

ГОРБУНОВ Д.С., НИЩЕВ К.Н., НОВОПОЛЬЦЕВ М.И., МИШКИН В.П.
ПРИМЕНЕНИЕ РЭМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И АДГЕЗИОННЫХ
СВОЙСТВ СПЕЧЕННЫХ СЛОЕВ СЕРЕБРОСОДЕРЖАЩИХ ПАСТ¹

Аннотация. В статье представлены результаты исследования микроструктуры и адгезионных свойств спеченных слоев серебрясодержащих паст (СП), применяемых в технологиях производства силовых полупроводниковых приборов для низкотемпературного соединения электрически активной кремниевой структуры (КС), содержащей *p-n*-переходы, с молибденовым термокомпенсатором (МТ). Микроструктура границ между спеченным слоем СП и металлизированными поверхностями КС и МТ, а также границы между спеченным слоем СП и поверхностью механически отслаиваемой тестовой полосы исследовалась путем анализа РЭМ-изображений, полученных с помощью РЭМ Quanta 200i 3D FEI.

Ключевые слова: силовые полупроводниковые приборы, серебрясодержащая паста, спекание, растровая электронная микроскопия, адгезия, *L*-отслаивание.

GORBUNOV D. S., NISHCHEV K. N., NOVOPOLTSEV M. I., MISHKIN V. P.,
THE USE OF SEM TO STUDY THE STRUCTURE AND ADHESIVE PROPERTIES
OF SILVER-CONTAINING PASTE SINTERED LAYERS

Abstract. The article presents the results of a study of the microstructure and adhesive properties of silver paste sintered layers (SP) used in power semiconductor devices for low-temperature electrically active silicon structure (CS) containing *pn*-junctions with molybdenum temperature compensator (MT). The microstructure of the boundaries between the sintered layer and the metallized surfaces of the COP and the MT as well as the border between the sintered layer and the surface of mechanically peel test strip was investigated by analyzing the SEM images obtained by SEM Quanta 200i 3D FEI.

Keywords: power semiconductor devices, silver-containing paste, sintering, scanning electron microscopy, adhesion, *L*-peel.

Разработка новых технологий, обеспечивающих повышение надежности силовых полупроводниковых приборов (СПП), является актуальной задачей силовой электроники.

¹ Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н.П. Огарева» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по договору № 02.G25.31.0051 в рамках реализации Постановления Правительства РФ от 9.04.2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Надежность СПП, работающих в условиях циклических нагрузок, в значительной степени определяется технологией межэлементных соединений в приборах. Эффективной технологией получения межэлементных соединений в СПП является низкотемпературное спекание серебросодержащих паст (Low-Temperature Joint Technique – *LTJT*) [1–4]. Процесс *LTJT* представляет собой технологический способ соединения кремниевой структуры (КС), содержащей *p-n*-переходы, с молибденовым термокомпенсатором (МТ). Процесс осуществляется посредством спекания (sintering) специальных серебросодержащих паст (СП) при воздействии температуры и давления. Получаемая в результате спекания структура КНМ (кремний на молибдене) является основным активным элементом, определяющим выходные электрические и тепловые параметры СПП. Термокомпенсатор служит для передачи тепловых потерь от кремниевой структуры к охладителю. Коэффициент теплового расширения материала, из которого он изготовлен, должен быть близким к соответствующему коэффициенту кремния во всем диапазоне рабочих температур.

Надежность силовых полупроводниковых приборов на основе структур КНМ в значительной степени зависит от сплошности границ раздела спеченного слоя СП и слоев металлизации КС и МТ. В связи с этим в данной работе были проведены исследования микроструктуры поверхности поперечных шлифов структур КНМ. С целью отработки методики РЭМ изображения поверхностей шлифов были получены с использованием стандартного детектора вторичных электронов (ETD) (рис.1а) и детектора обратно отраженных электронов (BSED) (рис.1б).

