

УДК 533.9.15+537.52.7

## РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ ЗОНДОВОЙ ДИАГНОСТИКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

И. А. Буфетов, Г. А. Буфетова, С. Б. Кравцов, В. Б. Федоров

*Измерен временной ход потенциала на границе наносекундной лазерной плазмы, образованной у проводящей мишени в атмосфере остаточного газа. Обнаружено, что при увеличении диаметра пятна облучения до величины порядка расстояния между электрическим зондом и мишенью наблюдается искажение сигнала с зонда вплоть до смены его полярности. Показано, что эффект является результатом индукционного влияния системы токов, возникающих в области мишени.*

В настоящей работе проводились измерения (с временным разрешением) потенциала двойного зарядового слоя на границе лазерной плазмы, образующейся на металлической мишени под действием импульсов лазерного излучения длительностью 10 нс с длиной волны 1,06 мкм и интенсивностью от  $10^9$  до  $10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>. Измерение потенциала двойного слоя может быть использовано для оценки ее электронной температуры [1].

Опыты проводились по схеме, представленной на рис. 1. В качестве источника лазерного излучения использовался неодимовый лазер, собранный по схеме задающий генератор (ЗГ) – многокаскадный усилитель. ЗГ работал в режиме одной продольной и одной поперечной моды. Лазерный импульс имел асимметричную по времени форму (рис. 2). Резкий передний фронт длительностью  $\sim 1$  нс формировался электрооптическим затвором, а длительность более пологого заднего фронта определялась кинетикой генерации ЗГ с просветляющимся затвором на кристалле *LiF*. Излучение фокусировалось на плоскую металлическую поверхность мишени, находившейся в камере при давлении остаточного газа  $\sim 0,1$  торр. Электрический зонд, представлявший собой проволочное кольцо диаметром 5 – 8 мм без какой-либо изоляции, размещался на оси лазерного

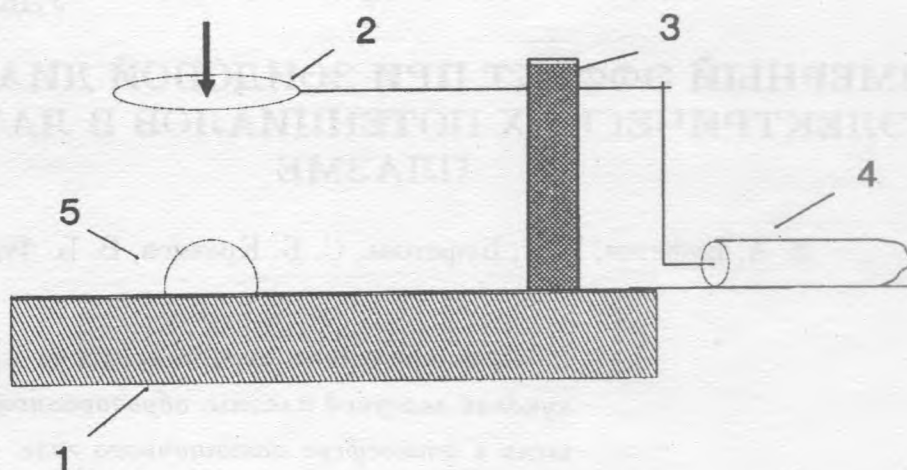


Рис. 1. Схема подключения зонда. 1 - металлическая мишень, 2 - кольцо зонда, 3 - изолирующая опора, 4 - коаксиальный кабель, 5 - лазерная плазма.

луча на расстоянии 3 - 4 мм от поверхности мишени. Кольцо зонда присоединялось к коаксиальному кабелю с волновым сопротивлением  $R = 75 \text{ Ом}$ , которое являлось активной нагрузкой зонда. Оплетка кабеля соединялась с плоской алюминиевой мишенью диаметром 40 мм и толщиной 5 мм. Сигнал с зонда выводился из вакуумной камеры на скоростной осциллограф С7-19 с временным разрешением лучше 1 нс.

При острой фокусировке лазерного излучения на мишень, т.е. при помещении ее в фокус линзы с фокусным расстоянием  $f = 1 \text{ м}$ , (диаметр пятна фокусировки при этом составлял 80 мкм) осциллограф фиксировал отрицательный импульс, начало которого с точностью до 1 нс соответствовало началу лазерного импульса и амплитуда которого (в зависимости от интенсивности лазерного излучения) могла достигать  $\sim 10^3 \text{ В}$  (см. рис. 2а). Но при увеличении пятна фокусировки лазерного излучения на мишени до 3 мм форма регистрируемого сигнала существенно изменялась и, более того, изменялась его полярность (рис. 2б). Как видно на осциллограмме, полярность сигнала с зонда - положительная и, очевидно, никак не может соответствовать знаку э.д.с. двойного слоя на границе плазмы.

