

## ДВА РЕЖИМА РАБОТЫ ИСТОЧНИКА ПЛАЗМЫ

С.Н.Попов

В процессе исследования титанового источника [1] было обнаружено существование двух качественно различных режимов генерации плазмы с различными механизмами ускорения частиц.

В одном из режимов, названном нами "медленным", средняя энергия ионов составляет 150–200 эв, а число частиц с энергией 1 кэВ на порядок величины меньше, чем со средней энергией.

Второй режим, названный "быстрым", наступает при уменьшении величины основной емкости  $C_0$ , входящей в разрядную цепь. В этом случае энергетический спектр ионов в плазме изменяется, удельный вес хвостов увеличивается, а средняя энергия ионов растет на порядок величины. Одновременно с генерацией плазмы источник инжектирует электронный пучок интенсивностью порядка одного ампера и энергией свыше 1 кэВ. опыты показали, что быстрый режим наступает при значительном уменьшении энерговклада в разряд с сохранением приложенного к источнику рабочего напряжения  $U_0$ .

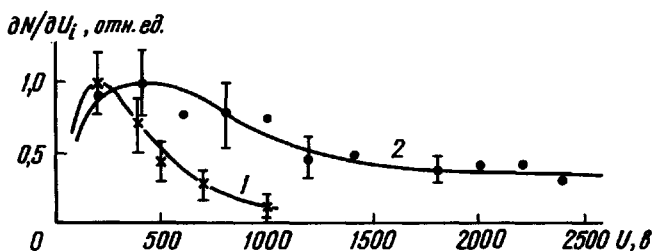


Рис.1. Распределение ионов по энергиям:  
1—медленный, 2—быстрый режим

На рис. 1 представлены в качестве примера распределения ионов по энергиям в медленном (1) ( $C_0 = 5,3 \text{ мкф}$ ,  $U_0 = 8 \text{ кВ}$ ) и быстром (2) ( $C_0 = 0,3 \text{ мкф}$ ,  $U_0 = 8 \text{ кВ}$ ) режимах.

Методика измерений и применяемая модель источника описаны в работе [2].

Медленный режим в наших опытах осуществлялся при  $C_0 = 7,5; 5,3; 1,7^I$  мкф, рабочем напряжении  $U_0 = 4-10$  кВ. Число генерированных

частиц пропорционально запасенной энергии, а энергетический спектр практически постоянен.

Хвост энергетического распределения простирается до 10 кэв, однако число частиц с энергией выше 1 кэв не превышает 5% от всех частиц.

Типичные осциллограммы ионного тока на измерительный зонд и тока в источнике показаны на рис.2,а и б соответственно.

Быстрый режим. При уменьшении  $C_0$  с 5,3 до 0,3 мкф длительность токового импульса (рис.3,в) вместо ожидаемой 1 мксек составила 2 мксек, разряд носит аperiодический характер. Это указывает на резкое изменение сопротивления плазмы в источнике.

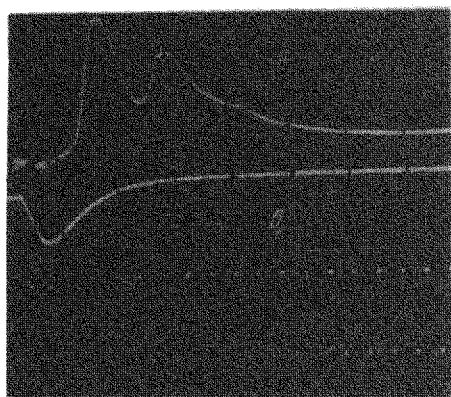


Рис.2. Осциллограммы ионного тока на зонд (а) и тока в источнике (б). Метки времени через 1 мксек

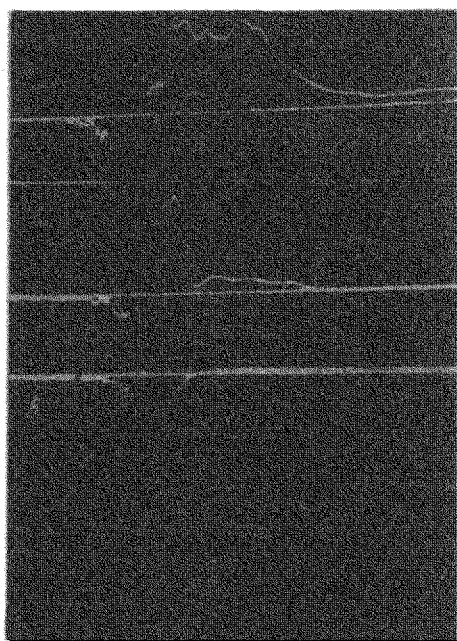


Рис.3. Осциллограммы ионного тока на зонд (а и б) и тока в источнике (в). Метки времени через 1 мксек

Форма импульса в обоих режимах отличается друг от друга (ср. рис.2,б и 3,в). Скорость переднего фронта  $v_{\phi}$  больше  $1,5 \cdot 10^8$  см/сек. Точное определение  $v_{\phi}$  затруднено наличием отрицательного (электронного) импульса, предшествующего импульсу плазмы (рис.3,а и б).

