# МЕХАНИЗМ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОВОДИМОСТИ ПЛЕНОК SiO<sub>2</sub>, ИМПЛАНТИРОВАННЫХ БОЛЬШИМИ ДОЗАМИ ИОНОВ In<sup>+</sup> И Sb<sup>+</sup>

А.К. Федотов<sup>1)</sup>, И.Е. Тысченко<sup>2)</sup>, В.Ю. Слабухо<sup>1), 3)</sup>, Ю.А. Федотова<sup>1)</sup> <sup>1)</sup>Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, ул. Бобруйская 11, Минск 220006, Беларусь, akf1942@gmail.com, julia@hep.by <sup>2)</sup>Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, пр. Лаврентьеа 13, Новосибирск 630090, Россия, tys@isp.nsc.ru <sup>3)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, vvs.4550817@gmail.com

Исследованы поперечные вольт-амперные характеристики (ВАХ) структур металл-диэлектрикполупроводник (МДП) на основе пленок SiO<sub>2</sub>, имплантированных ионами In<sup>+</sup> и Sb<sup>+</sup> до и после отжига при температурах 800 и 1100 °C. Вольт-амперные характеристики исследовались как функция электрического поля в диапазоне от  $3 \times 10^6$  до  $7 \times 10^7$  В/м и температуры в интервале 2-300 К. Установлено, что при температурах < 40 К и полях  $E \le 1 \times 10^7$  В/м ВАХ описываются в рамках модели токов ограниченных пространственным зарядом Мотта-Гурни для моноэнергетических ловушек. При температурах > 40 К и полях >  $1 \times 10^7$  В/м ВАХ описываются в рамках усовершенствованной модели токов, ограниченных пространственным зарядом Марка-Хельфриха с экспоненциальным распределением ловушек по энергиям. С ростом температуры отжига энергетический интервал локализованных состояний на хвостах распределения плотности состояний, занятых носителями заряда, увеличивается. Полученные результаты обсуждаются с точки зрения эволюции структурных свойств имплантированных ионами пленок SiO<sub>2</sub>.

Ключевые слова: ионная имплантация; SiO<sub>2</sub>; InSb; нанокристаллы; BAX; перенос зарядов.

## ELECTRONIC CONDUCTIVITY MECHANISM OF SiO<sub>2</sub> FILMS IMPLANTED WITH HIGH DOSES OF In<sup>+</sup> AND Sb<sup>+</sup> IONS

A.K. Fedotov<sup>1)</sup>, I.E. Tyschenko<sup>2)</sup>, V.Yu. Slabukha<sup>1),3)</sup>, J.A. Fedotova<sup>1)</sup>
<sup>1)</sup>Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University,
11 Bobruiskaya Str., 220006 Minsk, Belarus, akf1942@gmail.com, julia@hep.by
<sup>2)</sup>A.V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics,
13 Lavrentyev Ave., 630090 Novosibirsk, Russia, tys@isp.nsc.ru
<sup>3)</sup>Belarusian State University,
4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, vs.4550817@gmail.com

InSb nanocrystals were produced in the 280 nm thick SiO<sub>2</sub> layers by the Sb<sup>+</sup>- and In<sup>+</sup>-ion implantation at the ion energy of 200 keV and doses 8.0×0<sup>15</sup> cm<sup>-2</sup>. P-type (100)-oriented Si wafers were used as substrates. The used ion implantation parameters allowed to form Gauss-like In and Sb atom distributions with the peak concentrations  $\sim 1.2 \times 10^{21}$  cm<sup>-3</sup> at a depth of about 110 nm below the top of SiO<sub>2</sub> surface. Before the subsequent annealing, the 600 nm thick Si layer was transferred onto the ion-implanted SiO<sub>2</sub> layer. Then the wafers were cut into small pieces, which were heat-treated at the temperature of 800 or 1100 °C for 30 min in the N<sub>2</sub> ambient. Before the electric measurements, the top silicon layer was removed. Metal-oxide-semiconductor (MOS) structures were produced on the samples before and after annealing. Transverse current-voltage (I-V) characteristics were measured as a function of the electric field in the range from  $3 \times 10^6$  to  $7 \times 10^7$  V/m and temperature in the range 2-300 K. It was established that at temperatures <40 K and fields  $E \le 1 \times 10^7$  V/m, the I-V characteristics are described within the framework of the Mott-Gurney model corresponded to currents limited by space charge localized at monoenergetic traps. At temperatures > 40 K and fields  $>1 \times 10^7$  V/m, the I-V characteristics are described within the framework of the Mark-Helfrich model developed for currents limited by space charges localized at the exponential energy distributed trap levels. As the annealing temperature was grown from 800 to 1100 °C, the energy range of the states localized at the distribution tails and occupied by charge carriers, increased. The results obtained are discussed in the frame of the structural evolution in the ion implanted SiO<sub>2</sub> films.

