

УДК 533.924:537.52

Образование локальных разрушений в диэлектриках, взаимодействующих с безэлектродными микроволновыми разрядами

В. А. Иванов, М. Е. Коньжев

Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

Проведены экспериментальные исследования различных типов безэлектродных микроволновых разрядов, развивающихся на поверхности и в объеме диэлектрических монокристаллов (фторид лития LiF , хлорид натрия $NaCl$, бромид калия KBr , иодид цезия CsI , диоксид циркония ZrO_2) и аморфных диэлектриков (фторопласт, полиэтилен, органическое стекло) в вакууме. Обнаружено и классифицировано несколько видов локальных разрушений, возникающих на поверхности и в объеме диэлектриков в результате их взаимодействия с безэлектродными микроволновыми разрядами. Предложен физический механизм возникновения сильных локальных электрических полей на поверхности и в объеме диэлектриков при взаимодействии с микроволновыми разрядами. Предложена физическая модель возникновения безэлектродного электрического пробоя и разрушений в локальных областях на поверхности и в объеме диэлектриков в результате их взаимодействия с этими сильными электрическими полями.

Фундаментальные проблемы физики взаимодействия плазмы микроволновых (сверхвысокочастотных) разрядов с конденсированными диэлектрическими средами состоят в следующем:

определение физических критериев возникновения, поддержания и эволюции различных типов безэлектродных импульсных микроволно-

вых разрядов на поверхности и в объеме кристаллических и аморфных диэлектриков;

определение физических процессов, характеризующих предельные случаи слабого и сильного взаимодействий плазмы безэлектродных микроволновых разрядов с кристаллическими и аморфными диэлектриками;

установление физических механизмов быстрого спонтанного контрагирования плазмы безэлектродных микроволновых разрядов и пространственной локализации сильного взаимодействия плотной плазмы с диэлектриками;

построение классификаций различных типов безэлектродных микроволновых разрядов и видов разрушений на поверхности и в объеме кристаллических и аморфных диэлектриков, взаимодействующих с плазменными разрядами.

Прикладные проблемы физики взаимодействия плазмы микроволновых разрядов с диэлектрическими материалами связаны с научными исследованиями, направленными на увеличение электрической и тепловой прочности выходных окон сверхвысокочастотных устройств, а также на повышение устойчивости к возникновению микроволновых разрядов в волноводных и открытых системах с диэлектрическими, полупроводниковыми и металлическими компонентами, в которых распространяется интенсивное импульсное микроволновое излучение [1, 2]. Эмпирически найденные методы предотвращения микроволновых разрядов в вакуумных системах, как правило, сводились к снижению уровня плотности потока энергии микроволнового излучения, падающего на диэлектрики. Для подавления микроволновых разрядов на поверхности диэлектриков применялись также внешние электрические и магнитные поля и специальные покрытия, с помощью которых удавалось в ряде случаев предотвращать возникновение разрядов [3–6]. Выполненные в этом направлении работы привели к определенным положительным результатам. Однако несмотря на достигнутые успехи, проблема повышения электрической прочности диэлектриков, полупроводников и сложных металл-диэлектрических композитов в сильных полях микроволнового излучения является актуальной и в настоящее время в связи со значительным прогрессом в области мощной релятивистской сверхвысокочастотной электроники [7, 8].

Необходимость решения проблем мощной сверхвысокочастотной электроники, связанных с генерацией, транспортировкой и выводом микроволнового излучения, в течение многих десятилетий инициирует фундаментальные и прикладные исследования безэлектродных микроволновых разрядов на поверхности твердых тел в вакууме. Ниже рассмотрены основные научные результаты этих исследований, выполненных в течение нескольких последних десятилетий.

В 50-е годы американские ученые обнаружили резонансный вторично-эмиссионный элек-

тронный микроволновый разряд (мультипакторный разряд), возникающий в вакуумных зазорах между металлическими поверхностями в мощных сверхвысокочастотных устройствах. Возбуждение этих разрядов происходило при выполнении определенных резонансных условий, связывающих амплитуду и частоту колебаний сверхвысокочастотного электрического поля с характерным размером вакуумного зазора [9]. В 60-е годы резонансный вторично-эмиссионный электронный микроволновый разряд был также обнаружен и исследовался между диэлектрическими поверхностями в поле микроволнового излучения [10]. В 70-е годы был обнаружен новый тип электронного микроволнового разряда — нерезонансный полифазный вторично-эмиссионный электронный разряд, развивающийся на поверхности металлов и диэлектриков в поле микроволнового излучения в отсутствие резонансных условий. Этот, наиболее часто встречающийся в сверхвысокочастотных устройствах тип разряда исследовался в работах российских ученых [11, 12]. Ими изучались условия возникновения однородного вдоль поверхности твердых тел вторично-эмиссионного электронного разряда, временная эволюция потока электронов из разряда и процессы электрической зарядки изолированных металлических образцов, взаимодействующих с разрядом. В результате исследований была разработана теоретическая модель нерезонансного полифазного вторично-эмиссионного электронного разряда, развивающегося на поверхности металлов и диэлектриков в поле микроволнового излучения. Эта модель позволяла рассчитывать пороги возникновения вторично-эмиссионного электронного микроволнового разряда на поверхности твердых тел в вакууме. Поскольку в предложенной модели полифазного электронного разряда свойства твердого тела рассматривались упрощенно и характеризовались только одним параметром (фиксированной зависимостью коэффициента вторичной электронной эмиссии от энергии электронов), процессы возбуждения твердого тела и его влияния на свойства разряда не учитывались. Вследствие этого в рамках этой модели принципиально не могли быть исследованы нелинейные процессы, приводящие к плазменным стадиям развития микроволнового разряда на поверхности твердых тел в вакууме.

В 80-е годы российские физики обнаружили новый тип разряда — плазменно-факельный микроволновый разряд на поверхности твердых тел в вакууме. В течение нескольких лет был выполнен цикл фундаментальных исследований плазменно-факельного разряда в поле сфокусированного микроволнового излучения в рамках решения проблемы преобразования энергии мощного микроволнового излучения в энергию квазипостоянного электрического тока [13, 14].

