

09  
**О природе свечения полиметилметакрилата при возбуждении пучком электронов субнаносекундной и наносекундной длительностей**

© В.И. Олешко,<sup>1</sup> Е.Х. Бакшт,<sup>2</sup> А.Г. Бураченко,<sup>2,3</sup> В.Ф. Тарасенко<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, Россия

<sup>2</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055 Томск, Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050 Томск, Россия  
e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 19 апреля 2016 г.)

Представлены результаты исследований физической природы свечений, возникающих в полиметилметакрилате при возбуждении пучками электронов субнаносекундной и наносекундной длительности. Изучены пространственные, амплитудные и спектрально-кинетические характеристики свечения при варьировании плотности энергии электронного пучка в диапазоне от  $10^{-4}$  до  $4 \cdot 10^{-1}$  J/cm<sup>2</sup>. Установлено, что при низкой плотности энергии электронного пучка основным видом свечения является катодолюминесценция образца. С увеличением плотности энергии наносекундного электронного пучка, или (и) числа импульсов возбуждения электронным пучком субнаносекундной длительности, в зоне облучения происходит электрический пробой полиметилметакрилата, который сопровождается вспышкой свечения плотной низкотемпературной плазмы.

DOI: 10.21883/JTF.2017.02.44137.1860

## Введение

Пучки электронов нано- и субнаносекундной длительностей широко используются в импульсной спектрометрии для диагностики природных и искусственных кристаллов [1–3], исследования свойств энергетических материалов [4,5] и светодиодных наногетероструктур [6,7]. При сравнительно малых плотностях энергии электронного пучка ( $H$ ) наносекундной длительности, как правило, регистрируется спонтанная катодолюминесценция возбужденных образцов, а при увеличении  $H$  в полупроводниковых кристаллах высокого качества наблюдается стимулированное излучение [7]. Дальнейшее увеличение  $H$  приводит к разрушению образцов вследствие накопления инжектированного в диэлектрик отрицательного объемного заряда электронного пучка и последующего электрического пробоя [7,8].

В последние годы повысился интерес к исследованию излучения кристаллов и полиметилметакрилата (ПММА) под действием электронных пучков. Различные кристаллы, в том числе из алмаза, начали широко применять для диагностики потока убегающих электронов в установках типа ТОКАМАК [9–11], используя излучение Вавилова–Черенкова (ИВЧ). В работе [12] была предпринята попытка применить для регистрации ИВЧ полиметилметакрилат. Для возбуждения ПММА использовался ускоритель с газовым диодом, заполненным воздухом атмосферного давления. Из [12] следовало, что основной вклад в свечение образца давало ИВЧ, а интенсивность катодолюминесценции была малой и не

превышала 25% от интенсивности ИВЧ. Однако данный вывод был сделан без проведения измерений спектров излучения ПММА, а также спектра электронного пучка.

Цель настоящей работы — выяснить физическую природу свечений, возникающих в ПММА при возбуждении пучком электронов субнаносекундной и наносекундной длительностей. Электронные пучки формировались в импульсных ускорителях электронов с газовым и вакуумным диодами. Плотности энергии пучка электронов ( $H$ ) в экспериментах варьировали от  $10^{-4}$  до  $0.4$  J/cm<sup>2</sup>, а длительности импульса тока пучка на полувысоте составляли 0.1–0.6 и 12 ns.

## Экспериментальная аппаратура и методика

Эксперименты были проведены на двух установках с генератором СЛЭП-150М [13], к которому подключался газовый диод (установка № 1) и с генератором ГИН-600 [14], к которому подключался вакуумный диод (установка № 2).

