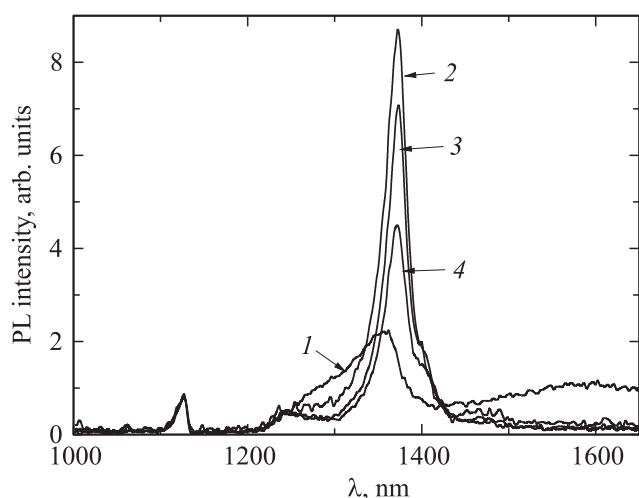
### 2. Экспериментальные условия

Исходные образцы представляли собой p<sup>+</sup>-n-структуры на основе кремния n-типа проводимости, выращенного методом Чохральского, с удельным сопротивлением 4.5 Ω·см, в которых с помощью диффузии примеси бора из газовой фазы формировался p<sup>+</sup>-n-переход. Измеренные с помощью метода вторичной ионной масс-спектропии концентрации бора у поверхности и глубина p<sup>+</sup>-n-перехода равнялись  $\sim 10^{20}$  см<sup>-3</sup> и  $\sim 50$  nm соответственно. Со стороны p<sup>+</sup>-n-перехода имплантировались ионы кислорода с энергией 350 keV и неаморфизующими дозами  $D_1 = 1.7 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>,  $D_2 = 3.7 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>,  $D_3 = 7.7 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> и  $D_4 = 1.7 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>. Имплантация

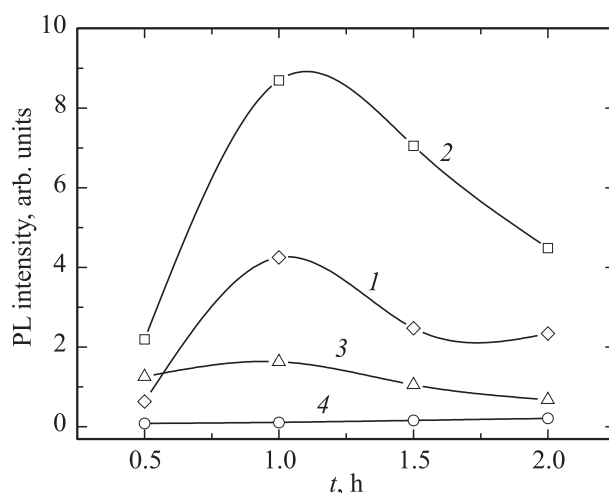
проводилась при комнатной температуре под углом  $7^\circ$ , чтобы избежать эффекта каналирования. Проецированная длина пробега ионов  $O^+$  ( $R_P$ ), рассчитанная с помощью программы SRIM [12], равна 790 nm. Таким образом, основная часть ионов кислорода имплантировалась глубже  $p^+ - n$ -перехода. Последующие отжиги, в процессе которых происходила перестройка структурных дефектов и формирование люминесцентных центров, проводились при температуре  $700^\circ C$  в течение 0.5, 1, 1.5 и 2 h в хлорсодержащей атмосфере (ХСА), представляющей собой поток кислорода, насыщенный парами четыреххлористого углерода с молярной концентрацией 1%. ФЛ возбуждалась твердотельным лазером на длине волны 532 nm (диаметр луча  $\sim 2$  mm, интенсивность изменялась в диапазоне 2–52 mW) и регистрировалась в области длин волн 1000–1650 nm в диапазоне температур 64–120 K с помощью автоматизированного монохроматора МДР-25 и InGaAs-фотоприемника. Образец помещался в криостат УТРЕКС (разработка Института физики НАН Украины, Киев, Украина), что позволяло поддерживать температуру с точностью  $\pm 0.2$  K.

