

## КОРОТКИЕ ВОДОРОДНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ СГУСТКИ

Э. Я. Гольц (Москва)

При когерентном ускорении плазменного сгустка электромагнитной волной последний должен удовлетворять условию [1]

$$a \ll \lambda/2\pi$$

Здесь  $a$  — размер сгустка,  $\lambda$  — длина ускоряющей его волны. При плотности плазмы  $n_* \approx 10^{13} / \lambda$  (где  $\lambda$  — в см) сгусток становится полностью непрозрачным для электромагнитной волны. Представляют интерес эксперименты с плазменными сгустками как при  $n > n_*$ , так и при  $n < n_*$ . Следовательно, выбор длины волны определяет геометрические размеры и плотность плазменного сгустка.

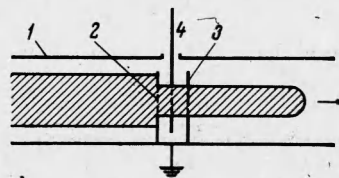
Применение метровых волн нежелательно, поскольку установка в этом случае становится громоздкой. Использование сантиметровых волн требует получения очень небольших и плотных плазменных сгустков, что является весьма сложной задачей. По этим причинам при выборе длины волны, ускоряющей плазму, следует остановиться на дециметровом диапазоне волн.

Итак, необходимо иметь плазменные сгустки длиной от 5 до 15 см с плотностью, регулируемой в пределах от  $10^{10}$  до  $5 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup>.

Поперечные размеры сгустков можно ограничить системой диафрагм, и все трудности связаны с получением необходимой длины, плотности и чистоты (желательно иметь водородные плазменные сгустки).

Поскольку во всех плазменных струях, создаваемых различными источниками, впереди движется водородная плазма, то, выделив ее каким-либо способом из остальной части струи, можно получить водородный и достаточно короткий плазменный сгусток. Это было осуществлено при помощи обрезания плазменной струи электрическим полем.

Принципиальная схема применявшегося для этого устройства, использующая импульсное электрическое поле, изображена на фиг. 1. Здесь плазменная струя движется в трубе 1 в направлении, указанном стрелкой, проходя при этом заземленные сетки 2 и 3 и управляющую сетку 4. Пусть в момент времени, когда плазменная струя занимает положение, указанное на фигуре, между управляющей и заземленными сетками импульсно подается напряжение.



Фиг. 1

В зависимости от знака импульса система пропустит ионы или электроны. После обрезания устройства в трубе будет двигаться плазменный сгусток и сзади него частицы какого-либо одного знака. Однако длительное совместное движение частиц одного знака невозможно из-за кулоновского взаимодействия между ними.

Если через обрезную систему проходит достаточно плотная плазма, то не происходит полного разделения плазмы на ее компоненты. Однако и в этом случае траектории частиц, прошедших обрезную систему после того, как на управляющую сетку подано напряжение, изменяются, и плазма может быть задержана системой диафрагм.

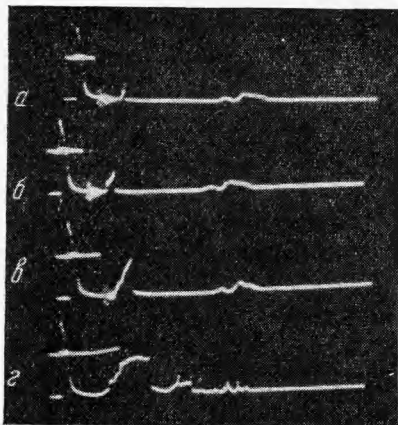
Было проведено обрезание плазменной струи небольшой плотности ( $10^{10}$  см<sup>-3</sup>) импульсным напряжением и запираение более плотной струи ( $10^{12}$  см<sup>-3</sup>) постоянным электрическим полем. В первом случае для регистрации плазмы использовался экранированный зонд 2 и масс-спектрограф по пролетному времени, во втором — только экранированный зонд. Расстояние между плазменной пушкой и управляющим электродом обрезного устройства равнялось 110 мм.

В экспериментах с небольшой плотностью применялась плазменная пушка бостиковского типа. Экранированный зонд находился в нескольких мм от заземленной сетки 3 (фиг. 1) обрезного устройства. В этом же месте можно было располагать вход масс-спектрографа по пролетному времени. Длина масс-спектрографа 1,5 м, ионы регистрировались электронным умножителем, сигнал с которого поступал на вход осциллографа ОК-17М.

