

Плотников С.В.¹, Тұрлыбекұлы А.^{1*}, Манапбаева А.Б.²

¹Восточно-Казахстанский государственный технический университет
имени Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

*e-mail: aturlybekuly@gmail.com

О МЕХАНИЗМЕ ИНИЦИИРОВАНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ СИЛЬНОТОЧНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ. ОБЗОР

Актуальность исследований механизма инициирования взрывчатых веществ сильноточным импульсным электронным пучком обусловлена общенаучным и практическим интересом к изучению фундаментальных явлений при взаимодействии мощных направленных потоков энергии с конденсированными средами. В частности, большое практическое значение имеет изучение процесса электронно-пучкового инициирования энергетических материалов с целью практического использования этого способа подрыва в технологических целях (нанесение покрытий, сварка взрывом и др.). Известно, что воздействие сильноточного электронного пучка на диэлектрики и полупроводники приводит к изменению оптических, электрических и механических свойств материалов. В статье представлены основные положения о механизме инициирования взрывчатых веществ (ВВ) сильноточным электронным пучком (СЭП). Проведен обзорный анализ научных работ, посвященных исследованию природы механизма инициирования ВВ при воздействии СЭП. Показано, что на пороге инициирования взрыва свечение энергетических материалов определяется двумя физическими процессами – импульсной катодолюминесценцией твердого тела, которая наблюдается только в момент импульса облучения и свечением продуктов взрывного разложения (плазмы), которое формируется после индукционного периода. Применяемые ранее методики регистрации спектров взрыва энергетических материалов имели недостаточное спектральное разрешение, что не позволяло идентифицировать продукты взрывного разложения исследованных ВВ.

Ключевые слова: сильноточный электронный пучок, механизм инициирования, взрывчатые вещества

Plotnikov S.V.¹, Turlybekuly A.^{1*}, Manapbaeva A.B.²

¹D. Serikbayev East Kazakhstan state technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: aturlybekuly@gmail.com

Explosives initiation mechanism by high – current electron beam pulse. Overview

The research urgency of the explosives initiation mechanism by a high-current pulsed electron beam is due to general scientific and practical interest in the study of fundamental phenomena in the interaction of powerful directed energy flows with condensed media. In particular, it has a great practical importance to study the process of electron-beam initiation of energy materials in order to use this method of detonation for technological purposes (coating, explosion welding, etc.). It is known that the action of a high-current electron beam on dielectrics and semiconductors leads to a change in the optical, electrical, and mechanical properties of materials. The article presents the main points of the initiation mechanism of explosives by high-current electron beam. Providence overview of scientific papers devoted to the study of nature initiating explosive mechanism under the influence of high-current electron beam. It is shown that on the verge of initiating an explosion glow of energetic materials is determined by two

physical processes – pulsed solid cathodoluminescence, which occurs only when the pulse irradiation and glow of explosive decomposition products (plasma), which is formed after the induction period. The applied methods previously recording the spectra of the explosion of energetic materials have insufficient spectral resolution, which did not allow to identify the products of explosive decomposition studied explosives.

Key words: high-current electron beam initiation mechanism explosives

Плотников С.В.¹, Тұрлыбекұлы А.^{1*}, Манапбаева А.Б.²

¹Д. Серікбаев ат. Шығыс Қазақстан мемлекеттік техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

²Әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

*e-mail: aturlybekuly@gmail.com

Жоғары тоқты импульстік электрондық шоғырмен жарылғыш заттардың инициациялану механизмі. Шолу

Жоғары-ағымдағы импульстік электрондық шоғырлардың көмегімен жарылғыш заттың жарылу себептерін зерттеу, бағытталған энергия сәулелері мен қатты дененің әрекеттесуі іргелі құбылыстарды зерттеу тұрғысынан алғанда, қолданбалы мағынасы жоғары, өзекті мәселе болып табылады. Атап айтқанда, ол технологиялық мақсаттарда (жабын түзу, жарылыс дәнекерлеу және т.б.) осы әдісті пайдалану үшін энергетикалық материалдарды электрондық шоғырлармен атқылау процесін зерттеу үлкен практикалық маңызы бар. Диэлектрик және жартылай өткізгіштерді жоғары ағымдағы электрондық шоғырлармен атқылау материалдардың оптикалық, электр және механикалық қасиеттерін өзгеруіне әкелетіні белгілі. Мақалада жоғары тоқты электрондық шоғырдың әсерінен жарылыс механизмінің негізгі заңдылықтары ұсынылған. Электрондық шоғырдың әсерінен жарылыс механизмі жайлы бастамашылық сипаттағы зерттеуге арналған ғылыми жұмыстарға сараптамалы шолу жасалды. Жарылыс инициациялау шегіндегі материалдардың сәулеленуі екі физикалық үдерістермен сипатталады – сәулелендіру мезетінде байқалатын импульсті катодолуминисценциямен және жарылысты ыдырау өнімдерінің сәулеленуімен сипатталады.

