

УДК 53.05, 53.06

PACS: 78.47.+p

## Вклад катодолюминесценции и фотолюминесценции в сигналы с алмазных детекторов пучков убегающих электронов

А. Г. Бураченко, Д. В. Белоплотов, Д. А. Сорокин, В. Ф. Тарасенко,  
Е. Х. Бакшт, М. И. Ломаев, Е. И. Липатов

*Исследовано свечение алмазов Па типа (природного и искусственного) под воздействием пучка убегающих электронов субнаносекундной длительности и излучения импульсной KrCl-эксилампы. Показан существенный вклад катодолюминесценции (КЛ), а также фотолюминесценции (ФЛ) на спектры излучения в области 310–650 нм. Излучения Вавилова-Черенкова (ИВЧ) зарегистрировано только в области 225–310(350) нм и только с помощью монохроматора и ФЭУ. Измерены задержки между импульсами ИВЧ и КЛ. Показано, что коротковолновое ультрафиолетовое излучение усиливает интенсивность ФЛ.*

*Ключевые слова:* пучок убегающих электронов, катодолюминесценция, фотолюминесценция, излучение Вавилова-Черенкова.

### Введение

Последние годы существенно повысился интерес к изучению генерации убегающих электронов (УЭ) в установках для исследований плазмы типа ТОКАМАК (см., например, [1–3] и ссылки в этих работах). Генерация убегающих электронов при нагреве плазмы приводит к потерям энергии и к испарению стенок вакуумных камер. Пары материала стенок, в свою очередь, уменьшают температуру плазмы и изменяют её состав. В работах [4, 5] уже сообщалось о создании и применении датчиков, предназначенных для регистрации УЭ в установках для исследований управляемого термоядерного синтеза. В этих датчиках, называемых в англоязычной литературе черенковскими детекторами (Cherenkov-type detector), используется излучение, которое авторы [4, 5] относят к излучению Вавилова-Черенкова (ИВЧ).

В черенковских детекторах УЭ попадают на приемную часть, которая обычно изготавливается из алмаза и защищается от непосредственного воздействия плазмы плёнкой из металла. Далее оптическое излучение, т. е. ИВЧ, возникающее в алмазе, передается за пределы рабочей камеры установки по кварцевым световодам и регистрируется фотоэлектронными умножителями (ФЭУ).

Черенковские детекторы весьма сложны и их технология постоянно совершенствуется (см. результаты в работах [4] и [5]). 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. Под действием заряженных частиц с достаточной высокой энергией «светятся» все прозрачные тела, находящиеся в жидком, газообразном и твёрдом состоянии. Спектральную плотность мощности ИВЧ  $dJ(\lambda)/d\lambda$  для одного электрона можно определить через эффективную силу радиационного торможения  $dF$  [см. формулу в 6, 7]:

$$\begin{aligned}
 dJ(\omega) &= VdF = \frac{e^2}{c^2} V \left( 1 - \frac{c^2}{V^2 n^2} \right) \omega d\omega = \\
 &= dJ(\lambda) = 4\pi^2 e^2 V \left( 1 - \frac{c^2}{V^2 n^2} \right) \frac{d\lambda}{\lambda^3} \quad (1) \\
 \frac{V}{c} &= \frac{\sqrt{(1 + E / mc^2)} - 1}{1 + E / mc^2}.
 \end{aligned}$$

Бураченко Александр Геннадьевич, младший научный сотрудник.

Белоплотов Дмитрий Викторович, младший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

Сорокин Дмитрий Алексеевич, научный сотрудник, к.ф.-м.н.

Тарасенко Виктор Федотович, зав. лабораторией, д.ф.-м.н.

Бакшт Евгений Хаимович, старший научный сотрудник, к.т.н.

Ломаев Михаил Иванович, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.

Липатов Евгений Игоревич, научный сотрудник, к.ф.-м.н. Институт сильноточной электроники СО РАН.

Россия, 634050, Томск, просп. Академический, 2/3.

Тел. (3822) 491-685. E-mail: bag@loi.hcei.tsc.ru

Статья поступила в редакцию 27 апреля 2017 г.

