

## ПЛАЗМЕННЫЙ ШНУР В ГАЗЕ С ЛЕГКОЙ ПРИМЕСЬЮ

Ю.Р. Аланакян

Показано, что в смеси тяжелого и легкого газов возможно образование такого плазменного шнура, в горячей области которого в основном содержатся ионы легких частиц, т.е. в плазме шнура происходит самоочищение газа от тяжелых частиц. Если при этом вдали от шнура концентрация легких частиц в газе достаточно мала по сравнению с концентрацией тяжелых, то затрата мощности ВЧ излучения, подводимого к шнуру, оказывается в  $(M_1/M_2)^{1/2}$  раз меньше, чем в опытах с чистым легким газом. ( $M_1$  и  $M_2$  - массы тяжелой и легкой частиц, соответственно).

Капица в работе [1] исследовал плазменный шнур с высокой температурой электронов, возникающий в резонаторе с плотным газом под действием мощного ВЧ излучения. В этих опытах обнаружены, в частности, следующие свойства шнура. Наличие в газе легких примесей водорода или дейтерия способствует возникновению горячего плазменного шнура. Вместе с тем, в спектре излучения шнура полностью отсутствуют линии многократно ионизованных атомов. Исследование плазменного шнура в дейтериевом газе с примесью аргона показало, что с увеличением в смеси газа концентрации аргона уменьшается величина мощности, необходимой для получения шнурового разряда (Капица, Филимонов [2]). Указанные свойства шнура согласуются с теоретическими результатами, полученными в настоящей работе.

Рассмотрим плазменный шнур в смеси газов в условиях, когда в горячей области шнура длина свободного пробега иона между столкновениями с частицами больше, чем характерные размеры шнура (режим "свободного полета"). В этих условиях под действием постоянного электрического поля, обусловленного разделением зарядов в плазме, на границе горячей области возникает поток ионов, препятствующий проникновению нейтральных частиц в эту область. Такой плазменный шнур, образованный в газе без примеси, теоретически исследован в работе [3]. Однако, в отличие от работы [3], не будем ограничивать себя предположением, что во всей области горячего шнура потенциальная энергия иона в электрическом поле велика по сравнению с кинетической энергией нейтральной частицы, из которой образовался этот ион. Дело в том, что такое условие в объеме шнура может не выполняться, а это в случае смеси газов существенно сказывается на распределении ионных компонентов плазмы в шнуре.

С помощью кинетических уравнений для различных компонентов плазмы, используя метод рассмотрения, подробно изложенный в работе [3], в случае плоскопараллельного слоя плазмы ( $|z| < b$ ) получим следующую формулу, характеризующую пространственное распределение плот-

ности ионов  $\alpha$ -го сорта в области  $z > 0$

$$n_{\alpha i} = A_{\alpha} \left( \int_0^z + 2 \int_z^{z_{\alpha}} \right) \frac{n_e(z') \exp(-3\mathcal{E}_{\alpha}(z')/T)}{[\mathcal{E}_{\alpha}(z') - e(\phi(z) - \phi(z'))]^{1/2}}, \quad (1)$$

где  $A_{\alpha} = n_{\alpha b} M_{\alpha}^{1/2} \sigma_{\alpha i} v_e / 2\sqrt{6}$ ,  $n_{\alpha b}$  — плотность нейтральных частиц  $\alpha$ -го сорта при  $z = b$ ,  $\sigma_{\alpha i}$  — эффективное сечение ионизации частицы,  $z_{\alpha}$  — корень уравнения  $\mathcal{E}_{\alpha}(z_{\alpha}) + e\phi(z_{\alpha}) = e\phi(z)$ ,  $\mathcal{E}_{\alpha}(z) = (T/2) \times \times (M_{\alpha}^{1/2} \sigma_{\alpha i} v_e \int_0^z n_e dz / T^{1/2})^{2/3}$ . Отметим, что в условиях плазменного шнура  $\mathcal{E}_{\alpha}(0)$  значительно больше, чем температура нейтральных частиц  $T$ . Потенциал постоянного электрического поля  $\phi(z)$  определяется условием квазинейтральности плазмы.

Пусть шнур образован в смеси двух газов, причем  $\beta \gg 1$ , где  $\beta = M_1^{1/2} \sigma_{1i} / M_2^{1/2} \sigma_{2i}$ .

В случае  $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2 \ll |e\phi|$  имеем  $z_1 = z_2 = z$  и с помощью формулы (1) получим

$$n_{1i}(0) / n_{2i}(0) \approx (A_1 / A_2) \exp[3(\mathcal{E}_2(0) - \mathcal{E}_1(0)) / T]. \quad (2)$$

Поскольку при условии  $\beta \gg 1$  имеем  $\mathcal{E}_1(0) \text{ PP } \mathcal{E}_2(0) \gg T$ , то в центральной части шнура содержатся практически лишь легкие ионы. Тяжелые частицы, обладающие низким потенциалом ионизации и малой тепловой скоростью, ионизируются в граничной области шнура и выбрасываются из шнура постоянным электрическим полем.

