

УДК 537.52

К. ф.-м. н. А. Г. БОРИСЕНКО

Украина, г. Киев, Институт ядерных исследований НАНУ

E-mail: boris@kinr.kiev.ua

## ИСТОЧНИК БЕСКАПЕЛЬНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ ДЛЯ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

*Описан источник потоков плазмы твердофазных материалов, генерируемых вакуумно-дуговым разрядом в парах диффузно испаряемого анода. Источник способен эффективно создавать бескапельные потоки плазмы различных металлов в вакууме, а при напуске в вакуумную камеру необходимых рабочих газов — потоки газовой и газометаллической плазмы. Приведены основные характеристики разряда и параметры создаваемых плазменных потоков, имеющих компенсированный объемный заряд. Источник может быть использован для нанесения островковых и тонких металлических пленок на подложки из различных материалов, в том числе и диэлектрических.*

*Ключевые слова:* вакуум, дуговой разряд, анод, наноструктура.

О возможности формирования тонких функциональных слоев в электронике с помощью катодно-дугового осаждения различных твердофазных материалов известно давно. В широко используемом дуговом разряде в парах материала катода протекающие физические процессы таковы, что делают неизбежным присутствие в создаваемых потоках плазмы капельно-кластерной фазы материала катода [1, 2]. Эти потоки содержат капли катодного материала, размеры которых изменяются от единиц до десятков микрометров. Исследования показали, что плазменные потоки, создаваемые с помощью вакуумной катодной дуги, содержат капли диаметром до 20 мкм, причем доля капель диаметром более 2 мкм в общем массопереносе превышает 90% [3]. Такие макровключения ухудшают характеристики покрытий, т. к. имеют плохое сцепление с подложкой и могут по размерам превосходить толщину покрытия (проступать сквозь него). Поэтому для решения ряда технологических задач в нано- и микроэлектронике такие потоки оказываются неприемлемыми и требуют разработки разных методов их дополнительной фильтрации [4–8]. Однако фильтрация потоков не только способствует удалению капельной фазы, но и приводит к значительному ослаблению интенсивности потоков плазмы на выходе источников [8, 9].

Бескапельные потоки плазмы твердофазных материалов способен генерировать несамостоятельный дуговой разряд в парах материала анода благодаря диффузной привязке разряда на аноде и испарению рабочего материала из широкой зоны [10, 11]. Реализация режима локального испарения рабочего материала с поверхности анода в этом типе разряда весьма

затруднена [12]. Кроме того, этот разряд позволяет изменять в генерируемых им потоках плазмы в довольно широком диапазоне значения коэффициента ионизации потока, т. е. долю ионов в потоке. При этом интенсивность выходящего потока остается практически постоянной. Как известно, воздействие ионов, особенно на начальной стадии процесса осаждения, способно влиять на процессы образования точечных дефектов на поверхности осаждения, процессы поверхностной диффузии, зарождение и развитие металлических кластеров, дальнейший рост и структуру пленки [13, 14]. Поэтому возможность регулирования доли ионов в осаждаемом потоке плазмы может быть дополнительно использована как средство управления процессами зарождения и роста кластеров и пленок, позволяющее целенаправленно влиять на структуру и свойства создаваемых пленок. Отмеченные выше особенности вакуумного дугового разряда в парах материала анода делают целесообразным и актуальным изучение его свойств и характеристик для различных рабочих материалов и в различных диапазонах разрядного тока, а также изучение различных конструкций источников плазмы, создаваемых на его основе.

### Экспериментальное устройство

Принципиальная схема экспериментального устройства приведена на **рис. 1**. Разряд зажигался между охлаждаемым водой анодом 3 и заземленным накаливаемым катодом 1 в парах рабочего материала 2. В качестве рабочих материалов в проведенных экспериментах использовали медь, никель и титан, которые размещали непосредственно на аноде разряда 3 или в установившемся на аноде тигле. Зажигание разря-

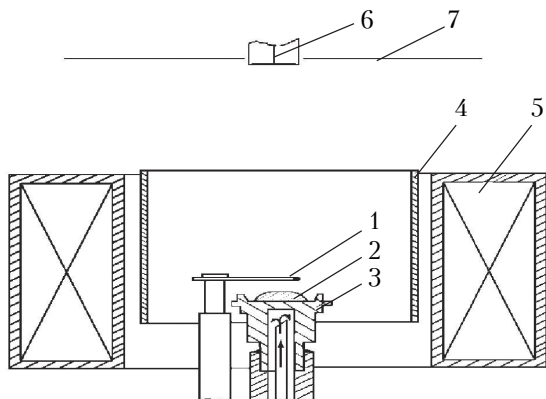


Рис. 1. Схема экспериментального устройства:

1 — накаливаемый катод; 2 — рабочий материал; 3 — водохлаждаемый анод; 4 — цилиндрический электрод; 5 — магнитная катушка; 6 — электрический зонд; 7 — подложкодержатель

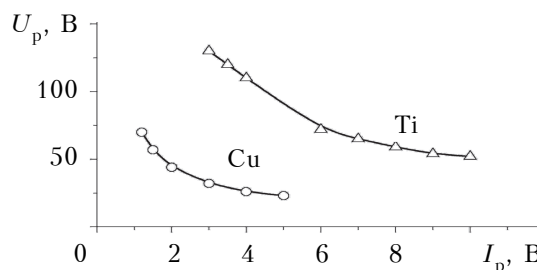
да происходило следующим образом. Между анодом 3 и предварительно накаливаемым катодом 1 прикладывали напряжение, которое приводило к нагреву рабочего материала термоэлектронами, эмитируемыми с катода, и к образованию в зоне между катодом и анодом паров рабочего вещества. Когда давление паров в разрядном промежутке достигало определенного значения, происходило зажигание разряда. Для облегчения зажигания разряда и с целью управления параметрами создаваемых плазменных потоков в зоне разряда использовали скрещенные электрическое и магнитное поля, создаваемые с помощью цилиндрического электрода 4 и магнитной катушки 5. Потенциал электрода  $U_4$  изменялся относительно заземленного катода разряда. В описываемых экспериментах индукция магнитного поля  $B$  в зоне разрядного промежутка составляла  $80 \cdot 10^{-4}$  Тл и была выбрана исходя из условий формирования максимальной доли ионной компоненты в создаваемых плазменных потоках. Для измерения параметров плазменных потоков использовали плоский электрический зонд 6, который располагался на оси системы на расстоянии  $0,17-0,19$  м от анода или  $0,09-0,11$  м от верхней плоскости электрода 4 и обычно находился под отрицательным относительно катода разряда потенциалом  $U_6 = -200$  В.

Источник плазмы позволял работать с различными твердофазными материалами. Для нанесения на подложку оптических покрытий в качестве рабочего материала использовали медь, а для формирования резистивных слоев — такие материалы, как Ni, Ti, Cr, Ta и другие. В качестве подложек при определении скорости осаждения пленок использовали ситалловые пластины Ст. 50 размером  $0,048 \times 0,06$  м, которые размещались на держателе подложек 7. Приводимые ниже скорости осаждения пленок, которые определяли весовым методом, являются усредненными по поверхности подложек. В описываемых экспериментах подложки располага-

лись на расстоянии  $0,180-0,185$  м от анода разряда. Геометрические размеры описываемого источника в целом соответствуют размерам цилиндра  $\varnothing 0,17 \times 0,20$  м, поэтому он легко размещается в вакуумной камере установок вакуумного напыления, например УВН 83П-1, УРМЗ.279.014П. Для получения высокого вакуума использовали магнитоэлектрический или диффузионный вакуумные насосы. Предельное давление в вакуумных камерах составляло  $(0,5-1) \cdot 10^{-3}$  Па. В режиме напыления давление  $P_k$  в вакуумных камерах было близко к предельному и практически не превышало  $1 \cdot 10^{-3}$  Па, а при работе с титаном наблюдалось уменьшение давления в камере примерно на порядок.