© Бураченко А. Г., Белоплотов Д. В., Сорокин Д. А., Тарасенко В. Ф., Бакшт Е. Х., Ломаев М. И., Липатов Е. И., 2017

Здесь  $n$  – показатель преломления среды,  $m$  – масса электрона,  $c$  – скорость света в вакууме,  $V$  – скорость электрона,  $E$  – кинетическая энергия электрона. Величина пороговой энергии электронов  $E_0$  для появления ИВЧ рассчитывается из равенства нулю выражения в круглых скобках (1). При показателе преломления алмаза, который составляет 2,42,  $E_0 \approx 50$  кэВ. Такая же величина пороговой энергии для возникновения ИВЧ приводится и в других работах [4, 5]. Из формулы (1) можно также рассчитать зависимости спектральной плотности мощности ИВЧ от длины волны при различных энергиях электронов и при различных показателях преломления. Расчётные зависимости спектральной плотности мощности ИВЧ в полиметилметакрилате от длины волны для энергий электронов 200, 250 и 300 кэВ приведены в работе [7]. Как следует из формулы (1) и данных из работы [7], спектральная плотность мощности ИВЧ в области пропускания кварцевых световодов для ультрафиолетового и видимого диапазонов возрастает с уменьшением длины волны, а также при увеличении энергии электронов.

Однако в монографии [8] показано, что при возбуждении импульсными пучками электронов с энергиями в десятки-сотни кэВ природных и искусственных алмазов, а также других кристаллов, основной вклад в излучение даёт катодолюминесценция (КЛ). Исследование в другой работе [9] излучения различных кристаллов, возбуждаемых пучками УЭ субнаносекундной длительности, также показало, что в диапазоне длин волн 200–800 нм основной вклад в спектр излучения природных и искусственных алмазов даёт катодолюминесценция.

Цель данной работы – провести исследования свечения природного и искусственного алмазов, возбуждаемых субнаносекундным пучком убегающих электронов с энергией десятки-сотни кэВ, и определить относительный вклад ИВЧ и КЛ в различных спектральных диапазонах. Применение пучка электронов с длительностью  $\sim 100$  пс обусловлено тем, что при субнаносекундном разрешении системы регистрации временные характеристики излучения можно использовать для разделения вклада ИВЧ и КЛ.

### Экспериментальная установка и методики исследования

Для возбуждения алмазных образцов был применен сверхкороткий лавинный электронный пучок (СЛЭП), получаемый в газовом диоде [10]. Также для сравнения возбуждение алмаза осуществлялось УФ-излучением от KгCl-эксилампы на длине волны 222 нм [11].

При получении спектров и амплитудно-временных характеристик оптического излучения

алмазов использовались три режима возбуждения пучком электронов с нижеследующими параметрами СЛЭП.

– *Режим 1*: плотность тока пучка  $j \approx 75$  А/см<sup>2</sup>, длительность импульса СЛЭП на полувысоте  $\tau \approx 180$  пс, частота следования импульсов  $f = 1$  Гц; соответствующее распределение электронов по энергиям представлено на рис. 1 (кривая 1).

– *Режим 2*:  $j \approx 1,1$  А/см<sup>2</sup>,  $\tau \approx 100$  пс,  $f = 1$  Гц, распределение электронов по энергиям подобно распределению в режиме 1 (т.е. кривая 1 отражает распределение в режимах 1 и 2). В режиме 2 излучение регистрировалось с помощью монохроматора и ФЭУ.

– *Режим 3*:  $j \approx 1,6$  А/см<sup>2</sup>,  $\tau \approx 100$  пс,  $f = 60$  Гц, распределение электронов по энергиям представлено на рис. 1 (кривая 3).

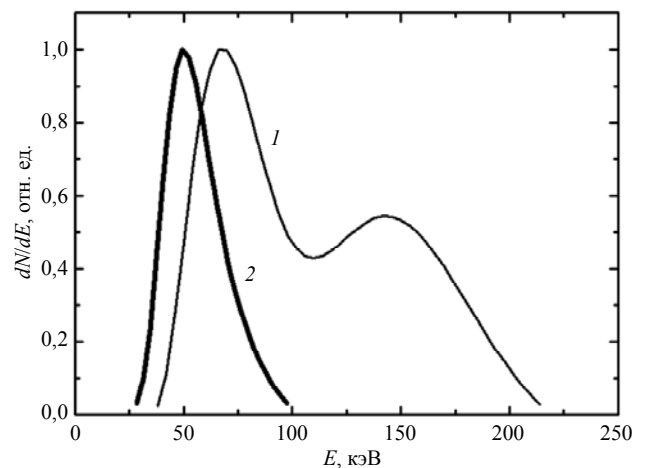


Рис. 1. Распределение электронов по энергиям в различных режимах возбуждения алмаза: кривая 1 – режимы 1 и 2; кривая 2 – режим 3.

