

ЧЕРЕНКОВСКИЕ РАДИАТОРЫ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ АЛМАЗА И КОРУНДА

*Б. А. Алексеев^а, А. В. Вуколов^а, Ф. В. Конусов^а,
С. К. Павлов^а, А. П. Потылицын^а, С. Р. Углов^а,
Ю. М. Черепенников^а, М. В. Шевелев^{а,1}, А. Г. Бураченко^б*

^а Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

^б Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

Эффект Вавилова–Черенкова — известное явление, находящее широкое применение в различных областях, в том числе в диагностике пучков заряженных частиц. Возможность разделения излучения Вавилова–Черенкова и люминесцентного света имеет решающее значение для развития оптических методов нового поколения в диагностике низкоэнергетических пучков. В работе приведены первые экспериментальные результаты по регистрации излучения Вавилова–Черенкова от электронного пучка с энергией 5,7 МэВ, проходящего через кристаллы алмаза и корунда (сапфира). Показано, что черенковский и люминесцентный свет имеют разные времена свечения для кристалла корунда, в то время как для синтетического алмаза эти времена сравнимы. Реализованная в эксперименте оптическая схема, состоящая из фильтра и поляризатора, также позволяет разделить черенковский и люминесцентный свет. Предложенная схема регистрации излучения Вавилова–Черенкова будет использована для разработки нового метода измерения энергии ионного пучка на установке NICA (ОИЯИ, Дубна).

Cherenkov effect is a well-known phenomenon that has a wide application in physics including beam diagnostics. The ability to separate Cherenkov and luminescence light in crystal-based detector is critical to develop the new generation of optical techniques in low-energy beam diagnostics. In this paper, we demonstrate the first experimental results on detection of Cherenkov light from the 5.7 MeV electron beam passing through synthetic diamond and corundum. We show that the measured amplitude-time characteristics of radiation indicate that Cherenkov and luminescent light possess different glow times for corundum, while for synthetic diamond these times are comparable. The special optical scheme consisting of filter and polarizer allows us to separate Cherenkov and luminescence light. The proposed scheme for detection of Cherenkov light will be used to develop a new method for measurement of the ion beam energy at NICA facility (JINR, Dubna).

PACS: 41.60.Bq; 78.60.Hk; 41.75.Ht; 41.60.-m; 29.00.00

В физике высоких энергий широко используются различные черенковские детекторы (пороговые, полного поглощения, RICH и др.) [1]. В последние годы прогресс лазерных технологий обеспечил возможность получать и ускорять пучки электронов,

¹E-mail: mvshhev@tpu.ru

протонов, ионов вплоть до ГэВ-х энергий [2]. Контроль и управление параметрами полученных пучков выдвигает новые требования по быстродействию диагностической аппаратуры (субпикосекундный уровень). Используемые традиционно сцинтилляционные детекторы не удовлетворяют таким требованиям. Представляется, что черенковские детекторы, у которых длительность вспышки определяется временем прохождения заряженной частицы через рабочий объем детектора, могут обеспечить требуемое временное разрешение.

Известно, что в большинстве своем прозрачные диэлектрики, используемые для черенковских радиаторов, обладают люминесцентными свойствами с временем свечения до миллисекунд [3]. Проблема выделения черенковского сигнала на фоне люминесценции является актуальной экспериментальной задачей.

В настоящей статье мы показываем, что, используя такие характеристики излучения Вавилова–Черенкова (ИВЧ), как угловая направленность и линейная поляризация, можно подавить фон люминесценции и уверенно выделить ИВЧ.

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки. Эксперимент проводился на электронном пучке микротрона Ми-6 Томского политехнического университета с энергией 5,7 МэВ, импульсным током 230 нА, длительностью макроимпульса 0,5 мкс, с частотой следования макроимпульсов 50 Гц. Горизонтальные и вертикальные размеры электронного пучка составляли $\sigma_x = \sigma_y \approx 3$ мм. В качестве радиаторов ИВЧ использовались кристаллы CVD алмаза 8×8 мм и корунда (сапфир) 25×25 мм толщиной 500 мкм каждый. Кристаллы устанавливались на двухосном моторизованном устройстве перемещения. Вращение вокруг вертикальной оси осуществлялось в пределах 360° . Горизонтальное перемещение мишеней производилось для юстировки положения мишени относительно пучка электронов. В качестве детектора излучения использовался кремниевый ФЭУ MicroFJ-SMA-30020 с площадью детектора 1 мм^2 , с полосой чувствительности в диапазоне от 250 до 850 нм и максимумом при 430 нм [4]. Фронт нарастания сигнала ФЭУ составлял менее 1 нс, и время восстановления — менее 100 нс, что намного превышает время релаксации кремниевого ФЭУ. Детектор устанавливался под углом 90° относительно пучка электронов. Во время измерений использовались светофильтры из набора [5] и оптический поляризатор.

