

дрейфа частиц. Области ЭЦР как в реальном, так и в численном экспериментах соответствовала парабола с вершиной, находящейся в медианной плоскости системы на расстоянии 3 см от ее оси. Численная модель построена в соответствии с методом частиц в ячейке [8, 9]. В начальный момент времени генерировалось однородное распределение частиц плазмы вблизи ЭЦР-поверхности. Начальные энергии электронов и ионов считались близкими к нулю. Распределение СВЧ-электрического поля в области формирования плазмы определялось системой электродов коаксиального резонатора.

Диагностики, используемые в модели, позволяли рассчитывать интенсивность потока частиц в радиальном направлении и энергетические спектры электронов и ионов для различных условий эксперимента. В численных экспериментах наблюдались амбиполярный и градиентный дрейфы частиц, скорости которых зависели от напряженности электрического поля и начальной плотности плазмы. Результаты численных экспериментов позволяют сделать вывод о возможности формирования интенсивных потоков плазмы в радиальном направлении.

Представленные в работе результаты исследований показывают перспективность продолжения работ по изучению параметров плазмы, формируемой в источнике CERA-R, как для его

применения в технологических процессах, так и его использования в качестве источника мягкого рентгеновского излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Л и т е р а т у р а

1. Strong microwave in plasma. V Int. Workshop. — Nizhny Novgorod. Russia. 2002.
2. Microwave Discharge: Fundamentals and Applications. IV Int. Workshop. — Zvenigorod. Russia. 2002.
3. Balmashnov A. A.: Proc. International University Conference "Electronics and Radiophysics of Ultra-High Frequencies". (UHF-99). — St. Petersburg. 1999. P. 432.
4. Asmussen J.: Proc. of Int. Workshop Microwave plasma and its applications. — Zvenigorod. 1994. P. 52.
5. Musil J. Proc. of Int. Workshop "Microwave plasma and its applications". — Zvenigorod. 1994. P. 318.
6. Андреев В. В., Балмашинов А. А., Умнов А. М.// Прикладная физика. 2004. № 6. С. 91.
7. Силин В. П. Параметрическое воздействие излучения большой мощности на плазму. — М.: Наука, 1973.
8. Birdsall C. K., Langdon A. B. Plasma Physics via Computer Simulation. Bristol, Philadelphia: IOP Publishing Ltd. 1995. P. 305.
9. Сигов Ю. С. Вычислительный эксперимент: Мост между прошлым и будущим физики плазмы. — М.: Физматлит. 2001. С. 223.

Статья поступила в редакцию 26 апреля 2005 г.

The peculiarities of microwave plasma creation in CERA-R device

V. V. Andreev, A. A. Balmashnov, A. V. Kalashnikov, A. M. Umnov
Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

Coaxial vacuum cavity and two permanent disk magnets are used to form azimuthally symmetric flux of microwave plasma. It has been found experimentally that the density of plasma created in the device can exceed its critical value. The results of 3D plasma simulation and the experimental evidence point to the feasibility of designing a soft x-ray source on a basis of a developed source of microwave plasma.

УДК 533.924, 537.525

Образование сверхплотной плазмы при СВЧ-пробое диэлектриков

В. А. Иванов, М. Е. Коныжев, В. П. Гавриленко, А. А. Летунов
Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия

Е. А. Окс

Обернский университет, Оберн, Алабама, США

Исследованы безэлектродные разряды, возбуждаемые импульсным сверхвысоко-частотным (СВЧ) излучением (импульсная мощность до 2 МВт, частота колебаний 2 ГГц, длительность импульсов до 10 мкс) на поверхности диэлектриков в вакууме ($\sim 10^{-4}$ Па). Установлено, что наиболее интенсивное оптическое излучение регистри-

руется на стадии безэлектродного СВЧ-пробоя в форме контрагированного разряда на поверхности диэлектриков. Характерная длительность этой стадии СВЧ-разряда составляет около 0,1 мкс. Исследован спектр излучения контрагированного СВЧ-разряда в области характеристической линии Бальмер-альфа (H_α) атомарного водорода (656,3 нм). Экспериментально установлено, что на стадии контрагированного СВЧ-разряда полуширина линии H_α достигает 7 нм. Основной механизм уширения линии — эффект Штарка в электрических микрополях, создаваемых ионами и электронами в плотной плазме контрагированного СВЧ-разряда. На основании экспериментально измеренных профилей линии H_α и соответствующих теоретических расчетов определена максимальная электронная плотность плазмы в контрагированном СВЧ-разряде $\approx 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, которая более чем на семь порядков величины превышает критическую электронную плотность плазмы $4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. По оценкам, электронная температура плазмы контрагированного СВЧ-разряда изменяется в интервале значений от 2 до 10 эВ при характерном диаметре плазмы контрагированного разряда ~ 10 мкм. При этом плотность потока мощности, выделяемой плазмой контрагированного СВЧ-разряда в приповерхностном слое диэлектрика, составляет величину $\sim 1 \text{ МВт/см}^2$, что по крайней мере в 100 раз превышает плотность потока падающей СВЧ-мощности $\sim 10 \text{ кВт/см}^2$. Такое интенсивное взаимодействие плотной плазмы СВЧ-разрядов с диэлектриками приводит к сильным локальным разрушениям на поверхности и в объеме диэлектриков.

Начиная с 1973 г. наблюдается значительный прогресс в развитии фундаментальной и прикладной релятивистской СВЧ-электроники больших мощностей [1]. Этот прогресс сопровождается существенным увеличением мощности и длительности генерируемого импульсного СВЧ-излучения [2]. Перспективное использование высокоинтенсивных импульсных потоков СВЧ-излучения ставит новые задачи реализации: а — эффективного вывода этого излучения из СВЧ-генератора через выходные окна; б — транспортировки СВЧ-излучения от генератора к технологической или исследовательской установке с использованием устойчивых к пробоям волноводных или квазиоптических элементов; в — ввода СВЧ-излучения в установку через вакуумно-герметичные и СВЧ прозрачные окна [3]. Используя ранее для этих целей диэлектрические материалы (полистирол, кварц, тефлон и др.) становятся малоэффективными для интенсивного СВЧ-излучения. При прохождении через эти материалы мощного СВЧ-излучения в вакууме на поверхности и в объеме этих материалов возникают безэлектродные СВЧ-разряды. Сильное взаимодействие плазмы СВЧ-разрядов с диэлектрическими материалами обусловлено поглощением в образующейся плотной плазме значительной части энергии падающего СВЧ-излучения (50—100 %), что приводит к разрушениям на поверхности и в объеме диэлектриков [4]. Для эффективного предотвращения подобных нежелательных эффектов необходимо выявить и исследовать механизмы возбуждения и взаимодействия плазмы СВЧ-разрядов с различными диэлектрическими материалами. Результаты этих исследований позволят разработать методы предупреждения развития и подавления поверхностных СВЧ-разрядов и тем самым увеличить электрическую и тепловую

прочность элементов СВЧ выходных и входных окон, через которые распространяется высокоинтенсивное СВЧ-излучение.

Современное развитие релятивистской СВЧ-электроники демонстрирует широкие возможности генерирования СВЧ-излучения импульсной мощностью до 10 ГВт и длительностью импульса до 1 мкс [5, 6]. При этом возникают новые проблемы, а именно: нахождение эффективного способа для вывода СВЧ-излучения из СВЧ-генератора; транспортировка СВЧ-излучения от генератора к промышленной или экспериментальной установке посредством волноводных или квазиоптических систем; ввод СВЧ-мощности в установки через входные СВЧ прозрачные окна.

Подобные проблемы могут возникать также и при распространении СВЧ-излучения умеренной мощности 0,1—1 МВт в зауженных волноводных системах, широко применяемых в бортовых СВЧ-комплексах связи на обитаемых космических станциях и автономных спутниках.

