

12

©1994 г.

РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФОЛЬГ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИНТЕНСИВНОГО МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ю.И.Зецер, В.А.Пуштарик

Облучением комбинированных образцов установлено, что разрушение металлических мишеней мощным СВЧ излучением с плотностями потока энергии $10^4 - 10^5$ Вт/см² начинается с прогрева участков с меньшей электропроводностью и последующего возникновения явлений пробоя в недрах у поверхности мишеней. Обнаружены низкочастотные поля внутри замкнутых полостей при возникновении поверхностных пробоев у их внешней поверхности.

Введение

Появление мощных источников микроволнового излучения [1], выдвижение новых идей по использованию этих излучений при обработке материалов [2], а также в глобальных системах передачи энергии [3] показывают необходимость исследования процессов взаимодействия интенсивного микроволнового излучения с различными материалами в свободном пространстве.

В [4] изложены основные механизмы и модели взаимодействия мощного СВЧ излучения с гетерогенными диэлектрическими средами. В настоящей работе делается попытка анализа явлений взаимодействия такого излучения с проводящими средами — металлическими фольгами при интенсивностях излучения $10^4 - 10^5$ Вт/см².

Механизмы появления и развития СВЧ разрядов у поверхности мишеней в свободном пространстве и инициированных при различных давлениях окружающего газа, а также физические модели этих явлений всесторонне исследованы в некоторых работах, в частности в [5].

В настоящей работе основное внимание уделяется исследованию явлений взаимодействия интенсивного СВЧ излучения с металлическими фольгами, особенностям их разрушения под действием возникающих у поверхности СВЧ разрядов, возможным причинам появления и локализации этих разрядов, а также процессам возникновения в замкнутых, заэкранированных полостях вторичного низкочастотного электромагнитного поля, причиной которого является поверхностный СВЧ разряд.

Описанный ниже цикл исследований выполнен в основном в 1970-1975 г.

Разрушение металлических фольг различных материалов

При воздействии СВЧ излучения на металлические поверхности вся поглощаемая энергия практически выделяется в скин-слое металла. При значительной толщине металла (много большей глубины скин-слоя) его прогрев за счет джоулева тепловыделения до температуры испарения из-за большого коэффициента отражения требует чрезвычайно высоких энергий и плотностей потоков энергий (ППЭ).

Современные экспериментальные установки имеют такие плотности потоков энергий, которые не обеспечивают необходимых условий для испарения металлов больших толщин. Поэтому для моделирования и исследования начальных стадий взаимодействия СВЧ излучения с металлами целесообразно проводить эксперименты с металлическими пленками, имеющими толщину, соизмеримую с глубиной скин-слоя. Быстрый нагрев до высоких температур таких пленок из-за малой их массы может быть реализован на имеющихся экспериментальных установках, обеспечивающих ППЭ до $10^4 - 10^5$ Вт/см².

Методика эксперимента

Сфокусированное СВЧ излучение через радиопрозрачное окно подавалось в камеру на металлическую пленку, поверхность которой перпендикулярна излучению. Регистрация происходящих явлений осуществлялась оптической аппаратурой. Высокоскоростные камеры СФР-2М и ФК-1 позволяли фиксировать отдельные процессы, происходящие в течение одного импульса СВЧ излучения. С помощью промышленной телевизионной установки и камеры РФК-5 можно было регистрировать интегральную картину в течение всего времени воздействия.

Спектральные измерения проводились спектрографом ИСП-51 (интегральный спектр за все время воздействия) и специально разработанной спектральной приставкой, действующей вместе с камерой РФК-5 и способной регистрировать спектр при каждом отдельном импульсе.

Экспериментальные исследования проводились при непрерывном и импульсном (с частотой до 10 Гц) воздействии СВЧ излучения с ППЭ $10^3 - 10^4$ Вт/см². Остаточное давление воздуха в камере составляло $10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. В процессе воздействия давление увеличивалось вплоть до $\approx 10^{-3}$ мм рт.ст. В качестве мишеней использовались фольги кадмия и алюминия толщиной 90-900 мкм, а также напыленные на ситалловые подложки металлические пленки кадмия, висмута, индия, алюминия толщиной 1-25 мкм. Указанные материалы выбирались из условия минимальной теплоты испарения ($\approx 0.9 - 1.0$ кДж/г) и как широко распространенные материалы (теплота испарения алюминия ≈ 8.5 кДж/г).