Түйін сөздер: жоғары тоқты электрондық шоғырлар, инициациялау механизмі, жарылғыш заттар

Введение

Азиды тяжелых металлов (АТМ) на протяжении многих лет являются модельными объектами для исследования ВВ, а ТЭН широко используется как вторичное ВВ. Механизм взрывного разложения самих ВВ до настоящего времени точно неизвестен, хотя с момента первого иницирования ТЭН сильноточным электронным пучком (СЭП) с 2003 года прошло более 10 лет. Применение энергии электронного пучка и мощных лазерных импульсов в сочетании с электрофизическими и оптическими методами исследования с высоким временным разрешением позволило получить обширный спектр экспериментальных данных о процессах, протекающих при взрывном разложении ВВ.

Наиболее сложным является определение физики процессов, связанных с внутренними превращениями ВВ после иницирования, так как скорость данных процессов очень велика, а сам образец после опыта полностью разрушается. На сегодняшний день принято различать механизмы иницирования ВВ на цепной и тепловой метод развития взрыва вВВ. Обзор проводился

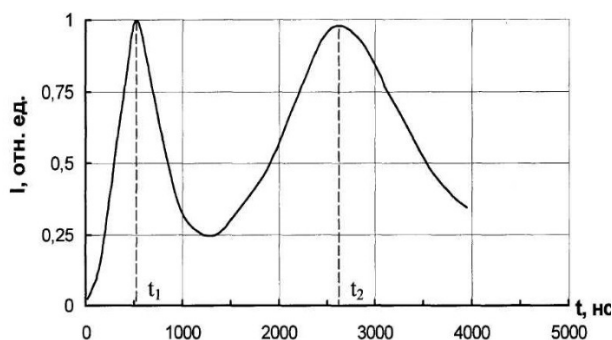
по результатам работ научных групп, имеющих противоположенные объяснения механизма развития взрыва.

Взрывное разложение энергетических материалов воздействием сильноточного электронного пучка

Спектрально-кинетические характеристики азидов тяжелых металлов

Кинетика предвзрывного и взрывного свечения несет в себе значительную информацию о процессах, протекающих при иницировании ВВ воздействием СЭП. Согласно [1] кинетика предвзрывной и взрывной люминесценции азидов тяжелых металлов представляет собой кривую, как правило, с двумя пиками короткого (~500 нс в полувысоте) и длинновременного свечения (~2 мс). Кинетика свечения азидов серебра при воздействии СЭП представлен на рисунке 1. По мнению авторов первый пик с максимумом $t_1 \approx 500$ нс (рис.1.) соответствует свечению образца до разрушения – предвзрывная люминесценция (спектр люминесценции рис.2), так как он не соответствует кривой формулы План-

ка, второй пик с максимумом $t_2 \approx 2,5$ мкс соответствует свечению плазмы взрыва с линейчатым спектром (рис.3.). Предвзрывную люминесценцию связывают с дефектами, образующимися в процессе цепной реакции. В работе [1] показано, что взрывное разложение АТМ является следствием экзотермической реакции $2N_3^0 \rightarrow 3N_2$, в результате которой выделяется энергия 10-12 эВ, а характер самой реакции является нетепловой, по причине возрастания проводимости в образце, обуславливающей размножение электронных возбуждений и приводящей к взрыву образца. Позже, в работе [2] описывается гипотеза, что повышение проводимости в нитевидном кристалле азида серебра является следствием перекрывания очагов реакции и образования сплошного канала проводимости в образце, так как в работе [3] экспериментально доказывается, что роль очагов исполняют области вокруг дислокаций.



t_1 – время, соответствующее максимуму предвзрывной люминесценции; t_2 – время, соответствующее максимуму свечения продуктов взрыва.