При прохождении интенсивного СВЧ-излучения сквозь диэлектрические материалы в вакууме возможно возникновение безэлектродных СВЧ-разрядов на поверхности и в объеме этих материалов [7]. В результате возбуждения СВЧ-разрядов и взаимодействия образовавшейся плазмы с диэлектриками могут происходить следующие явления:

существенное кратковременное изменение характеристик диэлектриков;

значительное поглощение энергии СВЧ-излучения в плазме;

быстрое локальное выделение энергии плазмы в диэлектрике;

образование сильных локальных разрушений на поверхности и в объеме диэлектриков.

В связи с этим необходимо исследовать механизмы, посредством которых происходит возбуждение СВЧ-разрядов и их взаимодействие с различными диэлектрическими материалами.

Цели исследований состояли в том, чтобы:

- измерить электронную плотность и оценить электронную температуру в плотной плазме контрагированного разряда на стадии СВЧ-пробоя на поверхности диэлектриков;
- рассчитать тепловые потоки из плотной плазмы контрагированного СВЧ-разряда на поверхность диэлектриков;
- вычислить значение температуры на поверхности диэлектриков в окрестности контрагированного разряда на стадии СВЧ-пробоя;
- определить возможные физические механизмы (обусловленные тепловыми и электрическими эффектами) различных видов локальных разрушений в диэлектриках, взаимодействующих с плотной плазмой контрагированных разрядов на стадии СВЧ-пробоя диэлектриков.

Экспериментальные условия и диагностические средства

Все экспериментальные исследования по взаимодействию безэлектродных СВЧ-разрядов с диэлектриками были выполнены на установке БРУС при высоком вакууме — остаточное давление воздуха в установке не превышало 0,1 мПа. Схема экспериментальной установки БРУС представлена на рис. 1. Импульсное СВЧ-излучение частотой 2 ГГц, длительностью импульса 3 мкс, мощностью до 2 МВт моды H_{10} от магнетрона по системе волноводов транспортировалось к вакуумированному волноводу и вводилось в него через СВЧ прозрачное окно. Вакуумированный волновод имел прямоугольное поперечное сечение с размерами 12×5,8 см и был короткозамкнут плоским металлическим фланцем на своем конце. Падающая СВЧ-волна совместно с отраженной от плоскости фланца СВЧ-волной формировала в вакуумированном волноводе стоячую СВЧ-волну. Диэлектрический образец устанавливался в волноводе в пучность стоячей СВЧ-волны в максимум электрического СВЧ-поля на расстоянии $0,75 \times \lambda = 15$ см ($\lambda = 20$ см — длина волны в волноводе) от плоскости торцевого металлического фланца (рис. 2). При этом диагностическое диэлектрическое окно находилось в узле электрического поля стоячей СВЧ-волны, где величина электрического СВЧ-поля равна нулю. Сигнал огибающей отраженного импульса СВЧ-излучения регистрировался с помощью полупроводникового диодного датчика и СВЧ-антенны, расположенной в волноводном направленном ответвителе, характеризующимся высокой степенью направленности (отношение мощностей отраженного и падающего СВЧ-излучения составляло 45 дБ). Сигнал

огibaющей СВЧ-импульса с диодного СВЧ-датчика записывался 4-канальным цифровым осциллографом типа Tektronix TDS 3014 с временным разрешением 10 нс. Для измерения плавающего потенциала плазмы вблизи поверхности диэлектрика использовался электрический лентгмюровский зонд в виде тонкого графитового стержня, импульсное напряжение с которого (через омический делитель напряжения 1:200) также регистрировалось с помощью осциллографа Tektronix TDS 3014 с временным разрешением 10 нс.

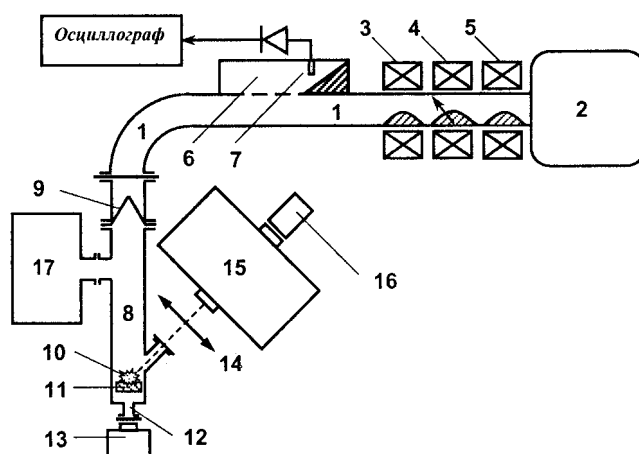


Рис. 1. Схема экспериментальной установки БРУС:

1 — волновод 12×5,8 см; 2 — магнетрон; 3, 5 — магнитоферритовые вентили; 4 — магнитоферритовый аттенюатор; 6 — волноводный ответвитель для регистрации сигнала отраженной СВЧ-мощности; 7 — СВЧ-антенна; 8 — вакуумированный волновод 12×5,8 см; 9 — СВЧ-прозрачное вакуумно-плотное окно; 10 — плазма; 11 — диэлектрический образец; 12 — цилиндрический запредельный патрубок; 13 — фотокамера; 14 — фокусирующая оптическая линза; 15 — монохроматор МДР-2; 16 — фотоумножитель ФЭУ-79; 17 — высоковакуумный магниторазрядный насос НОРД-100

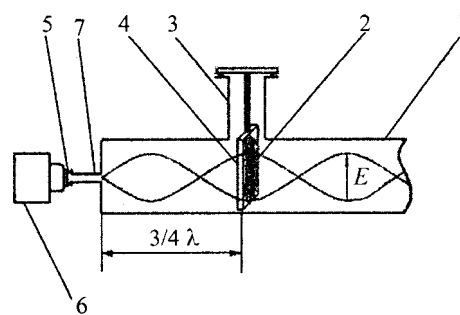


Рис. 2. Схема расположения диэлектрического образца в вакуумированном волноводе установки БРУС:

1 — вакуумированный волновод прямоугольного сечения 12×5,8 см; 2 — плазма СВЧ-разряда; 3 и 7 — цилиндрические запредельные патрубки; 4 — диэлектрический образец; 5 — оптическое окно; 6 — фотокамера; E — электрическое поле стоячей СВЧ-волны; $\lambda = 20$ см — длина волны СВЧ-излучения моды H_{10} в волноводе

Основное внимание в данных экспериментах было уделено спектральным измерениям свечения плазмы на различных стадиях развития СВЧ-разрядов. При этом необходимо было учи-

тивать сильную пространственную неоднородность и нестабильность плазменных контрагированных разрядов на стадии СВЧ-пробоя. Особое внимание было уделено изучению спектров оптического свечения при высоком пространственном разрешении. С этой целью изображение плазмы контрагированного разряда, возбуждаемого на поверхности диэлектрического образца, с помощью линзы диаметром 12 см фокусировалось в плоскости входной щели монохроматора МДР-2 так, чтобы во входную щель шириной 0,1 мм попадала исследуемая часть разряда. В монохроматоре была установлена дифракционная решетка 1200 штрихов/мм. Ширина выходной щели составляла 0,1 мм, а аппаратная функция монохроматора — около 0,4 нм. Спектр излучения плазмы регистрировался по точкам, последовательно переходя от одной длины волны к другой, с набором необходимой статистики. Для каждой спектральной точки исследуемого оптического излучения производилось несколько независимых одиночных импульсов падающего СВЧ-излучения. При этом в каждом отдельном импульсе на стадии СВЧ-пробоя диэлектрика, т. е. в течение времени жизни контрагированного разряда, регистрировалась амплитуда оптического излучения (с помощью фотоумножителя ФЭУ-79 и цифрового осциллографа TDS 3014 с входной активной нагрузкой 50 Ом).