СЛЭП-150М формировал импульсы напряжения в передающей линии с амплитудой в падающей волне  $\sim 150$  kV и длительностью на полувысоте 1 ns. Длительность фронта импульса напряжения составляла  $\sim 250$  ps на уровне 0.1–0.9. Исследования были проведены с трубчатым катодом из нержавеющей стали. Катод имел форму трубки диаметром 6 mm с толщиной стенки 200  $\mu$ m, торец которой был округлен. Амплитуда сверх-

короткого лавинного электронного пучка (СЛЭП) после анодной фольги или число электронов в пучке определялись с помощью конусного коллектора с диаметром приемной части 20 mm. Временное разрешение данного коллектора составляло  $\sim 80$  ps. Энергия электронов определялась по ослаблению тока СЛЭП в фильтрах из алюминиевой фольги различной толщины [15]. Для изменения амплитуды и плотности тока пучка и его длительности давление в газовом диоде, который заполнялся гелием, варьировало от 3 до 760 Torr. Это позволило изменять плотность тока пучка от единиц до сотен ампер на квадратный сантиметр. Наибольшие амплитуды СЛЭП были получены в гелии при давлении 30 Torr. Длительность импульса СЛЭП при уменьшении давления гелия от 760 до 9 Torr изменялась от 100 до 600 ps. Максимальные плотности энергии электронного пучка с генератором СЛЭП-150М составляли  $\sim 0.01$  J/cm<sup>2</sup>, минимальные, при которых удавалось регистрировать осциллограммы СЛЭП, были на три порядка меньше.

Излучение ПММА регистрировалось фотодиодом PD025 (катод LNS20 компании Photek, время нарастания переходной характеристики  $\sim 80$  ps). Импульсы с фотодиода, коллектора и емкостных делителей подавались на осциллограф DSO-X6004A (6 GHz, 20 выборок за наносекунду). Спектры излучения ПММА измерялись с помощью спектрометра Ocean Optics HR2000+ES (диапазон 190–1100 nm, спектральное разрешение  $\sim 0.9$  nm). Спектральные и амплитудно-временные характеристики излучения на первой установке были исследованы для трех пластинок из ПММА толщиной 0.9, 6 и 10 mm.

Генератор ГИН-600 [14] формировал на разрядном промежутке импульс напряжения с максимальной амплитудой  $\sim 350$  kV. Длительность импульса тока сильного электронного пучка (СЭП) на полувысоте составляла 12 ns, диапазон варьированной плотности энергии  $\sim 0.01$ – $0.4$  J/cm<sup>2</sup>.

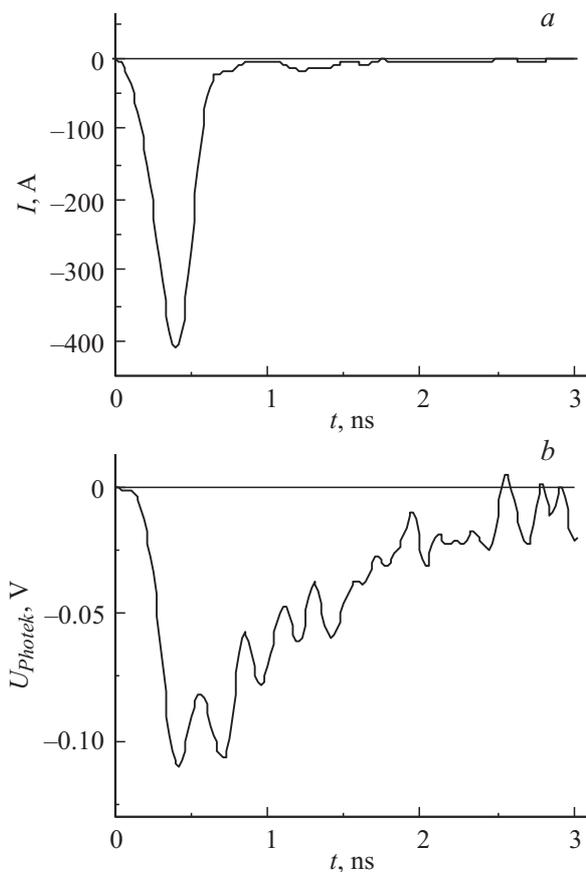
Использовались два метода регистрации спектров свечения ПММА: „спектр по точкам“ и „спектр за импульс“. Первый метод позволял регистрировать спектры свечения с помощью импульсного спектрометра на основе дифракционного монохроматора МДР-23, ФЭУ-84 и осциллографа Tektronix DPO 3034, связанного с компьютером. Временное разрешение спектрометра составляло  $\sim 15$  ns. Во втором методе спектры свечения регистрировались с помощью оптоволоконного спектрометра AvaSpec-2048 (диапазон 340–900 nm, спектральное разрешение  $\sim 3$  nm). Пространственное распределение свечения по поверхности образца фотографировалось зеркальной цифровой фотокамерой SONY DSLR-A500 за один импульс возбуждения через микроскоп МБС-10. Морфологию остаточных разрушений регистрировали микровизором проходящего света  $\mu$  Vizo-101. Количество импульсов возбуждения варьировало от 1 до 100. Измерения проводились при температуре 300 K.

