

К. Н. Нищев, М. И. Новопольцев,
Б. Ф. Мамин, В. В. Елисеев, В. А. Мартыненко

ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОРИСТОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ¹

Аннотация

Актуальность и цели. Эксплуатационные характеристики и надежность силовых полупроводниковых приборов (СПП) определяются как качеством электрически активного полупроводникового элемента, так и свойствами материала термокомпенсатора (ТК), обеспечивающего снижение уровня термомеханических напряжений в конструкции прибора. ТК, являясь одним из электродов СПП, служит также для отвода тепла, выделяющегося в процессе эксплуатации прибора. Исследования, направленные на поиск новых материалов, обеспечивающих необходимый комплекс функциональных характеристик ТК, являются актуальными. Проведенными ранее исследованиями установлено, что перспективными материалами ТК СПП могут быть металломатричные композиционные материалы (МКМ). Важнейшим параметром, определяющим функциональные характеристики ТК из МКМ, является пористость композиционного материала. Целью работы является исследование возможностей рентгеновской микротомографии для получения информации о распределении пористости в МКМ, применяемых для изготовления ТК СПП.

Материалы и методы. Метод рентгеновской микротомографии был применен для исследования пористости ТК СПП, изготовленных из металломатричного композиционного материала AlSiC. Эксперименты проводились с применением рентгеновского микротомографа SkyScan 1172.

Результаты. Предложен метод анализа распределения пористости в МКМ, применяемых для изготовления ТК СПП, основанный на математической обработке функции распределения вокселей микротомограмм исследуемых образцов по рентгеновской плотности. Проведены исследования распределения микропористости в термокомпенсаторах СПП, изготовленных из МКМ AlSiC. Установлено, что микропористость в центральной области ТК существенно выше, чем на его периферии, что объясняется недостаточным качеством пропитки центральных областей пористой заготовки МКМ расплавом матричного алюминиевого сплава.

Ключевые слова: силовые полупроводниковые приборы, термокомпенсатор, композиционные материалы, пористость, рентгеновская микротомография.

К. Н. Nishchev, M. I. Novopol'tsev,
B. F. Mamin, V. V. Eliseev, V. A. Martynenko

¹ Работа выполнена в ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарева» при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки России) в рамках договора № 02.G25.31.0213 между ОАО «Электровыпрямитель» и Минобрнауки РФ об условиях предоставления и использования субсидии на реализацию комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения.

APPLICATION OF X-RAY MICROTOMOGRAPHY FOR RESEARCHING POROSITY OF COMPOSITE MATERIALS IN POWER ELECTRONICS

Abstract.

Background. Operating performance and reliability of power semiconductor devices (PSD) can be attributed to the quality of an electrically active semiconductor element, as well as to the properties of thermal compensator's (TC) material, which reduces thermomechanical stress in the device's design. TC, being one of the PSD's electrodes, also serves to remove the heat, generated during operation of the device. Researches, devoted to finding new materials providing a necessary range of TC functional characteristics, are of high relevance. Previous researches have found that promising TC materials can be composed of metal-composite materials (MCM). The most important parameter in determining the MCM TC's functional characteristics is the porosity of a composite material. Therefore, the objective of the paper is to examine X-ray microtomography possibilities to obtain data on distribution of porosity in the MCMs, used in PSD's TC.

Materials and methods. The X-ray microtomography method was used to study the porosity of TC's material, made of a metal matrix composite AlSiC. The experiments were performed using an X-ray microtomograph SkyScan 1172.

Results. The paper presents the method of analysis of porosity distribution in MCMs, based on mathematical treatment of the distribution function of microtomogram voxels in test samples in X-ray density. The authors carried out the research of microporosity distribution in PSD's temperature compensators, composed of MCM AlSiC. It has been found that the microporosity in the TC's central region is significantly higher than in its periphery, which can be attributed to insufficient impregnation of central regions in a porous MCM preform by a molten aluminum matrix alloy.

Key words: power semiconductor devices, temperature compensator, composite materials, porosity, X-ray microtomography.

