

УДК 53.05, 53.06

PACS: 78.47.+p

## Излучение Вавилова–Черенкова в кварце, сапфире и $MgF_2$ , инициированного пучком электронов с энергией до 400 кэВ

М. В. Ерофеев, В. И. Олешко, В. Ф. Тарасенко

*Проведены исследования свечения кварца, сапфира и кристаллов  $MgF_2$  под воздействием пучка электронов с энергией до 400 кэВ. Во всех образцах зарегистрированы полосы излучения, интенсивность которых в ультрафиолетовой (УФ) области спектра при отсутствии поглощения увеличивается с уменьшением длины волны, а форма импульса излучения в области 200–400 нм соответствует форме импульса тока пучка. Данные полосы были отнесены к излучению Вавилова–Черенкова (ИВЧ). Установлено, что в сапфире и кристаллах  $MgF_2$  во время облучения пучком электронов возникает наведённое поглощение, которое существенно влияет на спектр излучения.*

*Ключевые слова:* излучение Вавилова–Черенкова, пучок электронов, катодоллюминесценция, поглощение.

**Ссылка:** Ерофеев М. В., Олешко В. И., Тарасенко В. Ф. // Прикладная физика. 2020. № 2. С. 15.

**Reference:** M. V. Erofeev, V. I. Oleshko, and V. F. Tarasenko, Applied Physics, No. 2, 15 (2020).

### Введение

Диагностика параметров пучков электронов является важной задачей. Последнее десятилетие возникла необходимость в изучении генерации убегающих электронов в установках для исследований плазмы типа ТОКАМАК, см., например, [1–5] и ссылки в этих работах. Генерация убегающих электронов (УЭ) при нагреве плазмы приводит к потерям энергии и к испарению стенок рабочих камер [1, 2]. Пары материала стенок уменьшают температуру плазмы и изменяют её состав. В работах [6, 7] сообщалось о создании детекторов, предназначенных для регистрации УЭ в ТОКАМАКах. В этих детекторах, называемых в англоязычной литературе Черенков-

скими детекторами (Cherenkov-type detector), УЭ попадают на радиатор, который обычно изготавливается из алмаза и защищается от воздействия плазмы плёнкой из металла. Далее оптическое излучение из алмаза, которое авторы [6, 7] относят к излучению Вавилова–Черенкова (ИВЧ), передается за пределы рабочей камеры установки по кварцевым световодам и регистрируется ФЭУ. Известно, что ИВЧ возникает при движении в веществе электрически заряженных частиц (например, электронов) со скоростью, превышающей фазовую скорость света. ИВЧ носит универсальный характер и является безынерционным излучением. Интенсивность ИВЧ в УФ и видимой области спектра возрастает при увеличении скорости электронов (при этом энергия должна быть выше пороговой для данного образца), а также с уменьшением длины волны. Однако результаты калибровки Черенковского детектора в [8] показали, что спектр его излучения не соответствует спектру ИВЧ.

С другой стороны, спектры ИВЧ и короткие длительности импульсов излучения были зарегистрированы в алмазе, кварце, сапфире и других кристаллах при возбуждении пучками электронов [9–11], в том числе, при энергиях электронов до 350 и до 400 кэВ с по-

Ерофеев Михаил Владимирович<sup>1</sup>, с.н.с., к.ф.-м.н.

Олешко Владимир Иванович<sup>2</sup>, профессор, д.-ф.м.н.

Тарасенко Виктор Федотович<sup>1</sup>, г.н.с., д.ф.-м.н.

<sup>1</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН.

Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3.

E-mail: MVE@loi.hcei.tsc.ru

<sup>2</sup> Томский политехнический университет.

Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 30.

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2020 г.

© Ерофеев М. В., Олешко В. И., Тарасенко В. Ф., 2020

мощью стандартных спектрометров [12–14]. Также было обнаружено [12, 13], что в алмазе при увеличении плотности тока пучка на полосу ИВЧ в УФ-области спектра накладывается мощная экситонная полоса с максимумом на длине волны 235 нм [15]. Всё это требует продолжения исследований ИВЧ в различных образцах, в том числе от различных производителей.

Цель данной работы – провести исследование свечения кварца, сапфира и  $MgF_2$  при возбуждении наносекундным пучком электронов с энергией до 400 кэВ и определить наличие ИВЧ в образцах различных производителей.

