

ПРИРОДА СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ СИСТЕМЫ SiO₂/Si

А.А. Никольская¹⁾, Д.С. Королев¹⁾, А.Н. Яблонский²⁾, Д.В. Юрасов²⁾, В.Е. Захаров²⁾,
Б.А. Андреев²⁾, А.А. Конаков¹⁾, Д.И. Тетельбаум¹⁾

¹⁾Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
пр. Гагарина 23/3, Нижний Новгород 603022, Россия

²⁾Институт физики микроструктур РАН, ГСП-105, Нижний Новгород 603950, Россия
nikolskaya@nifti.unn.ru, dmkorolev@phys.unn.ru, yablonsk@ipmras.ru, Inquisitor@ipmras.ru,
zakharov@ipmras.ru, boris@ipmras.ru, konakov_anton@mail.ru, tetelbaum@phys.unn.ru

Одним из перспективных вариантов решения задачи повышения излучательной способности кремния является использование ионной имплантации. При ионной имплантации в кремнии образуются точечные дефекты (комплексы), которые обладают достаточно эффективной люминесценцией и могут быть использованы как в «классической» оптоэлектронике, так и в качестве оптических кубитов в квантово-механических фотонных устройствах. В настоящей работе проведено исследование оптических свойств кремния, покрытого термической пленкой SiO₂ и подвергнутого ионному облучению ионами криптона с последующим отжигом. Обнаружено, что при определенных параметрах исходных структур, режимов имплантации и отжига в такой системе наблюдается интенсивная фотолюминесценция в ИК-области спектра при $\lambda \approx 1240$ нм (линия W^M).

Ключевые слова: кремниевая фотоника; кремний; ионная имплантация; фотолюминесценция; светоизлучающие дефекты.

THE NATURE OF LIGHT-EMITTING DEFECTS IN SILICON ARISING DURING IRRADIATION OF THE SiO₂/Si SYSTEM

A.A. Nikolskaya¹⁾, D.S. Korolev¹⁾, A.N. Yablonsky²⁾, D.V. Yurasov²⁾, V.E. Zakharov²⁾,
B.A. Andreev²⁾, A.A. Konakov¹⁾, D.I. Tetelbaum¹⁾

¹⁾Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
23/3 Gagarina Ave., 603022 Nizhny Novgorod, Russia

²⁾Institute for Physics of Microstructures RAS, GSP-105, 603950 Nizhny Novgorod, Russia
nikolskaya@nifti.unn.ru, dmkorolev@phys.unn.ru, yablonsk@ipmras.ru, Inquisitor@ipmras.ru,
zakharov@ipmras.ru, boris@ipmras.ru, konakov_anton@mail.ru, tetelbaum@phys.unn.ru

One of the promising options for solving the problem of increasing the emissivity of silicon is the use of ion implantation. Ion implantation in silicon produces point defects (complexes) that have fairly effective luminescence and can be used both in "classical" optoelectronics and as optical qubits in quantum-mechanical photonic devices. In this paper, we study the optical properties of silicon coated with a thermal SiO₂ film and subjected to ion irradiation with krypton ions followed by annealing. It was found that, for certain parameters of the initial structures, implantation and annealing modes, intense photoluminescence is observed in the IR region of the spectrum at $\lambda \approx 1240$ nm (W^M line).

Keywords: silicon photonics; silicon; ion implantation; photoluminescence; light-emitting defects.

Введение

Возникновение светоизлучающих дефектов в кремнии при ионном облучении исследуется уже много лет. Однако, эти исследования получили новую жизнь в связи с активной разработкой квантовых оптических устройств. Несмотря на обширные знания, накопленные в области инженерии дефектов, все еще необходимо решить

много проблем, прежде чем появится возможность внедрения структур на основе кремния со светоизлучающими дефектами в практику в промышленных масштабах.

