

УДК 538.935

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПАРАМЕТР РАБОТЫ МЕМРИСТОРА НА ОСНОВЕ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ LiF С НАНОКЛАСТЕРАМИ Cu

© 2019 г. Т. С. Лазарева¹, Л. И. Щепина^{1, *}, А. А. Черных¹, В. Л. Паперный¹, Н. А. Иванов²

¹Научно-исследовательский институт прикладной физики при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования “Иркутский государственный университет”, Иркутск, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Иркутский национальный исследовательский технический университет”, Иркутск, Россия

*E-mail: scherina@ipf.isu.ru

Поступила в редакцию 03.09.2018 г.

После доработки 10.09.2018 г.

Принята к публикации 22.10.2018 г.

Рассмотрены факторы, влияющие на параметр работы мемристора ($R_{\text{выкл}}/R_{\text{вкл}}$). Изучается рост данного параметра при увеличении тока магнетрона и времени облучения в процессе приготовления тонкой пленки LiF с нанокластерами меди. Показано синоптическое поведение мемристора на основе этой пленки.

DOI: 10.1134/S0367676519030128

ВВЕДЕНИЕ

Разработка материалов для резистивной энергонезависимой памяти (мемристоров) – одно из ключевых направлений развития устройств для искусственного интеллекта (ИИ). Для сравнения, человеческий мозг обладает уникальной способностью к вычислениям по сравнению с суперкомпьютером благодаря высокой скорости обработки сигнала при низких энергетических затратах [1]. Особую роль в этом играют синапсы, выполняющие функции передачи электрической активности от одной нервной клетки к другой нервной или мышечной клетки [2]. Этот механизм может быть использован в системах ИИ, которые теоретически позволяют дублировать фундаментальные функции биологических синапсов и имитировать работу мозга [3]. Использование мемристоров в качестве синапсов может обеспечить высокую скорость взаимодействия элементов и необходимую их плотность для эффективной обработки информации. Материалы для мемристоров на основе оксидов металлов широко исследуют в настоящее время. На сегодняшний день на их основе достигнуты достаточно высокие значения параметра переключения из одного резистивного состояния в другое ($R_{\text{выкл}}/R_{\text{вкл}}$) [4]. Для большинства мемристоров этого класса (ионная коммутация), однако, остается нерешенной проблема стабильности и воспроизводимости значений сопротивления в низкоомном ($R_{\text{вкл}}$) и высокоомном состояниях ($R_{\text{выкл}}$). Основной причиной этого является неоднородность распределе-

ния электрического поля в активном слое мемристора из-за неоднородности этого слоя. Для решения этой проблемы проводится поиск новых материалов для мемристоров. Ранее нами предложены мемристоры на основе тонких пленок LiF с нанокластерами (НК) меди, в которых проявляется эффект электронной коммутации [5]. Максимально достигнутый параметр работы мемристора $R_{\text{выкл}}/R_{\text{вкл}}$ составлял $4 \cdot 10^3$ при напряжении 0.6 В. В рамках данной работы изучается возможность увеличения этого параметра.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования электрических свойств тонкие пленки LiF с нанокластерами Cu создавали путем одновременного напыления фторида лития и меди на подложку. Пленки наносили на токопроводящее стекло (ТПС) магнетронным напылением по технологии, описанной в [6]. Давление в вакуумной камере было $\sim 10^{-5}$ мм. рт. ст. Контроль за нанокластерами меди осуществляли по спектрам оптического поглощения в полосе плазмонного резонанса (ППР) в области ~ 590 нм [7]. Спектры оптического поглощения исследуемых пленок регистрировали на спектрофотометре MPS-50L. Вольтамперные характеристики измеряли для установления характерной энергии активации носителей заряда из нанокластеров, характеризующейся наклоном кривой, построенной в двойных логарифмических координатах $\lg I - \lg U$. Измерения ВАХ проводили по стандарт-

