

## О ПРИРОДЕ СВЕЧЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ТЕТРАНИТРОПЕНТАЭРИТРИТА ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

В. И. Олешко, В. И. Корепанов, В. М. Лисицын, В. П. Ципилев

Томский политехнический университет, 634050 Томск, oleshko@tpu.ru

Представлены результаты исследований природы свечения, возникающего при возбуждении тетранитропентаэритрита электронным пучком со средней энергией электронов  $\approx 250$  кэВ и длительностью импульса тока 15 нс. Средняя за импульс плотность мощности пучка варьировалась в диапазоне  $10^6 \leq P \leq 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>. Показано, что при  $10^6 \leq P \leq 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> основным видом свечения является импульсная катодолюминесценция тэна. В преддетонационном режиме ( $P \approx 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>) на заднем фронте пика люминесценции формируется более инерционное свечение, идентифицированное как свечение продуктов взрывчатого превращения тэна, образующихся в области пробега электронного пучка. При  $P \geq 5 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> формируется дополнительный импульс свечения, связанный с образованием и разлетом плотной плазмы, возникающей в результате детонации всей массы образца.

Ключевые слова: тетранитропентаэритрит, импульсное инициирование, взрывное свечение.

В работе [1] впервые осуществлено инициирование взрыва прессованных образцов тетранитропентаэритрита (тэна) импульсным электронным пучком. Установлено, что после индукционного периода ( $\approx 100$  нс) в условиях свободного разлета плазмы наблюдается один пик взрывного свечения (ВС) с длительностью по основанию  $\approx 300$  нс. Этот импульс свечения интерпретирован как свечение продуктов взрывного разложения тэна. Позднее [2] были получены подобные экспериментальные результаты на монокристаллах тэна и измерены спектры ВС в области длин волн  $550 \div 1000$  нм. Исследования показали, что при регистрации свечения со стороны облучаемой поверхности тэна (монокристаллов и прессованных образцов) в условиях свободного разлета продуктов взрыва ВС состоит из двух пиков, спектры которых совпадают и являются сплошными. Первый и второй пики ВС длительностью 100 и 500 нс с максимумом вблизи 850 нм авторы [2] интерпретировали как люминесценцию тэна, возникающую в процессе развития реакции взрывного разложения и протекающую в твердой фазе до механического разрушения образца.

Целью настоящей работы является установление физической природы свечения, возникающего при облучении тэна мощным элект-

ронным пучком и определение момента фазового перехода образца из твердой фазы в плазменное состояние.

В отличие от [2] в настоящей работе при измерениях использовались схемы, позволяющие регистрировать не только люминесценцию твердой фазы, но и свечение продуктов взрывного разложения тэна с пространственным разрешением вне поверхности твердой фазы, как это описано в [3].

Объектом исследования служил порошкообразный тэн в виде таблеток, полученных прессованием под давлением  $10^9$  Па. Возбуждение образцов проводилось в вакуумной камере при давлении  $10^{-2}$  Па и температуре 300 К. Облучаемая поверхность тэна могла устанавливаться под углами 90 или 45° к электронному пучку. Геометрия возбуждения и регистрации ВС ( $\alpha = 45^\circ$ ) позволяла без пространственного разрешения одновременно регистрировать все виды свечения, инициируемого электронным пучком: и люминесценцию, и излучение плазмы в области, прилегающей к поверхности образца. Для измерения оптического пропускания продуктов взрывного разложения на заданном расстоянии  $L$  параллельно облучаемой поверхности тэна направлялся зондирующий пучок лазерного излучения. Регистрировалось изменение потока зондирующего излучения, прошедшего через плазму факела взрывного разложения, во времени после возбуждения образца. Для определения скорости разлета продуктов

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 06-03-32724).