Таким образом, в экспериментах достигалось пространственное разрешение около 0,1 мм, спектральное разрешение 0,4 нм и временное разрешение 10 нс.

В экспериментах в качестве образцов (размеры 70×10×5 мм) использовались диэлектрические монокристаллы LiF, NaCl, KBr, ZrO₂, кварцевое стекло SiO₂, а также образцы из синтетических материалов: фторопласт, полиэтилен, органическое стекло.

Для решения поставленной задачи определения плотности плазмы по спектру свечения плазмы контрагированных СВЧ-разрядов наиболее оптимальным является метод исследования уширения линий атомов водорода вследствие сильного эффекта Штарка. При этом штарковское уширение линий атомов водорода является теоретически и экспериментально наиболее изученным. В частности, уширение линии H_α (656,3 нм) характеристического излучения серии Бальмера возникает в результате взаимодействия микрополей ионов и электронов плазмы с атомами водорода, и тем самым в оптимальных случаях может служить надежным методом измерения плотности плазмы [8]. В наших экспериментальных условиях для успешного применения метода штарковского уширения линии H_α необходимо было решить две проблемы, а именно: 1 — обеспечение пространственной стабильности контрагированных СВЧ-разрядов; 2 — введение атомов водорода в плазму СВЧ-разрядов в достаточном количестве для устойчивой регистрации уширенного спектра линии H_α.

Эти проблемы были решены путем изготовления специального диэлектрического образца из кварцевого стекла с нанесенной на его поверхность узкой полоской органического стекла, предварительно растворенного в ацетоне. Органическое стекло (полиметилметакрилат) содержит в большом количестве атомарный водород (54 % атомов водорода, 33 % атомов углерода, 13 % атомов кислорода) [9]. После испарения ацетона на поверхности кварцевого стекла была сформирована узкая полоска органического стекла (длина 30 мм, ширина около 1 мм). Поскольку порог возбуждения СВЧ-разрядов на органическом стекле был значительно ниже порога возбуждения СВЧ-разрядов на кварцевом стекле, можно было экспериментально легко определить такую импульсную мощность падающего СВЧ-излучения, при которой контрагированные СВЧ-разряды возникали и оставались локализованными только на поверхности органического стекла.

Таким образом, были решены задачи пространственной стабилизации контрагированных СВЧ-разрядов и введения в плазму СВЧ-разрядов большого количества атомов водорода для надежной регистрации свечения уширенной линии Бальмер-альфа H_α характеристического излучения атомарного водорода.

Типы СВЧ-разрядов, возбуждаемых на поверхности диэлектриков в вакууме

Нами исследуются три типа безэлектродных разрядов, которые могут возбуждаться мощным импульсным СВЧ-излучением на поверхности твердых диэлектриков в вакууме [10]:

- а — нерезонансный вторично-эмиссионный электронный СВЧ-разряд;
- б — поверхностный СВЧ-пробой диэлектриков;
- в — плазменно-факельный СВЧ-разряд на диэлектриках.

Фотографии различных типов СВЧ-разрядов приведены на рис. 3, а, б, в.

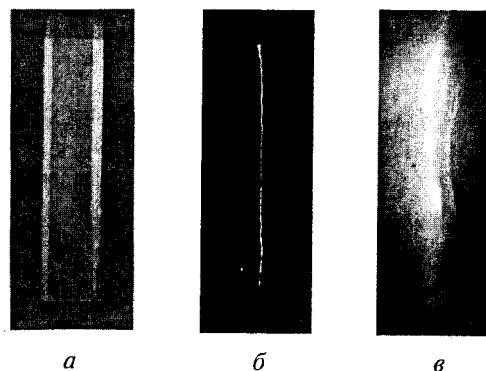


Рис. 3. Фотография свечения:

- а — монокристалла KBr, возбуждаемого электронами СВЧ-ВЭЭР. Относительное усиление света 1000;
- б — сильно контрагированного разряда при поверхностном СВЧ-пробое монокристалла KBr. Относительное усиление света 1;
- в — на стадии плазменно-факельного СВЧ-разряда на поверхности фторопласта. Относительное усиление света 5

Нерезонансный вторично-эмиссионный электронный СВЧ-разряд

Вторично-эмиссионный электронный СВЧ-разряд (СВЧ-ВЭЭР) возбуждается на диэлектрике в вакууме (см. рис. 3, а) при условии превышения энергии осцилляции электронов (ϵ) в электрическом поле стоячей СВЧ-волны (E_0) характеристической энергии диэлектрика (W_1), при которой коэффициент вторичной электронной эмиссии с поверхности диэлектрика равен единице (так называемый первый критический потенциал диэлектрика) [11]

$$\epsilon = e^2 E_0^2 / 2 m \omega^2 > W_1,$$

где e и m — заряд и масса электрона;

ω — угловая частота СВЧ-поля.

Величина W_1 для большинства диэлектриков находится в диапазоне значений 10—100 эВ.

При возбуждении стоячей волны моды H_{10} в прямоугольном волноводе $12 \times 5,8$ см импульсной СВЧ-мощностью $P = 0,6$ —2 МВт средние энергии электронов в разряде СВЧ-ВЭЭР изменяются в интервале значений 200—600 эВ. Электронная плотность n_e в таком СВЧ-разряде намного ниже критической плотности электронов $n_{cr} = m \omega^2 / 4 \pi e^2$ для падающей СВЧ-волны $n_e < 0,25 \cdot n_{cr} = 10^{10}$ см⁻³, при этом коэффициент поглощения СВЧ-излучения составляет величину около ~0,01.

На стадии разряда СВЧ-ВЭЭР мощность падающего СВЧ-излучения поглощается электронами разряда, которые распределены практически равномерно вдоль поверхности диэлектрика и бомбардируют ее.

Таким образом, свободные электроны СВЧ-ВЭЭР в электрическом поле стоячей СВЧ-волны совершают осцилляторные движения вблизи поверхности диэлектрика с периодом осцилляций 0,5 нс. В течение характерного интервала времени 0,2 нс они набирают энергию порядка энергии осцилляции (100—1000 эВ) и тут же теряют ее, сталкиваясь с поверхностью диэлектрика. Большая часть этой энергии тратится на образование в приповерхностном слое диэлектрика элементарных квантовомеханических твердотельных возбуждений: экситонов, плазмонов, электронно-дырочных пар, центров окраски [12]. Меньшая часть энергии электронов СВЧ-ВЭЭР разряда расходуется на возбуждение люминесценции диэлектрика, которая также почти равномерна вдоль его поверхности (см. рис. 3, а). Эта люминесценция обусловлена образованием, накоплением, возбуждением и релаксацией короткоживущих центров окраски с характерным временем жизни около 1 мкс при комнатной температуре [13]. Эти короткоживущие центры окраски образуются в тонком приповерхностном слое диэлектрика с характерной толщиной слоя

~0,1 мкм. Несмотря на относительно малое время жизни, эти короткоживущие центры окраски в условиях бомбардировки электронами СВЧ-ВЭЭР накапливаются в приповерхностном слое диэлектрика с высокой скоростью: за время существования СВЧ-ВЭЭР в течение длительности 1—2 мкс концентрация короткоживущих центров окраски может достигать значений $\sim (10^{18} - 10^{19})$ см⁻³ [14]. При такой высокой концентрации небольшое локальное увеличение температуры вследствие электронной бомбардировки поверхности СВЧ-ВЭЭР приводит к рекомбинации центров окраски с образованием свободных электронов в зоне проводимости диэлектриков с плотностью $\sim (10^{15} - 10^{16})$ см⁻³. Такая высокая концентрация электронно-дырочной плазмы приводит к возникновению сильной локальной наведенной электрической проводимости в приповерхностном слое диэлектрика, что вызывает резкое возрастание поглощения падающего СВЧ-излучения в этой локальной области диэлектрика, которое в свою очередь приводит к повышению температуры, возрастанию скорости рекомбинации короткоживущих центров окраски и взрывному локализованному плазмообразованию — поверхностному СВЧ-пробое диэлектрика в виде контрагированного СВЧ-разряда.