Рисунок 1 – Полная кинетика взрывного свечения макрокристалла AgN_3 , $\lambda=770$ нм [1]

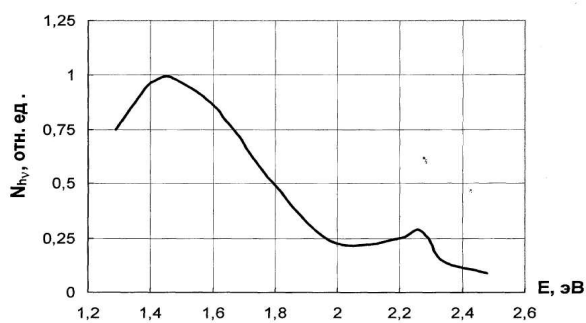


Рисунок 2 – Спектр предвзрывной люминесценции макрокристаллов AgN_3 [1]

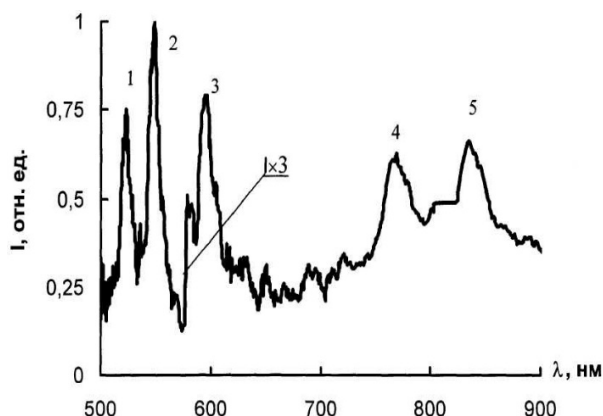


Рисунок 3 – Спектр свечения продуктов взрывного разложения макрокристаллов AgN_3 [1]

В работе [4] представлена еще одна попытка доказать цепную теорию детонации АТМ. На основании акустического сигнала, снимаемого с акустического датчика, установленного непосредственно на образце инициируемым лазером, рисунок 4. Так как часть свечения, опережающая появление акустического сигнала относится к недеформированному образцу и, может быть идентифицирована как предвзрывное свечение. В спектрах плазмы, образующейся в результате взрыва АТМ, идентифицируются линии металлов (серебро, таллий, свинец) и некоторые линии азота (рис. 5). Нужно отметить, что при спектральном разрешении в ~ 15 нм идентифицировать резонансные линии атомов невозможно. Во всех АТМ наблюдается также не идентифицированная линия в районе 770 нм. Спектры предвзрывного свечения, как и в работе [5], не удается описать формулой Планка, что свидетельствует о его нетепловом характере. Такой вывод подтверждается качественным характером спектра (особенно для азиды таллия, см. рис. 5а и характером кинетики) спад интенсивности сигнала перед появлением спектра плазмы (см. рис. 5б и 5в). Нетепловой характер предвзрывного свечения позволяет уверенно идентифицировать его как предвзрывную люминесценцию.

Выделены следующие свойства этой люминесценции, существенных для понимания ее природы и механизма взрывного разложения в целом.

Коротковолновая граница люминесценции во всех объектах лежит в области прозрачности. Попытки обнаружения более коротковолнового свечения с использованием более чувствительной аппаратуры не привели к успеху. Этот результат позволяет исключить процесс фоторазмножения из механизмов размножения дырок.