## Результаты и обсуждение

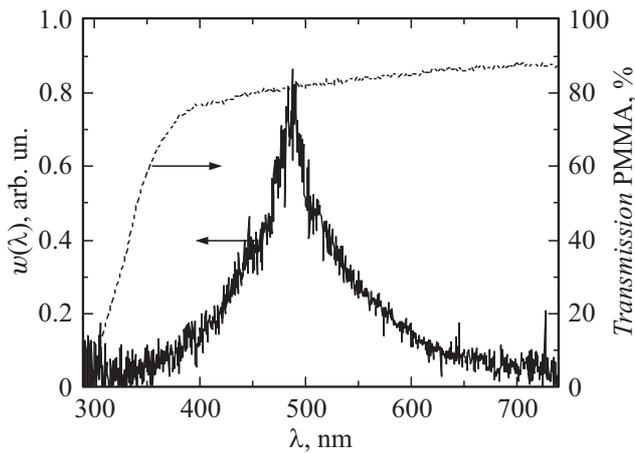
### Основные закономерности свечения и разрушения ПММА при возбуждении СЛЭП

При возбуждении пучком электронов на первой установке всех трех пластинок из ПММА наблюдалось голубоватое свечение, интенсивность которого возрастала с ростом амплитуды и длительности импульса тока СЛЭП. Однако интенсивность свечения всех пластинок при атмосферном давлении гелия в газовом диоде была очень мала и не регистрировалась фотодиодом. На рис. 1 показаны импульсы тока пучка и излучения ПММА при длительности импульса тока пучка на полувысоте 0.25 ns.

Из приведенных осциллограмм следует, что длительность импульса излучения ПММА существенно превышает длительность импульса тока пучка и составляет  $\sim 1.5$  ns на полувысоте. Этот факт свидетельствует о том, что данное излучение не является ИВЧ, а связано с импульсной катодолуминесценцией (ИКЛ) ПММА. Спектры излучения и пропускания ПММА, приведенные на рис. 2, также подтверждают этот вывод. Действи-



**Рис. 1.** Импульс тока пучка уходящих электронов (a) и осциллограмма импульса излучения образца из ПММА толщиной 6 mm (b) при давлении гелия в газовом диоде 30 Torr. Межэлектродный зазор в газовом диоде  $d = 14$  mm. Полоса пропускания осциллографа 6 GHz.

