

Физико-технический  
институт им. А.Ф. Иоффе  
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию  
4 августа 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 19

12 октября 1988 г.

## О ПОЛНОМ ПОГЛОЩЕНИИ МОЩНОГО СВЧ ИМПУЛЬСА В В СТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ

В.Н. С л и н к о, Л.В. С у л а к ш и н а,  
С.С. С у л а к ш и н

Мощные СВЧ импульсы, в особенности получаемые с помощью релятивистских генераторов, перспективны для возбуждения эксимерных и иных импульсных газовых лазеров [1-3]. Одним из основных здесь является вопрос об эффективности энерговода СВЧ импульса в плазму. Ранее сообщалось [4], что на мегаваттном уровне СВЧ мощности экспериментальный КПД энерговода достигал 80-90%. Для субгигаваттных мощностей СВЧ импульсов вопрос оставался открытым.

В настоящем сообщении анализируется вопрос о взаимодействии СВЧ импульса со столкновительной плазмой. Получено, что поглощение может достигать 100%.

Плазма активных сред газовых лазеров атмосферного давления характеризуется значениями электронной концентрации в диапазоне  $N = (10^{13} - 10^{17}) \text{ см}^{-3}$  и частотами соударений  $\nu = 10^{12} - 10^{13} \text{ с}^{-1}$ . В 10 см - диапазоне длин волн это означает, что  $\frac{N}{N_c} = 10^2 - 10^6$ ,  $\frac{\nu}{\omega} = 10^2 - 10^3$ , где  $N_c = \frac{m\omega^2}{4\pi e^2}$  - критическая электронная концентрация,  $\omega$  - частота СВЧ волны. В [5] экспериментально показано, что указанные значения  $\frac{N}{N_c}$  и  $\frac{\nu}{\omega}$  в самостоятельном микросекундном СВЧ разряде в газах атмосферного давления реализуются. Соответственно, плазма в этом случае является столкновительной и слабо ионизованной. В отличие от бесстолкновительного случая, когда при достижении критической электронной концентрации возникает полная отсечка СВЧ волны, коэффициент отражения в районе  $\frac{N}{N_c} \sim 1$  существенно падает, а полное отражение может произойти только при  $\frac{N}{N_c} = 1 + \frac{\nu^2}{4\omega^2}$ , что для самостоятельного СВЧ разряда практически недостижимо. Наиболее подходящей электродинамической структурой для ввода СВЧ мощности в разряд является волновод с расположенной по центру продоль-

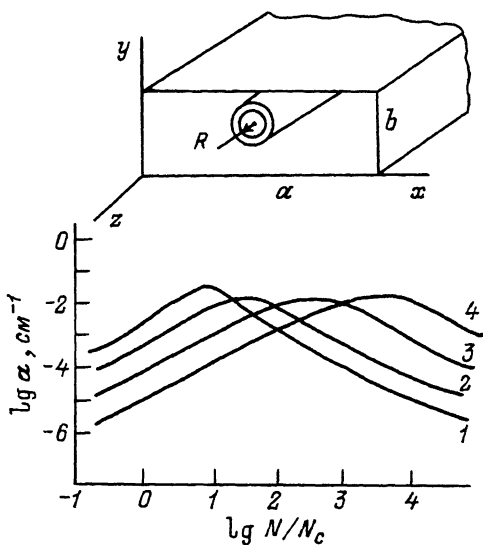


Рис. 1. Расчетная зависимость коэффициента поглощения в плазменной нагрузке в показанной сверхструктуре ( $\alpha = 7.2$  см,  $b = 3.4$  см,  $R = 0.5$  см,  $\lambda = 10$  см) от электронной концентрации в плазме. 1)  $\frac{\nu}{\omega} = 1$ , 2)  $\frac{\nu}{\omega} = 10$ , 3)  $\frac{\nu}{\omega} = 100$ , 4)  $\frac{\nu}{\omega} = 1000$ .

но газоразрядной трубкой [2] (рис. 1). Коэффициент затухания для столкновительного случая в такой системе имеет вид [6]:

$$\alpha = k \frac{\Lambda}{\lambda^2} \frac{S_1}{S_0} \frac{N}{N_c} \frac{1}{\left(1 - \frac{N}{N_c}\right)^2 + \left(\frac{\nu}{\omega}\right)^2}, \text{ где}$$

$k$  - геометрический параметр;  $\Lambda$ ,  $\lambda$  - длина волны соответственно в свободном волноводе и свободном пространстве;  $S_0$  - площадь волновода;  $S_1$  - площадь плазмы.

Из расчетных зависимостей рис. 1 видно, что при длине разряда около метра и характерных (и необходимых) для лазерного эксперимента значениях  $\frac{N}{N_c}$  и  $\frac{\nu}{\omega}$  поглощение приближается к полному.

Имеется „резонансный” характер зависимостей, связанный с возрастанием отражения от плазмы и уменьшением в ней поглощения. Вопрос связан с тем, успеет ли за наносекундные времена в самостоятельном СВЧ разряде развиться необходимо большая электронная концентрация.