### Экспериментальная установка и методики измерений

Для возбуждения был применен генератор ГИН-600 [16], который формировал импульсы напряжения с амплитудой до 400 кВ. Длительность импульса на полувысоте составляла  $\tau \approx 12$  нс, а плотность тока за фольгой  $j \approx 100$  А/см<sup>2</sup>. Максимальная энергия электронов в пучке достигала 400 кэВ. Исследуемые кристаллы располагались за выходным окном генератора, покрытого алюминиевой фольгой толщиной 30 мкм, на расстоянии  $\approx 2$  мм от нее.

В данной работе использовались диски диаметром 60 мм из сапфира, кварца КУ-1 и  $MgF_2$  толщиной 5, 8 и 9 мм, соответственно.

Спектры излучения образцов, а также спектры их пропускания измерялись с помощью спектрометра OceanOptics HR2000+ES (диапазон 190–1100 нм, разрешение 0,9 нм) с известной спектральной чувствительностью. Амплитудно-временные характеристики излучения в диапазоне 200–700 нм, как и в работе [12], исследовались с помощью фотодиода Photek PD025 (катод LNS20 компании Photek, длительность переходной характеристики  $\sim 80$  пс). Коротковолновая граница излучения ограничивалась поглощением образцов или воздуха, а длинноволновая уменьшением чувствительности фотодиода.

Для определения длительности и амплитуды тока пучка использовался конический коллектор, с диаметром приёмной части 20 мм [10], который устанавливался вместо кристалла. Сигналы с фотодиода PD025 и коллектора электронов регистрировались с помощью цифрового осциллографа Tektronix TDS3054B.

### Результаты измерений и их обсуждение

Проведенные спектральные исследования показали, что оптическое пропускание (рис. 1, а) всех исследуемых образцов практически не меняется в видимой области спектра и спадает при переходе от длинноволновой УФ-области к коротковолновой.

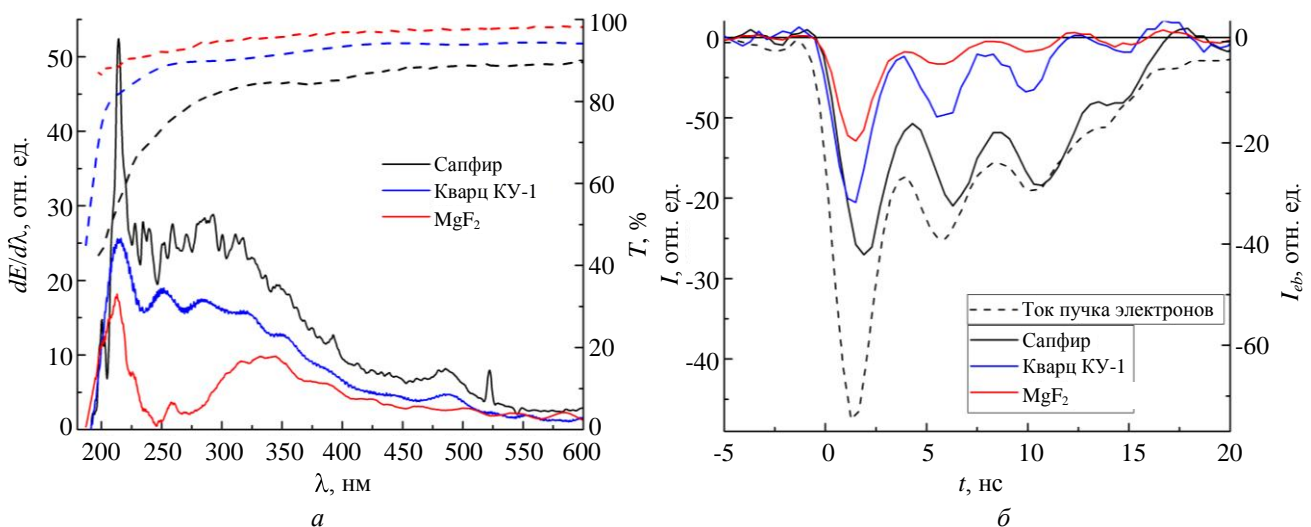


Рис. 1. а – спектры пропускания (пунктирные кривые, правая ось) кристаллов  $MgF_2$ , кварца КУ-1 и сапфира и спектры их излучения (сплошные кривые, левая ось) при возбуждении электронным пучком; б – импульс тока пучка электронов  $I_{eb}$  (пунктирная кривая) и временной ход излучения кристаллов  $MgF_2$ , кварца КУ-1 и сапфира

ра, полученный с фотоприемника Photek PD025.

