

## НАГРЕВ ТОНКИХ ФОЛЬГ СИЛЬНОТОЧНЫМ ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОНОВ

*С.Л.Боголюбский, Б.П.Герасимов, В.И.Ликсонов,*

*Ю.П.Попов, Л.И.Рудаков, А.А.Самарский*

*В.П.Смирнов, Л.И.Уруцкоев*

При облучении тонких анодных фольг (10 – 30 мкм, золото) сфокусированным пучком релятивистских электронов был обнаружен аномально большой нагрев фольг, превышающий на порядок величины энерговклад, вычисленный в одночастичном приближении. Наблюденный эффект объясняется увеличением времени пребывания электронов в плазме фольги благодаря действию магнитного поля сильноточного диода.

При изучении ускорения фольг сфокусированным в диоде пучком электронов на установке "Тритон" [1, 2] было установлено, что энерговклад в фольгу слабо зависел от толщины  $d$ , даже при  $d \ll r_0$  ( $r_0$  – классический пробег электронов в веществе фольги). Ток пучка в описыва-

емых экспериментах составляла 120 кэВ, энергия электронов - 500 кэВ, длительность импульса на полувывсоте 30 нсек, плотность тока 2 мА/см<sup>2</sup>. Исследуемая вакуумно плотная фольга из золота или платины толщиной от 5 до 30 мк закрывала отверстие (φ 3 мм) в массивном диоде. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

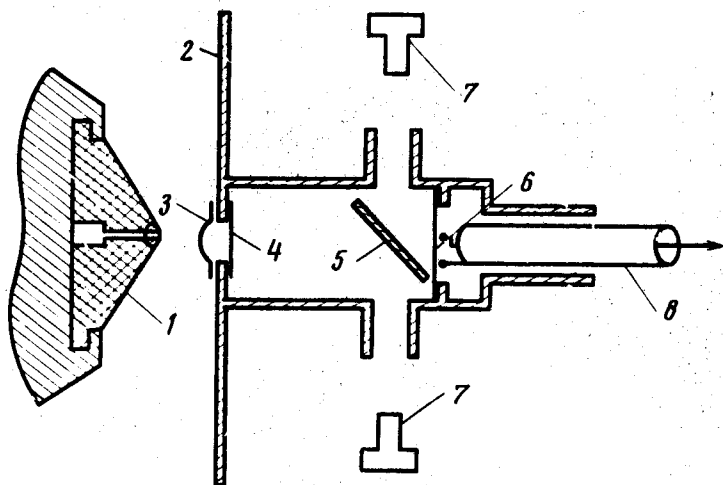


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 - полиэтиленовый катод ускорителя, 2 - анодная пластина, 3 - золотая фольга, 4 - полиэтиленовая фольга, 5 - съемная преграда из фольги, 6 - подвижной поршень баллистического калориметра, 7 - регистрирующие ФЭУ, 8 - двойной электрический зонд

При нагреве фольга взрывалась и золотая плазма влетала в баллистический калориметр, расположенный за анодом. Калориметр имел цилиндрическую форму с подвижным торцом, который перемещался под действием давления плазмы и замыкал двойной электрический зонд. Как было установлено, стенки калориметра не испарялись под действием прошедшего за фольгу пучка, и давление в калориметре определялось только энергосодержанием золотой плазмы.

Энергия, поглощенная фольгой, находилась из соотношения

$$\epsilon = \frac{2MV_0}{S(\gamma_{eff} - 1)t_{eff}^2} l_{пр},$$

где  $V_0$  - объем калориметра,  $M$  и  $S$  - масса и площадь поршня,  $\gamma_{eff}$  - показатель адиабаты,  $t_{eff}$  - эффективное время действия давления,  $l_{пр}$  - расстояние между поршнем и зондом.

Величина энергии, оцененная из типичной осциллограммы, показанной на рис. 2, а, составляла 600 дж или 50% от полной энергии пучка. Это более, чем в десять раз превосходит энергию, полученную в результате расчета по методу Монте-Карло с учетом углового разброса скоростей в сфокусированных пучках.