Эксперименты проводились как с мишенями малых размеров, так и с мишенями, размеры которых в 3-4 раза больше диаметра пятна СВЧ излучения в фокальной плоскости, который по уровню 0.7 мощности составлял несколько сантиметров.

Все основные эксперименты проводились с мишенями, конструкция которых показана на рис. 1, а-в. Основная задача конструкции состоя-

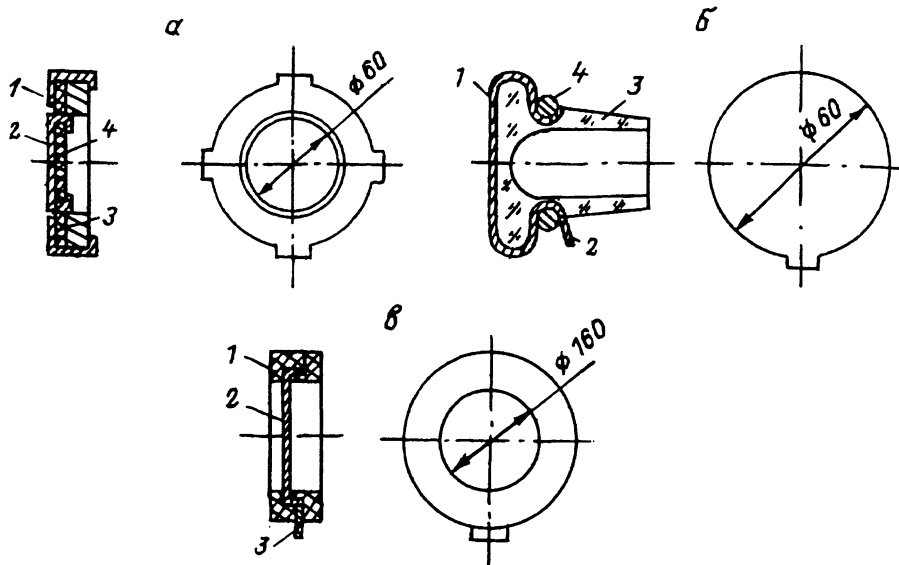


Рис. 1. Конструкции мишеней из металлических фольг для экспериментов по их разрушению интенсивным микроволновым излучением.

а: 1 — кольцо из дюралюминия; 2 — фольга кадмиевая; 3, 4 — подложка фторопластовая;
 б: 1 — фольга кадмиевая, 2 — контакт, 3 — подложка стеклянная, 4 — кольцо прижимное;
 в: 1 — пальцы из оргстекла, 2 — фольга кадмиевая, 3 — контакт.

ла в том, чтобы “убрать” острые кромки фольги из области фокального пятна воздействующего микроволнового излучения.

Кинетика процесса разрушения металлических пленок

Первоначально предполагалось, что основным видом разрушения металлических пленок является нагрев за счет джоулевых потерь в металле, в результате которых часть энергии падающего излучения поглощается в веществе мишени.

Однако проведенные эксперименты показали, что основной механизм разрушения мишеней связан не с равномерным нагревом металлических пленок джоулевым теплом, а с локальным нагревом их поверхности за счет разрядов, образующихся у поверхности пленок при взаимодействии с ними СВЧ излучения. При этом полной энергии, приобретаемой мишенью за счет джоулевых потерь, было недостаточно для испарения мишеней. Так, в одном из экспериментов вес кадмиевой мишени уменьшился за 200 с работы установки на 2.23 г. Для испарения такого количества вещества необходимо было бы затратить энергию 2 кДж, а полная энергия джоулевого нагрева, выделявшаяся в течение всего времени воздействия, могла составить не более 300 Дж (без учета потери энергии мишенью за счет излучения в паузах между импульсами).

Зарегистрированный характер разрушения мишени следующий: первоначальная эрозия кадмия в нескольких точках на поверхности мишени, затем сквозное ее проплавление в этих точках и образование большого отверстия с постепенно увеличивающимся радиусом.