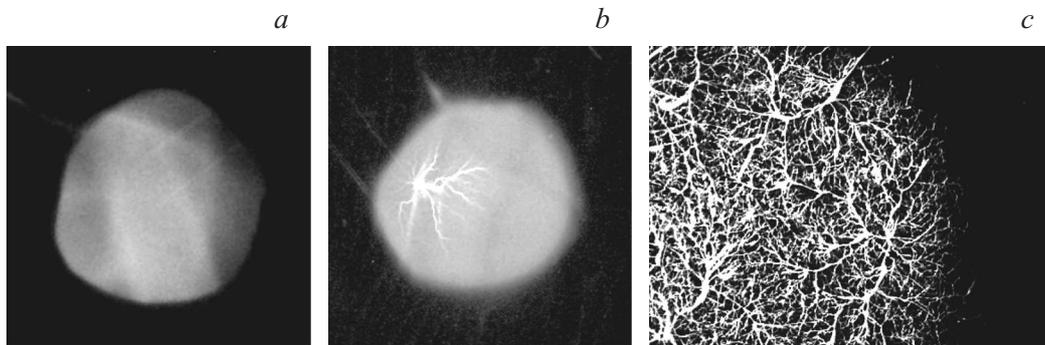


**Рис. 2.** Спектр излучения (сплошная) и пропускания (пунктир) ПММА.

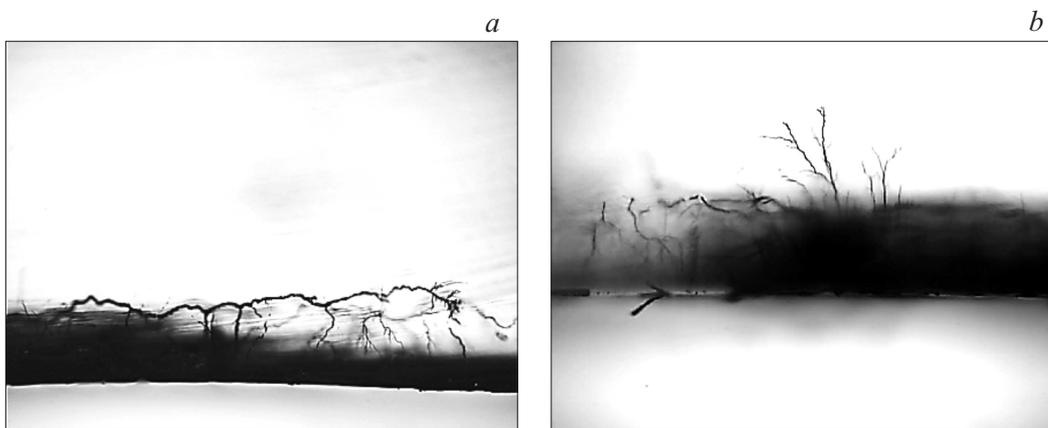
тельно, на спектрограмме излучения видна одна полоса с максимумом на длине волны 490 nm. Как известно [16], интенсивность ИВЧ должна увеличиваться в области прозрачности ПММА с уменьшением длины волны. Однако на регистрируемых спектрах интенсивность излучения уменьшается в области короче 490 nm с уменьшением длины волны.

На рис. 3 приведены фотографии свечения ПММА при максимальных плотностях тока пучка в первых импульсах возбуждения (*a*), а также после 100 и более импульсов возбуждения (*b*).

Анализ фотографий, приведенных на рис. 3, свидетельствует о том, что в первых импульсах возбуждения и максимальных плотностях тока пучка ( $H \sim 0.01 \text{ J/cm}^2$ ), а также при малых плотностях тока СЛЭП ( $H \leq 0.001 \text{ J/cm}^2$ ) наблюдается сравнительно равномерная по облучаемой поверхности катодолюминесценция образцов. Наблюдаемые неоднородности на рис. 3, *a* связаны с флуктуациями плотности тока пучка в отдельных импульсах. Увеличение числа импульсов облучения при  $H \sim 0.01 \text{ J/cm}^2$  привело к накоплению инжектированного в образец отрицательного объемного заряда СЛЭП и инициированию электрического пробоя ПММА в зоне торможения электронного пучка. Электрический пробой реализуется в виде стримерных разрядов (СР), которые инициируются на возбуждаемой поверхности образца и развиваются в область локализации отрицательного объемного заряда, пространственное распределение которого определяется энергетическим спектром СЛЭП. Электрические разряды регистрируются как по свечению плотной низкотемпературной плазмы, образующейся в каналах электрического пробоя (КЭП), так и по морфологии остаточных



**Рис. 3.** Фотографии свечения ПММА за один импульс (*a, b*) и морфология остаточных разрушений (*c*), образующихся в зоне торможения СЛЭП в результате развития электрического пробоя. Диаметр светящейся области (*a, b*) и зоны разрушения, изображение которой увеличено, (*c*)  $\sim 6 \text{ mm}$ . Количество импульсов облучения — 500 при частоте 1 Hz (*c*).



