

04;09;12

## ЭФФЕКТИВНЫЙ ВОЗБУДИТЕЛЬ РАЗРЯДА НА ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЕ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

© А.Л.Витарев, О.А.Иванов, А.Л.Кольско

1. Интерес к газовым разрядам, поддерживаемым с помощью поверхностных электромагнитных волн (ПВ), обусловлен перспективами использования таких разрядов в различных практических приложениях (от газовых лазеров до напыления алмазных пленок) [1-4]. Разряд на ПВ является привлекательным для тех приложений, где требуется создание протяженных столбов неравновесной плазмы.

Известен ряд устройств, позволяющих возбуждать разряд на ПВ в различных частотных диапазонах, к которым относятся: робокс [5] в диапазоне частот 1-300 МГц, сурфатрон в диапазоне 0.3-3 ГГц [1], в области более высоких частот (свыше 1 ГГц) — сурфагайд [6]. Величина закачиваемой в разряд с помощью сурфатрона или робокса СВЧ мощности ограничена электрической прочностью коаксиального кабеля и обычно не превышает одного киловатта. Волноводные конструкции (сурфагайды) позволяют использовать более высокие уровни СВЧ мощности. В этих устройствах плазма создается в трубке, пересекающей волновод по широкой стенке так, что ось трубки параллельна вектору электрического поля в волноводе. Для увеличения напряженности электрического поля в области возбуждения ПВ используется сужение волновода.

В настоящее время достаточно хорошо исследованы режимы поддержания разрядов на ПВ при относительно низких частотах возбуждения  $f \leq 2.45$  ГГц. Импульсные режимы возбуждения поверхностной волны и разряд на ПВ, создаваемый излучением более высоких частот, изучены менее полно.

Концентрация электронов в разрядной плазме, формируемой поверхностной волной, превышает величину  $N_e = N_c(1 + \epsilon_g)$  (где  $N_c = m(\nu^2 + \omega^2)/4\pi e^2$  — критическая концентрация,  $m$  и  $e$  — масса и заряд электрона,  $\omega = 2\pi \cdot f$ ,  $\nu$  — частота соударений электрон-молекула,  $\epsilon_g$  — диэлектрическая проницаемость материала трубки, для частоты  $f = 40$  ГГц  $N_c \geq 2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>) и, следовательно, существенно возрастает с увеличением частоты возбуждающего поля в области  $\nu < \omega$ . При этом возрастает и необходимая для поддержания разряда СВЧ мощность. Так, согласно [6], дли-

на разряда  $L_p$  определяется выражением  $L_p = Af^{-m} P_a^p$ , где  $A$  — не зависящая от частоты и мощности константа, а  $P_a$  — поглощаемая в разряде мощность. Значения  $m$  и  $p$  обычно лежат в диапазоне  $0.5 \leq p \leq 1$ ,  $1 \leq m \leq 2$ . Поэтому для создания протяженных столбов плазмы в коротковолновом диапазоне возникает необходимость использования мощных импульсных СВЧ источников.

В настоящее время, насколько нам известно, максимальная частота, на которой удалось получить разряд на ПВ, не превышает 10 ГГц [7,8]. В первую очередь, это связано с тем, что использование традиционных конструкций возбуждателей поверхностных волн на высоких частотах и больших уровнях СВЧ мощности затруднено из-за малых геометрических размеров волноводов. Так, для сурфагайда, предложенного в работе [6], внешний диаметр разрядной трубки не должен превышать четверти ширины волновода, что для излучения с длиной волны  $\lambda = 8$  мм составляет менее 2 мм и вряд ли представляет интерес для широкого практического использования. Другая конструкция возбуждателя, используемая для создания разряда на ПВ излучением большой мощности трехсантиметрового диапазона ( $E$ -тройник с согласующим поршнем в  $H$ -плече [8]), также малоприспособна для более коротких длин волн.

В данной работе на основе преобразователя волн  $H_{11}^{\circ} \rightarrow H_{01}^{\circ}$  [9] круглого волновода, предлагается новый тип возбуждателя, позволяющего создавать импульсный разряд на ПВ в миллиметровом диапазоне длин волн.