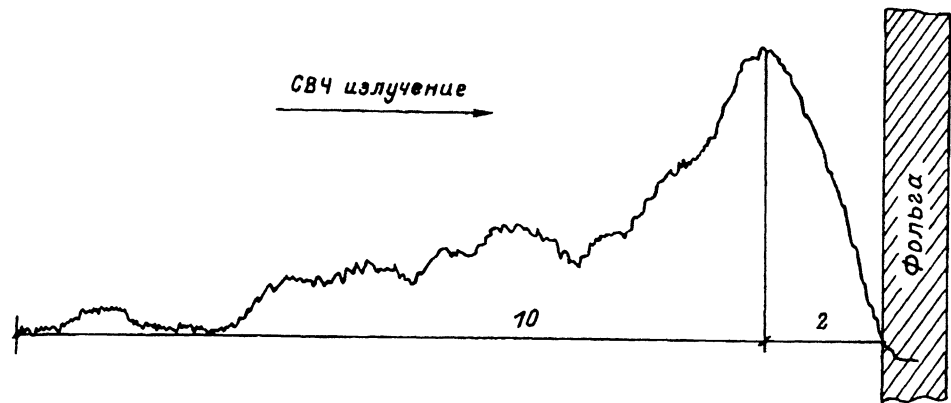


Рис. 2. Распределение свечения в разряде, появляющемся у поверхности металлической фольги из кадмия, при действии на нее микроволнового излучения.

При отсутствии поверхностных разрядов разрушения мишени не происходило. Так, в экспериментах с параметрами воздействия, аналогичными описанным выше, проведенных при нормальном давлении окружающего воздуха, которое препятствовало появлению поверхностных разрядов, эрозии и разрушения не наблюдалось.

Поверхностные разряды возникают практически на всех мишенях, выполненных из указанных материалов, при достаточном времени воздействия. Тем не менее не общий нагрев мишени является доминирующей причиной их появления. Экспериментальное исследование взаимодействия СВЧ излучения с предварительно нагретой до $\sim 120^\circ\text{C}$ мишенью из кадмия толщиной 90 мкм дало те же результаты, что и с ненагретой (эталонной) мишенью.

Фотометрирование пленок, полученных скоростными оптически-камерами, позволило определить пространственное распределение свечения разряда в течение одного импульса у поверхности мишени. На рис. 2 приведено типичное распределение интенсивности свечения разряда. Как видно, максимальная интенсивность локализуется в 2–4 мм от поверхности и спадает до фона на расстояниях порядка 15 мм от мишени.

Исходя из чувствительности пленок, применявшихся в камерах, и светосилы используемой оптики, для некоторых экспериментов были проведены оценки яркостной температуры свечения. При этом диапазон возможных яркостных температур локальных свечений составил $(900-1500) \pm 100^\circ\text{C}$.

На рис. 3 показана типичная зависимость максимального свечения одного и того же разряда в течение одного импульса воздействия от времени, полученная фотометрированием пленок СФР. Как видно, яркость свечения в течение одного импульса меняется, разряд пульсирует со средним периодом 60–80 мкс. Такая пульсация, по-видимому, может объясняться частичной экранировкой разрушаемого участка мишени плазмой, когда ее плотность в разряде достигает критического значения.

На том же рис. 3 показано время существования поверхностных разрядов в течение импульсного воздействия. Цифрами 1–3 соответствен-

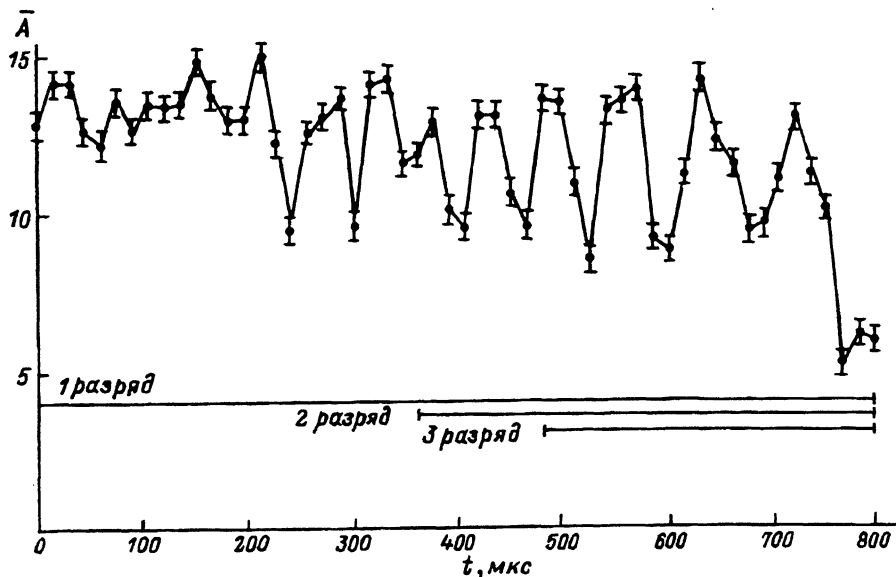


Рис. 3. Изменения величины интенсивности приповерхностного разряда в течение одного импульса (800 мкс) воздействия.

