

К СОЗДАНИЮ ПРОТЯЖЕННОГО СВЧ РАЗРЯДА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

В. Н. Слинко, С. С. Сулакшин, Л. В. Сулакшина

В работе [1] продемонстрирован новый подход к возбуждению эксимерного лазера мощным СВЧ импульсом. В качестве источника накачки использовался релятивистский магнетрон, запитываемый от сильноточного наносекундного электронного ускорителя. Перспективность данного направления связана с большой энергетикой ускорителя, возможностью полного поглощения СВЧ мощности в плазме разряда, решении проблемы разделительной фольги в лазере. При этом возможен рост удельного энерговклада в активную среду, а объем разряда может быть увеличен до необходимого, поскольку размеры волновода сверху практически не ограничены. Однако в [1] КПД генерации не превышал 0.5 %, что было связано с неоптимальной электродинамической структурой для ввода СВЧ мощности в плазму. Действительно, в [1], следуя работе [2], использовалась структура, показанная на рис. 1.

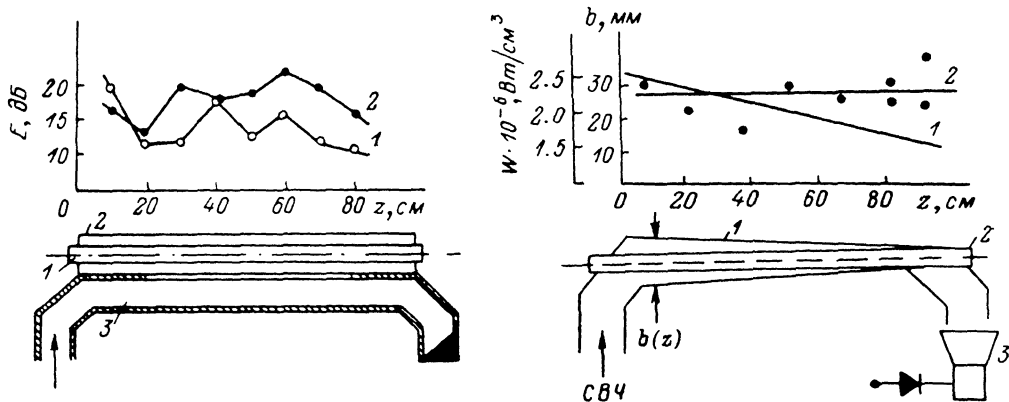


Рис. 1. Схема электродинамической структуры ввода СВЧ мощности в плазму типа протяженного направленного ответвителя. Распределение напряженности поля в разрядной трубке для вторичного плеча в виде отрезка волновода (1) и отрезка запредельного волновода (2).

Рис. 2. Схема электродинамической структуры ввода СВЧ мощности в режиме бегущей волны. Профиль узкой стенки (1), распределение СВЧ энерговклада в плазму вдоль продольной оси (2).

Газоразрядная трубка 1 помещалась во вторичном плече 2 протяженного направленного ответвителя, представляющего собой отрезок прямоугольного волновода 72×34 мм. Из первичного волновода 3 СВЧ мощность ответвлялась через конусную протяженную щель связи в общей узкой стенке. Профиль щели подбирался экспериментально [3] с целью равномерного по длине ответвления мощности. Однако измерения, выполненные в [3], были проделаны на макете, не учитывающем существенные детали, в частности глухие торцевые стенки во вторичном плече.

На рис. 1 приведено распределение напряженности поля в 10-см диапазоне длин волн вдоль газоразрядной трубки, выполненное непосредственно в устройстве, в котором получалась лазерная генерация в [1]. Измерение проводилось методом пробного тела.

Распределение поля вдоль трубки резко неоднородно. Перепад напряженности поля достигает нескольких раз. Причина неоднородности заключалась в резонансных свойствах вторичного плеча и образовании нерегулярной системы стоячих волн. Исправить распределение поля уменьшением широкой стенки вторичного плеча до размеров запредельной не удалось (рис. 1). Такое распределение поля привело в [1] к неоднородному вдоль направления усилению разряду и в результате невысокому КПД генерации. Кроме того, щель связи, выполненная в узкой стенке, не обладает необходимой электрической прочностью, что делает данную структуру непригодной для мощной накачки лазера.

