

Свойства проводящего канала в тонких пленках субоксида кремния

© П.С. Захаров, В.С. Зайончковский, Е.Б. Баскаков

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Калуга, 248600, Россия

Проведен анализ вольт-амперных характеристик МДП-структур для различных температур. Основное внимание уделено проводящему каналу в матрице нестехиометрического оксида кремния. С помощью построения графиков в различных координатах установлено, что лимитирующим механизмом проводимости является эффект Шоттки. Температурная зависимость тока для заданного напряжения позволила определить величину энергетического барьера 0,12 эВ. Показано, что увеличение температуры образца на 200К приводит к значительному снижению эффективной диэлектрической проницаемости материала проводящего канала, что позволяет говорить о дипольной поляризации вещества. Такое поведение может быть обусловлено высоким содержанием заряженных дефектов в матрице нестехиометрического оксида, которые представляют собой трехкоординированные атомы кремния, обладающие большей способностью к ориентации в электрическом поле, чем четырехкоординированные.

Ключевые слова: МДП-структура, нестехиометрический оксид кремния, эффект Шоттки, относительная диэлектрическая проницаемость.

Введение. Флэш-память является сегодня наиболее ярким представителем энергонезависимых постоянных запоминающих устройств. Принцип ее работы основан на хранении электрического заряда в «плавающем» затворе МДП-транзистора. Однако такой метод неизбежно приводит к деградации подзатворного диэлектрика, его износу вследствие инъекции «горячих» носителей в «плавающий» затвор [1].

В работах [2, 3] показано, что эффект обратимого переключения проводимости в тонких (< 100 нм) пленках оксида кремния может лежать в основе альтернативного способа хранения информации. Однако существующие представления о механизмах изменения сопротивления диэлектрических пленок довольно скудны: высказываются предположения об образовании проводящих каналов нанокристаллического кремния [4], фазового распада вследствие миграции кислородных вакансий [5].

В настоящей работе предпринята попытка описать свойства проводящих каналов в тонких пленках нестехиометрического оксида кремния на основе анализа вольт-амперных характеристик (ВАХ), представленных в работе [6].

Методика изготовления образцов. В работе [6] использовались образцы в виде МДП-структур (рис. 1). Диэлектрическая пленка — нестехиометрический оксид кремния с 11% ат. избыточного кремния толщиной 37 нм — осаждалась совместным магнетронным распылением мишеней Si и SiO₂ в плазме аргона на кремниевые подложки *p*-типа.

Верхний проводящий слой — оксид индия и олова (ИТО) — осажден при комнатной температуре с целью исключения фазового распада термодинамически неустойчивого диэлектрика. Методами фотолитографии сформированы верхние контакты размером 125×125 мкм².

Анализ вольт-амперных характеристик. Проанализированы ВАХ структуры в низкоомном состоянии при различных температурах — 373, 403, 423, 473 К и комнатной. Из рис. 2 экстрагированы численные

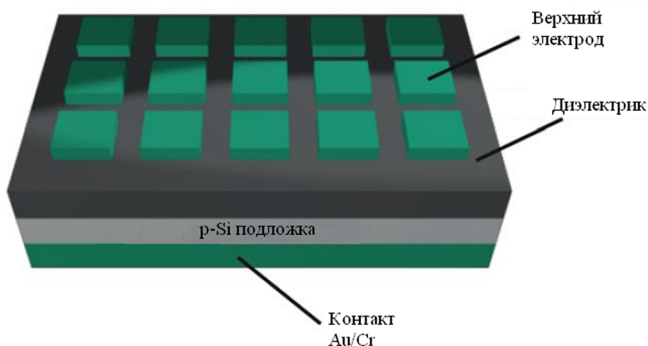


Рис. 2. Исходные ВАХ [6]

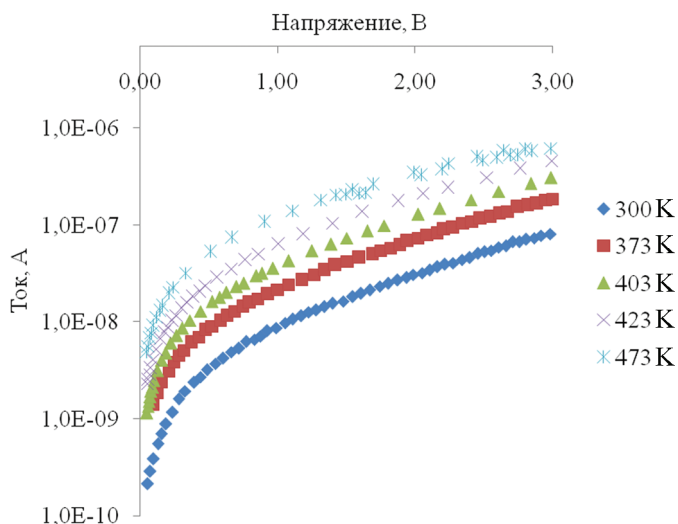


Рис. 1. Исследуемая структура [6]

