

ИЗЛУЧЕНИЕ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ПУЧКОМ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ С СУБНАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ ИМПУЛЬСА

LUMINESCENCE OF POLYMETHYLMETHACRYLATE IRRADIATED BY A SUBNANOSECOND RUNAWAY ELECTRON BEAM

*В. Ф. Тарасенко, Е. Х. Бакуит, А. Г. Бураченко, А. В. Козырев
V. F. Tarasenko, E. Kh. Bakshit, A. G. Burachenko, A. V. Kozyrev*

Институт сильноточной электроники СО РАН,
Institute of High Current Electronics SB RAS

Исследовано излучение полиметилметакрилата (оргстекла) под действием сверхкороткого лавинного электронного пучка (с.л.э.п.) при его различной плотности и длительности импульса. Показано, что в спектрах излучения наибольшую интенсивность имеют полосы люминесценции.

The luminescence of polymethylmethacrylate (PMMA) irradiated by a supershort avalanche electron beam (SAEB) with different densities and pulse durations is studied. It is shown, that the most intense in the emission spectrum has the luminescence band.

Введение

Детекторы, использующие излучение Вавилова-Черенкова (ИВЧ) для регистрации высокоэнергетических электронов, последнее время стали широко использоваться в установках типа ТОКАМАК [1]. Это связано с необходимостью регистрации убегающих электронов (УЭ), в том числе попадающих на стенки вакуумной камеры. Генерация УЭ в ТОКАМАКАх приводит к потерям энергии и испарению боковых стенок, что существенно влияет на нагрев плазмы.

В работах [2, 3], сообщалось о наблюдении ИВЧ при возбуждении полиметилметакрилата пучком УЭ субнаносекундной длительности, который генерировался в газовом диоде. Согласно [2, 3] интенсивность ИВЧ при заполнении газового диода воздухом атмосферного давления и плотности потока УЭ $(0,5-0,7) \times 10^9$ на квадратный сантиметр существенно (в 4 раза) превышала интенсивность люминесценции полиметилметакрилата. Вывод о регистрации ИВЧ был сделан на основании измерений амплитудно-временных характеристик излучения, в том числе проводимых с помощью ФЭУ. Неопределенность проведенных исследований состоит в том, что спектры излучения полиметилметакрилата, а также спектры электронного пучка, используемого для получения ИВЧ, в работах [2, 3] не измерялись. Считаем, что только измерение данных характеристик может дать обоснованное заключение о регистрации ИВЧ.

Исследования, проведенные в работах [4, 5] показали, что в спектры излучения полиметилметакрилата при возбуждении пучком электронов, формируемом в газовом диоде, основной вклад дает люминесценция с максимальной интенсивностью на длине волны ~ 490 нм. Из этих работ также следовало, что интенсивность свечения полиметилметакрилата под действием пучка убегающих электронов, генерируемого при атмосферном давлении в газовом диоде, очень мала.

Цель данной работы – провести подробные спектральные и амплитудно-временные исследования свечения полиметилметакрилата под действием пучка УЭ при различной плотности и длительности импульсов с.л.э.п., а также под действием излучения импульсной Крс1 эксилампы с длиной волны 222 нм.

1. Свойства ИВЧ

ИВЧ возникает при движении в веществе электрически заряженных частиц (например, электронов) со скоростью, превышающей фазовую скорость света в этом веществе (скорость распространения световых волн). ИВЧ носит универсальный характер так как под действием частиц с достаточной высокой энергией «светятся» все прозрачные тела, находящиеся в жидком, газообразном и твердом состоянии. Зависимость спектральной плотности мощности ИВЧ $dJ(\omega)$ для

