

Электрофизические свойства светоизлучающих структур на основе SiO₂, имплантированного высокими дозами ионов олова

И. А. Романов¹, Ф. Ф. Комаров^{2,3}

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь; e-mail: romivan@bsu.by

²Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко
Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь;

³Научно-исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

Светоизлучающие структуры на базе кремния изготовлены методом имплантации ионов олова с энергией 80 кэВ и дозами 1×10^{17} , 5×10^{16} и $2,5 \times 10^{16}$ ион/см² в термически выращенные слои SiO₂ с последующей термообработкой при 900 °С. Установлено, что концентрация дефектов в имплантированных слоях стремительно возрастает с увеличением дозы имплантации. Сформированные структуры обладают интенсивной фото- и электролюминесценцией в фиолетовой области спектра, которая приписывается люминесценции нановключений SnO₂. Увеличение дозы имплантации приводит к увеличению концентрации центров безызлучательной рекомбинации, возрастанию тока утечки и уменьшению эффективности фото- и электролюминесценции полосы с максимумом при 3,2 эВ.

Ключевые слова: оксид кремния, оксид олова, вольт-амперные характеристики, фотолюминесценция, электролюминесценция

Введение

Тонкие слои оксида кремния, содержащие наноразмерные кристаллические включения, являются перспективным материалом для создания светоизлучающих устройств на базе кремния. Наиболее распространенным способом создания светоизлучающих нанокристаллов в оксиде кремния является метод ионной имплантации с последующей термической обработкой. Оксид кремния, имплантированный высокими дозами ионов олова и прошедший термообработку, обладает интенсивной фото- и электролюминесценцией в фиолетовой области спектра [1]. Люминесценцию в этой области приписывают излучательной рекомбинации между уровнями, расположенными вблизи валентной зоны и зоны проводимости нанокристаллов SnO₂ [1].

Исследование электрофизических свойств светоизлучающих структур позволяет определить механизмы переноса носителей заряда, выявить влияние механизмов переноса на люминесцентные свойства и деградацию структур. К настоящему времени проведено недостаточное количество исследований, позволяющих выявить связь между электрофизическими и люминесцентными свойствами SiO₂, имплантированного оловом.

Цель работы – исследовать влияние дозы имплантации на электрофизические свойства пленок SiO₂, имплантированных ионами олова и прошедших высокотемпературную термообработку.

1. Материалы и методы исследования

Для создания светоизлучающих структур в термически выращенный на кремнии *p*-типа SiO₂ толщиной 130 нм проводилась имплантация ионов Sn⁺ с энергией 80 кэВ и дозами 1×10^{17} , 5×10^{16} и $2,5 \times 10^{16}$ ион/см². Термообработка образцов проводилась при температуре 900 °С в течение часа на воздухе. При измерении вольт-амперных характеристик (ВАХ), кинетик напряженности электрического поля $E(t)$ и электролюминесценции (ЭЛ) в качестве прозрачного контакта к излучающему слою использовался 1М водный раствор Na₂SO₄. Регистрация зависимостей $E(t)$ и спектров ЭЛ проводилась в гальваностатическом режиме при положительном смещении подложки.

Для возбуждения ФЛ в фиолетовой области применялся He–Cd лазер с энергией квантов 3,81 эВ. Все измерения проводились при комнатной температуре.

2. Результаты и их обсуждение

На рис. *a* представлены ВАХ имплантированных и отожженных образцов. Как видно из рисунка, в области слабых полей (до 1 МВ/см) проводимость образца, имплантированного наибольшей дозой, превышает проводимость образцов, имплантированных дозами 5×10^{16} и $2,5 \times 10^{16}$ ион/см², более чем на три порядка. Величина тока через структуру Si/SiO₂ в области слабых полей преимущественно обусловлена инжекцией дырок из кремния в оксид [2]. При этом можно утверждать, что для образца, имплантированного дозой 10^{17} ион/см², дырки, инжектируемые из кремния в SiO₂ не преодолевают значительного потенциального барьера. Это означает, что в слое SiO₂ этого образца энергетические уровни локализованных состояний расположены вблизи потолка валентной зоны кремния. В области средних и сильных полей имеет место как инжекция дырок из кремния, так и инжекция электронов из электролита [2]. ВАХ в диапазоне токов $10^{-3} - 1$ мА/см² имеют схожий вид для всех образцов и в основном отличаются смещением характеристик в область слабых полей с увеличением дозы имплантации. Такая зависимость свидетельствует о том, что плотность энергетических уровней дефектов внутри запрещенной зоны SiO₂ монотонно возрастает с увеличением дозы имплантации.