Изменение режимов генерации СЛЭП осуществлялось за счет применения различных генераторов, а также за счет вариации сорта газа в диоде и его давления. Подробное описание генераторов, коллекторов и методик измерений параметров СЛЭП приведено в коллективной монографии [10].

Как видно из рис. 1, в режимах 1 и 2 более 95 % электронов в пучке имеет энергию, превышающую пороговую ( $\approx 50$  кэВ) для ИВЧ в алмазе. В режиме 3 доля таких электронов превышает 60 %.

Спектры излучения алмазов, а также спектры их пропускания измерялись с помощью спектрометра OceanOptics HR2000+ES (диапазон 190–1100 нм, разрешение:  $\sim 0,9$  нм) с известной спектральной чувствительностью. Амплитудно-временные характеристики излучения в диапазоне 225–700 нм, как и в работе [9], исследовались с высоким временным разрешением с помощью фотодиода PD025 (катод LNS20 компании Photek,

длительность переходной характеристики ~80 пс). Коротковолновая граница регистрируемого излучения определялась поглощением алмаза, а длинноволновая – уменьшением чувствительности фотодиода. Исследование амплитудно-временных характеристик излучения на различных длинах волн осуществлялось с помощью монохроматора МДР-23 (решётка –1200 штрихов/мм, величина обратной линейной дисперсии – 13 Å/мм, ширина входной и выходной щелей монохроматора – 400 мкм) и ФЭУ Н7732-10 Hamamatsu (рабочий диапазон длин волн – 185–900 нм, диапазон изменения чувствительности ФЭУ –  $10^3$ – $10^7$ , длительность переходной характеристики – 2,2 нс) с известной спектральной чувствительностью.

Сигналы с фотодиода PD025 и коллектора электронов регистрировались с помощью цифрового осциллографа Agilent DSO-X6004A (рабочая полоса до 6 ГГц, 20 выборок за наносекунду), а сигналы с ФЭУ – с помощью цифрового осциллографа Tektronix TDS3054B (0,5 ГГц, 5 выборок за наносекунду).

В данной работе использовались прозрачные пластинки природного и искусственного алмазов Па типа толщиной 0,25 и 0,5 мм соответственно. Искусственный алмаз был получен методом газохимического осаждения.

### Спектры излучения природного и искусственного алмазов

Спектральные характеристики излучения алмаза были измерены в режимах 1 и 3 при возбуждении с помощью СЛЭП, а также при возбуждении УФ-излучением от эксилампы. На рис. 2 представлены данные для природного алмаза, а на рис. 3 – данные для искусственного алмаза.

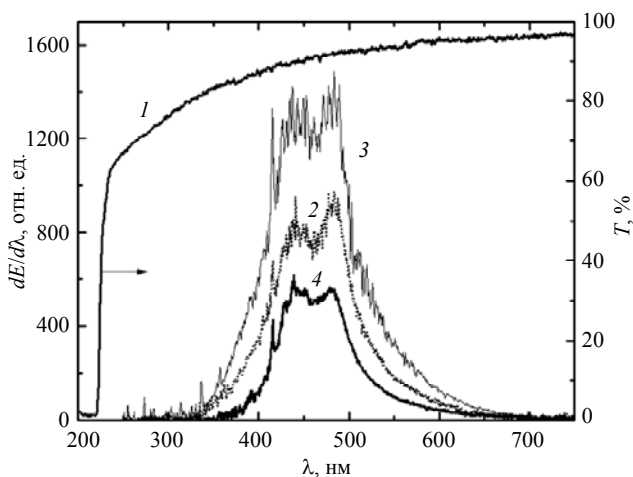


Рис. 2. Спектры пропускания (кривая 1) и излучения природного алмаза при возбуждении с помощью СЛЭП в режимах 3 (кривая 2) и 1 (кривая 3), а также эксилампой (кривая 4).

