

# Электролюминесценция структур Si–SiO<sub>2</sub>, последовательно имплантированных кремнием и углеродом

© А.П. Барабан, Ю.В. Петров

Научно-исследовательский институт физики им. В.А. Фока Санкт-Петербургского государственного университета, 198504 Санкт-Петербург, Петергоф, Россия

E-mail: barabanalex@mail.ru

(Поступила в Редакцию 4 июля 2005 г.)

Изучена электролюминесценция (ЭЛ) структур Si–SiO<sub>2</sub>, подвергнутых последовательной ионной имплантации (ИИ) кремния с энергиями 130 и 60 keV и углерода с энергией 60 keV в окисный слой. Результатом ИИ являлось возникновение полос ЭЛ с максимумами около 2.7 и 4.3 eV, которые связывались с образованием силиленовых центров. Постимплантационный отжиг приводил к уменьшению интенсивности данных полос ЭЛ, а также к появлению плеча с коротковолновой стороны полосы 2.7 eV.

PACS: 78.20.Jq, 85.40.Ry, 61.72.Ww

## 1. Введение

Получение эффективных источников излучения на базе кремниевой технологии является одной из актуальных задач современной оптоэлектроники. В качестве одного из способов решения этой задачи было предложено использование полупроводниковых нанокластеров (НК), сформированных в объеме диэлектрического слоя [1,2]. Для получения НК используется ионная имплантация (ИИ) в слой SiO<sub>2</sub>, выращенный на кремниевой подложке, с последующим высокотемпературным отжигом. В частности, в работе [3] было предложено использовать НК карбида кремния, который является эффективным источником излучения. Для получения таких НК проводилась последовательная имплантация кремния и углерода в окисный слой.

Целью настоящей работы является исследование электролюминесценции (ЭЛ) структур Si–SiO<sub>2</sub>, содержащих в окисном слое избыточный кремний и углерод, введенные путем последовательной ИИ.

## 2. Методика эксперимента

Структуры Si–SiO<sub>2</sub> формировались путем термического окисления кремния *p*-типа во влажном кислороде при температуре 1100°C. Толщина окисного слоя составляла 400 nm. Первоначально проводилась имплантация ионов кремния с энергиями 130 и 60 keV, а затем — углерода с энергией 60 keV. Параметры имплантации приведены в таблице.

Параметры ионной имплантации

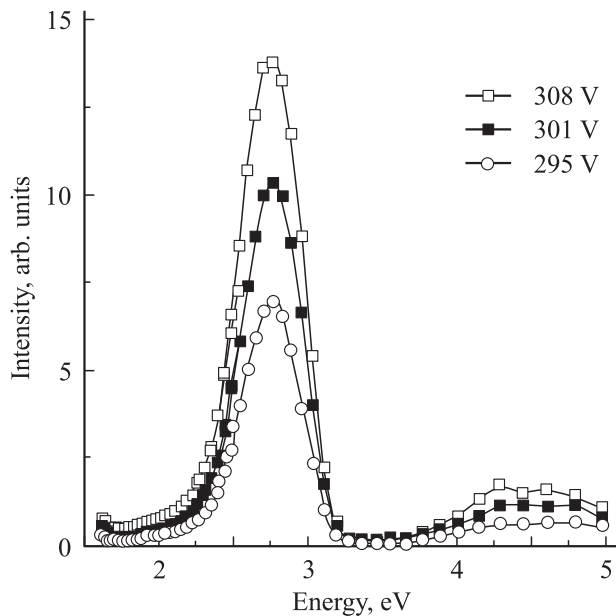
Параметр	Имплантируемый элемент		
	Si <sup>+</sup>	Si <sup>+</sup>	C <sup>+</sup>
Энергия, keV	130	60	60
Доза 1, 10 <sup>16</sup> см <sup>-2</sup>	1.3	0.5	1
Доза 2, 10 <sup>16</sup> см <sup>-2</sup>	6.5	2.5	5

Данным условиям имплантации отвечает распределение избыточного кремния по глубине от 100 до 300 nm с концентрациями 1 и 5 at.% для доз 1 и 2 соответственно. Имплантированный углерод локализован в области 100–250 nm, причем его концентрация в максимуме распределения совпадает с концентрацией избыточного Si [3]. Постимплантационный отжиг структур проводился в атмосфере азота при температуре 1100°C в течение часа.

