

02

## Излучение Вавилова–Черенкова и катодолюминесценция в алмазе под действием электронов с энергией 5.7 MeV

© А.Г. Бураченко<sup>1,2</sup>, К.П. Артёмов<sup>1,3</sup>, А.В. Вуколов<sup>3</sup>, А.А. Крылов<sup>1,2</sup>, Е.И. Липатов<sup>1,2</sup>, В.С. Рипенко<sup>1,2</sup>, А.С. Гоголев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, 634055 Томск, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050 Томск, Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, Россия

e-mail: bag@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 31.10.2023 г.

В окончательной редакции 04.12.2023 г.

Принята к публикации 08.12.2023 г.

Исследованы спектральные и кинетические характеристики свечения алмазных образцов с различным примесно-дефектным составом под действием электронов с энергией 5.7 MeV. Излучение Вавилова–Черенкова было получено во всех исследуемых образцах. Установлено различие в спектрах свечения номинально-беспримесных образцов, полученных разными методами синтеза. Определен алмазный образец, подходящий для регистрации излучения Вавилова–Черенкова в широком спектральном диапазоне (УФ и видимый) в условиях низкой плотности тока пучка (десятки нА/см<sup>2</sup>).

**Ключевые слова:** излучение Вавилова–Черенкова, катодолюминесценция, алмаз, электронный пучок, спектральные и кинетические характеристики свечения.

DOI: 10.61011/OS.2023.12.57400.5713-23

### Введение

Алмаз является перспективным материалом для использования его в детекторах ионизирующих излучений и высокоэнергетических частиц, чувствительных в УФ области спектра, способных работать в условиях высокого радиационного фона и высокой температуры [1,2]. В частности, алмаз является перспективным материалом для использования его в качестве радиатора черенковского детектора [3] в токамаках [2] для регистрации электронов с энергией десятки-сотни keV и единицы MeV. Кроме того, перспективно применение алмаза в черенковском детекторе для регистрации заряженных частиц солнечного ветра в околоземном космическом пространстве. Энергия электронов солнечного ветра также имеет энергию как десятки-сотни keV, так и единицы MeV [4]. Известно, что при такой энергии электронов в материале радиатора черенковского детектора помимо излучения Вавилова–Черенкова (ИВЧ) [3] может возникать и люминесценция, которая в данном случае будет вносить искажения в регистрируемый сигнал детектора. Кроме того, наличие различных примесей в образцах алмаза будет давать вклад в свечение этих образцов. Поэтому исследования спектральных и кинетических характеристик свечения алмазных образцов с различным примесно-дефектным составом являются актуальной задачей. Исследования свечения алмазных образцов с различным примесно-дефектным составом проводились при энергиях элект-

тронов десятки-сотни keV [5,6]. В этих работах было показано, что основной вклад в свечение алмазных образцов вносит катодолюминесценция, а ИВЧ на фоне чувствительности регистрирующей аппаратуры не было зарегистрировано.

Целью настоящей работы является исследование спектральных и кинетических характеристик свечения алмазных образцов с различным примесно-дефектным составом при воздействии пучком электронов с энергией единицы MeV (5.7 MeV).

### Экспериментальная установка и методики

Исследование свечения проводилось на 4 алмазных образцах, характеристики которых представлены в таблице. Образцы № 1 и № 2 были получены методом газохимического осаждения, а № 3 и № 4 методом температурного градиента в условиях высоких давлений и высоких температур (ВДВТ) [7].

Исследования свечения алмазных образцов с различным примесно-дефектным составом проводились на микротроне МИ-6 Томского политехнического университета [8–11]. Микротрон генерировал пучок электронов с энергией 5.7 MeV, длительностью макроимпульса 0.5 μs, с частотой следования макроимпульсов 25 Hz. Ток пучка электронов составлял не более 1 mA в импульсе.

## Характеристики исследуемых образцов

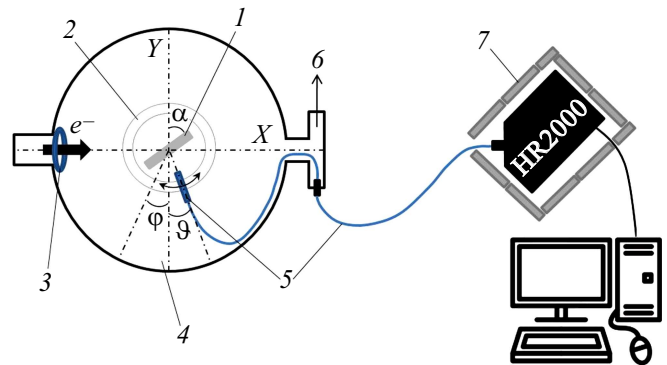
Номер образца	Метод синтеза	Наличие примесей	Размеры, mm
№ 1	Газохимическое осаждение	Номинально-беспримесный	$5 \times 5 \times 0.25$
№ 2	Газохимическое осаждение	Азот	$5.5 \times 3.2 \times 0.5$
№ 3	Температурный градиент	Номинально-беспримесный	$5 \times 5 \times 0.25$
№ 4	Температурный градиент	Азот, NV-центры, междуузлия	$3.42 \times 6.44 \times 0.61$

Электронный пучок фокусировался на мишени, которыми являлись алмазные образцы. Диаметр электронного пучка в фокусе составлял  $\sim 3$  mm. Плотность тока пучка составляла  $\sim 20$  A/cm<sup>2</sup>.