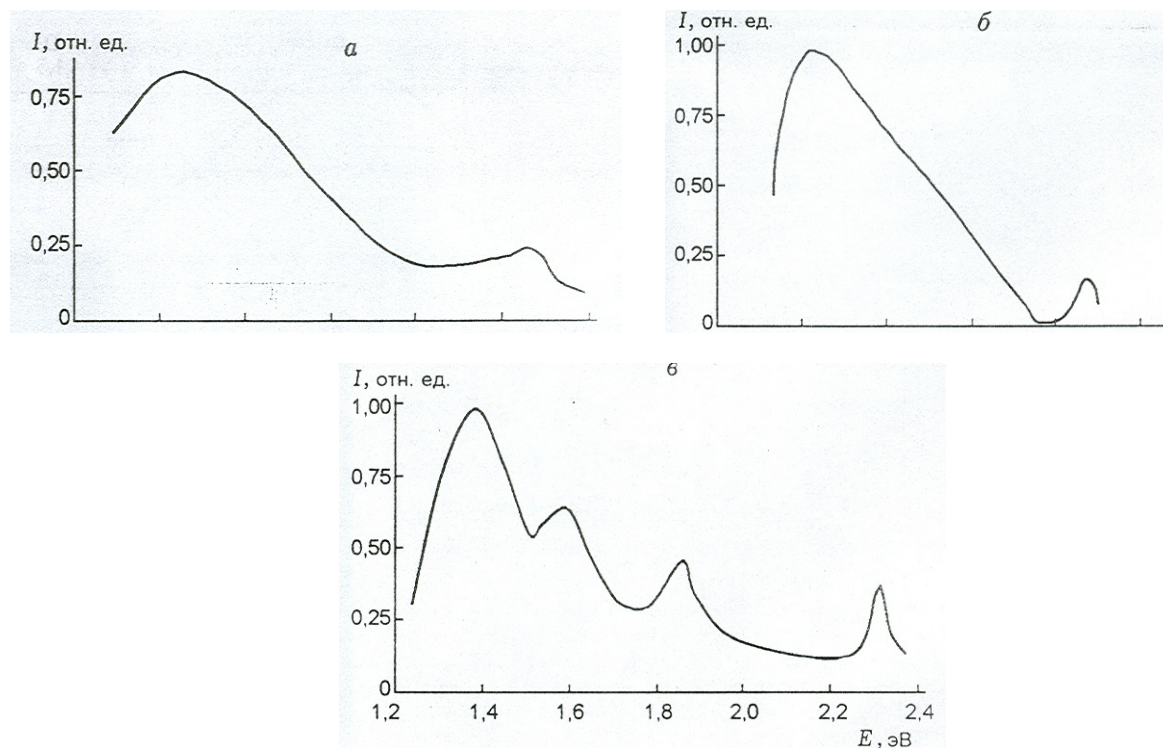


Рисунок 4 – Спектр свечения продуктов свечения взрыва АТМ: Инициирование импульсом ускорителя; а) AgN_3 , интенсивность линий участка спектра 580÷900нм увеличена в 3 раза, б) $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$, участок спектра 650÷900нм увеличен в 10 раз, в) TlN_3 , участок спектра 570÷900нм увеличен в 15 раз [9]

2. Значительная часть спектра предвзрывной люминесценции соответствует энергиям фотонов, превышающим термическую ширину запрещенной зоны АТМ ($\approx 1,5$ эВ). Следовательно, в данном случае имеет место горячая люминесценция.

3. Синхронные измерения предвзрывной проводимости и люминесценции показывают, что люминесценция наблюдается в области очень высоких концентраций зонных носителей заряда ($\approx 10^{20}$ см⁻³). Уже при значительно меньших концентрациях наблюдаются эффекты насыщения люминесценции, связанной с дефектами. Кроме того, при таких концентрациях становятся существенными процессы поглощения заряда зонными носителями.

4. В [5] было показано, что перед механическим разрушением образец частично плавится. Следовательно, предвзрывная люминесценция наблюдается при температуре, близкой к температуре плавления, при которой люминесценция обычно потушена.

В исследованиях взрывного разложения азидов тяжелых металлов (АТМ) [6] показано, что скорость детонационной химической реакции в

взрывчатом веществе (ВВ) может достигать порядков 10^3 м/с.

В работах [7-9] предлагается цепная теория процессов, реакция взрывного разложения АТМ запускается непосредственно во время воздействия иницирующего импульса. Далее идет период спада интенсивности катодолуминесценции (КЛ) связанный с протеканием конкурирующих процессов, заполнением ловушек, центров рекомбинации и размножением активных частиц (дырок). Время же протекания данных процессов, по оценки авторов, составляет ~ 100 нс [10].

Тепловая теория реакции в ВВ приводящая к взрыву рассматривается в [11-13]. Природа предвзрывной люминесценции подробно описана в [14] и доказывает, что все предыдущие исследования наблюдали совсем другое явление, а не ИКЛ. Благодаря расположению образца под углом в 45° на алюминиевой фольге можно отсеять, непосредственно ИКЛ, так как фольга непрозрачна для света и прозрачна для СЭП. Сравнение осциллограмм свидетельствует о том, что в первом случае (рис. 6б) наблюдается два пика свечения: пик ИКЛ и следующий, с задержкой

~0,2 мкс. Во втором случае ИКЛ не наблюдается, но наблюдается следующий пик, так как фольга разрывается продуктами взрывного разложения. Максимум последнего сдвигается на ~100 нс, поскольку продукты взрыва задерживаются на фольге. Исходя из полученных данных авторы считают, что в момент воздействия электронного пучка на образец возникает ИКЛ азида серебра с длительностью импульса электронного пучка (~25 нс). Далее следует индукционный период (~200 нс), в результате детонации образца в зоне облучения и прилегающей к ней области возникает плотный сгусток низкотемпературной плазмы. Облучение АТМ электронным пучком с пороговой плотностью энергии $H \geq 0,1$ Дж/см² приводит к формированию сильного электрического поля в зоне торможения СЭП и электрическому пробое образца. Электрический пробой реализуется в форме сверхзвуковых анодных разрядов, развивающихся со стороны облучаемой поверхности образца в область локализации отрицательного объемного заряда электронного пучка. Анодный разряд в диэлектриках (или стример в полупроводниках) представляет собой домен электрического поля размером 3–5 мкм,