Введение

Одним из ключевых элементов конструкции силовых полупроводниковых приборов (СПП) является термокомпенсатор (ТК), который обеспечивает снижение уровня термомеханических напряжений, возникающих из-за разности коэффициентов линейного термического расширения применяемых материалов. Наряду с данной функцией ТК служит для отвода тепла, выделяющегося в процессе эксплуатации прибора, а также является электродом СПП. Эксплуатационные характеристики и надежность СПП существенно зависят как от качества электрически активного полупроводникового элемента, так и от свойств материала ТК. Результаты ранее проведенных исследований [1–3] дают основание считать, что перспективными материалами ТК СПП могут быть металломатричные композиционные материалы (МКМ). Важнейшим параметром, определяющим функциональные характеристики ТК из МКМ, является пористость композиционного материала.

Эффективным методом исследования пористой структуры композиционных материалов может быть рентгеновская микротомография, позволяющая реконструировать объемное изображение исследуемого образца из набора рентгеновских теневых проекций, зарегистрированных при его вращении.

Целью работы является исследование возможностей рентгеновской микротомографии для анализа распределения пористости в МКМ, применяемых для изготовления ТК СПП.

1. Сущность метода определения микропористости композиционных материалов

Реконструированное объемное микротомографическое изображение образца исследуемого композиционного материала представляет собой совокупность вокселей, имеющих различные значения уровня серого. Для каждого вокселя томограммы его уровню серого соответствует определенное значение линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения (рентгеновской плотности) соответствующей области исследуемого образца. Гистограмма зависимости относительного числа вокселей от уровня серого представляет собой функцию распределения вокселей по их рентгеновской плотности.

Из анализа формы функции распределения вокселей по рентгеновской плотности может быть получена информация о равномерности распределения неоднородностей в исследуемом образце, включая микропоры. Если исследуемый образец состоит из однородного по рентгеновской плотности материала, содержащего внутри только случайно распределенные включения с отличающейся рентгеновской плотностью и размерами, не превышающими разрешение микротомографа, то измеренная функция распределения вокселей будет иметь гауссову форму. При этом ширина распределения будет характеризовать равномерность распределения таких неоднородностей в объеме исследуемого образца. Наличие микропор с размерами выше предела разрешения микротомографа приведет к искажению левого склона функции распределения Гаусса. Данное искажение проявляется в превышении измеренных значений функции по отношению к кривой Гаусса. Аналогично, по искажениям правого склона функции распределения можно определять объемную долю беспористых микрообластей исследуемого образца. Если данные искажения функции распределения описываются гауссианами, то микропоры и беспористые микрообласти случайным образом распределены по объему образца и их размеры случайны. Обработав по методу наименьших квадратов (МНК) полученную в эксперименте функцию распределения, можно определить значение объемной доли микропор в исследуемом образце.

В настоящей работе данные подходы использованы для исследования распределения микропористости в МКМ, применяемых для изготовления термокомпенсаторов силовых полупроводниковых приборов.

2. Образцы и результаты эксперимента

Эксперименты проводились с использованием рентгеновского микротомографа SkyScan 1172, имеющего предельное разрешение около 1 мкм. Были исследованы термокомпенсаторы диаметром 100 и толщиной 5 мм из металломатричного композитного материала AlSiC, полученного методом вакуумно-компрессионной пропитки [4–5]. Исследуемые образцы пористых заготовок термокомпенсаторов имели вид цилиндров диаметром 5 и высотой 50 мм. Образцы самих термокомпенсаторов представляли собой прямоуголь-

ные параллелепипеды с размерами $5 \times 5 \times 50$ мм, вырезанные вдоль радиуса термокомпенсатора.

На рис. 1 приведены типичные рентгеновские микротомографические сечения образца пористой заготовки ТК.