но обозначены интервалы существования одного, двух и трех локализованных разрядов на мишени.

Спектральные измерения, проведенные с помощью спектрографа ИСП-51 и приставки "РФК спектр", позволили получить спектральный состав плазмы разряда. Например, в полученных спектрограммах для кадмиевой мишени идентифицированы яркие линии кадмия $\text{Cd II} = 4415.63 \text{ \AA}$; $\text{Cd I} = 4676.15 \text{ \AA}$; $\text{Cd I} = 4799.9 \text{ \AA}$; $\text{Cd I} = 5086.82 \text{ \AA}$.

Образование поверхностных разрядов сопровождается появлением потенциала мишени, при отсутствии разряда отсутствует и потенциал. На рис. 4 приведена типичная осциллограмма потенциала мишени во время импульса излучения (а), а также осциллограмма огибающей высокочастотного сигнала, отраженного от мишени б. При отсутствии

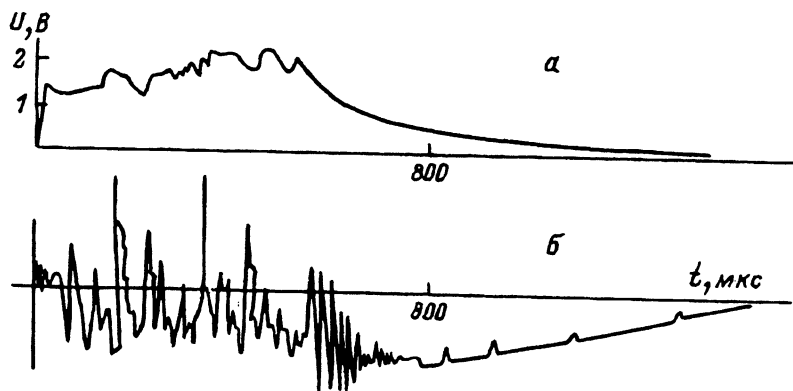


Рис. 4. Осциллограмма потенциала металлической фольги во время возникновения у ее поверхности разряда.



Рис. 5. Вид фольги из кадмия, разрушенной в результате воздействия микроволнового излучения.

разряда огибающая отраженного сигнала представляет собой прямоугольный импульс длительностью 800 мкс. Резкие пульсации, наблюдаемые на осциллограмме, определяются появлением на мишени поверхностных разрядов.

Возможные причины появления СВЧ разрядов на металлических фольгах и места их локализации

Анализ экспериментов указывает на одинаковый характер разрушения мишеней, выполненных из различных материалов. Причиной разрушения является эрозия материала за счет поверхностного разряда, появляющегося при взаимодействии СВЧ излучения с мишенью. Эрозия приводит к образованию раковин, сквозных оплавленных отверстий. Внешний вид металлической пленки из кадмия, разрушенной СВЧ разрядами, показан на рис. 5.

Роль неоднородностей поверхности мишеней

Одной из возможных причин возникновения и локализации разряда является наличие на поверхности мишени неоднородности в виде участка материала с проводимостью, отличной от проводимости основного материала.

Естественно, что процесс взаимодействия бегущей СВЧ волны с мишенью начинается с того, что мишень разогревается за счет джоулева тепла. Уравнение, описывающее этот процесс, имеет вид

$$\frac{dT}{dt} = \kappa \frac{d^2T}{dx^2} + S(x)f(t),$$

где E — температура мишени; κ — коэффициент температуропроводности; $S(x)$ — функция, описывающая пространственное распределение энергии, $f(t)$ — функция, описывающая выделение тепла во времени.