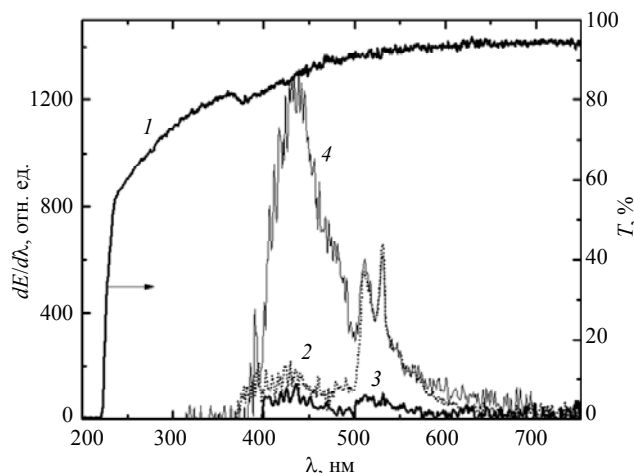


Рис. 3. Спектры пропускания (кривая 1) и излучения искусственного алмаза при возбуждении с помощью СЛЭП в режимах 3 (кривая 2) и 1 (кривая 3), а также эксилампой (кривая 4).

В интегральных спектрах КЛ природного алмаза (см. рис. 2) в области 330–650 нм при всех трех источниках возбуждения видна хорошо известная суперпозиция бесструктурной А-полосы и электронно-колебательной системы (ЭКС) N3 [12, 13]. При этом А-полоса в диапазоне 350–650 нм обусловлена собственными дефектами, а именно,  $sp^2$ -гибризированными углеродными связями [14]. Центрами ЭКС N3 являются комплексные дефекты, включающие три замещающих атома азота в соседних узлах решетки в плоскости <111>, связанные с общей вакансией, т. н. N<sub>3</sub>V-дефекты [15]. Бесфононная линия (БФЛ) ЭКС N3 наблюдается при 415 нм, причем её основные фонные повторения – при 428, 439 и 452 нм. В области 225–310 нм, которая попадает в область пропускания используемых кристаллов алмаза и в которой должно наблюдаться ИВЧ, излучение на спектрограммах было слабым и надежно не регистрировалось.

В спектрах КЛ искусственного алмаза (см. рис. 3) интенсивность излучения в области 370–650 нм уменьшилась (отсутствие вклада ЭКС N3), изменилось распределение энергии излучения по спектру в данной области и проявилась зависимость спектра от режима возбуждения.

Наиболее сильное уменьшение регистрируемой интенсивности излучения в области 370–650 нм было получено при частоте следования импульсов 1 Гц. Причем в режиме 2 из-за уменьшения плотности тока СЛЭП более, чем на порядок, зарегистрировать спектр излучения искусственного алмаза не удалось. При возбуждении в импульсно-периодическом режиме с частотой 60 Гц уменьшение интенсивности излучения в области 370–650 нм было меньше, чем в режиме однократных импульсов. Кроме того, в режиме 3 изменилось распределение энергии оптического

излучения по спектру. В спектре свечения КЛ помимо А-полосы при 350–650 нм наблюдались ЭКСы 389 нм и 3Н [16]. ЭКС 389 нм названа по спектральному положению БФЛ, причем её фонные повторения наблюдаются при 400, 410 и 420 нм. БФЛ ЭКС 3Н при 503 нм характеризуется низкой интенсивностью при комнатной температуре, а ее основные фонные повторения наблюдаются при 510 и 530 нм. На данный момент еще не предложены модели центров ЭКС 389 нм и 3Н, которые бы описывали все наблюдаемые данные, но можно утверждать, что данные ЭКСы обусловлены междоузельными атомами, т. е. радиационными дефектами [16]. В области 225–350 нм излучение на спектрограммах было слабым и надежно не регистрировалось, как и в режиме 1. Соответственно при увеличении частоты следования импульсов тока СЛЭП интенсивность излучения искусственного алмаза в области 370–650 нм увеличивается, что может быть обусловлено накоплением радиационных дефектов, которые не успевают релаксировать в паузах между импульсами возбуждения.

При возбуждении импульсами УФ-излучения ( $\lambda \sim 222$  нм) с длительностью  $\sim 200$  нс от КгСл-эксилампы, которые следовали с частотой 43 кГц и обеспечивали на образцах среднюю плотность мощности излучения  $7$  мВт/см<sup>2</sup>, также наблюдались ЭКСы 389 нм и 3Н (500–540 нм). Интенсивность А-полосы в области 400–500 нм значительно увеличилась. Из этих результатов следует, что при облучении алмазов коротковолновым УФ-излучением интенсивность излучения алмазов в области 350–650 нм увеличивается. Соответственно, ИВЧ при его достаточной интенсивности может также давать вклад в интегральное свечение алмаза, возбуждая ФЛ.