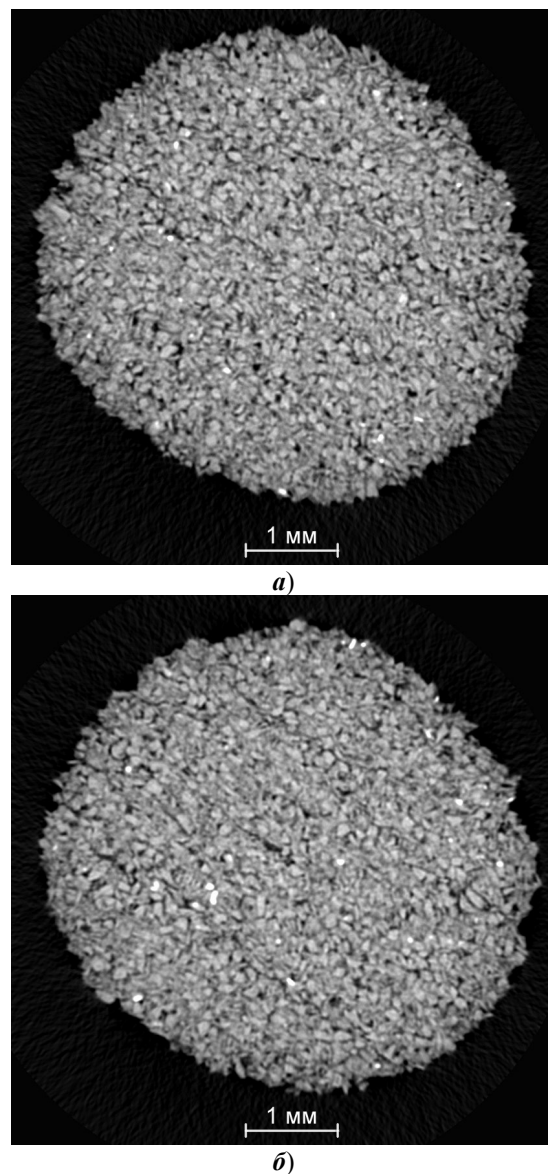


Рис. 1. Типичные рентгеновские микротомографические сечения образца пористой заготовки термокомпенсатора

На рис. 2 точками изображены измеренные значения функции распределения вокселей по рентгеновской плотности для пористой заготовки термокомпенсатора. Здесь же приведены результаты их математической обработки по МНК двумя кривыми Гаусса 1 (синие кривые) и суммарная огибающая 2 (красная кривая). Из рис. 2 следует, что суммарная огибающая двух гауссианов практически совпадает с результатами эксперимента. Это свиде-

тelleствует о том, что микропоры распределены по объему пористой заготовки равномерно. Суммарная объемная пористость пор с размерами более 1 мкм составила $(8,7 \pm 0,9) \%$.

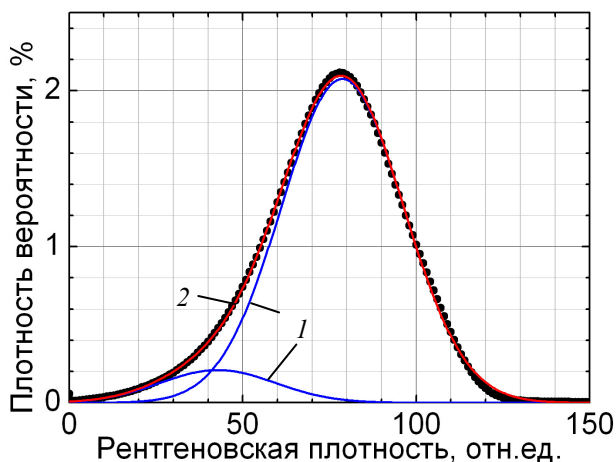


Рис. 2. Измеренная функция распределения вокселей по рентгеновской плотности для пористой заготовки термокомпенсатора и результаты ее математической обработки

На рис. 3 приведены микротомографические сечения образца термокомпенсатора, из которых визуально следует, что микропористость в центральной области термокомпенсатора значительно превосходит его пористость в периферийной области.

На рис. 4 приведены измеренные значения функции распределения вокселей по их рентгеновской плотности для периферийной (а) и центральной (б) областей термокомпенсатора размерами $5 \times 5 \times 5$ мм. Там же показаны результаты аппроксимации методом наименьших квадратов результатов экспериментов кривой Гаусса. На вкладках показаны увеличенные изображения левой и правой границ соответствующего распределения Гаусса.

В области сканирования, расположенной на периферии исследуемого термокомпенсатора, экспериментальная функция распределения вокселей по их рентгеновской плотности (рис. 4,а) практически не отличалась от распределения Гаусса. В центральной области термокомпенсатора наблюдали значимое отклонение результатов томографии от левого склона кривой Гаусса (рис. 4,б). Объемная доля микропор, имеющих размеры более 1 мкм, в центральной области термокомпенсатора соответствует разности площадей левого склона экспериментального распределения и левого склона гауссовой кривой и составляет $(1,1 \pm 0,2) \%$.