Недостаточная продвинутость многих исследований по изучению свойств микроволновых разрядов на поверхности твердых тел во многом объясняется не только многообразием и сложностью экспериментальных условий, затрудняющих однозначную интерпретацию результатов, но и несовершенством концептуального подхода в целом к решению фундаментальных проблем по взаимодействию микроволновых разрядов с конденсированными средами.

Анализ результатов проведенных исследований свойств микроволновых разрядов на поверхности диэлектриков позволил авторам данной работы предложить новый концептуальный подход [15, 16] к изучению свойств микроволновых разрядов на поверхности твердых тел, который состоит в том, что твердое тело рассматривается не как пассивная "подложка" с неизменными свойствами, а как конденсированная среда, которая в процессе интенсивного взаимодействия с разрядами сильно изменяет не только свои физические свойства, но и свойства самих микроволновых разрядов. В рамках нового подхода авторами данной работы развивается концепция сильного возбуждения и последующей релаксации электронной подсистемы приповерхностного слоя твердых диэлектриков, взаимодействующих с безэлектродными импульсными микроволновыми разрядами. При этом адекватное описание процессов возбуждения и трансформации различных типов разрядов на поверхности диэлектриков становится возможным лишь на основе рассмотрения радиационных явлений, происходящих в конденсированных средах при их взаимодействии с микроволновыми разрядами [15, 16].

В 90-е годы в рамках нового подхода авторами данной работы был обнаружен и исследован новый тип безэлектродного разряда на поверхности диэлектрических материалов в вакууме — поверхностный микроволновый пробой диэлектриков. Было установлено, что этот тип разряда инициируется вторично-эмиссионным электронным разрядом и является особой стадией перехода однородного электронного разряда в плазменно-факельный микроволновый разряд на поверхности диэлектриков [15—19].

В настоящее время развиваются прикладные исследования по микроволновым разрядам на поверхности поликристаллической диэлектрической керамики Al_2O_3 в США (А. J. Durand, доклад на международном симпозиуме XIX ISDEIV, 2000 г.) и в Японии (S. Michizono, доклад на международном симпозиуме XX ISDEIV, 2002 г.) с целью разработки устойчивых к пробую выходных окон мощных микроволновых генераторов. В последние годы становятся все более актуальными исследования по взаимодействию микроволновых разрядов с твердыми телами для решения задач в области плазменных технологий обработки диэлектриков, полупроводников и металлов [20—22].

Цель настоящей работы — исследование взаимосвязи различных типов безэлектродных микроволновых разрядов, развивающихся на диэлектрических монокристаллах (фторид лития LiF, хлорид натрия NaCl, бромид калия KBr, иодид цезия CsI, диоксид циркония ZrO_2) и аморфных диэлектриках (фторопласт, полиэтилен, органическое стекло) с различными видами разрушений, возникающих на поверхности и в объеме этих диэлектриков.

Методика экспериментов и техника измерений

Эксперименты по изучению взаимодействия безэлектродных микроволновых разрядов с диэлектриками в вакууме выполнялись в экспериментальных установках двух типов, принципиально различающихся системами ввода микроволнового излучения в вакуумные камеры и конфигурациями фокусировки микроволнового излучения внутри вакуумных камер. В первой конфигурации (установка ИВА) для фокусировки микроволнового излучения в вакуумные камеры больших размеров (диаметр ≥ 1 м, длина ≥ 2 м) использовались квазиоптические рупорно-линзовые системы (рис. 1) [13, 14], во второй (установка БРУС) — волноводные вакуумные системы без дополнительной фокусировки микроволнового излучения (рис. 2) [15—17].

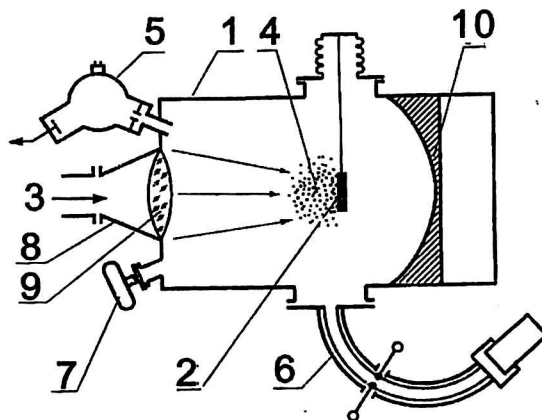


Рис. 1. Схема установки ИВА:

1 — вакуумная камера; 2 — диэлектрический образец; 3 — падающее микроволновое излучение; 4 — плазма микроволнового разряда; 5 — анализатор ионов; 6 — электростатический анализатор электронов; 7 — детекторы ультрафиолетового и рентгеновского излучений; 8 — квазиоптическая система волноводно-конусного преобразователя; 9 — квазиоптическая линза, фокусирующая микроволновое излучение; 10 — сферическое металлическое зеркало

Для исследования микроволновых разрядов на поверхности и в объеме диэлектриков использовались беспримесные диэлектрические монокристаллы (фторид лития LiF, хлорид натрия NaCl, бромид калия KBr, иодид цезия CsI, диоксид циркония ZrO_2) и аморфные диэлек-

трики (фторопласт, полиэтилен, органическое стекло). Поверхности диэлектрических монокристаллов были сколоты по плоскостям спайности или отполированы. Все диэлектрики, использованные в экспериментах, характеризовались малыми коэффициентами поглощения микроволнового излучения в диапазоне частот 2–10 ГГц, при этом тангенс угла диэлектрических потерь составлял величину $(1 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-4})$.

