

Возбуждение импульсной катодолюминесценции пучком убегающих электронов пикосекундной длительности

В.И. Соломонов¹, А.В. Спирина^{1,}, Л.Н. Лобанов¹, С.А. Шунайлов¹, А.И. Липчак¹,
К.А. Шарыпов¹, А.С. Макарова¹, М.И. Яландин^{1,2}*

¹*Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

²*Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия*

**anniebubnova@mail.ru*

Аннотация. Исследовалась импульсная катодолюминесценция образцов щелочно-галлоидных кристаллов и синтетического бриллианта, возбуждаемая пучками убегающих электронов длительностью около 100 пс. Пучки генерировались в промежутке катод-анод, заполненном воздухом атмосферного давления, и фокусировались неоднородным магнитным полем амплитудой ≈ 0.6 Тл в диаметр ≈ 15 мм. Проведен сравнительный анализ полученных результатов с параметрами импульсной катодолюминесценции тех же образцов, возбуждаемой пучками электронов длительностью 2 нс и плотностью тока 130 А/см², генерируемыми в вакуумном диоде. В случае облучения пучками убегающих электронов в щелочно-галлоидных кристаллах не происходит образования F -центров, что является результатом пониженной радиационной нагрузки на образцы, и, соответственно, не искажается спектральная информация. Люминесценция и кинетические параметры синтетического бриллианта идентичны в обоих случаях, различие проявляется только в интенсивности свечения, которая значительно слабее при воздействии пучками убегающих электронов.

Ключевые слова: убегающие электроны, импульсная катодолюминесценция, щелочно-галлоидные кристаллы, F -центры.

1. Введение

В последнее время достигнут значительный успех в генерации убегающих электронов (УЭ), исследования по которым представлены в коллективной монографии [1]. При приложении к катоду электрического поля с напряженностью выше критического значения: осуществляется преионизация газа автоэмиссионными электронами, формируется прикатодный слой плазмы, и с его границы испускаются образующие пучок УЭ. Такой режим убегания функционирует в течение единиц-десятков пикосекунд до тех пор, пока электрическое поле не станет меньше критического за счет расширения плазмы.

Возможность использования пучков УЭ для возбуждения импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) продемонстрирована в ряде работ [2–5]. В работах [2, 3] показано, что при возбуждении такими пучками кристаллов Nd:YAG, сподумена и алмаза их спектры люминесценции в диапазоне 200–800 нм идентичны спектрам ИКЛ, возбуждаемой электронным пучком из вакуумного диода длительностью 2–10 нс. В [4] исследовалась кинетика люминесценции кальцита, шеелита, флюорита, алмаза и кимберлита в интервале 380–620 нм при их облучении пучком УЭ длительностью 0.25 нс при средней энергии электронов 270 кэВ. Авторы обнаружили люминесценцию всех указанных выше минералов в наносекундном интервале (0–50 нс) после электронного пучка. В работах [2–4] при измерении кинетики спектральный интервал выделялся с помощью широкополосных светофильтров. В [5] представлены результаты сравнительных исследований параметров ИКЛ, возбуждаемой пучками УЭ длительностью 10–12 пс, генерируемыми в воздушном промежутке с острым катодом, и пучками электронов длительностью 2 нс, генерируемыми в вакуумном диоде. В качестве объектов исследования выступали монокристаллы рубина и сапфира, а также керамика и монокристаллы иттрий-алюминиевого граната. Показано, что спектр люминесценции и кинетика затухания полос в обоих случаях совпадают. При возбуждении пучком УЭ наблюдается меньшая интенсивность люминесценции.

В настоящей работе представлены результаты следующей серии сравнительных исследований воздействия на вещество пучком УЭ длительностью ≈ 100 пс и диаметром ≈ 15 мм, сформированным в магнитоизолированном воздушном диоде со стальным concentрическим катодом, и пучком электронов длительностью 2 нс, генерируемым в вакуумном диоде.

