

10

## Экспериментальные исследования возбуждения сходящейся волны плотности в цилиндрическом аноде сильноточного диода

© А.С. Адаменко, С.В. Адаменко, Е.В. Буляк

Лаборатория электродинамических процессов „Протон-21“

Поступило в Редакцию 20 августа 2004 г.

В окончательной редакции 30 декабря 2004 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований возбуждения волны плотности при облучении цилиндрического анода короткоимпульсным сильноточным потоком электронов в релятивистском вакуумном диоде. Обнаружено, что в условиях эксперимента траектории электронов практически нормальны боковой поверхности цилиндрического анода, расположенного соосно с катодом. В результате разряда поверхностный слой анода остается без видимых изменений, в то время как внутренняя часть сплошного анода испаряется. Использование коаксиальных анодов, состоящих из стержня, на который плотно посажена трубка, позволило прояснить механизм возбуждения изотропной волны. Наиболее правдоподобно, что электронный пучок вызывает схлопывание приповерхностного слоя анода.

Для экспериментов по концентрации энергии в твердом теле в лаборатории создан импульсный релятивистский диод с игольчатыми электродами со специфическим характером электронного потока у анода. Электронный поток формируется таким образом, что направление траекторий электронов у цилиндрического анода практически нормально к боковой поверхности анода, что зарегистрировано несколькими методами по распределению высокоэнергетичной части спектра тормозного излучения.

Основные параметры электронного пучка:

Энергия электронов	250 . . . 500 keV;
Длительность импульса на полувысоте	5 . . . 20 ns;
Ток пучка	20 . . . 70 kA;
Плотность тока на аноде	$10^5 \dots 10^7$ A/cm <sup>2</sup> .

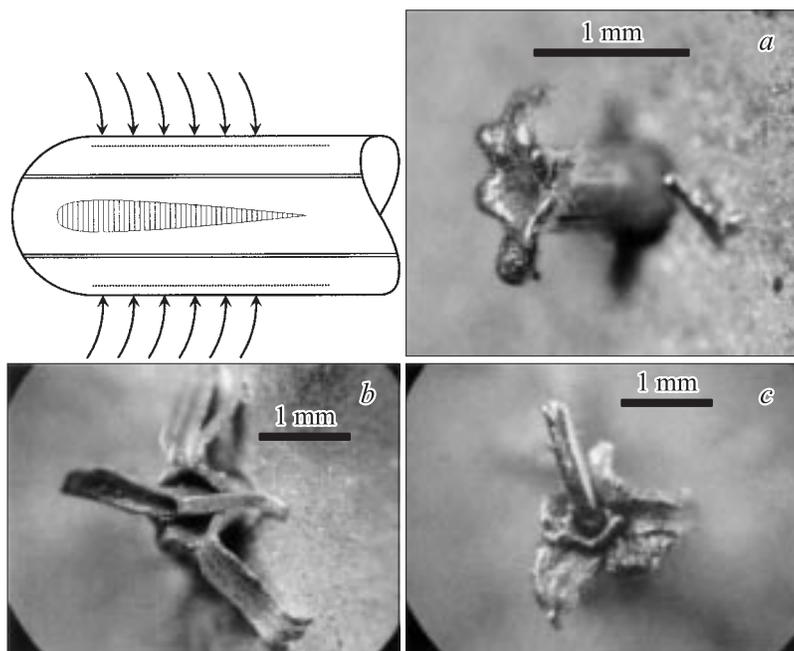
Эксперимент проводился следующим образом. На оси диода устанавливался цилиндрический анод. Поток ускоренных электронов фокусировался на цилиндрическую поверхность анода у его острия в относительно узкий пояс с мгновенной шириной порядка нескольких десятков микрометров.

В результате разряда анод разрушался характерным образом: наружная поверхность анода, на которую падал поток ускоренных электронов, испытывала минимальные изменения. Максимальная концентрация тепловой энергии приходилась на околоосевую область анода.