Зная коэффициенты преломления используемых мишеней, можно определить угол поворота мишени ψ для вывода ИВЧ под заданным углом наблюдения [6]:

$$\theta_{\text{vac}}^{\text{ChR}} = \arcsin \left(n(\lambda) \sin \left[\arccos \frac{1}{n(\lambda)\beta} \right] - \psi \right) + \psi.$$

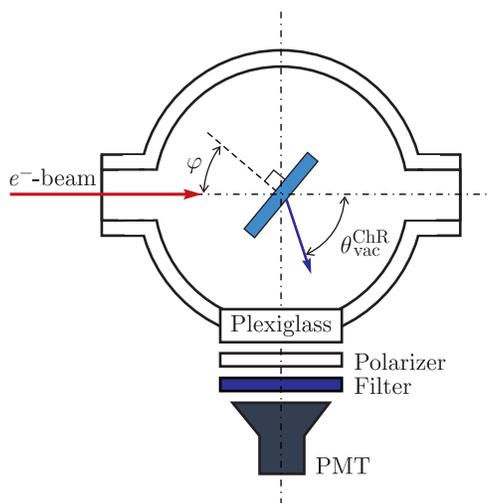


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

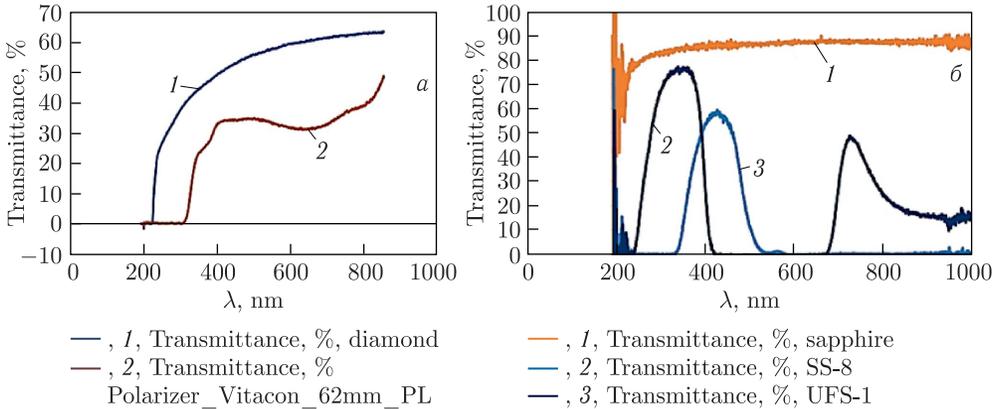


Рис. 2. Спектры пропускания: а) поляризатор, алмаз; б) светофильтры УФС-1, СС-8 и корунд

Здесь $\theta_{\text{vac}}^{\text{ChR}}$ — угол испускания фотонов ИВЧ в вакуум из материала мишени, через которую проходит электронный пучок со скоростью $v = \beta c$ (c — скорость света); ψ — угол наклона пластины относительно импульса электронного пучка; $n(\lambda)$ — коэффициент преломления среды на длине волны λ .

В нашем случае для угла наблюдения $\theta_{\text{vac}}^{\text{ChR}} = 90^\circ$ углы поворота ψ составляют для алмазной мишени $53,7^\circ$ ($n = 2,57$) и для корунда $24,9^\circ$ ($n = 1,77$) [7].

Максимальный выход ИВЧ относительно люминесценции был достигнут при использовании светофильтров УФС-1 и СС-8 для кристалла алмаза и корунда соответственно. Для выделения сигнала ИВЧ на фоне люминесцентного излучения мы применяли 62-мм поляризационный фильтр Vitacon PL и проводили измерения при двух ортогональных положениях фильтра. Разность измеренных величин позволила оценить вклад ИВЧ, поскольку излучение люминесценции не поляризовано.

На рис. 2 показаны спектры пропускания алмаза, корунда и поляризатора, которые были измерены с использованием оптического спектрометра Avantes Avaspec 3648 и комбинированного источника света Avantes AvaLight-DHc на основе дейтериевой и галогенной ламп.

