

05.6;09.1

Излучение Вавилова—Черенкова и импульсная катодолюминесценция в полиметилметакрилате при возбуждении субнаносекундным пучком электронов

© В.Ф. Тарасенко^{1,2}, Е.Х. Бакшт¹, М.В. Ерофеев¹¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия² Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

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

Поступило в Редакцию 28 октября 2020 г.

В окончательной редакции 13 ноября 2020 г.

Принято к публикации 27 ноября 2020 г.

Исследованы спектральные и амплитудно-временные характеристики излучения полиметилметакрилата при возбуждении пучками электронов с энергией электронов до 300 и 450 keV. С субнаносекундным временным разрешением зарегистрированы импульсы излучения Вавилова—Черенкова и катодолюминесценции. Показано, что интенсивность излучения импульсной катодолюминесценции в видимой и ближней ультрафиолетовой областях спектра при энергии электронов сотни keV существенно превышает интенсивность излучения Вавилова—Черенкова.

Ключевые слова: пучок электронов, излучение Вавилова—Черенкова, импульсная катодолюминесценция, фотовозбуждение.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.06.50749.18601

Полиметилметакрилат (ПММА, оргстекло) широко используется для регистрации высокоэнергетических частиц, в том числе в медицинской дозиметрии [1–5]. Это обусловлено доступностью данного материала и сравнительно высокой интенсивностью излучения ПММА при воздействии электронов и других частиц [1–7]. Считается [1–4], что при высоких энергиях электронов излучение ПММА в основном состоит из излучения Вавилова—Черенкова (ИВЧ). Однако приводимые спектры излучения ПММА существенно отличаются от спектров ИВЧ (см., например, [4,6,7]). Из теории [8] хорошо известно, что интенсивность ИВЧ в области прозрачности образцов возрастает с уменьшением длины волны излучения. Расчеты спектров ИВЧ для различных веществ при энергиях электронов в десятки-сотни keV приведены в [6,9–11].

Экспериментально (при возбуждении пучком электронов с энергией, составляющей сотни keV и 6 MeV) спектры ИВЧ для образцов из алмаза, кварца и сапфира были получены в работах [9–11], где демонстрировались основные отличительные свойства ИВЧ. К ним относятся наличие для появления ИВЧ пороговой энергии у заряженных частиц, увеличение интенсивности ИВЧ с уменьшением длины волны, безынерционность эффекта Вавилова—Черенкова относительно импульса возбуждения и наличие угла между направлением ИВЧ и траекторией движения заряженных частиц, который зависит от энергии частиц.

Спектр излучения, приведенный в [4], имел полуширину основной полосы ~ 225 nm с максимумом на длине волны ~ 510 nm. Также была зарегистрирована вторая полоса меньшей интенсивности с максимумом на длине

волны ~ 650 nm. Эти данные, в том числе согласно мнению авторов [4], отличались от спектров ИВЧ. В [6,7] было показано, что при возбуждении ПММА пучком электронов с энергией до 300 keV на спектрограммах видны полосы только импульсной катодолюминесценции (ИКЛ), которые имели максимум для основной полосы на длине волны ~ 490 nm при ее полуширине ~ 100 nm. Также отметим, что интенсивность ИКЛ в условиях [6,7] зависела от производителя ПММА и была минимальной в образцах высокой чистоты.

Широкий набор спектров излучения ПММА для различных энергий электронов и рентгеновских квантов приведен в [5], в том числе для пиковых напряжений на рентгеновской трубке 75, 125 и 250 kV. В представленных спектрах ИВЧ в области 400–700 nm интенсивность излучения возрастала с уменьшением длины волны до 400 nm, что соответствует поведению черенковского излучения. Данные для длин волн короче 400 nm в [5] отсутствуют. Однако подобную зависимость имели и спектры ИКЛ, приводимые в этой работе. Как уже отмечалось выше, в [6,7] было показано, что при возбуждении ПММА пучком электронов с энергией до 300 keV наблюдалась полоса ИКЛ, интенсивность которой уменьшается начиная с длины волны 490 nm.

Цель настоящей работы — провести исследования спектральных и амплитудно-временных характеристик излучения ПММА при возбуждении пучком электронов субнаносекундной длительности с различной энергией электронов в диапазоне сотен keV, а также получить данные о соотношении интенсивностей излучения Вавилова—Черенкова и импульсной катодолюминесценции.