2. Аппаратура и объекты исследования

На Рис.1 представлена упрощенная схема выходного узла экспериментальной установки. Не включенный в схему генератор, создающий высоковольтные импульсы напряжения, построен на базе драйвера РАДАН-303 и описан в [6, 7]. В данном случае использовался катод с шестью concentрическими стальными кольцами. Промежуток катод-анод был заполнен воздухом атмосферного давления. По передающей линии на катод подавался высоковольтный импульс напряжения амплитудой $-(135 \pm 5)$ кВ и длительностью на полувысоте ≈ 210 пс. Фокусирующее магнитное поле в области эмиссии и ускорения УЭ создавалось с помощью катушек Гельмгольца, разнесенных на 21 мм друг от друга с возможностью установки между ними световода для регистрации люминесценции на «отражение». Измерение параметров ИКЛ проводилось при магнитном поле ≈ 0.6 Тл на квазиоднородном участке (в зазоре), в то время как на катоде оно составляло ≈ 0.2 Тл.

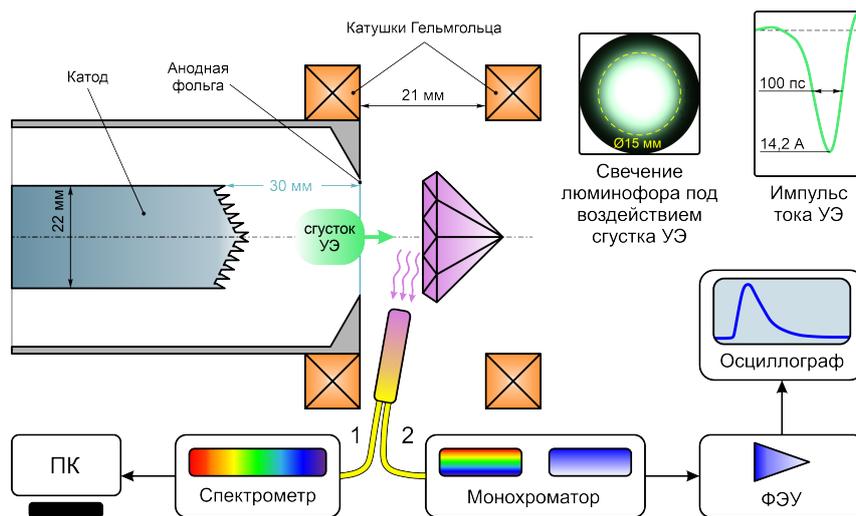


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки.

Для визуализации электронного пучка использовался листовой рентгеновский люминофор, устанавливаемый в центре зазора между катушками. Параметры электронного пучка измерялись в этой же точке с помощью широкоапертурного коллекторного датчика [8] и осциллографа Tektronix TDS6604B. Переходная характеристика измерительного тракта была недостаточной, поэтому приведенные значения тока сгустка УЭ являются скорее оценкой снизу. Типичные осциллограмма импульса тока сгустка и свечение люминофора под его воздействием приведены на Рис. 1.

Для сравнения люминесцентных параметров дополнительно проводились исследования на установке КЛАВИ [9] при возбуждении электронным пучком длительностью 2 нс со средней энергией электронов 170 кэВ и плотностью тока 130 A/cm^2 , генерируемом в вакуумном диоде. В обоих случаях использовалась одна и та же фотоспектральная аппаратура. При регистрации интегрального спектра (Рис. 1, измерительный тракт 1) посредством многожильного кварцевого световода длиной 1.5 м световой поток люминесценции передавался на спектрометр (400–850 нм), представляющий собой

сочленение электронно-оптического преобразователя и ПЗС-линейки и управляемый с помощью специального программного обеспечения. Для регистрации кинетики (Рис. 1, измерительный тракт 2) использовался фотоэлектронный умножитель ФЭУ-100, совмещенный с осциллографом DP04034 с полосой пропускания 500 МГц. При этом спектральный участок шириной 4 нм отдельных полос люминесценции выделялся посредством монохроматора МДР-41.

В качестве образцов для исследования использовались монокристалл синтетического бриллианта весом 1 карат и щелочно-галоидные кристаллы NaCl и KCl в виде микронных порошков, запрессованных в металлическую оправу из нержавеющей стали. Выбор образцов обусловлен хорошей изученностью их люминесцентных свойств при разных способах возбуждения. На обеих установках образцы помещались на оси пучка электронов, а люминесценция регистрировалась «на отражение» – со стороны облучаемой поверхности образца под углом 45° к ее нормали. Образцы устанавливались на расстоянии 10 мм от анода на установке с УЭ и на 12 мм от выходной фольги вакуумного диода на установке КЛАВИ.