На рис. *б* представлены зависимости напряженности электрического поля от времени, полученные при первом пропускании через образцы тока с плотностью 25 мкА/см². Представленные зависимости характеризуются плавным нарастанием напряжения на образцах, что свидетельствует о высокой концентрации ловушек в имплантированных слоях [2]. В качестве глубоких ловушек могут выступать как дефекты матрицы оксида кремния ($\equiv\text{Si}\cdot$, $\equiv\text{Si}-\text{O}\cdot$, $=\text{Si}:$) так и дефекты, содержащие имплантированные атомы [3].

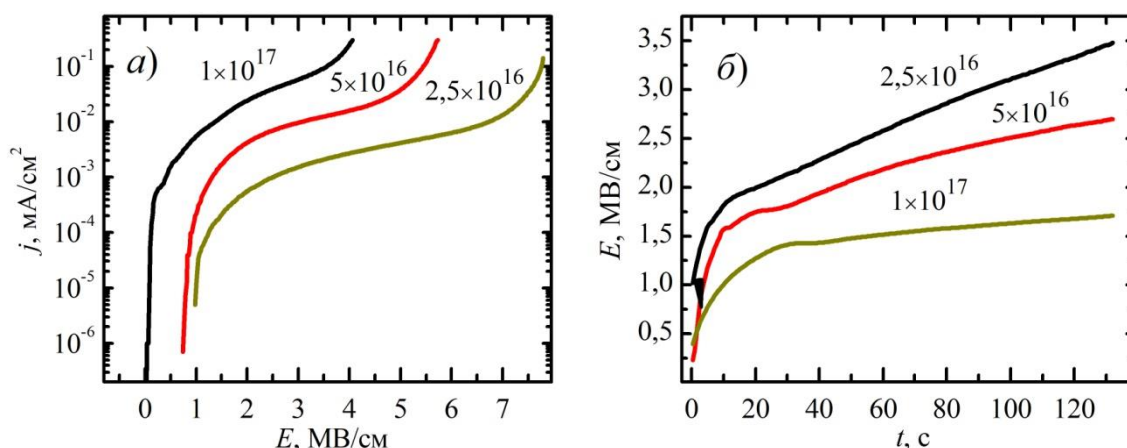


Рис. – Вольт-амперные характеристики (*a*) и кинетики напряженности электрического поля (*б*) образцов SiO₂/Si, имплантированных различными дозами Sn⁺ и отожженных при 900 °С.

Из зависимостей $E(t)$, полученных в процессе измерения спектров ЭЛ, с применением упрощенной модели Шокли-Рида-Холла [3] определены параметры ловушек в имплантированных оловом и отожженных слоях SiO₂. Для определения концентрации ловушек и их сечения захвата принят ряд допущений: распределение ловушек по объему имплантированного слоя считалось однородным; не учитывался тип

носителей заряда и сечение их рекомбинации. Концентрации ловушек N_t и сечения захвата σ , для образцов, имплантированных различными дозами, представлены в таблице. Представленные результаты позволяют оценить влияние дозы имплантации на процессы переноса носителей заряда. Как видно из таблицы, концентрация ловушек стремительно возрастает с увеличением дозы имплантации. Однако произведение $N_t\sigma$ для образцов, имплантированных дозами 5×10^{16} и $2,5 \times 10^{16}$ ион/см², отличается незначительно. Можно предположить, что механизмы переноса носителей заряда в образцах, имплантированных дозами 5×10^{16} и $2,5 \times 10^{16}$ ион/см², имеют одинаковую природу. Высокая концентрация и большое сечение захвата ловушек для образца, имплантированного дозой 10^{17} ион/см², свидетельствует о высокой плотности энергетических состояний внутри запрещенной зоны SiO₂.

В таблице приводится интенсивность ФЛ полосы с максимумом при 3,2 эВ для образцов, имплантированных различными дозами. Интенсивность ФЛ нормирована на коэффициент поглощения образца на длине волны возбуждения – k . Как видно из таблицы, интенсивность ФЛ уменьшается с увеличением дозы имплантации. Такую зависимость можно объяснить возрастанием концентрации центров тушения люминесценции по мере увеличения дозы имплантации.

Табл. – Электрофизические и люминесцентные параметры образцов SiO₂/Si, имплантированных различными дозами ионов олова и отожженных при 900 °С.