#### Амплитудно-временные характеристики излучения в различных спектральных диапазонах

Применение монохроматора МДР-23 и ФЭУ позволило сравнить энергию и длительность импульсов излучения образцов алмаза в различных спектральных областях и получить зависимости спектральной плотности энергии излучения от длины волны. Чувствительность используемого ФЭУ оказалась достаточной для достоверной регистрации излучения образцов алмаза и в области 225–320 нм. Полученные зависимости приведены на рис. 4. Данные зависимости построены с учетом спектров пропускания образцов алмаза, оптических элементов системы регистрации, а также спектральной чувствительности ФЭУ.

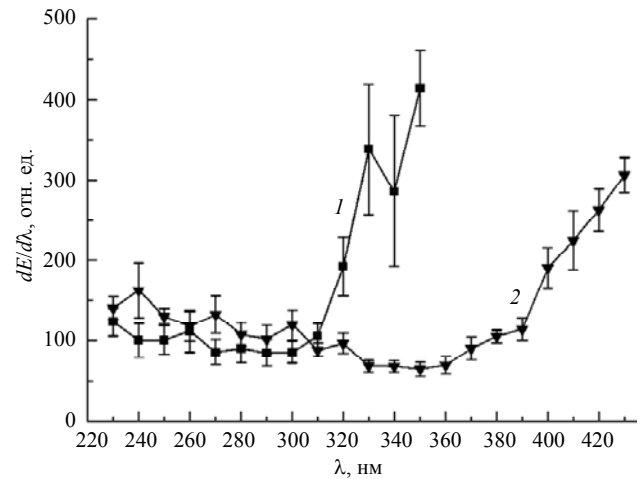


Рис. 4. Зависимости спектральной плотности энергии излучения природного (кривая 1) и искусственного (кривая 2) алмазов при возбуждении с помощью СЛЭП от длины волны, полученные в режиме 2 с применением ФЭУ и монохроматора МДР-23.

Из рис. 4 следует, что в области 225–310 нм для природного алмаза и в области 225–350 нм для искусственного алмаза спектральная плотность энергии излучения увеличивается с уменьшением длины волны. Регистрируемая длительность импульсов излучения образцов алмаза в этих областях не изменяется и соответствует временному разрешению ФЭУ. Кроме того, при этом наблюдается минимальная задержка импульсов излучения образцов алмаза относительно фронта импульса напряжения. Соответственно, зарегистрированное оптическое излучение в данной области можно отнести к ИВЧ. Начиная с длины волны 310 нм для природного и 350 нм для искусственного алмаза, наблюдается рост спектральной плотности энергии излучения и увеличение длительности импульсов излучения в несколько раз по мере увеличения длины волны. Кроме того, в этом диапазоне длин волн появляется задержка импульсов излучения относительно импульсов излучения, ассоциируемых с ИВЧ, которая плавно увеличивается до 4–5 нс.

Увеличение спектральной плотности энергии излучения, начиная с длин волн 310 и 350 нм (для природного и искусственного алмазов соответственно), показывает, что вклад КЛ начинает превышать вклад ИВЧ в регистрируемый сигнал. Из проведенных исследований также следует, что суммарный вклад КЛ в энергию и длительность импульсов излучения образцов алмаза в области 225–600 нм существенно превышает вклад ИВЧ. Это следует, в частности, из совпадения спектров излучения в области полос КЛ, полученных с помощью монохроматора и ФЭУ (рис. 4), и спектрометра (рис. 2 и рис. 3). Из результатов, получен-

ных при регистрации излучения образцов алмаза фотодиодом PD025, также следует аналогичный вывод.

Как известно, ИВЧ является безынерционным и должно повторять длительность и форму импульса тока пучка. Однако при возбуждении образцов алмаза с помощью импульсов СЛЭП с длительностью на полувысоте  $\sim 0,2$  нс, как и в работе [9], длительность импульсов излучения искусственного алмаза на полувысоте составила 2,2 нс при фронте импульса 1 нс, а природного – 8 нс при фронте 2 нс. При этом временное разрешение системы регистрации было не хуже 0,3 нс.