**Рис. 4.** Пространственное распределение КЭП вдоль направления распространения СЛЭП, *a* — на расстоянии 4 mm от оси пучка, *b* — на оси пучка. Размеры поля фотографии  $1467 \times 1970 \mu\text{m}$ .  $H \sim 0.01 \text{ J/cm}^2$ .

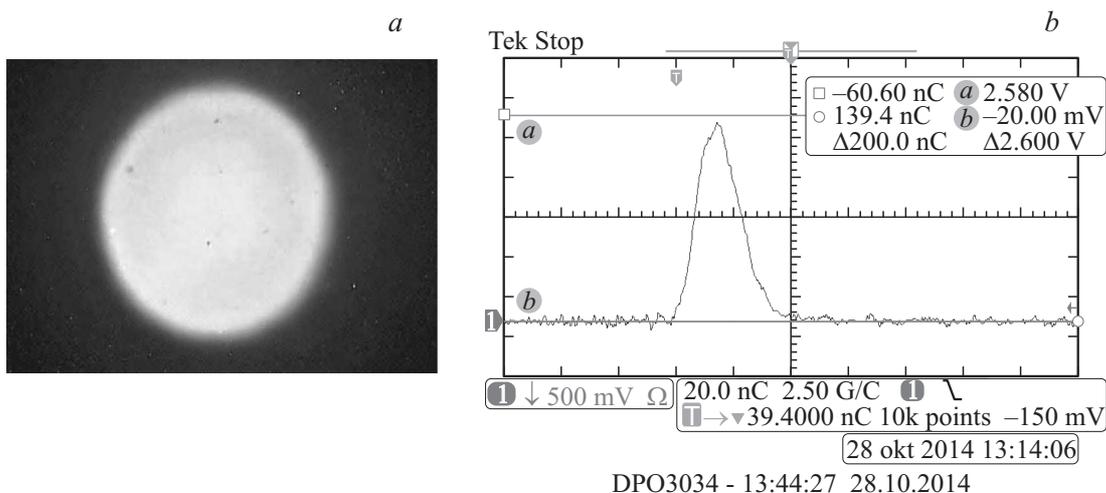


Рис. 5. Фотография (a) и осциллограмма (b) катодолуминесценции ПММА.  $H = 0.1 \text{ J/cm}^2$ .

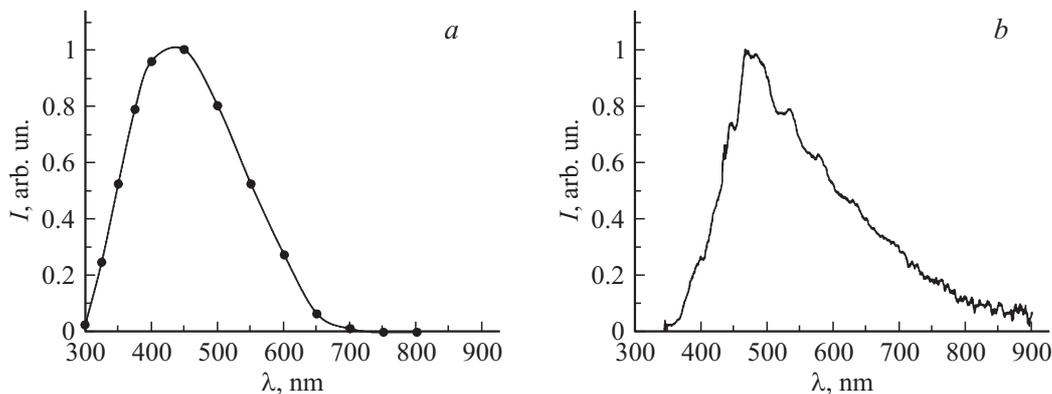


Рис. 6. Спектры ИКЛ (a) и свечения плазмы СР (b) в ПММА при облучении СЭП.