### Результаты исследований

На рис. 2 для разных рабочих материалов приведены типичные вольт-амперные характеристики (ВАХ) разряда, т. е. зависимости напряжения разряда  $U_p$  от величины разрядного тока  $I_p$ . Видно, что ВАХ такого разряда имеет вид, типичный для вакуумной дуги, т. е. увеличение тока разряда сопровождается уменьшением разрядного напряжения. В нашем случае


 Рис. 2. ВАХ разряда, полученного в парах меди и в парах титана при  $U_4 = 0$ 

при увеличении  $I_p$  в парах меди от  $1,5$  до  $5$  А напряжение  $U_p$  уменьшалось от  $57$  до  $23$  В. Для разряда в парах титана  $U_p$  изменялось от  $130$  до  $52$  В при увеличении  $I_p$  от  $3$  до  $10$  А. Вольт-амперная характеристика описываемого типа разряда кардинально отличается от ВАХ самостоятельного дугового разряда в газе, для которого рост разрядного тока сопровождается не понижением, а повышением напряжения разряда.

С учетом того, что в ряде случаев необходимы плазменные потоки, в состав которых входят и частицы металлов, и газы, нами были изучены характеристики разряда в таких комбинированных средах. На рис. 3 приведены ВАХ самостоятельного дугового разряда в парах титана при различном давлении газа, напускаемого в вакуумную камеру. В качестве рабочего газа был использован азот. Кривая 1 представляет собой типичную ВАХ разряда в парах Ti (при  $P_k = 1,3 \cdot 10^{-3}$  Па) без напуска рабочего газа в вакуумную камеру, а кривая 6 получена в чистом азоте (при  $P_k = 4 \cdot 10^{-2}$  Па), т. е. при отсутствии испаряемого рабочего материала на аноде. Кривые 2—5 получены при различном

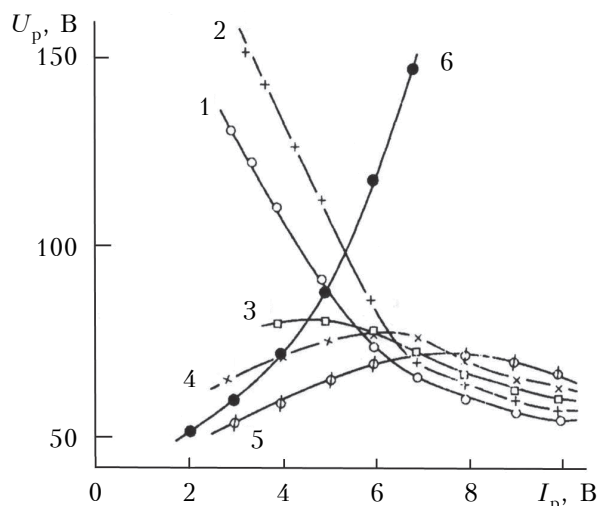


Рис. 3. ВАХ разряда в парах Ti при  $P_k=1,3 \cdot 10^{-3}$  Па (1), в чистом азоте при  $P_k=4 \cdot 10^{-2}$  Па (6) и в смеси паров Ti и азота, напускаемого в камеру при различном давлении (в Па):

2 —  $2,7 \cdot 10^{-2}$ ; 3 —  $3,3 \cdot 10^{-2}$ ; 4 —  $4 \cdot 10^{-2}$ ; 5 —  $5,5 \cdot 10^{-2}$

давлении напускаемого в вакуумную камеру газа и демонстрируют динамику изменения вольт-амперной характеристики самостоятельного дугового разряда в смеси паров материала анода и газа при различных соотношениях их давления в разрядном промежутке. Они свидетельствуют о возможности реализации устойчивого горения разряда в таких комбинированных средах и о возможности использования данного типа разряда для создания потоков газометаллической плазмы. Приведенные данные свидетельствуют также о возможности осуществления непрерывного перехода с одной рабочей среды на другую и обратно в условиях постоянного горения разряда и демонстрируют степень влияния появляющихся в газовом разряде металлических примесей на его вольт-амперную характеристику (кривые 4 и 6).

Возможная скорость роста осаждаемых пленок и покрытий относится к основным характеристикам технологических источников плазменных потоков. На рис. 4 приведены полученные для описываемого экспериментального устройства зависимости скорости роста  $q$  осаждаемых покрытий от тока разряда  $I_p$  для различных рабочих материалов: Cu, Ti и Ni. Результаты по-

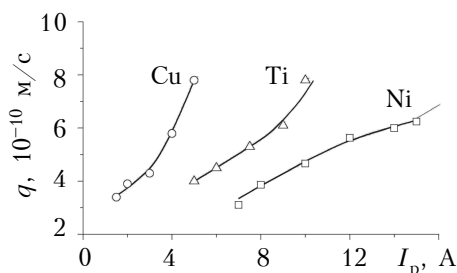


Рис. 4. Зависимости скорости роста осаждаемых покрытий от тока разряда для разных материалов

лучены в одной установке путем простой замены рабочего вещества на аноде разряда. Обращает на себя внимание тот факт, что при минимальных токах горения разряда значения  $q$  для трех материалов близки по величине. Это свидетельствует о том, что зажигание разряда для исследованных материалов происходит при одинаковых или близких значениях давления паров используемых рабочих материалов в разрядном промежутке. То есть, как и следовало ожидать, зажигание разряда происходит при некоем минимальном значении давления паров, практически одинаковом для разных рабочих материалов. При этом значение тока разряда зависит от материала. На рис. 4 также видно, что на начальной стадии, сразу после зажигания разряда, изменение  $q$  с увеличением тока разряда для всех материалов может быть аппроксимировано зависимостью, близкой к линейной. С ростом тока разряда характер зависимости  $q(I_p)$  для Cu и Ti изменяется — рост  $q$  превышает линейный, а для Ni наблюдаемое изменение  $q(I_p)$  остается близким к линейному и даже проявляет тенденцию к дальнейшему насыщению. Для выяснения этой ситуации требуются дополнительные исследования. В целом же, приведенные на рис. 4 данные показывают, что представленное экспериментальное устройство позволяет осаждать медные, титановые или никелевые покрытия со скоростью от 0,3 до 0,8 нм/с при токах разряда до 5, до 10 и до 15 А соответственно.

Проведенные измерения показали, что изолированный зонд, размещенный на оси создаваемых плазменных потоков, приобретает отрицательный потенциал, который незначительно изменяется по всему диаметру плазменного потока. Эти данные свидетельствуют о том, что формируемый плазменный поток имеет компенсированный объемный заряд и может быть успешно использован для нанесения кластеров и пленок на подложки из любых материалов, не только металлических и полупроводниковых, но и диэлектрических.

Проблема получения кластеров, наноструктур и пленочных систем с необходимыми свойствами требует поиска методов воздействия на составляющие комплексного процесса их роста. Использование регулируемой скорости осаждения и управление коэффициентом ионизации  $\alpha$  поступающего на подложку плазменного потока может быть отнесено к числу основных таких методов. Поэтому измерение этих величин является важным и с научной, и с практической точек зрения. Как следует из рис. 4, изменяя ток разряда в парах меди от 1,5 до 5 А, можно менять  $q$  от 0,3 до 0,7 нм/с. Измерения показывают, что при этом одновременно изменяется коэффициент  $\alpha$ , который также может быть определен как доля ионов в осаждаемом плазменном потоке. Способ измерения коэффициента иони-

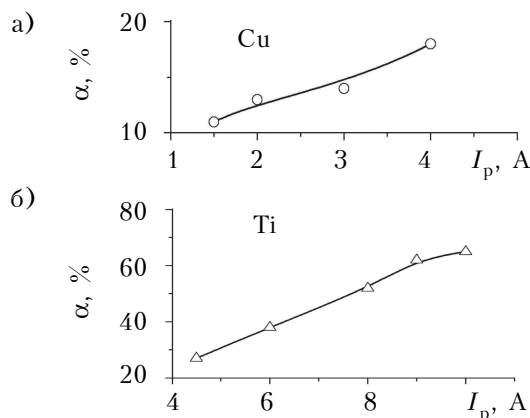


Рис. 5. Зависимость коэффициента ионизации плазменного потока  $\alpha$  от тока разряда в парах меди (а) и в парах титана (б) при  $I_4 = 0$

зации плазменного потока подробно описан в [10]. Из рис. 5, а видно, что  $\alpha$  в этих условиях изменяется от 10 до 19%. Для разрядов в парах Ni и Ti наблюдались более высокие значения коэффициентов ионизации создаваемых плазменных потоков. Так, из рис. 5, б видно, что для разряда в парах Ti повышение тока разряда от 5 до 10 А позволяет создавать потоки титановой плазмы с изменяемыми от 25 до 60% значениями  $\alpha$ .