### Заключение

Из проведённых исследований следует, что в спектре излучения природного и искусственного алмазов Па типа, возбуждаемых пучком убегающих электронов субнаносекундной длительности в области 200–800 нм, наибольший вклад в излучение даёт катодолуминесценция. Установлено, что при облучении образцов алмаза коротковолновым УФ-излучением интенсивность излучения образцов алмаза в области 350–650 нм увеличивается за счет А-полосы. Излучение Вавилова-Черенкова, интенсивность которого увеличивается с уменьшением длины волны и увеличением энергии электронов, также может давать вклад в ФЛ алмаза.

Установлено, что при увеличении частоты следования импульсов возбуждения (пучком электронов и УФ-фотонами) интенсивность излучения искусственного алмаза в области 370–650 нм увеличивается, что можно объяснить накоплением радиационных дефектов, которые не успевают релаксировать в паузах между импульсами возбуждения. Показано, что излучение Вавилова-Черенкова можно зарегистрировать с помощью монохроматора и ФЭУ только в диапазоне длин волн от края фундаментального поглощения в алмазе (225 нм) до длин волн, при которых наблюдаются полосы его люминесценции.

Предлагается использовать полученные данные при создании и калибровке датчиков убегающих электронов для установок по исследованиям термоядерного синтеза.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН по теме № 13.1.3.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ghanbari M. R., Ghoranneviss M., Elahi A. S., Mohammadi S., Arvin R. // *Journal of Fusion Energy*. 2016. Vol. 35. No. 2. P. 180.
2. Jiang Z. H., Wang X. H., Chen Z. Y., Huang D. W., Sun X. F., Xu T., Zhuang G. // *Nuclear Fusion*. 2016. Vol. 56. No. 9. P. 092012.
3. Aleynikov P., Breizman B. N. // *Nuclear Fusion*. 2017. Vol. 57. No. 4. P. 046009.
4. Jakubowski L., Sadowski M. J., Zebrowski J., Rabinski M., Malinowski K., Mirowski R., ... & Basiuk V. // *Review of Scientific Instruments*. 2010. Vol. 81. No. 1. P. 013504.
5. Jakubowski L., Sadowski M. J., Zebrowski J., Rabinski M., Jakubowski M. J., Malinowski K., ... & Colledani G. // *Review of Scientific Instruments*. 2013. Vol. 84. No. 1. P. 016107.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982.
7. Tarasenko V. F., Baksh E. Kh., Burachenko A. G., Beloplotov D. V., Kozyrev A. V. // *IEEE Trans. on Plasma Science*. 2017. Vol. 45. No. 1. P. 76.
8. Соломонов В. И., Михайлов С. Г. Импульсная катодолуминесценция и ее применение для анализа конденсированных веществ. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003.
9. Бакут Е. Х., Бураченко А. Г., Тарасенко В. Ф. // *Письма в ЖТФ*. 2010. Т. 36. № 21. С. 102.
10. Генерация убегающих электронов и рентгеновского излучения в разрядах повышенного давления / *Под ред. В. Ф. Тарасенко*. – Томск: STT, 2015.
11. Lomaev M. I., Sosnin E. A., Tarasenko V. F. // *Chemical Engineering Technology*. 2016. Vol. 39. No. 1. P. 39.
12. Липатов Е. И., Лисицын В. М., Олешко В. И., Тарасенко В. Ф. // *Известия вузов. Физика*. 2007. Т. 50. № 1. С. 53.
13. Lipatov E. I., Lisitsyn V. M., Oleshko V. I., Polisdova E. F., Tarasenko V. F., Baksh E. H. Pulsed cathodoluminescence of natural and synthetic diamonds excited by nanosecond and subnanosecond electron beams. – Rijeka, Croatia: InTech, 2012.
14. Takeuchi D., Watanabe H., Yamanaka S., Okushi H., Sawada H., Ichinose H., Sekiguchi T., Kajimura K. // *Physical review B*. 2001. Vol. 63. No. 24. P. 245328.
15. Васильев Е. А., Иванов-Омский В. И., Помазанский Б. С., Богуш И. Н. // *Письма в ЖТФ*. 2004. Т. 30. № 19. С. 7.
16. Zaitsev A. M. Optical properties of diamond: A data handbook. – Berlin: Springer. 2001.