3. Результаты и их обсуждение

На Рис. 2а представлены нормированные спектры люминесценции бриллианта, возбуждаемые на установке с УЭ (кривая 1) и на установке КЛАВИ (кривая 2). В первом случае были зарегистрированы 10 одиночных спектров, которые были просуммированы и поделены на их общее количество. Во втором случае спектры регистрировались автоматически с частотой 1 Гц при их накоплении и усреднении по 20 импульсам. Для качественной оценки на Рис. 2а спектры люминесценции были совмещены по интенсивности. Полученные полосы излучения являются подобными, однако при возбуждении пучками УЭ их интенсивность значительно меньше.

Кинетика люминесценции бриллианта на длине волны 520 нм приведена на Рис. 2б. Для обоих пучков наблюдается одинаковый спад интенсивности, который описывается экспоненциальным законом. При этом прозрачность бриллианта до и после облучения и пико-, и наносекундными пучками не изменялась.

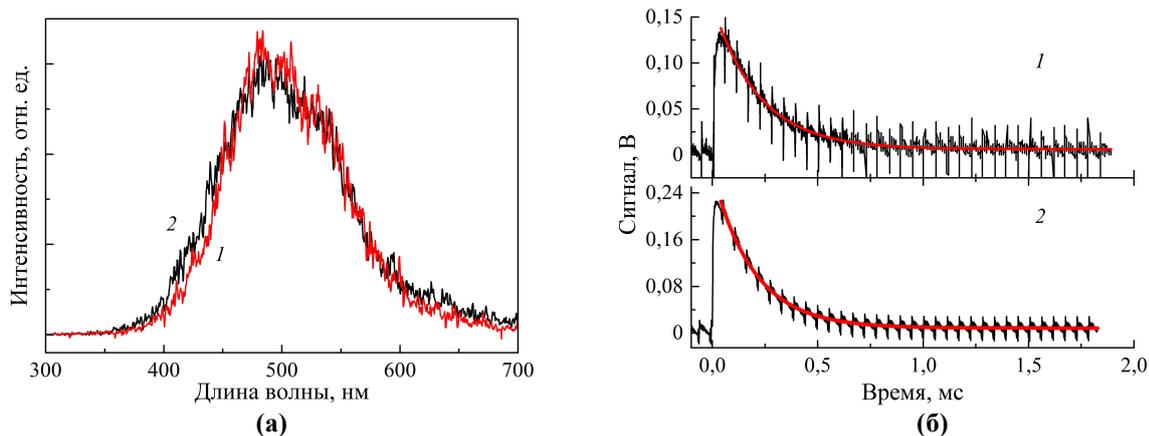


Рис. 2. Нормированные спектры импульсной катодолуминесценции бриллианта (а) и кинетика затухания люминесценции на длине волны 520 нм (б), зарегистрированные на установке с убегающими электронами (кривые 1) и на установке КЛАВИ (кривые 2).

В случае щелочно-галоидных кристаллов интересным представлялось наблюдение образования F -центров при воздействии УЭ. Известно [10, 11], что при ионизирующем воздействии NaCl и KCl окрашиваются. В них F -центры образуют полосу поглощения колоколообразного вида (F -полосу) в видимой области, смещающуюся в сторону длинных

волн при увеличении атомного веса катиона (аниона). В частности, в NaCl полоса поглощения F -центра имеет максимум в синей области (465 нм), и цвет кристалла становится жёлто-коричневым, в KCl – в зелёной области (563 нм), и кристалл выглядит фиолетовым. Образование полосы поглощения происходит за счет перехода F -центра из основного состояния $1s$ в $2p$ -возбужденное состояние, расположенное ниже дна зоны проводимости, приблизительно на 0.1 эВ.

После облучения импульсами пикосекундного пучка УЭ кристаллы солей оставались бесцветными (Рис. 3а). Для сравнения приведены фотографии этих же образцов, облученных на установке КЛАВИ наносекундным пучком (Рис. 3б). В последнем случае наблюдается классическая картина образования F -центров, проявляющихся в окрашивании кристаллов KCl и NaCl в фиолетовый и желто-коричневый цвета соответственно.

