

05;10

## **Инициирование взрывного разложения азидов тяжелых металлов электрическим разрядом, индуцированным электронным пучком**

© В.И. Олешко, G. Damamme, D. Malys, В.М. Лисицын

Томский политехнический университет, Томск, Россия  
Commissariat a l'energie atomique, 75015, Paris, France  
E-mail: oleshko@tpu.ru

Поступило в Редакцию 23 апреля 2009 г.

Представлены результаты экспериментального исследования взрывного разложения азидов тяжелых металлов под действием электрических („стримерных“) разрядов, индуцированных электронным пучком наносекундной длительности. Предложена физическая модель инициирования азидов тяжелых металлов электронным пучком, включающая формирование сильного электрического поля в образце и его нейтрализацию сверхзвуковыми анодными разрядами. Фронт стримера генерирует в конденсированном реакционноспособном веществе „горячие точки“, из которых формируются очаги взрывного разложения.

PACS: 78.60.-b

Механизм взрывного разложения азидов тяжелых металлов (АТМ) при инициировании сильноточным электронным пучком (СЭП) наносекундной длительности до сих пор остается не ясным. Диссипация энергии СЭП в диэлектриках и полупроводниках сопровождается широким спектром физических процессов (формированием сильных механических и электрических полей, генерацией электронно-дырочных пар и др. [1–3]), выделить из которых первичный, обеспечивающий начало взрывного разложения АТМ, представляет сложную задачу. В последнее время для объяснения механизма инициирования АТМ электронными и лазерными пучками стали привлекаться цепные модели, которые ключевую роль отводят электронным возбуждениям (свободным электронам, дыркам и экситонам), образующимся в твердом теле при облучении [4–5]. Однако отказ от тепловой модели

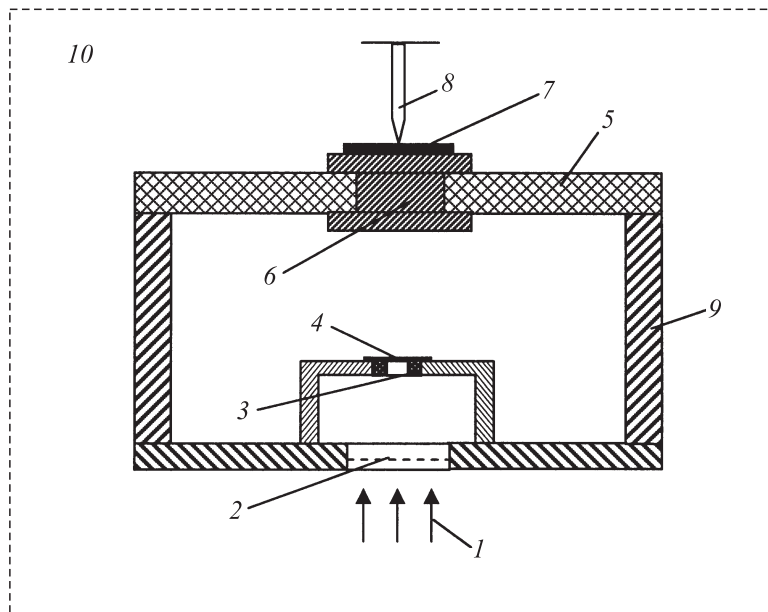
иницирования АТМ внешним энергетическим импульсом, в основе которой лежит представление о концентрации энерговыделения в твердом теле и формировании „горячих точек“, представляется нам не обоснованным [6,7]. Анализ фундаментальных процессов, протекающих в диэлектриках и полупроводниках при облучении СЭП, позволяет предположить, что наиболее вероятным процессом, который может привести к образованию начального теплового очага взрыва в АТМ, является электрический пробой в поле инжектированного объемного заряда электронного пучка.

В данном сообщении приведены результаты экспериментального исследования инициирования взрывного разложения АТМ электрическим разрядом, формируемым с помощью электронного пучка наносекундной длительности.