Поверхностный СВЧ-пробой диэлектриков

Сильное возбуждение приповерхностного слоя диэлектрика электронами СВЧ-ВЭЭР на предпробойной стадии развития СВЧ-разряда приводит к очень быстрому во времени (~10—50 нс) увеличению поглощения падающего на диэлектрик СВЧ-излучения: от ~1 % (на стадии СВЧ-ВЭЭР) до ~50—100 % (на конечной стадии СВЧ-пробоя) [15]. На конечной стадии СВЧ-пробоя поглощение происходит в плотной плазме (см. рис. 3, б), образующейся в результате локализованного “взрыва” тонкого приповерхностного слоя диэлектрика. Продолжительность во времени стадии СВЧ-пробоя составляет около ~0,05—0,1 мкс и сокращается с увеличением падающей СВЧ-мощности. Оценка минимальной величины электронной плотности в контрагированном разряде, исходя из величины поглощения падающего СВЧ-излучения, дает такое большое значение электронной плотности, которое на много порядков величины превышает критическую плотность плазмы: $(n_e)_{\min} \approx 10^{17}$ см⁻³ $\gg n_{cr} \approx 4 \cdot 10^{10}$ см⁻³.

Плазменно-факельный СВЧ-разряд

Плазменно-факельный СВЧ-разряд возникает после стадии СВЧ-пробоя диэлектрика как результат разлета плотной плазмы контрагированного СВЧ-разряда (см. рис. 3, в), развивающегося

на поверхности диэлектрика [16]. Максимальная скорость разлета плазмы по уровню критической плотности в первые 1—2 мкс после СВЧ-пробоя достигает величины $\sim(10^7\text{--}10^6)$ см/с. В течение последующих 3—10 мкс эта скорость уменьшается до значения $\sim 10^3$ см/с. Разлет плазмы сопровождается формированием облака плотной плазмы больших размеров: по уровню критической плотности размер плазменного облака составляет 10—15 см. По данным интерферометрических измерений на длине волны зондирующего СВЧ-излучения 8 мм электронная плотность плазмы на стадии плазменно-факельного СВЧ-разряда возрастает от периферии плазменного облака к его центру по параболическому закону, и вблизи поверхности диэлектрика электронная плотность плазмы превышает значение $2 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$, которое на три порядка величины больше критической плотности $n_{cr} \approx 4 \cdot 10^{10}$ см $^{-3}$.

Стадия плазменно-факельного СВЧ-разряда характеризуется достаточно сильным (но не локализованным) поглощением в плазме падающей СВЧ-мощности на уровне $\sim 20\text{--}50\%$ [17].

На стадии плазменно-факельного СВЧ-разряда в плазме развиваются следующие процессы: возбуждение в области плазменного резонанса ($n_e \approx n_{cr} \approx 4 \cdot 10^{10}$ см $^{-3}$) сильных ленгмюровских плазменных волн с локализованными электрическими полями, в десятки раз превышающими электрическое поле в падающей СВЧ-волне [18, 19];

ускорение 1—3 % электронов плазмы в результате опрокидывания сильных ленгмюровских плазменных волн вследствие развития нелинейных процессов в плазме [19, 20];

формирование в результате первых двух процессов неравновесной функции распределения электронов по энергиям с характерной квазitemпературой $T_e \approx e^2 E_0^2 / 4 m \omega^2 \approx 100\text{--}300$ эВ и почти платообразным неравновесным распределением по энергиям в диапазоне значений 1—15 кэВ. Максимальная энергия ускоренных электронов растет пропорционально величине

электрического поля падающей СВЧ-волны, но уменьшается в 2—3 раза в течение интервала времени 3—5 мкс после окончания стадии СВЧ-пробоя [16, 20, 21];

формирование высокого положительного электрического потенциала в плазме [16, 22] в результате ускорения электронов, которое происходит в области плазменного резонанса. При этом вся область плазмы с плотностью выше критической оказывается заряженной до величины потенциала, соответствующего максимальной энергии ускоренных электронов в плазменном резонансе. Заряженная до высокого потенциала плазма (до +15 кВ) на стадии сильно локализованного контрагированного СВЧ-разряда при взаимодействии с поверхностью диэлектриков может генерировать сильные электрические поля (1—10 МВ/см) в приповерхностном слое диэлектриков и таким образом вызывать сильные локальные разрушения на поверхности и в объеме диэлектриков [10].

Разрушения в диэлектриках при их взаимодействии с плазмой СВЧ-разрядов

При взаимодействии плазмы СВЧ-разрядов с диэлектриками на поверхности и в объеме диэлектриков возникают различные виды разрушений [10]. Наиболее сильные из них наблюдаются на стадии СВЧ-пробоя и на стадии плазменно-факельного СВЧ-разряда. В связи с этим важно установить взаимосвязь между свойствами различных типов СВЧ-разрядов и механизмами взаимодействия плазмы с диэлектриками, с одной стороны, и процессами возникновения соответствующих видов разрушений в диэлектриках — с другой стороны. На рис. 4, а—ж показано несколько видов разрушений, образовавшихся на поверхности и в объеме кристаллов в результате их взаимодействия с плазмой СВЧ-разрядов. (Фотографии выполнены с помощью оптического и электронного микроскопов.)

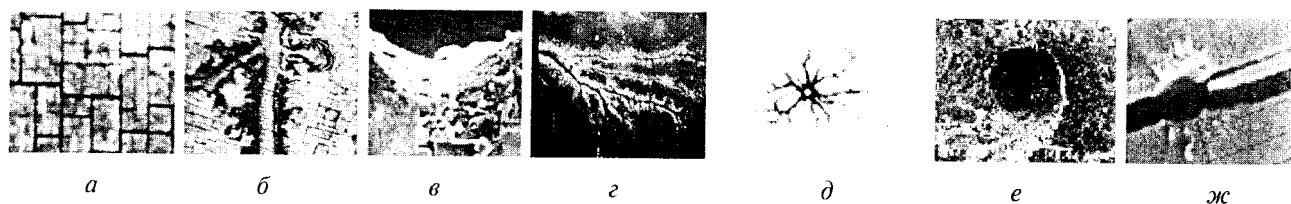


Рис. 4. Виды разрушений:

а — микротрещины на поверхности монокристалла фторида лития LiF. Характерный размер 0,5—2 мкм; б — канал пробоя в виде трека на поверхности монокристалла хлорида натрия NaCl. Длина канала 5 см, поперечный размер 7 мкм; в — поперечное сечение канала пробоя в виде трека на поверхности монокристалла NaCl. Характерный диаметр канала 7 мкм; г — система дендритов, прорастающих от поверхности (левый край изображения) в глубь объема монокристалла NaCl. Характерная длина дендритов 10 мм, характерный диаметр дендритов 10—100 мкм; д — вид сверху кратера на поверхности кристалла двуокиси циркония ZrO_2 и системы связанных с ним дендритов в глубине кристалла. Диаметр кратера 50 мкм, диаметр дендритов 30—10 мкм; е — кратер на поверхности монокристалла NaCl с системой дендритов, уходящих в глубь объема кристалла. Диаметр кратера около 100 мкм; ж — кратер на поверхности монокристалла NaCl с образовавшейся макротрещиной. Диаметр кратера около 100 мкм