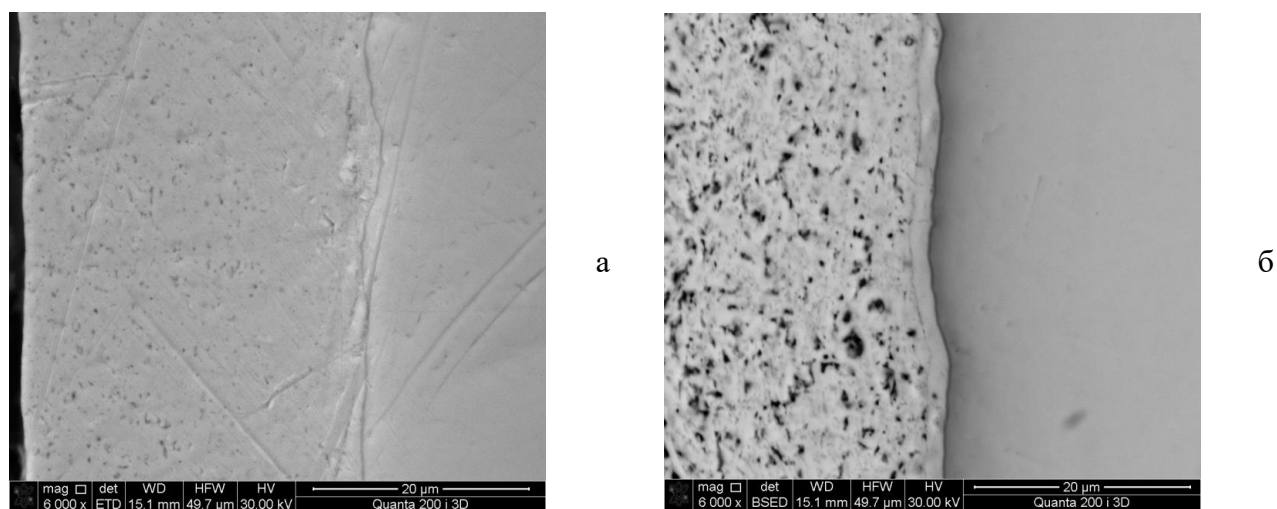


Рис. 1. РЭМ-изображения границы раздела между спеченным слоем серебросодержащей пасты и металлическими слоями структуры КНМ: (а) – детектор вторичных электронов (ETD); (б) – детектор обратно отраженных электронов (BSED). Ускоряющее напряжение $U_{\text{уск}} = 30$ кВ, увеличение – 6000.

Из сравнения полученных изображений следует, что для исследования сплошности границ раздела в структурах КНМ, наиболее оптимальным является режим регистрации обратно отраженных электронов с использованием детектора BSED, чувствительному к Z-номеру исследуемых материалов (Z-контраст). В отличие от детектора BSED детектор вторичных электронов (ETD) позволяет хорошо выявить топографические особенности исследуемой поверхности. С помощью BSED-детектора отчетливо выявляются границы всех металлических слоев, составляющие данную структуру (рис. 2).

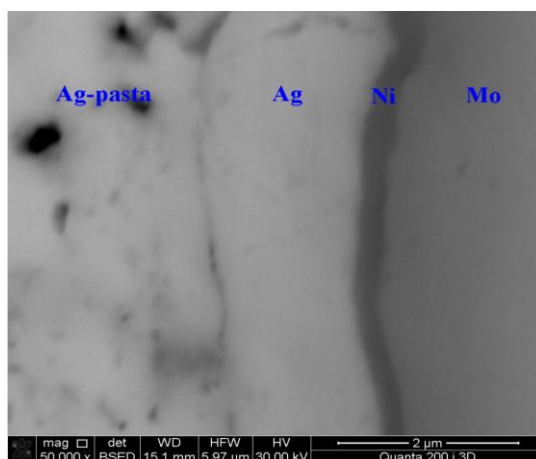


Рис. 2. РЭМ-изображение металлических слоев в структуре КНМ, полученное с помощью детектора BSED.

Ускоряющее напряжение $U_{\text{уск}} = 30$ кВ, увеличение – 50000.

В результате анализа РЭМ-изображений границы между слоем никеля и молибдена выявлено, что на всей длине границы отсутствуют какие-либо значительные дефекты (рис.3), слой никеля хорошо ложится на поверхность молибдена, повторяя ее морфологию данной поверхности (рис.3а).