Существует и дополнительная возможность изменения коэффициента ионизации плазменного потока — путем подачи положительного относительно катода разряда потенциала на цилиндрический электрод 4 и реализации дополнительного разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях. Приведенные на рис. 6 данные демонстрируют зависимость  $\alpha$  от тока дополнительного разряда  $I_4$  при горении разряда в парах трех разных материалов. Видно, что для меди при увеличении  $I_4$  от 0 до 2 А можно изменять величину  $\alpha$  от 11 до 48%. Эксперименты показали, что увеличение  $\alpha$  происходит при незначительном изменении  $q$ . Для случаев разряда в парах Ti и Ni при токе основного разряда 10 А подача положительного потенциала на цилиндрический электрод 4 и увеличение тока

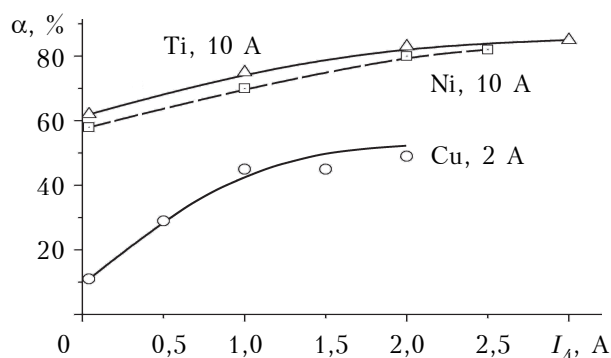


Рис. 6. Зависимость коэффициента ионизации  $\alpha$  плазменного потока различных материалов от тока  $I_4$  при разных значениях тока основного разряда

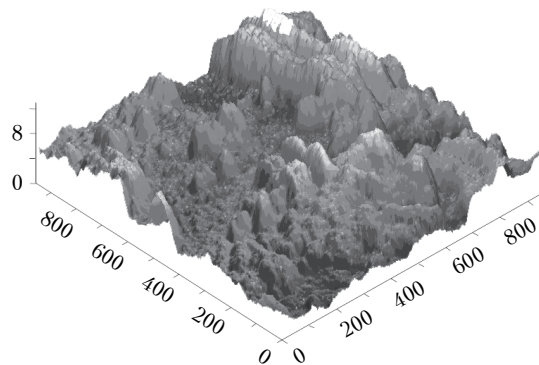


Рис. 7. Фотография участка титановой пленки (размеры — в нм)

дополнительного разряда от 0 до 3 А позволяет повышать  $\alpha$  до 85%. Потенциал электрода 4 в этих условиях не превышает 145 В.

На рис. 7 приведено фото осажденной с помощью экспериментального устройства титановой пленки. Учитывая, что размерность отложенных по осям величин — нанометры, можно сказать, что фото свидетельствует о полном отсутствии капель в осаждаемом потоке плазмы. Можно также говорить о том, что минимальная толщина формируемых сплошных пленок не превышает 7 нм.

Следует отметить, что при самых неблагоприятных режимах работы источника максимальное содержание примесей в нанесенных медных покрытиях не превышало 0,05%, а работа в стандартных режимах позволяла легко создавать лазерные зеркала с коэффициентом отражения более 99% на длине волны 1,315 мкм.

### Заключение

Таким образом, приведенные результаты исследований показывают, что описываемый источник плазмы действительно позволяет создавать бескапельные и высокоионизированные плазменные потоки и позволяет управлять ионизацией потока в достаточно широких пределах. Необходимо также отметить возможность успешного использования данного источника и для создания потоков газометаллической плазмы [11].

Представленные данные показывают возможность и целесообразность практического использования источников бескапельных плазменных потоков на основе несамостоятельного дугового разряда в парах материала анода для нанесения тонких пленок в технологиях наноэлектроники. Компенсированный объемный заряд создаваемых плазменных потоков позволяет наносить функциональные слои на подложки из различных материалов, включая диэлектрические. Возможность управления изменением долей ионов в создаваемых потоках плазмы может быть использована для целенаправленного влияния на процессы зародышеобразования металлических кластеров и пленок, в том числе на размер и плотность образующихся зародышей, структуру и



свойства возникающих на поверхности подложки образований.

# ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Daalder J. E. Components of cathode erosion in vacuum arc // J. Phys. D: Appl. Phys. — 1976. — Vol. 9, N 11. — P. 2379—2395.

2. Аксенов И. И., Коновалов И. И., Кудрявцева Е. Е. и др. Исследование капельной фазы эрозии катода стационарной вакуумной дуги // ЖТФ. — 1984. — Т. 54, Вып. 8. — С. 1530—1533. [Aksenov I. I., Konovalov I. I., Kudryavtseva E. E. i dr. // ZhTF. 1984. Vol. 54, Iss. 8. P. 1530]

3. Хороших В.М. II. Капельная фаза эрозии катода стационарной вакуумной дуги // Физическая инженерия поверхности. — 2004. — Т. 2, № 4. — С. 200—213. [Khoroshikh V. M. II. // Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti. — 2004. Vol. 2, N 4. P. 200]

4. Anders A. Approaches to rid cathodic arc plasma of macro- and nanoparticles: a review // Surface and Coatings Technology. 1999. — Vol. 120—121. — P. 319—330.

5. Бизюков А. А., Ромащенко Е. В., Середа К. Н. и др. Динамика капельной фазы в плазме дугового разряда низкого давления // Вісник Харківського університету. Серія фізична «Ядра, частинки, поля». — 2004, № 642. — Вип. 3/25/. — С. 42—46. [Bizyukov A. A., Romashchenko E. V., Sereda K. N. i dr. // Visnik Kharkivs'kogo universitetu. Seriya fizichna «Yadra, chastinki, polya». 2004, N 642. Iss. 3/25/. P. 42]

6. Белоус В. А., Хороших В. М. Динамика плазмы вакуумной дуги в магнитном поле и системы формирования плазменных потоков // Физическая инженерия поверхности. — 2005. — Т. 3, № 1—2. — С. 108—126. [Belous V. A., Khoroshikh V. M. // Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti. 2005. Vol. 3, N 1—2. P. 108]

7. Аксёнов Д. С., Аксёнов И. И., Стрельницкий В. Е. Подавление эмиссии макрочастиц в вакуумно-дуговых источниках плазмы // Вопросы атомной науки и техники. — 2007. — № 6. — С. 106—115. [Aksyonov D. S., Aksyonov I. I., Strel'nitskii V. E. // Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. 2007. N 6. P. 106]

8. Anders A. Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation. — New York: Springer, 2008.

9. Хороших В. М., Комарь А. А., Бровина М. А. Об эффективности вакуумно-дуговых источников плазмы с сепарацией капельной фазы эрозии катода // Физическая инженерия поверхности. — 2009. — Т. 7, № 1—2. — С. 54—59. [Khoroshikh V. M., Komar' A. A., Brovina M. A. // Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti. 2009. Vol. 7, N 1—2. P. 54]

10. Borisenko A. G., Saenko V. A., Rudnitsky V. A. Nonself-sustained arc discharge in anode material vapors // IEEE Trans Plasma Science. — 1999, August. — Vol. 27, N 4. — P. 877—881.