Получить экспериментальные доказательства развития электрического пробоя в зоне торможения электронного пучка в АТМ по морфологии разрушения или свечению каналов электрического пробоя, как это имеет место в пассивных материалах [2,3], не представляется возможным, так как образец исчезает в результате взрыва. Поэтому для выяснения роли электроразрядных процессов в инициировании взрывного разложения АТМ, возбуждаемых электронным пучком, применялась схема формирования импульсов электрического поля, приведенная на рис. 1.

Исследуемый образец АТМ (прессованные под давлением  $10^6$  Па таблетки  $\text{AgN}_3$ ,  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ , диаметром 3–5 мм и толщиной  $\sim 400 \mu\text{m}$ , или монокристалл  $\text{AgN}_3$ ) располагался между электродами 6 и 8. Один из электродов 6 („потенциальный“) представлял собой плоскую свинцовую пластинку, которая крепилась на диэлектрической подставке 5 из полиметилметакрилата. Второй электрод 8, имеющий вид иглы, находился под потенциалом „земли“. Импульсное электрическое поле с параметрами (амплитуда и фронт нарастания), близкими к реализующимся в зоне торможения электронного пучка ( $E \sim 10^6$  V/cm,  $dE/dt \sim 10^{14}$  V(cm · s)), создавали путем зарядки потенциального электрода СЭП. Толщина электрода составляла 5 мм и значительно превышала длину пробега электронного пучка. Средняя энергия электронного пучка  $\sim 300$  keV, длительность импульса  $\sim 15$  ns, плотность энергии варьировалась в диапазоне 0.01–0.5 J/cm<sup>2</sup>.

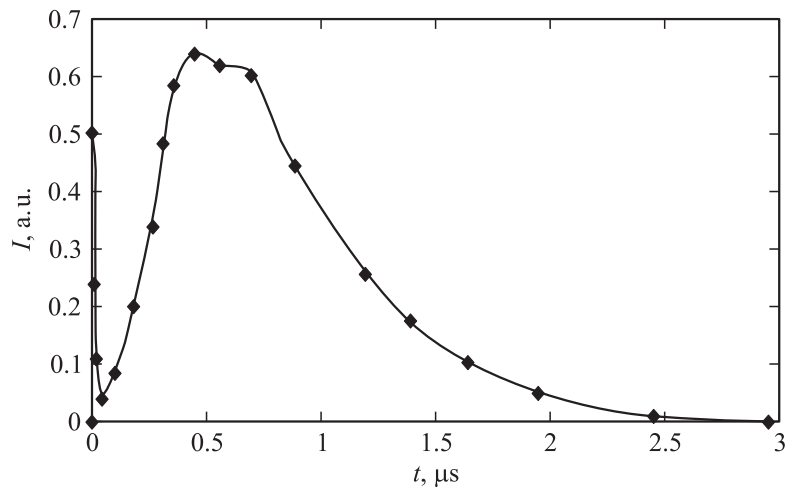
Изображение образца и прилегающей к нему области проецировалось с помощью объектива на входную щель монохроматора МДР-23.



**Рис. 1.** Схема инициирования взрывного разложения АТМ электрическим разрядом, формируемым зарядкой потенциального электрода СЭП: 1 — электронный пучок, 2 — анод, 3 — диафрагма, 4 — фольга ( $\text{Al}$ ,  $d = 10 \mu\text{m}$ ), 5 — диэлектрический держатель, 6 — электрод „потенциальный“ ( $\text{Pb}$ ,  $d = 5 \text{mm}$ ), 7 — образец АТМ, 8 — электрод „нулевой“ (корпус), 9 — держатель, 10 — вакуумная камера.

Оптический сигнал поступал на ФЭУ-118 и регистрировался с помощью запоминающего осциллографа TDS 2014. Измерительная ячейка находилась в вакуумной камере при давлении  $\sim 10^{-2}$  Па.

