

Углеродная электроника и фотоника

Научная статья
УДК 535, 548.4, 53.087.92
doi: 10.17223/29491665/8/5

Спектры свечения малопримесных алмазных образцов под действием пучков электронов с энергией десятки кэВ – единицы МэВ

Александр Александрович Крылов¹, Александр Геннадьевич Бураченко²,
Василий Сергеевич Рипенко³, Дарья Александровна Переседова⁴,
Артем Владимирович Вуколов⁵

^{1, 2, 3, 4} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

^{1, 2, 3, 4} *Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

⁵ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия*

¹ *daivi22@mail.ru*

⁵ *dsws@vrpenko.ru*

Аннотация. Исследованы спектры свечения малопримесных синтетических алмазных образцов при возбуждении их электронными пучками с энергией десятки–сотни кэВ и единицы МэВ с различной плотностью тока – сотни А/см² и десятки нА/см². Обнаружено существенное различие в спектрах катодолуминесценции исследуемых образцов при изменении энергии и плотности тока пучка. Определены более подходящие образцы, которые могут использоваться в черенковских детекторах на основе алмаза в различных условиях.

Ключевые слова: алмаз, катодолуминесценция, излучение Вавилова-Черенкова, электронный пучок, черенковский детектор

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Минобрнауки России в рамках Федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» при реализации «Программы Учебного центра коллективного проектирования электронной компонентной базы для систем беспроводной связи» (соглашение от 06.03.2024 г. № 075-02-2024-1524) в Томском государственном университете.

Для цитирования: Крылов А.А., Бураченко А.Г., Рипенко В.С., Переседова Д.А., Вуколов А.В. Спектры свечения малопримесных алмазных образцов под действием пучков электронов с энергией десятки кэВ – единицы МэВ // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 8. С. 37–44. doi: 10.17223/29491665/8/5

Original article
doi: 10.17223/29491665/8/5

Radiation spectra of low-impurity diamond samples under the action of electron beams with energies of tens of keV – units of MeV

Alexander A. Krylov¹, Alexander G. Burachenko², Vasily S. Ripenko³,
Daria A. Peresedova⁴, Artyom V. Vukolov⁵

^{1, 2, 3, 4} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

^{1, 2, 3, 4} *Institute of high current electronics SB RAS, Tomsk, Russian Federation*

⁵ *National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation*

¹ *daivi22@mail.ru*

⁵ *dsws@vrpenko.ru*

Abstract. The radiation spectra of low-impurity synthetic diamond samples were studied when excited by electron beams with energies of tens to hundreds of keV and units of MeV with different densities – hundreds of А/см² and tens of nА/см². A significant difference in the cathodoluminescence spectra of the studied samples was found when changing the energy and density of the beam current. More suitable samples were determined that can be used in diamond-based Cherenkov detectors under various conditions.

Keywords: diamond, cathodoluminescence, Cherenkov radiation, electron beam, Cherenkov detector

Acknowledgments: The study was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the Federal Project «Personnel Training and scientific foundation for the electronic industry» of

the State Program of the Russian Federation «Scientific and Technological Development of the Russian Federation» during the implementation of the Program «Training Center for Collective Design of electronic component Base for wireless communication systems» (Agreement No. 075-02-2024-1524 dated 03/06/2024) at Tomsk State University.

For citation: Krylov, A.A., Burachenko, A.G., Ripenko, V.S., Peresedova, D.A. & Vukolov, A.V. (2024) Radiation spectra of low-impurity diamond samples under the action of electron beams with energies of tens of keV – units of MeV. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatelnosti – Life Safety / Security Technologies*. 8. pp. 37–44. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/8/5

Введение

Алмаз является перспективным материалом для высокотемпературной радиационно-стойкой полупроводниковой электроники и фотоники, в том числе для использования его в оптоэлектронных детекторах ионизирующих излучений [1], преобразующих их энергию в оптическое излучение в широком диапазоне длин волн. В частности, алмаз является перспективным материалом для детектирования высокоэнергетических электронов в условиях высокого радиационного фона и высоких температур [2]. Для регистрации таких электронов используются детекторы, основанные на эффекте Вавилова–Черенкова (черенковские), которые обладают рядом преимуществ [3] относительно детекторов, принцип работы которых основан на сцинтилляции материала детектора (сцинтилляционные). В [2] показано, как с помощью черенковского детектора (ЧД) в установках типа «Токамак» регистрируют потоки высокоэнергетических убегающих электронов, которые в процессе работы могут повредить стенки камеры термоядерной установки; последствием может стать дорогостоящий и длительный ремонт. Очень важно контролировать потоки убегающих электронов, появление которых может привести к таким негативным последствиям. Основная энергия таких электронов лежит в диапазоне десятков–сотен кэВ, а также может составлять и единицы МэВ.