Блок-схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Образцы устанавливались на металлическом держателе, плоскость которых была направлена к пучку электронов. Держатель с помощью поворотной платформы с электромеханическим приводом фирмы Standa мог вращаться вокруг своей оси, тем самым изменяя угол падения пучка электронов к плоскости исследуемого образца. Угол  $\alpha$  между осью  $Y$ , которая перпендикулярна оси пучка электронов, и плоскостью образца был равен  $54^\circ$  (рис. 1) и не менялся во всех исследованиях. Световод был установлен также на поворотной платформе, которая перемещала световод только в азимутальном направлении вокруг образца (рис. 1), при этом расстояние от центра образца до плоскости световода составляло  $\sim 2$  cm.

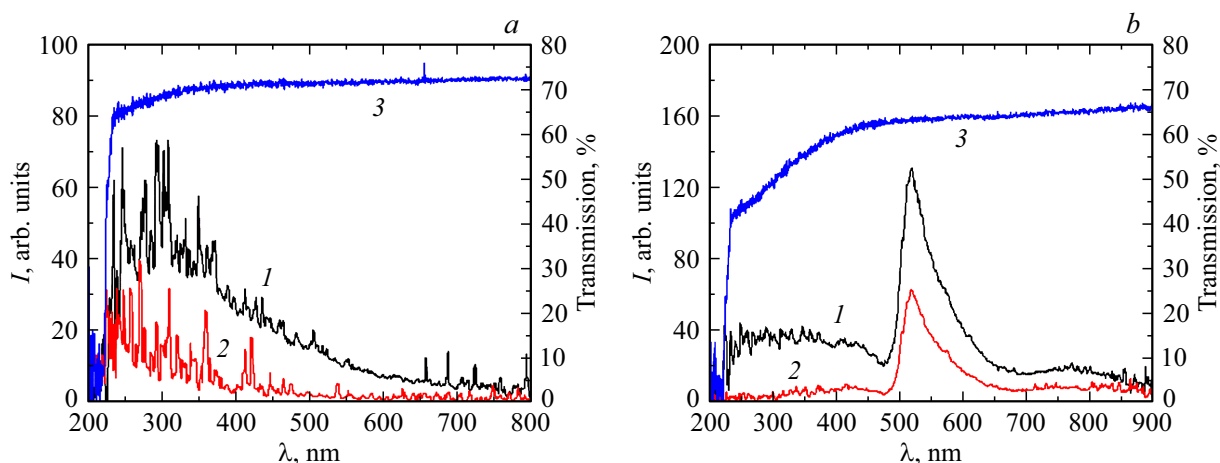
Так как ИВЧ распространяется под определенным углом к направлению движения заряженных частиц и зависит от их энергии, то для электронного пучка с энергией 5.7 MeV были рассчитаны значения углов  $\alpha$  и  $\vartheta$ , при которых ИВЧ будет попадать в приемную часть световода. Расчет производился с помощью численного кода GEANT4 [12]. Значения углов  $\alpha$  и  $\vartheta$  составили  $54^\circ$  и  $5^\circ$  соответственно. Люминесценция в отличие от ИВЧ распространяется в полный телесный угол  $4\pi$ , поэтому для того чтобы в спектре свечения отсутствовал вклад ИВЧ, либо был минимальным, световод разворачивался под углом  $\varphi$  либо под еще большим углом к оси  $Y$ . Как правило, световод было достаточно повернуть на угол  $\varphi$ , равный  $15^\circ$ , для того чтобы полностью подавить или значительно уменьшить вклад ИВЧ в спектр свечения исследуемого образца.

Спектральные характеристики свечения регистрировались с помощью спектрометра HR2000+ES (OceanOptics Inc.) с известной спектральной чувствительностью в диапазоне длин волн 190–1100 nm (разрешение  $\sim 0.9$  nm). Излучение от образца посредством кварцевого световода, который был также прозрачен в диапазоне 190–1100 nm, передавалось в спектрометр. Кинетические характеристики свечения регистрировались с помощью кремниевого ФЭУ MicroFJ-SMA-30035, чувствительного в диапазоне длин волн 200–900 nm. Время нарастания переходной характеристики ФЭУ составляло  $\sim 0.1$  ns, постоянная времени перезарядки

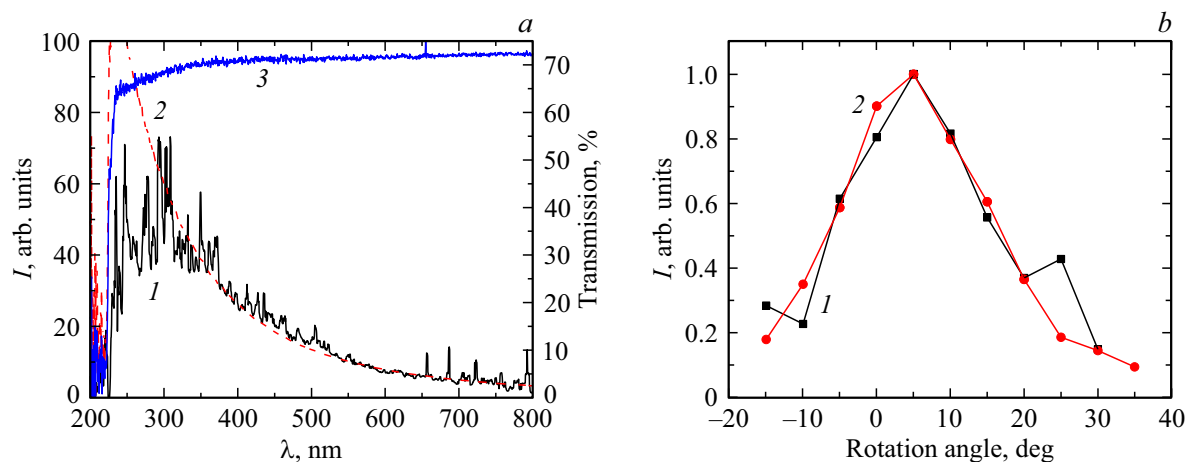


**Рис. 1.** Блок-схема экспериментальной установки по регистрации спектров излучения алмазных образцов: 1 — образец, 2 — поворотная платформа, 3 — индукционный датчик тока, 4 — камера, 5 — световод, 6 — вывод к турбомолекулярному насосу, 7 — свинец.