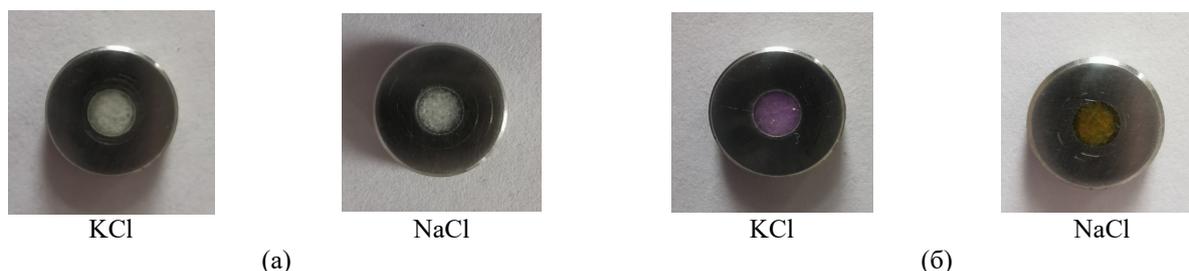


Рис. 3. Окрашивание солей при воздействии пикосекундным пучком убегающих электронов (а) и наносекундным пучком электронов, генерируемых в вакуумном диоде (б).

В обоих случаях в этих солях наблюдается собственное свечение в виде широкой неэлементарной полосы в видимой области. При облучении пучком электронов наносекундной длительности за счет самопоглощения излучения F -центрами [12–14] в этой полосе наблюдаются минимумы (Рис. 4, кривые 2). При возбуждении убегающими электронами F -центры не образуются и, следовательно, спектр люминесценции не искажается за счет эффекта самопоглощения (Рис. 4, кривые 1).

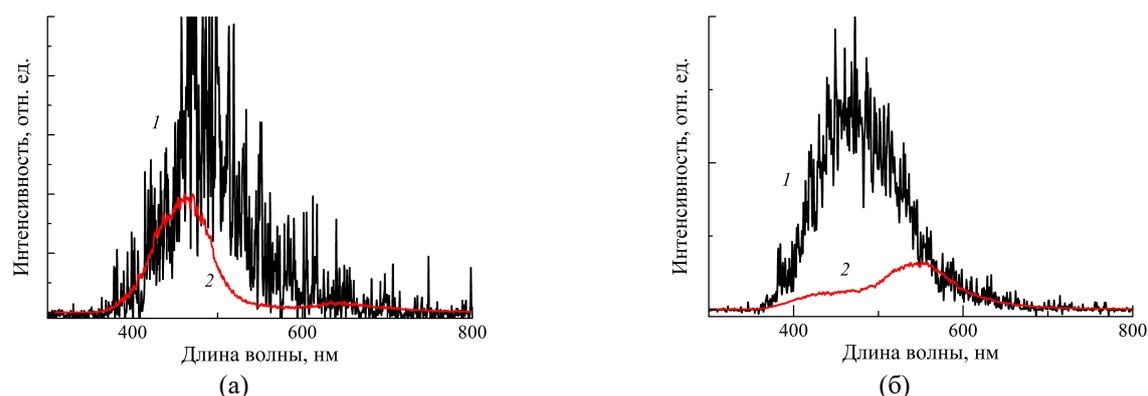


Рис. 4. Спектры люминесценции кристаллов KCl (а) и NaCl (б) под облучением пикосекундным (кривые 1) и наносекундным (кривые 2) пучками электронов. Для наглядности интенсивности спектральных кривых нормировались до совпадения крыльев полос излучения.

4. Заключение

Таким образом, при облучении пикосекундными пучками убегающих электронов синтетического бриллианта возникает импульсная катодолуминесценция с характерными временами, подобная той, что наблюдается при воздействии наносекундными пучками электронов, генерируемыми вакуумным диодом. В образцах KCl и NaCl при облучении

пикосекундными пучками радиационные дефекты не образуются, и структура спектра люминесценции не искажается за счет эффекта самопоглощения, как в случае с пучками электронов наносекундной длительности. Подход с использованием убегающих электронов представляет альтернативу использованию вакуумного взрывоэмиссионного диода. В сравнении с ним снижается радиационная нагрузка как на оператора, так и на образцы. Поэтому такие пучки целесообразно использовать в люминесцентном анализе веществ с низким порогом образования радиационных дефектов.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00053, <https://rscf.ru/project/23-19-00053/>.