значения семейства графиков с помощью программы GetData Graph Digitizer 2.24. Удовлетворительно кривые линейризуются в координатах Шоттки (рис. 3) по методу наименьших квадратов с достоверностью аппроксимации $R^2 > 0,9861$ для напряжений $U > 0,64$ В.

Известно [7], что плотность тока, протекающего согласно механизму термоэлектронной эмиссии Шоттки, вычисляется по формуле:

$$j_s = AT^2 \exp\left(-\frac{e(\varphi - \beta_s \sqrt{E})}{kT}\right). \quad (1)$$

Тогда наклон графика в координатах $\ln J \sim U^{1/2}$ определяется выражением:

$$S = \beta \frac{e}{kT\sqrt{d}}, \quad (2)$$

где

$$\beta = \sqrt{\frac{e}{4\pi\epsilon\epsilon_0}}. \quad (3)$$

В формулах (1)–(3) T — температура, К; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — элементарный заряд; φ — потенциальный барьер Шоттки, эВ; E — напряженность электрического поля, В/м; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; $d = 3,7 \cdot 10^{-8}$ м — толщина диэлектрика; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — диэлектрическая проницаемость вакуума; A — константа, слабо зависящая от температуры; ϵ — высокочастотная относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Из соотношения (3) легко определить эффективную высокочастотную диэлектрическую проницаемость материала проводящего канала для диапазона температур от 300 до 473 К (рис. 4).

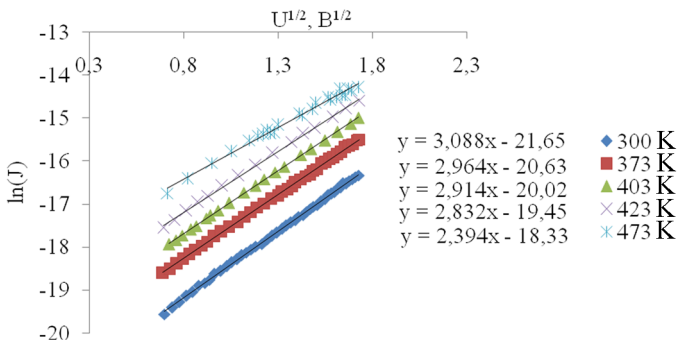


Рис. 3. Аппроксимация ВАХ в координатах Шоттки

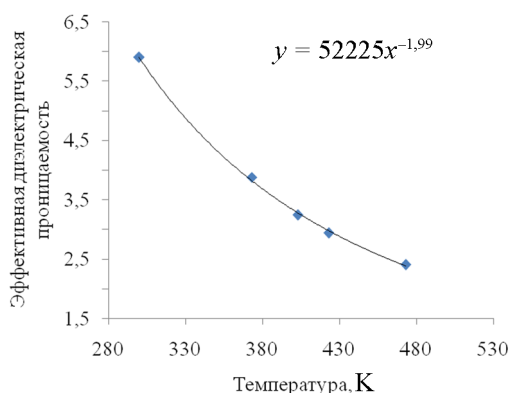


Рис. 4. Температурная зависимость эффективной высокочастотной относительной диэлектрической проницаемости материала проводящего канала

Существенное уменьшение ϵ материала (более чем в два раза) на температурном интервале 200 К указывает, что наряду с электронной есть (и играет важнейшую роль) дипольная поляризуемость. Зависимость от температуры в степени ≈ -2 (рис. 4) очевидно обусловлена тем, что концентрация диполей обратно пропорциональна температуре.

Таким образом, маловероятно, что роль проводящего канала играет кремниевая нить в диэлектрике, связывающая два электрода.

Известно [8], что в оксиде кремния существуют E^1 - и P_V -центры, первый из которых — отрицательно заряженная релаксирующая кислородная вакансия, а второй — трехкоординированный атом кремния с неспаренным электроном. При этом E^1 -центр ведет себя как положительно заряженная электронная ловушка. Предполагается, что эти трехвалентные дефекты, вероятность существования которых повышается в нестехиометрическом оксиде кремния, имеют большую способность к ориентации в электрическом поле, чем четырехкоординированные атомы, и обуславливают наблюдаемую температурную зависимость ϵ (рис. 4).