одного электрона с различной кинетической энергией E можно определить через эффективную силу радиационного торможения dF , приведенную в [6]:

$$dJ(\omega) = VdF(\omega) = \frac{e^2}{c^2} V \left(1 - \frac{c^2}{V^2 n^2} \right) \omega d\omega =$$

$$= 4\pi^2 e^2 V \left(1 - \frac{c^2}{V^2 n^2} \right) \frac{d\lambda}{\lambda^3}, \quad (1)$$

$$\frac{V}{c} = \frac{\sqrt{(1 + E/mc^2)^2 - 1}}{1 + E/mc^2}.$$

Здесь n – показатель преломления среды, m – масса электрона, c – скорость света в вакууме, V – скорость электрона. Величина пороговой энергии электронов E_0 для появления ИВЧ рассчитывается из равенства нулю выражения в круглых скобках (1). При показателе преломления полиметилметакрилата, который составляет 1,49, $E_0 = 178$ кэВ. Примерно такая же величина пороговой энергии для возникновения ИВЧ приводится в работах [2, 3]. Зависимости интенсивности ИВЧ от длины волны, полученные из формулы (1), показаны на рис. 1.

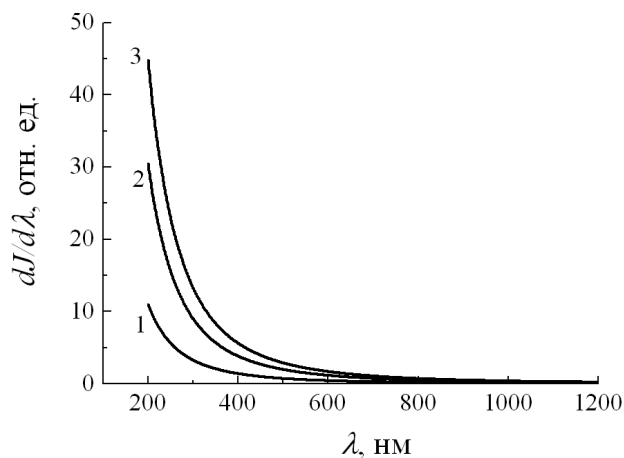


Рис. 1. Рассчитанные спектры ИВЧ в полиметилметакрилате при различных энергиях электронов (1 – 200 кэВ, 2 – 250 кэВ, 3 – 300 кэВ)

Интенсивность ИВЧ возрастает при уменьшении длины волны излучения и увеличении энергии электронов пучка. Соответственно, в спектрах излучения полиметилметакрилата при возбуждении электронами с энергией более 178 кэВ в области, где отсутствует сильное поглощение, должна наблюдаться широкая полоса, интенсивность которой увеличивается с уменьшением длины волны излучения.

2. Экспериментальная аппаратура и методики

Для возбуждения полиметилметакрилата был применен пучок убегающих электронов, получаемый в газовом диоде, на который подавались импульсы напряжения от генератора СЛЭП-150М. Ускорители СЛЭП-150 на основе газовых диодов имеют малые размеры и генерируют пучки электронов с энергией до нескольких сотен кэВ. При уменьшении давления в газовом диоде плотности тока с.л.э.п. превышают 100 А/см^2 , а длительности импульса электронного пучка составляют сотни пс. Генератор формировал импульсы напряжения в передающей линии с амплитудой в падающей волне ~ 150 кВ и длительностью на полувысоте 1 нс. Длительность фронта импульса напряжения также составляла ~ 250 пс на уровне 0,1–0,9. СЛЭП-150М имел дополнительную передающую линию, что позволяло по падающей и отраженной волне напряжения, восстанавливать импульс напряжения на промежутке. Выходная часть передающей линии генератора СЛЭП-150М, газовый диод с трубчатым катодом и PD025 фотодиод в защитном корпусе показаны на рис. 2.

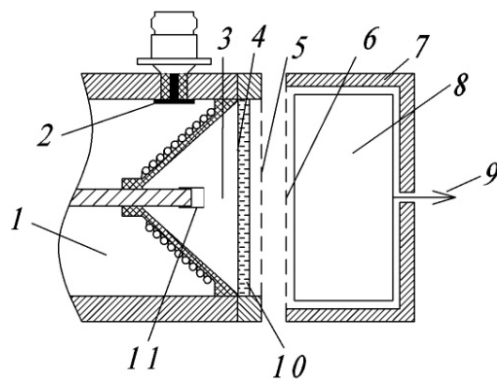


Рис. 2. Схема эксперимента по определению длительности импульса излучения. 1 – выходная часть дополнительной передающей линии генератора СЛЭП-150М, 2 – емкостный делитель, 3 – разрядный промежуток газового диода, 4 – анод из металлической сетки, за которым вплотную располагалась Al фольга толщиной 15 мкм, 5 – металлическая сетка на торце генератора СЛЭП-150М, 6 – металлическая сетка на торце защитного корпуса фотодиода, 7 – защитный корпус, 8 – фотодиод PD025, 9 – вывод сигнала с фотодиода, 10 – круглые пластинки из полиметилметакрилата толщиной 0,9, 3, 6 или 10 мм, 11 – трубчатый катод

