

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 538.9

Л.И. ЩЕПИНА<sup>1</sup>, В.Л. ПАПЕРНЫЙ<sup>1</sup>, А.А. ЧЕРНЫХ<sup>1</sup>, Н.А. ИВАНОВ<sup>2</sup>

МЕХАНИЗМ СТАРЕНИЯ ПЛЕНКИ LiF С НАНОКЛАСТЕРАМИ МЕДИ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ МЕМРИСТОРА\*

**Ключевые слова:** нанокластеры меди, временная деградация, параметры мемристора.

В настоящее время актуальны разработка наноразмерной памяти битовых ячеек, достижение размера микроэлектронных устройств порядка нескольких нанометров. Известны резистивные переключатели на основе тонкопленочных элементов [1], причем положительное смещение напряжения на образце приводит к низкорезистивному состоянию (вкл), а отрицательное – к высокорезистивному (выкл). В частности, такой характер вольт-амперных характеристик (ВАХ) был зарегистрирован на пленках LiF с нанокластерами (НК) меди [2]. Параметр работы мемристора, определенный по соотношению токов во включенном и выключенном состоянии, был равен  $5 \cdot 10^6$  при напряжении 0.6 В. В течение полугода хранения пленки при комнатной температуре данный параметр снизился до значения  $4 \cdot 10^3$ . Задача настоящей работы заключается в выяснении механизма старения. Исследовались ВАХ поперечной проводимости и спектры оптического поглощения пленок LiF с нанокластерами меди, сформированные магнетронным напылением на подложку из токопроводящего стекла (ТПС) по технологии, описанной в [3]. Измерение ВАХ проводили по стандартной методике с использованием классической схемы, где с помощью электрометра У5-11 измеряется падение напряжения на эталонном сопротивлении, включенном в цепь последовательно с образцом. Использовались точечные электроды с площадью контакта  $1 \cdot 10^{-3}$  мм<sup>2</sup>. Падение напряжения на образце изменялось в пределах 0–10 В, концентрация нанокластеров меди контролировалась по спектру поглощения в полосе объемного плазмонного резонанса НК Cu в области ~ 500 нм [4].

Для нахождения энергетического распределения ловушек электронов экспериментальные ВАХ строились в двойных логарифмических координатах (рис. 1). Как видно из рис. 1, мы получили линии. Это означает, что через образец протекает ток, ограниченный объемным пространственным зарядом (ТОПЗ) [5]. В этом случае ток имеет степенную зависимость от напряжения ( $U$ ) и толщины диэлектрика ( $L$ ):

$$I = e\mu N_c \left( \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{N_t} \right)^\ell \frac{U^{\ell+1}}{L^{2\ell+1}},$$

где  $N_t$  – концентрация ловушек;  $N_c$  – эффективное число состояний в зоне проводимости.

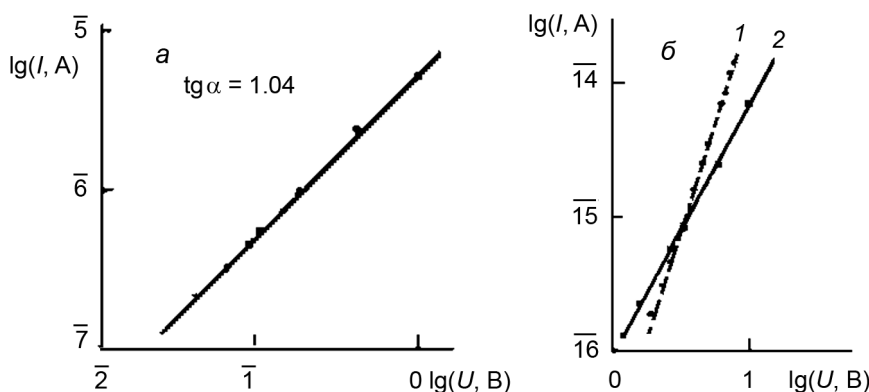


Рис. 1. ВАХ в двойных логарифмических координатах свежеприготовленной пленки (а) и подвергнутой старению в течение 1 года (кр. 1) и 6 мес. (кр. 2) (б)

\* Исследования выполнены при частичной поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госзадание, проект № 3.8401-2017/БЧ).