Так пропускание в диапазоне длин волн 350–600 нм для кристалла  $MgF_2$ , кварца КУ-1 и сапфира составляет 98 %, 95 % и 90 %, соответственно. Наилучшее пропускание в УФ-области спектра имеет кристалл  $MgF_2$  – его пропускание равномерно снижается с 97 % до 93 %, тогда как пропускание кварца резко падает в диапазоне 250–200 нм (с 90 % до 74 %), а спад пропускания сапфира начинается уже с длины волны 350 нм – с 84 % до 44 % на 200 нм. Несмотря на это при возбуждении образцов пучком электронов, их спектральная плотность мощности растет с уменьшением длины волны (сплошные кривые на рис. 1, а). Сильный спад интенсивности излучения на длинах волн 245 и 265 нм в излучении  $MgF_2$  [17], на 230 и 270 нм в излучении кварца [18] и в диапазоне длин волн 225–280 нм в излучении сапфира [19], связан с наведенным электронным пучком поглощением на F-центрах разной конфигурации. Минимальная задержка импульсов излучения образцов относительно начала импульса тока пучка электронов, при том, что их временной ход в целом повторяет его форму (рис. 1, б), а также характер спектров позволяют отнести зарегистрированное оптическое излучение к ИВЧ.

Также в работе проводились сравнительные исследования спектров свечения кристаллов различного диаметра, выращенных разными производителями. Кристаллы кварца марки КУ-1 (ЛОМО, г. Ленинград) и кварца GE214 (пластина толщиной 2 мм), произведенного на заводе General Electric, были практически идентичны друг другу. Аналогичный результат был получен на двух имеющихся кристаллах  $MgF_2$ , полученных из разных источников. Спектры же свечения сапфиров различного диаметра заметно отличались. На рис. 2 показаны спектры свечения сапфиров диаметрами 60, 30 и 20 мм под действием электронного пучка. Видно, что в спектрах образцов с диаметром 60 мм и 30 мм (производство «Института монокристаллов» г. Харьков) присутствуют интенсивные полосы в области длин волн 650–800 нм, соответствующие примесям хрома. Спектры сапфиров в УФ-области также существенно отличаются, что вызвано наличием многих центров окраски, образующихся при различных технологи-

ях производства.

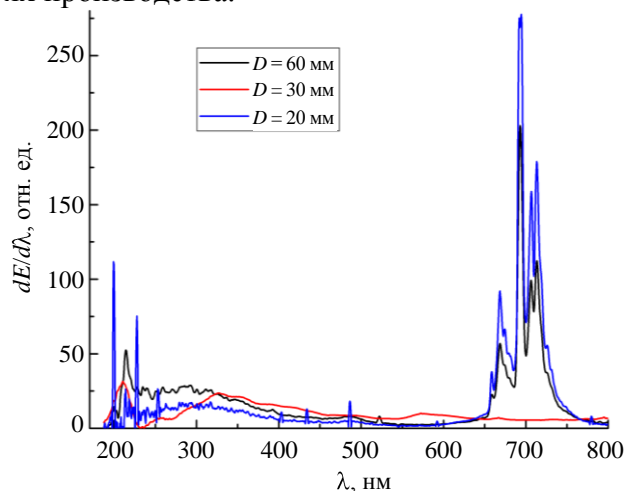


Рис. 2. Спектры излучения сапфиров диаметром 60, 30 и 20 мм при их возбуждении пучком электронов.

## Заключение

Излучение Вавилова–Черенкова было зафиксировано в спектрах свечения всех исследованных в данных экспериментах кристаллов, возбуждаемых пучком электронов с энергией 400 кэВ. Наибольшую интенсивность свечения в УФ-области спектра имеют кристаллы сапфира, однако их спектры существенно разнятся в зависимости от размеров кристаллов и их производителей. На излучение кристаллов  $MgF_2$  существенное влияние оказывает наведенное поглощение. Таким образом в качестве черенковского детектора пучков электронов, целесообразно использовать образцы из кварца высокой чистоты.