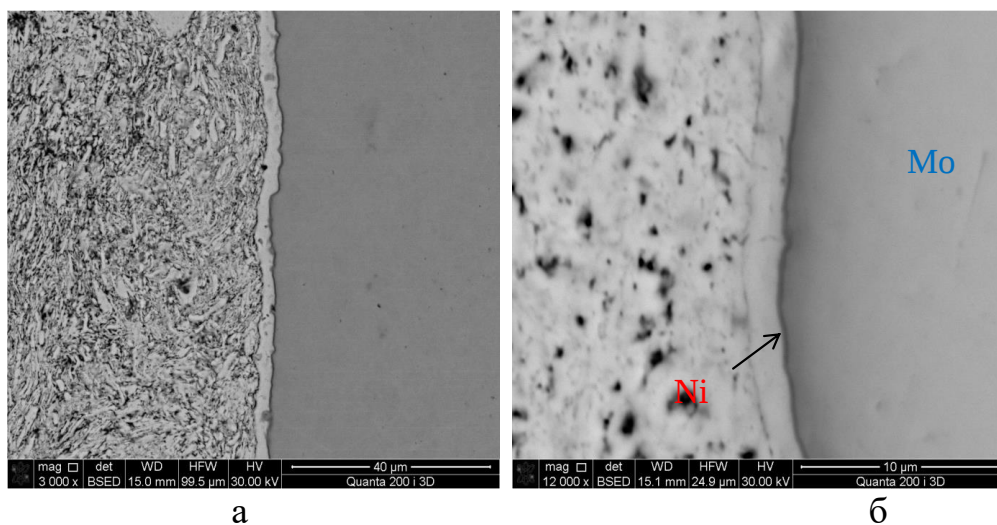


Рис. 3. РЭМ-изображения границы раздела «никель – молибден». Увеличение (а) – 3000; (б) – 12000.

При исследовании структур КНМ как на торцах, так и на изломах [9] визуализируется пористая структура спеченного слоя серебрясодержащей пасты (рис. 4).

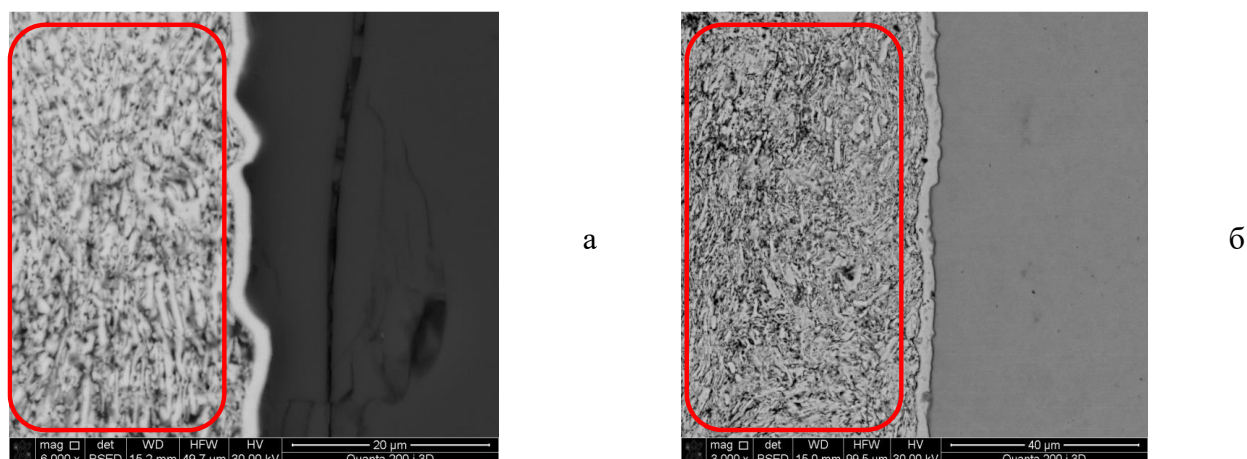


Рис. 4. Пористая структура спеченного слоя серебрясодержащей пасты, выявленная на торце: (а) – со стороны Si; (б) – со стороны Mo.

Механическая прочность структур КНМ в значительной степени определяется адгезионными свойствами спеченного слоя СП. Для повышения адгезии соединяемые путем низкотемпературного спекания поверхности КС и МТ металлизировались [5; 6].

Адгезионные характеристики спеченных слоев СП существенно зависят от технологических условий процесса спекания. Для измерения адгезионной прочности применяют методы, при которых отделение пленки от подложки производят при воздействии статической или динамической нагрузки. В зависимости от способа нарушения адгезионных связей различают равномерный отрыв, неравномерный отрыв и сдвиг. В случае неравномерного отрыва (отслаивания) нагрузка прилагается лишь к части образца и нарушение контакта между пленкой и подложкой распространяется последовательно по его поверхности. В этом случае адгезионная прочность определяется отношением силы отрыва к ширине отслаиваемой пленки и связана с работой изотермического отрыва единицы площади пленки. Методы отслаивания в большинстве случаев дают более реальную оценку адгезии, чем методы равномерного отрыва. В зарубежной литературе отслаивание пленки от жесткой подложки под прямым углом к ней называют методом *L*-отслаивания [5; 7], а расслаивание двух тонких соединенных между собой пленок – методом *T*-отслаивания [8].