2. В экспериментах возбуждение поверхностной волны осуществлялось излучением восьмимиллиметрового диапазона. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В качестве СВЧ генератора использовался магнетрон с выходной мощностью  $P = 30-60$  кВт. Длительность СВЧ импульса изменялась в пределах  $t = 0.5 - 10$  мкс, а частота следования импульсов  $F = 10 - 1000$  Гц. Излучение магнетрона, генерируемое в виде моды  $H_{10}^{\square}$  прямоугольного волновода сечением  $3.4 \times 7.2$  мм<sup>2</sup>, первоначально трансформировалось в моду  $H_{11}^{\circ}$  круглого волновода, а затем с помощью преобразователя волн [9] в моду  $E_{01}^{\circ}$  сверхразмерного (диаметр  $D = 16$  мм) круглого волновода. Разряд создавался в кварцевых трубках с внутренним диаметром  $2r = 4, 7$  мм, внешним диаметром  $2R = 6, 9$  мм и длиной  $L = 30$  см, располагаемых вдоль оси круглого волновода (при экспериментах с толстой трубкой диафрагма не использовалась). Ось трубки была параллельна также вектору электрического поля в волноводе, по которому осуществлялся подвод СВЧ энергии к возбуждателю. Трубка наполнялась различными газами (воздух, аргон, гелий), давление газа в трубке варьировалось в диапазоне  $p = 0.1 - 60$  Тор.

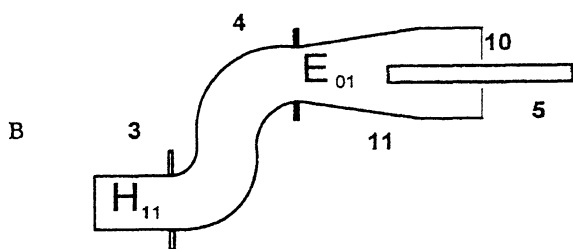
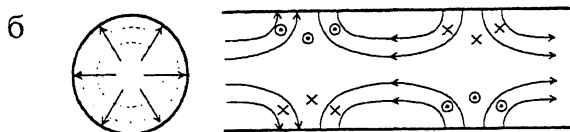
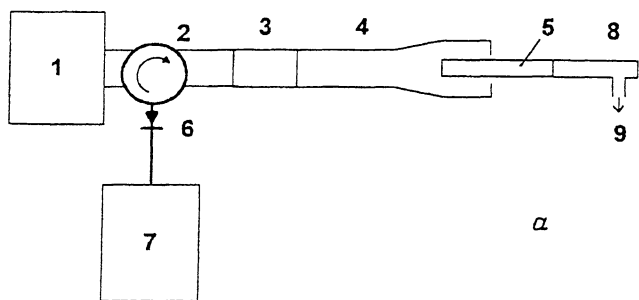


Рис. 1.

*а* — схема экспериментальной установки; *б* — структура магнитного  $H$ (---) и электрического  $E$ (—) поля на выходе преобразователя моды  $H_{11}^{\circ} \rightarrow E_{01}^{\circ}$ ; *в* — конструкция возбуждителя поверхностных волн. 1 — СВЧ генератор, 2 — направленный ответвитель, 3 — преобразователь моды  $H_{10}^{\square} \rightarrow H_{11}^{\circ}$ , 4 — преобразователь моды  $H_{11}^{\circ} \rightarrow E_{01}^{\circ}$  круглого волновода, 5 — разряд, 6 — СВЧ детектор, 7 — осциллограф, 8 — кварцевая трубка, 9 — откачка, 10 — диафрагма, 11 — рупор.