Исследования были проведены с катодом из нержавеющей стали. Катод имел форму трубки диаметром 6 мм и был изготовлен из нержавеющей стали с толщиной рабочей кромки 200 мкм. Амплитуда с.л.э.п. после анодной фольги или чис-

ло электронов в пучке определялись с помощью конусного коллектора с диаметром приемной части 20 мм. Временное разрешение данного коллектора составляло ~ 80 пс. Для определения энергии основных групп электронов использовался времяпролетный спектрометр. Кроме того, энергия электронов определялась по ослаблению тока с.л.э.п. в фильтрах из алюминиевой фольги различной толщиной.

Для изменения амплитуды и плотности тока пучка и его длительности давление в газовом диоде, который заполнялся гелием, азотом или воздухом, варьировалось от 3 до 760 Торр. Это позволило изменять плотность тока пучка от единиц до сотен ампер на квадратный сантиметр. Наибольшие амплитуды с.л.э.п. были получены в гелии при давлении 30 Торр. Длительность импульса с.л.э.п. при уменьшении давления гелия от 760 до 9 Торр гелия изменялась от 100 до 600 пс на полувысоте. На рис. 3 приведены импульсы с.л.э.п., полученные при различных давлениях гелия. Амплитуда импульса напряжения на промежутке при межэлектродном зазоре 14 мм, давлении гелия 9 Торр составила 250 кВ. Данная амплитуда напряжения была получена на основе измерений падающей и отраженной волны напряжения. Спектр электронов для данных условий определялся по методике, описанной в [7]. Восстановленный спектр тока с.л.э.п. при давлении гелия в газовом диоде 30 Торр приведен на рис. 4. Как показали исследования амплитуды тока пучка за фильтрами из алюминия различной толщины, энергия части электронов в этих условиях превышала пороговую энергию для возникновения ИВЧ в полиметилметакрилате (~ 178 кэВ).

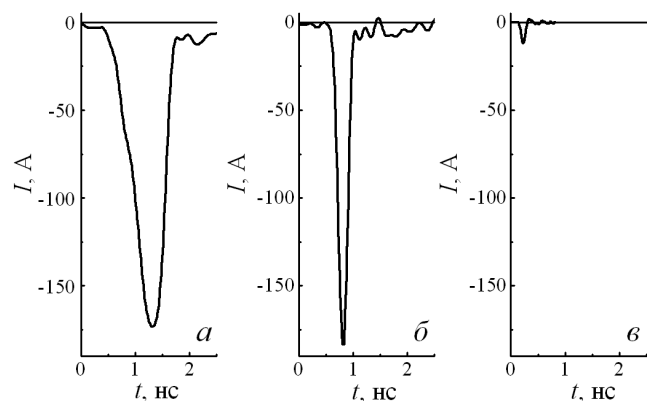


Рис. 3. Импульсы тока пучка убегающих электронов за диафрагмой диаметром 1 см при давлении гелия в газовом диоде: а – 9 Торр, б – 60 Торр, в – 760 Торр