В данной работе исследовались микроструктурные особенности поверхностей МТ и ТП после *L*-отслаивания спеченного слоя СП структуры КНМ при различных режимах спекания. Отслаивание спеченного слоя проводили на испытательной машине SHIMADZU AG 100 KNX. В испытаниях на металлизированную поверхность МТ через сетчатый

трафарет наносился слой СП, на который помещалась гибкая посеребренная медная тестовая полоса толщиной 100 мкм и шириной 5 мм, затем полученная конструкция подвергалась горячему прессованию. РЭМ-изображения области отрыва тестовой полосы были получены на РЭМ Quanta 200 I 3D в высоком вакууме при ускоряющем напряжении 30 кВ.

На рисунке 5 представлено РЭМ-изображение поверхности высушенного слоя СП нанесенной на поверхность МТ через сетчатый трафарет. На данном изображении четко выявляется периодический рельеф характеристики которого соответствуют геометрическим параметрам трафарета.

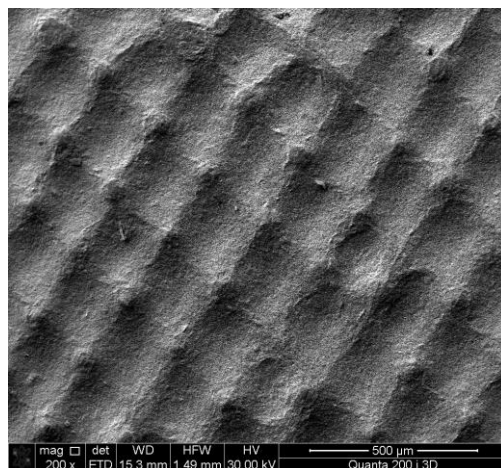


Рис. 5. РЭМ-изображение поверхности слоя СП, высушенного перед спеканием.

После процедуры L-отслаивания на большей части поверхности МТ спеченный слой СП отсутствовал (рис.6), что указывает на более высокую адгезию слоя с посеребренной поверхностью тестовой полосы по сравнению с адгезией с металлическим покрытием МТ.

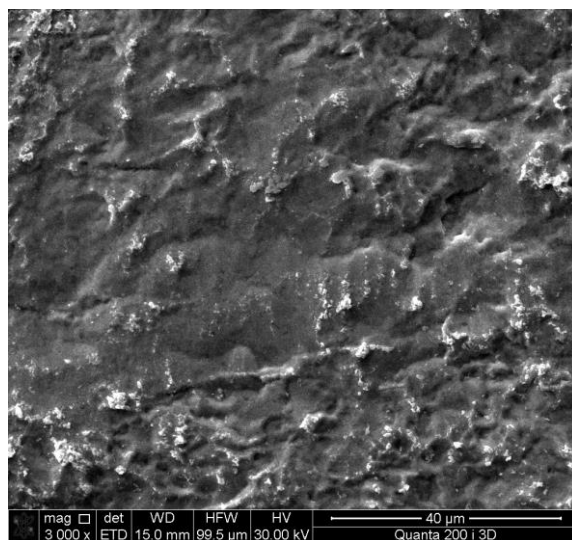


Рис. 6. РЭМ-изображение фрагмента поверхности МТ после испытания путем L-отслаивания. Увеличение – 3000.

На рисунке 7 приведены изображения поверхности молибденового компенсатора (МТ) (рис.7а) и сопряженной поверхности тестовой полосы (ТП), используемой в испытаниях на отслаивание (рис.7б). На данных изображениях выявлены элементы периодической структуры, расположение которых соответствует профилю поверхности слоя СП до спекания. Вместе с тем на поверхности МТ после L-отслаивания были выявлены отдельные остаточные фрагменты спеченного слоя СП размерами менее 100 мкм (рис.7–9).