распространяющийся со скоростью – 10^8 см/с. В результате за время – 10^{-11} с фронт стримера формирует горячую точку» объемом – 10^{-10} см³ сильно возбужденного вещества с концентрацией неравновесных носителей 10^{20} – 10^{22} см⁻³ и удельным энерговыделением 10^3 – 10^4 Дж/см³. Первичными являются электронно-дырочные процессы, развивающиеся на фронте ударной волны сверхзвукового анодного разряда. Затем, практически мгновенно, за фронтом стримера в результате рекомбинации неравновесных носителей заряда формируется горячая точка», из которой развивается очаг взрывного разложения. Наиболее сложным для качественного и количественного описания являются начальные процессы, развивающиеся на фронте ударной волны анодного разряда и прилегающей к нему переходной области канала, заполненной плотной плазмой [13].

Необходимо отметить тот факт, единственное, что не вызывает споров, это уменьшение индукционного периода ВВ с увеличением плотности энергии инициирующего электронного пучка и оценке пороговой плотности энергии пучка в $H=0,1$ Дж/см².

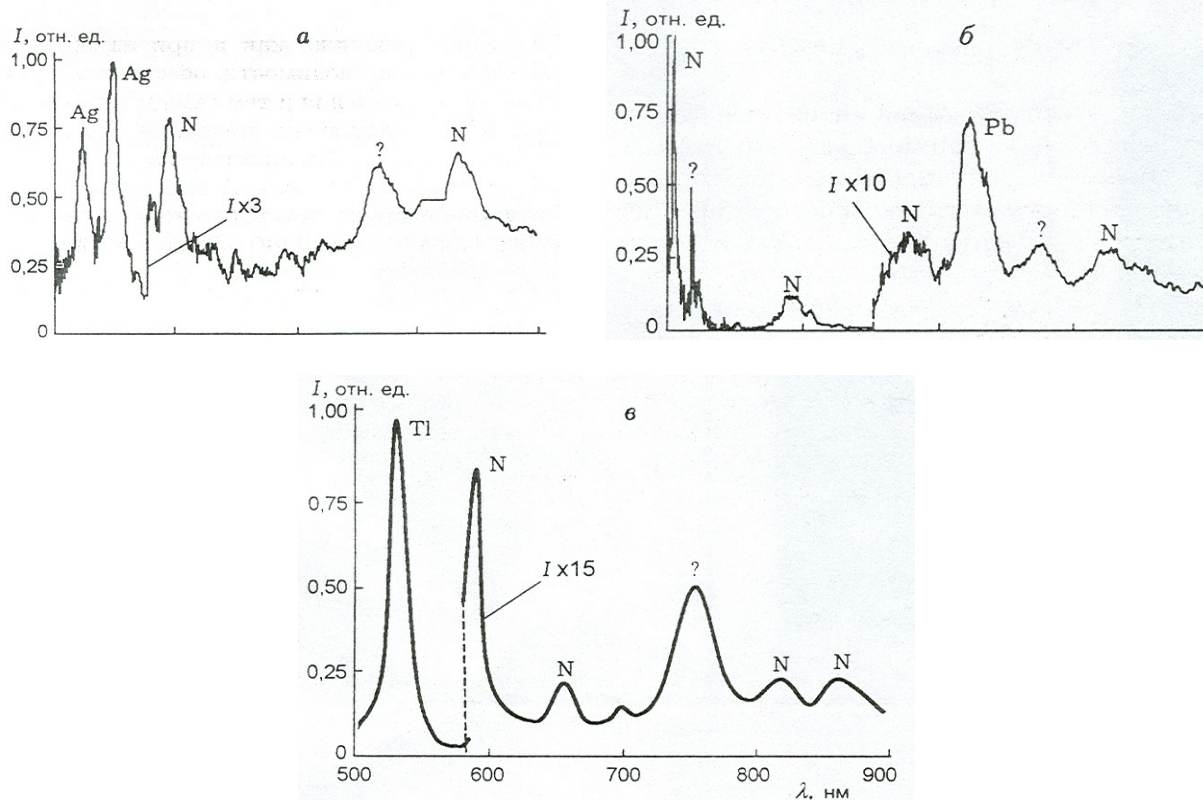


Рисунок 5 – Спектры предвзрывной люминесценции АТМ: а) AgN_3 , б) $Pb(N_3)_2$, в) TlN_3 [10]