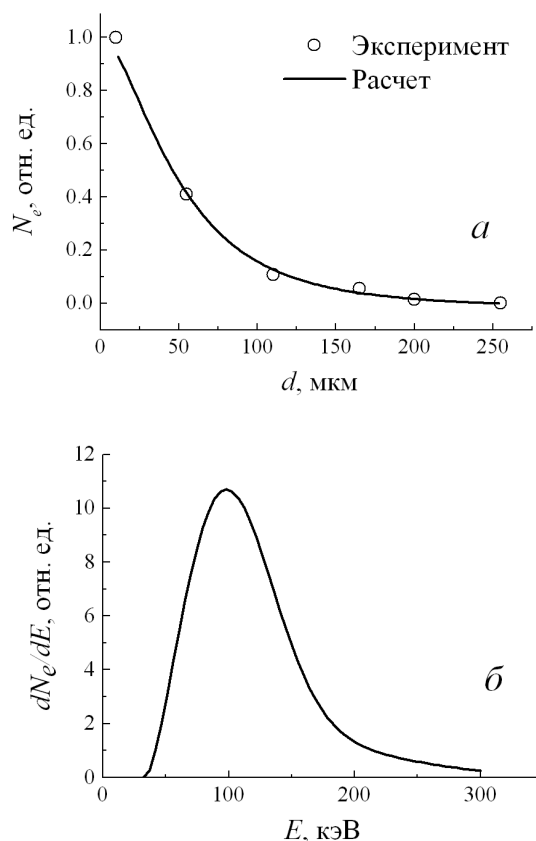


Рис. 4. а – Зависимость среднего за импульс заряда электронов пучка, прошедших через Al-фильтр, от толщины фильтра: точки – экспериментальные данные, сплошная линия – расчетная зависимость, соответствующая восстановленному спектру; б – восстановленный спектр с.л.э.п.

Амплитудно-временные характеристики излучения полиметилметакрилата измерялись фотодиодом PD025. Импульсы с фотодиода, коллектора и емкостных делителей подавались на осциллограф DSO-X6004A (6 ГГц, 20 выборок за наносекунду). Кроме того, излучение полиметилметакрилата фотографировалось фотоаппаратом Sony A100.

Спектры излучения полиметилметакрилата определялись с помощью спектрометра Ocean Optics HR2000+ES (диапазон 190 – 1100 нм, разрешение: $\sim 0,9$ нм). Коэффициент пропускания различных образцов полиметилметакрилата также снимался на спектрометре Ocean Optics HR2000+ES. Спектральные и амплитудно-временные характеристики излучения были исследованы для четырех пластинок из полиметилметакрилата толщиной 0,9, 3, 6 и 10 мм. Все пластинки были изготовлены из полиметилметакрилата с высокой прозрачностью в видимой области спектра.

Кроме с.л.э.п. для воздействия на полиметилметакрилат использовалась KгCl эксилампа с длиной волны 222 нм. Средняя плотность мощности излучения составляла около 7 мВт/см². Импульсы излучения эксилампы имели длительность на полувысоте ~200 нс и следовали с частотой повторения 43 кГц.

3. Результаты измерений и их обсуждение

Для получения данных о свечении полиметилметакрилата при возбуждении пучком электронов с различными параметрами предварительно было проведено исследование различных режимов работы ускорителя электронов с газовым диодом, заполняемым гелием, или азотом или воздухом. Наибольшие плотности тока пучка с трубчатым катодом были получены при давлениях гелия 3–60 Торр. Так при давлениях гелия 9–60 Торр плотности тока с.л.э.п. превышали 200 А/см², а длительность импульса на полувысоте с ростом давления в этом диапазоне уменьшалась от 600 до 200 пс. Плотность числа электронов пучка на квадратный сантиметр при этом составляла $\sim 2 \times 10^{11}$, что было на два порядка больше, чем в работах [2, 3]. При атмосферном давлении гелия плотность числа электронов пучка на квадратный сантиметр составляла $\sim 2 \times 10^{10}$, а длительность импульса на полувысоте уменьшалась до ~100 пс.

При возбуждении пучком электронов всех четырех пластинок из полиметилметакрилата наблюдалось свечение голубого цвета, интенсивность которого возрастала с ростом амплитуды и длительности импульса с.л.э.п. Свечение всех пластинок при атмосферном давлении гелия, азота и воздуха в газовом диоде и плотности электронов пучка на квадратный сантиметр $\sim 2 \times 10^{10}$ было слабым, так что его можно было регистрировать только визуально, при полном затемнении комнаты с установкой. При уменьшении давления гелия в газовом диоде свечение полиметилметакрилата можно было сфотографировать за один импульс, рис. 5.