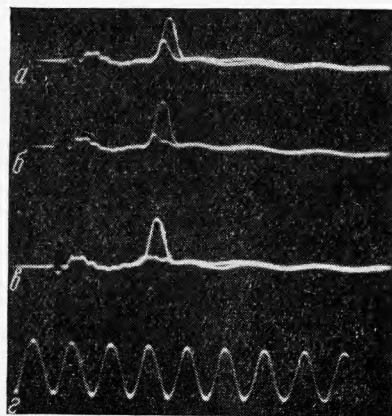
Если задний «обрезанный» фронт плазмы зарегистрирован в момент времени  $t$ , а импульс напряжения подается на обрезное устройство в момент времени  $t_1$ , то пролетное время частиц, находящихся на заднем фронте,  $\tau = t - t_1$ . Зная  $\tau$ , расстояние, которое пролетают ионы в масс-спектрографе, и разность потенциалов, которую они проходят на его входе, можно определить массовый состав исследуемых частиц плазмы. На фиг. 2 изображены четыре масс-спектрограммы, соответствующие включению обрезного устройства в различные моменты; длительность развертки 27 мксек.

Крайний левый импульс на каждой осциллограмме связан с непосредственным воздействием световой вспышки от плазменной пушки на первый диод электронного умножителя, второй — с попаданием короткого водородного сгустка на вход масс-спектрографа. Далее имеются несколько импульсов, соответствующих неводородной

компоненте плазмы. Они проходили через обрезавшую систему, так как в этих экспериментах на управляющую сетку подавался довольно короткий импульс напряжения. Первый импульс как бы перечеркнут горизонтальной чертой — это сигнал со второго канала осциллографа, у правого края этой черты начинался обрезавший импульс (фронт не виден). Из осциллограмм видно, что при перемещении во времени импульса

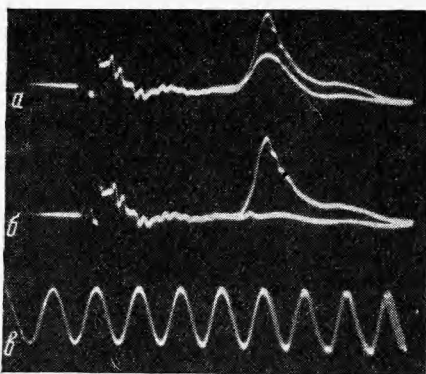


Фиг. 2



Фиг. 3

обрезающего напряжения можно получить плазменные водородные ступки различной длины. На нижней осциллограмме показан случай, когда обрезавший импульс столь



Фиг. 4

поздно включен, что через обрезавшую систему проходят уже и примеси. Плотность плазмы на заднем фронте плазменного водородного ступка (фиг. 3, б) равна  $10^{10} \text{ см}^{-3}$  (в точке обрезания), его длина 18 см.

В случае обрезания плотной плазмы существенным является глубина проникновения поля в эту плазму. В неподвижной плазме экранировка электрического поля происходит на дебаевском радиусе; при скоростях ионов, равных тепловой скорости электронов, глубина проникновения в плазму становится неограниченно большой. В этом случае может произойти полное обрезание плазменной струи электрическим полем.

Обрезание плотной плазменной струи экспериментально проверялось на установке, аналогичной описанной выше, но вместо пушки бостиковского типа был разработан источник плазмы, более соответствующий предъявляемым требованиям: ско-

рость нарастания плотности на переднем фронте плазменного ступка, создаваемого этим источником, такова, что нет необходимости формировать передний фронт ступка каким-либо способом (например обрезанием). В этой плазменной пушке использован разряд между плоскими электродами вдоль поверхности оргстекла. Расстояние между электродами 3 мм. Пушка срабатывает от внутреннего поджига. Емкость конденсатора, записывающего пушку, равна 0,3 мкф, рабочее напряжение — от 0,5 до 8 кВ, полная индуктивность системы плазменная пушка — конденсатор равнялась 40 см. Пушка создает плазменный ступок, имеющий максимальную плотность в области обрезавшего устройства  $10^{12} \text{ см}^{-3}$  и скорость движения переднего фронта, равную  $10^7 \text{ см} / \text{сек}$ .

Обрезающее устройство состояло из двух сеток, изготовленных из молибденовой проволоки толщиной 0,03 мм, расстояние между проволочками 0,5 мм (отсутствовала сетка 2, фиг. 1).

На фиг. 3 показаны осциллограммы тока на экранированный зонд, полученные при постоянном во времени напряжении на управляющей сетке. Для удобства сравнения их между собой они попарно совмещены. Эти осциллограммы сняты при напряжениях 0 и +100 в (фиг. 3, а); 0 и +200 в (фиг. 3, б) и 0 и +300 в (фиг. 3, в). Внизу

(фиг. 3, *з*) помещена градуировочная кривая (частота 2 *мгц*). Расстояние между управляющей сеткой и зондом равнялось 45 *мм*.