Спектрально-кинетические характеристики тетранитратпентаэритрита

В работе [15], целью которой являлось обоснование «электроразрядной» гипотезы, доказана тепловая природа детонации ТЭНа при воздействии СЭП достаточной плотности энергии. Согласно данной теории, взрыв развивается из «горячих точек», роль которых выполняют каналы электрического пробоя. Основанием для этой гипотезы являлись косвенные экспериментальные результаты, полученные при исследовании физико-химических процессов, развивающихся в энергетических материалах [12-16], и данные по электрическому пробоя пассивных (не энергетических) диэлектриков под действием СЭП [17-19.]. При исследовании спектров взрывного свечения, необходимо достаточное спектральное разрешение системы регистрации, для точной и бесспорной идентификации спектров свечения продуктов взрывного разложения. Так например, в кандидатской диссертации автора [20] приводятся результаты исследования спектров взрывного свечения ТЭНа рисунок 7 и рисунок 8. Автор отметил, что спектр взрывного свечения возникает при взрыве образца в результате развития химической реакции, наблюдается сплошной спектр, на который накладывается линия свечения возбужденных молекул азота, однако очевидно, что при спектральном разрешении ~ 15 нм, легко ошибиться с выводами, и перепутать, например, уширенную резонансную линию примесного атома ВВс молекулярным спектром продуктов взрывного разложения.

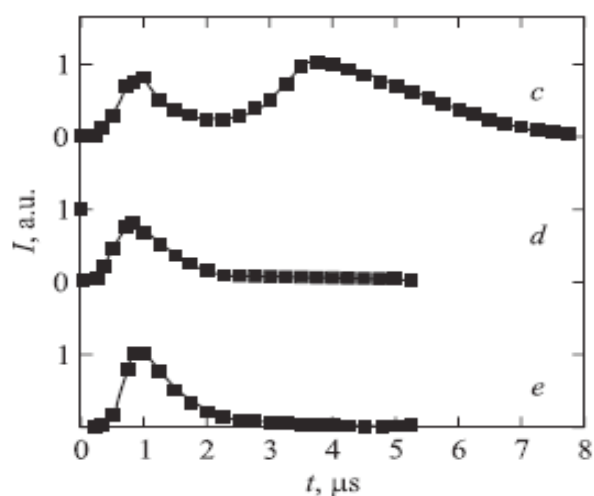


Рисунок 6 – Кинетика взрывного свечения азида серебра, $\lambda=600$ нм. Кинетики взрывного свечения: а – при панорамной съемки, б – при облучении со свободной стороны образца, в – при установке фольги [12]

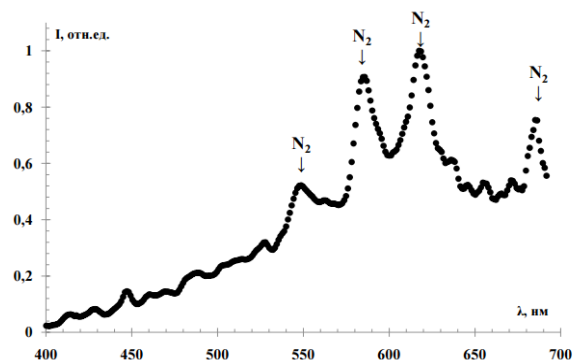


Рисунок 7 – Спектр свечения ТЭНа при взрыве для момента времени, соответствующего максимуму второго пика кинетики свечения, 850 нс [20]

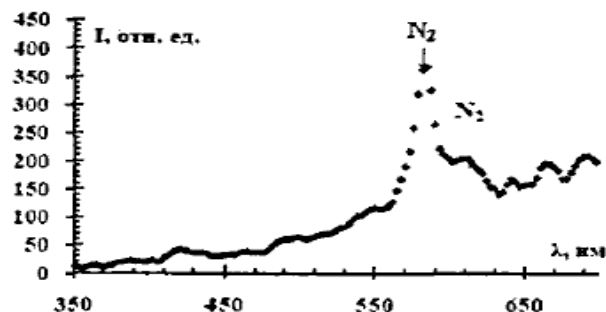


Рисунок 8 – Спектр разлетающихся продуктов взрыва монокристалла ТЭНа на 850 нс [20]