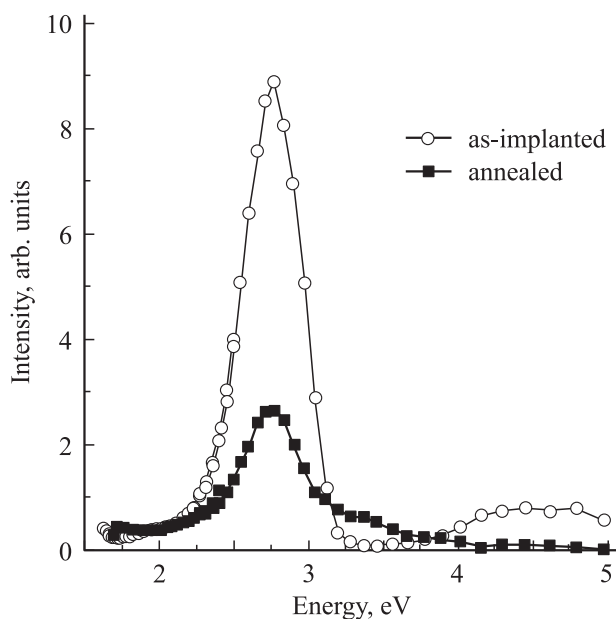
Спектры ЭЛ регистрировались в системе электролит–диэлектрик–полупроводник (ЭДП) по методике, детально описанной в [4]. Возможность стабильного возбуждения ЭЛ в структурах кремния–диэлектрик и ее регистрации в системе ЭДП в значительной мере связаны с преимуществами данной системы, заключающимися в инжекции электронов и их разогреве в диэлектрических слоях в широкой области электрических полей, а также в высокой прозрачности электролита в широком спектральном диапазоне, позволяющем регистрировать свечение малой интенсивности. Кроме того, возможность контролируемого травливания диэлектрического слоя с одновременным измерением спектров ЭЛ позволяет определять пространственное распределение центров люминесценции (ЦЛ) в окисном слое. Регистрация спектров ЭЛ проводилась в режиме счета фотонов в спектральном диапазоне 250–900 nm при температуре 293 K.

## 3. Экспериментальные результаты

ЭЛ исследуемых структур наблюдалась при наличии в окисном слое электрического поля напряженностью 5.6–8.2 MV/cm. Спектральное распределение ЭЛ характеризовалось наличием интенсивной полосы излучения с максимумом  $2.7 \pm 0.1$  eV и полушириной  $0.50 \pm 0.08$  eV и сопутствующей ей менее интенсивной полосы с максимумом около 4.3 eV (рис. 1). Интенсивность этих полос ЭЛ возрастала при увеличении напряжения на структуре по экспоненциальному закону. Пороговое напряжение, необходимое для возбуждения



**Рис. 1.** Спектры ЭЛ структур Si-SiO<sub>2</sub>, подвергнутых совместной имплантации углерода и кремния (доза 2 в таблице).



**Рис. 2.** Спектры ЭЛ структур Si-SiO<sub>2</sub>, подвергнутых совместной имплантации углерода и кремния (доза 2 в таблице), до и после отжига.

ЭЛ, оказалось больше для образцов с меньшей дозой имплантации. Сравнение спектров ЭЛ при одинаковых плотностях тока показало, что интенсивность полос 2.7 и 4.3 eV выше для образцов с большей дозой имплантации. Отношение интенсивностей данных полос составляет  $11 \pm 4$  и сохраняется при изменении условий возбуждения.