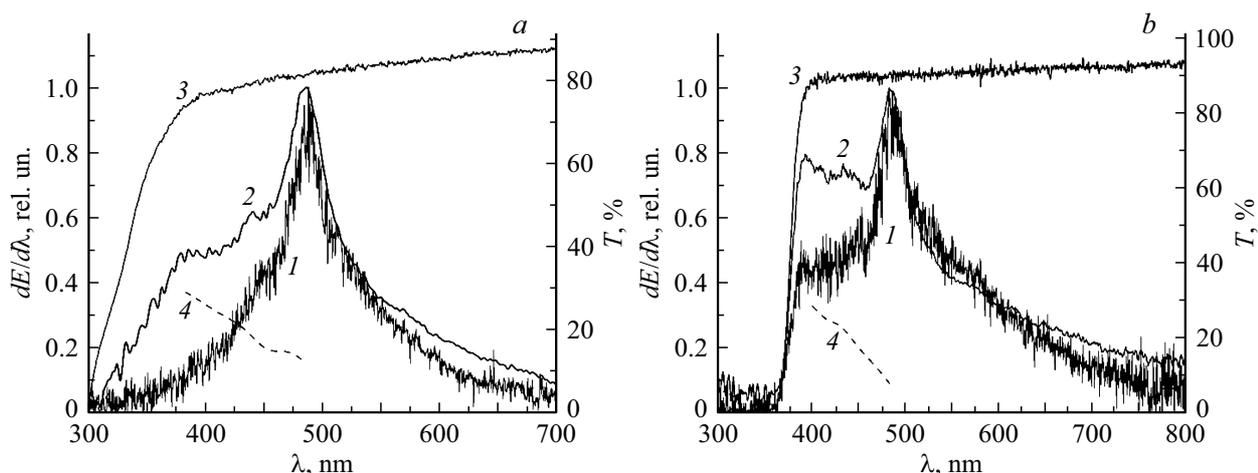


Рис. 1. Спектры излучения ПММА, характерные для образцов первой (а) и второй (б) групп, при возбуждении пучком электронов ускорителей с генератором СЛЭП-150 (1) и с генератором ГИН-1000 (2). Кривые 3 соответствуют коэффициенту пропускания данных образцов, а кривые 4 показывают добавку в общий спектр излучения Вавилова—Черенкова.

Для воздействия на ПММА использовались два ускорителя с генераторами СЛЭП-150 и ГИН-1000, которые обеспечивали длительность импульса тока пучка ~ 350 ps. Первый (СЛЭП-150) формировал пучок электронов с энергией до 300 keV при плотности тока ~ 200 A/cm². Генератор ГИН-1000 второго ускорителя состоял из трех секций и формировал пучок электронов с энергией до 450 keV при плотности тока ~ 2 kA/cm². Ток пучка электронов измерялся с помощью конического коллектора с диаметром приемной части 15 mm, который имел временное разрешение не хуже 100 ps. При измерениях тока пучка пространство между фольгой и коллектором откачивалось форвакуумным насосом. Для ослабления тока электронного пучка при измерениях коллектором применялись металлические сетки с известной прозрачностью. Образцы ПММА устанавливались за AlMg-фольгой толщиной 40 μ m перпендикулярно оси ускорителя. Всего было исследовано восемь образцов толщиной 0,9, 3, 4, 6 и 10 mm от различных производителей. Образцы высокой чистоты были изготовлены в Сибирском физико-техническом институте (Томск).

Спектры пропускания и излучения ПММА регистрировались с помощью спектрометра Ocean Optics HR2000+ES (спектральный диапазон измерений 200–1000 nm, разрешение 0,9 nm), излучение на который подавалось по световоду P600-1-SR (Ocean Optics, Inc.). Амплитудно-временные характеристики излучения ПММА регистрировались фотодиодом PD025 (катод LNS20 компании Photech, время нарастания переходной характеристики ~ 80 ps), который помещался в алюминиевый стакан. Сигналы с фотодиода, емкостных делителей генераторов и коллектора подавались на цифровой осциллограф Keysight DSO-X6004A (6 GHz и 20 S/ns) через высокочастотные кабели 5D-FB PEEG (Radiolab) длиной 1,2 m. Для ослабления сигналов использовались

ослабители 142-NM (Barth Electronics, 30 GHz), позволяющие регистрировать без существенных искажений импульсы напряжения с фронтом до 20 ps.

