

Сопrotивление гибридной пленки, полученной из суспензии, смешанной в соотношении 5 мл ОУНТ:10 мл WS₂-НТ, составило $R(300\text{ K}) \sim 2,5\text{ кОм}$, $R(4\text{ K}) \sim 1\text{ МОм}$.

В результате анализа импеданса гибридных пленок было установлено, что при увеличении содержания неорганической компоненты наблюдается увеличение как активной, так и реактивной (емкостной, связанной с влиянием контактных барьеров между проводящими углеродными нанотрубками) части комплексного сопротивления. Было установлено, что при низких температурах комплексный импеданс гибридных пленок ОУНТ/WS₂-НТ аппроксимируется при помощи параллельной эквивалентной схемы замещения, как видно из рисунка.

Таким образом, нами получены гибридные пленки из ОУНТ и многослойных нанотрубок WS₂ с различным соотношением углеродной и неорганической компонент в них. Обнаружено, что при возрастании содержания углеродных нанотрубок в гибридных пленках наблюдается уменьшение температурного коэффициента сопротивления и вклада емкостной компоненты в импеданс пленок. Показанная возможность создания гибридных пленок с управляемо варьируемым содержанием в них органической и неорганической компонент может быть использована при создании структур, характеризующихся различными коэффициентами пропускания и поглощения электромагнитного излучения в СВЧ- и терагерцовом диапазоне частот.

1. Zak A., Sallacan-Ecker L., Efrati R. L. [et al.] // Sens. Transducers J. Large-scale synthesis of WS₂ multiwall nanotubes: 2011. 12:1–10.

2. Zak A., Sallacan-Ecker L., Margolin A., M. [et al.]. Insight into the growth mechanism of WS₂ nanotubes in the scaled-up fluidized-bed reactor // NANO. 2009. 04. 91.

3. Ksenevich V. K., Gorbachuk N. I., Viet Ho [et al.]. Electrical properties of carbon nanotubes/WS₂ nanotubes (nanoparticles) hybrid films // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. 2016. 7. 37.

ЛОКАЛЬНЫЙ РАЗОГРЕВ НАНОРАЗМЕРНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ В ПРОЦЕССЕ ЕГО АНОДНОГО РОСТА

С. К. Лазарук, В. В. Дудич, Д. Н. Завальный, Д. А. Циркунов,
А. А. Лешок, В. Б. Высоцкий, В. Е. Борисенко

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Беларусь, e-mail: serg@nano.bsuir.edu.by*

С целью формирования новых наноразмерных материалов активно используется электрохимическое анодное окисление вентильных металлов [1]. Такой способ отличается простотой реализации и большой вариативностью. В частности, за счет выбора состава электролита и электрических режимов процесса (напряжения и плотности тока) можно формировать требуемые наноструктуры с размером элементов от единиц до сотен и более нанометров. Важным параметром, влияющим на протекание анодного процесса, является температура

электролита и температура внутри растущей пленки, так как она влияет на характер и интенсивность химических процессов при анодировании. Контроль температуры анодной пленки реализовать сложно ввиду малых размеров. Для измерения температуры в таких случаях использовались не прямые методы, такие как инфракрасная эмиссия [2, 3], использование терморезистора [3, 4] либо термопары, расположенной рядом с растущей пленкой [5]. Точность данных методов мала из-за отсутствия непосредственного контакта с исследуемой структурой. В ряде работ были предприняты попытки оценить локальную температуру внутри растущих оксидов [3–5].

В данной работе предложен метод контроля температуры растущего оксида алюминия, основанный на измерении электрического сопротивления анодируемой алюминиевой фольги. Непосредственный контакт алюминия и его оксида обеспечивает высокую точность при определении средней температуры растущей пленки.

В качестве исходных образцов использовали алюминиевую фольгу толщиной 10 мкм. Фольгу разрезали для получения лент длиной 30 см и шириной 0,3 см. Контакт анода располагался в середине алюминиевой ленты между контактами омметра, которые находились по краям исследуемого образца. В качестве электролитов использовали 2 %-ные растворы лимонной кислоты в воде либо в этаноле. Процесс проводили в гальваностатическом режиме при плотности анодного тока 50 мА/см^2 . В процессе анодирования измеряли сопротивление алюминиевого анода и значение анодного напряжения.

Измерения показали, что во время анодного процесса сопротивление исследуемых образцов может увеличиваться в несколько раз. При этом после остановки анодного процесса сопротивление исследуемых образцов всегда возвращалось к исходной величине R_0 . На рис. 1 представлены зависимости изменения сопротивления исследуемых образцов во время анодного процесса от потребляемой электрической мощности. Представленные зависимости могут быть объяснены увеличением температуры исследуемых образцов во время анодного процесса. Увеличение разброса экспериментальных данных для высоких значений мощности объясняется погрешностью их регистрации. Поэтому эксперимент проводили многократно, а получаемые данные подвергали статистической обработке.