5. Список литературы

- [1] В.Ф. Тарасенко (ред.), *Генерация убегающих электронов и рентгеновского излучения в разрядах повышенного давления*. Томск: STT, 2015.
- [2] E.Kh. Baksht, A.G. Burachenko, V.I. Solomonov, and V.F. Tarasenko. Spodumene and garnet luminescence excited by subnanosecond electron beams, *Russian Physics Journal*, vol. **54**, 634, 2011, doi: 10.1007/s11182-011-9663-7
- [3] Е.И. Липатов, Е.Х. Бакшт, А.Г. Бураченко, В.И. Соломонов, В.Ф. Тарасенко, Люминесценция кристаллов при возбуждении сверхкоротким лавинным электронным пучком, в *Генерация убегающих электронов и рентгеновского излучения в разрядах повышенного давления, под ред. В.Ф. Тарасенко*. Томск: STT, 2015, с.495–508.
- [4] L.P. Babich, K.N. Becker, and T.V. Loiko, Luminescence from minerals excited by subnanosecond pulses of runaway electrons generated in an atmospheric-pressure high-voltage discharge in air, *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. **37**, 2261, 2009, doi: 10.1109/TPS.2009.2030577
- [5] M.I. Yalandin, V.I. Solomonov, A.V. Spirina, S.A. Shunailov, K.A. Sharypov, A.S. Makarova, and A.I. Lipchak, Specific features of pulsed cathodoluminescence under excitation by nanosecond and subnanosecond electron beams, *Doklady Physics*, vol. **68**, 50, 2023, doi: 10.1134/S1028335823020064
- [6] L.N. Lobanov, G.A. Mesyats, E.A. Osipenko, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin, and N.M. Zubarev, Disk-Shaped Bunch of Runaway Electrons Formed in a Magnetized Air Diode, *IEEE Electron Device Letters*, vol. **44**, 1748, 2023, doi: 10.1109/LED.2023.3301867
- [7] G.A. Mesyats, E.A. Osipenko, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin, and N.M. Zubarev, An ultra-short dense paraxial bunch of sub-relativistic runaway electrons, *IEEE Electron Device Letters*, vol. **43**, 627, 2022, doi: 10.1109/LED.2022.3155173
- [8] G.A. Mesyats, M.I. Yalandin, N.M. Zubarev, A.G. Sadykova, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.R. Ulmaskulov, O.V. Zubareva, A.V. Kozyrev, and N.S. Semeniuk, How short is the runaway electron flow in an air electrode gap, *Applied Physics Letters*, vol. **116**, 063501, 2020, doi: 10.1063/1.5143486
- [9] V.I. Solomonov, S.G. Michailov, A.I. Lipchak, V.V. Osipov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin, and M.R. Ulmaskulov, CLAVI Pulsed cathodoluminescence spectroscopy, *Laser Physics*, vol. **16**, 126, 2006, doi: 10.1134/S1054660X06010117
- [10] Ч.Б. Лущик и А.Ч. Лущик, *Распад электронных возбуждений с образованием дефектов в твердых телах*. Москва: Наука, 1989.
- [11] R.W. Pohl, Electron conductivity and photochemical processes in alkali-halide crystals, *Proceedings of the Physical Society*, vol. **49**, 3, 1937, doi: 10.1088/0959-5309/49/4S/301

- [12] B. Yang, B.J. Luff, and P.D. Townsend, Comparison between thermoluminescence and cathodoluminescence spectra of KBr and KCl, *Physical Review B*, vol. **48**, 16256, 1993, doi: 10.1103/physrevb.48.16256
- [13] B. Yang and P.D. Townsend, Intrinsic emission in the cathodoluminescence spectra of KBr and KCl crystals, *Physica Status Solidi B*, vol. **178**, 533, 1993, doi: 10.1002/pssb.2221780230
- [14] T. Timusk, Optical absorption and luminescence of the α center in KBr, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. **26**, 849, 1965, doi: 10.1016/0022-3697(65)90260-X