Заключение

Анализ экспериментальных работ, посвященных исследованию процесса инициирования энергетических материалов сильноточным электронным пучком позволяет сделать следующие выводы. Установлена физическая природа взрывного свечения и поглощения, сопровождающих взрывное разложение энергетических материалов при инициировании взрыва электронным пучком. Показано, что на пороге инициирования взрыва свечение энергетических материалов определяется двумя физическими процессами – импульсной *катодолюминесценцией* твердого тела, которая наблюдается только в момент импульса облучения и *свечением продуктов взрывного разложения (плазмы)*, которое формируется после индукционного периода. Применяемые ранее методики регистрации спектров взрыва энергетических материалов имели недостаточное спектральное разрешение, что не позволяло идентифицировать продукты взрывного разложения исследованных ВВ.

Литература

- 1 Адуев Б.П., Алукер Э.Д., Белокуров Г.М., Кречетов А.Г. Предвзрывная проводимость азидов серебра // Письма в ЖТФ. – 1995. – Т. 62. – С.203-204.
- 2 Адуев Б.П., Алукер Э.Д., Белокуров Г.М., Кречетов А.Г., Митрофанов А.Ю. Кинетика ранних стадий предвзрывной проводимости азидов серебра // ФГВ. – 2002. – №38. – С.141-144.
- 3 Крашенин В.И., Кузьмина Л.В., Захаров В.Ю. Физико-химические процессы, инициированные постоянным электрическим полем в нитевидных кристаллах азидов серебра // Журн. прикл. химии. – 1996. – №69. – С.21-24.
- 4 Адуев Б.П., Алукер Э.Д., Кречетов А.Г., Митрофанов А.Ю. Распространение цепной реакции взрывного разложения в кристаллах азидов серебра // ФГВ. – 2003. – №39. – С.104-106.
- 5 Адуев Б.П., Алукер Э.Д., Кречетов А.Г. Спектр предвзрывной люминесценции азидов серебра // Письма в ЖТФ. – 1996. – Т. 22. – С.24-27.
- 6 Адуев Б.П., Алукер Э.Д., Кречетов А.Г., Белокуров Г.М., Митрофанов А.Ю. Кинетика предвзрывной проводимости азидов серебра // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25. – С.44-48.
- 7 Адуев Б.П., Алукер Э.Д., Кречетов А.Г., Митрофанов А.Ю. Топография зарождения реакции взрывного разложения азидов серебра при инициировании импульсом электронного ускорителя // ФГВ. – 2003. – №39. – С.105-108.
- 8 Адуев Б.П., Алукер Э.Д., Кречетов А.Г. Дивакационная модель инициирования азидов тяжелых металлов // ФГВ. – 2004. – Т. 40. – С.95-99.
- 9 Адуев Б.П., Алукер Э.Д., Белокуров Г.М., Тупицын Е.В. Топография зарождения реакции взрывного разложения азидов серебра при инициировании импульсом электронного ускорителя // ФГВ. – 2005. – № 41. – С.116-118.
- 10 Адуев Б.П., Алукер Э.Д., Гречин С.С., Тупицын Е.В. Спектрально-кинетические характеристики продуктов взрывного разложения азидов серебра // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31. – С.7-11.
- 11 Корепанов В.И., Лисицын В.М., Олешко В.И., Ципилев В.П. Импульсная катодоллюминесценция азидов тяжелых металлов // Письма в ЖТФ. – 2002. – Т. 28. – С.48-52.
- 12 Олешко В.И., Корепанов В.И., Лисицын В.М., Ципилев В.П. О природе свечения, возникающего при облучении тетранитропентаэритрита электронным пучком // ФГВ. – 2007. – №43. – С.87-89.
- 13 Олешко В.И., Damamme G., Malys D., Лисицын В.М. Иницирование взрывного разложения азидов тяжелых металлов электрическим разрядом, индуцированным электронным пучком // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35. – С.55-61.
- 14 Олешко В.И., Корепанов В.И., Лисицын В.М., Ципилев В.П. О физической природе свечения и поглощения, сопровождающих взрывное разложение азидов тяжелых металлов // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30. – С.17-22.
- 15 Олешко В.И., Корепанов В.И., Лисицын В.М., Ципилев В.П. Электрический пробой и взрывное разложение монокристаллов тетранитрата пентаэритрита при облучении электронным пучком // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38. – С.37-43.
- 16 Олешко В.И., Корепанов В.И., Лисицын В.М., Ципилев В.П. // Забобахинские научные чтения: сборник материалов IX международной конференции. г. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ. – 2007. – С.58–59.
- 17 Лисицын В.М., Олешко В.И. Электрический пробой ПЦК при импульсном облучении // Письма в ЖТФ. – 1983. – №9. – С.15–18.
- 18 Олешко В.И., Штанько В.Ф. Механизм разрушения высокоомных материалов под действием мощных электронных пучков наносекундной длительности // ФТТ. – 1987. – Т.29(2). – С.320–324.
- 19 Олешко В.И. Пороговые процессы в твердых телах при взаимодействии с сильноточными электронными пучками // Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Томск, 2009. – 317.
- 20 Гречин С.С. Исследование спектрально-кинетических характеристик радиоллюминесценции и взрывного свечения тетранитропентаэритрита при инициировании импульсным пучком электронов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Кемерово / Кемеровский гос. университет, 2007. – 132 с.