Микротрещины

Микротрещины возникают на всех стадиях СВЧ-разрядов: СВЧ-ВЭЭР, СВЧ-пробой, СВЧ-плазменный факел. Они образуются в результате сильных локальных термомеханических напряжений, возникающих на поверхности диэлектриков даже на предпробойной стадии развития СВЧ-разрядов (СВЧ-ВЭЭР). На стадии ВЭЭР поверхность диэлектриков бомбардируется электронами разряда с характеристическими энергиями 10–1000 эВ. Глубина проникновения этих электронов в диэлектрики составляет величину 0,01–0,1 мкм. Импульсное взаимодействие потока электронов СВЧ-ВЭЭР с поверхностью диэлектриков в течение 1–3 мкс сопровождается нагревом приповерхностного слоя диэлектриков на величину приращения температуры ~ 1 К и как следствие возникновением в нем высокого температурного градиента. Поскольку толщина нагреваемого приповерхностного слоя диэлектриков составляет 1–3 мкм, то градиент температуры в этом слое достигает значений $(3 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^4)$ К/см и вызывает сильные термомеханические напряжения. Наиболее характерно образование таких микротрещин при возбуждении СВЧ-ВЭЭР-разрядов на поверхности щелочно-галогидных монокристаллов LiF, NaCl, KCl, KBr, CsI. Это обусловлено тем, что этот класс кристаллов имеет большой коэффициент температурного расширения ($\sim 10^{-4}$ К $^{-1}$), что приводит к существенным перемещениям нагретых приповерхностных слоев кристаллов относительно более глубоких холодных слоев. На стадии СВЧ-ВЭЭР даже кратковременное повышение температуры приповерхностного слоя кристаллов на величину ~ 1 К приводит к смещению нагретых слоев на величину нескольких сотен постоянных решетки в таких кристаллах.

Таким образом, термомеханические напряжения в приповерхностных слоях щелочно-галогидных кристаллов достаточно сильны, чтобы привести к возникновению микротрещин на поверхности кристаллов при взаимодействии с СВЧ-разрядами.

Каналы пробоя (треки)

Треки возникают на стадии сильно локализованного контрагированного разряда — поверхностного СВЧ-пробоя диэлектриков. Образование треков обусловлено взаимодействием плотной плазмы контрагированных СВЧ-разрядов с диэлектриками, при этом плотность мощности теплового потока из плазмы на поверхность диэлектриков в окрестности контрагированных разрядов должна достигать большой величины, которая приводит к сильному расплавлению и испарению вещества диэлектриков в каналах пробоя. Наиболее сильно этот вид разрушений

проявляется при возникновении СВЧ-пробоя на поверхности диэлектриков с низкой температурой плавления — это щелочно-галогидные монокристаллы, а также полимеры типа фторопласт, органическое стекло, полиэтилен, полистирол. В то же время на поверхности монокристаллов ZrO_2 , которые характеризуются высокой температурой плавления, образование треков не наблюдается.

Поверхностные кратеры и связанные с ними дендриты

В глубине объема диэлектриков поверхностные кратеры и дендриты могут возникать на двух стадиях развития СВЧ-разрядов:

на завершающем этапе формирования и разлета контрагированного разряда в результате СВЧ-пробоя;

на стадии плазменно-факельного СВЧ-разряда — в условиях возникновения высокого положительного потенциала плазмы.

Эти виды разрушений обусловлены возникновением сильных электрических полей в локальных областях вблизи поверхности и в разрядных каналах в глубине объема диэлектриков, взаимодействующих с заряженной плазмой. Величина этих электростатических полей должна достигать достаточно высоких значений, необходимых для образования кратеров на поверхности и дендритов внутри объема диэлектриков в результате их высоковольтного пробоя. Проведенные оценки значений этих локальных электростатических полей дают величину $E_{st} \sim 1\text{--}10$ МВ/см. Столь высокие локальные электрические поля могут возникать в области взаимодействия СВЧ-разрядов с диэлектриками и вызывать разрушения в виде поверхностных кратеров и объемных дендритов в диэлектрических материалах.

Исследование процессов возбуждения и развития СВЧ-разрядов во времени

Для достижения сформулированных целей изучались физические процессы, характеризующие взаимодействие плазмы СВЧ-разрядов с водородсодержащими диэлектрическими образцами. В ходе экспериментов исследовались: динамика поглощения СВЧ-излучения в плазме СВЧ-разряда на различных стадиях развития (рис. 5, а), временная эволюция свечения из плазмы СВЧ-разряда в области характеристической линии Бальмер-бета (H_β) (см. рис. 5, б) и Бальмер-альфа (H_α) атомарного водорода (см. рис. 5, г, д, е), а также эволюция возникновения и изменения во времени потенциала плазмы (см. рис. 5, в).

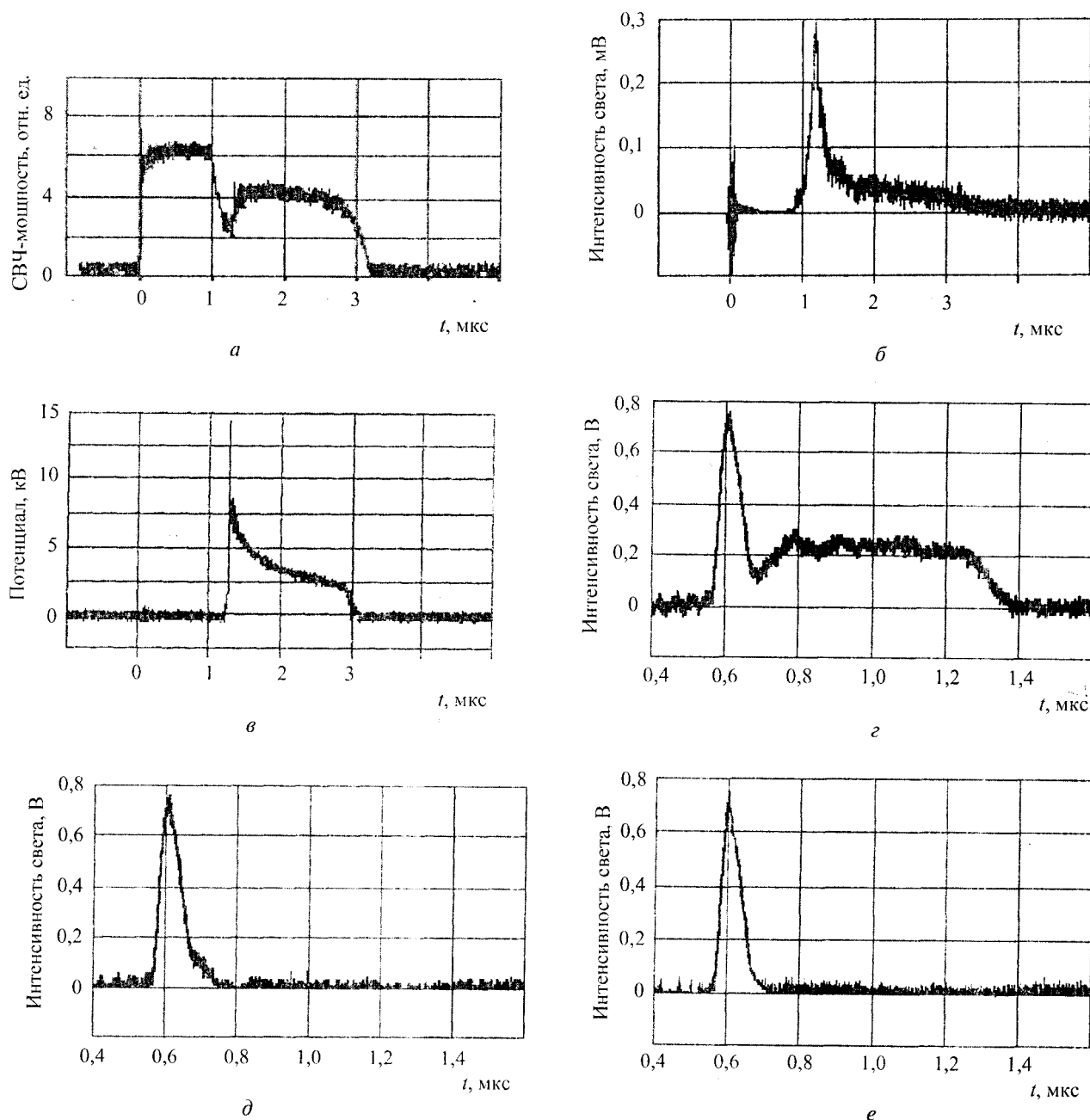


Рис. 5. Осциллограммы:

a — огибающей СВЧ-мощности, отраженной от плазмы на различных стадиях СВЧ-разряда. Режим облучения для рис. 5, *a*, *б*, *в*: СВЧ-мощность $P = 620$ кВт, длительность СВЧ-импульса 3 мкс, амплитуда напряженности электрического поля в падающей СВЧ-волне $E = 3,6$ кВ/см; *б* — свечения плазмы СВЧ-разряда на длине волны 484,5 нм, соответствующей центру линии H_{β} серии Бальмера; *в* — временной эволюции плавающего потенциала плазмы вблизи поверхности диэлектрика; *г* — свечения плазмы СВЧ-разряда на длине волны света 656,3 нм — центр линии H_{α} серии Бальмера атомарного водорода. Режим облучения для рис. 5, *г*, *д*, *е*: СВЧ-мощность $P = 2$ МВт, длительность СВЧ-импульса 1,3 мкс, амплитуда напряженности электрического поля в падающей СВЧ-волне $E = 6$ кВ/см; *д* — свечения плазмы СВЧ-разряда на длине волны света 655,8 нм, смещенной от центра линии H_{α} в синюю сторону спектра на 0,5 нм; *е* — свечения плазмы СВЧ-разряда на длине волны света 656,8 нм, смещенной от центра линии H_{α} в красную сторону спектра на 0,5 нм

Во временном интервале 0—1 мкс после начала СВЧ-облучения развивается СВЧ-ВЭЭР (см. рис. 5, *a*), и отраженная СВЧ-мощность составляет около 99 % (соответственно, величина поглощения составляет около 1 %). Наиболее сильное поглощение СВЧ-мощности (около 60 %) наблюдается в интервале времени 1—1,2 мкс на стадии СВЧ-пробоя — стадии контрагированного СВЧ-разряда. На следующей за пробоем стадии

плазменно-факельного СВЧ-разряда в интервале времени 1,2—3 мкс в плазме поглощается около 30 % СВЧ-мощности. При этом падающее СВЧ-излучение характеризовалось следующими параметрами: импульсная СВЧ-мощность 620 кВт, длительность СВЧ-импульсов 3 мкс, амплитуда напряженности электрического поля в падающей СВЧ-волне $E = 3,6$ кВ/см.

Характерно, что на стадии контрагированного разряда величина потенциала плазмы невелика и составляет всего несколько десятков вольт. При переходе от стадии контрагированного разряда к стадии плазменного факела (спустя промежуток времени 50–100 нс после достижения максимума свечения плазмы контрагированного разряда и максимума поглощения мощности СВЧ-излучения) возникает высокий положительный потенциал плазмы, величина которого достигает 15 кВ (см. рис. 5, в) при падающей СВЧ-мощности 620 кВт.

Поскольку возникновение высокого потенциала плазмы обусловлено процессами ускорения электронов в усиленном электрическом поле ленгмюровских волн (возбуждаемых в области плазменного резонанса) и ухода быстрых электронов из плазмы, то такая временная эволюция плавающего потенциала плазмы указывает на то, что усиление поля в плазменном резонансе возникает только на стадии плазменно-факельного СВЧ-разряда и не возникает на стадии контрагированного СВЧ-разряда. Это можно объяснить тем, что на стадии контрагированного СВЧ-разряда поперечные размеры плазмы столь малы, а градиенты электронной плотности плазмы в пространственной области вблизи ее критического значения столь велики, что раскачки и усиления ленгмюровских колебаний в окрестности плазменного резонанса не происходит [18, 20]. В отличие от этого в результате расширения плазмы на стадии плазменного факела градиенты электронной плотности уменьшаются, в результате чего в области плазменного резонанса становится возможным выполнение резонансных условий и развитие нелинейных процессов опрокидывания ленгмюровских волн и ускорения электронов до максимальной энергии около 15 кВ [20]. Эта максимальная величина энергии быстрых электронов и определяет величину положительного потенциала плазмы +15 кВ, возникающего в начальный момент времени перехода от стадии контрагированного СВЧ-разряда к стадии СВЧ плазменно-факельного разряда.

На стадии развития СВЧ-ВЭЭР на поверхности водородсодержащих диэлектрических образцов свечения линий атомарного водорода не наблюдается даже при максимальном усилении ФЭУ-79 (напряжение питания 2 кВ). На этой стадии регистрируемое свечение диэлектриков обусловлено люминесценцией короткоживущих центров окраски, создаваемых в результате бомбардировки поверхности диэлектриков электронами из СВЧ-ВЭЭР [13]. На стадии СВЧ-пробоя при возникновении плазмы контрагированного разряда наблюдается яркое свечение атомарного водорода как в центре линии H_α серии Бальмера, так и в широком диапазоне длин волн вне центра линии (см. рис. 5, д, е). Из представленных осциллограмм свечения в области линии H_α атомарного водорода видно, что на стадии кон-

трагированного СВЧ-разряда линия H_α весьма широкая, в то время как на стадии СВЧ плазменного факела ширина линии H_α заметно сужается. На рис. 6 представлен профиль линии H_α на стадии контрагированного СВЧ-разряда.

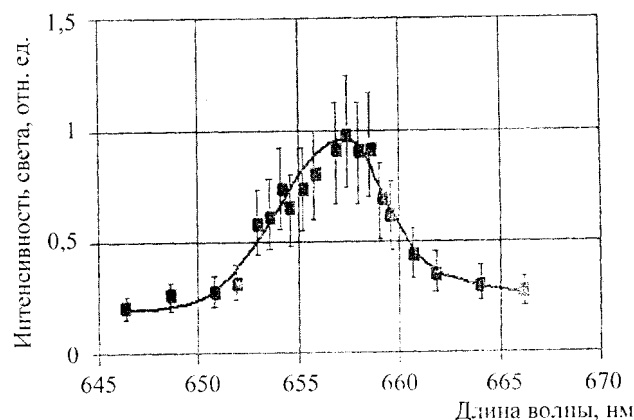


Рис. 6. Профиль линии H_α серии Бальмера атомарного водорода на стадии контрагированного СВЧ-разряда

Режим СВЧ-облучения: импульсная СВЧ-мощность 2 МВт, длительность СВЧ-импульса 1,3 мкс, относительная величина поглощенной СВЧ-мощности в момент регистрации — 60 % от падающей. Момент времени регистрации профиля линии H_α соответствует максимуму свечения плазмы СВЧ-разряда и составляет около 50 нс после начала интенсивного свечения и начала интенсивного СВЧ-поглощения.