11. Borisenko A. G., Saenko V. A., Rudnitsky V. A. Semi-self sustained arc discharge in mixtures of metal vapors with gas // High Temperature. — 1999. — Vol. 37, N 1. — P. 1—8.

12. Borisenko A. G., Saenko V. A., Podziray J. S. Destruction of the arc discharge in vapors of the anode material by the gas entering into the vacuum chamber // Proceeding Int. Conf. on Plasma of Low Temperature Plasma, PLTP-03. — Ukraine, Kyiv. — 2003. — P. 6-2-5.

13. Палатник Л. С., Фукс М. Я., Косевич В. М. Механизм образования и субструктура конденсированных пленок. — Москва: Наука. Главная редакция физ.-мат. литературы, 1972. [Palatnik L. S., Fuks M. YA., Kosevich V. M. Mekhanizm obrazovaniya i substruktura kondensirovannykh plenok. Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiz.-mat. literatury, 1972]

14. Гусева М. Б. Ионная стимуляция в процессах образования тонких пленок на поверхности твердого тела // Соросовский образовательный журнал. — 1998. — № 10. — С. 106—112. [Guseva M. B. // Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal. 1998. N 10. P. 106]

Дата поступления рукописи  
в редакцию 05.04 2013 г.

**Borisenko A. G. The source of macroparticle-free plasma flows for nanoelectronics.**

*Keywords: vacuum, arc discharge, anode, nano-structure.*

The paper describes the source of solid-phase materials plasma flow generated by vacuum-arc discharge in vapors of diffuse evaporated anode. The source can efficiently create macroparticle-free plasma flows of various metals in vacuum, and provided the vacuum chamber is filled with required working gases, the source creates gas and gas-metal plasma flows. The main characteristics of the discharge and the parameters of the plasma flows with compensated volume charge are presented. The source can be used for application of island and thin metal films on substrates of different materials, including dielectrics.

Ukraine, Kiev, Institute for Nuclear Research of NASU.

**Борисенко А. Г. Джерело безкраплинних плазмових потоків для наноелектроніки.**

*Ключові слова: вакуум, дуговий розряд, анод, наноструктура.*

Описано джерело потоків плазми твердофазних матеріалів, генерованих вакуумно-дуговим розрядом в парах дифузно випаровуваного аноду. Джерело здатне ефективно створювати безкраплинні потоки плазми різних металів у вакуумі, а при напусканні у вакуумну камеру необхідних робочих газів — потоки газової та газометалічної плазми. Наведено основні характеристики розряду та параметри створюваних плазмових потоків, що мають компенсований об'ємний заряд. Джерело може бути використане для нанесення острівцевих і тонких металевих плівок на підкладки з різних матеріалів, в тому числі й діелектричні.

Україна, м. Київ, Інститут ядерних досліджень НАНУ.

УДК 621.3.049.776

Д. т. н. В. Г. СПИРИН

Россия, Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р. Е. Алексеева

E-mail: spvl49@mail.ru

## УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫВОДОВ БЕСКОРПУСНЫХ МИКРОСХЕМ

*Рассмотрены конструкция и принцип действия двух устройств контроля качества сварных соединений алюминиевых выводов бескорпусных микросхем с контактными площадками тонкопленочной платы.*

*Ключевые слова:* микросборка, контроль качества сварки выводов микросхем.

При монтаже бескорпусных микросхем (БМ) алюминиевые проволоочные и ленточные выводы присоединяют ультразвуковой микросваркой. Качество сварного соединения проволоки с контактными площадками (КП) платы можно проверить методом обрыва свободной части приваренного вывода, диаметр которого обычно составляет 30–60 мкм. Качество же сварки ленточных выводов, которые присоединяются к КП платы с помощью крестообразного электрода, этим методом проверить невозможно ввиду высокой прочности ленты (обычно такой вывод имеет толщину 20–30 мкм и ширину 150–300 мкм). Поэтому возникла необходимость в разработке устройства для контроля качества ультразвуковой сварки ленточных алюминиевых выводов БМ с КП платы. Упрощенная конструкция такого устройства [1] со звуковым или световым сигналом показана на **рис. 1**.

К пружинным контактам 10 припаивают два провода, которые идут к устройству звуковой или световой сигнализации. При настройке или при работе с устройством его берут за нижний корпус, как ручку или карандаш. Настройку устройства на заданное усилие  $20 \pm 2$  Г произво-

дят нижней и верхней втулками. При приложении к игле заданного усилия хвостовик 8 замыкает контакты 10, которые в свою очередь включают звуковую или световую сигнализацию.

При контроле качества сварного соединения иглой устройства касаются боковой поверхности ленточного вывода в месте сварки, при этом иглу располагают под углом 30–60° к поверхности платы. Затем плавно перемещают нижний корпус в направлении иглы до тех пор, пока не услышат звуковой или не увидят световой сигнал. Если при этом отрыва вывода не произошло, то сварное соединение считается качественным. Недостатком данного устройства является то, что к нему нужно изготавливать специальные звуковые или световые устройства, которые сигнализируют достижение заданного усилия нажима на ленточный вывод. В связи с этим автором было разработано устройство [2], основанное на органолептическом методе фиксации достижения заданного усилия (**рис. 2**).

Отличие конструкции нового устройства от устройства, изображенного на **рис. 1**, состоит в том, что в нем исключены верхняя втулка, хвосто-

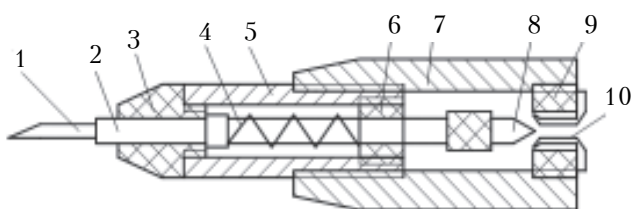


Рис. 1. Устройство со звуковым (световым) сигналом: 1 – игла; 2 – стержень; 3 – наконечник; 4 – пружина; 5 – нижний корпус; 6 – нижняя втулка; 7 – верхний корпус; 8 – хвостовик; 9 – верхняя втулка; 10 – контакты

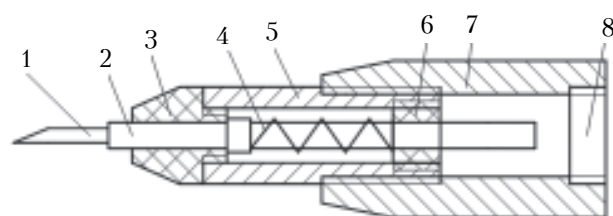


Рис. 2. Устройство, основанное на органолептическом методе:

1 – игла; 2 – стержень; 3 – наконечник; 4 – пружина; 5 – нижний корпус; 6 – втулка; 7 – верхний корпус; 8 – крышка

вик и контакты и добавлена металлическая крышка 8. Настройку на заданное усилие производят перемещением втулки 6. При достижении заданного усилия при настройке устройства или при контроле качества сварного соединения, пальцы ощущают легкий удар стержня 2 о крышку 8, при этом слышен характерный звук удара. Это устройство является относительно недорогим, т. к. оно конструктивно проще, чем предыдущее, и не требует внешних систем сигнализации. Кроме того, оно легко настраивается и надежно в эксплуатации.

Разработанные устройства контроля качества сварных соединений алюминиевых выводов БМ, присоединяемых к КП платы методом ультразвуковой сварки, обладают следующими преимуществами по сравнению с известными методами и устройствами: обеспечивают высокую производительность и достоверность при определении качества сварных соединений; отличаются простотой конструкции, низкой себестоимостью и высокой надежностью при эксплуатации. Немаловажным преимуществом является также то, что контроль выполняется неразрушающим методом.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. А.с. 1589743 СССР. Устройство для контроля качества приварки вводов и выводов микросхем / В. С. Кораблев, В. Г. Спирин., В. З. Гончаров. — 01.05.90. [A.s. 1589743 SSSR. / V. S. Korablev, V. G. Spirin., V. Z. Goncharov. 01.05.90.]