Работа выполнена в рамках проекта  
Российского Научного Фонда № 18-19-00184.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Sadowski M. J. // Nukleonika. 2011. Vol. 56. P. 85.
2. Savrukhin P. V., Shestakov E. A. // Nuclear Fusion. 2015. Vol. 55 (4). P. 043016.
3. Breizman B. N., Aleynikov P., Hollmann E. M., Lehnen M. // Nuclear Fusion. 2019. Vol. 59 (8). P. 083001.
4. Lvovskiy A., Heidbrink W. W., Paz-Soldan C., Spong D. A., Dal Molin A., Eidietis N. W., Thome K. E. // Nuclear Fusion. 2019. Vol. 59 (12). P. 124004.
5. McDevitt C. J., Guo Z., Tang X. Z. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2019. Vol. 61 (5).

P. 054008.

6. Jakubowski L., Sadowski M. J., Zebrowski J., Rabinski M., Jakubowski M. J., Malinowski K., ... Colledani, Note G. // Review of Scientific Instruments. 2013. Vol. 84. No. 1. P. 016107.

7. Zebrowski J., Jakubowski L., Rabinski M., Sadowski M. J., Jakubowski M. J., Kwiatkowski R., ... Weinzettl V. // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 959. No. 1. P. 012002.

8. Bagnato F., Romano A., Buratti P., Doria A., Gabellieri L., Giovenale E., Rabinski M. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2018. Vol. 60 (11). P. 115010.

9. Бураченко А. Г., Белоплотов Д. В., Сорокин Д. А., Тарасенко В. Ф., Бакут Е. Х., Ломаев М. И., Луна-тов Е. И. // Прикладная физика. 2017. № 3. С. 5.

10. Sorokin D. A., Burachenko A. G., Beloplotov D. V., Tarasenko V. F., Baksht E. Kh., Lipatov E. I., Lomaev M. I. // J. Appl. Phys. 2017. Vol. 122. P. 093304(1-6).

11. Burachenko A. G., Tarasenko V. F., Beloplotov D. V., Baksht E. Kh. // Russ. Phys. J. 2018. Vol. 60. P. 1533.

12. Tarasenko V. F., Oleshko V. I., Erofeev M. V., Lipatov E. I., Beloplotov D. V., Lomaev M. I., Burachenko A. G., Baksht E. K. // J. Appl. Phys. 2019. Vol. 125 (24). P. 244501.

13. Tarasenko V. F., Oleshko V. I., Lipatov E. I., Erofeev M. V. // In XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications. 2019. Vol. 11322. P. 113222U.

14. Tarasenko V. F., Baksht E. K., Beloplotov D. V., Burachenko A. G., Erofeev M. V., Lipatov E. I., Oleshko V. I. // Russian Physics Journal. 2019. Vol. 62 (7). P. 1181.

15. Lipatov E. I., Genin D. E., Grigor'ev D. V., Tarasenko V. F. "Recombination Radiation in the Diamond" Chapter 9, pp. 191–224. // In Book "Luminescence - An Outlook on the Phenomena and their Applications". Published by Intech, 2016. Additional information is available at <http://dx.doi.org/10.5772/65064>.

16. Oleshko V. I., Tarasenko V. F., Burachenko A. G., Nguyen V. V. // Tech. Phys. Lett. 2019. Vol. 45 (4). P. 309.

17. Sergeev A. P., Sergeev P. B. // Quantum electron. 2008. Vol. 38. No. 3. P. 251.

18. Sergeev P. B., Sergeev A. P., Zvorykin V. D. // Quantum electron. 2007. Vol. 37. No. 8. P. 706.

19. Kulagin N. A. // Quantum electron. 2012. Vol. 42. No. 11. P. 1008.

PACS: 78.47.+p

## Cherenkov radiation in quartz, sapphire and MgF<sub>2</sub> under the action of electron beam with energy up to 400 keV

M. V. Erofeev<sup>1</sup>, V. I. Oleshko<sup>2</sup>, and V. F. Tarasenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of High Current Electronics  
2/3 Academicheskii Ave, Tomsk, 634055, Russia  
E-mail: MVE@loi.hcei.tsc.ru

<sup>2</sup>Tomsk Polytechnic University  
30 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia

Received February 17, 2020

*Study of quartz, sapphire and MgF<sub>2</sub> radiation under the action of electron beam with energy up to 400 keV have been carried out. Radiation bands, which intensity increased in the UV-region with decreasing of wavelength and at absorption absence, as well as radiation waveform in the 200–400 nm spectral region repeated the electron beam current waveform, have been registered for all specimens. These radiation bands were attributed to the Cherenkov radiation. It was established, that induced absorption appears in sapphire and MgF<sub>2</sub> during the irradiation by electron beam and has significant effect on the radiation spectra.*

*Keywords:* Cherenkov radiation, electron beam, cathodoluminescence, absorbance.