На комбинированных анодах, представляющих собой коаксиальную конструкцию, состоящую из центрального керна, на который плотно посажен внешний металлический цилиндр, характер разрушений несколько отличается: кроме осевой области высокотемпературного воздействия, которая в комбинированных анодах была меньше по объему по сравнению с однородными, наблюдается отщепление наружу лепестков внешней оболочки анода. Характер этого отщепления существенно не зависел от того, состоял ли анод из разнородных или одинаковых материалов, был ли внутренний керн сплошным или пустотелым.

Схема эксперимента и фотографии анодов после разряда представлены на рис. 1. На схеме (рис. 1, *a*) стрелками показаны траектории электронного потока у поверхности края цилиндрического анода, обращенного к катоду; двоянные линии показывают стык внешнего цилиндра и внутреннего керна в случае комбинированных анодов; заштрихованная область на оси — место наибольшего выделения энергии.

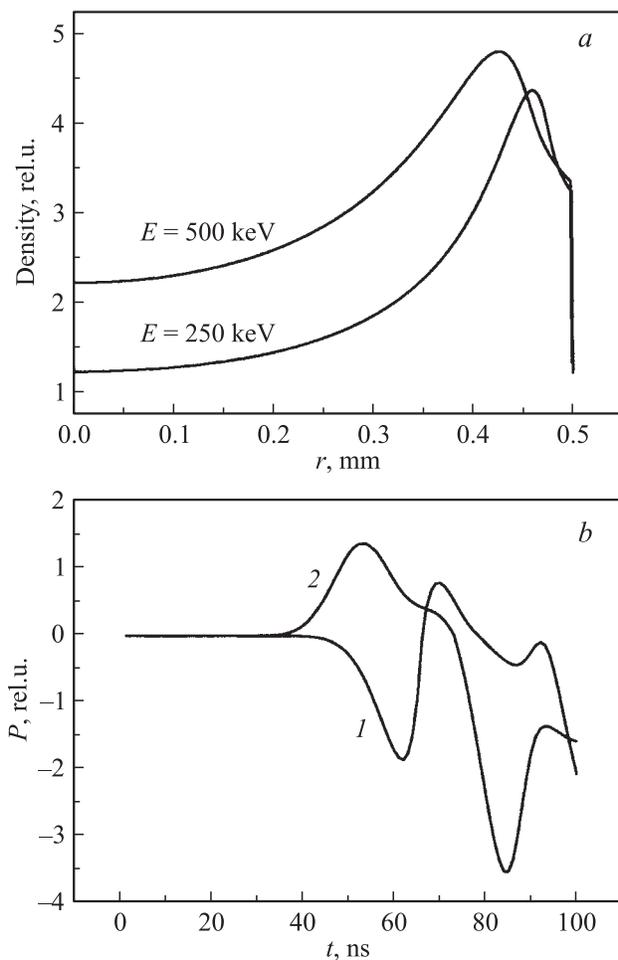
Были использованы аноды из различных металлов, как однородные, так и комбинированные с сохранением осевой симметрии, диаметром от 100 до 2000  $\mu\text{m}$ . Аноды, облучаемые снаружи, „взрывались“ изнутри, как это показано на фотографиях (рис. 1, *a–c*). Толщина образовавшихся анодных лепестков составляла от 100 до 300  $\mu\text{m}$ . Металл наружной поверхности лепестков не претерпевал существенных изменений, в то время как внутренняя поверхность носила явные следы высокотемпературного воздействия. В однородных анодах осевой объем испытывал наибольший энергетический вклад, часть этого объема улетучивалась (рис. 1, *a*). При использовании коаксиальных комбинированных анодов, состоящих как из идентичных металлов (наружная оболочка обжималась вокруг внутреннего стержня, рис. 1, *b*), так и из разнородных (рис. 1, *c*), всегда наблюдалось отщепление внешнего коаксиала по поверхности раздела.



**Рис. 1.** Схема эксперимента и образцы анодов после высоковольтного разряда (длительность импульса 8...10 ns, максимальный ток пучка 30...50 kA, расчетное пиковое напряжение 350...450 kV): *a* — однородный медный анод диаметром 0.5 mm; *b* — комбинированный медный анод диаметром 0.6 mm с внутренним керном 0.2 mm; *c* — комбинированный анод с внешней медной оболочкой диаметром 0.5 mm и внутренним никелевым керном 0.2 mm.