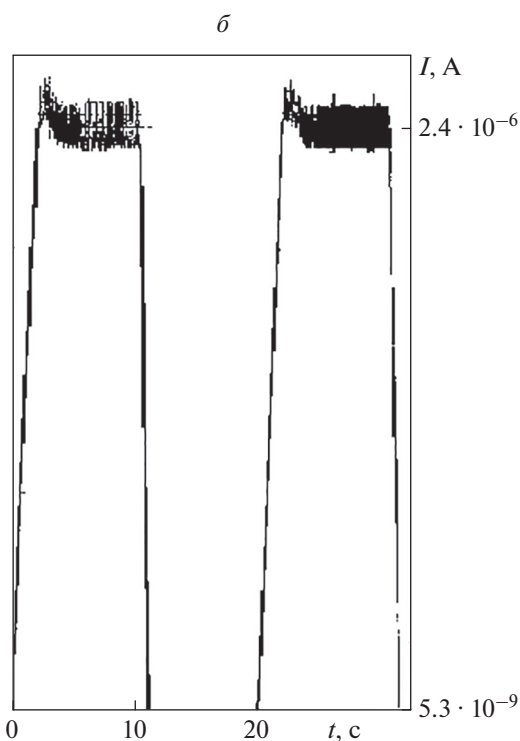
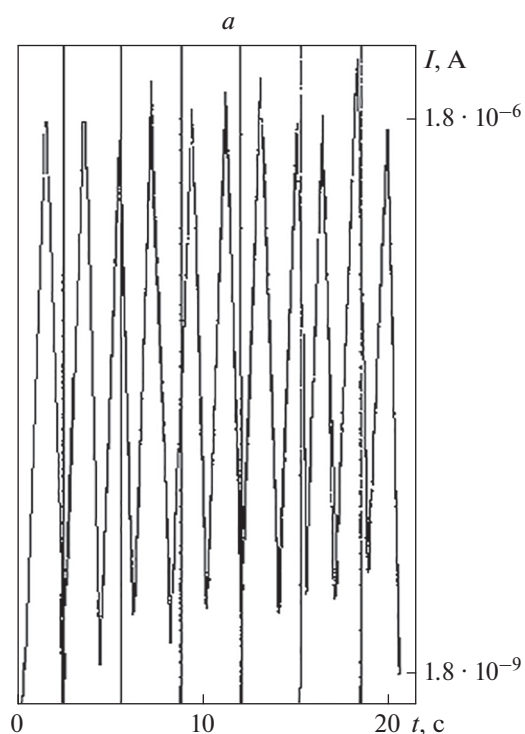


Рис. 1. Изменение тока пленки LiF/Cu, соответствующее краткосрочной памяти, при подаче импульсов напряжения через интервал времени 2 с (а) и соответствующее долгосрочной памяти при периоде импульсов напряжения 20 с (б).

ной методике с использованием классической схемы, где с помощью электрометра У5-11 измеряется падение напряжения на эталонном сопро-

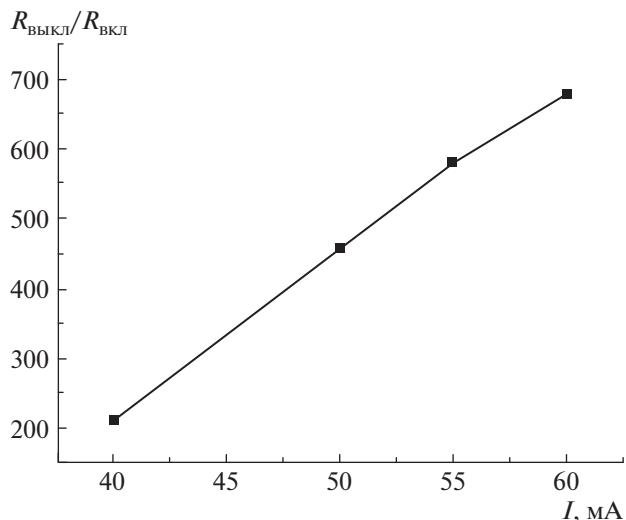


Рис. 2. Зависимость параметра работы мемристора ($R_{\text{выкл}}/R_{\text{вкл}}$) от тока магнетрона при формировании пленки LiF с нанокластерами Cu на поверхности ТПС.