## The contribution of cathodoluminescence and photoluminescence to signals from diamond detectors of runaway electron beams

A. G. Burachenko, D. V. Beloplotov, D. A. Sorokin, V. F. Tarasenko,  
E. Kh. Baksht, M. I. Lomaev, and E. I. Lipatov

Institute of High-Current Electronics, SB RAS  
2/3 Academichesky av., Tomsk, 634055, Russia  
E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Received April 27, 2017

*Luminescence of diamonds of IIa types (natural and artificial) exposed by a runaway electron beam having subnanosecond duration and radiation of a pulsed KrCl excilamp was studied. It was shown that the cathodoluminescence, as well as the photoluminescence, make a significant contribution in the spectra radiation in the 310–650 nm region. The Cherenkov radiation was detected in the 225–310 (350) nm region only and only thanks to a monochromator and a photomultiplier. The delays between the pulses of the Cherenkov radiation and cathodoluminescence radiation was measured. It is shown that short-wave ultraviolet radiation amplifies the photoluminescence radiation intensity.*

*Keywords:* runaway electron beam, cathodoluminescence, photoluminescence, Cherenkov radiation.

### REFERENCES

1. M. R. Ghanbari, M. Ghoranneviss, A. S. Elahi, S. Mohammadi, and R. Arvin, *Journal of Fusion Energy* **35** (2), 180 (2016).
2. Z. H. Jiang, X. H. Wang, Z. Y. Chen, D. W. Huang, X. F. Sun, T. Xu, and G. Zhuang, *Nuclear Fusion*, **56** (9), 092012 (2016).
3. P. Aleynikov and B. N. Breizman, *Nuclear Fusion* **57** (4), 046009 (2017).
4. L. Jakubowski, M. J. Sadowski, J. Zebrowski, M. Rabinski, K. Malinowski, R. Mirowski, ... & V. Basiuk, *Review of Scientific Instruments* **81** (1), 013504 (2010).
5. L. Jakubowski, M. J. Sadowski, J. Zebrowski, M. Rabinski, M. J. Jakubowski, K. Malinowski, ... & G. Colledani, *Review of Scientific Instruments* **84** (1), 016107 (2013).
6. L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Theoretical Physics. Electrodynamics of Continuous Media* (Nauka, Moscow, 1982) [in Russian].
7. V. F. Tarasenko, E. Kh. Baksht, A. G. Burachenko, D. V. Beloplotov, and A. V. Kozyrev, *IEEE Trans. on Plasma Science* **45** (1), 76 (2017).
8. V. I. Solomonov and S. G. Mikhailov, *Pulsed Cathodoluminescence and Its Application to Analysis of Condensed Substances* (Ural Branch of the the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, 2003) [in Russian].
9. E. Kh. Baksht, A. G. Burachenko, and V. F. Tarasenko, *Technical Physics Letters* **36** (11), 1020 (2010).
10. *Generation of runaway electrons and x-ray radiation in elevated pressure discharges*. Ed. by V. F. Tarasenko (STT, Tomsk, 2015) [in Russian].
11. M. I. Lomaev, E. A. Sosnin, and V. F. Tarasenko, *Chemical Engineering Technology* **39** (1), 39 (2016).
12. E. I. Lipatov, V. M. Lisitsyn, V. I. Oleshko, and V. F. Tarasenko, *Russian Physics Journal* **50** (1), 52 (2007).
13. E. I. Lipatov, V. M. Lisitsyn, V. I. Oleshko, E. F. Polisadova, V. F. Tarasenko, and E. H. Baksht, *Pulsed cathodoluminescence of natural and synthetic diamonds excited by nanosecond and subnanosecond electron beams* (InTech, Rijeka, Croatia, 2012).
14. D. Takeuchi, H. Watanabe, S. Yamanaka, H. Okushi, H. Sawada, H. Ichinose, T. Sekiguchi, and K. Kajimura, *Physical Review B* **63** (24), 245328 (2001).
15. E. A. Vasil'ev, V. I. Ivanov-Omskii, B. S. Pomazanskii and I. N. Bogush, *Technical Physics Letters* **30** (10), 802 (2004).
16. A. M. Zaitsev, *Optical Properties of Diamond: A Data Handbook* (Springer, Berlin, 2001).