Кроме того, является перспективным использование ЧД на основе алмаза для регистрации высокоэнергетических частиц солнечного ветра (в частности, электронов), которые могут негативным образом воздействовать на бортовую электронику космических аппаратов – выводить ее из строя вследствие накопления избыточного заряда на обшивке аппаратов. Основная энергия электронов солнечного ветра составляет также десятки–сотни кэВ, единицы МэВ [4]. Известно, что при таких энергиях электронов в материале радиатора (алмаз) ЧД, помимо излучения Вавилова–Черенкова (ИВЧ), может возникать катодолюминесценция, которая будет искажать полезный сигнал детектора. Поэтому, с одной стороны, представляется целесообразным использование чистых беспримесных алмазных образцов для регистрации высокоэнергетических электронов, в которых отсутство-

вала бы полностью люминесценция. С другой стороны, известно, что в спектрах свечения номинально-беспримесных алмазных образцов (содержание примесей менее нескольких частиц на миллион атомов углерода) может возникать интенсивная экситонная полоса люминесценции в УФ области спектра [5], затрудняющая регистрацию ИВЧ, интенсивность которой максимальна в УФ области спектра. Поэтому в случае, когда люминесценция вносит паразитный вклад в регистрируемый сигнал ЧД, необходимо знать спектр свечения используемого материала радиатора ЧД.

Цель работы и современное состояние вопроса

В работах [6–10], посвященных регистрации убегающих электронов (с энергией десятки–сотни кэВ и единицы МэВ) в токамаках с помощью ЧД на основе алмаза не приводятся спектры свечения используемых алмазных образцов, не приводятся также данные о влиянии люминесценции на сигнал ЧД. Однако для корректного измерения сигнала ЧД в случае, когда катодолюминесценция может вносить паразитный вклад в этот сигнал, необходимо предварительно проводить спектральные измерения свечения алмазного образца для определения его пригодности в качестве материала черенковского детектора в условиях, в которых он будет применяться.

Целью данной работы является исследование спектральных характеристик свечения малопримесных алмазных образцов при облучении их пучками электронов с энергиями как десятки–сотни кэВ, так и единицы МэВ. При этом плотность тока пучка также была различной – сотни А/см² и десятки нА/см².

Материалы и методы исследований

Спектральные исследования свечения проводились с тремя алмазными образцами, синтезированными методами температурного градиента в условиях высокого давления, высокой температуры (ВДВТ) и газохимического осаждения (ГХО). Данные образцы являлись малопримесными по азоту, содержащими собственные дефекты. Образцы имели форму плоскопараллельных пластин различных размеров и толщины (0,25 или 0,5 мм). Характеристики используемых образцов представлены в таблице.

Номер образца	Метод синтеза	Наличие примесей / дефектов	Размеры образца, мм
№ 1	ГХО	Номинально-беспримесный, собственные дефекты	$5 \times 5 \times 0,25$
№ 2	ГХО	Номинально-беспримесный, собственные дефекты	$5,5 \times 3,5 \times 0,5$
№ 3	ВДВТ	Номинально-беспримесный, собственные дефекты	$5 \times 5 \times 0,25$

Исследование спектральных характеристик свечения осуществлялось на двух различных установках. Облучение алмазных образцов электронным пучком с энергией десятки–сотни кэВ проводилось на импульсном генераторе электронов НОРА с отпаянной электронной трубкой ИМА3-150Э [11, 12]. Генератор работал с частотой следования импульсов 2 Гц, энергия электронов в пучке находилась в диапазоне 30–300 кэВ, длительность импульса тока пучка на полувысоте составляла ~ 1 нс. Блок-схема экспериментальной установки представлена в [13]. Исследование свечения алмазных образцов проводилось при разных плотностях тока пучка. В первом случае алмазные образцы устанавливались на расстоянии 14 мм от фольги электронной трубки ИМА3-150Э [13], во втором случае – непосредственно вблизи фольги электронной трубки ИМА3-150Э. Электронный пучок диафрагмировался до 3 мм в диаметре. Излучение от образцов попадало в коллимирующую линзу и передавалось с помощью световода в спектрометр Ocean Optics HR2000+ES. Спектральная чувствительность спектрометра, а также линзы и световода лежала в диапазоне длин волн 190–1100 нм. Все исследования свечения проводились при комнатной температуре. Плотность электронного пучка на расстоянии 14 мм от фольги электронной трубки ИМА3-150Э составляла ~ 200 А/см², а вблизи фольги электронной трубки была на $\sim 40\%$ выше.

Исследование свечения алмазных образцов в области энергий электронов $\sim$ единиц МэВ проводилось на микротроне МИ-6 Томского политехнического университета [14, 15]. Блок-схема экспериментальной установки для исследования спектральных характеристик свечения алмазных образцов приведена в [16]. Энергия моноэнергетического пучка электронов МИ-6 составляла 5,7 МэВ, длительность макроимпульса – $\sim 0,5$ мкс, частота следования макроимпульсов – 25 Гц. Диаметр электронного пучка составлял 3 мм, при этом плотность тока пучка составляла ~ 20 нА/см².