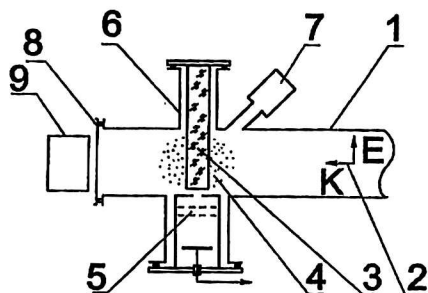


Рис. 2. Схема установки БРУС:

1 — волновод; 2 — падающее микроволновое излучение; 3 — диэлектрический кристалл; 4 — плазма микроволнового разряда; 5 — многосеточный электростатический анализатор; 6 — запредельный патрубок диаметра 24 мм; 7 — фотомножитель; 8 — оптическое окно; 9 — фотокамера

Образцы диэлектриков, использованных в экспериментах на установке ИВА (подробно описана в работе [14]), имели размеры $100 \times 100 \times 5$ мм и помещались в максимум электрического поля стоячей или бегущей электромагнитной волны в гауссовом пучке сфокусированного микроволнового излучения. Источниками последнего являлись импульсные магнетроны (частота колебаний $\nu = 2-10$ ГГц, мощность импульсов $P_0 = 0,5-10$ МВт, длительность импульсов $\tau = 1-50$ мкс, частота следования импульсов $f = 0,1-1$ Гц). Вакуумные камеры откачивались до давления 10^{-3} Па.

Диэлектрические образцы, использованные в экспериментах на установке БРУС [15, 16], имели размеры $70 \times 10 \times 5$ мм и помещались в максимум электрического поля стоячей волны типа TE_{10} , возбуждаемой в металлическом волноводе прямоугольного сечения (120×57 мм) импульсным микроволновым излучением магнетрона (частота колебаний $\nu = 2$ ГГц, мощность импульсов $P_0 = 0,5-5$ МВт, длительность импульсов $\tau = 1-10$ мкс, частота следования импульсов $f = 0,1-1$ Гц). Волновод откачивался безмасляными насосами до давления 10^{-4} Па.

Скоростная фоторегистрация микроволновых разрядов проводилась с помощью электронно-оптического преобразователя (ЭОП) «Кадр-4» в кадровом режиме работы (количество кадров 4, длительность временной экспозиции одного кадра 50 нс, временной интервал между кадрами 50 нс). Энергетические спектры электронов и ионов, эмитированных из области микроволновых разрядов, регистрировались с помощью электростатических анализаторов. Исследования

рентгеновского излучения с энергией квантов в диапазоне 3–20 кэВ проводились с помощью сцинтилляционных детекторов и камеры обскуры с использованием калиброванных металлических фильтров. Измерение концентрации плазмы в микроволновых разрядах выполнялось с использованием сверхвысокочастотного интерферометра на длине волны зондирующего излучения 8 мм. Сигналы падающей и отраженной мощности микроволнового излучения регистрировались с помощью направленных волноводных ответвителей и полупроводниковых детекторов. Исследование разрушений на поверхности и в объеме кристаллов диэлектриков, возбуждаемых плазмой микроволновых разрядов, проводилось с помощью растрового электронного микроскопа JEOLS и оптического микроскопа БИОЛАМ. Все эксперименты были выполнены при комнатной температуре.

Классификация различных типов безэлектродных импульсных микроволновых разрядов на диэлектриках в вакууме

Как показано ранее, мощное импульсное микроволновое излучение может возбуждать на поверхности твердых диэлектриков в вакууме безэлектродные микроволновые разряды [14–16]. Эти разряды, развивающиеся на поверхности диэлектриков в вакууме, можно разделить на три типа: (№ 1) нерезонансный вторично-эмиссионный электронный микроволновый разряд (ВЭЭР); (№ 2) поверхностный микроволновой пробой диэлектриков (ПМП); (№ 3) плазменно-факельный микроволновый (ПФР).

Вторично-эмиссионный электронный разряд преобразуется в плазменно-факельный, проходя через стадию микроволнового пробоя на поверхности диэлектриков: ВЭЭР \rightarrow ПМП \rightarrow ПФР.

Типичные осциллограммы сигналов, характеризующих взаимодействие микроволновых разрядов с диэлектриками на установке ИВА, показаны рис. 3. Длина волны микроволнового излучения $\lambda = 4$ см, интенсивность падающего микроволнового излучения $S = 50$ кВт/см², длительность импульса падающего микроволнового излучения $\tau = 10$ мкс. ВЭЭР (стадия микроволнового разряда А) существует в интервале времени 0–4,7 мкс; ПМП существует в интервале 4,7–5,5 мкс (стадия В); ПФР — в интервале 5,5–10 мкс (стадия С) (начало отсчета времени «0 мкс» совпадает с передним фронтом импульса микроволнового излучения).

Вторично-эмиссионный электронный микроволновый разряд (ВЭЭР)

Может быть возбужден на поверхности диэлектрика при выполнении условия

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

где ε — энергия осцилляции электрона в электрическом поле микроволнового излучения;

E_0 — амплитуда электрического поля микроволнового излучения;

e и m — заряд и масса электрона, соответственно;

ω — угловая частота колебаний микроволнового излучения ($\omega = 2\pi\nu$);

W_1 — “первый критический потенциал” диэлектрика, который зависит от материала и состояния его поверхности ($W_1 \approx 10-100$ эВ). Электроны ВЭЭР имеют энергии, соизмеримые по порядку величины с энергией осцилляции электрона ε . В экспериментальных условиях на установке БРУС энергии осцилляции электронов достигали 1000 эВ, на установке ИВА — значения 200 эВ.