### 3. Результаты и их обсуждение

Измеренные при 78 K спектры ФЛ образцов, имплантированных ионами кислорода с энергией 350 keV и дозой  $D_2 = 3.7 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  и отожженных при  $700^\circ C$  в ХСА в течение 0.5, 1, 1.5 и 2 h, представлены на рис. 1. После отжига в течение 0.5 h в спектре доминируют две широкие линии с максимумами при  $\sim 1350$  и  $\sim 1580$  nm, которые характерны для дефектов, образующихся главным образом из собственных междоузельных атомов кремния на начальной стадии отжига облученных образцов [2]. При увеличении длительности отжига в спектрах доминирует узкая линия



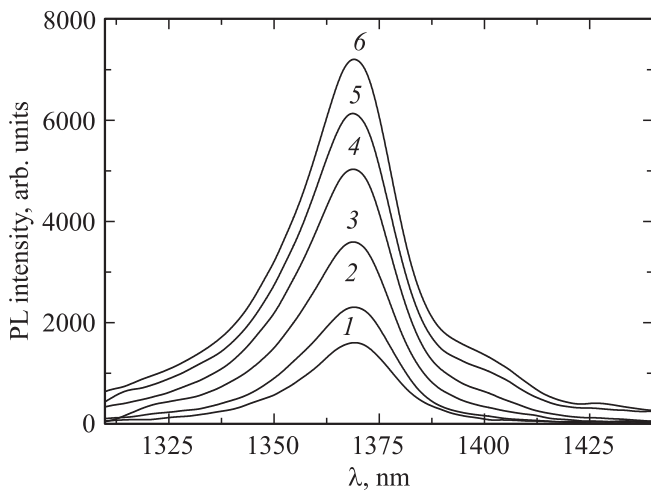
**Рис. 1.** Спектры ФЛ образцов, имплантированных ионами кислорода с энергией 350 keV и дозой  $D_2 = 3.7 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  и отожженных при  $700^\circ C$  в ХСА в течение 0.5 (1), 1 (2), 1.5 (3) и 2 h (4). ФЛ измерялась при 78 K.



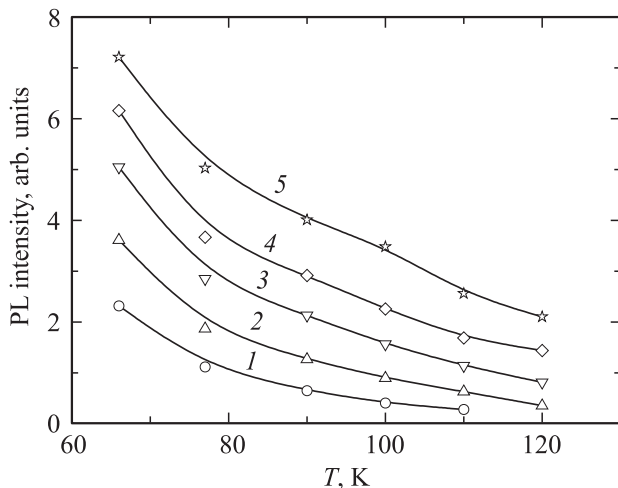
**Рис. 2.** Зависимости интенсивности линии ФЛ (113) дефектов от длительности отжига при  $700^\circ C$  в ХСА для образцов, имплантированных ионами кислорода с энергией 350 keV и дозами  $D_1 = 1.7 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  (1),  $D_2 = 3.7 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  (2),  $D_3 = 7.7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  (3) и  $D_4 = 1.7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  (4). ФЛ измерялась при 78 K.