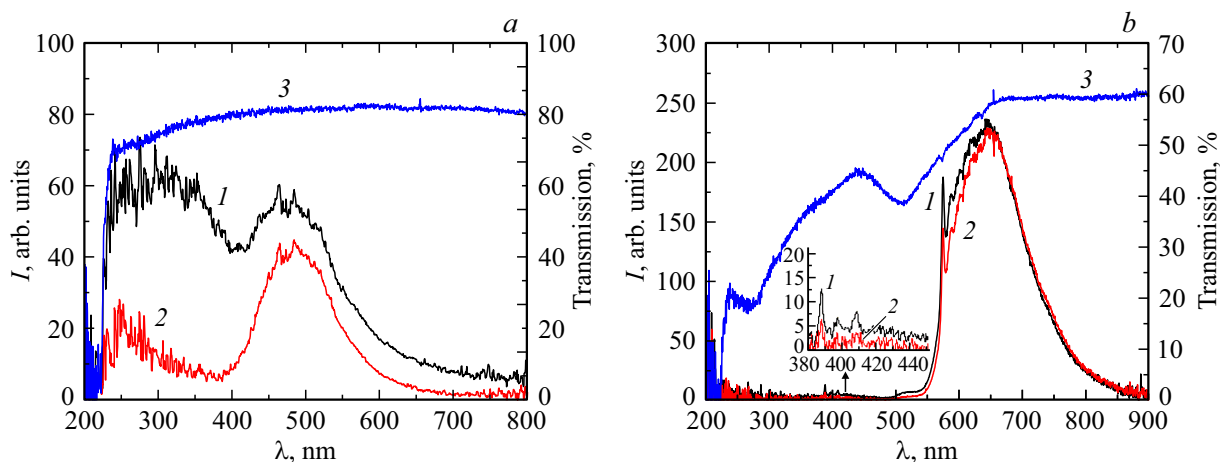
микроячеек (Microcell recharge time constant) составляла 45 ns [13]. Расстояние от плоскости образца до световода было таким же, как и при спектральных исследованиях. При регистрации кинетических характеристик свечения с помощью ФЭУ схема эксперимента была аналогичной схеме эксперимента по регистрации спектральных характеристик (рис. 1), только вместо спектрометра устанавливался ФЭУ, сигнал с которого выводился на осциллограф Hantek DSO-6074BC (70 MHz, 1 GSa/s). Кинетические характеристики свечения исследовались в различных спектральных диапазонах благодаря использованию различных светофильтров: УФС-2 (260–380 nm), СС-8 (360–540 nm), ЖС-17 (480–3000 nm), ОС-12 (540–3000 nm). Ток пучка регистрировался с помощью индукционного датчика тока, который был установлен на выходе ускорительного тракта (рис. 1). Однако из-за низкого временного разрешения этого датчика оказалось возможным только корректно контролировать им количество электронов пучка. Форма тока пучка соответствовала осциллограмме тока, приведенной в [11]. Для уменьшения влияния наводок от тормозного излучения электронного пучка во время работы спектрометр и ФЭУ закрывались свинцом. Камера непрерывно откачивалась турбомолекулярным насосом, который обеспечивал вакуум не хуже  $10^{-6}$  Torr. Исследования свечения алмазных образцов проводились при комнатной температуре.



**Рис. 2.** Спектры излучения (1, 2) и пропускания (3) образца № 1 (а) и № 2 (b) при повороте световода на угол  $\vartheta$  (кривая 1) и  $\varphi$  (кривая 2).



**Рис. 3.** (а) Спектр излучения (1) и пропускания (3), а также расчетный спектр ИВЧ (2) для образца № 1; (b) экспериментальная (1) и расчетная (2) угловые зависимости интенсивности ИВЧ от угла поворота световода, полученные для длины волны 326 nm. Образец № 1.



**Рис. 4.** Спектры излучения (1, 2) и пропускания (3) образца № 3 (а) и № 4 (b) при повороте световода на угол  $\vartheta$  (кривая 1) и  $\varphi$  (кривая 2).

## Результаты экспериментов и обсуждение

### Спектральные характеристики свечения алмазных образцов

Спектры излучения и пропускания всех 4 исследуемых образцов приведены на рис. 2–4. В спектре излучения малопримесного алмазного образца № 1 при повороте световода на угол  $\theta$  наблюдается ИВЧ. Католюминесценция в спектрах излучения при повороте световода на различные углы, в том числе на углы  $\vartheta$  и  $\varphi$ , в этом образце не наблюдалась. На рис. 3, *a* приведен отдельно экспериментальный спектр излучения, полученный при повороте световода на угол  $\vartheta$  для образца № 1 (рис. 2, *a*), а также расчетный спектр ИВЧ, полученный при моделировании ИВЧ в программном коде GEANT4. Из рис. 3, *a* видно достаточно хорошее совпадение экспериментального и расчетного спектров ИВЧ. Кроме того, были получены экспериментальная и расчетная угловые зависимости интенсивности ИВЧ на длине волны 326 nm от угла поворота световода (рис. 3, *b*). Длина волны 326 nm была выбрана произвольно в УФ области спектра, где интенсивность ИВЧ максимальна. Расчет угловой зависимости также производился в численном коде GEANT4. Углы с положительным знаком на рис. 3, *b* соответствуют повороту световода по часовой стрелке от оси  $Y$  в сторону угла  $\vartheta$ , отрицательные углы — повороту световода против часовой стрелки от оси  $Y$  в сторону угла  $\varphi$ . Из рис. 3, *b* видно хорошее совпадение расчетной и экспериментальной угловой зависимостей интенсивности ИВЧ, что дополнительно подтверждает природу данного излучения — ИВЧ.