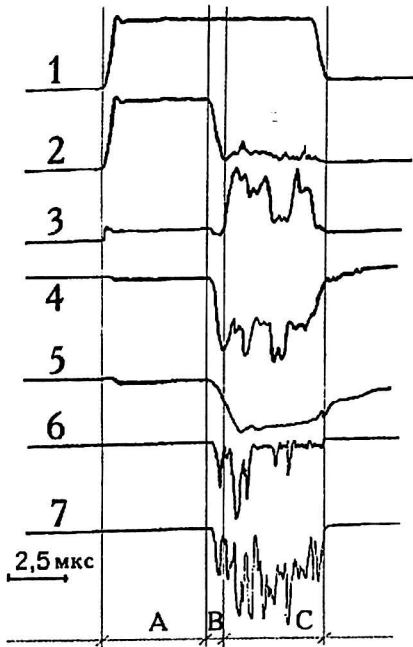


Рис. 3. Типичные осциллограммы сигналов:

1 — мощность падающего микроволнового излучения; 2 — мощность микроволнового излучения, прошедшего через плазму; 3 — мощность микроволнового излучения, отраженного от плазмы; 4 — ультрафиолетовое излучение с энергиями фотонов более 10 эВ; 5 — ультрафиолетовое излучение с энергиями фотонов менее 10 эВ; 6 и 7 — рентгеновское излучение с энергиями квантов в диапазонах значений 6–20 и 3–20 кэВ, соответственно. Стадии микроволнового разряда: А — ВЭЭР; В — ПМП; С — ПФР

Концентрация электронов ВЭЭР намного ниже, чем критическая концентрация электронов в плазме, а плотность электрического тока этих электронов достигает значения $j_e \leq (\omega E_0)/4\pi \sim 1$ А/см². Коэффициент поглощения мощности микроволнового излучения электронами вторично-эмиссионного разряда (на еди-

ницу площади поверхности диэлектрика) можно оценить по формуле

$$\eta \sim eE_0/m\omega c = e\lambda E_0/2\pi m c^2,$$

где c — скорость света в вакууме;

λ — длина волны микроволнового излучения в вакууме.

В наших экспериментах коэффициент поглощения мощности микроволнового излучения составлял величину $\eta \sim (10^{-2}-10^{-1})$. Электроны вторично-эмиссионного разряда поглощали энергию падающего микроволнового излучения, бомбардировали поверхность диэлектриков и вызывали их люминесценцию. Последняя связана с образованием, накоплением и релаксацией короткоживущих центров окраски (время жизни ~ 1 мкс) в тонком приповерхностном слое диэлектриков. Так, например, в кристаллах LiF нами обнаружена люминесценция F_2 и F_3^+ центров окраски [16, 20], которые в диэлектрических кристаллах представляют собой точечные дефекты в кристаллической решетке твердого тела, при этом характерные размеры этих дефектов составляют величину ~ 1 нм.

Концентрация короткоживущих центров окраски в тонком приповерхностном слое диэлектриков (толщина слоя ~ 1 мкм) достигает очень высоких значений $\sim (10^{19} \div 10^{20})$ см⁻³. Однако после окончания единичного импульса микроволнового излучения только малая часть $\sim (10^{-4} \div 10^{-3})$ этих короткоживущих центров окраски преобразуется в долгоживущие центры, стабильные при комнатной температуре в течение нескольких лет. Таким образом, после каждого импульса микроволнового излучения концентрация стабильных центров окраски, образующихся в приповерхностном слое диэлектриков, достигает величины $\sim (10^{15}-10^{17})$ см⁻³. Следовательно, после воздействия на диэлектрик ($10^3 \div 10^4$) импульсов микроволнового излучения (возбуждающих на поверхности диэлектрика вторично-эмиссионный электронный разряд) концентрация стабильных центров окраски, наведенных в приповерхностном слое диэлектрика, достигает значений $\sim (10^{18} \div 10^{21})$ см⁻³.

Концентрация стабильных центров окраски, наведенных в диэлектриках в результате бомбардировки их поверхности электронами ВЭЭР, по крайней мере, на порядок величины превышает концентрацию стабильных центров окраски, наведенных в диэлектриках в результате их облучения γ -излучением, рентгеновским излучением или релятивистскими электронными пучками. Диэлектрические кристаллы LiF, окрашенные с использованием плазмы микроволновых разрядов и содержащие в приповерхностном слое толщиной ~ 1 мкм стабильные агрегатные F_2 и F_3^+ центры окраски, представляют большой интерес для волоконной и интегральной оптики в качестве перспективных оптически-активных сред для создания миниатюрных лазеров и опти-

ческих усилителей, плавно перестраиваемых в ближнем инфракрасном и видимом диапазонах длин волн [20].

Поверхностный микроволновый пробой диэлектриков (ПМП)

Безэлектродный микроволновый пробой на поверхности диэлектриков в вакууме инициируется ВЭЭР, который является предпробойной стадией развития микроволновых разрядов. Длительность существования этой предпробойной стадии представляет собой время запаздывания поверхностного микроволнового пробоя Δt относительно момента времени возникновения ВЭЭР. При этом бомбардировка диэлектриков электронами ВЭЭР вызывает в приповерхностном слое диэлектриков интенсивное образование элементарных электронных возбуждений (электронно-дырочные пары, экситоны, плазмоны). Распад этих электронных возбуждений приводит к образованию короткоживущих центров окраски с временем жизни ~ 1 мкс, которое является достаточным для того, чтобы в течение промежутка времени Δt (время запаздывания пробоя) произошло накопление наведенных короткоживущих центров окраски в достаточном количестве. При этом концентрация короткоживущих центров окраски, наведенных в тонком приповерхностном слое диэлектриков, возрастает с увеличением длительности предпробойной стадии Δt и интенсивности S падающего микроволнового излучения. Когда концентрация наведенных короткоживущих центров окраски достигает значения $\sim (10^{16} - 10^{17}) \text{ см}^{-3}$, то их рекомбинация приводит к образованию "затравочной" электронно-дырочной плазмы с концентрацией $\sim (10^{15} - 10^{16}) \text{ см}^{-3}$. Поглощение энергии падающего микроволнового излучения в "затравочной" электронно-дырочной плазме сопровождается нагревом кристаллической решетки диэлектриков, который стимулирует рекомбинацию короткоживущих центров окраски с образованием дополнительных свободных электронов в зоне проводимости диэлектриков, т. е. приводит к увеличению концентрации электронно-дырочной плазмы и дальнейшему росту поглощения энергии падающего микроволнового излучения. Развитие этого лавинообразного процесса приводит к пробоям на поверхности диэлектриков и возникновению плазмы микроволнового разряда. Так как распределение концентрации электронно-дырочной плазмы на стадии ВЭЭР может быть неоднородно вдоль поверхности диэлектриков, то наиболее интенсивное поглощение микроволнового излучения происходит в тех локальных областях диэлектриков, где концентрация свободных электронов максимальна.