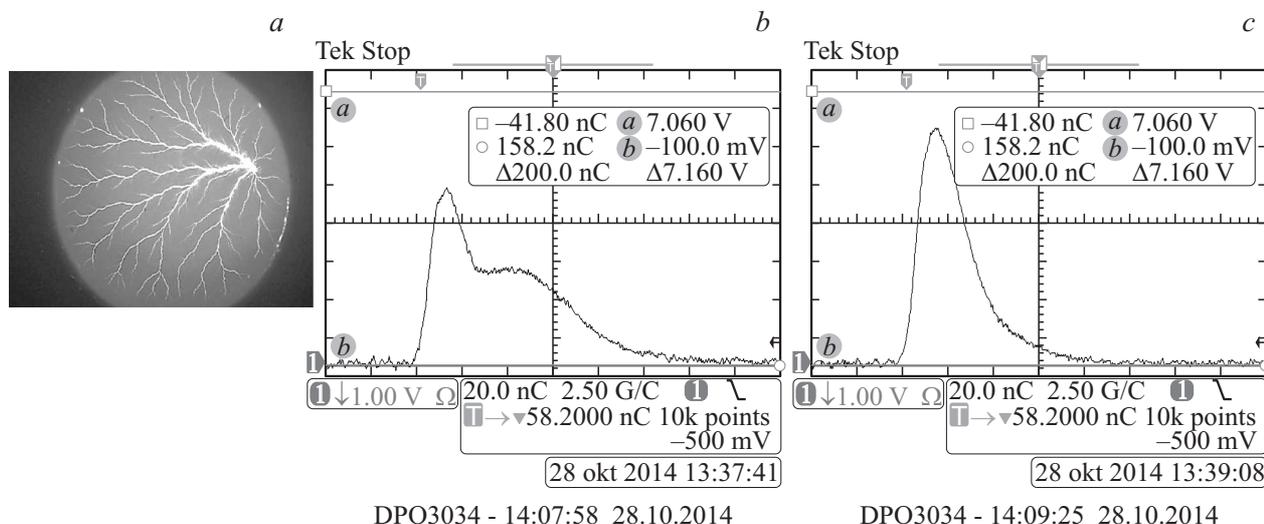


Рис. 7. Фотография и осциллограммы свечения ПММА: a, b — первый импульс возбуждения, c — второй импульс возбуждения. Диаметр зоны облучения 5 mm.  $H = 0.2 \text{ J/cm}^2$ .

разрушений рис. 3, *b, c*. Длительность свечения плазмы, образующейся в КЭП с помощью фотодиода PD025, нам зарегистрировать не удалось из-за малой интенсивности излучения СР по сравнению с интенсивностью ИКЛ. На рис. 4, *a, b* показаны фотографии поперечных сечений образцов ПММА после многоимпульсного облучения.

Видно, что пространственное распределение КЭП вдоль пробега электронного пучка не однородно. На периферии зоны облучения максимальная глубина локализации СР составляет  $\sim 360 \mu\text{m}$ , а в центральной зоне облучения  $\sim 720 \mu\text{m}$ , что соответствует энергиям СЛЭП  $\sim 200$  и  $\sim 300 \text{keV}$ .