2. Заявка № 4799691. Устройство для контроля качества приварки вводов и выводов микросхем / В. Г. Спирин. —

Решение о выдаче патента РФ от 15.06.92. [Zayavka № 4799691. / V. G. Spirin. Reshenie o vydache patenta RF ot 15.06.92.]

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 17.01 2013 г.*

**Spirin V. G. Devices for quality control of welded joints of leads of packageless chips.**

*Keywords: microassembly, quality control of micro-circuit leads welding.*

The author considers the design and operation of two devices for quality control of welded joints between aluminum leads of packageless microcircuits and contact pads of a thin-film circuit.

Russia, Arzamas polytechnic institute (branch) of the R.E. Alekseev NSTU.

**Спирін В. Г. Пристрої для контролю якості зварних з'єднань виводів безкорпусних мікросхем.**

*Ключові слова: мікроскладання, контроль якості зварювання виводів мікросхем.*

Розглянуто конструкцію та принцип роботи двох пристроїв контролю якості зварних з'єднань алюмінієвих виводів безкорпусних мікросхем з контактними площинками тонкоплівкової плати.

Росія, Арзамаський політехнічний інститут (філія) НГТУ ім. Р. Є. Алексєєва.

#### НОВЫЕ КНИГИ

##### НОВЫЕ КНИГИ



**Митягин А. Ю., Фещенко В. С. Фотоприемники УФ-диапазона на природных алмазах (на английском языке + CD с переводом текста на русский язык).— Одесса: Политехперіодика, 2013.**

В монографии представлены результаты исследований фотоприемников на основе природных алмазов, в частности конструкции, технологии изготовления и результаты тестирования экспериментальных моделей одно- и многоэлементных УФ-фотоприемников. Показана принципиальная возможность создания на основе алмаза высокочувствительных элементов матрицы. В книге также представлены разработки двухканальных алмазных фотоприемников, работающих в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах.

##### НОВЫЕ КНИГИ



**Красников Г. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов.— Москва: Техносфера, 2011.**

Рассмотрены особенности работы субмикронных МОП-транзисторов, направления развития и ограничения применения методов масштабирования транзисторов, требования к подзатворным диэлектрикам, технологии их формирования, различные конструкции стокоисточковых областей МОПТ и технологические процессы создания мелкозалегающих легированных слоев. Рассмотрено влияние масштабирования размеров элементов в субмикронную область и технологических процессов на надежность и долговечность субмикронных МОП-транзисторов. Представлены данные о влиянии технологических процессов изготовления субмикронных СБИС на деградацию подзатворного диэлектрика, а значит — на уровень выхода, надежность и долговечность годных готовых изделий.

УДК 621.315.5

Е. В. АНТОНОВА, к. ф.-м. н. В. Р. КОЛБУНОВ,  
д. ф.-м. н. А. С. ТОНКОШКУР, к. ф.-м. н. А. Ю. ЛЯШКОВ

Украина, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара  
E-mail: vdnv@yandex.ru

## ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ КОМПОЗИТА «ПОЛИЭТИЛЕН — ДИОКСИД ВАНАДИЯ»

*Получены образцы композита «полиэтилен —  $VO_2$ » по технологии изготовления самовосстанавливающихся предохранителей типа polyswitch. Объемная доля диоксида ванадия в образцах изменялась в пределах от 0,25 до 0,6. Показано, что электропроводность композита носит перколяционный характер. Приведены результаты исследования микроструктуры, температурной зависимости сопротивления и вольт-амперных характеристик образцов полимерного композита, а также влияния на них содержания  $VO_2$ .*

**Ключевые слова:** электропроводность, композит, полиэтилен,  $VO_2$ , самовосстанавливающийся предохранитель типа polyswitch.

Разработка стабильных объемных критических терморезисторов на основе компонента с фазовым переходом «металл — полупроводник» (ФПМП) важна для ряда областей электроники и электротехники, где пленочные структуры не могут быть использованы из-за сравнительно малых рабочих токов [1, 2]. Одной из нерешенных до настоящего времени проблем технологии терморезисторов, которая сдерживает их производство и использование, является нестабильность параметров материала. Эта нестабильность связана с изменением линейных размеров образца из-за перестройки кристаллической решетки при ФПМП и с механическим разрушением вследствие этого как структуры керамики в целом, так и отдельных кристаллитов  $VO_2$  [3, 4]. Одним из перспективных направлений преодоления этого недостатка является разработка на основе поликристаллических порошков  $VO_2$  композитов, где в качестве материала матрицы используется эпоксидная смола [5], полиэтилен [5, 6] и политетрафторэтилен (тефлон) [7].

В последнее время достигнуты определенные успехи в исследованиях и технологии изготовления композитов с проводящими наполнителями [8—10], в частности самовосстанавливающихся предохранителей (структур polyswitch) на основе графита или технического углерода в полиэтиленовой матрице [11—13]. Тем не менее, область применения таких материалов может быть существенно расширена, если в качестве наполнителя использовать материалы с ФПМП. Такие структуры, кроме защиты от токовых перегрузок и высоких температур, в перспективе могут реализовать функцию отключения при низких температурах, что важно для электронных

устройств, не предназначенных для эксплуатации при пониженных температурах.

В настоящей работе приведены результаты исследования микроструктуры, температурной зависимости сопротивления и вольт-амперных характеристик образцов полимерного композита и влияния на них содержания  $VO_2$ .

### Образцы для исследований

Исходными компонентами композита были мелкодисперсный кристаллический диоксид ванадия ( $VO_2$ ), полученный методом восстановления из пентаоксида ванадия ( $V_2O_5$ ) углеродом [14], и полиэтилен низкой плотности (15803-020) [15, 16]. Процесс синтеза композита «полиэтилен —  $VO_2$ » проводился по технологической схеме, сходной с технологией изготовления самовосстанавливающихся предохранителей типа polyswitch [17].

Схема включала в себя следующие операции:

- механическое измельчение полиэтилена низкой плотности до размера частиц менее 1 мм;
- смешивание порошка диоксида ванадия с размером частиц менее 20 мкм с измельченным в фарфоровой ступке полиэтиленом;
- прессование шихты под давлением 20 МПа и получение образцов в виде дисков толщиной порядка 1 мм и диаметром 10 мм;
- прогревание полученных дисков при температуре плавления кристаллитов полиэтилена (110—130°C) [15];
- повторное перетирание материала (для улучшения однородности образцов), его прессование под давлением 20 МПа в виде дисков толщиной порядка 1 мм;
- впрессовывание электродов из тонкой медной сетки в образцы;



— прогревание полученных дисков при температуре 110–130°C в течение 1 часа для окончательной формовки и стабилизации механических свойств образцов (не подвергнутые такой обработке образцы композита имели склонность к расслоению при термоциклировании).

### Методика исследований

Теоретическое значение плотности образцов композита  $\rho_x^{(th)}$  определяли из задаваемого значения доли наполнителя (микрочастиц  $VO_2$ )  $v_{VO_2}$ . При этом плотность диоксида ванадия ( $\rho_{VO_2}$ ) принималась равной 4,339 г/см<sup>3</sup>, полиэтилена — 0,92 г/см<sup>3</sup> [16]. Геометрическая плотность синтезированных образцов композита  $\rho_x$  определяли на основе данных об их массе и объеме.

Исходя из предположения о гомогенном распределении наполнителя в объеме полимерной матрицы усредненное расстояние  $L$  между частицами наполнителя можно определить по формуле [18]

$$L = D(1 + (1 - \rho_{VO_2}) / \rho_{VO_2})^{1/3} - D,$$

где  $D$  — средний размер зерен наполнителя.