Доза имплантации, ион/см ²	Концентрация ловушек $N_t \times 10^{11}$, см ⁻²	Сечение захвата $\sigma \times 10^{-18}$, см ²	$N_t \sigma \times 10^{-4}$, отн. ед.	Интенсивность ФЛ $I_{\text{ФЛ}}/k$, отн. ед.	ξ , отн. ед.
$2,5 \times 10^{16}$	1,4	970	1,36	1	1
5×10^{16}	3,5	266	0,93	0,72	0,51
1×10^{17}	65	3400	220	0,25	0,12

Если допустить, что интенсивность ФЛ полосы с максимумом 3,2 эВ в первом приближении пропорциональна количеству излучательных рекомбинаций за единицу времени, то отношение внешнего квантового выхода ЭЛ $\eta_{\text{эл}}$ к внешнему квантовому выходу ФЛ $\eta_{\text{фл}}$ можно определить соотношением:

$$\xi = \frac{\eta_{\text{эл}}}{\eta_{\text{фл}}} \sim \frac{I_{\text{эл}}}{I_{\text{фл}}} k,$$

где $I_{\text{эл}}$ и $I_{\text{фл}}$ – интенсивности ЭЛ и ФЛ в относительных единицах. Результаты определения параметра ξ в относительных единицах представлены в таблице. Из таблицы видно, что увеличение дозы имплантации приводит к уменьшению эффективности ЭЛ. Такую зависимость можно объяснить тем, что в процессе высокодозной имплантации в имплантируемом слое создаются локализованные состояния, которые приводят к уменьшению квантового выхода ЭЛ. Во-первых, перенос носителей заряда по таким уровням может происходить от одного контакта к другому. Во-вторых, инжектируемые в имплантированный слой электроны и дырки могут рекомбинировать на уровнях дефектов с выделением тепла. Таким образом, электрический ток, протекающий через светоизлучающий слой можно разделить на две компоненты: ток, который участвует в процессах возбуждения люминесцентных центров j_{lum} , и ток, который не участвует в этих процессах и является шунтирующим $j_{\text{ш}}$. Следовательно, уменьшение параметра ξ по мере увеличения дозы имплантации

свидетельствует об увеличении доли тока утечки $j_{ш}$. При наличии большого количества дефектов их локализованные состояния перекрываются с образованием сплошного энергетического уровня, который можно представить в виде проводящего канала, по которому протекает ток, “шунтирующий” люминесцентные центры.

Заклучение

Исследовано влияние дозы имплантации на электрофизические и оптические свойства пленок SiO₂, имплантированных ионами олова с энергией 80 кэВ и дозами 1×10^{17} , 5×10^{16} и $2,5 \times 10^{16}$ ион/см², прошедших термообработку при 900 °С. Установлено, что увеличение дозы имплантации с $2,5 \times 10^{16}$ до 1×10^{17} ион/см² приводит к нелинейному увеличению концентрации ловушек в 46 раз и стремительному возрастанию проводимости. Результаты исследований фото- и электролюминесценции позволяют утверждать, что увеличение дозы имплантации приводит к увеличению центров безызлучательной рекомбинации и уменьшению эффективности электролюминесценции полосы с максимумом при 3,2 эВ. Показано, что электрический ток, протекающий через образцы, можно представить в виде суммы тока, участвующего в процессах возбуждения люминесцентных центров, и тока “шунтирующего” эти процессы. При этом доля шунтирующего тока возрастает с увеличением дозы имплантации. Наиболее эффективной ФЛ и ЭЛ обладает образец, имплантированный дозой $2,5 \times 10^{16}$ ион/см².

Литература

1. Romanov I., Komarov F., Milchanin O., Vlasukova L., Parkhomenko I., Makhavikou M., Wendler E., Mudryi A., Togambayeva A. Structural evolution and photoluminescence of SiO₂ layers with Sn nanoclusters formed by ion implantation. *J. Nanomaterials*. 2019. Vol. 2019. P. 9486745 (9 p.)
2. Барабан А. П., Булавинов В. В., Коноров П. П. Электроника слоев SiO₂ на кремнии. ЛГУ, 1988.
3. Насыров К. А., Гриценко В. А. Механизмы переноса электронов и дырок в диэлектрических плёнках. УФН. 2013. Т. 183, №. 10. С. 1099–1114.

Electrophysical properties of light-emitting structures based on high fluence Sn-implanted SiO₂ layers

I.A. Romanov¹, F.F. Komarov^{2,3}

¹ *Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus; e-mail: romivan@bsu.by*

² *A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus;*

³ *National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia*

Silicon-based light-emitting structures have been fabricated by high-fluence Sn implantation (80 keV, $2,5 \times 10^{16}$, 5×10^{16} and 1×10^{17} ion/cm²) into thermally grown SiO₂ and afterwards annealed at 900 °C for 60 minutes in ambient air. It was found that the concentration of defects in the implanted layers increases rapidly with the increase in the implantation dose. The implanted samples exhibit an intense photo- and electroluminescence in the violet region of the spectrum, which is attributed to the luminescence of SnO₂ nanoparticles. An increase in the implantation dose leads to an increase in the concentration of nonradiative recombination centers, an increase in the leakage current, and a decrease in the efficiency of the photo- and electroluminescence of the band with a maximum at 3.2 eV.

Keywords: silica layers, tin oxide, current-voltage characteristics, photoluminescence, electroluminescence.