На стадии контрагированного СВЧ-разряда полуширина профиля линии H_α составляет около 7 нм (при мощности падающего СВЧ-излучения 2 МВт). На стадии плазменно-факельного СВЧ-разряда ширина линии существенно сужается и не превышает 1 нм. Основной механизм уширения линии H_α в плазме связан со столкновениями атомарного водорода с электронами и ионами плазмы, т. е. это эффект Штарка, вызываемый электрическими полями электронов и ионов плазмы, действующих на атомы водорода при столкновении с ними [8]. Сделанные на основе экспериментальных данных расчеты позволяют рассчитать плотность электронов в плазме на стадии контрагированного СВЧ-разряда. Величина этой электронной плотности достигает значения $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. На стадии плазменно-факельного СВЧ-разряда расчет плотности электронов дает величину не больше чем $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Напомним, что более ранние измерения посредством микроволнового интерферометра на длине волны 8 мм показали, что плотность электронов в плазме на стадии плазменно-факельного СВЧ-разряда превышает значение $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. При снижении падающей СВЧ-мощности с 2 МВт до 620 кВт профиль линии H_α сужается, при этом полуширина профиля линии становится равной 2,5–3 нм. Это дает возмож-

ность утверждать, что при мощности падающего СВЧ-излучения 620 кВт плотность электронов в плазме контрагированного СВЧ-разряда составляет $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Доля поглощаемой в плазме контрагированного разряда СВЧ-мощности составляет примерно ту же величину — около 60 % от падающей СВЧ-мощности, т. е. практически не зависит от падающей СВЧ-мощности.

Таким образом, можно заключить, что электронная плотность плазмы на стадии контрагированного СВЧ-разряда изменяется приблизительно пропорционально величине мощности падающего СВЧ-излучения.

Обсуждение экспериментальных результатов и определение тепловых потоков на диэлектрик из плазмы СВЧ-разряда

- На основании полученных экспериментальных данных об электронной плотности плазмы на стадии контрагированного СВЧ-разряда и учитывая слабую зависимость коэффициента поглощения СВЧ-мощности в разряде от абсолютной величины падающей СВЧ-мощности можно сделать заключение о том, что электрическая проводимость плазмы контрагированного СВЧ-разряда не зависит от плотности плазмы. Следовательно, электрическая проводимость плазмы на стадии контрагированного СВЧ-разряда определяется кулоновскими столкновениями между электронами и ионами плазмы и зависит только от температуры электронов. Исходя из этого можно сделать оценку электронной температуры плазмы, что дает величину $T_e = 2\text{—}10 \text{ эВ}$. Верхняя оценка температуры получена из расчета диаметра плотной плазмы на основании размера канала пробоя (трека) 10 мкм, оставляемого на поверхности диэлектрика после возникновения СВЧ-пробоя. Нижняя оценка температуры рассчитана в предположении того, что размер проводящего канала может быть в три раза больше.

- Оценка теплового потока частиц из плазмы СВЧ-разрядов на поверхность диэлектрических образцов показала, что величина теплового потока из плазмы контрагированного разряда на поверхность диэлектриков достигает величины 1 МВт/см^2 , в то время как интенсивность падающей на плазму СВЧ-мощности не превышает 10 кВт/см^2 . Таким образом, плазма контрагированного СВЧ-разряда, поглощая значительную долю падающей СВЧ-мощности, преобразует последнюю в тепловой поток на поверхность диэлектрика вблизи каналов СВЧ-пробоя. При этом в результате сильной локализации этого теплового потока происходит усиление мощности удельного энерговыделения в плазме на два порядка величины выше по сравнению с удель-

ным потоком мощности падающего СВЧ-излучения.

- Большая плотность теплового потока из плазмы контрагированного СВЧ-разряда на поверхность диэлектриков приводит к быстрому росту температуры поверхности диэлектриков в локальных областях существования плотной плазмы СВЧ-разряда. Температурный скачок на поверхность диэлектриков можно оценить с учетом теплопроводности материала диэлектрического образца за время существования плазмы около 50 нс. Проведенные расчеты дают значения скачка температуры на поверхности диэлектриков $\sim 500\text{—}1000 \text{ К}$. Сравнение температуры плавления диэлектриков с расчетными значениями температурных скачков на их поверхности позволяет сделать вывод относительно тепловой природы механизма образования разрушений в виде каналов пробоя на поверхности таких диэлектриков, как полистирол, фторопласт, органическое стекло, щелочно-галоидные кристаллы. Тот факт, что контрагированные СВЧ-разряды не оставляют заметных следов разрушения на поверхности диэлектриков с высокой температурой плавления, превышающей расчетные температурные скачки (например, для монокристаллического диоксида циркония ZrO_2), подтверждает предположение о тепловой природе происхождения каналов пробоя (треков) на поверхности диэлектриков, взаимодействующих с СВЧ-разрядами.

Заключение

1. На основе оптического метода измерения профиля линии атомарного водорода H_α и теории эффекта Штарка в плазме контрагированного СВЧ-разряда экспериментально измерена плотность электронов плазмы на стадии контрагированного СВЧ-разряда и стадии плазменно-факельного СВЧ-разряда. Величина электронной плотности в плазме контрагированного СВЧ-разряда находится в интервале значений $6 \cdot 10^{17} \div 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при изменении СВЧ-мощности падающего СВЧ-излучения от 0,6 до 2 МВт. В этих же условиях значения плотности электронов на стадии плазменно-факельного СВЧ-разряда находятся в интервале $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3} < n_e < 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

2. Максимальные температурные скачки на поверхности диэлектрических образцов, которые взаимодействуют с плазмой контрагированного СВЧ-разряда, составляют величину 500—1000 К.

Установлено, что каналы пробоя (треки), возникающие на поверхности диэлектрических образцов в областях их взаимодействия с плотной плазмой контрагированных СВЧ-разрядов, обусловлены тепловым механизмом, при котором поток падающей СВЧ-мощности интенсивностью 10 кВт/см^2 преобразуется в тепловой поток заряженных частиц из плазмы контраги-

рованных СВЧ-разрядов с усилением по интенсивности в 100 раз — до 1 МВт/см². При этом поверхность диэлектриков разрушается вследствие плавления и испарения материала диэлектриков (полистирол, фторопласт, органическое стекло, щелочно-галогидные кристаллы) в течение времени существования контрагированного разряда 50—100 нс.

Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам ИОФ РАН А. С. Герасимову, А. А. Дорофеюк, Е. Ф. Большакову, Т. И. Камоловой, С. Н. Сатунину, А. М. Спирину за помощь при подготовке аппаратуры и техническое обеспечение работ при проведении исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект 03-02-17140-а, и Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF), проект RU-P1-2594-MO-04.