Для теплоизолированной с двух сторон пластины с начальной температурой T_0 и

$$f(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } (k-1)(\Delta t + \tau) \leq t \leq (k-1)(\Delta t + \tau) + \Delta t, \\ 0 & \text{при } (k-1)(\Delta t + \tau) + \Delta t \leq t \leq k(\Delta t + \tau), \end{cases}$$

где $k = 1, 2, \dots$ — количество циклов импульсного нагрева, Δt — единичный интервал времени облучения мишени, τ — интервал времени между двумя последовательными импульсами облучения, имеем следующее решение уравнения теплопроводности для k -го цикла:

$$T = T_0 + \Delta t \left[k S_0 + \sum_{n=1}^{\infty} S_n e^{-\kappa \beta_n \tau} \frac{(1 - e^{-\kappa \beta_n \Delta t})(1 - e^{-\kappa \beta_n k(\Delta t + \tau)})}{\kappa \beta_n \Delta t (1 - e^{-\kappa \beta_n (\Delta t + \tau)})} \cos \sqrt{\beta_n} x \right],$$

где

$$\beta_n = \frac{\pi^2 n^2}{d^2}, \quad S_0 = \frac{1}{d} \int_0^d S(x) dx,$$

$$S_n = \frac{2}{d} \int_0^d S(x) \cos \sqrt{\beta_n} x dx,$$

d — толщина образца.

В случае металла, когда $\varepsilon \ll (4\pi\sigma/\omega)$ (ε — действительная часть диэлектрической проницаемости, σ — проводимость, ω — частота волны), для плоской волны, падающей нормально на плоскую мишень, имеем

$$S(x) = \frac{E_0^2 \omega}{2c\pi\rho} e^{-2x/\delta},$$

где E_0 — напряженность электрического поля СВЧ волн в вакууме, c — теплоемкость материала мишени, ρ — плотность мишени, δ — толщина скин-слоя.

Иначе говоря, тепловыделение практически не зависит от материала мишени, а вся зависимость от проводимости осталась только в выражении для толщины скин-слоя ($\delta \sim \sigma^{-1/2}$).

Еще более упростим задачу. Положим $k = 1$, $\delta/d \ll 1$, $(\pi^2 \kappa \Delta t)/d^2 \ll 1$, тогда получим

$$T \cong T_0 + \frac{E_0^2 \omega}{4\pi c \rho} \frac{\delta}{d} t \left[1 + \frac{d^2}{\kappa t} \left(\frac{1}{3} - \frac{x}{d} + \frac{1}{2} \frac{x^2}{d^2} \right) \right]; \quad 0 \leq t \leq \Delta t.$$

Таким образом, нагрев прямо пропорционален толщине скин-слоя и, следовательно, обратно пропорционален $\sqrt{\sigma}$, т.е. если на поверхности металлической мишени имеются участки с существенно меньшей

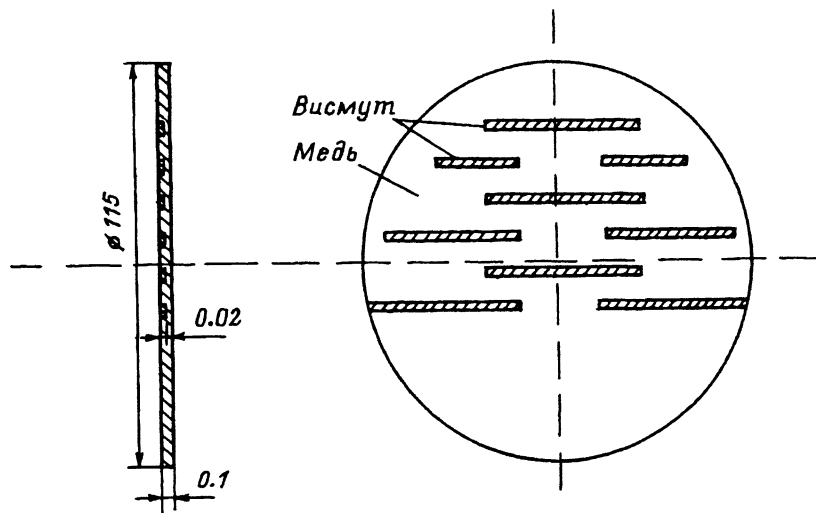


Рис. 6. Конструкция мишени, моделирующей материал с включениями.

проводимостью, то они будут нагреваться сильнее. Этот нагрев активизирует процессы десорбции, повышает плотность газа у поверхности и создает условия для возникновения поверхностного разряда.