Результаты и их обсуждение

Спектры свечения исследуемых образцов алмаза при облучении их пучком электронов различной плотности генератора НОРА, а также спектры пропускания данных образцов показаны на рис. 1, 2.

В случае расположения исследуемых образцов на расстоянии 14 мм от фольги электронной трубки

ИМА3-150Э в образцах № 1 и № 3 наблюдались люминесценция свободных экситонов с максимумом на длине волны 235 нм и максимум двухфононной компоненты ($TO + O'$) излучательной рекомбинации свободных экситонов на длине волны 241 нм (рис. 1, а, б) [17]. В образце № 3 также наблюдалась слабоинтенсивная полоса люминесценции в диапазоне 400–600 нм (рис. 1, с); предположительно данная полоса является А-полосой [17], природа которой до сих пор однозначно не установлена. В разных публикациях дефектами А-полосы называли sp^2 -гибридизованные связи [18], азотные центры [19], донорно-акцепторные пары [20] и дислокации [21].

В спектрах свечения образца № 2 (рис. 1, б) наблюдалась еле различимая на уровне шумов полоса люминесценции в диапазоне 400–600 нм, природа которой пока не установлена.

При увеличении плотности тока пучка на $\sim 40\%$ (образцы устанавливались вблизи электронной трубки ИМА3-150Э) во всех трёх образцах наблюдались люминесценция свободных экситонов и излучение Вавилова–Черенкова (см. рис. 2, а–с), которое не отмечено при меньшей плотности тока пучка (см. рис. 1, а–с). Появление экситонной полосы люминесценции в образце № 2 (рис. 2, б), вероятно, связано с тем, что свечение свободных экситонов является квадратичным процессом излучательной рекомбинации носителей заряда [12]. Следовательно, интенсивность свечения экситонной полосы люминесценции сильно зависит от плотности электронного пучка, который ее возбуждает.

В спектрах катодолюминесценции трех образцов при воздействии пучком электронов меньшей плотности (см. рис. 1, а–с) наблюдается еле заметная на уровне шумов электронно-колебательная система (ЭКС) с бесфононной линией на 389 нм. Данная ЭКС обусловлена собственными междоузельными атомами. При увеличении плотности тока пучка на $\sim 40\%$ данная ЭКС в спектрах свечения уже не отмечалась на фоне ИВЧ (см. рис. 2, а–с).

Спектры свечения для всех алмазных образцов существенно изменились при облучении их пучком электронов с энергией 5,7 МэВ (рис. 3, а–с). Люминесценции свободных экситонов не наблюдалось для всех образцов (рис. 3, а–с). Отсутствие данной люминесценции в спектрах свечения, по-видимому, является следствием малой плотности тока пучка, так как экситонная люминесценция, как уже ранее говорилось, является квадратичным процессом излучательной рекомбинации электронно-дырочных пар.