Важно заметить, что в [6] при воздействии с пучком электронов меньшей энергии (до 300 keV), но большей плотности тока пучка ( $\sim 100$  A/cm<sup>2</sup>) в спектрах свечения этого же образца (№ 1) наблюдалась люминесценция экситонов с интенсивной полосой на 235 nm. Мы полагаем, что появление экситонной полосы зависит от плотности тока пучка, так как экситонная люминесценция является квадратичным процессом рекомбинации электронно-дырочных пар, и её интенсивность нелинейно зависит от плотности возбуждения.

В спектре свечения образца № 2 (рис. 2, *b*) на фоне ИВЧ наблюдается бесфонная линия (БФЛ) на 503 nm и широкая полоса люминесценции в диапазоне длин волн 480–650 nm с максимумом на 519 nm, которая связана с  $N_2V^0$ -центрами и является электронно-колебательной системой НЗ [14]. При оптимальном угле  $\vartheta$  для регистрации ИВЧ с уменьшением длины волны в УФ области спектра интенсивность излучения начинает расти (рис. 2, *b*, кривая 1), что является подтверждением наличия ИВЧ в спектре свечения данного образца. При уменьшении длины волны короче 400 nm рост интенсивности ИВЧ замедляется, что объясняется ростом поглощения в спектре пропускания этого образца в данном спектральном диапазоне (рис. 2, *b*,

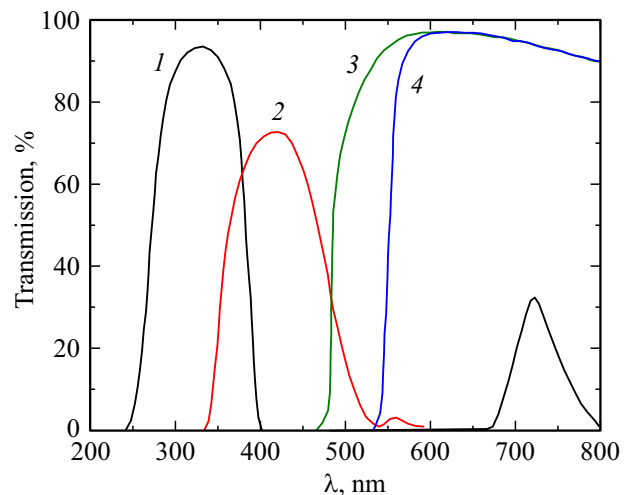


Рис. 5. Спектры пропускания светофильтров УФС-2 (1), СС-8 (2), ЖС-17 (3), ОС-12 (4).

кривая 3). При повороте световода на угол  $\varphi$  в спектре свечения образца № 2 также наблюдается ИВЧ, однако в диапазоне длин волн короче 400 nm уже наблюдается спад интенсивности ИВЧ (рис. 2, *b*, кривая 2), так как при повороте световода на этот угол число фотонов ИВЧ, попадающих в световод, значительно меньше.

В спектре свечения номинально-беспримесного образца № 3 (рис. 4, *a*) в отличие от номинально-беспримесного образца № 1 помимо ИВЧ наблюдается широкая полоса люминесценции в диапазоне длин волн 400–700 nm, которая, по-видимому, является А-полосой [14].

В спектрах свечения при оптимальном угле  $\vartheta$  для регистрации ИВЧ наблюдается резкий подъем интенсивности излучения с уменьшением длины волны (рис. 4, *a*, кривая 1), при повороте световода на угол  $\varphi$  рост интенсивности ИВЧ становится не таким резким (рис. 4, *a*, кривая 2). В спектрах свечения этого номинально-беспримесного образца, также как и для образца № 1, католюминесценция экситонов не наблюдалась.

В спектре свечения образца № 4 (рис. 4, *b*) наблюдается интенсивная люминесценция  $NV^0$ -центра с БФЛ на 575 nm и ее фонными повторениями. Кроме того, по форме спектров пропускания в диапазоне 500–700 nm и излучения в диапазоне 500–900 nm (рис. 4, *b*) можно предположить, что в данном образце также реализуется свечение  $NV^-$ -центров за счет самопоглощения в образце люминесценции  $NV^0$ -центров. Также в спектре свечения данного образца наблюдается электронно-колебательная система, обусловленная собственными междоузельными атомами, с БФЛ на 389 nm и фонными повторениями в диапазоне 390–450 nm. ИВЧ в этом образце на фоне интенсивной полосы католюминесценции, а также более сильного поглощения в УФ области спектра не наблюдалось.