Вместе с тем создание однородного протяженного СВЧ разряда и увеличение электрической прочности возможны в структуре, показанной на рис. 2. Рассмотрим ее. Предлагаемая

структура представляет собой прямоугольный волновод 1 с сужающейся по направлению распространения СВЧ волны узкой стенкой. По центру вдоль волновода помещена газоразрядная трубка 2 с плазмой (З — измеритель проходящей мощности). В отличие от структуры, показанной на рис. 1, возбуждение плазмы в данном случае осуществляется в режиме бегущей волны. КСВ структуры при моделировании плазмы в трубке поглотителем, в качестве которого использовалась вода, составил 1.1.

В волноводе с неоднородно-поглощающей средой СВЧ мощность, переносимая в некотором сечении, имеет вид

$$P(z) = P_0 e^{-\int_0^z \alpha'(z') dz'} \quad (1)$$

где P_0 — мощность на входе, $\alpha(z')$ — текущее значение коэффициента затухания, z — продольная координата.

Мощность, вкладываемая в плазму на отрезке dz , равна

$$dQ = -(dP/dz) dz.$$

Равномерный по длине волновода энерговклад в плазму соответствует условию

$$\frac{dP(\alpha(z), z)}{dz} = \text{const.}$$

Дважды дифференцируя выражение (5), получаем дифференциальное уравнение, описывающее зависимость коэффициента затухания в волноводе от продольной координаты

$$\frac{d\alpha(z)}{dz} - \alpha^2(z) = 0.$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$\alpha(z) = -1/(z + c),$$

где c — константа интегрирования. При $z=0$ $\alpha(z) = \alpha_0$, где константа α_0 — коэффициент затухания в волноводе с неизменяющимся сечением. Отсюда $c = -1/\alpha_0$ и искомая зависимость

$$\alpha(z) = \alpha_0/(1 - \alpha_0 z). \quad (2)$$

Такой характер изменения коэффициента затухания в прямоугольном волноводе с трубкой, заполненной плазмой и расположенной вдоль его оси, можно задать, соответственно изменяя ширину узкой стенки волновода. Это следует из результатов работы [4], в которой получено выражение для коэффициента затухания в рассматриваемой системе

$$\alpha = \frac{2\pi D^2}{k+1} \frac{\Lambda}{\lambda^2} \frac{S_1}{S_0} \frac{\eta\chi}{\chi^2 + (\eta-1)^2}, \quad (3)$$

где

$$D = \frac{4\epsilon d^2}{\epsilon(d^2+1) + d^2 - 1}, \quad k = \epsilon \frac{\epsilon(d^2-1) + d^2 + 1}{\epsilon(d^2+1) + d^2 - 1},$$

ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость материала трубки; $a = R_2/R_1$; R_1 и R_2 — внутренний и внешний радиус трубки; Λ, λ — длина волны в волноводе и в свободном пространстве; S_1 — площадь поперечного сечения плазмы; $S_0 = a b$; a, b — размеры широкой и узкой стенки прямоугольного волновода; $\eta = \omega_0^2/\omega^2(k+1)$; ω_0 — частота ленгмюровских колебаний в плазме; ω — частота СВЧ колебаний; $\chi = \nu/\omega$; ν — частота электрон-атомных соударений.

Как следует из формулы (3), в волноводной структуре с неизменяющимся сечением коэффициент затухания постояен и обратно пропорционален размеру узкой стенки волновода, т. е.

$$\alpha_0 = A/b_0,$$

где

$$A = \frac{2\pi D^2}{k+1} \frac{\Lambda}{\lambda^2} \frac{S_1}{a} \frac{\eta\chi}{\chi^2 + (\eta-1)^2},$$

b_0 — размер узкой стенки волновода.