References

- 1 B.P. Aduiev, E.D. Aluker, G.M. Belokurov, A.G. Krechetov, Techn. Phys. Lett., 62, 203-204, (1995). (in russ.)
- 2 B.P. Aduiev, E.D. Aluker, G.M. Belokurov, A.G. Krechetov, A.Y. Mitrofanov, SCF, 38, 141-144, (2002). (in russ.)
- 3 V.I. Krasheniny, L.V. Kuzmin, V.Y. Zakharov, Zhurn.prikl.himii, 69, 21-24, (1996). (in russ.)
- 4 B.P. Aduiev, E.D. Aluker, A.G. Krechetov, A.Y. Mitrofanov, SCF, 39, 104-106, (2003). (in russ.)
- 5 B.P. Aduiev, E.D. Aluker, A.G. Krechetov, Techn. Phys. Lett., 22, 24-27, (1996). (in russ.)
- 6 B.P. Aduiev, E.D. Aluker, A.G. Krechetov, G.M. Belokurov, A.Y. Mitrofanov, Technical Physics Letters, 25, 44-48, (1999). (in russ.)
- 7 B.P. Aduiev, E.D. Aluker, A.G. Krechetov, A.Y. Mitrofanov, SCF, 39, 105-108, (2003). (in russ.)
- 8 B.P. Aduiev, E.D. Aluker, A.G. Krechetov, SCF, 40, 95-99, (2004). (in russ.)
- 9 B.P. Aduiev, E.D. Aluker, G.M. Belokurov, E.V. Tupitsin, SCF, 41, 116-118, (2005). (in russ.)
- 10 B.P. Aduiev, E.D. Aluker, S.S. Grechin, E.V. Tupitsin, Techn. Phys. Lett., 31, 7-11, (2005) (in russ.)

- 11 V.I. Korepanov, V.M. Lisitsyn, V.I. Oleshko, V.P. Tsipilev, *Techn. Phys. Lett.*, 28, 48-52, (2002). (in russ.)
- 12 V.I. Oleshko, V.I. Korepanov, V.M. Lisitsyn, V.P. Tsipilev, *SCF*, 43, 87-89, (2007). (in russ.)
- 13 V.I. Oleshko, G. Damamme, D. Malys, V.M. Lisitsyn, *Techn. Phys. Lett.*, 35, 55-61, (2009) (in russ.)
- 14 V.I. Oleshko, V.I. Korepanov, V.M. Lisitsyn, V.P. Tsipilev, *Techn. Phys. Lett.*, 30, 17-22, (2004). (in russ.)
- 15 V.I. Oleshko, V.I. Korepanov, V.M. Lisitsyn, V.P. Tsipilev, *Techn. Phys. Lett.*, 38.37-43. (2012). (in russ.)
- 16 V.I. Oleshko, V.I. Korepanov, V.M. Lisitsyn, V.P. Tsipilev *Zababakhin scientific readings: a collection of materials IX international conference. Snezhinsk: Izd VNIITF*, 58-59. (2007). (in russ.)
- 17 V.M. Lisitsyn and V.I. Oleshko, *Techn. Phys. Lett.*, 9, 15-18, (1983). (in russ.)
- 18 V.I. Oleshko, V.F. Shtanko, *FTT*, 29, 320-324, (1987). (in russ.)
- 19 V.I. Oleshko, *Dis. ... Doctor. Sci. Sciences, Tomsk*, 2009. 317p. (in russ.)
- 20 S.S. Grechin, *Dis. ... Cand. Sci. Sciences, Kemerovo State. University*, 2007. – 132 p. (in russ.)