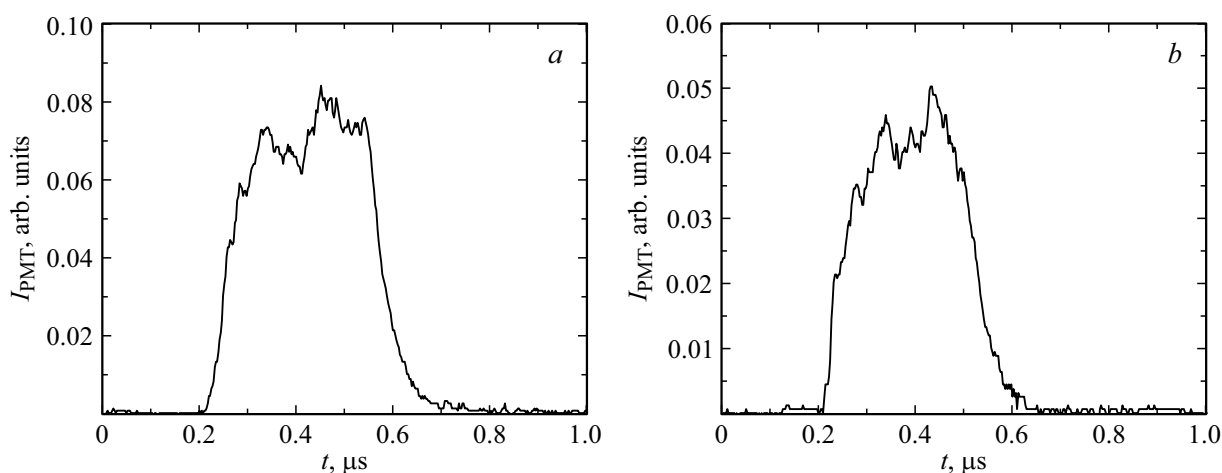


Рис. 6. Осциллограммы свечения для образца № 1 при повороте световода на угол  $\vartheta$  (а) и на угол  $\varphi$  (б). Светофильтр УФС-2.

### Кинетические характеристики свечения алмазных образцов

В экспериментах по регистрации кинетических характеристик свечения использовались различные светофильтры для выделения необходимого спектрального диапазона, спектры пропускания которых приведены на рис. 5. Данные светофильтры были подобраны исходя из полученных спектральных исследований свечения алмазных образцов (рис. 2–4). Длинноволновая граница спектрального диапазона, в котором регистрировались импульсы свечения с ФЭУ для светофильтров ЖС-17 и ОС-12, была ограничена длинноволновой границей полосы чувствительности ФЭУ, которая составляла 900 нм.

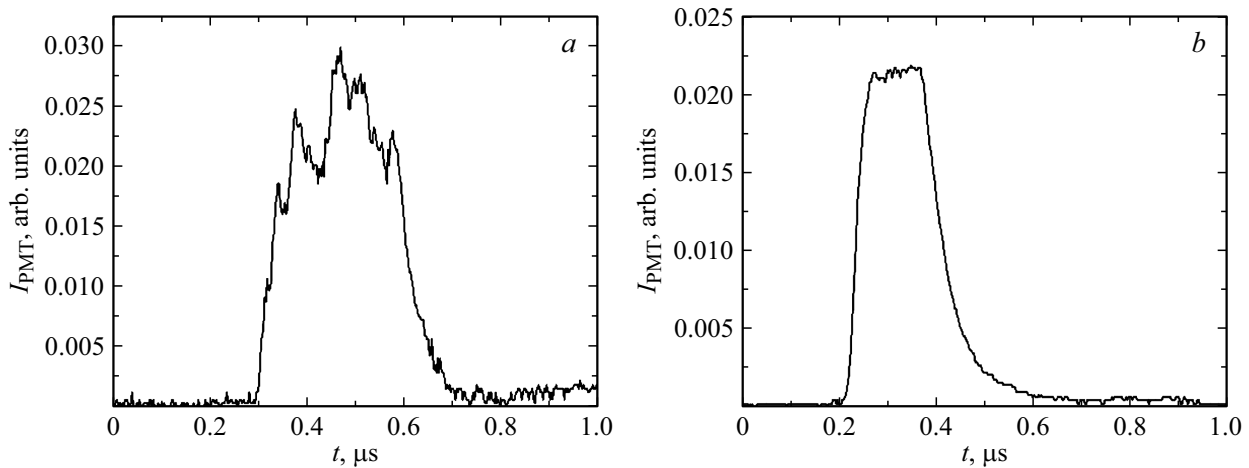
Форма импульсов свечения, регистрируемая ФЭУ, менялась от импульса к импульсу, что связано с некоторой нестабильностью работы микротрона. На рис. 6 представлены импульсы свечения для образца № 1, полученные с помощью ФЭУ, при разных углах поворота световода. При регистрации импульсов свечения использовался светофильтр УФС-2 для выделения УФ области спектра, в котором регистрировалось ИВЧ спектрометром (рис. 2, а и 3). При повороте световода на угол  $\varphi$ , который был неоптимальным для регистрации ИВЧ, уровень сигнала с ФЭУ заметно уменьшился (рис. 6, б). Количество электронов пучка, которое контролировалось индукционным датчиком тока, при регистрации импульсов свечения (рис. 6, а и б) практически не изменялось (разница составила не более 5%).

Длительности импульсов свечения при разных углах поворота световода (рис. 6) примерно соответствовали длительности макроимпульса тока пучка микротрона  $\sim 0.5 \mu\text{s}$ . Разница в длительностях импульсов свечения на полувысоте составляла менее 50 нс, что соответствовало разбросу длительности тока пучка микротрона (не более 10%).