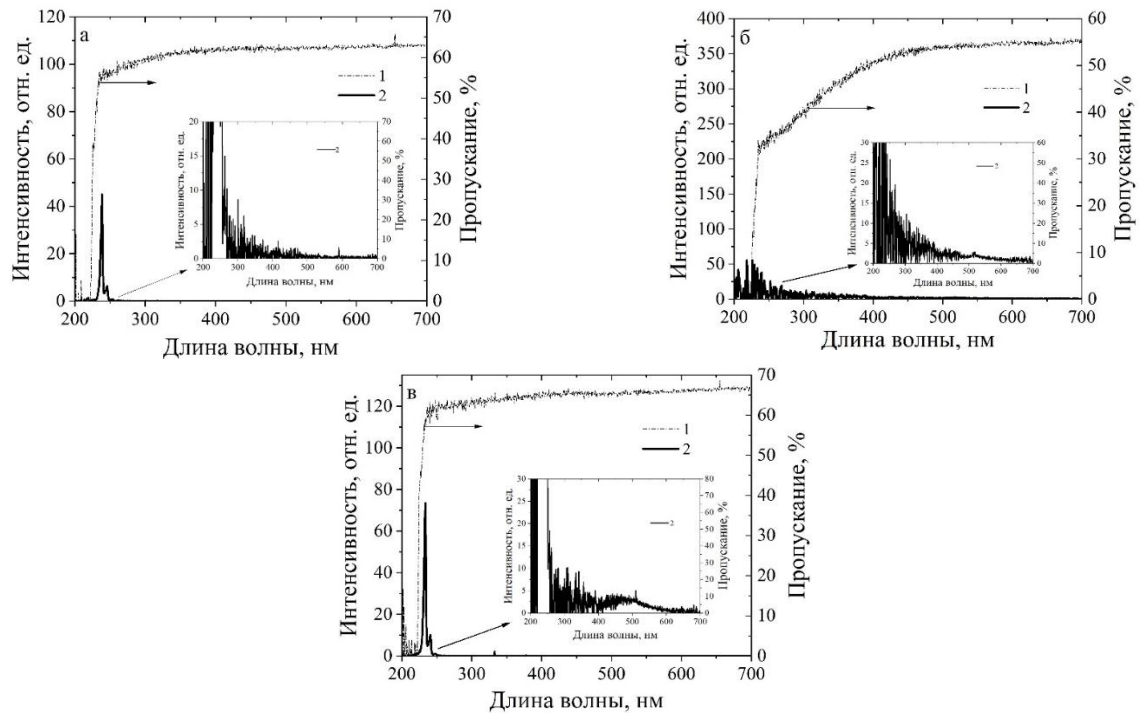


Рис. 1. Спектры свечения (кривая 2) образцов № 1 (a), № 2 (b), № 3 (c), полученные на расстоянии 14 мм от фольги электронной трубки ИМА3-150Э, и их спектры пропускания (кривая 1). Генератор НОРА

Fig. 1. Emission spectra (curve 2) of samples No. 1 (a), No. 2 (b), and No. 3 (c), obtained at a distance of 14 mm from the foil of the electronic tube IMA3-150E, and their transmission spectra (curve 1). Generator NORA

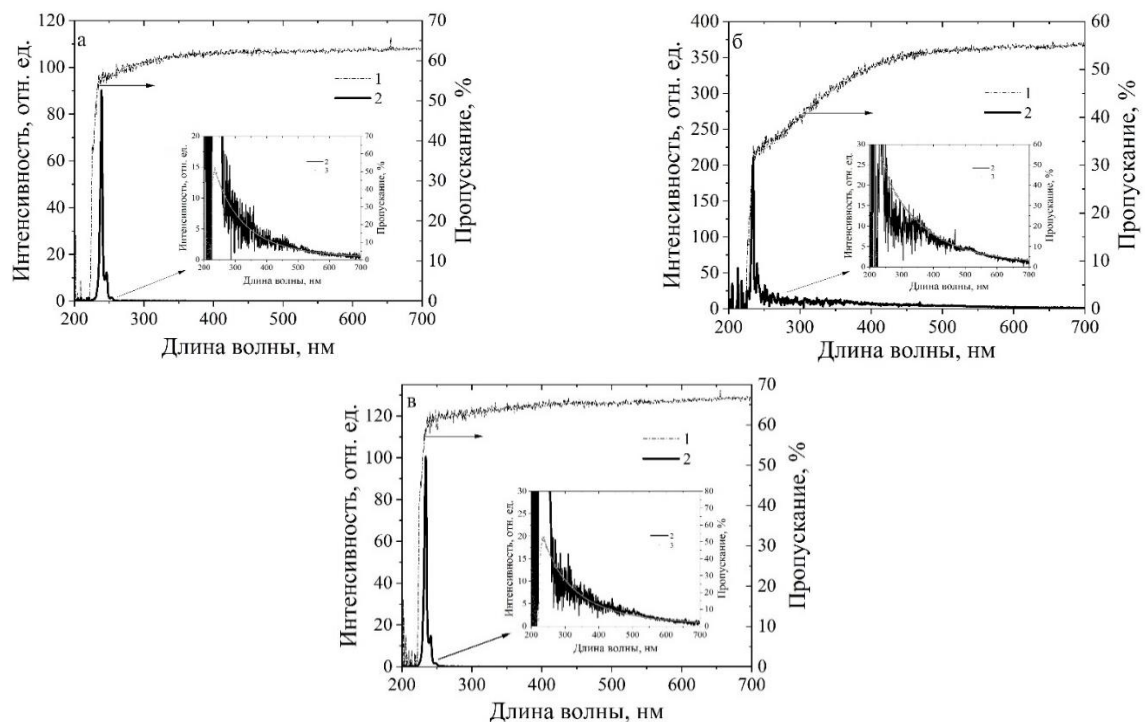


Рис. 2. Спектры свечения (кривая 2) образцов № 1 (a), № 2 (b), № 3 (c), полученные вблизи фольги электронной трубки ИМА3-150Э, а также их спектры пропускания (кривая 1) и расчетные спектры ИВЧ (кривая 3). Генератор НОРА

Fig. 2. Emission spectra (curve 2) of samples No. 1 (a), No. 2 (b), and No. 3 (c), obtained near the foil of the electronic tube IMA3-150E, along with their transmission spectra (curve 1) and calculated infrared spectra (curve 3). Generator NORA