Рис. 5. Фотография свечения полиметилметакрилата. Диаметр светящейся области 6 мм. Амплитуда тока пучка 220 А

Наибольшие амплитуды импульсов свечения полиметилметакрилата наблюдаются при наибольшем числе электронов в токе пучка (наибольших величинах произведения длительности импульса с.л.э.п. на полувысоте на его амплитуду). Длительность импульса свечения на полувысоте существенно превышала длительность импульса с.л.э.п.

Исследования спектров свечения и пропускания полиметилметакрилата с различными образцами показало, что спектры излучения и пропускания в трех образцах не имеют существенных различий и совпадают со спектром свечения, который был получен в [4] с образцом из полиметилметакрилата толщиной 0,9 мм. Спектры свечения полиметилметакрилата вместе со спектрами пропускания для образцов толщиной 6 и 10 мм приведены на рис. 6.

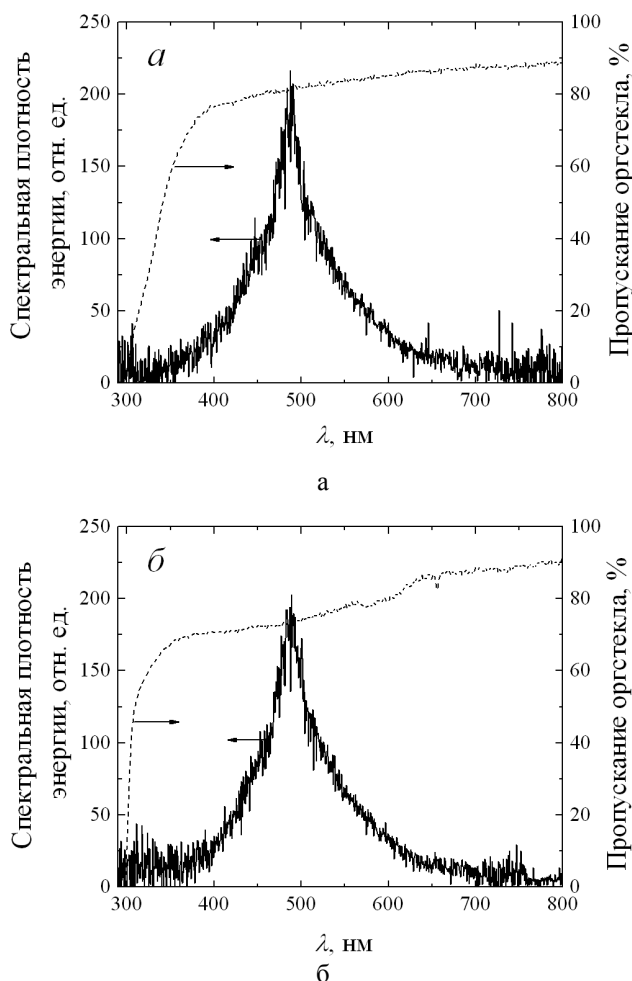


Рис. 6. Спектры излучения (сплошные) и пропускания (пунктир) образцов из полиметилметакрилата толщиной 6 (а) и 10 мм (б).

Сильное поглощение обоих образцов начинается в области спектра короче 350 нм. В области с

малым поглощением полиметилметакрилата видна полоса излучения с максимумом интенсивности на длине волны ~ 490 нм. ИВЧ зарегистрировать не удалось, что связано с малой его интенсивностью по сравнению с интенсивностью люминесценции. При увеличении числа электронов в с.л.э.п. интенсивность люминесценции полиметилметакрилата возрастает. Однако форма спектров излучения в трех образцах полиметилметакрилата совпадает и не зависит от амплитуды и длительности импульса тока пучка.

Изменение параметров с.л.э.п. достигалось за счет вариации давления в газовом диоде и его заполнения воздухом, азотом и гелием. На рис. 7 приведены спектры излучения полиметилметакрилата, полученные при четырех различных плотностях тока с.л.э.п.