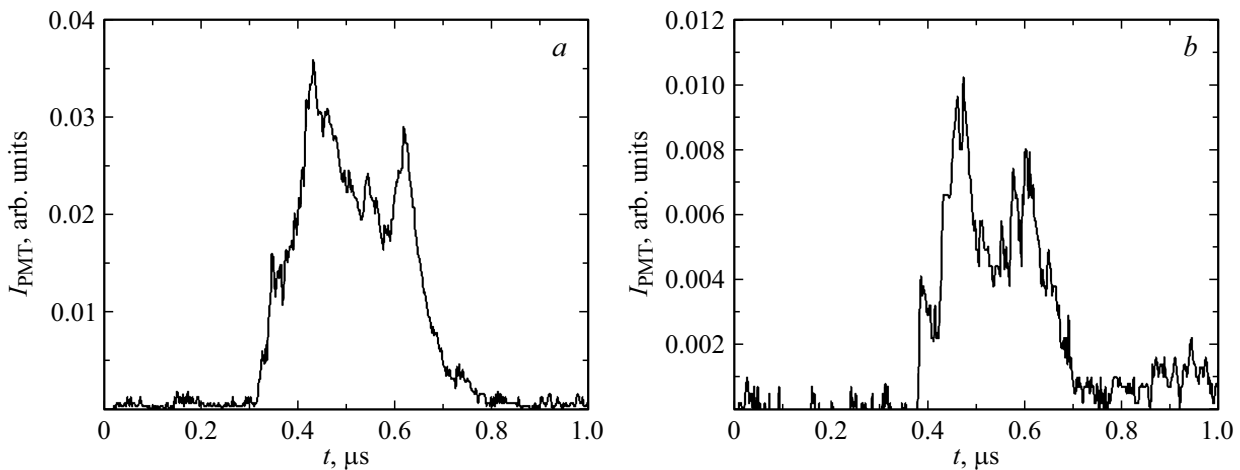
При регистрации импульсов свечения для образца № 2 использовались светофильтры УФС-2 (260–380 нм) и ЖС-17 (480–3000 нм). ИВЧ в УФ

области спектра выделялось с помощью светофильтра УФС-2, а свечение широкой полосы люминесценции (рис. 2, б), которая связана с  $\text{N}_2\text{V}^0$ -центрами, с помощью светофильтра ЖС-17. При регистрации импульсов свечения в диапазоне 480–900 нм (рис. 7, б) наблюдался высокий уровень сигнала с ФЭУ, поэтому ток пришлось значительно уменьшить (в  $\sim 10$  раз), чтобы ФЭУ не переходил в режим насыщения. Уровень сигнала с ФЭУ в спектральном диапазоне 480–900 нм (рис. 7, б) даже при уменьшении тока в  $\sim 10$  раз был значительно выше (в  $\sim 10$  раз) уровня сигнала, регистрируемого в УФ области спектра (рис. 7, а). Длительность импульса свечения ИВЧ (рис. 7, а) на полувысоте составила 266 нс, в то время как длительность импульса на полувысоте свечения  $\text{N}_2\text{V}^0$ -центров составила 177 нс (рис. 7, б). Спад импульса свечения ИВЧ, являющегося безынерционным процессом [3], обусловлен спадом импульсной характеристики используемого ФЭУ. Характеристическое время экспоненциального затухания импульса свечения ИВЧ составило 43 нс, что хорошо согласуется с постоянной времени перезарядки микроячеек данного ФЭУ — 45 нс [13]. Для импульса свечения  $\text{N}_2\text{V}^0$ -центров характеристическое время экспоненциального затухания составило 53 нс. С учётом значительного сокращения длительности импульса свечения на полувысоте и увеличения времени экспоненциального затухания по сравнению с импульсом ИВЧ можно предположить, что в процессе катодолуминесценции  $\text{N}_2\text{V}^0$ -центров при возбуждении пучком электронов с энергией несколько MeV и длительностью несколько сотен наносекунд возникает эффект тушения люминесценции. Данный эффект может быть объяснён изменением зарядового состояния  $\text{N}_2\text{V}^0$ -центров за счёт захвата вторичных носителей заряда, что, однако, требует проведения отдельного исследования, выходящего за рамки настоящей работы.

Регистрация импульсов свечения для малопримесного алмазного образца № 3 (рис. 8) происходила в двух спектральных диапазонах. Для регистрации импульсов ИВЧ



**Рис. 7.** Осциллограммы свечения для образца № 2 при повороте световода на угол  $\vartheta$  с использованием светофильтра УФС-2 (*a*) и на угол  $\varphi$  с использованием светофильтра ЖС-17 (*b*).