Из уравнения (1) видно, что, строя зависимость $\ln(J/T^2)$ от $1/T$, где J — полный ток через структуру, по углу наклона графика можно определить ϕ . Удачным обстоятельством является хорошая аппроксимация показателя преломления $n = \epsilon^{1/2}$ гиперболической функцией. Использование данного приближения в формулах (1) и (3) позволяет говорить, что модуль угла наклона графика равен величине потенциального барьера.

Для фиксированного напряжения на структуре 0,8 В, 1,0 В и 1,2 В построены вышеуказанные зависимости и представлены на рис. 5. Усреднив три угла наклона, получим $\phi_{cp} = 0,12$ эВ.

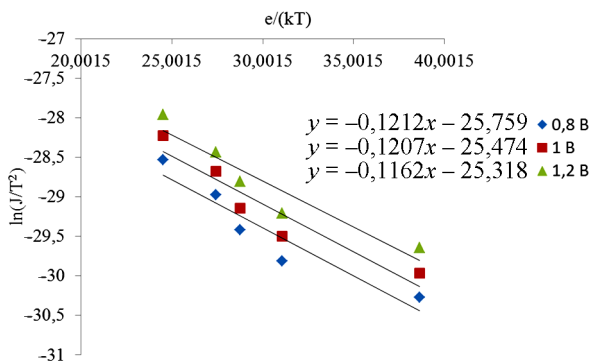


Рис. 5. Линейная аппроксимация температурной зависимости ВАХ для определения высоты энергетического барьера

Выводы. Аппроксимация семейства вольт-амперных характеристик, полученных при различных температурах структуры ИТО— SiO_x —Si, показывает, что доминирующим механизмом проводимости в низкоомном состоянии является эффект Шоттки с величиной энергетического барьера 0,12 эВ.

Низкая стехиометрия пленки оксида кремния обладает повышенным содержанием трехкоординированных атомов кремния (P_V -центр) и кислородных вакансий, которые релаксируют до образования E^1 -центров. Последние, проявляя свойства положительно заряженных электронных ловушек и обладая повышенной способностью к ориентации в электрическом поле, вероятно, вызывают дипольную поляризацию низкоомного канала, что наблюдается в сильной зависимости эффективной высокочастотной относительной диэлектрической проницаемости. Роль проводящего канала играет скорее цепь трехвалентных дефектов, нежели непрерывный кремниевый канал.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Зи С.М. *Физика полупроводниковых приборов: Кн. 1.* Сурис Р.А., ред. Москва, Мир, 1984, 456 с.
- [2] Зеерер К. *Физика полупроводников.* Москва, Мир, 1977, 606 с.
- [3] Jun Yao, Lin Zhong, Douglas Natelson, and James M. Tour. Etching-dependent reproducible memory switching in vertical SiO_2 structures. *Appl. Phys. Letters*, 2008, 93, 253101.
- [4] *Electronic devices containing switchably conductive silicon oxides as a switching element and methods for production and use thereof.* Patent application number: 20110038196. United States Patent Application Publication, Feb. 17, 2011.
- [5] Sarikov A., Litovchenko V., Lisovsky I., Maidanchuk I. and Zlobin S., *Appl. Phys. Letters*, 91(13), 133109 (2007).
- [6] Mehonic A. et al. Resistive switching in silicon suboxide films. *J. of Appl. Phys.*, 111, 074507 (2012).

- [7] Simmons J.G. Poole-Frenkel effect and Schottky effect in metal-insulator-metal systems. *Phys. Rev*, 1967, N 155(3), pp. 657–660.
- [8] Красников Г.Я., Зайцев Н.А. Система кремний — диоксид кремния в субмикронных СБИС. Москва, Техносфера, 2003, 384 с.

Статья поступила в редакцию 16.07.2013.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Захаров П.С., Зайончковский В.С., Баскаков В.С. Свойства проводящего канала в тонких пленках субоксида кремния. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/nano/hidden/797.html>

Захаров Павел Сергеевич окончил КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2013 г. по специальности «Микроэлектроника и твердотельная электроника», аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: магнетронное распыление материалов, переключение проводимости в тонких пленках оксида кремния. e-mail: pashache89@mail.ru

Зайончковский Вячеслав Станиславович окончил Харьковский авиационный институт в 1972 г. Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Материаловедение» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: технология изготовления интегральных схем, физика твердого тела. e-mail: vz48@post.ru

Баскаков Евгений Борисович — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: вакуумное напыление магнитных и углеродных покрытий. e-mail: baskak92@gmail.com