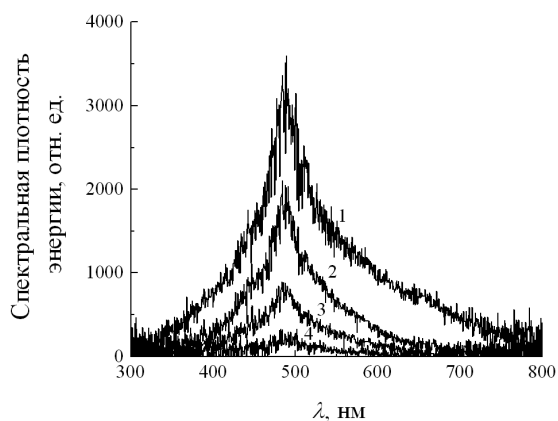


Рис. 7. Спектры излучения пластинки из полиметилметакрилата толщиной 6 мм при давлении гелия в газовом диоде 15 (1), 60 (2), 150 (3) и 375 Торр (4)

В спектрах свечения видна полоса с максимумом в области 490 нм, положение которой не изменялось при изменении плотности тока с.л.э.п. Коротковолновая граница поглощения полиметилметакрилата, которая для трех пластинок лежит в области 300 нм, не влияет на форму спектра излучения.

На рис. 8 приведены спектр люминесценции образцов из полиметилметакрилата толщиной 6 (а) и 10 мм (б) при возбуждении КгСл эксилампой с длиной волны 222 нм.

Видно, что спектры излучения этих образцов при возбуждении эксилампой и пучком электронов существенно не отличаются. Подобный спектр был зарегистрирован и для образца толщиной 0,9 мм. Это дополнительно подтверждает, что природа наблюдаемого излучения в данных экспериментах связана с люминесценцией. В образце толщиной 3 мм, как и в работе [4] при возбужде-

нии пучком электронов, наблюдалась вторая полоса с максимумом на длине волны ~ 400 нм, которая также обусловлена с люминесценцией.

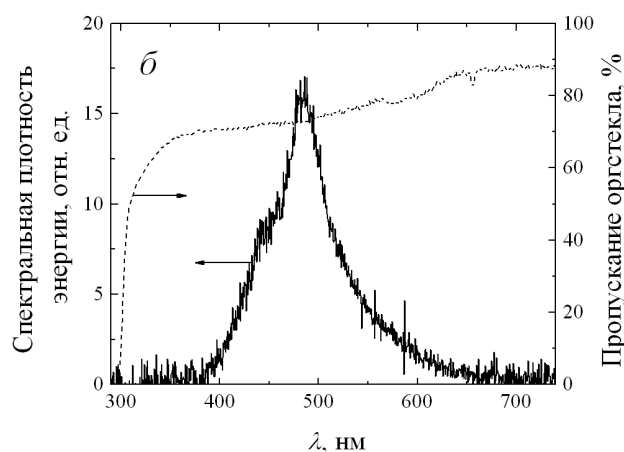
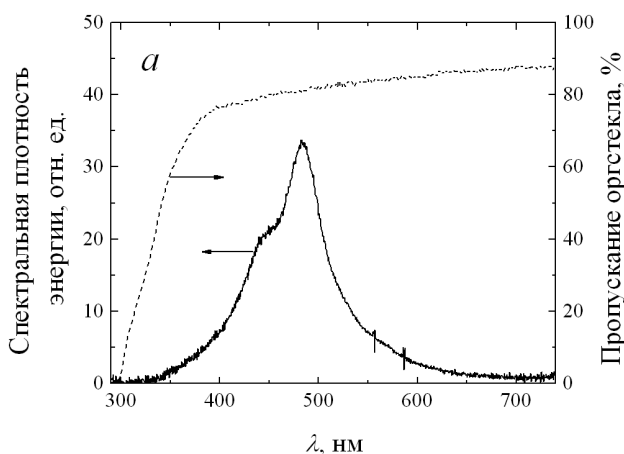


Рис. 8. Спектры излучения (сплошные линии) и пропускания (пунктир) образцов из полиметилметакрилата толщиной 6 (а) и 10 мм (б) под действием излучения эксилампы