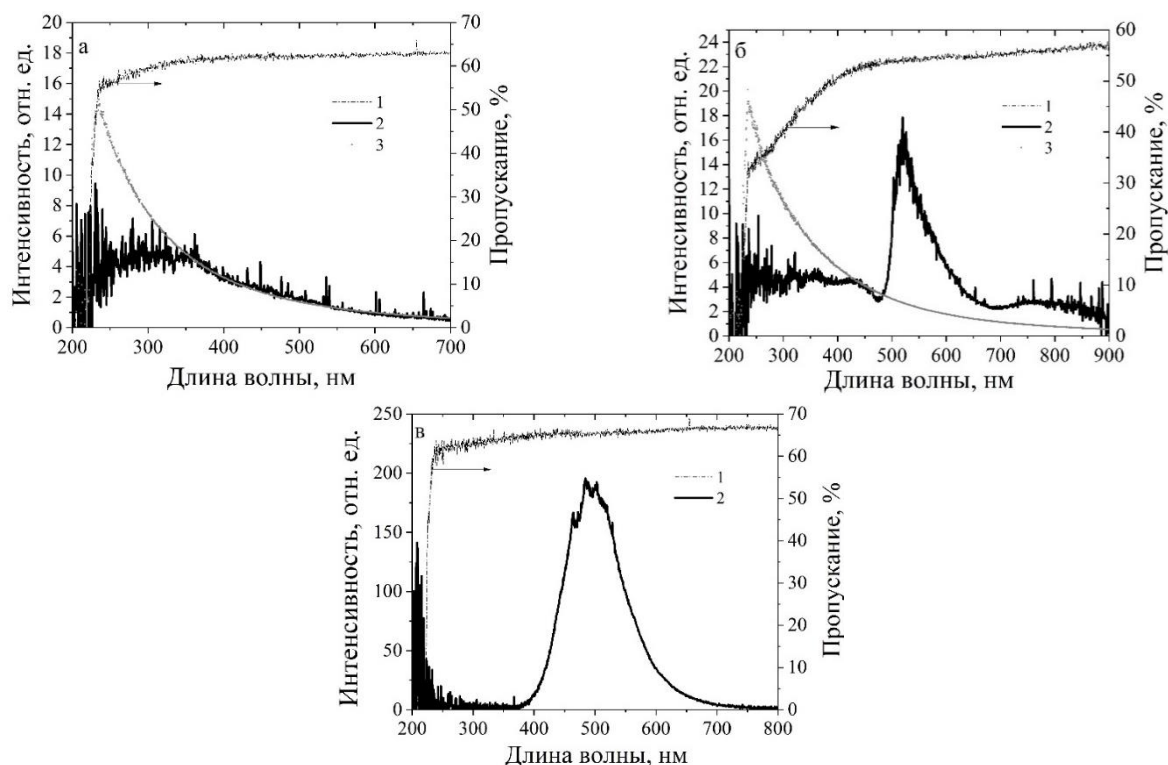


Рис. 3. Спектры свечения (кривая 2) образцов № 1 (a), № 2 (b), № 3 (c), а также их спектры пропускания (кривая 1) и расчетные спектры ИВЧ (кривая 3). Микротрон МИ-6

Fig. 3. Emission spectra (curve 2) of samples No. 1 (a), No. 2 (b) and No. 3 (c), as well as their transmission spectra (curve 1) and calculated infrared spectra (curve 3). Microtron MI-6

В спектре свечения образца № 1 зарегистрировано только ИВЧ, расчетный спектр которого достаточно хорошо совпадает с экспериментальным (рис. 3, a). В спектральной области короче ~ 350 нм несовпадение расчетного и экспериментального спектров обусловлено сильным поглощением образца в этой области (рис. 3, кривая 1), которое не было учтено в расчете. В спектре излучения образца № 2 также наблюдалось ИВЧ в области короче ~ 500 нм. Кроме того, в спектре данного образца отмечена интенсивная полоса люминесценции, которая является ЭКС НЗ центра с БФЛ на 503 нм [17]. Максимум данной полосы люминесценции составляет 519 нм и примерно совпадает с максимумом слабоинтенсивной полосы, полученной при возбуждении пучком электронов от генератора НОРА (см. рис. 1, b). Вероятно, природа данной полосы люминесценции в этом образце при разных способах возбуждения (генератор НОРА и микротрон) одна и та же. Отличие интенсивности свечения данной полосы люминесценции в этих спектрах (рис. 1, b; рис. 3, b), по-видимому, обусловлено разной энергией электронного пучка, однако точную причину еще предстоит выяснить.

В спектре образца № 3 (рис. 3, c) наблюдалась интенсивная полоса люминесценции в диапазоне 400–

700 нм, которая предположительно является А-полосой. ИВЧ на фоне интенсивной полосы люминесценции в спектре данного образца не отмечено, хотя оно также должно присутствовать в УФ области спектра, так как толщина образца № 3 и его спектр пропускания схожи с образцом № 1 (см. рис. 3, a, c, кривая 1). Кроме того, спектры пропускания всех образцов демонстрировали край фундаментального поглощения на 225 нм, что подтверждало малое содержание в них примесей и дефектов. Однако образец № 2 был менее чистым, чем образцы № 1 и 3, так как в нем экситонная люминесценция возникала при большей плотности тока пучка, а также в УФ области спектра он имел большее поглощение (см. рис. 3, b, кривая 1).