Из фиг. 3 следует, что электрическое поле не сразу проникает в плазму. Примерно такие же осциллограммы получаются и при отрицательном напряжении на управляющей сетке, но влияние его на плазму не столь велико. На фиг. 4 помещены осциллограммы тока на зонд для случая, когда расстояние между управляющей сеткой и зондом было увеличено до 185 *мм*; напряжение на управляющей сетке при измерениях равнялось 0 и +100 *в*, 0 и +200 *в*; внизу градуировочная кривая (частота 2 *мгц*).

Сравнение фиг. 3, *б* и 4, *б* показывает, что действие электрического поля обнаруживается сильнее, если зонд расположен далеко от обрезавшей системы. В первом случае отношение амплитуд на совмещенных осциллограммах равно 3, во втором — 20.

Это свидетельствует, что в процессе получения короткого плазменного сгустка, наряду с «истинным» обрезанием плазмы, т. е. отсечением частиц определенного знака, существенную роль играют процессы, связанные с изменением траекторий частиц сгустка. Таким образом, в процессе эксперимента получены короткие подородные плазменные сгустки с плотностью  $10^{10}$  *см*<sup>-3</sup>. Исследование обрезания постоянным электрическим полем движущейся плазменной струи с плотностью  $10^{12}$  *см*<sup>-3</sup> дает основания полагать, что могут быть получены короткие плазменные сгустки, имеющие подобную плотность.

В заключение автор благодарит А. А. Рухадзе за ценные дискуссии.

Поступила 1 II 1966

#### ЛИТЕРАТУРА

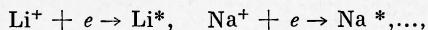
1. Векслер В. И. Когерентный принцип ускорения заряженных частиц. Атомная энергия, 1957, № 5.

### ОБ УСИЛЕНИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ РАСПАДЕ ПРЕДЕЛЬНО ИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЫ

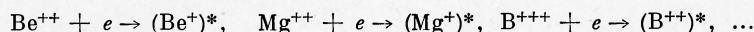
Б. Ф. Гордиец, Л. И. Гудзенко, Л. А. Шелепин

(Москва)

Анализ возможности усиления электромагнитного излучения на частотах атомного спектра в импульсно рекомбинирующей плазме проводился в работах [1, 2, 3] только для высокоионизованного водорода. Подобное рассмотрение для других элементов (не говоря уже о плазме более разнообразного химического состава<sup>1</sup>) провести намного сложнее по самому существу релаксационной задачи, а также из-за отсутствия достаточно точных значений вероятностей процессов, происходящих при столкновениях частиц. Проще всего обсудить распределение населенностей дискретных уровней ионов распадающейся плазмы, подавляющее большинство тяжелых частиц которой — голые атомные ядра одного из элементов (H<sup>+</sup>, He<sup>++</sup>, Li<sup>++</sup> и т. д.). К этой задаче — о релаксации водородоподобных ионов — примыкает и анализ населенностей в атомах щелочных металлов или в щелочноподобных ионах при распаде соответствующей плазмы:



или



Пусть, как и в [1], средняя энергия свободных электронов значительно меньше равновесного значения, соответствующего данной степени ионизации. Такая плазма распадается, причем характер релаксации населенностей дискретных уровней одноэлектронных ионов He<sup>+</sup>, Li<sup>++</sup>, Be<sup>+++</sup> и т. д., образующихся на первом этапе рекомбинации, во многом подобен релаксации в распадающейся водородной плазме. Сначала свободный электрон захватывается на высоковозбужденный уровень иона при тройном соударении (ядро + 2e → ион\* + e), затем электрон «сползает» по дискретным уровням: при неупругих столкновениях — главным образом по «соседним» уровням ( $n \rightarrow n - 1$ ), при радиационных переходах — чаще всего сразу в основное состояние ( $n \rightarrow 1$ ). На верхних дискретных уровнях одноэлектронного иона основную роль играют столкновения со свободными электронами, вероятности  $C_n$  этих безызлучательных переходов падают с уменьшением главного квантового числа  $n$ ; на нижних уровнях преобладают спонтанные радиационные переходы, вероятности  $A_n$  которых

<sup>1</sup> Осложнения возникают при существенности нескольких каналов релаксации по дискретным уровням прорекомбинировавших атомов или ионов. С этой точки зрения, например, смесь гелия с водородом, в которой водород рекомбинирует из высокоионизованного состояния, а гелий — практически нейтрален, почти не отличается от химически чистой водородной плазмы.