Таким образом, неоднородность электронно-дырочной плазмы в приповерхностном слое диэлектрика приводит к возникновению и формированию контрагированного канала пробоя, вытянутого вдоль вектора электрического поля падающего микроволнового излучения (рис. 4).



Рис. 4. Фотография поверхностного микроволнового пробоя (в форме контрагированного разряда) на диэлектрическом кристалле КВг. Вектор электрического поля падающего микроволнового излучения параллелен каналу пробоя. Размеры кристалла 70×10×5 мм

Время запаздывания поверхностного микроволнового пробоя Δt удовлетворяет эмпирическому закону:

$$(S - S_{thr}) \times \Delta t = Q,$$

где S — интенсивность падающего микроволнового излучения;

S_{thr} — интенсивность падающего микроволнового излучения, соответствующая порогу поверхностного микроволнового пробоя;

Q — удельная энергетическая характеристика микроволнового пробоя.

Значения величин $S_{thr} \approx (5 - 50) \text{ кВт/см}^2$, $Q \approx (0,02 - 1) \text{ Дж/см}^2$ зависят от свойств диэлектриков и возрастают с увеличением частоты колебаний микроволнового излучения ($S_{thr} \propto \omega^2$, $Q \propto \omega$). Пробой диэлектриков сопровождается сильным поглощением (до 100 %) энергии падающего микроволнового излучения в течение короткого интервала времени (0,03—0,8) мкс, интенсивной вспышкой свечения контрагированного разряда и генерацией высокоэнергетичных потоков электронов и ионов из плазмы контрагированного разряда [14—16, 18, 19].

Плазменно-факельный микроволновый разряд (ПФР)

ПФР возникает после микроволнового пробоя на поверхности диэлектриков, сопровожда-

ется образованием плотной плазмы (с концентрацией электронов, намного превышающей критическую плотность $n_{cr} = m\omega^2/4\pi e^2$) и характеризуется сильным поглощением ($\approx 50\%$) мощности падающего микроволнового излучения. На стадии ПФР происходят следующие явления:

- возбуждение сильных ленгмюровских волн в области плазменного резонанса (где плотность электронов в плазме $n_e = n_{cr}$) и ускорение электронов [13, 14] до максимальных энергий $\varepsilon_{e\max} \approx 2\pi e E_0(L\lambda)^{1/2}$ (где L — характеристическая длина резонансной области) в результате самопрокидывания сильных ленгмюровских волн [23, 24];

- генерация высокого положительного потенциала $\varphi \sim 2\pi E_0(L\lambda)^{1/2}$ в области плазменного резонанса и ускорение ионов [14, 25–27] до максимальных энергий $\varepsilon_{i\max} \approx eZ\varphi$, где eZ — заряд иона в плазме.

На установке ИВА максимальные значения энергий электронов, ускоренных в плазменном резонансе, достигали значения 20 кэВ.

Разрушения, образующиеся в диэлектриках при взаимодействии с плазмой микроволновых разрядов

На стадии ВЭЭР поверхность диэлектриков бомбардируется электронами разряда с характеристическими энергиями 100–1000 эВ. Глубина проникновения этих электронов в диэлектрик составляет величину 0,01–0,1 мкм. Импульсное взаимодействие электронов ВЭЭР с поверхностью диэлектриков в течение 1–10 мкс сопровождается нагревом приповерхностного слоя диэлектриков до температуры ~ 1 К и возникновением в нем высокого температурного градиента. Поскольку толщина нагреваемого приповерхностного слоя диэлектриков составляет 1–3 мкм, то градиент температуры в этом слое достигает значений $(3 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^4)$ К/см и вызывает сильные термомеханические напряжения. В щелочно-галогидных кристаллах LiF, NaCl, KCl, характеризующихся высокими значениями коэффициента теплового расширения ($\sim 10^{-4}$ К⁻¹), эти термомеханические напряжения вызывают сильное растрескивание приповерхностного слоя кристаллов вдоль их плоскостей спайности (рис. 5).

Характерной особенностью стадии поверхностного микроволнового пробоя диэлектриков (ПМП) является сильное поглощение мощности микроволнового излучения в плотной плазме контрагированного разряда на поверхности диэлектриков. Интенсивное локальное взаимодействие плотной контрагированной плазмы с диэлектриками вызывает образование треков в приповерхностном слое диэлектриков (рис. 6, 7). Диаметр поперечного сечения этих треков на поверхности кристаллов NaCl и LiF составляет ~ 10 мкм (см. рис. 7).

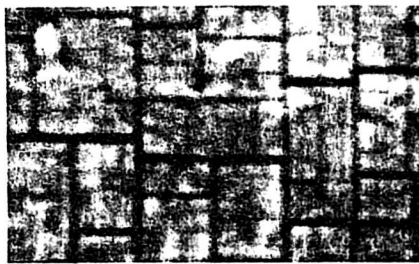


Рис. 5. Трещины (5–30 мкм) в кристалле LiF

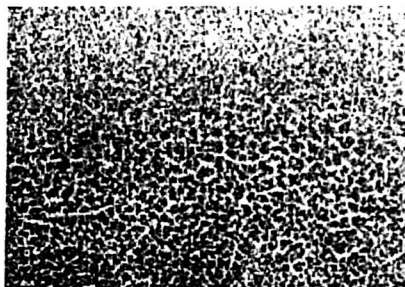


Рис. 6. Система треков (20–100 нм) в органическом стекле



Рис. 7. Трек на поверхности кристалла NaCl

В результате взаимодействия диэлектриков с последовательностью импульсных микроволновых разрядов возникают новые виды разрушений, в частности, кратеры на поверхности диэлектриков (рис. 8) и дендриты в виде системы разветвленных каналов пробоя в объеме диэлектриков (рис. 9–11). Кратеры образуются в русле треков на поверхности диэлектриков, а дендриты зарождаются в этих кратерах и формируются в объеме диэлектриков (в процессе постепенного прорастания каналов пробоя от поверхности в глубь объема диэлектриков в каждом импульсе последовательности микроволновых разрядов).