Для тонкого образца, когда выполнено условие $d^2 \ll 3\kappa\Delta t$, температура медной мишени будет в 24 раза меньше температуры аналогичного образца из висмута, и при ППЭ = 10^4 Вт/см², $d = 1$ мм на частоте $\nu = 10^{10}$ Гц за один импульс нагрева длительностью 800 мкс составит 0.63 и 15.4°C соответственно.

Экспериментальная проверка этого предположения была выполнена на специально изготовленной мишени, моделирующей материал с включениями (рис. 6). На медную фольгу толщиной 100 мкм были нанесены полосы из висмута, имеющего электропроводность приблизительно в 70 раз меньшую, чем медь, толщиной 20 мкм. Поверхность мишени была обработана так, что полосы висмута не выступали над основным материалом мишени.

Мишень располагалась в фокальном пятне, перпендикулярно направлению воздействия СВЧ излучения. В различных экспериментах полосы висмута ориентировались параллельно и перпендикулярно вектору E . Полученные результаты сравнивались с результатами воздействия на аналогичную медную мишень без висмута.

Таблица 1.

Ориентация полос висмута	Время воздействия, с	Частота воздействия, Гц	Средняя температура нагрева, °C	Примечание
$\perp E$	5	10	104 ± 10	Мишень без полос висмута
$\parallel E$	5	10	5 ± 1	
—	5	10	14 ± 1	

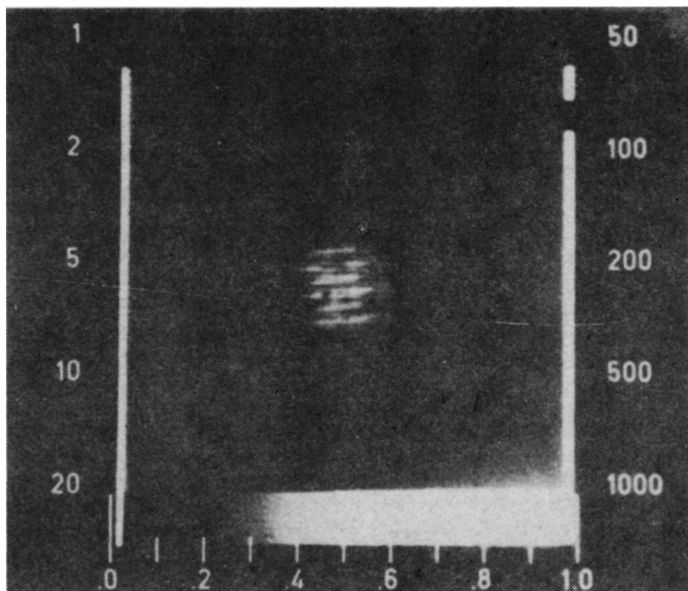


Рис. 7. Изображение “модельной” мишени на экране термовизора в процессе воздействия на нее микроволнового излучения.

Внешняя картина распределения температуры по поверхности мишени регистрировалась с помощью термовизора ФПФ-680. Одновременно проводилось измерение средней температуры мишени с помощью медно-константановой термопары. В табл. 1 приведена сводка полученных результатов при ППЭ $\sim 4.5 \cdot 10^4$ Вт/см².

На рис. 7 представлена сфотографированная с экрана термовизора мишень с висмутовыми включениями. Видно, что нагрев висмутовых включений при их расположении перпендикулярно вектору E намного сильнее, чем нагрев основного материала мишени, т.е. нагрев мишени в этом случае происходит в основном за счет нагрева включений.

Быстрый рост температуры висмутовых полос по сравнению с медью должен привести к появлению разрядов в окрестности этих полос и к их эрозии. Действительно, при увеличении длительности воздействия наблюдались приповерхностные разряды, локализованные у включений.

Анализ мишени после воздействия показал, что полосы висмутовых включений подверглись эрозии. На меди следов эрозии не обнаружено (рис. 8).