Теперь обратимся к рассмотрению такого случая, когда в объеме шнура потенциальная энергия иона меньше, чем кинетическая энергия нейтральной частицы. В этих условиях ионы  $\alpha$ -го сорта, которые возникают в области  $z_{\alpha 0} < |z| < b$ , покидают шнур под действием электрического поля, а возникающие в области  $|z| < z_{\alpha 0}$  попадают в центральную часть шнура. Здесь величина  $z_{\alpha 0}$  определена уравнением  $\mathcal{E}_{\alpha}(z_{\alpha 0}) = \phi(z_{\alpha 0})$ . Можно показать, что при  $\beta T / T_e < n_{2b} / n_{1b} \ll 1$  справедливы следующие оценочные соотношения

$$3\mathcal{E}_1(z_{10}) / T \approx \beta^{2/3} \ln(n_{2b} T_e / \beta n_{1b} T),$$

$$3\mathcal{E}_2(z_{20}) / T \approx \ln(n_{2b} T_e / \beta^{1/3} n_{1b} T).$$

Используя эти соотношения, из формулы (1) получим

$$n_{1i}(0) / n_{2i}(0) \approx (n_{1b} T \beta / n_{2b} T_e) \beta^{2/3} (T_e / T \beta^{1/3}). \quad (3)$$

Отсюда следует, что в условиях, когда на границе горячего шнура имеем  $n_{2b} > n_{1b} \beta T / T_e$  и при этом достаточно велик параметр  $\beta$ , концентрация тяжелых ионов в объеме шнура мала по сравнению с концентрацией легких ионов.

Укажем, что в случае экспериментов [1, 2], когда легкая примесь состоит из атомов водорода (или его изотопов), эффективное самоочищение горячего шнура от тяжелых частиц приводит к тому, что в плазме практически не возникают многозарядные ионы. Таким образом, отсутствие линий многократно ионизованных атомов в спектре излучения шнура отнюдь не означает, что плазменный шнур имеет низкую температуру электронов, как это считают авторы работы [4].

Определим теперь как зависят потери энергии горячего шнура от состава газа. Из уравнения (1) для потоков ионов на границе горячего шнура можно получить следующее соотношение  $\sum_a M_a^{1/2} j_{ai} \approx n_e(0) T_e^{1/2}$ , из которого следует, что величина  $\sum_a M_a^{1/2} j_{ai}$  инвариантна относительно состава смеси. Отсюда видно, что поток электронов из шнура, равный суммарному потоку ионов ( $j_e = \sum_a j_{ai}$ ) тем меньше, чем незначительнее поток легких ионов по сравнению с потоком тяжелых ионов. Ввиду того, что плазменный шнур находится в динамическом равновесии с окружающим газом и потоки ионов каждого сорта соответственно равны встречным потокам нейтральных частиц, влетающих в шнур с тепловой скоростью, то условие малости потока легких ионов можно записать в виде  $n_{2b} / M_2^{1/2} \ll n_{1b} / M_1^{1/2}$ . При этом потери энергии шнура ( $\sim T_e j_e$ ) окажутся в  $(M_1 / M_2)^{1/2}$  раз меньше, чем в случае, когда шнур образуется в чистом легком газе.

Заметим, что относительное содержание нейтральных компонентов смеси вдали от шнура и на границе горячего шнура, вообще говоря, неодинаково. Дело в том, что возникающий на границе горячей плазмы, ионный поток может оказывать фильтрующее действие на газ, если сечение столкновения иона с нейтральной частицей инородного газа отличается от сечения столкновения с частицей собственного газа. В условиях, когда в газе содержание примеси настолько мало, что конвекционным давлением ионов примеси можно пренебречь, плотность основного газа уменьшается у границы шнура, как и в случае однородного газа [3], в  $\gamma \approx \pi (T_e / T)^{1/2}$  раз по сравнению с плотностью газа вдали от шнура. При этом нейтральные частицы примеси могут проникать к границе шнура практически беспрепятственно, если сечение столкновения нейтральных частиц с ионами инородного газа значительно меньше, чем с ионами собственного газа (эффект перезарядки). В этом случае имеем  $n_{1\infty} / n_{2\infty} \approx \gamma n_{1b} / n_{2b}$ .

Оценки показывают, что в экспериментах [1, 2] режим "свободного полета" иона осуществляется лишь в "двойном слое", т.е. в граничной области, где плотность горячей плазмы резко спадает. Однако, следует отметить, что результаты, полученные в настоящей работе справедливы и в этих условиях, когда длина свободного пробега иона мала по сравнению с радиусом шнура, но значительно больше, чем толщина "двойного слоя". Дело в том, что формирование потока плазмы из шнура и самоочищение шнура от тяжелых частиц происходит в основном в граничном "двойном слое" и поэтому эти явления несущественно зависят от того, как движутся ионы в центральной части шнура, в диффузионном режиме или в режиме "свободного" полета".

Итак, если шнур получен в тяжелом газе с легкой примесью, то при условии  $\beta T / \gamma T_e < n_{2\infty} / n_{1\infty} \ll (1/\gamma)(M_2/M_1)^{1/2}$  в объеме шнура в основном имеются легкие ионы, а в образовании граничного "двойного слоя" главную роль играют тяжелые ионы.

Автор благодарит В.П.Силина за плодотворное обсуждение результатов и А.В.Гуревича за полезное замечание.

ВНИИ физико-технических  
и радиотехнических измерений

Поступила в редакцию  
14 ноября 1979 г.  
После переработки  
27 февраля 1980 г.

### Литература

- [1] П.Л.Капица. ЖЭТФ, 57, 1801, 1969.
  - [2] П.Л.Капица, С.И.Филимонов. ЖЭТФ, 61, 1016, 1971.
  - [3] Ю.Р.Алاناмян. ЖЭТФ, 76, 2046, 1979.
  - [4] Б.М.Дымшиц, Я.П.Корецкий. Оптика и спектроскопия, 33, 32, 1972.
-