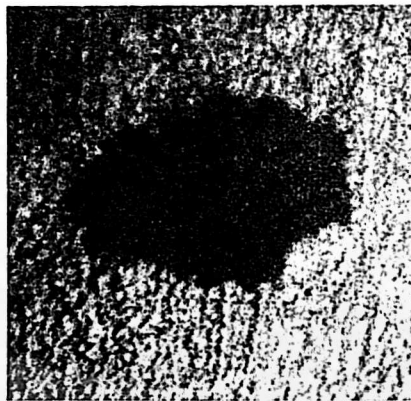


Рис. 8. Кратер на поверхности фторопласта

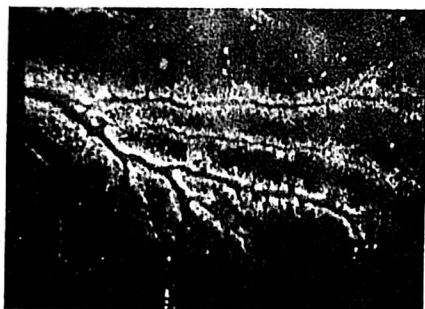


Рис. 9. Дендрит в кристалле NaCl



Рис. 10. Дендрит в полиэтилене



Рис. 11. Кратер и дендрит в кристалле ZrO₂

Характерные значения диаметров кратеров составляют 100—200 мкм в щелочно-галогенидных кристаллах LiF, NaCl, KCl; 20—50 мкм — в кристаллах ZrO₂ и 100—300 мкм — во фторопласте. Значения диаметров дендритов составляют: 10—100 мкм в щелочно-галогенидных кристаллах LiF, NaCl, KCl и 10—200 мкм — во фторопласте и полиэтилене (рис. 8—12).

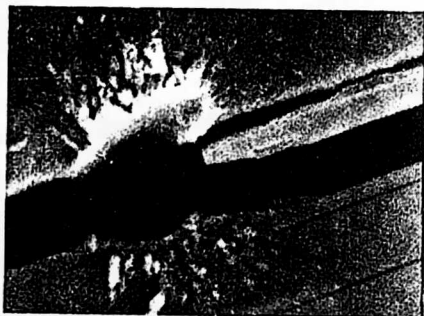


Рис. 12. Кратер и макротрещина на поверхности кристалла NaCl

На стадии плазменно-факельного микроволнового разряда концентрация электронов в плотной плазме достигает своего максимального значения n_{max} вблизи поверхности диэлектрика. При этом $n_{max} \sim 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ намного превышает

концентрацию электронов $n_{cr} = m\omega^2/4\pi e^2 \approx (5 \cdot 10^{10} \div 6 \cdot 10^{11}) \text{ см}^{-3}$, критическую для микроволнового излучения с частотой колебаний 2—10 ГГц.

Сильное поглощение мощности микроволнового излучения (20—50 %) в области плазменного резонанса приводит к возбуждению интенсивных ленгмюровских волн [13, 23]. В результате процесса самопрокидывания этих волн происходит генерация потока ускоренных высокоэнергетичных электронов [24] с характеристическими энергиями 1—20 кэВ. Движение этих высокоэнергетичных электронов из плазмы на стенки металлической камеры приводит к возникновению положительного электрического потенциала в области плазменного резонанса, где $n_e = n_{cr}$. Максимальное значение этого потенциала составляет величину 10—20 кВ и сопоставимо со значениями максимальных энергий быстрых электронов, вылетающих из плазмы наружу. Электроны с энергиями ниже 10 кэВ остаются внутри плазменного образования и бомбардируют поверхность диэлектрика.

Глубина проникновения этих электронов в приповерхностный слой диэлектриков составляет 1—3 мкм. В течение каждого единичного импульсного микроволнового разряда (ПФР) длительностью 1—10 мкс в результате взаимодействия с потоком быстрых электронов из плазмы приповерхностный слой диэлектриков нагревается до температуры $\sim (10^2 - 10^3) \text{ К}$. Такие высокие температуры превышают температуру плавления многих аморфных диэлектриков и приводят к разрушению структуры их приповерхностного слоя в результате процессов плавления и испарения вещества диэлектриков. Средняя скорость испарения вещества с поверхности аморфных диэлектриков достигает значения $\sim 1 \text{ г}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$ при интенсивности падающего микроволнового излучения $S \approx 50 \text{ кВт}/\text{см}^2$ и длине волны микроволнового излучения $\lambda = 15 \text{ см}$. Установлено, что сильная эрозия приповерхностного слоя аморфных диэлектриков является следствием процессов плавления и испарения вещества диэлектриков на стадии плазменно-факельного микроволнового разряда.

Нагрев поверхности кристаллических диэлектриков до температуры $\sim (10^2 - 10^3) \text{ К}$ не приводит к их плавлению, но сопровождается возникновением высоких температурных градиентов $(3 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^6) \text{ К}/\text{см}$ и сильных термомеханических напряжений в приповерхностных слоях диэлектриков на глубине 3—6 мкм. Эти термомеханические напряжения вызывают сильное растрескивание приповерхностных слоев диэлектрических кристаллов LiF, NaCl, KCl вдоль их плоскостей спайности.

В результате разлета высокоэнергетичных электронов из плазмы, на стадиях формирования контрагированного разряда и расширения плазменного факела, были зарегистрированы скачки

положительного электрического потенциала вблизи поверхности диэлектриков и генерация жесткого тормозного рентгеновского излучения. При этом максимальное значение потенциала (до 10—20 кВ) и наиболее жесткое рентгеновское излучение (с энергиями рентгеновских квантов 10—20 кэВ) существуют в течение короткого промежутка времени $\sim 0,5$ мкс только на стадии контрагированного разряда.

На основе исследований микроволновых разрядов в жестких рентгеновских лучах с помощью камеры обскуры было установлено, что наибольшая яркость изображения разрядов на обскурорамах соответствует областям локализации плазменных контрагированных разрядов на поверхности диэлектрика (см. рис. 4). Следовательно, наиболее интенсивное локальное взаимодействие плотной плазмы с диэлектриком в результате его бомбардировки высокоэнергетичными электронами происходит в областях формирования длинных узких плазменных шнуров контрагированного разряда на поверхности диэлектрика.