Для выяснения природы эффекта были поставлены дополнительные эксперименты. Поскольку токи, текущие по остаточному газу, могут оказывать существенное влияние на формирование потенциала зонда (путем генерации индукционных э.д.с.), то в сле-

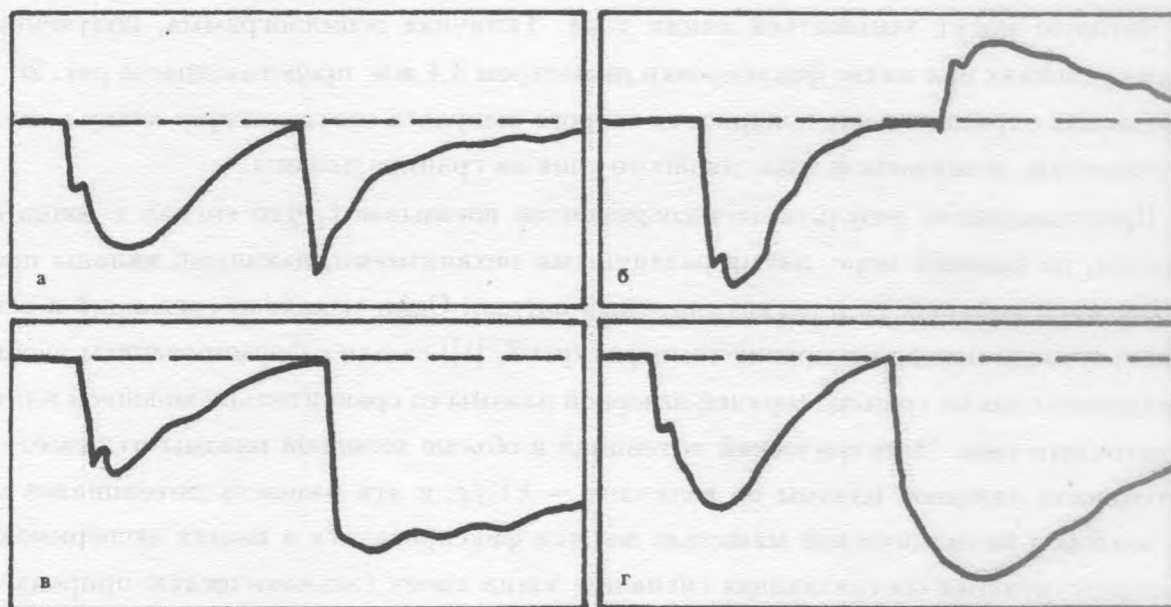


Рис. 2. Осциллограммы лазерного (первый) и электрического импульса с зонда (второй на каждой осциллограмме). Между первым и вторым импульсами введена задержка  $\approx 22$  нс. Для каждого опыта указаны диаметры мишени  $D$  и пятна фокусировки  $d$ , интенсивность лазерного излучения  $I$  и амплитуда электрического импульса  $U$ . а)  $D = 40$  мм,  $d = 80$  мкм,  $I = 8,7 \cdot 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>,  $U = 552$  В. б)  $D = 40$  мм,  $d = 0,31$  см,  $I = 6,5 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>,  $U = +32$  В. в)  $D = 40$  мм,  $d = 0,31$  см,  $I = 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>,  $U = 40$  В. г)  $D = 4$  мм,  $d = 0,31$  см,  $I = 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>,  $U = 113$  В.

дующем опыте, в отличие от представленного на рис. 1, точка фокусировки излучения была окружена плотно прилегающим к мишени диэлектрическим кольцом с внутренним диаметром  $\approx 10$  мм и высотой 2,5 мм. В этом случае кольцо препятствует ионизации собственным излучением плазмы остаточного газа у поверхности мишени в области, находящейся в тени кольца, и ограничивает тем самым размеры токового "фонтана" [1, 2] на мишени. Сигнал с зонда представлен на рис. 2в. Из сравнения рис. 2б и 2в следует, что размещение диэлектрического кольца вокруг плазмы изменяет знак сигнала, снимаемого с кольцевого зонда. Еще более жестко токовый фонтан ограничивался в опытах, где в качестве мишени использовался металлический диск малого диаметра, по возможности равного диаметру пятна фокусировки. В такой постановке отсутствует

вся металлическая поверхность мишени вблизи точки попадания лазерного излучения, на которую могут замыкаться линии тока. Типичная осциллограмма, полученная в таких условиях при пятне фокусировки диаметром 3,4 мм, представлена на рис. 2г. Наблюдаемая отрицательная полярность второго импульса соответствует знаку разности потенциалов, создаваемой э.д.с. двойного слоя на границе плазмы.