Спектральные измерения показали, что образцы по их спектральным характеристикам можно разбить на две группы. Образцы первой группы имели пропускание начиная с 300 nm, а второй — с 370 nm. Кроме того, при энергии электронов до 300 keV в первой группе образцов, как и в работах [6,7], вторая полоса с коротковолновым максимумом ~ 400 nm отсутствовала (рис. 1, а, кривая 1).

Наблюдаемая полоса на рис. 1, а (кривая 1), как уже было показано нами в [6,7], относится к ИКЛ. Доминирование ИКЛ в этих условиях обусловлено малым коэффициентом преломления света в ПММА (1,49), соответственно высокой пороговой энергией электронов для появления ИВЧ (178 keV) и малым числом электронов в пучке с энергией, которая превышает пороговую (не более 20% с генератором СЛЭП-150).

При увеличении плотности тока пучка на порядок и энергии электронов (число электронов с энергией, превышающей пороговую для ИВЧ, было около 50%) с генератором ГИН-1000 спектр излучения изменялся (кривая 2), и в области спектра с длинами волн меньше 450 nm появлялась вторая полоса меньшей интенсивности. Коротковолновая граница этой полосы определялась поглощением в ПММА (кривая 3), которое начиная с 300 nm обрезало все излучение. Нормируя максимумы спектров излучения 1 и 2 на единицу и определяя разность между ними, можно восстановить форму спектра появившейся полосы (см. кривую 4). Данная полоса, которая возникла при увеличении энергии электронов, по нашему мнению состоит в основном из ИВЧ. Спектральная плотность энергии излучения этой полосы $dE/d\lambda$ в области прозрачности образца

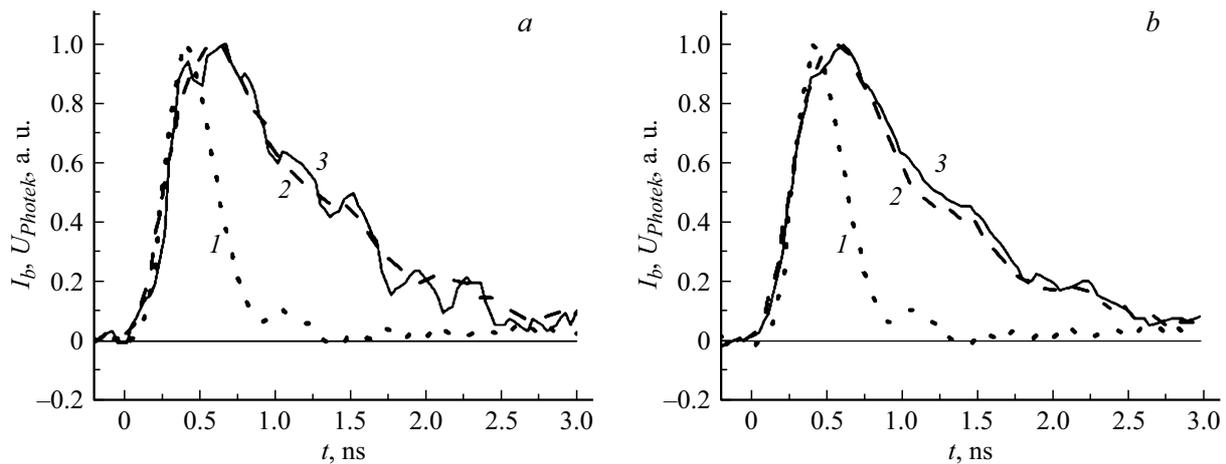


Рис. 2. Осциллограммы импульсов тока пучка (1) и излучения (2, 3) ПММА, характерные для образцов первой (а) и второй (b) групп (2 — при возбуждении пучком электронов от генератора ГИН-1000 без фильтра, 3 — с фильтром УФС-1).

возрастает с уменьшением длины волны, что является одним из признаков, которые характеризуют ИВЧ.