В эксперименте реализуются условия, при которых длительность импульса облучения была примерно равна длительности акустического импульса:  $\tau \approx R/V$  ( $R$  — радиальная проекция длины пробега электронов в аноде,  $V$  — продольная скорость звука).

Действительно, распределение плотности энерговклада (плотности траекторий электронов) в приповерхностном слое анода, как показывают наши расчеты (рис. 2, *a*), обусловленное упругим многократным рассеянием электронов на ядрах материала анода, имеет максимум на глубине 30...70  $\mu\text{m}$  (для медного анода радиусом 0.5 mm, для которого



**Рис. 2.** *a* — радиальный профиль плотности траекторий электронов в медном цилиндре радиусом 0.5 mm. Учтено только упругое рассеяние. *b* — эволюция волн, порождаемых имплозией и эксплозией.

эффекты проявляются наиболее полно). Вклады эффектов торможения коллективным электрическим полем и неупругого рассеяния нами не оценивались, но можно утверждать, что эти эффекты приведут только к

дальнейшему уменьшению глубины проникновения электронов. Уменьшение угла падения электронов также приводит к уменьшению глубины положения максимума.

Таким образом, согласно оценкам, отличительные особенности процесса заключаются в следующем:

1. Расстояние от поверхности анода до области максимального выделения тепла оказывается, по крайней мере, в три раза больше, чем до максимума энерговыклада электронного пучка.

2. Акустическая длительность импульса — отношение ширины энерговыклада в теле анода к продольной скорости звука — оказывается примерно равным длительности электронного потока.

3. Время тепловой релаксации (выравнивание температуры электронной и ионной подсистем поверхностного слоя анода) оказывается больше, чем акустическая длительность импульса (см. [2]).

Сравнение этих оценок с результатами эксперимента позволяет сделать следующее заключение. Энергия, содержащаяся в электронном потоке, передается объему с максимальным энерговыкладом опосредованно, через волну плотности. Волна плотности на расстоянии в несколько своих длин от начального положения распространяется без выделения тепла (квазиизотропийно). Волна порождается неабляционным механизмом, поскольку процесс абляции обусловлен передачей энергии от первично возбуждаемой электронной подсистемы ионной, что требует достаточно большого времени [2].

Существует по меньшей мере две гипотезы, которые могут описать неабляционный механизм зарождения волн плотности. Так, в работе [3] предполагается, что интенсивный короткоимпульсный пучок „разогревает“ электроны проводимости, часть из которых покидает поверхностный слой металла. В результате в этом слое нарушается баланс зарядов (плотность положительных ионов кристаллической решетки становится больше плотности электронов проводимости), наступает кулоновский взрыв. Можно также предположить, что при некоторых условиях магнитное поле потока электронов „замораживает“ электроны проводимости. Тогда к этим электронам добавляются электроны пучка, отрицательных зарядов становится больше, чем положительных, что может привести к кулоновской имплозии (схлопыванию) поверхностного слоя анода.

От области имплозии в противоположные стороны распространяются импульсы разрежения, за которыми следуют импульсы сжатия.

И наоборот, при взрыве (эксплозии) первыми будут распространяться импульсы сжатия. Поэтому если на пути пары импульсов, распространяющихся к оси цилиндра, находится разрыв однородности (механический стык), то в случае имплозии наружный слой будет оторван от керна, в случае эксплозии — приварен (рис. 2, *b*).

Таким образом, результаты работы сводятся к следующему. При облучении цилиндрического анода интенсивным короткоимпульсным сходящимся потоком релятивистских электронов возбуждается сходящаяся волна, которая переносит энергию без заметных потерь на расстояние в несколько собственных начальных длин. Характер разрушений в комбинированных анодах дает основание предположить, что переносимый энергию импульс порождается благодаря кулоновской имплозии поверхностного слоя анода.

## Список литературы

- [1] Судьенков Ю.В., Павлишин А.И. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 12. С. 14–20.
- [2] Быков В.М., Вайсбурд Д.И., Чебодаев М.И., Чернов А.В. // ЖТФ. 2004. Т. 74. В. 4. С. 77–81.
- [3] Рухадзе А.А., Юсупалиев У. // ЖТФ. 2004. Т. 74. С. 127–128.