Согласно имеющимся литературным данным, наиболее перспективным является использование в качестве светоизлучающих дефектов комплексов, известных под названиями W - и G -центры [1, 2]. Од-

ним из недостатков рассматриваемых комплексов является то, что они разрушаются при относительно низких температурах отжига (при $T > 500$ °C), что затрудняет их использование в КМОП технологии при изготовлении интегральных схем.

Нами был разработан новый подход, который позволяет увеличить термостойкость дефектов типа «*W*-центр». Этот подход заключается в том, что ионы внедряются не непосредственно в кремний, а в маскирующие пленки, выращенные на кремнии и имеющие толщину, при которой большинство имплантируемых ионов останавливается в пленке. В этом случае светоизлучающие комплексы оказываются более эффективно изолированными от вакансионных комплексов (распад которых при отжиге увеличивает вероятность разрушения *W*-центров люминесценции).

Методика эксперимента

В качестве исходных материалов использованы пластины кремния и структуры SiO₂/Si с толщиной защитной пленки SiO₂ = 120 нм, полученных методом термического окисления кремния при температуре 1100 °C в атмосфере осушенного кислорода.

Облучение проводилось ионами Kr⁺ с энергией 80 кэВ с дозой $5 \cdot 10^{16}$ см⁻² при облучении структур SiO₂/Si. Для подложек, не покрытых пленкой SiO₂ энергия и доза ионов Kr⁺ и O₂⁺ подбирались так, чтобы имитировать облучение системы SiO₂/Si. Постимплантационный отжиг производился в трубчатой печи при температуре 800 °C в потоке азота 30 мин.

Согласно расчетам, при облучении структур SiO₂/Si с подобранными параметрами имплантации, до подложки кремния через слой SiO₂ долетает лишь малая часть ионов Kr⁺ (рис. 1а), несмотря на это в подложке кремния образуется значительная концентрация радиационных дефектов (рис. 1б) за счет долетевших атомов криптона и атомов отдачи Si и O. Эти радиационные дефекты могут служить «строительным» материалом для светоизлучающих

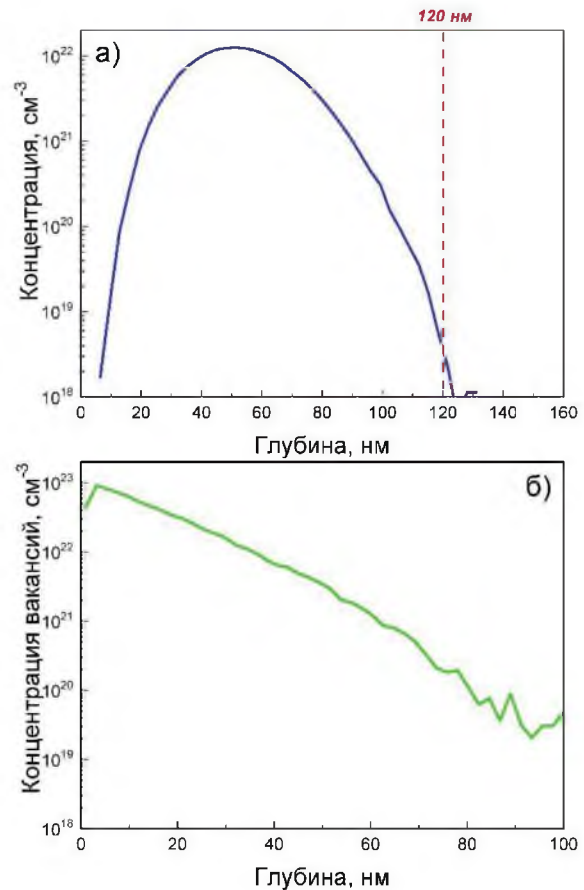


Рис. 1. Рассчитанный в программе SRIM профиль распределения атомов криптона, имплантированных в систему SiO₂/Si (а), и профиль дефектов, образованных в подложке Si при таком облучении (б)