Осциллограммы ионного тока, полученные при  $U_0 = 8$  кВ и отталкивающих потенциалах на зонде  $U_{от} = +100$ В и  $+2500$ В даны на рис.3,а и б соответственно. Видно, что примерно 30% всех частиц обладает энергией, превосходящей 2,5 кэВ. Хвост распределения, измеренный электростатическим анализатором, простирается за 17 кэВ.

Сравнение работы источника в обоих режимах приводит к следующим выводам:

1. Полное число частиц в быстром режиме на 1-2 порядка величины меньше, чем в медленном.

2. Средняя энергия ионов в быстром режиме растет на порядок величины по сравнению с медленным. По всей вероятности, далекие хвосты энергетического распределения в обоих режимах имеют один и тот же порядок величины, что свидетельствует о едином механизме ускорения в данной области энергий. Действительно, в начальный момент работы источника токовый режим не зависит от  $C_0$  и поэтому при любых  $C_0$  в течение короткого времени (по сравнению с временем работы источника) физические процессы в разряде должны быть одинаковыми.

3. Сопротивление  $R_p$  плазменного шнура в момент максимума тока в медленном режиме очень мало и составляет вместе с контактными (электрод-плазма, плазма-электрод) сопротивлениями около 0,05 ома. В быстром режиме то же сопротивление превосходит 1 ом. Считая контактные сопротивления одинаковыми в обоих режимах, увеличение  $R_p$  в быстром режиме нужно целиком отнести за счет изменения сопротивления плазмы.

4. Ток  $I$  в источнике составляет: в медленном режиме 10-12 ка, в быстром - 4-5 ка. Характер течения тока в обоих режимах различный. Из сравнения рис.2 и 3 можем заключить, что в быстром режиме ток в источнике течет "неспокойно"; наблюдаются срывы и колебания тока с частотой 5-10 мгц.

5. Средняя напряженность электрического поля (в максимуме тока) в плазме источника  $\bar{E}_{рс} = IR_p / l_0$  ( $l_0$  - длина источника) в быстром режиме  $\sim 1$  кВ/см. Поле  $\bar{E}_{рм}$  в медленном режиме определить не представляется возможным ввиду неясности величины  $R_p$ . Можно лишь утверждать, что  $\bar{E}_{рс} \gg \bar{E}_{рм}$ .

6. В быстром режиме одновременно с плазмой генерируются электроны, движущиеся со скоростями, превосходящими  $v_{\phi}$ , и энергией  $>1$  кэВ.

Процессы, наблюдаемые при работе источника в быстром режиме, по ряду перечисленных признаков характерны для возбуждения пучковой неустойчивости в плазме. В частности, наблюдаемые в опыте сильные электрические поля (см. п.5) могут существовать в плазме благодаря указанной неустойчивости. Действительно, при уменьшении  $C_0$  снижается плотность генерируемой плазмы и соответственно падает частота столкновений  $\nu$ . При данном  $U_0$  отношение  $E_p/\nu$  может быть достаточным для возбуждения и поддержания пучковой неустойчивости в течение всего времени генерации плазмы. При этом в разряде сохраняется сравнительно большое  $E_p$ , что в конечном итоге приводит к ускорению плазмы.

В случае больших  $C_0$  с ростом тока в источнике отношение  $E_p/\nu$  быстро (по сравнению с временем генерации плазмы) уменьшается до величины ниже критической и поэтому возникшие в начале разряда неустойчивости быстро гасятся. В этом случае источник будет работать в медленном режиме.

В заключение отметим, что обнаруженный эффект, по всей вероятности, не является специфическим свойством применяемого источника. Для получения быстрого режима важно, по-видимому, чтобы в плазме тем или иным способом было обеспечено достаточно высокое значение  $E_p/\nu$ . В других источниках это условие может быть выполнено уменьшением количества напускаемого газа в источник, уменьшением задержки между напуском газа и подачей напряжения и др.

Автор благодарен И.С.Данилкину, Е.К.Завойскому, А.А.Плюто и А.А.Рухадзе за полезные советы и дискуссии.

Физический институт

им. П.Н.Лебедева  
Академии наук СССР

278

Поступило в редакцию  
5 января 1966 г.

## Литература

- [1] E. H. Coensgen, W. P. Cummins, A. E. Sherman, Phys. Fluids, 2, 350, 1959.
- [2] С. Н. Попов. Сб. "Физика плазмы". Изд. "Наука", М., 1966.
- [3] Э. Д. Андрихина, И. С. Шпигель. Сб. "Физика плазмы". Изд. "Наука", М., 1966.

---

I) Измерения при  $C_0 = 1,7$  мкФ проводились в работе Андрихина и Шпигеля [3].