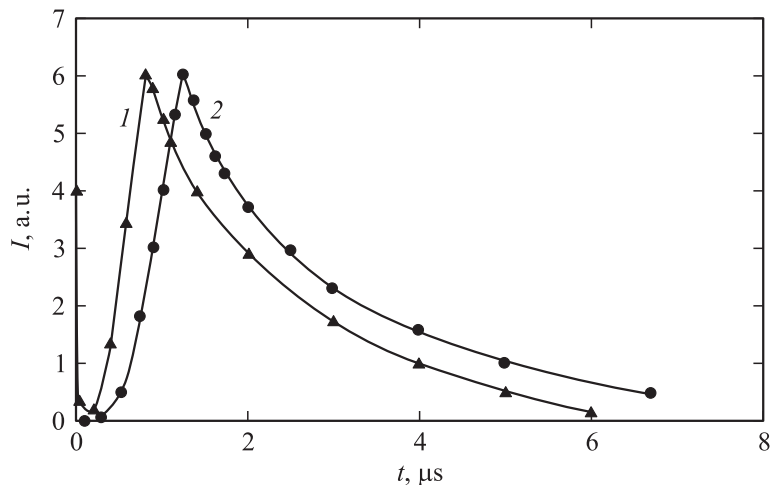
Установлено, что зарядка потенциального электрода электронным пучком с плотностью энергии  $H \geq 0.2 \text{J/cm}^2$  инициирует взрыв образца. О том, что произошел взрыв, свидетельствовали вспышка взрывного свечения, резкое уменьшение давления в вакуумной камере, формирование эрозионного пятна на поверхности свинцовой пластинки. Кинетика взрывного свечения ( $\lambda = 600 \text{nm}$ ) прессованного образца  $\text{AgN}_3$  представлена на рис. 2. Первый пик свечения возникает синхронно



**Рис. 2.** Кинетика взрывного свечения прессованного образца  $\text{AgN}_3$  при инициировании анодным разрядом, формируемым зарядкой потенциального электрода СЭП ( $H = 0.2 \text{ J/cm}^2$ ,  $d = 400 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 600 \text{ nm}$ ).

с импульсом электронного пучка и, очевидно, связан со свечением АТМ в результате возбуждения электрическим разрядом. Подобные кинетические характеристики свечения наблюдаются при возбуждении стримерных разрядов в  $\text{CdS}$  электрическим полем, формируемым СЭП в этой же схеме возбуждения [8]. Второй пик обусловлен свечением продуктов взрыва, возникающим с задержкой 70–100 ns относительно первого.

Обнаружено, что длительность индукционного периода и инерционного пика взрывного свечения, при инициировании взрывного разложения АТМ в схеме возбуждения рис. 1 меньше, чем длительность взрывного свечения, наблюдаемого при инъекции СЭП в образец на пороге взрыва рис. 3. Одной из возможных причин уменьшения времени взрывного разложения АТМ является высокая скорость распространения анодного разряда в диэлектриках и полупроводниках, которая, согласно [9,10], может достигать  $\sim 10^8 \text{ cm/s}$ . По-видимому, стример формирует большое количество „горячих точек“ в канале электрического пробоя, развивающегося между электродами 6 и 8,



**Рис. 3.** Кинетика взрывного свечения прессованного  $\text{AgN}_3$  при инициировании взрыва инъекцией СЭП в образец ( $H = 0.1 \text{ J/cm}^2$ ,  $d = 400 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 600 \text{ nm}$ ): 1 — со стороны облучаемой поверхности, 2 — с необлучаемой поверхности образца.

практически мгновенно. Время развития химической реакции в этом случае будет определяться двумя процессами: скоростью слияния очагов, формируемых стримером в образце, и условиями развития реакции взрывного разложения в радиальном, относительно канала электрического пробоя, направлении.

При инициировании взрывного разложения АТМ инъекцией электронного пучка в образец ( $H \sim 0.1 \text{ J/cm}^2$ ) химическая реакция начинается с облучаемой поверхности и распространяется по направлению к тыльной грани образца. В этом случае процесс протекает в условиях газодинамической разгрузки со стороны облучаемой электронным пучком поверхности, что, по-видимому, и является главной причиной низкой  $\sim 1000 \text{ m/s}$  (до звуковой) скорости распространения процесса взрывного разложения в АТМ, измеренной в [11].