Отжиг исследуемых структур приводил, как показано на рис. 2, к уменьшению интенсивности полосы ЭЛ

2.7 eV. При этом с коротковолновой стороны данной полосы позникало плечо, доходящее до 4.0 eV (рис. 2). Интенсивность полосы 2.7 eV возрастала при увеличении напряжения по экспоненциальному закону так же, как в неотожженных образцах, но пороговое напряжение, необходимое для возбуждения ЭЛ, составляло в этом случае 7.5 MV/cm. При этом при увеличении приложенного напряжения интенсивность ЭЛ в области плеча изменялась значительно меньше, чем в максимуме полосы 2.7 eV.

#### 4. Обсуждение результатов

Полученные результаты указывают на то, что в процессе ИИ в слое SiO<sub>2</sub> образовались ЦЛ, ответственные за полосы 2.7 и 4.3 eV. Необходимо отметить, что данные полосы наблюдались также в спектрах люминесценции структур, подвергнутых имплантации кремния [5,6] и аргона [7]. Появление этих полос излучения связывалось в [5] с образованием в процессе ИИ двухкоординированного по кислороду кремния (силиленового центра), энергия возбуждения которого составляет 5.0 eV [8]. В данном случае также можно связать наблюдаемые в спектре ЭЛ полосы с силиленовым центром, образование которого в рассматриваемых структурах может происходить как за счет радиационного разрушения структуры SiO<sub>2</sub>, так и за счет внедряемого в окисный слой кремния. Возбуждение данного центра, как и в случае имплантации Si [5], осуществляется горячими электронами с энергией выше 5.0 eV. Зависимость порогового напряжения возбуждения ЭЛ от концентрации имплантированных ионов могла быть связана с изменением величины встроенного в окисный слой заряда при изменении дозы имплантации.

Уменьшение интенсивности полосы ЭЛ 2.7 eV в результате отжига может быть связано как с сокращением числа ЦЛ, так и с изменением условий их возбуждения. Возникающее в результате отжига плечо с коротковолновой стороны полосы 2.7 eV может быть обусловлено кластерами Si, C, SiC, образующимися по данным работы [3] в результате отжига в таких структурах. Этот процесс может сопровождаться уменьшением концентрации силиленовых центров. Для более детального анализа природы центров, ответственных за люминесценцию в области плеча, необходимы дальнейшие исследования.

#### 5. Заключение

Таким образом, ИИ кремния и углерода в слой SiO<sub>2</sub> приводит к образованию дефектов типа двухкоординированного по кислороду кремния, которые являются ЦЛ, ответственными за полосы излучения 2.7 и 4.3 eV. Образование таких ЦЛ происходит независимо от типа имплантированных ионов. В результате высокотемпературного отжига интенсивность ЭЛ падает.

## Список литературы

- [1] G. Franzo, A. Irrera, E.C. Moreira, M. Miritelo, F. Iacona, D. Sanfilippo, G. Di Stefano, P.G. Fallica, F. Priolo. *Appl. Phys. A* **74**, 1, 1 (2002).
- [2] B. Garrido, M. Lopez, O. Gonzalez, A. Perez-Rodriguez, J.R. Morante, C. Bonafos. *Appl. Phys. Lett.* **77**, 20, 1 (2000).
- [3] A. Perez-Rodriguez, O. Conzalez-Varona, B. Garrido, P. Pellegrino, J.R. Morante, C. Bonafos, M. Carrada, A. Claverie. *J. Appl. Phys.* **94**, 1, 254 (2003).
- [4] А.П. Барабан, В.В. Булавинов, П.П. Коноров. *Электроника слоев SiO<sub>2</sub> на кремнии*. Изд-во ЛГУ, Л. (1988). 304 с.
- [5] А.П. Барабан, Д.В. Егоров, Ю.В. Петров, Л.В. Милоглядова. *Письма в ЖТФ* **30**, 2, 1 (2004).
- [6] L. Rebohle, J. Von Borany, N. Frob, W. Scorupa. *Appl. Phys. B* **71**, 131 (2000).
- [7] А.П. Барабан, П.П. Коноров, Л.В. Малявка, А.Г. Трошихин. *ЖТФ* **70**, 8, 87 (2000).
- [8] Л.Н. Скуя, А.Н. Стрелецкий, А.Б. Пакович. *ФХС* **14**, 481 (1988).