Эксперименты проводились при следующих условиях.  $\lambda = 10$  см, длительность импульса  $\tau_{0.5} = 16$  нс, энергозапас СВЧ импульса до  $W = 3.2$  Дж. Плазменная нагрузка имела длину 100 см, диа-

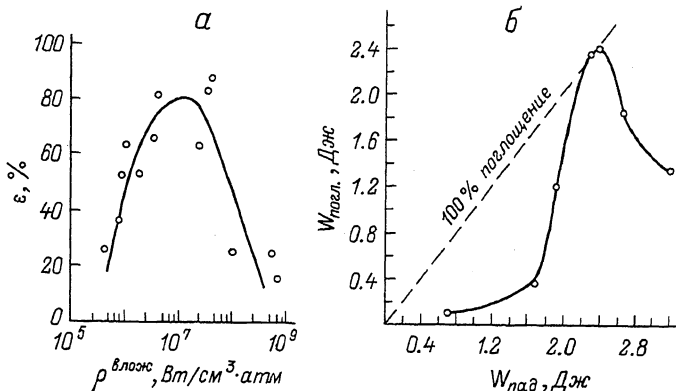


Рис. 2. а) Зависимость вложенной в смесь  $Ne-Kr-F_2 = 250-70-3$  при  $P = 1$  атм СВЧ энергии от падающей. б) Эффективность энерго-ввода СВЧ импульса в плазму самостоятельного разряда в воздухе от удельной мощности возбуждения.

метр 1 см и располагалась в прямоугольном вакуумированном волновомде  $72 \times 34$  мм<sup>2</sup>. СВЧ импульс распространялся на  $H_{10}$  моде. Энерговвод в плазму измерялся специальным калориметром, помещаемым непосредственно внутрь газоразрядной трубки. Все элементы калориметра для невозмущения разряда располагались по центру газоразрядной трубки вне скин-слоя, величина которого составляла [7]

$$\delta = 2 \left[ \frac{2e^2 \mu_0 N \nu \omega}{m (\omega^2 + \nu^2)} \right]^{-1/2} \approx 1 \text{ мм.}$$

При измерениях радиационный вынос энергии из трубки учитывался. Падающая энергия СВЧ импульса измерялась калориметром полного поглощения, обеспечивающим поглощение 99% падающей энергии. Регулировка энергии падающего СВЧ импульса осуществлялась изменением напряженности магнитного поля релятивистского магнетрона, использованного в качестве генератора [8]. Исследовался энерговвод в рабочую смесь  $KrF$  лазера  $Ne-Kr-F_2 = 250-70-3$  при полном давлении 1 атм и некоторые другие газы. На рис. 2, а приведены результаты измерений для  $Ne-Kr-F_2$ , из которых следует, что поглощение носит, аналогично рис. 1, „резонансный” характер и, что самое существенное, в максимуме поглощения является полным, с экспериментальной точностью достигая 100%. Отметим, что падающая мощность  $W$  определяет значение электронной концентрации в плазме и, в этом смысле, корреляция данных на рис. 1 и рис. 2, а очевидна. С другой стороны, более тесная связь должна быть не между падающей мощностью и электронной концентрацией, а между удельной вложенной мощностью в расчете на одну частицу и электронной концентрацией. С целью демонстрации этого на

рис. 2,6 приведены результаты измерения эффективности поглощения в воздухе (определяемой, как отношение СВЧ мощности вложенной в плазму к падающей), причем варьировалось как давление воздуха (в диапазоне от 3 торр до 1 атм), так и вложенная энергия (до 2.8 Дж) СВЧ импульса. Кривая также носит экстремальный характер, достигая в максимуме около 90%.

В заключение авторы благодарят А.С. Сулакшина за помощь в эксперименте.

### Л и т е р а т у р а

- [1] Диденко А.Н., Петров В.М., Слинко В.Н., Сулакшин А.С., Сулакшин С.С. - Письма в ЖТФ, 1986, т. 12, в. 20, с. 1245.
- [2] Ваулин В.А., Слинко В.Н., Сулакшин С.С. - Квантовая электроника, 1988, т. 15, № 1, с. 124.
- [3] Слинко В.Н., Сулакшин А.С., Сулакшин С.С. - Квантовая электроника, 1988, т. 15, № 2, с. 268.
- [4] Mendelson A.J., Normandin R., Harris S.E., Young J.F. - Appl. Phys. Lett., 1981, v. 38, N 8, p. 603.
- [5] Диденко А.Н., Петров В.М., Слинко В.Н., Сулакшин С.С., Юшков Ю.Г. Параметры плазмы мощного импульсного СВЧ разряда в газах высокого давления. Рук. деп. ВИНТИ № 4205-В86.
- [6] Пономарев В.Н., Солнцев Г.С. - ЖТФ, 1966, т. 36, № 8, с. 1377.
- [7] Голант В.Е. Сверхвысокочастотные методы диагностики плазмы. М.: Наука, 1968.
- [8] Диденко А.Н., Сулакшин А.С., Фоменко Г.П., Штейн Ю.Г., Юшков Ю.Г. - Письма в ЖТФ, 1978, т. 4, № 1, с. 10.

Поступило в Редакцию  
20 января 1988 г.