Keywords: ion implantation; SiO<sub>2</sub>; InSb; nanocrystals; I-V-characteristics; carrier transfer.

<sup>15-</sup>я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 26-29 сентября 2023 г., Минск, Беларусь 15th International Conference "Interaction of Radiation with Solids", September 26-29, 2023, Minsk, Belarus

### Введение

Оксид кремния является основным диэлектриком существующей кремниевой электроники, благодаря целому ряду его замечательных свойств, главными из которых являются низкая плотность состояний на границе раздела Si/SiO2, как следствие, низкая плотность встроенных зарядов, а также его высокая термическая стабильность. Однако SiO2 обладает низкой диэлектрической проницаемостью (3.9), что сильно ограничивает его использование при уменьшении размеров активных областей элементов интегральных схем до единиц нанометров. Поэтому модифицирование диэлектрических свойств оксида кремния рассматривается как одна из важных задач. В литературе одним из таких методов модифицирования электрических свойств SiO<sub>2</sub> рассматривается внедрения наночастиц материалов с высокой диэлектрической постоянной. В настоящей работе изучены процессы переноса носителей зарядов в пленках SiO<sub>2</sub> с нанокристаллами InSb, созданными методом ионно-лучевого синтеза и отжига.

### Методика эксперимента

Пленки SiO<sub>2</sub> толщиной 280 нм были термически выращены на подложках монокристаллического кремния диаметром 100 мм р-типа проводимости с ориентацией (100). Имплантация проводилась ионами Sb<sup>+</sup> и In<sup>+</sup> с энергией 200 кэВ дозами 8.0×0<sup>15</sup> см<sup>-2</sup>. Использованные параметры ионов создавали профили атомов в форме распределения Гаусса с концентрацией в максимуме ~1.2×10<sup>21</sup> см<sup>-3</sup> на глубине ~110 нм от поверхности SiO2. С целью предотвращения испарения In из пленки на имплантированный SiO<sub>2</sub> перед отжигом методом водородного переноса был перенесен слой кремния толщиной около 600 нм. Постимплантационный отжиг сформированных структур кремний-на-изоляторе проводился при температурах 800 и 1100 °С в течение 30 мин в парах азота. В результате отжига в пленке захороненного SiO<sub>2</sub> были сформированы наночастицы InSb, структура и геометрические параметры которых зависели от температуры отжига [1, 2]. Затем слой верхнего кремния удалялся химическим травлением в кипящем водном растворе аммиака.

С целью изучения механизма переноса зарядов через SiO<sub>2</sub> с нанокристаллами InSb после удаления слоя кремния были изготовлены структуры металлдиэлектрик-полупроводник (МДП) путем приваривания искровой сваркой алюминиевой фольги толщиной 50 мкм с обеих сторон образца. Затем к слоям Al с помощью ультразвуковой пайки индия были прикреплены медные проволокиконтакты. Поперечные вольт - амперные характеристики (ВАХ) были измерены в зависимости от величины электрического поля в диапазоне от  $3 \times 10^6$  до  $7 \times 10^7$  В/м при температурах 2 – 300 К.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены зависимости тока в МДП структуре от величины электрического поля j(E) при прямом смещении на структуре, измеренные при температурах 40 – 300 К. Соответствующие зависимости были получены и для обратных ВАХ. Из рисунка видно, что ВАХ имеют два участка с разными наклонами. В области полей  $E < 1 \times 10^7$  В/м зависимость тока от величины электрического поля имеет практически линейный характер во всем температурном интервале и соответствует омическому закону.