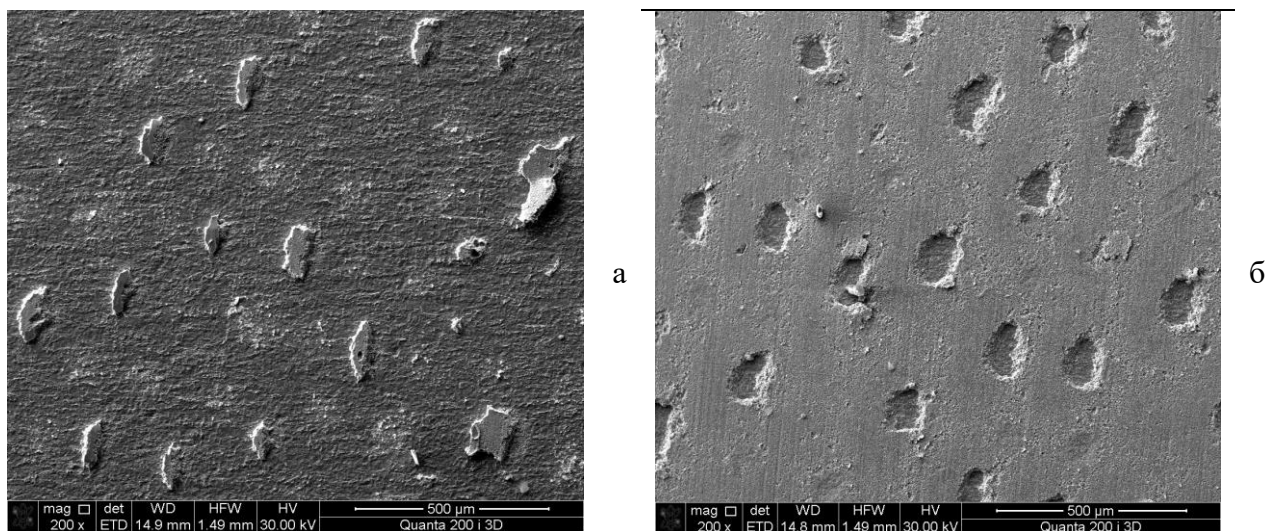


Рис. 7. РЭМ-изображения участка поверхности МТ (а) и сопряженного участка поверхности ТП (б) после испытания путем L-отслаивания.

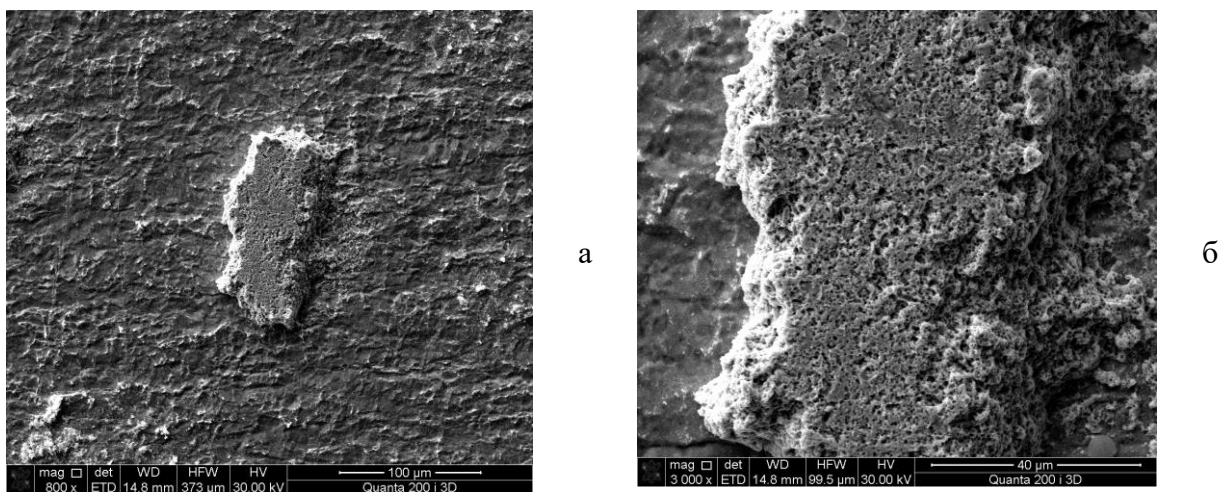


Рис. 8. РЭМ-изображение поверхности МТ после отслаивания: (а) – увеличение 800; (б) – увеличение 3000.