Таким образом, для возбуждения поверхностной волны использовалась мода  $E_{01}^{\circ}$  круглого сверхразмерного волновода. Структура этой моды такова (рис. 1), что максимум компоненты  $E_z$  электрического поля находится в центре волновода, а направление  $E_z$  совпадает с осью волновода и газоразрядной трубки. Ориентация других компонент электромагнитного поля ( $E_r$  и  $H_{\varphi}$ ) также близка к структуре полей в аксиально симметричной поверхностной волне. Поэтому мода  $E_{01}^{\circ}$  круглого волновода представляется привлекательной для эффективного возбуждения поверх-

ностной волны. Кроме того, такая конструкция возбуждителя обеспечивает трансформацию падающего излучения в поверхностную волну на всей длине, находящейся в выходном волноводе трубки, а не только в области сужения волновода, как это происходит в сурфагайде [6].

Конструкция возбуждителя и структура поля в волноводе на выходе преобразователя приведена на рис. 1. Остановимся коротко на конструкции возбуждителя. Преобразователь волн  $H_{11}^{\circ} \rightarrow E_{01}^{\circ}$  [9] выполнен на основе круглого изогнутого волновода (диаметром 8 мм) со знакопеременной кривизной. Для обеспечения связи волн  $H_{11}^{\circ}$  и  $E_{01}^{\circ}$  изгиб волновода находился в плоскости вектора напряженности электрического поля волны  $H_{11}^{\circ}$ . Согласно [9], такой преобразователь обладает большой широкополосностью и обеспечивает эффективность преобразования  $\eta = 0.9 - 0.99$  в широком диапазоне параметра  $kD = 2.7 - 8.5$  ( $k = 2\pi/\lambda$ ).

На выходе возбуждителя устанавливалась тонкая (толщиной 70 мкм) металлическая диафрагма с диаметром  $D_1$ , несколько превышающим диаметр газоразрядной трубки. Диаметр отверстия диафрагмы подбирался таким образом, чтобы значительная часть мощности на моде  $E_{01}^{\circ}$ , в отсутствие разряда, отражалась от диафрагмы. В этом случае формируемая в возбуждители стоячая волна существенно облегчала зажигание разряда в широком диапазоне давлений газа, этому способствовало и усиление поля на краях диафрагмы (при высоком уровне СВЧ мощности разряд возбуждался и без диафрагмы). В то же время поверхностная волна, распространяющаяся вдоль трубки и локализованная вблизи ее стенок, свободно проникала через отверстие тонкой диафрагмы. Таким образом, возбуждитель фактически подобен сурфагайду [6], в котором, однако, диафрагма и отверстие связи ориентированы вдоль направления распространения электромагнитной волны в волноводе. При этом, как и в сурфагайде, для эффективного возбуждения ПВ существуют оптимальные соотношения между радиусом разрядной трубки и диаметрами выходного волновода и диафрагмы. Оптимальные соотношения находились в диапазоне  $D/2R \sim (1.3 - 2)$ ,  $D_1/2R \sim (1.2 - 1.5)$ . Кроме того, эксперименты показали, что эффективное возбуждение наблюдается, когда диаметр выходного волновода в области расположения трубки не сильно превышает длину возбуждающей волны ( $D/\lambda \leq 2$ ). Дополнительное согласование может осуществляться изменением длины, находящейся в возбуждители части газоразрядной трубки. Описанная конструкция оказалась весьма эффективной при высоком уровне СВЧ мощности, когда не требуется значительного дополнительного увеличения напряженности электрического

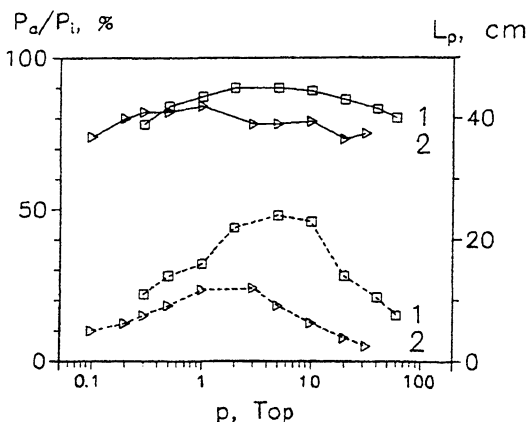


Рис. 2. Зависимость эффективности поглощения (—) и длины разряда (---) от давления аргона при длительности СВЧ импульса  $\tau = 5$  мкс:

1 —  $2R = 9$  мм,  $P_i = 50$  кВт, 2 —  $2R = 6$  мм,  $P_i = 40$  кВт.

