

В результате проведенных исследований установлены основные закономерности электронного переноса в аморфных углеродных пленках графитоподобной структуры. Анализ вольт-амперных характеристик показал, что перенос носителей заряда определяется локализованными состояниями в запрещенной зоне, которые тесно связаны со структурой углеродной сети и наличием дефектов в ней. Отсутствие гистерезиса на ВАХ указывает на стабильность электрических свойств исследуемых структур. Полученные результаты могут быть использованы при разработке электронных устройств на основе аморфных углеродных пленок, что подтверждает практическую значимость проведенных исследований.

#### Литература

1. Electrical transport and morphological study of PLD-grown nanostructured amorphous carbon thin films / K. M. Kant [et al.] // *Nanotechnology*. – 2006. – Vol. 17, N 20. – P. 5244.
2. Konofaos, N. Effect of the layered structure on the electronic properties of amorphous carbon films on n-Si / N. Konofaos, E. Evangelou, S. Logothetidis // *Journal of Applied Physics*. – 1999. – Vol. 86. – P. 4446–4451.
3. The effects of hydrogenation on the properties of ion beam sputter deposited amorphous carbon / F. Jansen [et al.] // *J. Vac. Sci. Technol. A*. – 1985. – Vol. 3. – P. 605–609.

### ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПРОВОДИМОСТИ АНОДНЫХ ПЛЕНОК $\text{TiO}_2$ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Д. А. Коваленко, М. А. Буневич, И. А. Врублевский

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск*

*Изучены электрические свойства тонких пленок  $\text{TiO}$ , полученных методом электрохимического окисления. Проведено исследование вольт-амперных характеристик пленок в диапазоне температур 263–300 К. Выявлен механизм токов ограниченного пространственного заряда для проводимости тонких пленок. Определена асимметрия ВАХ при прямом и обратном включениях.*

**Ключевые слова:** диоксид титана, электрохимическое окисление, токи ограниченного пространственного заряда, вольт-амперные характеристики, полупроводниковые свойства.

### INVESTIGATION OF CONDUCTIVITY MECHANISMS IN ANODIC $\text{TiO}_2$ FILMS AT LOW TEMPERATURES

D. A. Kovalenko, M. A. Bunevich, I. A. Vrublevsky

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk*

*The electrical properties of  $\text{TiO}$  thin films obtained by electrochemical oxidation method have been studied. An investigation of current-voltage characteristics of the films was conducted in the temperature range of 263–300 K. A space charge limited current mechanism for the conductivity of thin films was identified. Asymmetry of  $I$ – $V$  characteristics under forward and reverse bias conditions was determined.*

**Keywords:** titanium dioxide, electrochemical oxidation, space charge limited currents, current-voltage characteristics, semiconductor properties.

Пленки  $\text{TiO}_2$  в настоящее время находят применение в солнечных ячейках в качестве  $n$ -типа транспортного слоя, в детекторах УФ излучения, самоочищающих покрытиях и в фотокатализе. Во многих из применений используются электропрово-

дющие свойства  $TiO_2$ , хотя проводимость в этих случаях и не определяется его собственными свойствами.

В работе пленки Al толщиной 100 нм и Ti толщиной 50 нм наносились на подложки из стекла методом магнетронного распыления в среде аргона. Перед процессом вакуумного нанесения подготовленные образцы подвергались химической обработке, а затем промывались дистиллированной водой и сушились в эксикаторе при 60 °С. Для формирования анодной пленки использовалось электрохимическое окисление Ti в электролите на основе смеси 2%-ного водного раствора щавелевой кислоты и 1%-ного водного раствора сульфаминовой кислоты.

Используя саморегулирующийся процесс анодного окисления Ti при потенциостатическом режиме, путем выбора напряжения анодирования задавали толщину образующейся анодной пленки  $TiO_2$ . Электрохимическое окисление Ti проводилось в электролите при напряжении 10 В и последующей выдержкой до полного спада тока анодирования. По результатам измерений методом эллипсометрии установлено, что толщина анодного оксида  $TiO_2$  составляла 14 нм. После электрохимического окисления пленок Ti проводился отжиг образцов с полученными пленками оксида титана при температуре 140 °С.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) образцов, помещенных на держатель оптического проточного азотного криостата со стабилизацией температуры, измерялись на постоянном токе в атмосфере азота в интервале температур  $T = 263\text{--}300$  К с шагом 10 К с использованием автоматизированной измерительной установки на основе пикоамперметра. Напряжение варьировалось с переменным шагом в пределах от  $-0,5$  до  $+0,5$  В. Электрические контакты к образцам изготавливались с использованием серебряной проволоки, которая крепилась к металлическим электродам углеродной или серебряной пастой (SPI).

Определить основной механизм проводимости можно с помощью построения ВАХ в координатах, позволяющих выделить линейные участки, которые соответствуют определенному механизму проводимости. На рисунке показаны ВАХ образца в обычных и в двойных логарифмических координатах. Как видно из рис. 1, ВАХ сильно зависит от температуры, что характерно для токов ограниченного пространственного заряда (ТОПЗ), так как степень заполнения ловушек зависит от температуры.