Нагрев фольги определялся также по скорости расширения плазмы, измеряемой с помощью регистраторов световых потоков (СФР, ФЭУ,

ФЭК) и двойных электрических зондов. Исследовалось свечение плазмы при пролете мимо щели или соударении ее с преградой из алюминиевой фольги. Для тонких фольг можно было наблюдать свечение за преградой после ее прорыва потоком плазмы. Приход плазмы, вызывающей замыкание электродов, регистрировался электрическими зондами. Для устранения неопределенности световых измерений, связанной с неизвестным распределением свечения расширяющейся плазмы, в большей части экспериментов на расстоянии 1 мм от анодной фольги размещалась полиэтиленовая фольга с толщиной  $d_{(\text{CH}_2)_n} = 10 \div 60$  мкм. Основная часть экспериментов выполнена при  $d_{(\text{CH}_2)_n} = 10$  и 30 мкм. Типичные осциллограммы зондовых и световых сигналов приведены на рис. 2. Скорость золота достигает  $7,5 \cdot 10^5$  для  $d_{\text{Au}} = 10$  мкм и  $d_{(\text{CH}_2)_n} = 30$  мкм и  $(5,5 \div 6,0) \cdot 10^5$  см/сек для  $d_{\text{Au}} = 5$  мкм и  $d_{(\text{CH}_2)_n} = 30$  мкм. При свободном расширении золота скорость возрастает до  $(1,2 \div 1,6) \cdot 10^6$  см/сек и слабо зависит от толщины фольги.

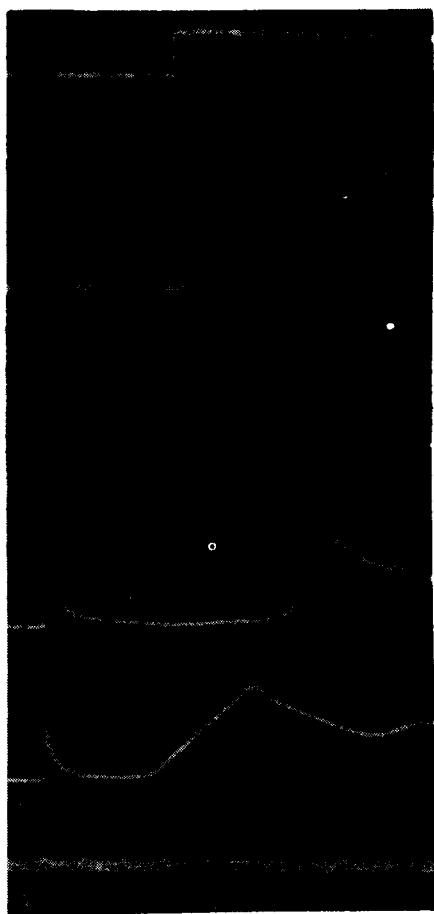


Рис. 2. Типичные осциллограммы зондовых и световых сигналов: а — сигнал с баллистического калориметра, б — метки 1 мксек, в — сигнал с электрического зонда ( $d_{\text{Au}} = 10$  мкм,  $d_{(\text{CH}_2)_n} = 30$  мкм), г — сигнал с ФЭУ ( $d_{\text{Au}} = 10$  мкм,  $d_{(\text{CH}_2)_n} = 30$  мкм), д — сигнал с ФЭУ ( $d_{\text{Au}} = 5$  мкм,  $d_{(\text{CH}_2)_n} = 30$  мкм), е — сигнал с ФЭУ свободно расширяющейся плазмы ( $d_{\text{Au}} = 10$  мкм, ж — метки 0,5 мксек

С целью установления связи между скоростью и вложенной в фольгу энергией эти эксперименты были численно промоделированы в рамках системы одномерных нестационарных уравнений газовой динамики с учетом лучистой теплопроводности. Для экспериментов с 10 мкм Au

и 30 мкм (CH<sub>2</sub>)<sub>n</sub>, отстоящими друг от друга на расстоянии 1 мм, была получена зависимость скоростей золотой и полиэтиленовой фольг от энергии вложенной в золотую фольгу, рис. 3. Сопоставление с экспериментом позволяет сделать вывод, что величина поглощенной энергии составляет 300 дж.