Влияние шероховатостей поверхности мишени на процесс возникновения приповерхностных разрядов

Еще одной из возможных причин появления и локализации разрядов у мишени может быть наличие шероховатостей у ее поверхности. Экспериментальная проверка этого предположения проводилась на мишени, выполненной из фольги кадмия (прокат) толщиной 100 мкм. Фольга располагалась в плоскости фокального пятна нормально к вектору E воздействующего СВЧ излучения. Воздействие осуществлялось

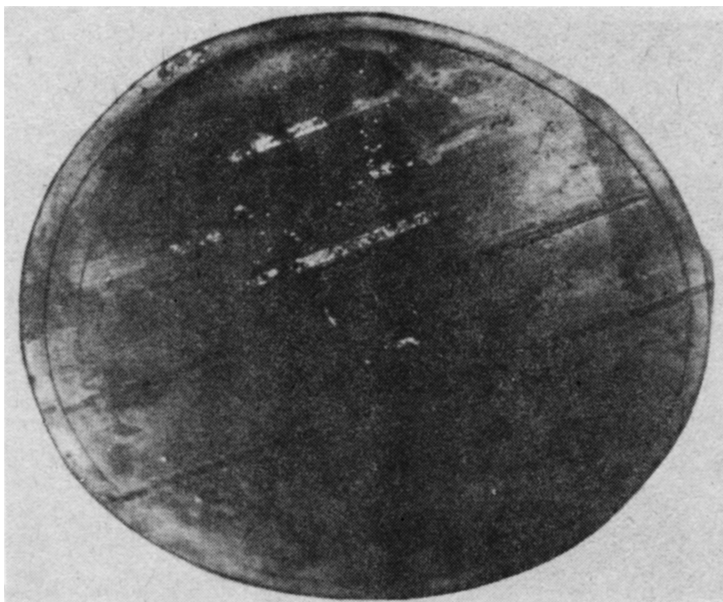


Рис. 8. Внешний вид “модельной” мишени после воздействия на нее микроволнового излучения.

в вакууме при давлении $3 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. и ППЭ = 10^4 Вт/см². В результате проката на поверхности фольги имеются шероховатости в виде выступов, высота которых оценивается приблизительно в 10 мкм, расстояние между ними колеблется в пределах 20–200 мкм. На рис. 9 показана сфотографированная поверхность фольги, увеличенная с помощью сканирующего микроскопа JSM-2 в 100 раз.

Анализ состояния поверхности показывает, что эрозионные разрушения (кратеры) сосредоточены в основном на выступах фольги. Высота этих кратеров пока мала, и поэтому можно проследить их направленность вдоль следов прокатки. После длительного воздействия размеры эрозионных кратеров увеличиваются, они появляются между следами прокатки, что, видимо, связано с общим прогревом участка фольги. Тем не менее осмотр фольги при меньшем увеличении позволяет отметить общую направленность разрушений, соответствующую направлению проката.

Сопоставление полученных результатов с имеющимися данными по взрывной эмиссии [6] говорит о том, что и в нашем случае воздействия возможен такой механизм развития поверхностного разряда. Действительно, при падении СВЧ излучения на металлическую поверхность с шероховатостями, размеры которых значительно меньше длины волны падающего излучения, поле вблизи шероховатости может считаться квазистатическим [7]. В этом случае поле вблизи шероховатости обратно пропорционально радиусу закругления [8]

$$E = r^{-1 - \frac{1}{2 \ln \theta}},$$

где θ — угол между образующими острия.

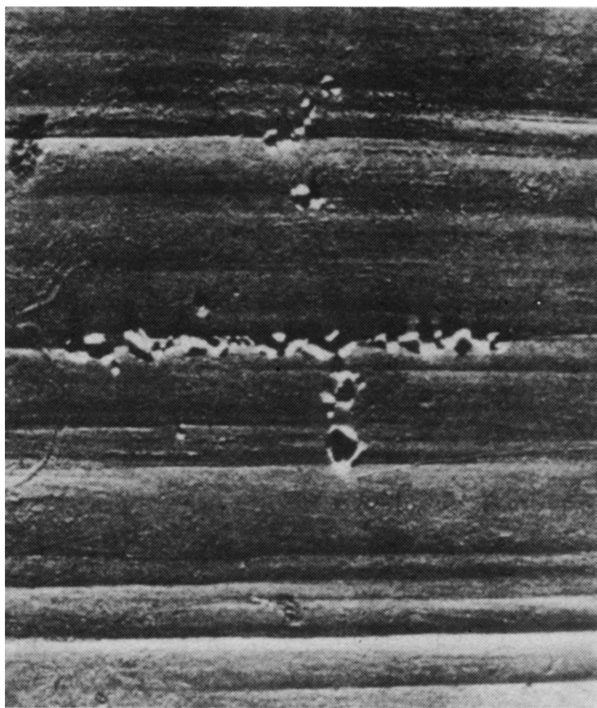


Рис. 9. Поверхность кадмиевой фольги на начальном этапе разрушения микроволновым излучением.