Для пленок  $TiO_2$  следует учитывать, что при малых напряжениях плотность инжектированных свободных зарядов меньше плотности свободных носителей заряда и поэтому преобладает закон Ома. Следовательно, вблизи точки с нулевым смещением имеет место омическая проводимость. Поэтому для проведения анализа использовалось напряжения со значением выше 0,06 В. Можно видеть, в логарифмическом масштабе экспериментальные точки хорошо аппроксимируются линейной функцией. Такое поведение зависимости тока от напряжения смещения характерно для токов ограниченного пространственного заряда (ТОПЗ). Следовательно, механизм проводимости на этом участке определяется ТОПЗ. ВАХ на этом участке описывается степенной зависимостью тока от напряжения  $J \propto U^m$  со значениями  $m$  равными 1,24, 1,34 и 1,52 (положительная область) и 1,21, 1,33 и 1,47 (отрицательная область) для температуры образца 298, 283 и 263 К соответственно.

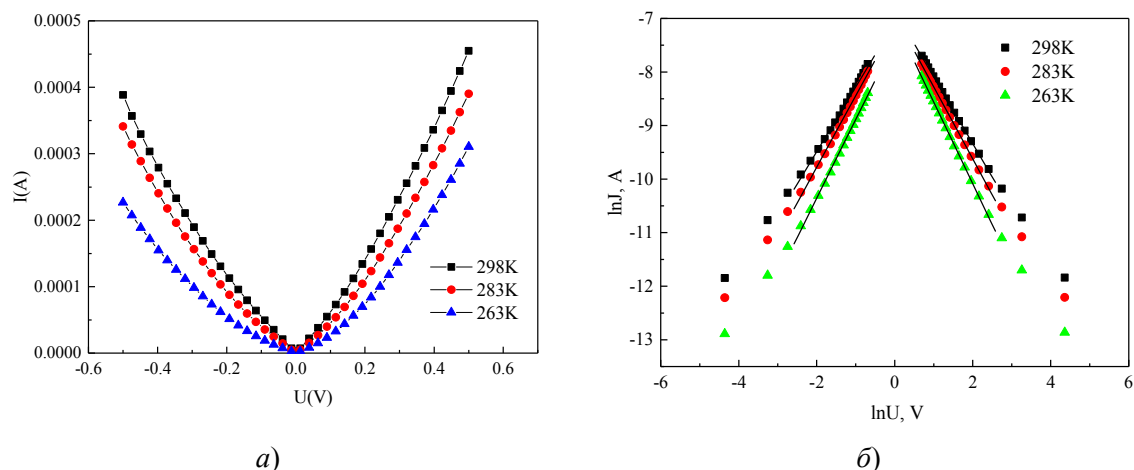


Рис. 1. ВАХ анодной пленки  $\text{TiO}_2$  (14 нм) в прямом и обратном включении в обычных (а) и в двойных логарифмических координатах (б). Температура образца: 298, 283, и 263 К, максимальное напряжение 0,5 В

Полученные данные для различных температур показали, что ВАХ анодной пленки  $\text{TiO}_2$  имеют сложное поведение. ВАХ в прямом (отрицательный потенциал на  $\text{Ti}$  электроде) и обратном (положительный потенциал на  $\text{Ti}$  электроде) включении пленочной структуры не являются симметричными, хотя наблюдаемая асимметрия проводимости является незначительной. Проведенный анализ механизмов проводимости показал, что анодный оксид  $\text{TiO}_2$  является полупроводником n-типа, в запрещенной зоне которого имеются как электронные ловушки, так и донорные центры, образованные анионными (кислородными) вакансиями.

#### Литература

1. Electronic Properties at the Junction Interfaces between Anodic Titanium Oxide Films and Conducting Polymers / T. Ogawa [et al.] // Faculty of Engineering, Chiba University. – 2004. – P. 1–33.
2. Tunable rapid electron transport in titanium oxide thin films / R. Li. [et al.] // Applied Physics Letters. – 2023. – Vol. 122. – P. 011601.

## СИСТЕМА МОНИТОРИНГА АВТОМОБИЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ С ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ СИГНАЛОВ НА БАЗЕ ESP32

Т. Н. Дворникова, В. А. Юревич

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск

Представлена система мониторинга автомобильной безопасности с цифровой обработкой сигналов на базе микроконтроллера ESP32-WROOM-32. Система обеспечивает детектирование дорожно-транспортных происшествий с высокой точностью и минимальной задержкой реакции, соответствующей требованиям международных стандартов. В ходе исследования были разработаны алгоритмы обработки данных с использованием адаптивного медианного фильтра и механизма перекрестной проверки сенсоров, что позволило достичь времени реакции не более 5 мс и снизить частоту ложных срабатываний до 0,8 раза в час. Полученные результаты подтверждают эффективность разработанного решения для повышения уровня безопасности дорожного движения.

**Ключевые слова:** система мониторинга, автомобильная безопасность, цифровая обработка сигналов, ESP32, IMU, адаптивный фильтр, ложные срабатывания.