Характерные спектры для второй группы образцов показаны на рис. 1, b. Эти образцы имели сильное поглощение начиная с длины волны 370 nm, и при возбуждении генератором СЛЭП-150 в них наблюдалось две полосы излучения. Обе полосы регистрировались при сравнительно низких энергиях электронов, в том числе, как показали дополнительные измерения, меньших пороговых для ИВЧ в ПММА. Коротковолновая граница второй полосы совпадала с границей пропускания в образцах второй группы. Обе эти полосы (кривая 1 на рис. 1, b) обусловлены ИКЛ. Данный вывод подтверждает работа [6], в которой вторая полоса регистрировалась при облучении этих образцов излучением эксилампы с длиной волны 222 nm (см. рис. 12, b в [6]). Кроме того, эта полоса с максимумом на длине волны 400 nm отсутствовала в образцах первой группы при возбуждении пучком электронов от генератора СЛЭП-150. Вторую полосу нельзя относить к ИВЧ, так как все исследованные образцы были изготовлены из ПММА с одинаковым коэффициентом преломления.

При увеличении энергии электронов в пучке (рис. 1, b, кривая 2) в спектре излучения появилось ИВЧ. Дополнительную полосу в УФ-области мы также выделили, нормируя максимумы интенсивности излучения, полученные с двумя ускорителями, на единицу и определяя разность (см. кривую 4 на рис. 1, b). Интенсивность излучения выделенной полосы увеличивается при уменьшении длины волны, что характерно для ИВЧ, но зависимости близки к линейным. Как известно [8], теория дает увеличение интенсивности ИВЧ обратно пропорционально кубу длины волны. Однако этот вывод справедлив для „тонких“ образцов, при прохождении которых направление движения и энергия электронов существенно не меняются. В данных экспериментах использовались „толстые“ (для энергии электронов в сотни keV) образцы. Соответственно энергия электро-

нов при торможении в образцах изменялась, что приводило к изменению угла между траекторией электронов и конусом ИВЧ. Кроме того, направление движения электронов изменялось при их торможении в образцах. Все это повлияло на наклон зависимости интенсивности ИВЧ от длины волны.

Для дополнительной проверки наличия в этих условиях ИВЧ были измерены амплитудно-временные характеристики свечения образцов обеих групп с высоким временным разрешением. Спектры излучения регистрировались в широкой спектральной области 300–550 nm и в сравнительно узкой спектральной области, которая вырезалась с помощью фильтра УФС-1, имеющего пропускание в области 300–400 nm. Соответственно для образцов первой группы, имеющих коротковолновую границу поглощения 300 nm (рис. 1, a), регистрировалось излучение в области 300–400 nm, а для образцов второй группы, имеющих коротковолновую границу поглощения 370 nm (рис. 1, b), — в области 370–400 nm. Как следует из рис. 1, при использовании фильтра доля регистрируемого ИВЧ относительно ИКЛ должна увеличиваться. Полученные результаты приведены на рис. 2.

Видно, что длительность импульса излучения составляет ~ 1 ns при регистрации излучения как в широкой области спектра, так и в сравнительно узкой области для обеих групп образцов. Длительность импульса тока пучка на полувысоте при этом равнялась 370 ps. Таким образом, основная доля регистрируемого излучения принадлежит ИКЛ даже при максимальной энергии электронов 450 keV, когда примерно у половины электронов пучка энергия превышала пороговую для ИВЧ и плотность тока пучка составляла ~ 2 kA/cm². Вместе с тем на импульсах излучения для образцов второй группы виден первый пик, соответствующий максимуму тока пучка, а для образцов первой группы — характерный изгиб, соответствующий максимуму тока пучка. Из этого следует, что в формировании импульса излучения

участвуют два процесса (ИВЧ и ИКЛ), которые имеют разные длительности. Отсутствие явно выраженного пика для второй группы образцов связано с поглощением образцов в области спектра короче 370 nm и соответствующим уменьшением доли регистрируемого сигнала ИВЧ. Также наличие ИВЧ косвенно подтверждает совпадение фронта импульса тока пучка и излучения. Отметим, что при регистрации импульсов излучения фотодиодом, который помещался в защитный экран, использовался аттенюатор Barth Electronics 142-NM с полосой пропускания до 30 GHz, ослабляющий сигналы в 20 раз, что позволило подавить влияние электрических помех. В экспериментах также было установлено, что оба типа излучения имеют малое время высвечивания и их интенсивность растет с увеличением плотности тока пучка.