с длиной волны 1372 nm, которая принадлежит (113) дефекту [8–11]. Положение максимума линии при изменении времени отжига не меняется. Значения другого характерного параметра линии — ее полуширины, составляющие порядка 10 meV, достаточно хорошо коррелируют с приводимыми в литературе [8–11]. Максимальная интенсивность линии наблюдается после отжига в течение 1 h. Исследование методами просвечивающей электронной микроскопии и электронной микроскопии высокого разрешения показало, что (113) дефекты доминируют в этом образце. С увеличением длительности отжига интенсивность линии уменьшается и начинает формироваться плечо (дополнительный пик) со стороны больших длин волн. Появление дополнительного пика ранее регистрировалось в имплантированных ионами кремния образцах при увеличении дозы имплантации [8]. Для всех отожженных образцов в спектрах ФЛ присутствует малоинтенсивная линия краевой (собственной) люминесценции при 1127 nm.

Зависимости интенсивности линий ФЛ (113) дефектов от длительности отжига при  $700^\circ C$  в ХСА для образцов, имплантированных ионами кислорода с различными дозами, приведены на рис. 2. Измерения спектров ФЛ проводились при 78 K. Уже при минимальной дозе имплантации  $D_4 = 1.7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  формируются (113) дефекты, но интенсивность линии (113) практически не зависит от длительности отжига. При увеличении дозы имплантации и для всех длительностей отжигов интенсивность линии нарастает и достигает максимума при дозе  $D_2 = 3.7 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ . При наибольшей дозе  $D_1 = 1.7 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  интенсивность уменьшается. Зависимости интенсивности линий (113) от длительности отжига при дозах имплантации  $7.7 \cdot 10^{13} - 1.7 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$



**Рис. 3.** Спектры ФЛ (113) дефектов в зависимости от мощности накачки для образцов, имплантированных ионами кислорода с энергией 350 keV и дозой  $D_2 = 3.7 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  и отожженных при 700°C в течение 1 h в ХСА. ФЛ измерялась при 64 К. Мощность накачки равна 2.1 (1), 4.3 (2), 10.7 (3), 21.5 (4), 31 (5) и 49 mW (6).



**Рис. 4.** Зависимости интенсивности линии ФЛ (113) дефектов от температуры измерения при различных мощностях накачки для образцов, имплантированных ионами кислорода с энергией 350 keV и дозой  $D_2 = 3.7 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  и отожженных при 700°C в течение 1 h в ХСА. Мощность накачки составляет 4.4 (1), 10.7 (2), 22.7 (3), 33.5 (4) и 51.6 mW (5).

представляют собой кривые с максимумом при времени отжига 1 h. Рост интенсивности с длительностью отжига обусловлен увеличением концентрации (113) дефектов, тогда как ее падение после 1 h отжига может быть связано как с уменьшением концентрации дефектов, так и с образованием эффективных центров безызлучательной рекомбинации.

Спектры ФЛ образцов, имплантированных ионами кислорода с энергией 350 keV и дозой  $D_2 = 3.7 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  и отожженных при 700°C в ХСА в

течение 1 h, были измерены в диапазоне длин волн 1310–1450 nm при 64 К и разной мощности накачки (рис. 3). Во всех спектрах доминирует линия ФЛ (113), интенсивность которой монотонно растет с увеличением мощности накачки. Полуширина линии, равная  $\sim 10 \text{ meV}$ , практически не зависит от мощности накачки. Положение максимума линии (113) дефекта не меняется при изменении мощности накачки и слабо зависит от температуры измерения в диапазоне 64–120 К. При мощности накачки более 31 mW со стороны больших длин волн появляется дополнительный пик, который, по-видимому, принадлежит другому структурному дефекту, формирующемуся также главным образом из собственных междоузельных атомов кремния, но с меньшей скоростью, чем (113) дефекты.

Зависимости интенсивности линии ФЛ (113) дефектов от температуры измерения при мощностях накачки 4–52 mW для образцов, имплантированных ионами кислорода с энергией 350 keV и дозой  $D_2 = 3.7 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  и отожженных при 700°C в течение 1 h в ХСА, приведены на рис. 4. Интенсивность монотонно уменьшается с ростом температуры измерения при всех мощностях накачки. Линия ФЛ, принадлежащая (113) дефекту, впервые нами наблюдалась при 120 К, что почти в 3 раза выше температуры, при которой она ранее регистрировалась в образцах, имплантированных ионами кремния [8–11]. Разумно ожидать, что при комнатной температуре ФЛ линии (113) может быть достигнута с применением методов геттерирования (например, фосфорного или алюминиевого) и водородной пассивации центров безызлучательной рекомбинации. Ранее было продемонстрировано, что использование этих методов увеличивает интенсивность линии ионов  $\text{Er}^{3+}$  и линии D1 дислокационной люминесценции на два порядка величины [5,13,14].