Ширина распределения Гаусса характеризует степень однородности материала исследуемого термокомпенсатора по его рентгеновской плотности. Результаты математической обработки, приведенные на рис. 4, показывают, что микропоры в центральной и периферийной областях исследуемого термокомпенсатора практически равномерно распределены по объему исследуемых образцов и их размеры случайны.

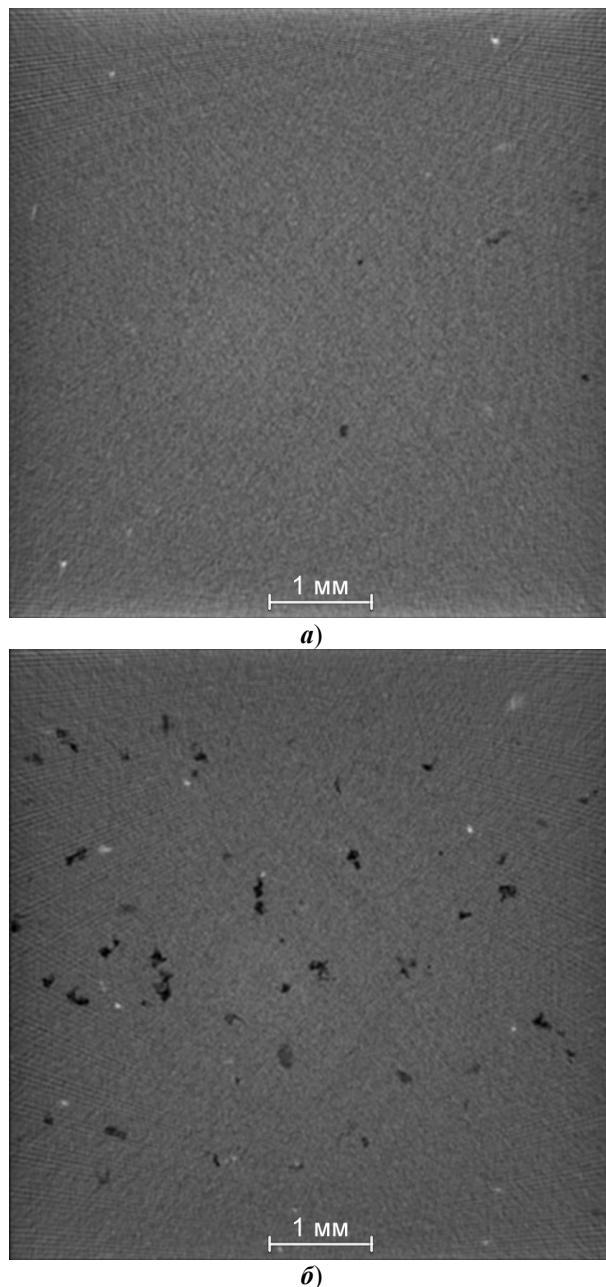


Рис. 3. Микротомографические сечения образца термокомпенсатора:
a – периферийная область; *б* – центральная область

На рис. 5 приведена полученная из рентгеновских микротомограмм зависимость объемной доли микропор с размерами более 1 мкм от расстояния от центра вдоль радиуса исследуемого термокомпенсатора. Выявленная в результате томографических исследований неравномерность распределения микропор по площади исследуемого термокомпенсатора может быть обусловлена недостаточно качественной пропиткой матричным алюминиевым расплавом центральных областей его пористой заготовки.