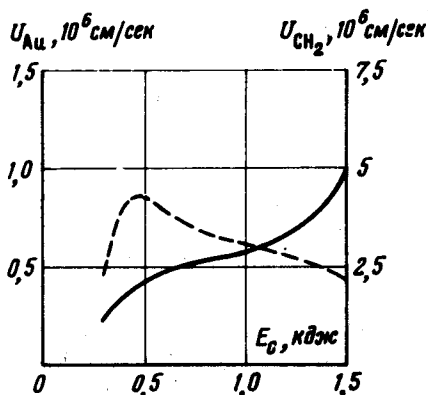


Рис. 3. Расчетная зависимость скоростей золотой и полиэтиленовой фольги от энергии, вложенной в золотую фольгу

Расхождение между измеренной энергией и вычисленными по методу Монте-Карло потерями при парных столкновениях (4,6%) от энергии пучка при  $d_{Au} = 10$  мкм можно объяснить увеличением эффективного времени пребывания электронов в плазме фольги благодаря действию собственных электрических и магнитных полей пучка. В сильноточном диоде электроны стягиваются к аноду, образуя облако релятивистских электронов [3]. Магнитное поле диода проникает в плазму взрывающейся фольги, поскольку, как следует из численного моделирования, к моменту основного энерговыклада плазма имеет параметры  $T = 20$  эв,  $Z_{eff} = 5$ , и расширяется до  $d = 0,5 \div 1$  мм. Толщина скин-слоя оказывается сравнимой с  $d$ .

Влетая в плазму, электроны либо отражаются в ускорительный промежуток к катоду, либо проходят через фольгу или застревают в ней. Отраженные электроны возвращаются к фольге электрическим и магнитными полями диода. В плазме фольги электрическое поле диода отсутствует. Поэтому перенос релятивистских электронов может происходить из-за диффузии при упругих рассеяниях, а также из-за магнитного дрейфа. Последний можно представить в виде

$$\frac{\gamma mc^2}{eH^2} |\nabla H| \approx C \frac{I_A}{21}, \quad I_A = 17000 \beta \gamma.$$

В наших экспериментах ток диода в четыре – пять раз больше  $I_A$ . Таким образом, время пребывания электронов в плазме фольги, а, следовательно, и потери должны увеличиваться на порядок величины. Этим, по нашему мнению, объясняется наблюдаемый эффект. Роль электрического поля за анодной фольгой [4], по-видимому, незначительна. На это указывает отсутствие зависимости нагрева фольги от давления газа в дрейфовом промежутке.

Обнаруженный эффект аномально большого поглощения энергии пучка в тонких фольгах обеспечивает энерговыклад до 80 эв на один

атом золота и позволяет осуществить моделирование нагрева термоядерных мишеней.

В заключение авторы благодарят Е.К.Завойского за обсуждение и советы в процессе выполнения работы, Е.И.Баранчикова, А.С.Черненко, С.П.Загородникова за помощь в проведении эксперимента, Б.В.Алексеева и В.И.Иванова за численное исследование взаимодействия электронов с фольгой.

Институт атомной энергии  
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию  
1 июля 1976 г.

### Литература

- [1] В.И.Ликсонов, Ю.Л.Сидоров, В.П.Смирнов. Письма в ЖЭТФ, 19, 516, 1974.
  - [2] Ю.В.Коба, В.И.Ликсонов, В.С.Пенькина, Л.И.Рудаков, Ю.Л.Сидоров, В.П.Смирнов, А.Д.Сухов, Э.З.Тарумов. V конференция МАГАТЭ по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Токио, 1974.
  - [3] М.Д.Клаузер и др. VII Европейская конференция по термоядерному синтезу и физике плазмы, 1, 85, 1975.
  - [4] Д.Д.Рютов, Г.В.Ступаков. Физика плазмы, 11, 1976.
-