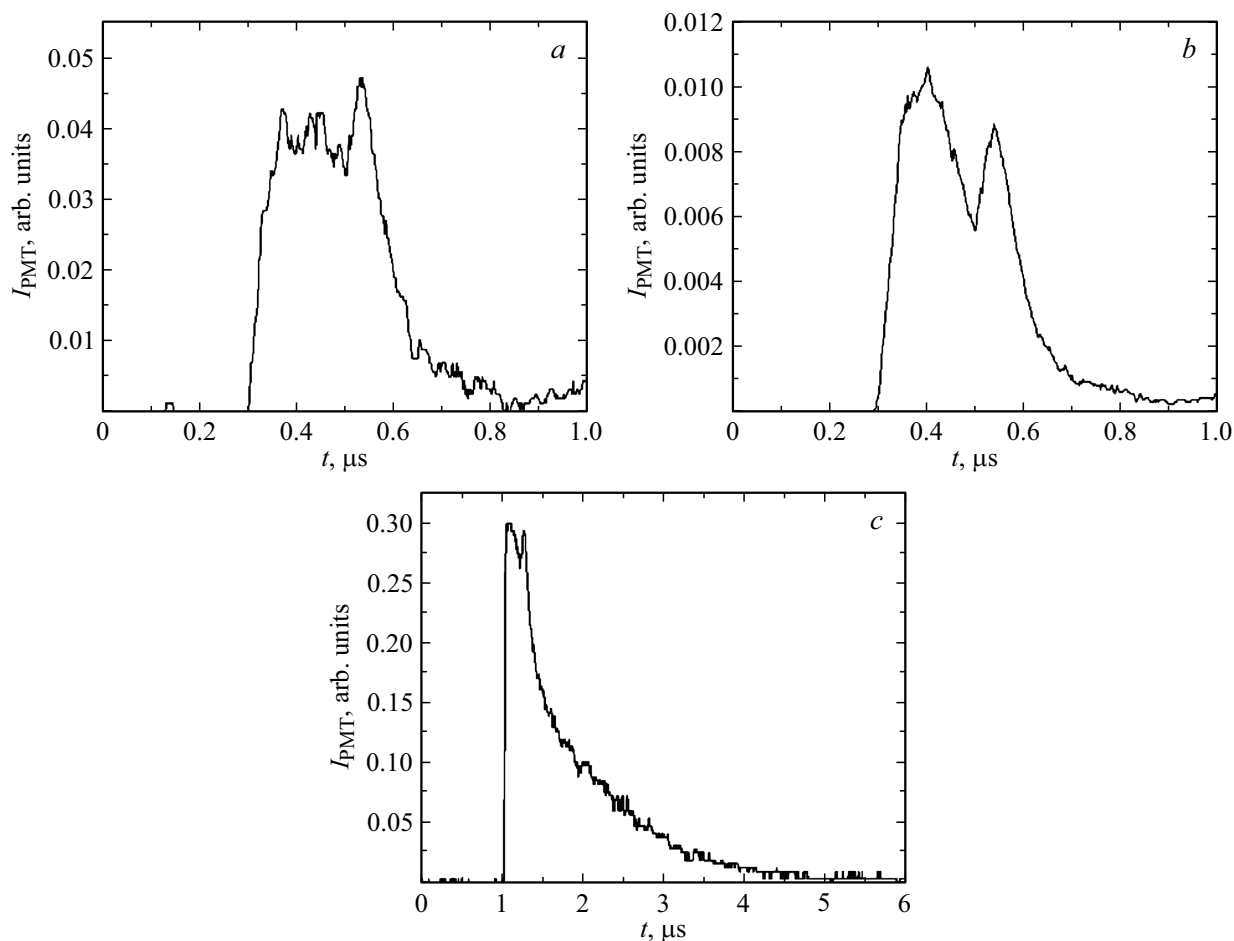
**Рис. 8.** Осциллограммы свечения для образца № 3 при повороте световода на угол  $\varphi$  с использованием светофильтра УФС-2 (*a*) и на угол  $\varphi$  с использованием светофильтра СС-8 (*b*).

в УФ области спектра использовался также светофильтр УФС-2. Для регистрации импульсов свечения широкой полосы люминесценции, которая, по-видимому, является А-полосой (рис. 4, *a*), использовался светофильтр СС-8. Уровень сигнала с ФЭУ при использовании светофильтра СС-8 (рис. 8, *a*), который выделяет спектральный диапазон  $\sim 360\text{--}540\text{ nm}$  (рис. 5), более чем в 3 раза ниже уровня сигнала с ФЭУ, регистрируемого в УФ области спектра (рис. 8, *b*). Количество электронов пучка при регистрации импульсов свечения (рис. 8, *a* и *b*) не изменялось. Длительности импульсов свечения в двух спектральных диапазонах (рис. 8, *a* и *b*) примерно соответствуют друг другу. Разница в длительностях импульсов свечения на полувысоте для данного образца составляла также менее 50 пс, как и для образца № 1, что коррелировало с разбросом длительности тока пучка микротрона, которая была не более 10%.

На рис. 9 представлены осциллограммы свечения в различных спектральных диапазонах для образца № 4.

Количество электронов пучка при регистрации данных осциллограмм практически было неизменным (разница составила не более 5%). В УФ области спектра регистрируется свечение (рис. 9, *a*), которое является ИВЧ, причем в спектрах свечения на фоне интенсивной полосы катодолюминесценции ИВЧ не было заметно (рис. 4, *b*). Для регистрации импульсов свечения БФЛ на 389 нм и ее фоновых повторений, излучающих в диапазоне 390–540 нм (рис. 4, *b*), использовался светофильтр СС-8 (рис. 5). Уровень сигнала с ФЭУ в этом спектральном диапазоне (рис. 9, *b*) был более чем в 2 раза выше уровня сигнала в УФ области спектра (рис. 9, *a*). При регистрации свечения NV<sup>0</sup>-центров с БФЛ на 575 нм в этом образце (рис. 9, *c*) использовался светофильтр ОС-12 (рис. 5).

Интенсивность свечения, регистрируемая ФЭУ в данном спектральном диапазоне (540–900 нм), значительно выше интенсивности свечения в спектральных диапазонах, выделяемых светофильтрами СС-8 (рис. 9, *b*) и



**Рис. 9.** Осциллограммы свечения для образца № 4 при повороте световода на угол  $\vartheta$  с использованием светофильтра УФС-2 (а) и на угол  $\varphi$  с использованием светофильтра СС-8 (б) и ОС-12 (с).

УФС-2 (рис. 9, а). Кроме того, длительность свечения  $NV^0$ -центров (рис. 9, с) оказалась гораздо больше длительности свечения в других спектральных диапазонах (рис. 9, а и б). Соответствующее характеристическое время экспоненциального затухания наиболее длинной компоненты составило 964 ns, что существенно больше литературных данных  $\sim 30$  ns для  $NV^0$ -центров [14].

Данный факт указывает на возможный вклад в КЛ других центров люминесценции, что также заслуживает отдельного исследования.

## Заключение

В процессе исследований изучены спектрально-кинетические характеристики свечения алмазных образцов с разным примесно-дефектным составом, полученных методом температурного градиента и газохимического осаждения. Излучение Вавилова-Черенкова было получено во всех исследованных алмазных образцах. Для образца № 4 ИВЧ удалось зарегистрировать с помощью ФЭУ и светофильтра, который отсекал интенсивную катодолуминесценцию  $NV^0$ -центров. Исследование

кинетики люминесценции показало, что в спектральном диапазоне 540–850 nm помимо свечения  $NV^0$ -центров присутствует дополнительная люминесценция невыясненной природы.

