

06

Влияние отжига на электролюминесценцию слоев SiO₂ с избыточным кремнием

© А.П. Барабан, Д.В. Егоров, Ю.В. Петров, Л.В. Милоглядова

НИИ физики С.-Петербургского государственного университета

Поступило в Редакцию 25 июля 2003 г.

Изучена электролюминесценция структур Si–SiO₂, содержащих избыточный кремний в окисном слое, введенный путем ионной имплантации (ИИ) с энергией 150 keV и дозами $5 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$. Результатом ИИ было появление интенсивной полосы ЭЛ 2.7 eV. Постимплантационный отжиг приводил к уменьшению интенсивности данной полосы и к появлению полосы ЭЛ 1.6 eV, которая связывалась с излучательными переходами на границе нанокластеры кремния/SiO₂.

Одна из основных задач современной оптоэлектроники заключается в получении стабильной люминесценции в структурах на основе кремния. В качестве подобных структур активно исследуются структуры на основе пористого кремния [1–3] и структуры Si–SiO₂, содержащие в объеме окисного слоя нанокластеры кремния (НК) [4–6]. В последнем случае формирование НК в SiO₂ могло осуществляться путем ионной имплантации (ИИ) кремния в окисный слой и последующего отжига [5,6].

Цель настоящей работы заключалась в исследовании электролюминесценции (ЭЛ) в отожженных структурах Si–SiO₂, содержащих избыточный кремний в окисном слое.

Пленки SiO₂ толщиной 800 nm были получены путем термического окисления кремния *p*-типа во влажном кислороде при температуре 1100°C. Имплантация ионов кремния в окисный слой осуществлялась с энергией 150 keV и дозами $5 \cdot 10^{16}$ – $3 \cdot 10^{17}$ см⁻². Этот диапазон доз соответствовал созданию избыточной концентрации кремния от 5 до 30% в области локализации имплантанта, максимум которого располагался на расстоянии ~ 200 nm от внешней границы окисного слоя. Постимплантационный отжиг структур проводился при температуре 1000°C в атмосфере N₂ в течение 16 h.

Спектры ЭЛ регистрировались в системе электролит–диэлектрик–полупроводник (ЭДП) по методике, детально описанной в [7]. Преимущества ЭДП-системы при исследованиях ЭЛ заключаются в возможности инжекции электронов и их разогрева в слоях SiO₂ в широкой области электрических полей, что является одним из необходимых условий возбуждения центров люминесценции. Регистрация спектров ЭЛ проводилась при температуре 273 K и при условиях возбуждения, исключающих возможность развития процесса ударной ионизации в объеме окисного слоя [8].

Результатом ИИ кремния в окисный слой Si–SiO₂ было появление интенсивной полосы ЭЛ с энергетическим положением максимума интенсивности ~ 2.7 eV. Последующий отжиг структур приводил к уменьшению интенсивности данной полосы ЭЛ и появлению длинноволновой полосы ЭЛ в области 1.6 eV (рис. 1). На рис. 2 приведены спектры ЭЛ структур Si–SiO₂ с различным содержанием избыточного кремния в окисном слое. Наблюдаемые полосы ЭЛ хорошо аппроксимируются гауссовым распределением со следующими параметрами: (2.7 ± 0.06) eV с полушириной (0.32 ± 0.06) и (1.64 ± 0.08) eV с полушириной (0.16 ± 0.08) eV. Вместе с тем необходимо отметить незначительный (~ 0.05 eV) сдвиг полосы ЭЛ 1.6 eV в длинноволновую область спектра при увеличении концентрации избыточного кремния в окисном слое от 5–10 до 20–30%. Из рис. 2 видно, что в спектре ЭЛ структур, содержащих 5–10% избыточного кремния, наиболее интенсивной являлась полоса излучения 1.6 eV, в то время как в спектрах ЭЛ структур с 20–30% избыточного кремния — полоса 2.7 eV. Появление полос ЭЛ 1.6 и 2.7 eV в исследованных структурах с разным процентным содержанием кремния наблюдалось при различных значениях приложенного напряжения, т.е. при разной средней напряженности электрического поля в окисном слое. Пороговая напряженность поля