## REFERENCES

1. M. J. Sadowski, *Nukleonika* **56**, 85 (2011).
2. P. V. Savrukhin and E. A. Shestakov, *Nuclear Fusion* **55** (4), 043016 (2015).
3. B. N. Breizman, P. Aleynikov, E. M. Hollmann, and M. Lehnen, *Nuclear Fusion* **59** (8), 083001 (2019).
4. A. Lvovskiy, W. W. Heidbrink, C. Paz-Soldan, D. A. Spong, A. Dal Molin, N. W. Eidietis, and K. E. Thome, *Nuclear Fusion* **59** (12), 124004 (2019).
5. C. J. McDevitt, Z. Guo, and X. Z. Tang, *Plasma Physics and Controlled Fusion* **61** (5), 054008 (2019).
6. L. Jakubowski, M. J. Sadowski, J. Zebrowski, M. Rabinski, M. J. Jakubowski, K. Malinowski, ... Colledani, and G. Note, *Review of Scientific Instruments* **84** (1), 016107 (2013).
7. J. Zebrowski, L. Jakubowski, M. Rabinski, M. J. Sadowski, M. J. Jakubowski, R. Kwiatkowski, ... and V. Weinzettl, *Journal of Physics: Conference Series* **959** (1), 012002 (2018).
8. F. Bagnato, A. Romano, P. Buratti, A. Doria, L. Gabellieri, E. Giovenale, and M. Rabinski, *Plasma Physics and Controlled Fusion* **60** (11), 115010 (2018).
9. A. G. Burachenko, D. V. Beloplotov, D. A. Sorokin, V. F. Tarasenko, E. Kh. Baksht, M. I. Lomaev, and E. I. Lipatov, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 5 (2017).
10. D. A. Sorokin, A. G. Burachenko, D. V. Beloplotov, V. F. Tarasenko, E. Kh. Baksht, E. I. Lipatov, and M. I. Lomaev, *J. Appl. Phys.* **122**, 093304(1-6) (2017).
11. A. G. Burachenko, V. F. Tarasenko, D. V. Beloplotov, and E. Kh. Baksht, *Russ. Phys. J.* **60**, 1533 (2018).
12. V. F. Tarasenko, V. I. Oleshko, M. V. Erofeev, E. I. Lipatov, D. V. Beloplotov, M. I. Lomaev, A. G. Burachenko, and E. K. Baksht, *J. Appl. Phys.* **125** (24), 244501 (2019).
13. V. F. Tarasenko, V. I. Oleshko, E. I. Lipatov, and M. V. Erofeev, *In XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications*, **11322**, 113222U (2019).
14. V. F. Tarasenko, E. K. Baksht, D. V. Beloplotov, A. G. Burachenko, M. V. Erofeev, E. I. Lipatov, and V. I. Oleshko, *Russian Physics Journal* **62** (7), 1181 (2019).
15. E. I. Lipatov, D. E. Genin, D. V. Grigor'ev, and V. F. Tarasenko "Recombination Radiation in the Diamond" Chapter 9, pp. 191–224. // In Book "Luminescence - An Outlook on the Phenomena and their Applications". Published by Intech, 2016. Additional information is available at <http://dx.doi.org/10.5772/65064>.
16. V. I. Oleshko, V. F. Tarasenko, A. G. Burachenko, and V. V. Nguyen, *Tech. Phys. Lett.* **45** (4), 309 (2019).
17. A. P. Sergeev and P. B. Sergeev, *Quantum electron.* **38** (3), 251 (2008).
18. P. B. Sergeev, A. P. Sergeev, and V. D. Zvorykin, *Quantum electron.* **37** (8), 706 (2007).
19. N. A. Kulagin, *Quantum electron.* **42** (11), 1008 (2012).