Л и т е р а т у р а

1. Ковалев Н. Ф., Петелин М. И., Райзер М. Д., Сморгонский А. В., Цопп Л. Э. Генерация мощных электромагнитных импульсов релятивистским электронным потоком// Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18. № 3. С. 232.
2. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. — М.: Наука, 2004. — 704 с. ISBN 5-02-033049-3.
3. Strong Microwaves in plasmas//Ed. A. G. Litvak. V. 1. 2. Nizhny Novgorod-2003. ISBN 5-8048-0039-X.
4. Ivanov V. A., Konyzhev M. E. Destructures produced in dielectrics by pulsed microwave discharges. — In: Microwave Discharges: Fundamentals and Applications (Proceedings of V International Workshop). Editor: Andreas Ohl. INP, Greiswald, 2003. Printed by Keibu-Druck GmbH. ISBN 3-00-011612-5. P. 247—254.
5. Бугаев С. П., Канавец В. И., Климов А. И. и др. Генерация мощных импульсов электромагнитного излучения релятивистскими сильноточными пучками электронов микросекундной длительности// Доклады АН СССР. 1984. Т. 276. № 5. С. 1102—1104.
6. Бугаев С. П., Канавец В. И., Климов А. И., Кошелев В. И. Атмосферный СВЧ-разряд и исследование когерентности излучения релятивистского многоволнового черенковского генератора// Там же. 1988. Т. 298. № 1. С. 92—94.
7. Ivanov V. A., Konyzhev M. E. Breakdowns and destructions of dielectrics in strong microwave fields. — In: Strong Microwaves in plasmas. Ed. A. G. Litvak. V. 2. P. 684—692. Nizhny Novgorod-2003. ISBN 5-8048-0039-X.
8. Fliih S. A., Oks E., Vitel Y. Comparison of the Stark width and shift of the H-alpha line measured in a flash tube plasma with theoretical results// J. of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. 2003. V. 36. P. 1—14.
9. Майофис И. М. Химия диэлектриков. — М.: Высш. шк., 1970. — 322 с.
10. Иванов В. А., Коныжев М. Е. Образование локальных разрушений в диэлектриках, взаимодействующих с безэлектродными микроволновыми разрядами// Прикладная физика. 2004. № 6. С. 42—52.
11. Гришин Л. В., Дорофеюк А. А., Косый И. А., Лукьянчиков Г. С., Савченко М. М. Исследование вторично-эмиссионного СВЧ-разряда при больших углах пролета электронов// В кн. "Диссипация электромагнитных волн в плазме": Тр. ФИАН. — М.: Наука. 1977. Т. 92. С. 82—131.
12. Луцик Ч. Б., Луцик А. Ч. Распад электронных возбуждений с образованием дефектов в твердых телах. — М.: Наука. 1989. — 264 с.
13. Батанов Г. М., Иванов В. А., Коныжев М. Е., Летунев А. А. Люминесценция короткоживущих центров окраски, наведенных в кристаллах LiF импульсным микроволновым разрядом// Письма ЖЭТФ. 1997. Т. 66. Вып. 3. С. 163—167.
14. Батанов Г. М., Иванов В. А., Коныжев М. Е., Коношикин В. А., Мирот С. Б. Создание оптически плотного слоя на поверхности LiF кристаллов при окрашивании в микроволновом разряде// Там же. 1993. Т. 19. В. 20. С. 42—45.
15. Батанов Г. М., Иванов В. А., Коныжев М. Е. Микроволновой пробой ионных кристаллов, инициированный вторично-эмиссионным разрядом// Там же. 1994. Т. 59. В. 10. С. 655—658.
16. Батанов Г. М., Иванов В. А. Плазменно-факельное преобразование энергии сверхвысокочастотных волн дециметрового диапазона в энергию квазистационарного электрического тока// Генерация нелинейных волн и квазистационарных токов в плазме: Тр. ИОФАН. — М.: Наука, 1988. Т. 16. С. 46—79.
17. Баринев В. И., Геккер И. Р., Иванов В. А., Карфидов Д. М. Бесстолкновительное поглощение электромагнитных волн в плазме и медленные нелинейные явления// В кн. "Диссипация электромагнитных волн в плазме": Тр. ФИАН. — М.: Наука, 1977. Т. 92. С. 35—69.
18. Буланов С. В., Коврижных Л. М., Сахаров А. С. Ленгмюровские колебания конечной амплитуды в области плазменного резонанса// ЖЭТФ. 1977. Т. 72. В. 5. С. 1809—1823.
19. Батанов Г. М., Иванов В. А., Косый И. А., Сергейчев К. Ф. Ленгмюровские волны большой амплитуды и ускорение частиц в плазменной короне// Физика плазмы. 1986. Т. 12. С. 552—560.
20. Коврижных Л. М., Сахаров А. С. Ускорение электронов в поле плазменного резонанса// Там же. 1979. Т. 5. В. 4. С. 840—848.
21. Batanov G. M., Ivanov V. A., Kossyi I. A. Strong Langmuir Turbulence and Particle Acceleration in the Plasma Corona// Nonlinear and Turbulent Processes in Physics. Gordon and Breach Harward Academic Published. 1984. V. 1. P. 45—55.
22. Batanov G. M., Ivanov V. A., Khomenko A. I., Konyzhev M. E., Ravaev A. A., Seleznev V. D. Generation of High Potentials in the Plasma by the Interaction with Intense Microwave Radiation// Strong Microwave in Plasma. V. 2. P. 553—558. Proceedings of the International Workshop, Suzdal. 18—23 Sept. 1990. (Ed. by Litvak A. G.) Institute of Appl. Phys., Nizhny Novgorod. 1991.

Статья поступила в редакцию 22 августа 2005 г.

Formation of superdense plasma in microwave breakdown of dielectrics

V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, V. P. Gavrilenko, A. A. Letunov
A. M. Prokhorov General Physics Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow

E. A. Oks

Auburn University, Auburn, Alabama, USA

Electrodeless microwave discharges excited by a pulsed microwave radiation (power up to 2 MW, frequency 2 GHz, pulse duration up to 10^{-5} s) on surfaces of dielectrics in vacuum ($\sim 10^{-4}$ Pa) were studied. In this work the most intensive optical radiation occurs in the stage of the electrodeless microwave breakdown in the form of contracted discharge on the surface of organic glass. The typical lifetime of this discharge being $\sim 10^{-7}$ s. The emission spectrum of the contracted discharge consists of hydrogen, carbon and oxygen spectral lines. We obtained that in the stage of a contracted discharge, the halfwidth (FWHM) of the Balmer-alpha line (wavelength is centered at 656.3 nm) of atomic hydrogen reaches 7 nm. Under the experimental conditions, the main mechanism for the broadening of the Balmer-alpha line is the Stark effect due to the electric microfields produced by ions and electrons in dense plasma of contracted microwave discharge. Using the experimental profiles of the Balmer-line of atomic hydrogen, we obtained that for the contracted microwave discharge, the electron concentration of plasma reaches the value of $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. This electron concentration of plasma more than seven orders of magnitude higher than the critical electron concentration $4 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. The electron temperature of plasma in contracted microwave discharge is 2–10 eV, and diameter of the contracted discharge is about 10 microns. Under these conditions the density of power deposited into the near-surface layer of dielectric is about 1 MW/cm^2 . Such strong interaction of super dense plasma of contracted microwave discharges with dielectrics leads to destructions in local areas on the surfaces and in the bulk of dielectrics.

УДК 621

Влияние капиллярного давления на интенсивность процесса ударно-кластерного ядерного синтеза

М. М. Мартынюк, Н. Ю. Кравченко
Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Исследована зависимость капиллярного давления кластера от его радиуса. Дан анализ экспериментальных данных по исследованиям D,D-реакции ядерного синтеза в процессе высокоскоростного удара кластера, содержащего дейтерий, по дейтерированной мишени. Показано, что максимальная интенсивность реакции достигается для кластеров с максимальным капиллярным давлением. Для повышения интенсивности реакции предложено использовать плазменно-кластерные потоки, которые возникают в процессе электрического взрыва металлов, содержащих дейтерий, и их фокусировку на мишень.

В работах [1, 2] был зафиксирован интенсивный выход продуктов D,D-реакции ядерного синтеза при ударе кластеров тяжелой воды по мишени из титана, насыщенного дейтерием. Однозарядные кластеры, содержащие от $N = 25$ до $N = 1300$ молекул D_2O , ускорялись электрическим полем до энергии $E = 200\text{--}325$ кэВ. Был обнаружен выход продуктов D,D-реакции: про-

тонов ($E = 3$ МэВ) и тритонов ($E = 1$ МэВ). При фиксированном значении энергии кластеров $E = 300$ кэВ максимальный выход протонов наблюдали при числе $N = 100\text{--}500$ молекул в нем (рис. 1). При $N = 150$ выход протонов возрастал в 20 раз при увеличении энергии кластера от 225 до 300 кэВ. В последнем случае кинетическая энергия на 1 дейтрон $E/2N = 1$ кэВ была в