тивлении, включенном в цепь последовательно с образцом. Потенциал на пленке измеряли с помощью точечных электродов с площадью контакта $1 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2$. Падение напряжения на образце изменялось в пределах 0–1 В. Таким образом, образец для исследований представлял собой тонкую пленку на основе LiF с нанокластерами меди толщиной 470 нм, нанесенную на токопроводящее стекло с верхним медным электродом и алюминиевым в качестве противоположного электрода.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Эффекты переключения исследовали, прикладывая импульсы напряжения к образцу с одновременным контролем изменения тока. Как показано на рис. 1 характеристики памяти, такие как краткосрочная и долгосрочная память, наблюдали с интервалами 2 и 20 с соответственно путем приложения напряжения 60 мВ с различными интервалами повторения импульса смещения. Для синоптического устройства, кроме наличия двух механизмов памяти, необходимо высокое значение параметра $R_{\text{выкл}}/R_{\text{вкл}}$, которое зависит от концентрации НК меди. Роста концентрации НК можно добиться увеличением интенсивности напыления, зависящей от тока магнетрона. На рис. 2 представлена зависимость параметра мемристора от тока магнетрона, которая свидетельствует о линейном увеличении параметра с ростом тока магнетрона. Однако мы столкнулись с отрицательными факторами, которые не позволяют значительно повысить параметр работы мемристора. Так, увеличение тока магнетрона до 100 мА приводит к росту значений энергии активации носителей

Таблица 1. Значения энергий активации различных участков на ВАХ, представленной в двойных логарифмических координатах

E , эВ в низкорезистивном состоянии		E , эВ в высокорезистивном состоянии		I , мА Ток магнетрона
0.52	2.14	2.33	0.96	40
0.66	3.18	2.5	1.44	100

заряда, хорошо проявляющейся на участках ВАХ, представленной в двойных логарифмических координатах (табл. 1).

Оценим глубину ловушек электронов на участках, которые отвечают за токи в образце, ограниченные объемным пространственным зарядом. В этом случае [8] ток имеет степенную зависимость от напряжения U и толщины диэлектрической пленки L :

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

где N_t – концентрация ловушек, N_c – эффективное число состояний в зоне проводимости. Как следует из формулы (1), в логарифмических координатах ВАХ будет представлена прямой линией с наклоном $\text{tg}\alpha = \ell + 1$. Зная ℓ , можно найти энергетическое распределение ловушек по формуле:

$$E_0 = \ell kT. \quad (2)$$

Наклон прямых в двойных логарифмических координатах $\lg I - \lg U$ стремится к 2 [9], когда доминируют токи, ограниченные пространственным зарядом. Как следует из табл. 1, мы имеем участки на ВАХ с наклоном 2.3 и 2.5 эВ. Следо-

вательно, для пленки, приготовленной при токе магнетрона 40 мА, получим $\ell = 1.3$. При токе магнетрона 100 мА $\ell = 1.5$. Учитывая, что $kT = 2.6 \cdot 10^{-2}$ эВ, в процессе электропереноса участвуют ловушки с глубиной 0.03 и 0.04 эВ соответственно. Сравнение энергетического распределения ловушек показывает, что с увеличением интенсивности напыления формируются пленки с НК, создающими более глубокие ловушки, участвующими в процессе электропереноса. Этот вывод подтверждается спектральными характеристиками пленок. Наблюдается смещение максимума полосы плазмонного резонанса в длинноволновую сторону до 590 нм, что свидетельствует об укрупнении нанокластеров меди [10]. Таким образом, мы делаем вывод, что укрупнение НК меди – это одна из причин, которая не позволяет значительно повысить параметр работы мемристора. Мы можем предположить, что увеличение тока магнетрона до 100 мА сопровождается усилением диффузионных процессов, приводящих к укрупнению нанокластеров меди, и поэтому параметр $R_{\text{выкл}}/R_{\text{вкл}}$ не превышает значения $3 \cdot 10^4$ при напряжении 0.6 В.

Роста концентрации нанокластеров меди можно добиться также увеличением времени облучения на магнетроне в процессе приготовления пленок. Были выбраны следующие параметры: ток магнетрона 60 мА, время облучения 6.5 мин. В результате была приготовлена пленка с концентрацией нанокластеров меди, соответствующей коэффициенту поглощения на длине волны 590 нм $K = 477 \text{ см}^{-1}$ и параметром работы мемристора $R_{\text{выкл}}/R_{\text{вкл}} = 7 \cdot 10^3$. Рост времени облучения на магнетроне до 10 мин позволил увеличить концентрацию нанокластеров в 2.3 раза ($K = 1096 \text{ см}^{-1}$). Однако рабочий параметр мемристора уменьшился до значений $1.8 \cdot 10^3$. Сравнение нормированных спектров поглощения полученных пленок (рис. 3) показало образование пленки Cu_2O на поверхности активного слоя мемристора с увеличением времени облучения до 10 мин. Наблюдается увеличение поглощения на крыльях полосы плазмонного резонанса НК меди (590 нм) и четко проявляющиеся максимумы в области ~620 и 640 нм (рис. 3, кривая 2). Все это характерно для пленки Cu_2O , спектр поглощения которой приведен в работе [11]. Пленка Cu_2O увеличивает ток в