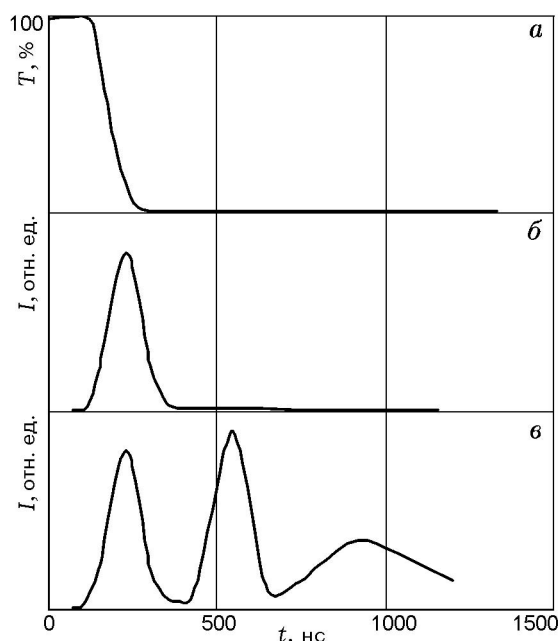


Рис. 1. Кинетика пропускания (*a*) и свечения (*б, в*) продуктов взрывного разложения тэна (геометрия возбуждения и регистрации  $\alpha = 90^\circ$ ):

*a, б* — при свободном разлете продуктов взрыва, *в* — при наличии двух преград

взрыва на их пути устанавливались преграды.

Кинетика оптического пропускания продуктов взрыва в зоне, отстоящей от облучаемой поверхности тэна на расстояние  $L = 0.2$  мм, представлена на рис. 1, *a*. Кинетики ВС ( $\lambda = 580$  нм), измеренные при свободном разлете продуктов взрывного разложения и при наличии двух преград (геометрия возбуждения и регистрации  $\alpha = 90^\circ$ ), приведены на рис. 1, *б, в* соответственно. Из приведенных осциллограмм следует, что инерционный пик ВС и поглощение формируются синхронно с задержкой  $\approx 120$  нс, что свидетельствует о появлении продуктов взрыва к этому моменту времени. Таким образом, инерционный пик ВС (второй пик ВС по терминологии [2]) обусловлен излучением продуктов взрывного разложения тэна, но не люминесценцией.

Для получения интегральной кинетики свечения, сопровождающего взрывное разложение тэна, была использована геометрия возбуждения и регистрации  $\alpha = 45^\circ$ . На рис. 2, *a–г* представлена кинетика свечения с облучаемой поверхности тэна при различных мощностях электронного пучка. Установлено, что при из-

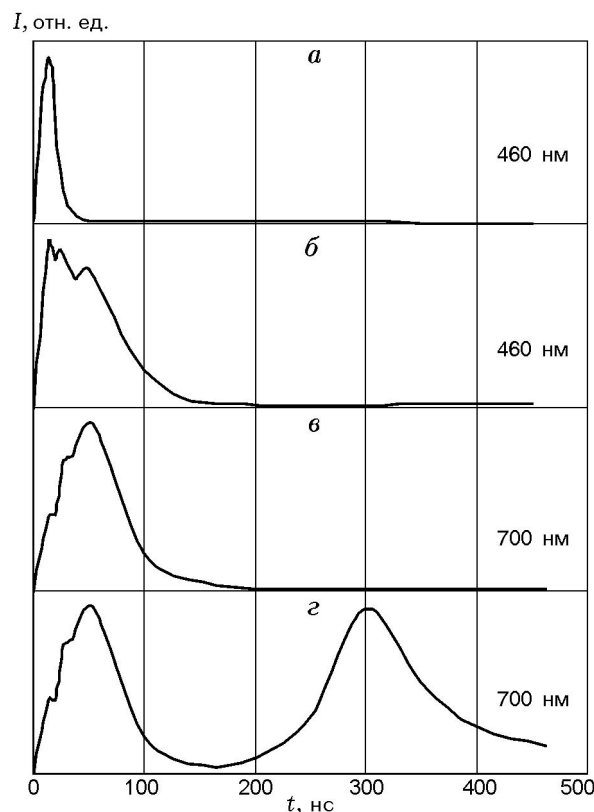


Рис. 2. Кинетика свечения, наблюдаемого из зоны облучения тэна (геометрия возбуждения и регистрации  $\alpha = 45^\circ$ ):