поля в области возбуждения ПВ и необходимо избежать пробоя газа в волноводе, вне разрядной трубки.

Определение эффективности возбуждителя проводилось по схеме, приведенной на рис. 1. Отраженная от возбуждителя СВЧ мощность через циркулятор поступала на калиброванный кристаллический детектор. Мощность  $P_a$ , поглощаемая в разряде измерялась по разнице между мощностью отраженной от возбуждителя в отсутствие разряда  $P_i$  и при его зажигании  $P_r$ :  $P_a = P_i - P_r$ . Эффективность возбуждения поверхностной волны, определяемая как отношение  $P_a/P_i$ , при различных давлениях аргона представлена на рис. 2.

Измерения показали достаточно высокую эффективность возбуждения в широком диапазоне давлений газа и уровней падающей СВЧ мощности. Некоторое уменьшение поглощаемой мощности на границах исследуемого диапазона давлений связано с возрастанием полей пробоя и соответственно увеличением необходимого для зажигания разряда времени. Более низкая эффективность возбуждения разряда на ПВ в тонкой трубке, по-видимому, обусловлена неоптимальным (для данной трубки) соотношением  $D/2R \sim 2.5$ , при котором СВЧ излучение, распространяющееся по периферии выходного волновода, слабо взаимодействует с плазмой разряда. На рис. 2 приведена также зависимость длины разряда от давления аргона. Эта зависимость при фиксированной длительности СВЧ импульса имеет характерный максимум, определяемый величиной

скорости распространения фронта ионизации в разряде на ПВ при различных давлениях газа [8].

3. Таким образом, в данной работе предложен новый эффективный тип волноводного возбуждателя поверхностных волн для создания протяженных столбов неравновесной плазмы с высокой концентрацией электронов. Показано, что использование моды  $E_{01}^{\circ}$  круглого волновода позволяет создавать импульсный разряд, поддерживаемый поверхностными волнами при существенно более высоких частотах возбуждения, чем в известных ранее конструкциях возбуждателей. Впервые реализован разряд на поверхностной волне в миллиметровом диапазоне длин волн.

Авторы выражают благодарность Д.В. Виноградову за полезные консультации. Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 95-02-05586а).

### Список литературы

- [1] Moisan M., Ferreira C.M., Hajlaoui Y. et al. // Rev. Phys. Appl. 1982. V. 17. P. 707-727.
- [2] Moisan M., Zakrzewski Z. // J. Phys. D.: Appl. Phys. 1991. V. 24. P. 1025-1048.
- [3] Ferreira C.M., Moisan M. (ed.) // Microwave discharges: Fundamentals and Applications, NATO Advanced Research Workshop. Plenum, New York, 1993.
- [4] Borges C.F.M., Moisan M., Gicquel A. // Diamond and Related Materials. 1995. V. 4. P. 149-154.
- [5] Moisan M., Zakrzewski Z. // Приборы для научных исслед. 1987. № 10. С. 108-111.
- [6] Moisan M., Zakrzewski Z., Pantel R., Leprince P. // IEEE Trans. on Plasma Phys. 1984. V. 12. N 3. P. 203-214.
- [7] Abed S., Bouvier A.J. Bouvier A.M. et al. // J. Phys. D.: Appl. Phys. 1982. V. 15. P. 595-604.
- [8] Bohle A., Ivanov O., Kolisko A. et al. // J. Phys. D.: Appl. Phys. 1996. V. 29. N 2. P. 369-377.
- [9] Виноградов Д.В., Денисов Г.Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 1990. Т. 33. В. 6. С. 726-732.

Институт прикладной физики РАН  
Нижний Новгород

Поступило в Редакцию  
14 мая 1996 г.