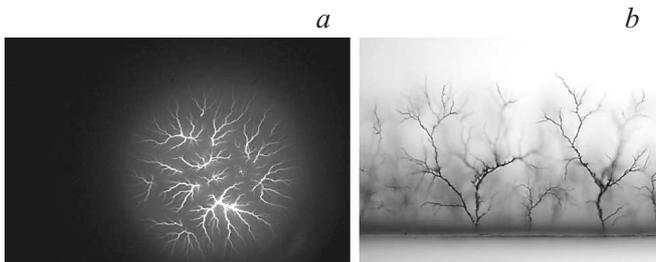
### Основные закономерности свечения и разрушения ПММА при возбуждении СЭП

Спектральные и кинетические характеристики свечения, индуцированного СЭП в ПММА при различных плотностях энергии пучка, приведены на рис. 5–7. Установлено, что спектральные характеристики свечения зависят от  $H$ . При  $H < 0.2 \text{J/cm}^2$  наблюдается ИКЛ образца (рис. 5, *a*), длительность которой на полувысоте (рис. 5, *b*) составляет  $\sim 17 \text{ns}$  и сопоставимо с временным разрешением импульсного спектрометра.

Преобразование спектра ИКЛ в сплошной спектр излучения плазмы электрических разрядов (рис. 6) происходит при плотности энергии пучка  $H^* \sim 0.2 \text{J/cm}^2$ , что соответствует порогу формирования СР и появлению остаточных КЭП в данном материале (рис. 7, 8).

Спектр ИКЛ полиметилметакрилата измерялся при  $H = 0.1 \text{J/cm}^2$  в режиме многоимпульсного облучения (спектр по точкам). Спектр излучения плазмы СР, индуцированных СЭП в ПММА (рис. 6, *b*), измерялся за один импульс возбуждения.

Изучение кинетики свечения СР в зоне торможения электронного пучка при  $H = H^*$  позволило обнаружить задержку свечения СР относительно импульса катодоллюминесценции в первом импульсе возбуждения СЭП (рис. 7, *b*). Видно, что импульс свечения ПММА состоит из двух разделенных во времени пиков: импульса катодоллюминесценции и импульса плазменного свечения



**Рис. 8.** Фотографии свечения возбуждаемой поверхности ПММА (*a*) и пространственного распределения КЭП по глубине пробега электронного пучка (*b*) после первого импульса СЭП. Диаметр зоны облучения  $5 \text{mm}$ .  $H = 0.4 \text{J/cm}^2$ . Размеры поля фотографии (*b*)  $784 \times 1054 \mu\text{m}$ .

СР. Задержка максимума второго пика относительно первого составляет  $\sim 30 \text{ns}$  и связана с задержкой развития электрического пробоя относительно импульса возбуждения. Интенсивность свечения СР во втором импульсе облучения этой же зоны увеличивается более чем на порядок и представляет моноимпульс (рис. 7, *c*), причем задержка свечения СР относительно импульса катодоллюминесценции отсутствует, что определяется развитием СР по сформированным в первом импульсе КЭП.

На рис. 8, *a, b* показаны фотографии свечения и пространственного распределения КЭП по глубине пробега электронного пучка в ПММА после однократного импульса облучения СЭП при  $H = 0.4 \text{J/cm}^2$ .

Видно, что с увеличением  $H$  количество КЭП увеличивается. Распределение КЭП в зоне торможения электронного пучка близко к однородному, а максимальная глубина пробега достигает  $\sim 650 \mu\text{m}$ , что соответствует средней энергии электронов в энергетическом спектре СЭП  $\sim 290 \text{keV}$ .

### Заключение

Анализ амплитудных и спектрально-кинетических характеристик излучения образцов ПММА при возбуждении СЛЭП малой плотности ( $H \leq 0.001 \text{J/cm}^2$ ), а также характеристик свечения образцов в первых импульсах возбуждения при максимальных плотностях тока СЛЭП ( $H \sim 0.01 \text{J/cm}^2$ ) свидетельствуют о том, что основной вклад в свечение ПММА дает катодоллюминесценция. ИВЧ в условиях данного эксперимента зарегистрировано не было. Обнаружено, что многоимпульсное облучение ПММА СЛЭП, при  $H \geq 0.01 \text{J/cm}^2$  приводит к электрическому пробую образца вследствие накопления отрицательного объемного заряда электронного пучка и формирования в зоне торможения пучка сильного электрического поля. Электрические разряды регистрируются как по свечению плотной низкотемпературной плазмы, образующейся в каналах электрического пробоя, так и по морфологии остаточных разрушений. Измерить спектрально-кинетические характеристики стримерных разрядов в ПММА при возбуждении СЛЭП не удалось, так как интенсивность катодоллюминесценции значительно превышает интенсивность излучения СР.