*a* —  $10^6 < P < 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>; *б, в* —  $P \approx 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>; *г* —  $P > 5 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>

менении мощности в диапазоне  $10^6 < P < 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> основным видом свечения является импульсная катодолюминесценция (ИКЛ) тэна (безынерционный пик свечения с фронтом нарастания  $\approx 13$  нс, рис. 2, *a*), о чем свидетельствуют спектрально-кинетические характеристики свечения и их совпадение с параметрами ИКЛ тэна, измеренными в [1]. На рис. 2, *б, в* представлена кинетика свечения, регистрируемого с облучаемой поверхности тэна в синей ( $\lambda_1 = 460$  нм) и красной ( $\lambda_2 = 700$  нм) областях спектра при ( $P \approx 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>). Видно, что при данной мощности электронного пучка происходит увеличение длительности импульса свечения за счет появления на заднем фронте ИКЛ ( $\lambda_1 = 460$  нм) дополнительного (более инерционного) свечения, имеющего тонкую структуру. Отметим, что при регистрации ВС на длине волны 700 нм интенсивность ИКЛ уменьшается и это приводит к изменению регистрируемой формы импульса с изменени-

ем положения максимума во времени (рис. 2, в). При  $P > 5 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> форма первого импульса ВС практически не изменяется и с задержкой 100 ÷ 150 нс формируется второй пик ВС (рис. 2, г). Появление второго пика ВС сопровождается интенсивной вспышкой, наблюдаемой во всем объеме вакуумной камеры, звуковым импульсом и механическим разрушением конструктивных элементов, что свидетельствует о детонации тэна.

Наиболее сложной является интерпретация свечения, имеющего тонкую структуру и появляющегося на заднем фронте ИКЛ в преддетонационном режиме облучения.

Специально проведенные исследования показали, что дополнительное к люминесценции свечение при плотности мощности электронного пучка, близкой к пороговой для инициирования детонации тэна, наблюдается в монокристаллах и прессованных образцах NaCl, CaF<sub>2</sub>, CdS и связано со свечением плазмы, образующейся в результате кумуляции энергии электронного пучка в микрообъемах вещества. На возможность плазмообразования в тэне при его облучении пучком, мощность которого значительно меньше пороговой, указывают газодинамические явления. Обнаружено, что при возбуждении тэна электронным пучком ( $P \approx 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>) продукты абляции вылетают из кратера навстречу электронному пучку со скоростью  $\approx 160$  м/с, в результате чего образец приобретает импульс в противоположном направлении ( $v \approx 1.5$  м/с,  $m = 75$  мг). Низкий порог возникновения газодинамических процессов в тэне и указанных выше инертных диэлектриках позволяет сделать предположение о том, что основная роль в газификации вещества принадлежит электрическому пробою, развивающемуся в поле инжектированно-

го объемного заряда пучка. Однако электро-разрядные процессы, развивающиеся при низких плотностях электронного пучка, недостаточны для обеспечения интенсивности плазменного свечения, сопоставимого с ИКЛ. При  $P \geq 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> интенсивность электроразрядных процессов нарастает, что приводит к химическому энерговыделению и формированию первого пика ВС. Ударная волна, которая образуется при этом, инициирует детонацию всей массы образца.

Таким образом, два последовательных взрыва (первый — в зоне пробега электронного пучка, максимум интенсивности свечения которого достигается через  $\approx 50$  нс после импульса возбуждения, второй — детонационный) формируют два пика ВС со сплошным спектром, связанные с излучением продуктов взрывчатого превращения тэна.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Корепанов В. И., Лисицын В. М., Олешко В. И., Ципилев В. П. Иницирование детонации тэна мощным электронным пучком // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29, вып. 16. С. 23–28.
2. Адуев Б. П., Белокуров Г. М., Гречин С. С., Тупицин Е. В. Взрывная люминесценция тетранитропентаэритрита, инициированная электронным пучком // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30, вып. 15. С. 91–95.
3. 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, вып. 22. С. 17–22.

*Поступила в редакцию 21/VII 2006 г.,  
в окончательном варианте — 22/I 2007 г.*