#### 4. Заключение

В имплантированном ионами кислорода кремнии исследовано влияние условий формирования (дозы имплантации и длительности отжига) (113) дефектов и режимов измерения (температуры измерения и мощности накачки) на их люминесцентные свойства. Зависимости интенсивности ФЛ линии (113) от дозы имплантации и длительности отжига характеризуются кривыми с максимумами. Максимальная интенсивность достигается после имплантации с дозой  $D_2 = 3.7 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  и отжига в ХСА в течение 1 h. Интенсивность ФЛ монотонно увеличивается с мощностью накачки и монотонно уменьшается с температурой. Положение максимума линии (113) дефекта не зависит от мощности накачки и слабо зависит от температуры измерения в диапазоне 64–120 К. Значения полуширины линии в пластинах кремния, имплантированных ионами кислорода, близки к наблюдавшимся ранее в имплантированных ионами кремния образцах. Линия ФЛ (113) дефекта впервые

наблюдалась при 120 К, что почти в 3 раза выше температуры, при которой она ранее регистрировалась в имплантированных образцах. Полученные результаты дополняют и развивают существующие представления о люминесцентных свойствах (113) дефектов. Они также позволяют предположить, что в ближайшее время будут изготовлены работающие при комнатной температуре светодиоды с длиной волны 1370 nm.

Авторы благодарны В.И. Вдовину за проведение исследований методами электронной микроскопии.

## Список литературы

- [1] M.A. Green, J. Zhao, A. Wang, P.J. Reece, M. Gal. *Nature* **412**, 805 (2001).
- [2] G. Davies. *Phys. Rep.* **176**, 83 (1989).
- [3] G. Franzo, F. Priolo, S. Coffa, A. Polman, A. Carnera. *Appl. Phys. Lett.* **64**, 2235 (1994).
- [4] A.M. Emel'yanov, N.A. Sobolev, A.N. Yakimenko. *Appl. Phys. Lett.* **72**, 1223 (1998).
- [5] V. Kveder, V. Badylevich, E. Steinman, A. Izotov, M. Zeibt, W. Schreter. *Appl. Phys. Lett.* **84**, 2106 (2004).
- [6] Н.А. Соболев, А.Е. Калядин, М.В. Коновалов, П.Н. Аруев, В.В. Забродский, Е.И. Шек, К.Ф. Штельмах, А.Н. Михайлов, Д.И. Тетельбаум. *ФТП* **50**, 241 (2016).
- [7] S. Takeda. *Jpn. J. Appl. Phys.* **30**, L639 (1991).
- [8] S. Coffa, S. Libertino, C. Spinella. *Appl. Phys. Lett.* **76**, 321 (2000).
- [9] P.K. Giri. *Semicond. Sci. Technol.* **20**, 638 (2005).
- [10] Y. Yang, C. Wang, R.D. Yang, L. Li, F. Xiong, J.M. Bao. *Chin. Phys. B* **18**, 4906 (2009).
- [11] Y. Yang, J.M. Bao, C. Wang, M.J. Aziz. *J. Appl. Phys.* **107**, 123109 (2010).
- [12] J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack. *Nucl. Instrum. Meth. B* **268**, 1818 (2010).
- [13] J. Michel, J.L. Benton, R.F. Ferrante, D.C. Jacobson, D.J. Eaglesham, E.A. Fitzgerald, Y.-H. Xie, J.M. Poate, L.C. Kimerling. *J. Appl. Phys.* **70**, 2672 (1991).
- [14] E.O. Sveinbjornsson, J. Weber. *Appl. Phys. Lett.* **69**, 2686 (1996).