Проведённые исследования позволили установить очень важную особенность, которая следует из экспериментов с эксилампой. УФ излучение эксилампы также, как и пучок электронов, приводит к появлению полосы люминесценции с максимумом интенсивности на длине волны ~ 490 нм. Соответственно следует ожидать, что ИВЧ в ультрафиолетовой области спектра будет приводить к усилению интенсивности люминесценции в полиметилметакрилате на зарегистрированных полосах в видимой области спектра. Из работы [8], а также наших расчетов (см. рис. 1) следует, что интенсивность ИВЧ возрастает при уменьшении длины волны и увеличении энергии электронов. Таким образом, ИВЧ с длиной волны короче 300 нм, которое возникает, а затем поглощается в полиме-

тилметакрилате, должно усиливать интенсивность люминесценции на длине волны ~ 490 нм. При этом, соотношение интенсивностей ИВЧ и люминесценции должно зависеть от распределения электронов пучка по энергиям. В образце толщиной 3 мм коротковолновая граница полосы поглощения сдвинута в длинноволновую область. Это можно объяснить наличием дополнительной примеси в данном образце. Соответственно, поглощение полиметилметакрилата в области длин волн короче 400 нм увеличилось, и появилась вторая полоса люминесценции.

Результаты, полученные в данной работе и в работах [4, 5], отличаются от результатов, приведенных в работах [2, 3]. Мы планируем продолжить исследования в данной области, используя образцы из других прозрачных материалов с высоким коэффициентом преломления, в том числе, из алмаза.

Заключение

Результаты экспериментальных исследований излучения полиметилметакрилата (оргстекла) при возбуждении пучком убегающих электронов и KrCl эксилампой с длиной волны излучения 222 нм показали, что в обоих случаях основной вклад в излучение даёт полоса люминесценции с максимумом на длине волны ~ 490 нм. Установлено, что интенсивность свечения зарегистрированной полосы изменяется пропорционально числу электронов в пучке, что позволяет использовать это излучение для определения числа высокоэнергетических электронов в электронных пучках. На основании экспериментов с эксилампой предполагается, что ИВЧ с длиной волны короче 300 нм должно усиливать интенсивность люминесценции на полосе с длиной волны ~ 490 нм. Показано, что в образце из полиметилметакрилата с большим поглощением в области 300–400 нм регистрируется вторая полоса люминесценции с максимумом

на длине волны ~ 400 нм. Подтверждено, что ИВЧ при заполнении газового диода газами атмосферного давления на фоне люминесценции не регистрируется.

Исследование было выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00052).

Список литературы

1. Plyusnin V. V., Jakubowski L., Zebrowski J. et al. Development of a diagnostic technique based on Cherenkov effect for measurements of fast electrons in fusion devices // *Review of Scientific Instruments*. 2012. Vol. 83, N 8. P. 083505.
2. Babich L. P., Loiko T. V., Rodigin A. V. Vavilov-Cherenkov radiation of a runaway electron subnanosecond pulse generated by discharge in the open atmosphere // *Doklady Physics*. Pleiades Publishing. 2014. Vol. 59, N 8. P. 351-354.
3. Babich L. P., Loiko T. V., Rodigin A. V. The first observations of Cherenkov's radiation of runaway electrons produced by discharge in dense gas // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2014. Vol. 42, N 4. P. 948-952.
4. Baksht E. Kh., Beloplotov D. V., Burachenko A. G., Tarasenko V. F. Emission of polymethylmethacrylate under runaway electron beams with subnanosecond pulse duration // *Russian Physics Journal*. 2016. Vol. 59. No.3. (Accepted).
5. Tarasenko V. F., Baksht E. Kh., Beloplotov D. V., Burachenko A. G. // *Doklady Physics*. – Pleiades Publishing, 2016. (Accepted).
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика, Том VIII. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. § 115. Излучение Черенкова.
7. Kozyrev A. V., Kozhevnikov V. Yu., Vorobyev M. S. et al. Reconstruction of electron beam energy spectra for vacuum and gas diodes // *Laser and Particle Beams*. 2015. Vol. 33. P. 183-192.
8. Jelly J. V. Cherenkov's Radiation and its Application. New York, USA: Pergamon, 1958.