Для изучения микроструктуры материала образцы охлаждали в жидком азоте, затем производили их механический раскол. На поверхность скола для повышения электропроводности поверхности напыляли тонкий слой углерода. Микрофотографии структуры образцов получали при помощи сканирующего электронного микроскопа.

При исследовании температурных зависимостей скорость изменения температуры  $T$  составляла не более 1°C/мин при точности измерения 0,5°C. Один цикл измерений включал в себя нагрев и охлаждение образца.

Измеряли статические вольт-амперные характеристики (**ВАХ**) образца, помещенного в экранную камеру. Данные регистрировали после установления термодинамического равновесия исследуемого образца с окружающей средой. Чтобы не допустить перегрева образцов, количество удельной теплоты, выделяемой на образцах в единицу времени за счет протекания электрического тока, ограничивалось (не более 300 Дж/см<sup>3</sup>).

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

#### Структура

Микроструктура исследуемых образцов приведена на **рис. 1**. Материал композита представляет собой неоднородную систему, в которой кристаллиты проводящей компоненты —  $VO_2$  — размещаются в матрице изолятора — полиэтилена (**ПЭ**). Размеры частиц диоксида ванадия варьируются от 1–2 до 30 мкм, что соответствует в верхнем пределе размеру зерен  $VO_2$  в

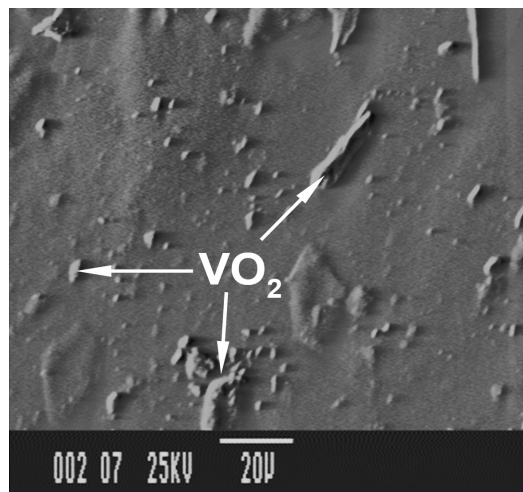


Рис. 1. Микроструктура образца композита «полиэтилен —  $VO_2$ » ( $v_{VO_2}=0,6$ )

исходном материале, который был использован для изготовления композита [14].

В **таблице** представлены некоторые физические параметры исследуемых образцов. Измеряемая геометрическая плотность композитов  $\rho_x$  при малых значениях объемной доли  $VO_2$  больше расчетной  $\rho_x^{(th)}$ , а при больших значениях  $v_{VO_2}$  — наоборот. Эффективные значения плотности полиэтилена  $\rho_{ПЭ}$ , образующего матрицу композита, были оценены в соответствии с формулой для двухкомпонентной гетерогенной системы с невзаимодействующими компонентами:

$$\rho_{ПЭ} = (\rho_x - \rho_{VO_2} v_{VO_2}) / (1 - v_{VO_2})$$

и в предположении, что плотность микрочастиц  $VO_2$  не изменяется в процессе изготовления композита.

При малых значениях  $v_{VO_2}$  эффективная плотность композита превышает максимально возможные значения этого параметра (1 г/см<sup>3</sup> [15, 16]) для чистого полиэтилена, когда он весь находится в кристаллическом состоянии. Это можно связать с образованием поверхностных более плотных фаз [19], что, в соответствии с [20], вероятно для композитов с полупроводниковыми

Физические параметры исследованных композитов и их матричной фазы

Параметр	Объемная доля $VO_2$				
	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60
$\rho_x^{(th)}$ , г/см <sup>3</sup>	1,77	1,94	2,29	2,63	2,97
$\rho_x$ , г/см <sup>3</sup>	2,22	2,36	2,22	2,65	2,80
$L$ , мкм	11,8	9,9	7,1	5,2	3,7
$\rho_{ПЭ}$ , г/см <sup>3</sup>	1,51	1,51	0,81	0,97	0,49

наполнителями. В области больших концентраций наполнителя  $\text{VO}_2$  обнаруживается уменьшение плотности  $\rho_{\text{ПЭ}}$ , значения которой становятся меньше минимального значения этого параметра для чистого ПЭ ( $0,85 \text{ г/см}^3$  [15, 16]), что свидетельствует о значительной пористости полиэтилена, образующего матрицу композита. Это также подтверждается уменьшением плотности полиэтилена матрицы после электротепловой «тренировки» образца при измерении температурных и полевых зависимостей его сопротивления [3].

#### Зависимость электропроводности от объемной доли наполнителя

Характер зависимости удельной электрической проводимости композита  $\sigma_x$  от объемной доли наполнителя имеет вид (рис. 2), наблюдаемый в диэлектриках с проводящими включениями [21].

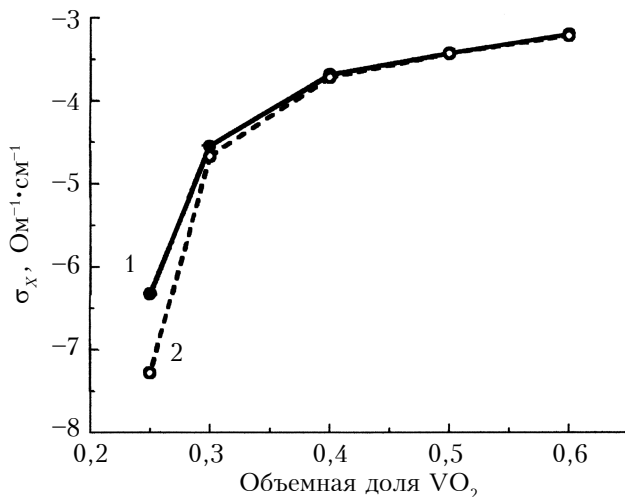


Рис. 2. Зависимость удельной электрической проводимости композита  $\sigma_x$  при температуре  $25^\circ\text{C}$  от объемной доли наполнителя  $v_{\text{VO}_2}$  до (1) и после (2) электротепловой «тренировки»

При значениях объемной доли полупроводникового наполнителя  $v_{\text{VO}_2} \geq 0,4$  удельная электрическая проводимость композита  $\sigma_x$  медленно возрастает до значений, характерных для электропроводности диоксида ванадия [22]. Это соответствует области зависимости  $\sigma_x(v_{\text{VO}_2})$  за порогом протекания. Резкое увеличение электропроводности обнаруживается в области значений объемной доли проводящего наполнителя от 0,2 до 0,3. Таким образом, порог протекания в исследуемой неоднородной системе соответствует известным представлениям перколяционной теории электропроводности [21, 23]. Электротепловая «тренировка» приводит к существенным изменениям только в области значений  $v_{\text{VO}_2}$ , меньших порога протекания.

#### Температурная зависимость удельного электрического сопротивления

На рис. 3, где представлены графики температурной зависимости удельного сопротивления  $\rho$  образцов композита при разных объемных долях фазы диоксида ванадия, видно, что зависимость имеет гистерезисный характер. Это связано со структурными изменениями из-за ФПМП в диоксиде ванадия [3, 4], а также с характером протекания релаксационных процессов деформации в полимерах.

Электрическое сопротивление образцов композитов с объемной долей диоксида ванадия 0,3 испытывает два скачка, так же как и для полимерного композиционного материала на основе  $\text{VO}_2$  и политетрафторэтилена в [5]. Скачок с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления в области температуры  $64^\circ\text{C}$  связан с фазовым переходом «металл — полупроводник» в  $\text{VO}_2$  [22]. Скачок в области температуры  $80 - 90^\circ\text{C}$ , имеющий положительный температурный коэффициент сопротивления (позисторный эффект), может быть интерпретирован так же, как и в структурах polyswitch — разрывом цепей протекания электрического тока по частицам проводящей фазы вследствие резкого увеличения объема полимерной матрицы в указанной температурной области.