Типичные осциллограммы для алмаза и корунда, соответственно, измеренные для выбранных углов поворота ψ мишеней относительно электронного пучка, представлены на рис. 3.

На осциллограммах наблюдается временная зависимость выхода ИВЧ и люминесценции, которая показана черной кривой на рис. 3.

Время высвечивания люминесценции корунда [8] на порядок превышает время генерации ИВЧ, которое обусловлено длительностью макроимпульса электронного пучка. Люминесценция алмаза по времени высвечивания близка к длительности вспышки ИВЧ.

С учетом размеров вакуумной камеры (диаметр — 400 мм) и площади детектора 1 мм^2 угловая апертура системы детектирования была оценена примерно в ± 2 мрад. Изменение угла поворота кристалла ψ позволяет выводить излучение ИВЧ под углом наблюдения 90° к направлению пучка электронов. Экспериментальные зависимости интенсивности излучения, регистрируемой кремниевым детектором, от угла поворота мишеней показаны на рис. 4.

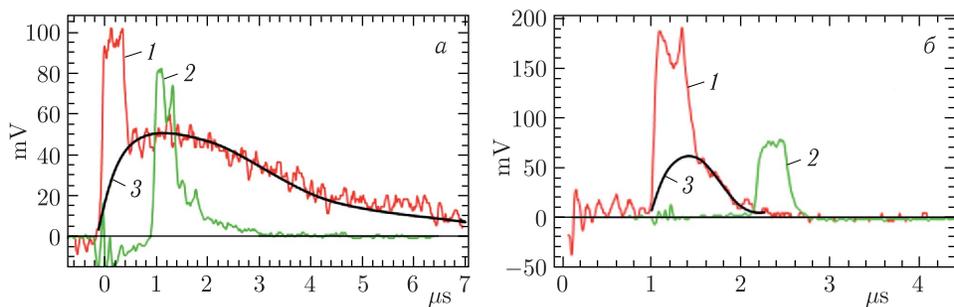


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Типичные осциллограммы наблюдения ИВЧ и люминесценции при $\psi = 40^\circ$: а) корунд; б) алмаз. Красная кривая (1) — измерения без фильтров; зеленая кривая (2) — измерения с фильтрами со сдвигом на 1,5 мкс; черная кривая (3) — вклад люминесценции

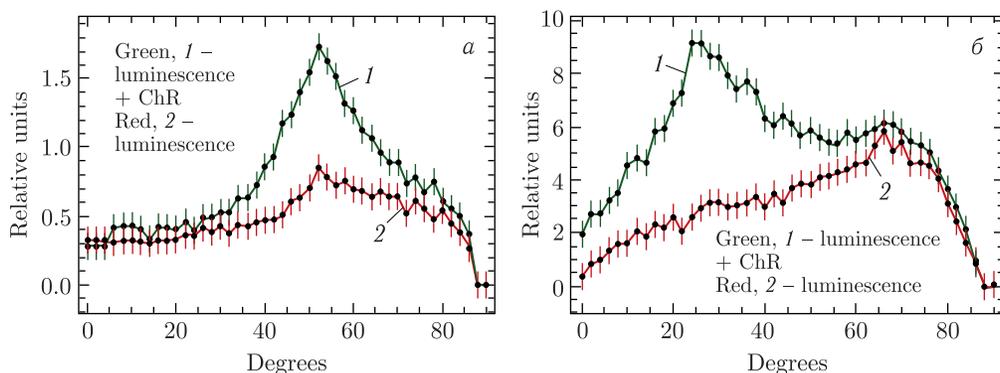


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Ориентационная зависимость ИВЧ: а) алмаза; б) корунда. Красная кривая (2) — поляризатор пропускает вертикальную поляризацию; зеленая кривая (1) — поляризатор пропускает горизонтальную поляризацию

Наблюдаемые ориентационные кривые характеризуются максимумом с шириной на полувысоте около 20° (рис. 5). Экспериментальные измерения проводились с нормировкой по току пучка электронов при помощи индукционного датчика. Амплитудные показания ИВЧ для алмаза и корунда приведены в одних и тех же относительных единицах.

Для учета вклада многократного рассеяния в форму ориентационной зависимости мы использовали модель, описанную в работе [9]. Из результатов расчетов с учетом апертуры детектора и многократного рассеяния электронов в материале радиатора, показанных на рис. 5, следует, что ширина измеренных ориентационных кривых обусловлена процессом многократного рассеяния электронов в радиаторе. Для протонных и ионных пучков подобный вклад будет пренебрежимо мал.