В наших экспериментах возникновение высоких значений положительного потенциала $\varphi \sim 10$ —20 кВ в микроволновых разрядах обусловлено ускорением электронов в области плазменного резонанса и их разлетом из плазмы. На стадии контрагированного микроволнового разряда области пространственной локализации плотной плазмы представляют собой длинные узкие плазменные шнуры с характеристической длиной ~ 5 —10 см и характеристическим диаметром $d_{pl} \sim (10$ —100) мкм.

Таким образом, на поверхности диэлектриков в окрестности плазменных шнуров с характеристическим диаметром $d_{pl} \sim (10$ —100) мкм формируется электрическое поле с напряженностью $E_{st} \sim \varphi/d_{pl} \approx 1$ —10 МВ/см. Такие сильные электрические поля, создаваемые плазмой микроволновых разрядов, инициируют безэлектродный электрический пробой, распространяющийся от поверхности диэлектрика в глубь его объема. Этот безэлектродный высоковольтный электрический пробой в объеме диэлектриков существенно отличается от высоковольтного электрического пробоя диэлектриков, контактирующих с металлическими электродами [28].

В течение длительности одиночного импульса поверхностного микроволнового пробоя глубина проникновения разрушения (т. е. глубина прораствания дендрита) ~ 10 мкм значительно превышает глубину проникновения $\sim 0,5$ мкм высокоэнергетичных плазменных электронов (с энергиями ~ 10 кэВ) в диэлектрик. Многократное возбуждение контрагированных разрядов, инициируемых 10^3 импульсами микроволнового излучения, и сильное локальное взаимодействие плотной плазмы этих разрядов с диэлектриками приводило к объемным разрушениям диэлектри-

ков в виде кратеров и дендритов, направленных от поверхности в глубь объема диэлектриков (см. рис. 9—11). От каждого кратера в глубь объема диэлектриков "прорастали" дендриты в виде системы разветвленных каналов пробоя с диаметром поперечного сечения 10—200 мкм и длиной до 10 мм. Обнаруженные нами в объеме диэлектриков дендриты аналогичны разрушениям, которые образуются в результате высоковольтного электрического пробоя в объеме диэлектриков, находящихся в постоянном электрическом поле напряженностью ~ 1 —10 МВ/см между металлическими электродами, а также в результате процессов объемного электрического заряжения диэлектриков (облучаемых релятивистскими электронными пучками) и их последующего спонтанного электрического пробоя.

Классификация разрушений, образующихся в диэлектриках в результате их взаимодействия с безэлектродными микроволновыми разрядами

В наших экспериментах по исследованию взаимодействия безэлектродных импульсных микроволновых разрядов с диэлектриками было обнаружено несколько видов разрушений, образующихся на поверхности и в объеме кристаллических и аморфных диэлектриков. Проведенный анализ характерных особенностей этих разрушений позволяет предложить следующую классификацию этих видов локальных разрушений в диэлектриках:

- точечные дефекты (в частности, центры окраски), образующиеся в приповерхностных слоях кристаллических и аморфных диэлектриков (на стадиях ВЭЭР, ПМП и ПФР);
- микротрещины, образующиеся в приповерхностных слоях кристаллических диэлектриков вдоль их плоскостей спайности (на стадиях ВЭЭР, ПМП и ПФР);
- треки, образующиеся в приповерхностных слоях кристаллических и аморфных диэлектриков (на стадии ПМП);
- кратеры, образующиеся в приповерхностных слоях кристаллических и аморфных диэлектриков (на стадии ПМП);
- дендриты, образующиеся в объеме кристаллических и аморфных диэлектриков (на стадии ПМП);
- макротрещины, образующиеся на поверхности и в объеме кристаллических диэлектриков вдоль их плоскостей спайности (на стадии ПМП);
- эрозия, образующаяся в приповерхностных слоях аморфных диэлектриков (на стадии ПФР).

Заключение

В результате экспериментальных исследований обнаружено, что на поверхности и в объеме диэлектриков возникают локальные разрушения, инициированные безэлектродными микроволновыми разрядами различных типов. Проведена классификация различных видов разрушений (точечные дефекты, трещины, микротрещины, макротрещины, кратеры, дендриты, поверхностная эрозия), возникающих в диэлектриках в результате их взаимодействия с различными типами микроволновых разрядов.

Установлено, что основную роль в образовании различного вида разрушений в диэлектриках играют контрагированные микроволновые разряды, которые образуются в результате поверхностного микроволнового пробоя диэлектриков. Плотная плазма контрагированных микроволновых разрядов возбуждает на поверхности диэлектриков сильные локальные квазистатические электрические поля напряженностью порядка $E \sim (1-10)$ МВ/см. Электронная бомбардировка диэлектриков и сильные локальные электрические поля вокруг контрагированной плазмы приводят к образованию следующих локальных разрушений в диэлектриках: точечные дефекты (центры окраски), трещины (каналы пробоя), микротрещины, кратеры, дендриты, поверхностная эрозия.

Таким образом показано, что плазма безэлектродных микроволновых разрядов является источником сильных локальных электрических, тепловых и механических воздействий на диэлектрики.