Закключение

Исследованы спектры излучения малопримесных алмазных образцов при возбуждении пучком электронов различных энергий (десятки–сотни кэВ и единиц МэВ) и плотностей тока пучка (десятки–сотни А/см² и десятки нА/см²). Показано существенное влияние энергии и плотности тока пучка на спектры свечения различных малопримесных алмазных образцов. Выбор конкретного алмазного образца для ис-

пользования его в качестве материала радиатора черенковского детектора в значительной степени зависит от условий, в которых он будет регистрировать потоки высокоэнергетических частиц. Так, например, в условиях околоземного космического пространства, где концентрация электронов относительно низкая, наиболее подходящим образом для регистрации высокоэнергетических электронов является номинально-беспримесный алмазный образец с примесно-дефектным составом, подобным образцу №1, полученному методом ГХО. В условиях более высоких концентраций электронов с энергией десятки–сотни кэВ наиболее

перспективным образцом для радиатора черенковского детектора будет малопримесный образец, но с большей концентрацией примесного азота, с примесно-дефектным составом, подобным образцу № 2, полученный также методом ГХО.

Результаты исследования будут полезны при создании и проектировании черенковских детекторов на основе алмаза, способных работать в экстремальных условиях (высокие температуры, высокий уровень радиационного фона) при различных энергиях и плотностях потоков высокоэнергетических электронов.

Список источников

1. Hochedez J.-F., et. al. Diamond UV detectors for future solar physics missions // *Diamond and Related Materials*. 2001. Vol. 10. P. 673–680. doi: 10.1016/S0925-9635(01)00374-0
2. Sadowski M.J. Generation and diagnostics of fast electrons within tokamak plasma // *Nukleonika*. 2011. Vol. 56, № 2. P. 85–98.
3. Зрелов В.П. Излучение Вавилова–Черенкова и его применение в физике высоких энергий М. : Атомиздат, 1968. 304 с.
4. Гальпер А.М. Радиационный пояс Земли // *СОЖ*. 1999. № 6. С. 74–81.
5. Рипенко В.С., Бураченко А.Г., Переседова Д. А., Липатов Е.И. Краевая люминесценция алмазов при температурах от 80 до 800 К // *Известия вузов. Физика*. 2022. Т. 65, № 11. С. 132–137. doi: 10.17223/00213411/65/11/132
6. Plyusnin V.V., Jakubowski L., Zebrowski J., Fernandes H., Silva C., Malinowski K., Duarte P., Rabinski M., Sadowski M.J. Use of Cherenkov-type detectors for measurements of runaway electrons in the ISTTOK tokamak // *Review of Scientific Instruments*. 2008. Vol. 79, № 10. P. 10F505.
7. Jakubowski L., Sadowski M.J., Zebrowski J., Rabinski M., Malinowski K., Mirowski R., Lotte Ph., Gunn J., Pascal J.-Y., Colledan G.i, Basiuk V., Goniche M., Lipa M. Cherenkov-type diamond detectors for measurements of fast electrons in the TORE-SUPRA tokamak // *Review of Scientific Instruments*. 2010. Vol. 81, № 1. P. 013504.
8. Ghanbari M.R., Ghoranneviss M., Elahi A.S., Mohammadi S., Arvin R. Controlling the diffusion of runaway electrons by safety factor changes in IR-T1 tokamak // *Journal of Fusion Energy*. 2016. Vol. 35, № 2. P. 180–186.
9. Pourshahab B., Abdi M.R., Sadighzadeh A., Rasouli C. Temporal and spatial evolution of runaway electrons at the instability moments in Damavand tokamak // *Physics of Plasmas*. 2016. Vol. 23, № 7. P. 072501.
10. Popovic Z., Esposito B., Martin-Solis J.R., Bin W., Buratti P., Carnevale D., Causa F., Gospodarczyk M., Marocco D., Ramogida G., Riva M. On the measurement of the threshold electric field for runaway electron generation in the Frascati Tokamak Upgrade // *Physics of Plasmas*. 2016. Vol. 23, № 12. P. 122501.
11. Месяц Г.А. Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии. Новосибирск : Наука, 1983. 169 с.
12. Соломонов В.И., Михайлов С.Г. Импульсная катодоллюминесценция и ее применение для анализа конденсированных веществ. Екатеринбург : УрО РАН, 2003. 181 с.
13. Бураченко А.Г., Рипенко В.С., Липатов Е.И., Артемов К.П., Крылов А.А. Катодоллюминесценция азотсодержащих алмазных образцов при температурах 80–800 К // *Известия вузов. Физика*. 2022. Т. 65, № 11. С. 19–25.
14. Bakshi E.Kh., Alekseev B.A., Burachenko A.G., Vukolov A.V., Potylitsyn A.P., Tarasenko V.F., Uglov S.R., Shevelev M.V. Emission of fused silica and KBr samples in the UV and visible spectral ranges under irradiation with 2.7 MeV electrons // *Matter and Radiation at Extremes*. 2022. Vol. 7, № 2. P. 026901. doi: 10.1063/5.0061100
15. Тарасенко В.Ф., Бакуит Е.Х., Ерофеев М.В., Бураченко А.Г. Спектральные и амплитудно-временные характеристики излучения Черенкова при возбуждении прозрачных материалов пучком электронов // *Оптика и спектроскопия*. 2021. № 129. С. 569. doi: 10.21883/OS.2021.05.50883.310-20
16. Бураченко А.Г., Артёмов К.П., Вуколов А.В., Крылов А.А., Липатов Е.И., Рипенко В.С., Гоголев А.С. Излучение Вавилова–Черенкова и катодоллюминесценция в алмазе под действием электронов с энергией 5,7 МэВ // *Оптика и спектроскопия*. 2023. Т. 131, № 12. С. 1653–1660. doi: 10.61011/OS.2023.12.57400.5713-23
17. Zaitsev A.M. Optical properties of diamond: A data handbook. Berlin : Springer, 2001. 353 p. doi: 10.1007/978-3-662-04548-0
18. Takeuchi D., Watanabe H., Yamanaka S., Okushi H., Sawada H., Ichinose H., Sekiguchi T., Kajimura K. Origin of band-A emission in diamond thin films // *Physical review B*. 2001. Vol. 63. P. 245328. doi: 10.1103/PhysRevB.63.245328
19. Соболев Е.В., Елисеев А.П. Об энергетических уровнях центров N9 и ND1 в алмазах // *Журнал структурной химии*. 1976. Т. 17, № 5. С. 935–938.
20. Dean P.J., Jones I.H. Recombination radiation from diamond // *Physical review*. 1964. Vol. 133, № 6A. P. A1698–A1705.
21. Walker J. Optical absorption and luminescence in diamond // *Reports on progress in physics*. 1979. Vol. 42. P. 1607–1659.