В то время, как увеличение температуры электролита в электрохимической ячейке во время процесса анодирования не превышало 1° , увеличение температуры алюминиевой фольги, подвергаемой анодному окислению, достигало нескольких сотен градусов. На рис. 2 представлена зависимость температуры алюминиевой фольги, подвергаемой анодному окислению, от удельной мощности, потребляемой во время анодного процесса для различных электролитов.

Из рис. 2 видно, что при увеличении количества тепла, выделяющегося во время анодного процесса в растущем оксиде, температура алюминия увеличивается первоначально линейно, но при высоких значениях мощности в даль-

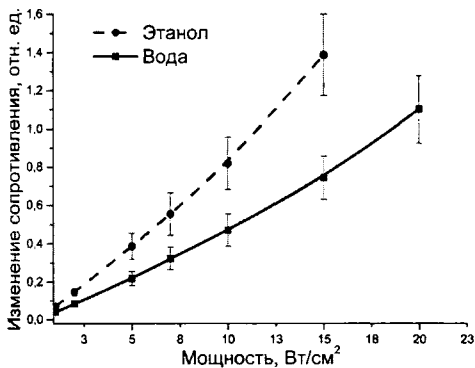


Рис. 1. Зависимость относительного изменения сопротивления алюминиевой фольги от удельной мощности, потребляемой во время анодирования в различных электролитах

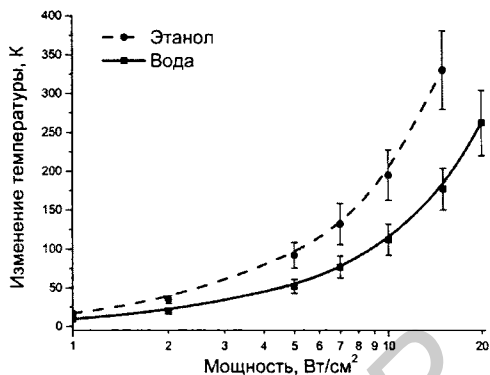


Рис. 2. Зависимость изменения температуры алюминиевой фольги от удельной мощности, потребляемой во время анодирования в различных электролитах

нейшем имеет место отклонение от линейной зависимости. Аппроксимация экспериментальных данных показала, что полученные кривые могут характеризоваться показателем степени 1,2–1,3 для диапазона удельной мощности 10–30 Вт/см². Кроме того, исследования показали, что увеличение температуры алюминиевой фольги более значимо для электролита на основе этанола (рис. 2) по сравнению с водным электролитом.

Полученный результат можно объяснить более низким значением теплопроводности электролита на основе этанола по сравнению с водным электролитом, так как коэффициент теплопроводности этанола почти в 2 раза меньше коэффициента теплопроводности воды. Следует отметить, что коэффициент теплопроводности во всех органических растворах меньше аналогичного параметра водных растворов. Поэтому увеличение температуры во время анодного процесса имеет большее значение для органических электролитов, таких как электролиты на основе этиленгликоля, глицерина и т. д.

Полученные результаты позволяют оценить распределение температур в анодных оксидах при высоких значениях мощности тепловыделения. Именно при высоких значениях напряжения формовки и, следовательно, высоких значениях мощности тепловыделения наблюдаются уникальные явления самоорганизации [6] и анизотропии [7]. Важно отметить, что для анодирования с использованием этих явлений все чаще применяют электролиты на основе органических растворителей, где эффект увеличения температуры проявляется особенно интенсивно.

1. Sousa C. T., Leitao D. C., Proenca M. P. [et al.] // *Appl. Phys. Rev.* 2014. 1. 031102.
2. Юнг Л. Анодные оксидные пленки // *Энергия*. Л. 1967. 232 с.
3. Lazarouk S. K., Sasinovich D. A., Borisenko V. E. [et al.] // *J. Appl. Phys.* 2010. 107. 033527.
4. Leshok A. A., Katsuba P. S., Vysotski V. B. // *Phys. Chem. and appl. of nanostructures*. 2011. 475.
5. Aerts T., I. De Graeve, Terryn H. // *Electrochim. Acta*. 2008. 5. 270.
6. Chu S., Wada K., Inoue S. [et al.] // *Mater.* 2005. 17. 2115.
7. Lazarouk S. K., Katsuba P. S., Leshok A. A. [et al.] // *Techn. Phys.* 2015. 60. 1343.