*Работа выполнена при поддержке
Российского фонда фундаментальных
исследований (проект № 03-02-17140).*

Литература

1. Сазонов В. П. Выходные устройства мощных СВЧ электровакуумных приборов (обзор)//Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1967. № 11. С. 47—72.
2. Strong Microwaves in Plasmas. Vols. 1, 2. Ed. A. G. Litvak. Nizhny Novgorod/Institute of Applied Physics, 2003.
3. Мицис А. Ю. К вопросу о подавлении высокочастотного резонансного разряда дополнительным электрическим смещением//Радиотехника и электроника. 1979. Т. 24. № 1. С. 80.
4. Бляхман Л. Г., Нечаев В. Е. Условия возникновения вакуумного резонансного СВЧ-разряда в магнитостатическом поле//ЖТФ. 1980. Т. 50. № 4. С. 720—727.
5. Мокров А. Б. Исследование вторично-эмиссионного разряда и эмиссии горячих электронов в СВЧ электрических полях: Дис. ... на соискание уч. степени канд. физ.-мат. наук — Л.: ЛПИ, 1981. — 166 с.
6. Волков В. А. Исследование вторично-эмиссионного размножения электронов в высокочастотном электрическом поле: Дис. ... на соискание уч. степени канд. физ.-мат. наук. — Л.: ЛПИ, 1985. — 198 с.
7. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. — М.: Наука, 2004. — 704 с.
8. Кузелев М. В., Рухадзе А. А., Стрелков П. С. Плазменная релятивистская СВЧ-электроника. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 544 с.
9. Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда. — М.: Госатомиздат, 1961.

10. Приезжев Г. М., Сазонов В. П. Исследование вторично-электронного разряда на СВЧ между керамическими поверхностями//Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1966. № 11. С. 119—134.

11. Гришин Л. В., Лукьянчиков Г. С. Рассмотрение вторично-эмиссионного СВЧ-разряда с учетом разброса скоростей электронов//ЖТФ. 1976. Т. 46. № 3. С. 536—543.

12. Гришин Л. В., Дорофеев А. А., Косый И. А., Лукьянчиков Г. С., Савченко М. М. Исследование вторично-эмиссионного СВЧ-разряда при больших углах пролета электронов: Тр. ФИАН. 1977. Т. 92. С. 82—131.

13. 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. № 5. С. 552—565.

14. Батанов Г. М., Иванов В. А. Плазменно-факельное преобразование энергии сверхвысокочастотных волн дециметрового диапазона в энергию квазистационарного электрического тока/В кн.: Генерация нелинейных волн и квазистационарных токов в плазме. — М.: Наука. 1988. С. 46—79; Тр. ИОФАН. 1988. Т. 16. С. 46—79.

15. Батанов Г. М., Иванов В. А., Козыжев М. Е. Микроволновый пробой ионных кристаллов, инициированный вторично-эмиссионным разрядом//Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 59. № 10. С. 655—658.

16. Батанов Г. М., Иванов В. А., Козыжев М. Е., Летунов А. А. Люминесценция короткоживущих центров окраски, наведенных в кристаллах LiF импульсным микроволновым разрядом//Там же. 1997. Т. 66. № 3. С. 163—167.

17. Ivanov V. A., Konyzhev M. E. Interaction of microwave discharges with dielectric LiF crystals//In book: Microwave Discharges: Fundamentals and Applications (Proceedings of IV International Workshop). Ed. Yu. A. Lebedev. Moscow: Yanus-K, 2001. P. 219—228.

18. Ivanov V. A., Konyzhev M. E. Strong Interaction of electrodeless microwave discharges with dielectric LiF crystals//In Book: Proceedings of the XX-th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Tours (France). July 1—5, 2002. Ed. SFV 2002. P. 499—502.

19. Ivanov V. A., Konyzhev M. E. Destructions produced in dielectrics by pulsed microwave discharges//In book: Microwave Discharges: Fundamentals and Applications (Proceedings of V International Workshop, Greifswald, Germany). Ed. Andreas Ohl/Institut für Niedertemperatur-Plasmaphysik e. V. Greifswald, 2003. P. 247—254.

20. Батанов Г. М., Иванов В. А., Козыжев М. Е., Конюшкин В. А., Мирон С. Б. Создание оптически плотного слоя на поверхности LiF кристалла при окрашивании в микроволновом разряде//Письма в ЖТФ, 1993. Т. 19. № 20. С. 42—45.

21. Иванов В. А. Возбуждение и воздействие микроплазменных разрядов на металлы и сплавы в плазме сверхвысокочастотного факела//Прикладная физика. 2001. № 2. С. 5—39.

22. Microwave Discharges: Fundamentals and Applications (Proceedings of V International Workshop, Greifswald, Germany, book). Ed. Andreas Ohl. Institut für Niedertemperatur-Plasmaphysik e. V. Greifswald, 2003.

23. Буланов С. В., Коврижных Л. М., Сахаров А. С. Ленгмюровские колебания конечной амплитуды в области плазменного резонанса//ЖЭТФ. 1977. Т. 72. № 5. С. 1809—1823.

24. Коврижных Л. М., Сахаров А. С. Ускорение электронов в поле плазменного резонанса//Физика плазмы, 1979. Т. 5. № 4. С. 840—848.

25. 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//In book "Strong Microwave in Plasma". V. 2. P. 553—558. (Proceedings of the International Workshop, Suzdal. September 18—23, 1990). Ed. by Litvak A. G., Institute of Appl. Phys., Nizhny Novgorod. 1991.

26. Батанов Г. М., Гладковский И. П., Иванов В. А., Орбели А. Л. Ускорение ионов в горячей плазме СВЧ-разряда//Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. С. 662—666.

27. Алферов В. В., Гладковский И. П., Иванов В. А., Орбели А. Л. Нестационарное ускорение ионов в сильноточной плазме СВЧ-разряда//Там же. 1985. Т. 11. С. 1491—1495.

28. Скандави Г. И. Физика диэлектриков. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1958. — 907 с.

Formation of local fractures in dielectrics interreacting with the electrodeless microwave discharges

V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev

Prokhorov General Physics Institute, Moscow, Russia

Different types of electrodeless microwave discharges were investigated experimentally at surfaces and in the bulk of pure crystal dielectrics (lithium fluoride LiF, sodium chloride NaCl, cesium iodide CsI, and zirconium dioxide ZrO₂ crystals) and amorphous dielectrics (teflon, polyethylene, and organic glass) in vacuum. Some kinds of local destructions arising on the surface and in the bulk of the dielectrics interacted with microwave discharges were observed and classified. The physical mechanism of arising of strong local electrical fields on the surface and in the bulk of dielectrics interacting with microwave discharges is proposed. The physical model of electrodeless electric breakdown and formation of destructions in local areas on the surface and in the bulk of dielectrics interacted with the strong electric fields is developed.