Тогда в волноводной структуре с изменяющейся величиной узкой стенки коэффициент затухания можно представить в виде

$$\alpha(z) = A/b(z). \quad (4)$$

Из (2) и (4) находим

$$b(z) = b_0(1 - \alpha_0 z).$$

Потребовав, чтобы СВЧ мощность на длине структуры вкладывалась в плазму полностью, можно получить, что $\alpha_0 = 1/l$, где l — длина волноводной структуры. В результате получаем

$$b(z) = b_0(1 - z/l).$$

Таким образом, равномерно сужая волновод по узкой стенке, можно получить равномерный вдоль оси волновода вклад СВЧ мощности в плазму.

Соответствующий профиль волновода по узкой стенке приведен на рис. 2. Заметим, что СВЧ разряд на стадии установления, как правило, распространяется от места его инициирования навстречу СВЧ волне [5]. В силу того что в узкой части структуры напряженность поля до возникновения разряда наибольшая, разряд первоначально инициируется именно там и развивается навстречу СВЧ волне. Таким образом, данная структура согласована с присущим СВЧ разряду режимом установления по пространству.

В ходе апробации структуры экспериментально измерялось распределение вложенной в плазму СВЧ мощности. СВЧ импульс длительностью 16 нс, мощностью до 500 МВт, с длиной волны 10 см транспортировался по вакуумированному волноводу (рис. 2) на основном типе колебаний H_{10} . Кварцевая газоразрядная трубка внутренним диаметром 10 мм заполнялась смесью газов $Ne-Xe-CCl_4$ — 300 : 60 : 1 при полном давлении 1.5 атм. Перед наполнением осуществлялась вакуумная откачка до давления 10^{-2} мм рт. ст. Газы использовались высокой чистоты. Размеры структуры составляли: длина 100 см, сечение волновода на входе 72×34 мм, на выходе 72×17 мм. Величина $b(l)$ была ненулевой и определялась внешним диаметром разрядной трубки, поэтому часть мощности проходила через структуру непоглощенной. Измерение проходящей мощности проводилось с помощью рупорной антенны с калиброванной связью, волноводно-коаксиального перехода и калиброванного по мощности лампового детектора (рис. 2). Ее величина не превышала 9 МВт или 2 % от падающей. При увеличении давления смеси до 3 атм прошедшая мощность падала до 0.3 % от падающей. Распределение вложенной в плазму мощности измерялось с помощью калориметра, помещаемого в газ вне области скин-слоя для того, чтобы не возмущать СВЧ поля. Калориметр калибровался при помощи импульсного нагрева энергии известной величины в тех же условиях, для которых проводились измерения. Длина калориметра 10 см, распределение мощности вдоль трубки измерялось путем его перемещения.

Результаты измерения приведены на рис. 2. Неоднородность энерговклада в плазму разряда по длине структуры не превышает 14 %.

Таким образом, исследованная электродинамическая структура для ввода СВЧ мощности в плазму атмосферных давлений позволяет осуществить эффективное и однородное возбуждение протяженного объема.

В заключение авторы благодарят за помощь в эксперименте и полезные обсуждения П. Ю. Чумерина, Ю. Г. Юшкова, А. С. Сулакшина.

Литература

- [1] Диденко А. Н., Слинко В. Н., Сулакшин А. С., Сулакшин С. С. Письма в ЖТФ, 1986, т. 12, № 20, с. 1245—1249.
- [2] Mendelson A. J., Normandin R., Harris S. E., Young J. F. Appl. Phys. Lett., 1981, v. 38, N 8, p. 603—606.
- [3] Чумерин П. Ю. ПТЭ, 1984, № 5, с. 130—131.
- [4] Пономарев В. Н., Солнцев Г. С. ЖТФ, 1966, т. 36, № 8, с. 1376—1377.
- [5] Райзер Ю. П. Лазерная искра и распределение разрядов. М.: Наука, 1974, 308 с.

Научно-исследовательский
институт ядерной физики
при Томском политехническом институте
им. С. М. Кирова

Поступило в Редакцию
4 января 1987 г.
В окончательной редакции
22 мая 1987 г.