Экспериментально установлено, что пороговая плотность энергии электронного пучка, инициирующего взрыв  $\text{AgN}_3$  в схеме рис. 1, составляет  $H \sim 0.2 \text{ J/cm}^2$ . Поскольку, согласно ранее проведенным исследова-

ниям [8], КПД преобразования энергии СЭП в энергию электрического поля составляет 1–10%, то энергетический порог инициирования взрыва АТМ электрическим разрядом находится в диапазоне 0.002–0.02 J. Низкий порог инициирования АТМ электрическим разрядом в схеме рис. 1, по сравнению с инициированием взрыва прямой инжекцией электронного пучка в образец, объясняется кумуляцией энергии электрического поля вблизи иглового электрода. В этих условиях возбуждения, как показали исследования электрического пробоя инертных материалов, формируется один канал электрического пробоя, радиус которого на порядок превышает радиусы многочисленных микроканалов пробоя, образующихся в зоне торможения электронного пучка.

Учитывая известные сведения о формировании и распространении электрических разрядов в твердых телах в электрическом поле электродов [9–10], а также экспериментальные данные по электрическому пробоя диэлектриков и полупроводников под действием сильноточных электронных пучков наносекундной длительности [2,3,8], можно предположить следующую последовательность стадий взрывного разложения АТМ при инициировании взрыва СЭП.

Облучение АТМ электронным пучком с пороговой плотностью энергии  $H \geq 0.1 \text{ J/cm}^2$  приводит к формированию сильного электрического поля в зоне торможения СЭП и электрическому пробоя 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  $\mu\text{m}$ , распространяющийся со скоростью  $\sim 10^8 \text{ cm/s}$ . Локальная напряженность поля перед „головкой“ стримера в твердом теле достигает величины  $10^7 \text{ V/cm}$ , что приводит к развитию туннельного эффекта и размножению неравновесных носителей заряда [9]. В результате за время  $\sim 10^{-11} \text{ s}$  фронт стримера формирует „горячую точку“ объемом  $\sim 10^{-10} \text{ cm}^3$  сильно возбужденного вещества с концентрацией неравновесных носителей  $10^{20} - 10^{22} \text{ cm}^{-3}$  и удельным энерговыделением  $10^3 - 10^4 \text{ J/cm}^3$ .

Предложенную выше физическую модель инициирования АТМ сильноточным электронным пучком следует рассматривать как первое приближение. Модель включает отдельные элементы деформационной [12], цепной и тепловой моделей. А именно, 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.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-08-00153).

## Список литературы

- [1] *Вайсбурд Д.И., Балычев И.Н.* // Письма в ЖЭТФ. 1972. Т. 15. № 9. С. 537–540.
- [2] *Лисицын В.М., Олешко В.И.* // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. В. 1. С. 15–18.
- [3] *Олешко В.И., Штанько В.Ф.* // ЖТФ. 1986. Т. 56. В. 6. С. 1235–1236.
- [4] *Кригер В.Г., Каленский А.В.* // Хим. физика. 1995. Т. 14. № 4. С. 152–160.
- [5] *Адуев Б.П., Алукер Э.Д., Белокуров Г.М., Кречетов А.Г.* // Письма в ЖЭТФ. 1995. Т. 62. № 3. С. 203–204.
- [6] *Олешко В.И., Корепанов В.И., Лисицын В.М., Ципилев В.П.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. № 22. С. 17–22.
- [7] *Корепанов В.И., Лисицын В.М., Олешко В.И., Ципилев В.П.* // ФГВ. 2004. Т. 40. № 5. С. 126–128.
- [8] *Олешко В.И.* Дис. . . канд. физ-мат. наук. Томск, 1999. С. 202.
- [9] *Басов Н.Г., Молчанов А.Г., Насибов А.С., Обидин А.З.* и др. // ЖЭТФ. 1976. Т. 70. № 5. С. 1751–1761.
- [10] *Вершинин Ю.Н.* Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 259 с.
- [11] *Алукер Э.Д., Адуев Б.П., Белокуров Г.М., Тупицин Е.В.* // ФГВ. 2005. Т. 41. № 2. С. 116–118.
- [12] *Лисицын В.М., Журавлев Ю.Н., Олешко В.И., Федоров Д.Г.* и др. // Химия высоких энергий. 2006. Т. 40. № 4. С. 259–264.