Таким образом, проведенные исследования показали, что при энергиях электронов в несколько сотен keV в спектрах излучения на фоне ИКЛ можно регистрировать полосу ИВЧ, но она уступает по интенсивности ИКЛ. Следует отметить важное свойство образцов из ПММА, а также из других материалов, в которых имеются полосы фотолюминесценции в УФ- и видимой областях спектра, а энергии электронов пучка достаточно для возникновения ИВЧ. Благодаря увеличению мощности излучения с уменьшением длины волны, ИВЧ даже в области поглощения ПММА может обеспечить его фотовозбуждение, что усиливает интенсивность полос, наблюдаемых при ИКЛ. Данный эффект был обнаружен нами в [6] при использовании KtCl-эксилампы с длиной волны 222 nm и подтвержден в работах [12,13] при использовании коротковолнового излучения с другими длинами волн, а также с другими материалами образцов. В настоящей работе при возбуждении ПММА излучением эксиламп с длиной волны 222 и 283 nm также регистрировались полосы фотолюминесценции в области полос ИКЛ. Соответственно сравнительно высокая интенсивность ИКЛ, которая следует из экспериментов с фотодиодом, при увеличении энергии электронов и плотности тока пучка отчасти связана с возбуждением фотолюминесценции за счет ИВЧ в области поглощения ПММА.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 18-19-00184.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.M. Frelin, J.M. Fontbonne, G. Ban, J. Colin, M. Labalme, A. Batalla, A. Isambert, A. Vela, T. Leroux, *Med. Phys.*, **32** (9), 3000 (2005). <https://doi.org/10.1118/1.2008487>
- [2] K.W. Jang, T. Yagi, C.H. Pyeon, W.J. Yoo, S.H. Shin, C. Jeong, B.J. Min, D. Shin, T. Misawa, B. Lee, *J. Biomed. Opt.*, **18** (2), 027001 (2013). <https://doi.org/10.1117/1.JBO.18.2.027001>
- [3] Y.N. Kharzheev, *Phys. Part. Nucl.*, **50** (1), 42 (2019). <https://doi.org/10.1134/S1063779619010027>
- [4] B. Lee, S.H. Shin, W.J. Yoo, K.W. Jang, *Opt. Rev.*, **23** (5), 806 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10043-016-0240-8>
- [5] F. Therriault-Proulx, L. Beaulieu, L. Archambault, S. Beddar, *Phys. Med. Biol.*, **58** (7), 2073 (2013). <https://doi.org/10.1088/0031-9155/58/7/2073>
- [6] V.F. Tarasenko, E.Kh. Bakst, A.G. Burachenko, D.V. Beloplotov, A.V. Kozyrev, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **45** (1), 76 (2017). <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2637570>
- [7] В.И. Олешко, Е.Х. Бакшт, А.Г. Бураченко, В.Ф. Тарасенко, *ЖТФ*, **87** (2), 271 (2017). DOI: 10.21883/JTF.2017.02.44137.1860
- [8] L.D. Landau, J.S. Bell, M.J. Kearsley, L.P. Pitaevskii, E.M. Lifshitz, J.B. Sykes, *Electrodynamics of continuous media* (Pergamon Press, Oxford, 1984). <https://www.elsevier.com/books/electrodynamics-of-continuous-media/landau/978-0-08-030275-1>
- [9] V.F. Tarasenko, V.I. Oleshko, M.V. Erofeev, E.I. Lipatov, D.V. Beloplotov, M.I. Lomaev, A.G. Burachenko, E.Kh. Bakst, *J. Appl. Phys.*, **125** (24), 244501 (2019). <https://doi.org/10.1063/1.5094956>
- [10] V.F. Tarasenko, E.Kh. Bakst, D.V. Beloplotov, A.G. Burachenko, M.I. Lomaev, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **59** (SH), SHHD01 (2020). <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab7475>
- [11] Е.Х. Бакшт, А.В. Вуколов, М.В. Ерофеев, Г.А. Науменко, А.П. Потылицын, В.Ф. Тарасенко, А.Г. Бураченко, М.В. Шевелев, *Письма в ЖЭТФ*, **109** (9), 584 (2019). DOI: 10.1134/S0370274X19090029
- [12] G.R. Araujo, T. Pollmann, A. Ulrich, *Eur. Phys. J. C*, **79** (8), 653 (2019). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7152-2>
- [13] J.M. Corning, G.R. Araujo, P.C.F. Di Stefano, V. Pereymak, T. Pollmann, P. Skensved, *J. Instrum.*, **15** (3), C03046 (2020). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/03/C03046>