Исследование радиационной стойкости кристалла корунда было проведено на выведенном электронном пучке микротрона при мощности дозы в несколько единиц Гр/с. Время облучения кристалла составило 15 ч 20 мин. Результаты измерения спектра пропускания радиатора после облучения показали, что пропускная способность уменьшилась на 10% в спектральной области от 450 до 1100 нм.

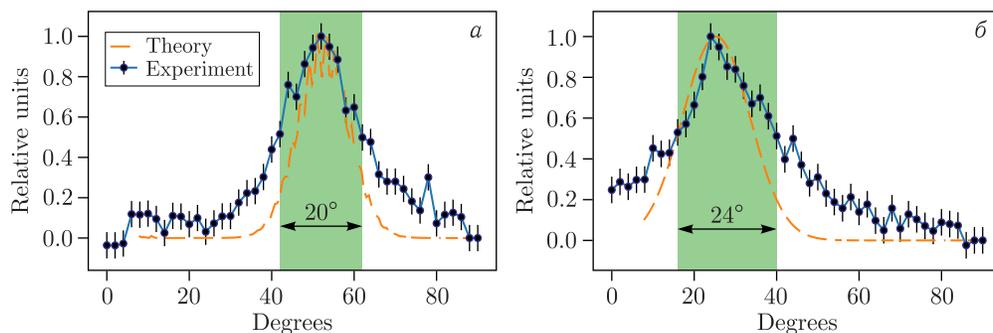


Рис. 5. Ориентационная зависимость ИВЧ с вычитанием вклада люминесценции: а) алмаз; б) корунд

Таким образом, мы показали, что ИВЧ может быть выведено из радиатора под заданным углом наблюдения с использованием характерной угловой зависимости генерации ИВЧ при соответствующей ориентации мишени. Другая важная характеристика ИВЧ — линейная поляризация излучения также позволяет эффективно отделять от неполяризованного свечения люминесценцию, не прибегая к анализу времени высвечивания вспышки излучения.

Мы не наблюдали заметного потемнения используемого кристалла корунда при экспозиции на электронном пучке вплоть до экспозиции $3,12 \cdot 10^{15}$ электронов.

Продемонстрирована пригодность кристаллов корунда для разработки детекторов ИВЧ, которые, в отличие от алмазных [10], существенно дешевле.

Работа выполнена в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (№ Приоритет-2030-НИП/ИЗ-005-0000-2030).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jeong T. W. et al. CR-39 Track Detector for Multi-MeV Ion Spectroscopy // Sci. Rep. 2017. V.7. Article number 2152; <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02331-w>. 2017.
2. Buck A. et al. Absolute Charge Calibration of Scintillating Screens for Relativistic Electron Detection // Rev. Sci. Instrum. 2010. V. 81. Article number 033301.
3. Бахит Е. Х., Бураченко А. Г., Тарасенко В. Ф. Импульсная катодолуминесценция алмаза, кальцита, сподумена и флюорита под воздействием электронного пучка субнаносекундной длительности // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 36, № 21. С. 102–110.
4. <https://www.farnell.com/datasheets/2704145.pdf> (дата обращения: 17.06.2022).
5. Каталог / Под ред. проф. Г. Т. Петровского. М.: Дом оптики, 1990. 228 с.
6. Потылицын А. П. и др. Монохроматическое излучение Вавилова–Черенкова умеренно релятивистских ионов в радиаторах с частотной дисперсией // Письма в ЖЭТФ. 2022. Т. 115, № 8. С. 474–478.
7. Refractive Index Database. <https://refractiveindex.info/>.
8. Барышников В. И. и др. Уширение R-линий при возбуждении кристаллов $\text{Cr:Al}_2\text{O}_3$ плотными электронными пучками // Изв. вузов. Физика. 2009. Т. 52, № 12-3. С. 49–52.
9. Потылицын А. П., Гоголев С. Ю. Излучение Вавилова–Черенкова в наклонной диэлектрической пластине. Нарушение азимутальной симметрии // Письма в ЭЧАЯ. 2019. Т. 16, № 2(221). С. 147–157.
10. https://syntechno.ru/diamond_plates-hpht/ (дата обращения: 17.06.2022).

Получено 21 июня 2022 г.