Для образца с объемной долей наполнителя  $v_{\text{VO}_2} = 0,6$  позисторный участок не наблюдается. Это может быть интерпретировано в рамках представлений о перколяционной электропроводности [21, 23]. Такое высокое содержание проводящей компоненты соответствует об-

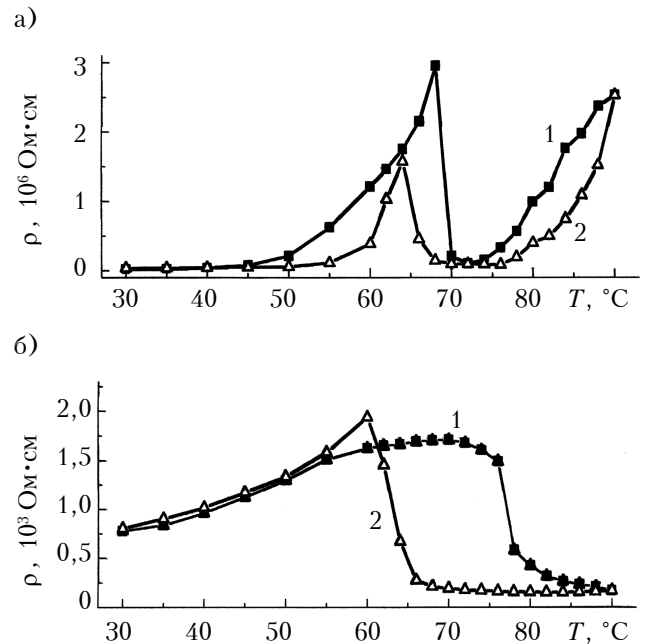


Рис. 3. Температурная зависимость удельного сопротивления образцов композита при  $v_{\text{VO}_2} = 0,3$  (а) и  $v_{\text{VO}_2} = 0,6$  (б) (1 — нагрев образца, 2 — охлаждение)

ласти зависимости электропроводности  $\sigma_x$  от  $v_{VO_2}$  выше порога протекания (см. рис. 2), где характер проводимости в образце определяется самим наполнителем.

#### Вольт-амперные характеристики

Характерной особенностью вольт-амперных характеристик  $J(E)$  исследуемых образцов композита «полиэтилен — диоксид ванадия» является их нелинейность (рис. 4). С ростом прикладываемого напряжения количество теплоты, выделяемой в образце в единицу времени, увеличивается, и он нагревается. При температуре фазового перехода «полупроводник — металл» в фазе  $VO_2$  его сопротивление скачкообразно уменьшается, что ведет к существенному перераспределению электрического поля в такой структуре и обуславливает наблюдаемую нелинейность и S-образность ВАХ.

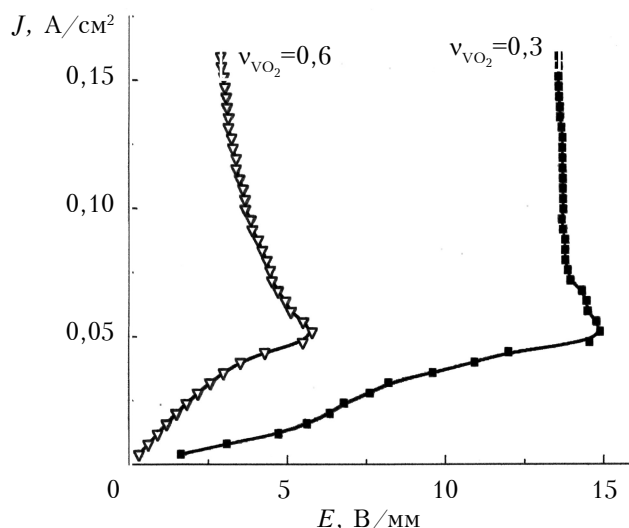


Рис. 4. ВАХ образцов композита с разной объемной долей диоксида ванадия

ВАХ для образца с объемной долей диоксида ванадия  $v_{VO_2}=0,3$  смещена в сторону относительно больших значений напряженности электрического поля. Она в большой степени напоминает ВАХ варистора [24]. По-видимому, в формировании наблюдаемой варисторной ВАХ существенным механизмом также является туннелирование носителей заряда через барьер, сформированный разделяющим кристаллиты  $VO_2$  слоем матричной фазы полиэтилена (или поверхностной фазы [20]) в самом тонком его месте [8].

Мелкокристаллический  $VO_2$  в образце композита с  $v_{VO_2}=0,6$  образует в полимерной матрице перколяционные каналы проводимости, что обуславливает значительное снижение удельного сопротивления (примерно в  $10^3$  раз, см. рис. 3), а также смещение вольт-амперной характеристики в сторону меньших значений напряженности электрического поля (рис. 4).

#### Заключение

В результате исследования композита «полиэтилен —  $VO_2$ » с разным содержанием  $VO_2$ , полученных по технологии, сходной с технологией изготовления самовосстанавливающихся предохранителей типа polyswitch, было обнаружено, что электропроводность образцов носит перколяционный характер.

При изучении механизма токопереноса в композите установлено, что электрическое сопротивление образцов скачкообразно уменьшается в области температуры фазового перехода «полупроводник — металл» в диоксиде ванадия. Для образцов, у которых объемная доля  $VO_2$  была меньше порога протекания, обнаружено увеличение сопротивления при температуре около  $90^\circ\text{C}$  вследствие резкого увеличения объема полимерной матрицы с ростом температуры.

Установлено, что с ростом содержания поликристаллических частиц  $VO_2$  ВАХ композита изменяют форму от близкой к варисторной до S-образной.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Jakub A. Koza, Zhen He, Miller Andrew S., Jay A. Resistance switching in electrodeposited  $VO_2$  thin films // Chemistry of Materials. — 2011. — Vol. 23, Iss. 18. — P. 4105–4108. — DOI: 10.1021/cm2019394.
2. Yang Zheng, Hart Sean, Ko Changhyun et al. Studies on electric triggering of the metal-insulator transition in  $VO_2$  thin films between 77 K and 300 K // J. Appl. Phys. — 2011. — 110 (3). — P. 033725. — DOI: 10.1063/1.3619806.
3. Bruckner W., Opperman H., Reihelt W. et al. Vanadiumoxide: Darstellung, Eigenschaften, Anwendung. — Berlin: Akademie-Verlag, 1983.
4. Ivon A. I., Kolbunov V. R., Chernenko I. M. Stability of electrical properties of vanadium dioxide based ceramics // J. Eur. Ceram. Soc. — 1999. — Vol. 19. — P. 1883–1888. — DOI: 10.1016/S0955-2219(98)00285-4.
5. Pan Y., Wu G. Z., Yi X. S. Artificial thermistors prepared by incorporating  $V_2O_5$  and  $VO_2$  into polymer matrices // Proc. of International Conf. on Electronic Ceramics & Applications. «Electroceramics V». — Aveiro, Portugal. — 1996. — Book 2. — P. 195.
6. Kerimov M. K., Kurbanov M. A., Sultanahmedova I. S. et al. Varistor effect in polymer-semiconductor composites // Semiconductors. — 2010. — Vol. 44, N 7. — P. 934–942. — DOI: 10.1134/S1063782610070134.
7. Turov V. V., Gorbik P. P., Ogenko V. M. et al. Influence of tetraethylammonium bromide on phase inhomogeneity of disperse vanadium dioxide particles in matrix of polyethylene glycol // Applied Surface Science. — 2000. — Vol. 166. — P. 492–496. — DOI: 10.1016/S0169-4332(00)00481-5.
8. Mamunya Ye. P., Davydenko V. V., Pissis P., Lebedev E. V. Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders // European Polymer Journal. — 2002. — Vol. 38. — P. 1887–1897. — DOI: 10.1016/S0014-3057(02)00064-2.
9. Aneli J., Zaikov G., Mukbaniani O. Physical principles of the conductivity of electrical conducting polymer composites (review) // Molecular Crystals and Liquid Crystals. — 2012. — Vol. 554. — N 1. — P. 167–187. — DOI:10.1080/15421406.2012.633866.
10. A. B. Glot A. B., Makeev A. M. Non-linear electrical characteristics of composite layers conductor-dielectric //

Physics and Chemistry of Solid State. — 2001. — Vol. 2, N 3. — P. 375—378.

