

ВЛИЯНИЕ ДОЗЫ ИМПЛАНТАЦИИ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИОКСИДА КРЕМНИЯ, ИМПЛАНТИРОВАННОГО ВЫСОКИМИ ДОЗАМИ ИОНОВ ОЛОВА

И.А. Романов¹⁾, Ф.Ф. Комаров²⁾, Е. Wendler³⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,

пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, romivan@bsu.by

²⁾Белорусский государственный университет, Институт прикладных физических проблем
имени Севченко, ул. Курчатова 7, Минск 220045, Беларусь, komarovf@bsu.by

³⁾Йенский университет им. Ф. Шиллера, пл. Макс-Вуен 1, Йена 07743, Германия

Исследуемые структуры изготовлены методом имплантации ионов олова с энергией 80 кэВ и дозами 1×10^{17} , 5×10^{16} и 2.5×10^{16} см⁻² в термически выращенные слои SiO₂ с последующей термообработкой при 900 °С в течение часа на воздухе. Методом измерения зависимостей $U(t)$ и вольт-амперных характеристик установлено, что увеличение дозы имплантации с 2.5×10^{16} до 1×10^{17} см⁻² приводит к увеличению проводимости имплантированных и отожженных слоев в 9 раз и уменьшению доли захваченных на ловушки носителей заряда в 1.5 раза. Сделан вывод, что при увеличении дозы имплантации механизм переноса носителей заряда путем туннелирования между ловушками начинает преобладать над механизмом захвата носителей заряда на ловушки.

Ключевые слова: ионная имплантация; оксид кремния; оксид олова; вольт-амперные характеристики; ловушки.

ELECTRICAL PROPERTIES OF SILICON OXIDE LAYERS IMPLANTED WITH HIGH FLUENCES OF TIN IONS

Ivan Romanov¹⁾, Fadei Komarov²⁾, Elke Wendler³⁾

¹⁾Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave, 220030 Minsk, Belarus, romivan@bsu.by

²⁾Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University,
7 Kurchatova Str., 220045 Minsk, Belarus, komarovf@bsu.by

³⁾Institut für Festkörperphysik, Friedrich-Schiller-Universität Jena,
1 Max-Wien-Platz, D-07743 Jena, Germany

Samples of SiO₂(130 nm)/Si were implanted with Sn⁺ ions (80 keV, 2.5×10^{16} , 5×10^{16} and 1×10^{17} cm⁻²) at room temperature and afterwards annealed at 900 °C for 60 minutes in ambient air. Current-voltage characteristics and voltage-time dependencies were investigated under positive bias on the silicon substrate. A 1M solution of Na₂SO₄ was used as a contact to the implanted layer. It was found that increasing the implantation dose from 2.5×10^{16} to 1×10^{17} cm⁻² leads to a nine-fold increase in the conductivity of the implanted layers and a 1.5-fold decrease in the fraction of charge carriers trapped. It is concluded that as the implantation dose increases, the mechanism of charge carrier transport through tunneling between traps begins to dominate over the mechanism of charge carrier capture by traps.

Keywords: ion implantation; silicon oxide; tin oxide; current-voltage characteristics; traps.

Введение

Оксид кремния, имплантированный высокими дозами ионов олова и прошедший термообработку, обладает интенсивной люминесценцией в фиолетовой области спектра и является перспективным материалом для создания светоизлучающих устройств на базе кремния [1].

Однако создание эффективных источ-

ников света на основе SiO₂ затруднено в виду того, что этот материал обладает крайне низкой проводимостью и подвижностью носителей заряда. Увеличить проводимость SiO₂ представляется возможным путем введения дополнительных дефектов методом ионной имплантации.

Высокодозная ионная имплантация примесей в SiO₂ приводит к образованию

большого количества электронных и дырочных ловушек, которые существенно влияют на проводимость имплантированных слоев. В качестве ловушек в SiO₂ могут выступать как дефекты матрицы оксида кремния, так и дефекты, содержащие имплантированные атомы [2]. Варьируя параметры имплантации, можно управлять электрофизическими свойствами имплантируемых диэлектрических слоев.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния дозы имплантации ионов олова на электрофизические свойства имплантированных и отожженных слоев SiO₂.