В спектрах свечения образца № 2 помимо ИВЧ наблюдалась широкая полоса люминесценции в диапазоне длин волн 480–650 nm, которая является электронно-колебательной системой НЗ. Сокращение длительности свечения данной полосы люминесценции по сравнению с длительностью свечения ИВЧ в этом образце можно объяснить изменением зарядового состояния  $N_2V^0$ -центров при захвате вторичных электронов, что приводит к изменению положения уровня Ферми, изменению зарядового состояния до  $N_2V^-$  и тушению полосы люминесценции  $N_2V^0$ -центров. Однако данное предположение требует проведения дополнительных исследований.

Для номинально-беспримесных образцов № 1 и 3 спектры свечения сильно отличались, что, по-видимому, связано с различным методом синтеза, при которых были получены данные образцы. В образце № 3, который был получен методом ВДВТ синтеза, в спектре свечения помимо ИВЧ наблюдалась широкая полоса люминесценции в диапазоне длин волн 400–700 nm, которая

предположительно является А-полосой. Кроме того, в спектрах свечения образцов № 1 и 3 отсутствовала люминесценция свободных экситонов, которая наблюдалась при воздействии пучком электронов с меньшей энергией (до 300 keV), но большей плотности тока пучка ( $\sim 100 \text{ A/cm}^2$ ), что, по-видимому, связано с зависимостью интенсивности свечения свободных экситонов от плотности возбуждения.

Проведенные расчеты генерации ИВЧ в алмазе с помощью численного кода GEANT4 хорошо согласуются с полученными экспериментальными результатами. Номинально-беспримесный образец № 1, в котором отсутствовала люминесценция, является перспективным материалом радиатора для создания черенковского детектора, способного работать в условиях относительно низких концентраций заряженных частиц (электронов), например, в околоземном космическом пространстве.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность Е.Х. Бакшту, С.Р. Углову и М.В. Шевелеву за участие в обсуждении результатов настоящей работы.

### Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00984, <https://rscf.ru/project/22-22-00984/>.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] J.F. Hochedez, P. Bergonzo, M.-C. Castex, P. Dhez, O. Hainaut, M. Sacchi, J. Alvarez, H. Boyer, A. Deneuve, P. Gibart, B. Guizard, J.-P. Kleider, P. Lemaire, C. Mer, E. Manroy, E. Munoz, P. Muret, F. Omnes, J.L. Pau, V. Ralchenko, D. Tromson, E. Verwichte, J.-C. Vial. *Diamond and Related Materials*, **10** (3–7), 673 (2001). DOI: 10.1016/S0925-9635(01)00374-0
- [2] M.J. Sadowski. *Nukleonika*, **56** (2), 85 (2011).
- [3] В.П. Зрелов. *Излучение Вавилова-Черенкова и его применение в физике высоких энергий* (Атомиздат, М., 1968).
- [4] А.М. Гальпер. *Соросовский образовательный журнал*, **6**, 75 (1999).
- [5] А.Г. Бураченко, В.С. Рипенко, Е.И. Липатов, К.П. Артёмов, А.А. Крылов. *Изв. вузов. Физика*, **65** (11), 19 (2022). [A.G. Burachenko, V.S. Ripenko, E.I. Lipatov, K.P. Artyomov, A.A. Krylov. *Russ. Phys. J.*, **65**, 1812 (2023). DOI: 10.1007/s11182-023-02835-1].
- [6] А.Г. Бураченко, Д.А. Переседова, А.А. Крылов, В.С. Рипенко, Е.И. Липатов, К.П. Артёмов. In: *Proc. of 8th Int. Cong. EFRE (Tomsk, 2022)*, p. 1494. DOI: 10.56761/EFRE2022.N4-O-909501
- [7] Р.А. Хмельницкий, Н.Х. Талипов, Г.В. Чучева. *Синтетический алмаз для электроники и оптики* (Икар, М., 2017).
- [8] В.И. Гриднев, Е.И. Розум, А.М. Слупский, С.А. Воробьев. *ПТЭ*, **1**, 20 (1987).
- [9] Б.А. Алексеев, А.В. Вуколов, Ф.В. Конусов, С.К. Павлов, А.П. Потылицын, С.Р. Углов, Ю.М. Черепенников, М.В. Шевелев, А.Г. Бураченко. *Письма в ЭЧАЯ*, **20** (1), 34 (2023).
- [10] В.Ф. Тарасенко, Е.Х. Бакшт, М.В. Ерофеев, А.Г. Бураченко. *Опт. и спектр.*, **129** (5), 569 (2021). DOI: 10.21883/OS.2021.05.50883.310-20
- [11] E.Kh. Baksht, B.A. Alekseev, A.G. Burachenko, A.V. Vukolov, A.P. Potylitsyn, V.F. Tarasenko, S.R. Uglov, M.V. Shevelev. *Matter Radiat. Extremes*, **7** (2), 026901 (2022). DOI: 10.1063/5.0061100
- [12] S. Agostinelli (Geant4 Collaboration) et al. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **506** (3) 250 (2003). DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8
- [13] MICROJ-SERIES - Silicon Photomultipliers (SiPM), High PDE and Timing Resolution Sensors in a TSV Package [Электронный ресурс]. URL: <https://www.onsemi.com/download/data-sheet/pdf/microj-series-d.pdf>
- [14] A.M. Zaitsev. *Optical properties of diamond: a data handbook*, 1st ed. (Springer, Berlin, Heidelberg, 2013). DOI: 10.1007/978-3-662-04548-0