дефектов. Для изучения светоизлучающих свойств синтезированных образцов применялся метод спектроскопии фотолюминесценции (ФЛ). Измерение спектров ФЛ проводилось в диапазоне длин волн 1000 – 1650 нм при возбуждении полупроводниковым лазером с длиной волны 408 нм (~ 3 эВ) при температуре жидкого азота.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены спектры ФЛ образца SiO₂(120 нм)/Si, облученного ионами Kr⁺ с энергией 80 кэВ и дозой $5 \cdot 10^{16}$ см⁻², с последующим отжигом при 800 °C. На спектре ФЛ наблюдается линия с максимумом на длине волны $\lambda \approx 1240$ нм (1 эВ), относящаяся к излучению обнаруженных нами дефектов типа *W*^M [3]. Мы предполагаем, что возникновение данной линии связано с образованием радиационных дефектов в подложке кремния.

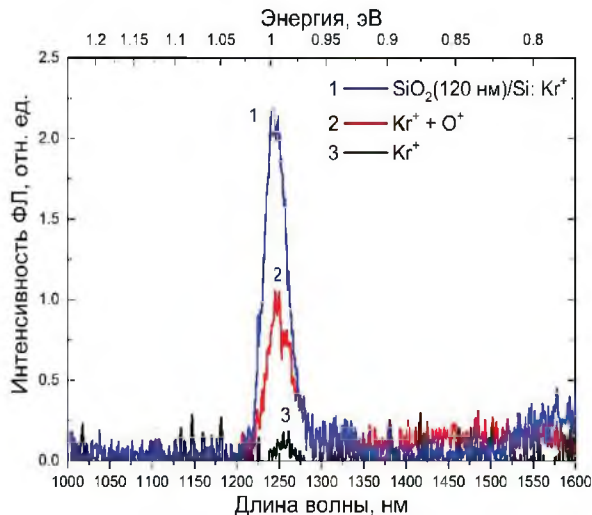


Рис. 2. Спектры ФЛ образцов кремния –покрытого пленкой SiO₂ (1) и без нее (2,3), облученных ионами Kr⁺ с последующим отжигом

Для того, чтобы изучить природу образования этих дефектов проводилось облучение подложек Si без пленки в различных режимах: в первом случае только ионами Kr⁺ для формирования слоя, обогащенного междоузельными атомами Si, а во втором случае – тоже ионами Kr⁺ в тех же режимах, но с последующей имплантацией ионов O⁺. В обоих случаях после имплантации проводился отжиг в N₂ при 800 °C (30 мин).

Видно (рис. 2), что при облучении подложки Si только ионами Kr⁺ ФЛ не возникает во всем исследуемом диапазоне длин волн, в то время как для образца, дополнительно облученного кислородом, линия ФЛ W^M наблюдается.

Заключение

Установлено, что при ионном облучении системы SiO₂/Si с последующим высокотемпературным отжигом в кремнии образуется слой, обладающий фотолюминесценцией при длине волны $\lambda \approx 1240$ нм (линия W^M).

Показано, что источником ФЛ на длине волны $\lambda \approx 1240$ нм являются светоизлучающие радиационные дефекты. При этом важную роль в их формировании играют атомы кислорода.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» Министерства науки и высшего образования РФ.

Библиографические ссылки

1. Redjem W., Zhiyenbayev Y., Qarony W., et al. All-silicon quantum light source by embedding an atomic emissive center in a nanophotonic cavity. *Nat Commun.* 2023; 14: 3321.
2. Buckley S.M., Tait A.N., Moody G., Primavera B., Olson S., Herman J. Optimization of photoluminescence from W-centers in silicon-on-insulator. *Opt. Express.* 2020; 28: 16057.
3. Nikolskaya A., Korolev D., Mikhaylov A., Konakov A., Okhapkin A., Kraev S., et al. Luminescence of modified W-centers arising in silicon upon irradiation of the SiO₂/Si system by Kr⁺ ions. *Materials Letters* 2023; 342: 134302.