Материалы и методы исследования

Имплантация ионов Sn⁺ с энергией 80 кэВ и дозами 1×10¹⁷, 5×10¹⁶ и 2,5×10¹⁶ см⁻² проводилась в термически выращенный на кремнии *p*-типа SiO₂ толщиной 130 нм. Отжиг имплантированных образцов проводился при температуре 900 °С в течение часа на воздухе.

Для исследования электрофизических свойств имплантированных и отожженных образцов проводилось измерение зависимостей $U(t)$ при пропускании через образцы постоянного тока 25 мкА см⁻² и измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) при положительном смещении подложки. В качестве катода к имплантированным слоям SiO₂ использовался 1М водный раствор Na₂SO₄ с площадью контакта 0,2 см².

Результаты и их обсуждение

По данным просвечивающей электронной микроскопии имплантированные и отожженные слои SiO₂ характеризуются неоднородным распределением преципитатов по глубине. После имплантации и термической обработки толщины диэлектрических слоев составили 130, 125 и 93 нм для образцов, имплантированных дозами 2,5×10¹⁶, 5×10¹⁶ и 1×10¹⁷ см⁻² соответственно.

Протекание через образцы постоянного тока приводит к увеличению потенциала

на аноде за счет накопления заряда на ловушках. Оценить концентрацию и сечение захвата ловушек можно по характеристикам $U(t)$. Без учета пространственного распределения ловушек зависимость $U(t)$ в первом приближении определяется выражением [3]:

$$U(t) = U_0 + \frac{ed}{\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^n N_i \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_i j t}{e}\right) \right]$$

где U_0 – смещение напряжения в начальный момент времени, e – заряд электрона, ϵ – диэлектрическая проницаемость материала, ϵ_0 – электрическая постоянная, d – толщина диэлектрика, j – плотность тока, t – время, N_i и σ_i – концентрация и сечение захвата i -го типа ловушек.

На рисунке 1 представлены измеренные и моделированные характеристики $U(t)$. Экспериментальные зависимости аппроксимированы с учетом ловушек двух типов: с большим и малым сечением захвата. Полученные значения концентраций ловушек в имплантированных и отожженных слоях (2×10¹² – 8×10¹² см⁻²) близки к значениям концентрации электронных ловушек в термическом SiO₂ [3]. Произведение концентрации и сечения захвата ловушек $\gamma=N\sigma$ позволяет оценить долю захваченных носителей заряда. В таблице представлены значения сечений захвата ловушек и параметров γ , нормированных на толщины диэлектрических слоев.

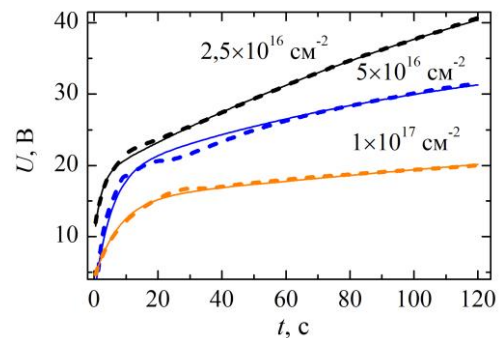


Рис. 1. Зависимости $U(t)$, измеренные при пропускании через имплантированные и отожженные образцы постоянного тока величиной 25 мкА см⁻² (пунктирные линии). Сплошные линии – аппроксимация

Как видно из таблицы, увеличение дозы имплантации приводит к увеличению сечения захвата σ_1 и уменьшению параметров γ_1 и γ_2 . Это является свидетельством того, что увеличение дозы имплантации приводит к уменьшению способности имплантированных слоев захватывать и удерживать носители заряда [3].