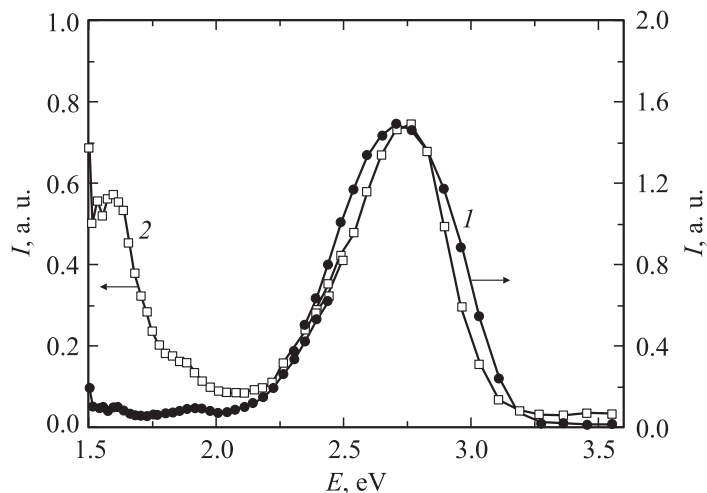


Рис. 1. Спектры ЭЛ структур Si–SiO₂, содержащих 30% избыточного кремния в окисном слое: 1 — до отжига, 2 — после отжига.

снижалась с 7.6 MV/cm для образцов с 5% избыточного кремния до 5.6 MV/cm для структур с 20% избыточного кремния, а затем возрастала до 6 MV/cm для образцов с 30% избыточного кремния. Интенсивность полос ЭЛ 2.7 и 1.6 eV экспоненциально возрастала с увеличением средней напряженности электрического поля в окисном слое и сверхлинейно зависела от плотности протекающего через структуру тока.

ИИ в окисный слой сопровождается интенсивным дефектообразованием, в том числе и образованием дефектов, ответственных за появление полосы ЭЛ 2.7 eV [9]. По нашему мнению, такими дефектами являются атомы двухкоординированного по кислороду кремния — так называемые силиленовые центры [10]. Высокотемпературный отжиг приводит к уменьшению концентрации дефектов, в том числе силиленовых центров, что находит свое отражение в уменьшении интенсивности полосы ЭЛ 2.7 eV. В случае структур Si–SiO₂ с имплантированным в окисный слой аргоном отжиг также приводил к уменьшению интенсивности, образующейся вследствие имплантации полосы ЭЛ 2.7 eV [11]. Это связывалось с уменьшением концентрации силиленовых цен-

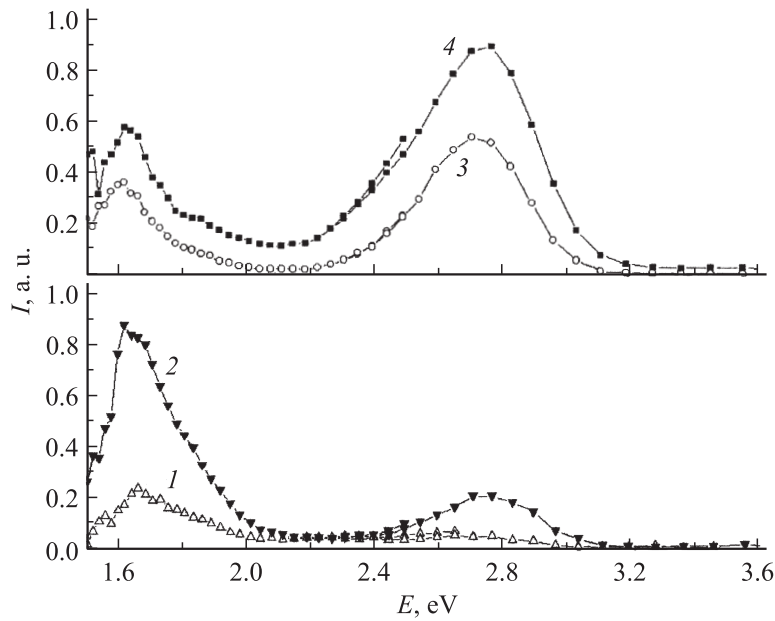


Рис. 2. Спектры ЭЛ отожженных структур Si–SiO₂, содержащих избыточный кремний (%) в окисном слое: 1 — 5%, 2 — 10%, 3 — 20%, 4 — 30%.