Как следует из формулы, в логарифмических координатах ВАХ будет представлена прямой линией с наклоном  $\lg \alpha = l + 1$ . Зная  $l$ , можно найти энергетическое распределение ловушек по формуле:  $E_0 = lkT$ . Измерения для свежеприготовленной пленки показали  $l = 0.04$ . С учетом того, что  $kT = 2.6 \cdot 10^{-2}$  эВ, положение уровня мелких ловушек  $E_0 = 1 \cdot 10^{-3}$  эВ практически совпадает с дном зоны проводимости. Через 6 мес. хранения уровень мелкой ловушки проявляется уже на глубине 0.03 эВ ( $l = 1.07$ ), через год хранения – на глубине 0.04 эВ ( $l = 1.42$ ). В работе [6] мы отмечали, что смещение энергетического уровня нанокластеров меди к уровню Ферми свидетельствует об укрупнении НК Cu. Известно, что укрупнение нанокластеров золота или серебра в фоточувствительных стеклах сопровождается смещением полосы плазмонного резонанса в длинноволновую область спектра [4]. На рис. 1 впервые представлены нормированные спектры поглощения исследуемых пленок на основе LiF с нанокластерами меди.

Наблюдается смещение максимума полосы поглощения в длинноволновую область спектра (рис. 2, кривая 2) в результате временной деградации пленки. Учитывая, что поверхность пленки не была защищена от проникновения ионов кислорода, необходимо проверить возможность окисления НК с образованием  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Для последнего соединения характерно сильное дипольное поглощение в области 452 и 478 нм и запрещенные переходы в области 540 и 565 нм [7]. Однако измерение спектра поглощения при температуре 78 К продемонстрировало совпадение со спектром, измеренным при 300 К, что характерно для плазмонного поглощения. На этом основании мы делаем вывод, что в процессе хранения происходит укрупнение нанокластеров меди, приводящее к увеличению соотношения сопротивлений мемристора во включенном и выключенном состоянии.

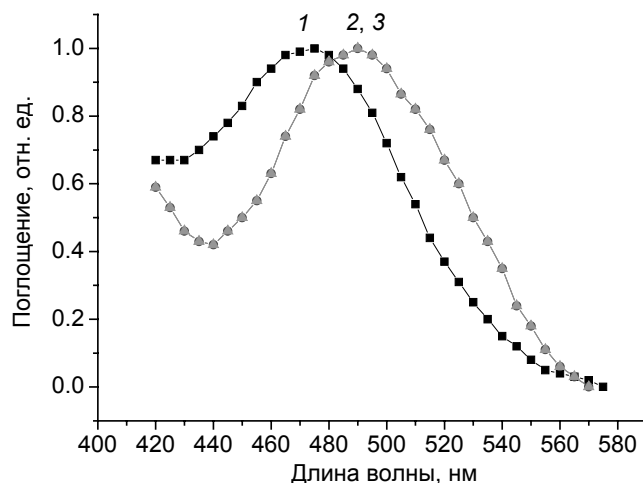


Рис. 2. Нормированные спектры поглощения свежеприготовленной (кр. 1) пленки на основе LiF с НК Cu и подвергнутой старению в течение года, температура измерения 300 К (кр. 2) и 78 К (кр. 3)

Следовательно, возможный механизм старения пленки связан с укрупнением нанокластеров меди.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xu-Bo Lai, Yu-Hang Wang, Xino-Lan Shi, et al. // Chinese Phys. Lett. – 2016. – V. 33. – No. 6. – P. 067202.
2. Genze Yu.V., Shchepina L.I., Shchepin I.Ya, et al. // Bull. Russ. Acad. Scie. Phys. – 2015. – V. 79. – No. 2. – P. 194–197.
3. Паперный В. Л. Мемристорный переключатель // Патент 159146 Российская Федерация, H01L45/00B82B1/00.
4. Kreibig U. and Vollmer M. Optical Properties of Metal Clusters. – Berlin: Springer Verlag, 1995. – 313 p.
5. Райкерус П. А. Электропроводность тонких диэлектрических пленок. – Петрозаводск, 1984. – 27 с.
6. Суворкин Я. В., Щепина Л. И., Щепин И. Я. и др. // Известия РАН. Физика. – 2017. – Т. 81. – № 9. – С. 1162–1165.
7. Кудряшов Д. А., Гудовских А. С., Бабичев А. Б. и др. // ФТП. – 2017. – № 1. – С. 111–115.

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Поступило в редакцию 19.07.17,  
после доработки – 13.10.17.

**Щепина** Лариса Иннокентьевна, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., доцент, e-mail: schepina@api.isu.ru;

**Паперный** Виктор Львович, д.ф.-м.н., профессор, зав. каф. космофизики, e-mail: paperny@math.isu.runnet.ru;

**Черных** Алексей Андреевич, к.ф.-м.н., доцент, e-mail: paperny@math.isu.runnet.ru;

**Иванов** Николай Аркадьевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., директор, e-mail: ivnik@istu.edu.