Представленные результаты экспериментов показывают, что сигнал с зонда обусловлен, по крайней мере, двумя различными механизмами, дающими вклады противоположной полярности в регистрируемый сигнал. Один механизм (лежащий в основе используемого метода измерения температуры  $T_e$  [1]) связан с формированием двойного зарядового слоя на границе горячей лазерной плазмы со сравнительно холодной плазмой остаточного газа. Электрический потенциал в объеме холодной плазмы отличается от потенциала лазерной плазмы на величину  $\sim kT_e/e$ , и эта разность потенциалов между зондом и металлической мишенью должна фиксироваться в наших экспериментах. Соответствующая составляющая сигнала с зонда имеет гальваническую природу. Отрицательная полярность соответствует знаку э.д.с. двойного слоя.

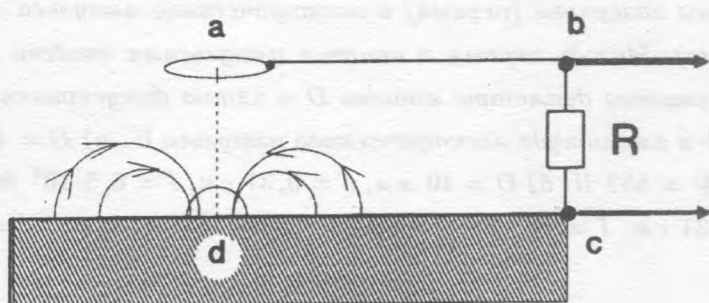


Рис. 3. Схема протекания токов в области мишени.

Действие же второго механизма, ответственного за формирование импульсов противоположной полярности, как показали приведенные эксперименты, существенно зависит от распределения токов в области мишени. Данное обстоятельство указывает на индукционное происхождение сигнала. В условиях эксперимента электрическая цепь зонда оказывается индуктивно связанной с "фонтанообразной" системой токов, возникающих в плазме перед мишенью и в самой мишени. Если считать, что измерительный контур  $abcd$  (рис. 3) замыкается через центр плазменного образования, то он охватывает полный магнитный поток токового тора у мишени. В этом случае индукционный сигнал

максимален и значительно (см. рис. 2б) превышает величину гальванической составляющей. В реальных же условиях линии тока измерительного контура сосредоточены не только на отрезке  $ad$ , а охватывают более широкую область, особенно учитывая сравнительно большие размеры зондового кольца, размеры которого или сравнимы с пятном фокусировки или значительно его превышают (при острой фокусировке). Случай острой фокусировки ближе к модели, когда токовый тор (рис. 3) полностью охватывается измерительным контуром. В таком случае (в отличие от предыдущего) суммарный магнитный поток через контур мал за счет вычитания магнитных потоков в диаметрально противоположных частях тора и величина гальванической составляющей много больше индукционной (рис. 2а). Если же площадь мишени совпадает с площадью пятна облучения, то система токов ограничена (электропроводность плазмы остаточного газа значительно меньше электропроводности металла), и она практически не влияет на сигнал с зонда, так что доминирует гальваническая составляющая.

Таким образом, результаты исследования обнаруженного размерного эффекта позволяют разделить гальваническую и индукционную составляющие зондового сигнала путем изменения экспериментальных условий. Гальваническая составляющая несет информацию об электронной температуре плазмы. Индукционная же составляющая сигнала с зонда может быть использована для получения данных о параметрах плазмы, величине, распределении и временах развития системы токов у мишени.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект N 94-02-05301-а) и Международного научного фонда (грант N M6J000).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мотылев С. Л., Пашинин П. П. ЖТФ, 48, 742 (1978).
- [2] Агеев В. П., Бурдин С. Г., Гончаров И. Н. и др., Взаимодействие мощного импульсного лазерного излучения с твердыми телами в газах. Радиотехника (Итоги науки и техники). М., 1983, с. 143.

Поступила в редакцию 7 сентября 1994 г.