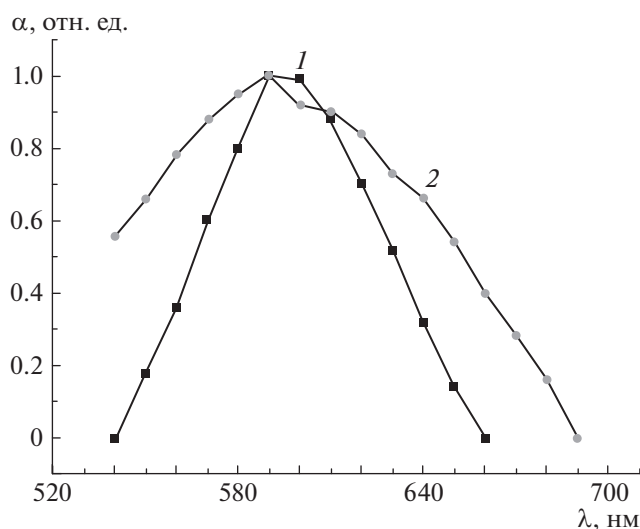


Рис. 3. Нормированные спектры поглощения пленки LiF с нанокластерами Cu, нанесенной на ТПС: время облучения на магнетроне – 6.5 мин (1); – 10 мин (2).

выключенном состоянии, в результате уменьшается сопротивление $R_{\text{выкл}}$ и, соответственно, уменьшается параметр работы мемристора. Следовательно, соотношение $R_{\text{выкл}}/R_{\text{вкл}}$ можно значительно увеличить, если удастся технологически устранить образование окиси меди, осуществив откачку камеры до более высокого вакуума ($<10^{-5}$ мм. рт. ст) для снижения остаточной концентрации кислорода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день мемристоры на основе тонкой пленки LiF с нанокластерами меди помимо простого процесса изготовления и малых размеров нанокластеров демонстрируют рабочий параметр $R_{\text{выкл}}/R_{\text{вкл}}$ порядка 10^4 . Рабочий параметр может быть увеличен, если удастся технологически устранить образование оксидов меди на поверхности активного слоя мемристора и предотвратить диффузионные процессы, приводящие к укрупнению нанокластеров меди. Исследования в этом направлении являются актуальными, так как мемристоры на основе тонкой пленки LiF с нанокластерами меди показывают достаточно высокие параметры переключения и проявляют синоптическое поведение.

Исследования выполнены при частичной поддержке Министерства образования и науки

Российской Федерации (Госзадание, проект № 3.8401.2017/8.9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Moravec H.* // J. Evolution Techn. 1998. № 1.
2. *Kuzum D., Jeyasingh R.G.D., Lee B. et al.* // Nano Lett. 2012. V. 12. № 5. P. 2179.
3. *Ayers J., Davis J.L., Rudolph A.* Neurotechn. for Biometric Robots. Cambridge: MIT Press, 2002. 650 p.
4. *Hadiyawaman, Budiman F., Hemowo D.G.O. et al.* // Jap. J. of Appl. Phys. 2018. V. 57. P. 03EA06.
5. *Гензе Ю.В., Щепина Л.И., Щепин И.Я. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 2. С. 217; *Genze Yu.V., Shchepina L.I., Shchepin I. Ya. et al.* // Bull. of Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. № 2. P. 194.
6. *Паперный В.Л. и др.* Патент 159146 РФ. H01L45/00 B 82B1/00 Мемристорный переключатель.
7. *Uwe Kr., Vollmer M.* Optical prop. of metal clusters. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 313 p.
8. *Райкерус П.А.* Электропроводность тонких диэлектрических пленок. Петрозаводск, 1984. 27 с.
9. *Hui-Yu Yan, Zhi-qing Li.* // Phys. Stat. Sol. A. 2017. V. 214. № 11. Art. no. 1700546.
10. *Щепина Л.И., Паперный В.Л., Черных А.А.* // Изв. Вуз. Физика. 2018. Т. 61. № 11. С. 166.
11. *Soolmaz J., Ahmad M., Nasim M.* // Phys. Stat. Sol. A. 2017. V. 214. Art. no. 1700380.