References

1. Hochedez, J.-F., et. al. (2001) Diamond UV detectors for future solar physics missions. *Diamond and Related Materials*. 10. pp. 673–680. doi: 10.1016/S0925-9635(01)00374-0
2. Sadowski, M.J. (2011) Generation and diagnostics of fast electrons within tokamak plasma. *Nukleonika*. 56 (2). pp. 85–98.
3. Zrelov, V.P. (1968) *Izluhenie Vavilova-Cherenkova I ego primenenie v fizike visokih energiy* [Vavilov-Cherenkov Radiation and Its Applications in High-Energy Physics] Moscow: Atomizdat Publishing.
4. Galper, A.M. (1999) *Radiacionniy po yas zemli* [The Earth's Radiation Belt]. Moscow: SOZh Publishing.

5. Ripenko, V.S., Burachenko, A.G., Peresedova, D.A., & Lipatov, E.I. (2022). Edge luminescence of diamonds at temperatures from 80 to 800 K. *Izvestiya VUZ. Physics*. 65 (11). pp. 132–137. doi: 10.17223/00213411/65/11/132.
6. Plyusnin, V.V., Jakubowski, L., Zebrowski, J., Fernandes, H., Silva, C., Malinowski, K., Duarte, P., Rabinski, M. & Sadowski, M.J. (2008) Use of Cherenkov-type detectors for measurements of runaway electrons in the ISTTOK tokamak. *Review of Scientific Instruments*. 79 (10). pp. 10F505.
7. Jakubowski, L., Sadowski, M.J., Zebrowski, J., Rabinski, M., Malinowski, K., Mirowski, R., Lotte, Ph., Gunn, J., Pascal, J.-Y., Colledani, G., Basiuk, V., Goniche, M. & Lipa, M. (2010) Cherenkov-type diamond detectors for measurements of fast electrons in the TORE-SUPRA tokamak. *Review of Scientific Instruments*. 81 (1). pp. 013504.
8. Ghanbari, M.R., Ghoranneviss, M., Elahi, A.S., Mohammadi, S. & Arvin, R. (2016) Controlling the diffusion of runaway electrons by safety factor changes in IR-T1 tokamak. *Journal of Fusion Energy*. 35 (2). pp. 180–186.
9. Pourshahab, B., Abdi, M.R., Sadighzadeh, A. & Rasouli, C. (2016) Temporal and spatial evolution of runaway electrons at the instability moments in Damavand tokamak. *Physics of Plasmas*. 23 (7). pp. 072501.
10. Popovic, Z., Esposito, B., Martín-Solís, J.R., Bin, W., Buratti, P., Carnevale, D., Causa, F., Gospodarczyk, M., Marocco, D., Ramogida, G. & Riva, M. (2016) On the measurement of the threshold electric field for runaway electron generation in the Frascati Tokamak Upgrade. *Physics of Plasmas*. 23 (12). pp. 122501.
11. Mesyats, G.A. (1983) *Silnotochnie impulsnie elektronnie puchki v technologii* [High-Current Pulsed Electron Beams in Technology]. Novosibirsk: Nauka.
12. Solomonov, V.I., & Mikhailov, S.G. (2003) *Impulsnaya katodoluminescenciya i ee primeneniye dlya analiza kondensirovannich veshstv* [Pulsed Cathodoluminescence and Its Application for the Analysis of Condensed Matter]. Yekaterinburg: Ural Branch of RAS.
13. Burachenko, A.G., Ripenko, V.S., Lipatov, E.I., Artemov, K.P., & Krylov, A.A. (2022) Katodoluminescenciya azotosoderzhashchikh almaznich obraztsov pri temperaturach 80–800 K [Cathodoluminescence of Nitrogen-Containing Diamond Samples at Temperatures of 80–800 K]. *Izvestiya VUZ. Physics*. 65 (11). pp. 19–25.
14. Baksht, E.Kh., Alekseev, B.A., Burachenko, A.G., Vukolov, A.V., Potylitsyn, A.P., Tarasenko, V.F., Uglov, S.R. & Shevelev, M.V. (2022) Emission of fused silica and KBr samples in the UV and visible spectral ranges under irradiation with 2.7 MeV electrons. *Matter and Radiation at Extremes*. 7 (2). pp. 026901. doi: 10.1063/5.0061100
15. Tarasenko, V.F., Baksht, E.Kh., Yerofeev, M.V., & Burachenko, A.G. (2021) Spectral and Amplitude-Temporal Characteristics of Cherenkov Radiation Excited in Transparent Materials by an Electron Beam. *Optics and Spectroscopy*. 129. pp. 569. doi: 10.21883/OS.2021.05.50883.310-20