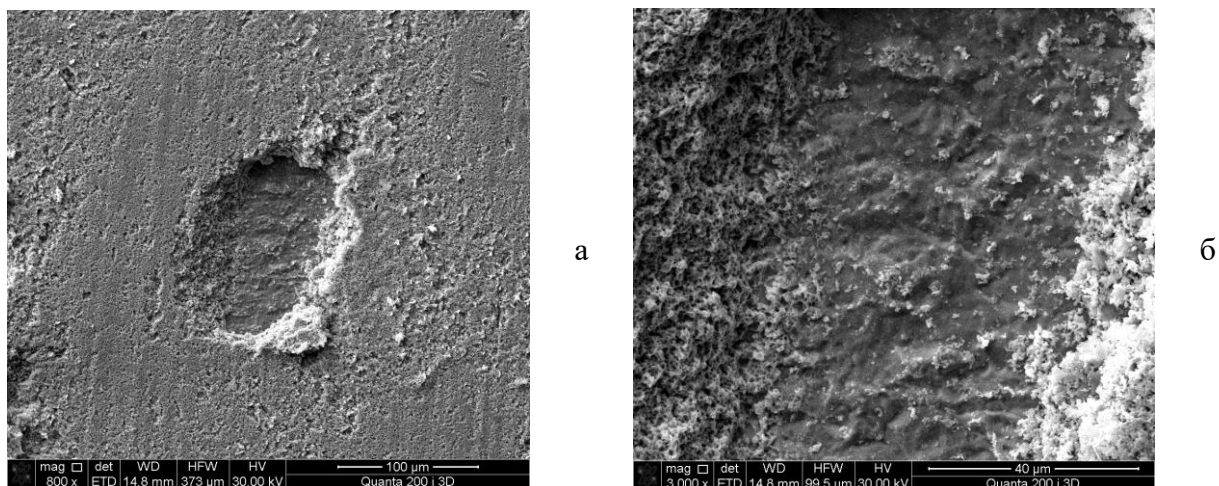


Рис. 9. РЭМ-изображение поверхности ТП после отслаивания: (а) – увеличение 800; (б) – увеличение 3000.

Происхождение данных фрагментов может быть обусловлено формой поверхности СП перед спеканием. При горячем прессовании образцов локальное давление внутри возвышающихся участков поверхности СП превышает локальное давление внутри впадин. Вследствие этого на возвышающихся участках адгезия СС СП с МТ превышает адгезию с ТП и на поверхности МТ при отслаивании остаются фрагменты СС. В результате низкого локального давления во впадинах поверхности СП адгезия СС СП с МТ оказывается ниже, чем с ТП и СС СП после отслаивания остается на поверхности ТП. В результате проведенных экспериментов установлено, что для достижения высокой адгезии СС СП с покрытием МТ при спекании структур КНМ необходимо использовать при спекании наиболее высокие значения давления и температуры в заданных интервалах изменения этих параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fellenger J., Baumgartner W. Patentschrift DE 3414065 C2. – Deutsches Patentamt, 1989.
2. Schwarzbauer H. Europäische Patentschrift EP 0 242 626 B1. – Europäisches Patentamt, 1991.
3. Schwarzbauer H., Kuhnert R. Novel Large Area Joining Technique for Improved Power Device Performance // IEEE Trans. Ind. Appl. – 1991. – Vol. 27. – No. 1. – P. 93.
4. Scheuermann U., Wiedl P. Low Temperature Joining Technology – a High Reliability Alternative to Solder Contacts // Workshop on Metal Ceramic Composites for Functional Applications. – Wien, 1997. – pp.181–192.
5. Mertens C. Die Niedertemperatur-Verbindungstechnik der Leistungselektronik // Fortschrittberichte: VDI-Verlag, Düsseldorf, 2004. – 141 s.

6. Нищев К. Н. Исследования свойств многослойной металлизации структур «кремний на молибдене», полученной методом магнетронного распыления // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2013. – № 3. – С. 248–260.
7. DIN 53287-2006 Testing of adhesives for metals and adhesively bonded metal joints - Determination of the resistance to liquids.
8. DIN 53282-1979 Testing of adhesives for metals and adhesively bonded metal joints; T-peel test.
9. Нищев К. Н. Исследование низкотемпературного спекания серебрясодержащих паст методом растровой электронной микроскопии // Прикладная физика – 2015. – № 3. – С. 10–14.