Таблица. Сечения захвата ловушек и параметры γ , нормированные на толщины имплантированных и отожженных слоев SiO₂

Доза имплантации, см ⁻²	σ_1 ×10 ⁻¹² , см ²	σ_2 ×10 ⁻¹⁴ , см ²	γ_1 ×10 ³ , см ⁻¹	γ_2 ×10 ³ , см ⁻¹
2.5×10 ¹⁶	3.0	3.6	350	21
5×10 ¹⁶	1.2	5.3	280	15
1×10 ¹⁷	0.8	1.7	240	8,4

Вольт-амперные характеристики образцов изображены на рисунке 2. Как видно из рисунка, ВАХ имеют сложную форму и смещаются в область слабых полей с увеличением дозы имплантации.

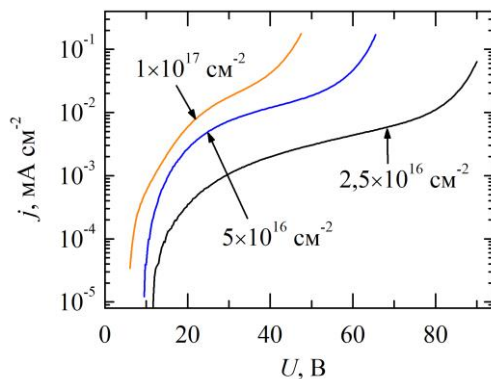


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики имплантированных и отожженных образцов

Основным механизмом проводимости диэлектриков с высокой концентрацией дефектов является туннелирование носителей заряда между локализованными состояниями (энергетическими уровнями ловушек) в запрещенной зоне SiO₂ [2]. При этом увеличение концентрации локализованных состояний приводит к увеличению проводимости имплантированных слоев [2]. Путем аппроксимации ВАХ линейными зависимостями в диапазоне токов 10⁻⁴–10⁻² мА см⁻² установлено, что проводимость имплантированных слоев

увеличивается от 1.2×10⁻¹² до 11×10⁻¹² Ом⁻¹ см⁻¹ с увеличением дозы имплантации от 2.5×10¹⁶ до 1×10¹⁷ см⁻². Проводимость исходного SiO₂ составляет 0.26×10⁻¹² Ом⁻¹ см⁻¹.

Увеличение проводимости имплантированных слоев с увеличением дозы имплантации сопровождается уменьшением способности диэлектрических слоев захватывать и удерживать носители заряда. Это можно объяснить тем, что при увеличении концентрации ловушек расстояние между ними становится настолько мало, что носители заряда могут туннелировать между ними без выхода в разрешенную зону. При этом механизм переноса носителей заряда путем туннелирования между ловушками начинает преобладать над механизмом захвата носителей.

Заключение

Исследовано влияние дозы имплантации на электрофизические свойства слоев SiO₂, имплантированных ионами олова с энергией 80 кэВ и дозами 1×10¹⁷, 5×10¹⁶ и 2.5×10¹⁶ см⁻², прошедших термообработку при 900 °С. Установлено, что увеличение дозы имплантации с 2.5×10¹⁶ до 1×10¹⁷ см⁻² приводит к увеличению проводимости в 9 раз и уменьшению доли захваченных на ловушки носителей заряда в 1.5 раза. Это объясняется тем, что при увеличении дозы имплантации механизм туннелирования между ловушками начинает преобладать над механизмом захвата носителей заряда.

Библиографические ссылки

- Romanov I., Komarov F., Parkhomenko I., Vlasukova L., Makhavikou M., Milchanin O., Neethling J. Fluence effect on photo-and electroluminescence of silica layers implanted with Sn⁺ ions. *Materials Letters* 2022; 308: 131070 (9 p.).
- Насыров К. А., Гриценко В. А. Механизмы переноса электронов и дырок в диэлектрических плёнках. *Успехи физических наук* 2013; 183(10): 1099-1114.
- Arnold D., Cartier E., DiMaria D. J. Theory of high-field electron transport and impact ionization in silicon dioxide. *Physical Review B* 1994; 49(15):10278-10297.