16. Burachenko, A.G., Artemov, K.P., Vukolov, A.V., Krylov, A.A., Lipatov, E.I., Ripenko, V.S., & Gogolev, A.S. (2023) Vavilov-Cherenkov Radiation and Cathodoluminescence in Diamond under the Action of Electrons with an Energy of 5.7 MeV. *Optics and Spectroscopy* 131 (12). pp. 1653–1660. doi: 10.61011/OS.2023.12.57400.5713-23
17. Zaitsev, A.M. (2001) Optical properties of diamond: A data handbook. Berlin: Springer. doi: 10.1007/978-3-662-04548-0
18. Takeuchi, D., Watanabe, H., Yamanaka, S., Okushi, H., Sawada, H., Ichinose, H., Sekiguchi, T. & Kajimura, K. (2001) Origin of band-A emission in diamond thin films. *Physical review B*. 63 (245328). pp. 1–7. doi: 10.1103/PhysRevB.63.245328
19. Sobolev, E.V. & Eliseev, A.P. (1976) Ob energeticheskikh urovnyach centrov N9 i ND1 v almazach [On the Energy Levels of N9 and ND1 Centers in Diamonds]. *Jurnal strukturnoy khimii - Journal of Structural Chemistry*. 17 (5). pp. 935–938.
20. Dean, P.J. & Jones, I.H. (1964) Recombination radiation from diamond. *Physical review* 133 (6A). pp. A1698–A1705.
21. Walker, J. (1979) Optical absorption and luminescence in diamond. *Reports on progress in physics*. 42. pp. 1607–1659.

Информация об авторах:

Крылов Александр Александрович – студент радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); инженер лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия). E-mail: daivi22@mail.ru

Бураченко Александр Геннадьевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); научный сотрудник лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия). ORCID ID: 0000-0002-5929-5697

Рипенко Василий Сергеевич – научный сотрудник лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); младший научный сотрудник лаборатории оптических излучений, Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия). E-mail: dsws@vripenko.ru. ORCID ID: 0000-0003-1216-4881

Переседова Дарья Александровна – студент радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); инженер лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия). ORCID ID: 0009-0002-9935-1101

Вуколов Артем Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Национального исследовательского Томского политехнического университета (Томск, Россия). SPIN-код: 5900-6464.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Krylov Alexander A., Student, faculty of radiophysics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); engineer, laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: daivi22@mail.ru

Burachenko Alexander G., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), researcher, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); researcher of the laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). ORCID ID: 0000-0002-5929-5697

Ripenko Vasily S., Researcher, laboratory of quantum information technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); junior researcher, laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: dsws@vripenko.ru. ORCID ID: 0000-0003-1216-4881

Peresedova Daria A., Student, faculty of radiophysics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); engineer, laboratory of optical radiation, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). ORCID ID: 0009-0002-9935-1101

Vukolov Artyom V., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), senior researcher, Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russian Federation). SPIN-code: 5900-6464

The authors declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.11.2024; одобрена после рецензирования 23.12.2024; принята к публикации 26.12.2024

The article was submitted 22.11.2024; approved after reviewing 23.12.2024; accepted for publication 26.12.2024

ok