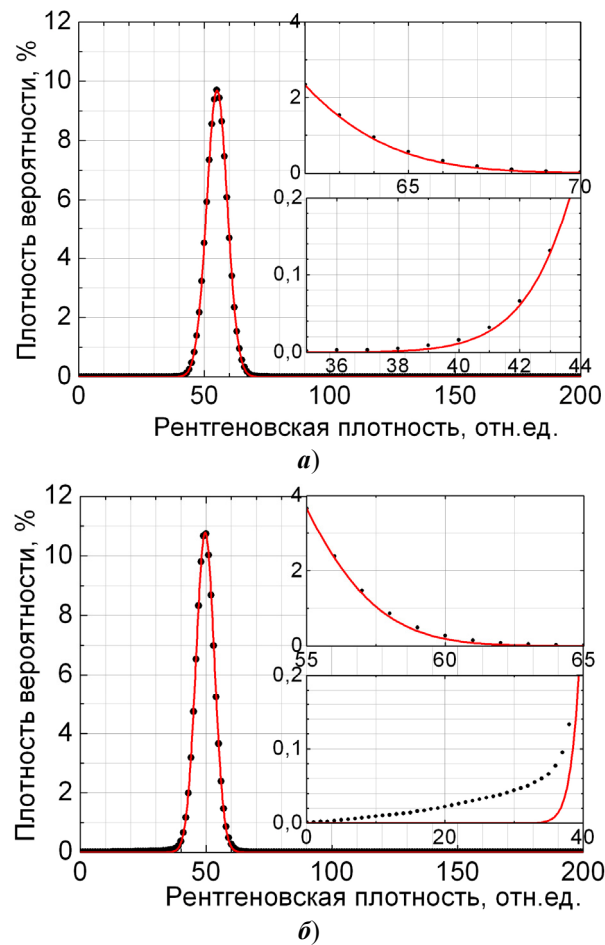


Рис. 4. Измеренная функция распределения вокселей по их рентгеновской плотности для термокомпенсатора и результаты ее математической обработки:
а – периферийная область; **б** – центральная область термокомпенсатора

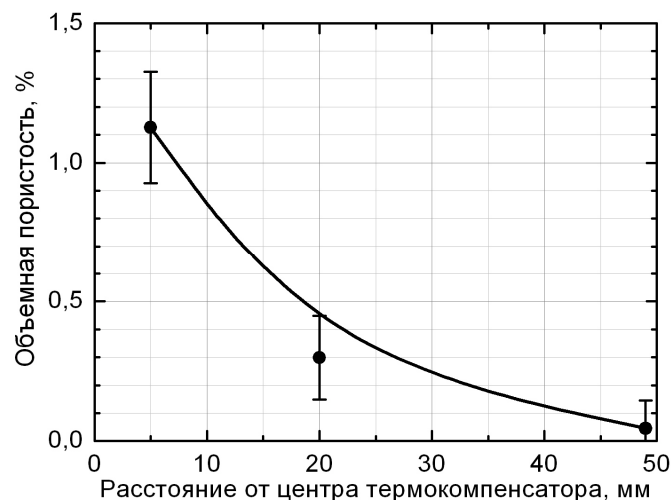


Рис. 5. Зависимость объемной доли микропор с размерами более 1 мкм от расстояния от центра исследуемого термокомпенсатора вдоль его радиуса

Заключение

Предложен метод исследования микропористости металломатричных композиционных материалов, основанный на математической обработке функции распределения вокселей микротомограмм по рентгеновской плотности. С использованием рентгеновского микротомографа SkyScan 1172 проведены исследования микропористости термокомпенсаторов силовых полупроводниковых приборов, изготовленных из металломатричного композиционного материала AlSiC.

Исследована зависимость объемной доли микропор с размерами более 1 мкм от расстояния от центра исследуемого термокомпенсатора вдоль его радиуса. Установлено, что микропористость в центральной области термокомпенсатора существенно выше, чем на периферии, что может быть обусловлено недостаточно качественной пропиткой центральных областей пористой заготовки матричным алюминиевым сплавом.

Список литературы

1. Novich, B. E. Aluminum/Silicon Carbide (AlSiC) Metal Matrix Composites For Advanced Packaging Applications / B. E. Novich, R. W. Adams // *Proceedings of the International Electronics Packaging Conference, IEPS*, 1995 September 24–27. – San Diego CA, 1995. – P. 220–227.
2. Каблов, Е. Н. Изготовление, свойства и применение теплоотводящих оснований из ММК Al-SiC в силовой электронике и преобразовательной технике / Е. Н. Каблов, В. В. Чибиркин, С. М. Вдовин // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 2. – С. 20–22.
3. The use of metal-matrix Al-SiC composites in heat-spreading bases of power electronic devices / K. N. Nishchev, M. I. Novopoltsev, V. V. Eliseev, L. A. Emikh, N. E. Fomin, V. A. Yudin, A. N. Afanas'ev-Khodykin // *Polymer Science. Series D. Glues and Sealing Materials*. – 2012. – Vol. 5, № 3. – P. 195–198
4. Патент № 2261780 Российская Федерация. Способ получения металлического композиционного материала и изделия из него / Каблов Е. Н., Абузин Ю. А., Маринин С. В., Варрик Н. М. – Оpubл. 10.10.2005.
5. Исследование физических свойств металломатричного композиционного материала AlSiC / К. Н. Нищев, М. И. Новопольцев, Н. Е. Фомин, В. А. Юдин, Б. В. Щетанов, В. В. Елисеев, Л. А. Эмих // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки*. – 2011. – № 4 (20). – С. 78–85.