11. Pat. 19970130 US5747147. Conductive polymer composition and device / M. F. Wartenberg, J. G. Lahlouh, James Toth. — 05.05.1998.

12. Pat. 19960319 TW538416. Conductive polymer compositions and method of making the conductive polymer composition / M. F. Wartenberg, J. G. Lahlouh, James Toth. — 21.06.2003.

13. Degtyar'ov A. V., Tonkoshkur A. S., Lyashkov A. Yu. Electrical properties of posistor composite materials based on polyethylene-graphite // Multidiscipline Modeling in Materials and Structures. VSP. — 2006. — Vol. 2. — N 4. — P. 435—441.

14. Деклар. пат. 40041 А України. Спосіб одержання діоксиду ванадію / О. І. Івон, І. М. Черненко, В. Р. Колбунов. — 2001. — Бюл. № 6. [Deklar. pat. 40041 A of Ukraine / O. I. Ivon, I. M. Chernenko, V. R. Kolbunov. 2001. Byul. N 6]

15. Peacock A. J. Handbook of Polyethylene: Structures, Properties and Applications (Plastics Engineering). — New York-Basel: Marcel Dekker. Inc., 2000.

16. ГОСТ 16337-77. Полиэтилен низкой плотности. [GOST 16337-77]

17. Degtyar'ov A. V., Tonkoshkur A. S. Electric conductivity of PTCR polyethylene-graphite composites // Ukrainian Journal of Physics. — 2007. — Vol. 52. — N 9. — P. 863—867.

18. Shandryuk G. A., Matukhina E. V., Vasil'ev R. B. et al. Effect of H-bonded liquid crystal polymers on CdSe quantum dot alignment within nanocomposite // Macromolecules. — 2008. — Vol. 41, Iss. 6. — P. 2178—2185. — DOI: 10.1021/ma701983y.

19. Mamunya E. P., Davidenko V. V., Lebedev E. V. Effect of polymer-filler interface interactions on percolation conductivity of thermoplastics filled with carbon black // Composite Interfaces. — 1996. — Vol. 4. — N 4. — P. 169—176. — DOI: 10.1163/156855497X00145.

20. Fistul V. I., Polyanskaya T. A. Percolation of the current in a polymer-semiconductor structure // Semiconductors. — 1993. — Vol. 27. — N 11/12. — P. 984—987.

21. Kirkpatrick S. Percolation and conduction. I. Transport theory of percolation processes // Rev. Mod. Phys. — 1973. — Vol. 45. — P. 574—588. — DOI: 10.1103/RevModPhys.45.574.

22. Berglund C. N., Guggenheim H. J. Electronic properties of VO<sub>2</sub> near the semiconductor-metal transition // Physical Review. — 1969. — Vol. 185. — N 3. — P. 1022—1033. — DOI: 10.1103/PhysRev.185.1022.

23. Shklovskii B. I., Efros A. L. Electronic properties of doped semiconductors. — Berlin: Springer-Verlag, 1983.

24. Gupta T. K. Application of zinc oxide varistors // Journal of American Ceramic Society. — 1990. — Vol. 73

(7). — P. 1817—1840. — DOI: 10.1111/j.1151-2916.1990.tb05232.x.

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 27.05 2013 г.*

Antonova E. V., Kolbunov V. R., Tonkoshkur A. S., Lyashkov A. Yu. **Electrical conductivity of the «polyethylene — vanadium dioxide» composite.**

*Keywords: electrical conductivity, composite, polyethylene, VO<sub>2</sub>, self-healin polyswitch fuse.*

Samples of the «polyethylene — VO<sub>2</sub>» composite have been obtained using technologies for manufacturing self-healing polyswitch fuses. The volume fraction of vanadium dioxide in the samples ranged from 0,25 to 0,6. It is shown that the electrical conductivity of the composite is of percolation character. The paper presents research results of the microstructure, the resistance temperature dependence and current-voltage characteristics of polymer composite samples, as well as the impact of the VO<sub>2</sub> content on the samples.

Ukraine, Oles Gonchar Dnepropetrovsk National University.

Антонова Є. В., Колбунов В. Р., Тонкошкур А. С., Ляшків А. І. **Електропровідність композиту «поліетилен — діоксид ванадію».**

*Ключові слова: електропровідність, композит, поліетилен, VO<sub>2</sub>, самовідновлюваний запобіжник типу polyswitch.*

Отримано зразки композиту «поліетилен — VO<sub>2</sub>» за технологією виготовлення самовідновлюваних запобіжників типу polyswitch. Об'ємна частка діоксиду ванадію в зразках змінювалася в межах від 0,25 до 0,6. Показано, що електропровідність композиту носить перколяційний характер. Наведено результати дослідження мікроструктури, температурної залежності опору і вольт-амперних характеристик зразків полімерного композиту, а також впливу на них змісту VO<sub>2</sub>.

Україна, Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара.



## РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

- Барабанов Николай Алексеевич*, старший преподаватель, Одесский национальный политехнический университет
- Белявский Евгений Данилович*, докт. физ.-мат. наук, профессор, НТУУ «Киевский политехнический институт»
- Глушеченко Эдуард Николаевич*, канд. техн. наук, начальник отдела, Научно-производственное предприятие «Сатурн», г. Киев
- Данилов Владимир Васильевич*, докт. техн. наук, заведующий кафедрой, Донецкий национальный университет
- Дружинин Анатолий Александрович*, докт. техн. наук, профессор, Национальный университет «Львовская политехника»
- Евтух Анатолий Анатольевич*, докт. физ.-мат. наук, заведующий отделом, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев
- Ключник Николай Тимофеевич*, канд. техн. наук, начальник отдела, ЦНИТИ «Техномаш-ВОС», г. Москва
- Козловский Сергей Иванович*, докт. физ.-мат. наук, заведующий отделом, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев
- Марьянчук Павел Дмитриевич*, докт. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой, Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича
- Николаенко Юрий Егорович*, докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник, НТУУ «Киевский политехнический институт»
- Панов Леонид Иванович*, канд. техн. наук, профессор, Одесский национальный политехнический университет
- Перевертайло Владимир Леонтьевич*, канд. физ.-мат. наук, зам. директора по научной работе, НИИ микроприборов НТК «ИМК» НАНУ, г. Киев
- Проценко Иван Ефимович*, докт. физ.-мат. наук, профессор, Сумский государственный университет
- Спирин Владимир Георгиевич*, докт. техн. наук, Арзамасский политехнический институт, филиал Нижегородского технического университета им. Р. Е. Алексеева
- Томашик Василий Николаевич*, докт. хим. наук, ученый секретарь, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев
- Старжинский Николай Григорьевич*, докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, г. Харьков
- Шинкаренко Владимир Викторович*, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев



тел./факс +38(057) 758-70-30,  
758-70-29, 758-72-30

[www.expos.com.ua](http://www.expos.com.ua)

## 16-я специализированная выставка 8—10 октября 2013 г.



**Контрольно-измерительные  
приборы**



**Электроника. Информатика.  
Связь**



**Энергетика. Электротехника.  
Энергосбережение**

**ПВЦ «Радмир Экспохолл»  
(г. Харьков ул. Академика Павлова, 271)**

*Номер готовили  
Арзамас, Днепропетровск, Донецк,  
Киев, Львов, Москва, Одесса, Сумы,  
Харьков, Черновцы*



Пишите  
Подписывайтесь  
Читайте