тров вследствие восстановления нарушенных имплантацией кремниво-кислородных связей. В данном случае в условиях дефицита кислорода в окисном слое уменьшение концентрации силиленовых центров может происходить за счет образования НК в процессе высокотемпературного отжига, на что указывалось в работе [6]. При этом отжиг структур с различным содержанием избыточного кремния приводил к образованию НК с разными размерами: 3, 3.8 и 5.3 nm для 10, 20 и 30% содержания избыточного кремния в окисном слое соответственно [6].

Наблюдаемое нами на всех исследованных структурах постоянство (в пределах погрешности) энергетического положения максимума полосы ЭЛ 1.6 eV не позволяет связать ее происхождение с излучательными переходами в НК кремния, как это делалось в работах [4,5] на основании зависимости спектрального положения максимума длинноволновой полосы ЭЛ и фотолюминесценции от содержания избыточного кремния

в окисном слое и, следовательно, от размеров НК. По нашему мнению, ЭЛ в полосе 1.6 eV связана с существованием дефектов на границе НК/SiO₂, которые образуются при формировании НК в процессе отжига структур. В качестве центров люминесценции могут выступать дефекты типа трехкоординированного кремния ($Si_3 = Si^{\cdot}$), конкретные свойства которых в этом случае определяются локальным окружением, т.е. строением НК [12]. При этом концентрация таких дефектов связана с концентрацией избыточного кремния в окисном слое сложным образом, так как она зависит не только от геометрических размеров НК (площади поверхности), но и от их общего количества, которое определяется концентрацией избыточного кремния и количеством атомов кремния в одном НК. Возбуждение данных центров люминесценции происходит за счет их взаимодействия с горячими электронами, образующимися в окисном слое в сильных электрических полях, на что указывает зависимость интенсивности полосы ЭЛ 1.6 eV от напряженности электрического поля в окисном слое и плотности протекающего через структуру тока.

Таким образом, отжиг структур Si–SiO₂, содержащих в окисном слое избыточный кремний, приводит к появлению новой полосы излучения в спектре ЭЛ с энергией 1.6 eV. Спектральное положение данной полосы не зависит в первом приближении от концентрации избыточного кремния, а ее появление связывается с образованием в объеме окисного слоя дефектов типа $Si_3 = Si^{\cdot}$ на границе НК/SiO₂.

Работа поддержана КЦФЕ МО РФ. Грант PD02–1.2–356.

Список литературы

- [1] *Canham L.T.* // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. P. 1046.
- [2] *Richter A., Steiner P., Kozlowski F., Lang W.* // IEEE Electron. Device Lett. 1991. V. 12. P. 691.
- [3] *Canham L.T., Leong W.Y., Beale M.I.J., Cox T.I., Taylor L.* // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 61. P. 2563–2565.
- [4] *Franzo G., Irrera A., Moreira E.C., Miritello M.* et al. // Appl. Phys. A. 2002. V. 74. P. 1–5.
- [5] *Song H.Z., Bao X.M., Li N.S., Zhang J.Y.* // J. Appl. Phys. 1997. V. 82. N 8. P. 4028–4032.
- [6] *Garrido B., Lopez M., Gonzales O.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77. N 20. P. 1–3.

- [7] Барабан А.П., Булавинов В.В., Коноров П.П. Электроника слоев SiO₂ на кремнии. Л.: Изд. ЛГУ, 1988. 304 с.
- [8] Барабан А.П., Климов И.В., Теношвили Н.И., Усеинов Э.Д., Булавинов В.В. // Письма ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 17. С. 44–46.
- [9] Барабан А.П., Милоглядова Л.В. // ЖТФ. 2002. Т. 72. В. 5. С. 56–60.
- [10] Скуя Л.Н., Стрелецкий А.Н., Пакович А.Б. // Физика и химия стекла. 1988. Т. 14. С. 481–489.
- [11] Барабан А.П., Коноров П.П., Малявка Л.В., Трошихин А.Г. // ЖТФ. 2000. Т. 70. В. 8. С. 87–90.
- [12] White C.T., Ngai K.L. // J. Vacuum Sci. and Techn. 1979. V. 16. N 5. P. 1412.