References

1. Novich B. E., Adams R. W. *Proceedings of the International Electronics Packaging Conference, IEPS, 1995 September 24–27*. San Diego CA, 1995, pp. 220–227.
2. Kablov E. N., Chibirkin V. V., Vdovin S. M. *Aviacionnye materialy i tehnologii* [Air-craft materials and technologies]. 2012, no. 2, pp. 20–22.
3. Nishchev K. N., Novopoltsev M. I., Eliseev V. V., Emikh L. A., Fomin N. E., Yudin V. A., Afanas'ev-Khodykin A. N. *Polymer Science. Series D. Glues and Sealing Materials*. 2012, vol. 5, no. 3, pp. 195–198
4. Patent № 2261780 Russian Federation. *Sposob poluchenija metallichesкого kompozitsionnogo materiala i izdelija iz nego* [A method for obtaining a metallic composite material and products on its basis]. Kablov E. N., Abuzin Ju. A., Marinin S. V., Varrik N. M. Publ. 10.10.2005.
5. Nishhev K. N., Novopol'cev M. I., Fomin N. E., Judin V. A., Shhetanov B. V., Eliseev V. V., Jemih L. A. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region*.

Нищев Константин Николаевич

кандидат физико-математических наук,
доцент, директор Института физики
и химии, Мордовский государственный
университет имени Н. П. Огарева
(Россия, г. Саранск,
ул. Большевикская, 68)

E-mail: nishchev@inbox.ru

Nishchev Konstantin Nikolaevich

Candidate of physical and mathematical
sciences, associate professor, director
of the Institute of physics and chemistry,
Ogarev Mordovia State University
(68 Bolshevistskaya street, Saransk, Russia)

Новопольцев Михаил Ильич

кандидат физико-математических наук,
доцент, кафедра общей физики,
Мордовский государственный
университет имени Н. П. Огарева
(Россия, г. Саранск,
ул. Большевикская, 68)

E-mail: novopol@inbox.ru

Novopol'tsev Mikhail Il'ich

Candidate of physical and mathematical
sciences, associate professor,
sub-department of general physics,
Ogarev Mordovia State University
(68 Bolshevistskaya street, Saransk, Russia)

Мамин Бари Фятыхович

кандидат технических наук, ведущий
инженер, кафедра общей физики,
Мордовский государственный
университет имени Н. П. Огарева
(Россия, г. Саранск,
ул. Большевикская, 68)

E-mail: barisfmamin@rambler.ru

Mamin Bari Fyattyakhovich

Candidate of engineering sciences,
leading engineer, sub-department of general
physics, Ogarev Mordovia State University
(68 Bolshevistskaya street, Saransk, Russia)

Елисеев Вячеслав Васильевич

кандидат технических наук, заместитель
генерального директора,
ОАО «Электровыпрямитель»
(Россия, г. Саранск,
ул. Пролетарская, 126)

E-mail: martin@moris.ru

Eliseev Vyacheslav Vasil'evich

Candidate of engineering sciences, deputy
general manager, JSC «Electroviptyamitel»
(126 Proletarskaya street, Saransk, Russia)

Мартыненко Валентин Александрович

директор Научно-инженерного центра
силовых полупроводниковых приборов,
ОАО «Электровыпрямитель»
(Россия, г. Саранск,
ул. Пролетарская, 126)

E-mail: martin@moris.ru

Martynenko Valentin Aleksandrovich

Director of the Scientific Engineering
Center of Power Semiconductor Devices,
JSC «Electroviptyamitel»
(126 Proletarskaya street, Saransk, Russia)

УДК 539.217.1

Применение рентгеновской микротомографии для исследования пористости композиционных материалов силовой электроники / К. Н. Нищев, М. И. Новопольцев, Б. Ф. Мамин, В. В. Елисеев, В. А. Мартыненко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 124–133. DOI 10.21685/2072-3040-2016-2-10