Возбуждение ПММА СЭП малой плотности ( $H < 0.2 \text{J/cm}^2$ ) сопровождается импульсной катодоллюминесценцией образца. При пороговой плотности энергии СЭП  $H^* \sim 0.2 \text{J/cm}^2$  в первом импульсе возбуждения образца на осциллограмме свечения регистрируются два сравнимых по амплитуде пика свечения: первый — безынерционный импульс катодоллюминесценции, длительность которого не превышает временное разрешение импульсного спектрометра и второй — с задержкой  $\sim 30 \text{ns}$  импульс свечения плазмы, образующейся в каналах электрического пробоя (свечение стримерных разрядов). При  $H > 0.2 \text{J/cm}^2$ , как правило, наблюдается один пик

свечения, связанный со свечением СР, интенсивность которых более, чем на порядок превышает интенсивность катодолуминесценции ПММА. Глубина проникновения СР в ПММА при их возбуждении пучком электронов субнаносекундной и наносекундной длительности коррелирует с энергией пучка электронов.

Исследование на установке № 1 было выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00052).

## Список литературы

- [1] *Lisitsyn V.M., Valiev D.T., Oleshko V.I. et al. // J. Luminescen. 2014. Vol. 153. P. 130–135.*
- [2] *Морозова Н.К., Данилевич Н.Д., Олешко В.И., Вильчинская С.С. // Изв. вузов. Электроника. 2012. № 3. С. 3–10.*
- [3] *Липатов Е.И., Лисицын В.М., Олешко В.И., Тарасенко В.Ф. // Изв. вузов. Физика. 2007. Т. 50. № 1. С. 53–57.*
- [4] *Олешко В.И., Зарко В.Е., Лысык В.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. Вып. 11. С. 10–15.*
- [5] *Олешко В.И., Лисицын В.М., Скрипин А.С., Ципилев В.П. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. Вып. 9. С. 37–43.*
- [6] *Олешко В.И., Горина С.Г., Корепанов В.И., Лисицын В.М. и др. // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 1. С. 55–58.*
- [7] *Олешко В.И., Горина С.Г. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. Вып. 15. С. 75–82.*
- [8] *Олешко В.И. Пороговые процессы в твердых телах при взаимодействии с сильноточными электронными пучками. Дис. докт. физ.-мат. наук. Томск, 2009. 317 с.*
- [9] *Plyusnin V.V., Jakubowski L., Zebrowski J. et al. // Rev. Sci. Instrument. 2012. Vol. 83. N 8. P. 083 505.*
- [10] *Vorobev V.V., Tyukhtin A.V. // Phys. Rev. Lett. 2012. Vol. 108. N 18. P. 184 801.*
- [11] *Ginis V., Danckaert J., Veretennicoff I. et al. // Phys. Rev. Lett. 2014. Vol. 113. N 16. P. 167 402.*
- [12] *Babich L.P., Loiko T.V., Rodigin A.V. // IEEE Trans. Plasm. Sci. 2014. Vol. 42. N 4. С. 948–952.*
- [13] *Tarasenko V.F., Kostyrya I.D., Baksht E.K., Rybka D.V. // IEEE Trans. Dielect. Electric. Insulat. 2011. Vol. 18. N 4. P. 1250–1255.*
- [14] *Ковальчук Б.М., Месяц Г.А., Семин Б.М., Шпак В.Г. // Приборы и техника эксперимента. 1981. № 4. С. 15–18.*
- [15] *Kozyrev A.V., Kozhevnikov V.Yu., Vorobyev M.S. et al. // Laser and Particle Beams. 2015. Vol. 33. P. 183–192.*
- [16] *Jelly J.V. Cherenkov's Radiation and its Application. NY, USA: Pergamon, 1958.*