В области полей >1×10<sup>7</sup> В/м эта зависимость становится более резкой и зависит от температуры измерений Т. Для Т < 40 К ВАХ в координатах j(E) является квадратичной функцией и соответствует идеальной модели токов, ограниченных объемным зарядом, Мотта-Гурни для моноэнергетических ловушек:

$$j = n e \mu E + \frac{9 \varepsilon \varepsilon_0 \mu E^2}{8d}$$
(1)

где n – концентрация равновесных свободных носителей заряда,  $\mu$  - подвижность,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона,

<sup>15-</sup>я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 26-29 сентября 2023 г., Минск, Беларусь 15th International Conference "Interaction of Radiation with Solids", September 26-29, 2023, Minsk, Belarus

 $\varepsilon_{0}=8.85\cdot10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая постоянная,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика, d – толщина слоя диэлектрика.



Рис. 1. Зависимость тока от величины электрического поля при прямом смещении МДП структур, созданных на основе имплантированных пленок SiO<sub>2</sub> до (а) и после отжига при температуре 800 °C (б) и 1100 °C (в). Температура измерения ВАХ: 1 – 40, 2 – 50, 3 – 75, 4 – 100, 5 – 150, 6 – 200, 7 – 250, 8 – 300

При температурах выше 40 К и Е > 1×10<sup>7</sup> В/м ВАХ становятся более резкими и описываются в рамках модели Марка-Хельфриха, которая учитывает ловушки носителей зарядов с экспоненциально распределенной плотностью состояний по энергии:

$$j(E) = e\mu N_C \left[ \frac{\varepsilon \varepsilon_o m}{eN_t(m+1)} \right] \left[ \frac{2m+1}{m+1} \right] \frac{E^m}{d^{2m'}},$$
 (2)

где N<sub>C</sub> и N<sub>t</sub> - эффективная плотность состояний в разрешенной зоне и концентрация ловушек в хвосте зоны соответственно, а показатель степени  $m = E_{ch}/kT$  связан с энергетической шириной занятых носителями локализованных состояний на экспоненциальном хвосте зоны. Было установлено, что значение *m* увеличивается с ростом температуры отжига. Если после отжига образцов при температуре 800 °С величина *т* при разных температурах измерения находилась в интервале от 3.4 до 6.7, то после отжига при температуре 1100 <sup>о</sup>С ее значение составляет 5.2 – 8.7. Этот эффект может быть объяснен с точки зрения изменения в пленке SiO<sub>2</sub> в процессе при имплантации отжига внесенных структурных нарушений.

#### Заключение

Установлено, что механизм транспорта носителей зарядов в пленках SiO<sub>2</sub>, имплантированных ионами In<sup>+</sup> и Sb<sup>+</sup> описывается моделью токов, ограниченных пространственным зарядом. Показано, что при T < 40 К проводимость в пленках определяется моноэнергетическими ловушками носителей зарядов, а при T > 40 К и E > 10<sup>7</sup> В/м перенос носителей зарядов лимитируется ловушками с экспоненциально распределенной по энергии плотностью состояний. Обнаружено, что энергетический интервал локализованных состояний растет с ростом температуры отжига имплантированных пленок SiO<sub>2</sub>.

#### Библиографические ссылки

- 1. Tyschenko I.E., Voelskow M., Cherkov A.G., Popov V.P. Ion-beam synthesis of InSb nanocrystals in the buried SiO<sub>2</sub> layer of a silicon-on-insulator structure. *Semiconductors* 2014; 48(9): 1228-1233.
- Zukowski P., Koltunowicz T.N., Czarnacka K., Fedotov A.K., Tyschenko I.E. Carrier transport and dielectric permittivity of SiO<sub>2</sub> films containing ionbeam synthesized InSb nanocrystals. *Journal of Alloys and Compounds* 2020; 846: 156482.

<sup>15-</sup>я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 26-29 сентября 2023 г., Минск, Беларусь 15th International Conference "Interaction of Radiation with Solids", September 26-29, 2023, Minsk, Belarus