Ввиду малости этого радиуса напряженность поля резко возрастает, ток автоэлектронной эмиссии также возрастает. При напряженностях внешнего поля порядка десятка киловольт на сантиметр поле вблизи острий может достичь столь большой величины, что выделяющееся в микрошероховатости тепло приведет к его быстрому испарению (взрывная эмиссия).

Возникновение низкочастотного электромагнитного поля внутри замкнутой металлической оболочки при воздействии на нее интенсивного СВЧ излучения

Электрические разряды, возникающие вблизи или на поверхности замкнутых металлических оболочек при воздействии на них СВЧ излучения, могут явиться источниками вторичного электромагнитного поля. В случае достаточной интенсивности возможно проникновение поля внутрь замкнутой оболочки либо индуктирование внутри нее электромагнитного импульса.

Проводились экспериментальные исследования вторичных низкочастотных электромагнитных полей и возможности их проникновения внутрь замкнутой металлической оболочки. При этом плотность потока энергии СВЧ излучения составляла в импульсе около 10^4 Вт/см², а длительность импульса — 800 мкс.

В качестве замкнутой металлической оболочки был выбран цилиндр из алюминиевой фольги толщиной $\cong 0.12$ мм, имеющий с торцов крышки из того же материала. Диаметр цилиндра 172 мм, высота 230 мм. Конструкция не имела щелей и отверстий, через которые элек-

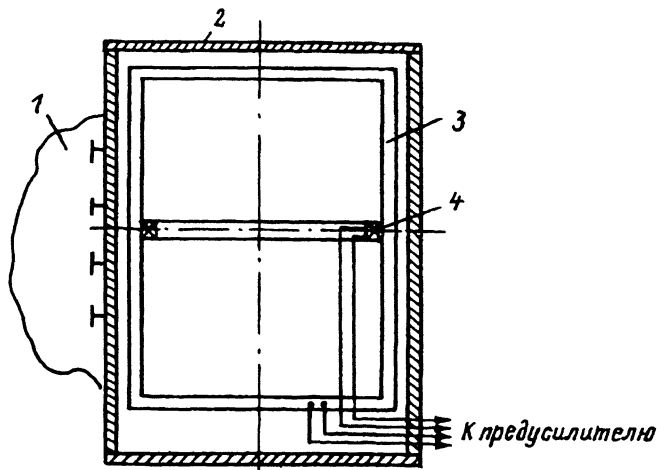


Рис. 10. Конструкция замкнутого металлического цилиндра с инициаторами разряда.

1 — область СВЧ разряда, 2 — цилиндр, 3 — вертикальная катушка, 4 — горизонтальная катушка.

тромагнитное поле могло непосредственно проникнуть внутрь оболочки.

Регистрация электромагнитного поля внутри цилиндра проводилась с помощью двух взаимно перпендикулярных рамочных антенн, охватывающих весь внутренний периметр цилиндра (рис. 10). Параметры этих антенн (вне экрана) приведены в табл. 2.

Эксперименты проводились для цилиндра, помещенного в вакуум (давление окружающего воздуха 10^{-5} мм рт.ст.). При воздействии на него СВЧ излучения разряд на поверхности цилиндра появлялся не при каждом импульсе. Это дало возможность отличить сигналы в катушках, возникающие при поверхностном разряде и без него.

На рис. 11 приведены типичные осциллограммы сигналов с катушек индуктивности, полученные при наличии поверхностного разряда на цилиндре. Для сравнения штриховой линией показаны осциллограммы с катушек при отсутствии поверхностного разряда. Как видно, осциллограммы фиксируют существование внутри замкнутого неземленного металлического цилиндра электромагнитного поля, которое связано с разрядом, возникающим на поверхности цилиндра при воздействии на него СВЧ излучения.

Таблица 2.

Вид антенны	Число витков	Средняя площадь витка, см ²	Активное сопротивление, Ом	Индуктивность, мГн
Горизонтальная катушка	500	96	233	61.0
Вертикальная катушка	400	248	342	82.0

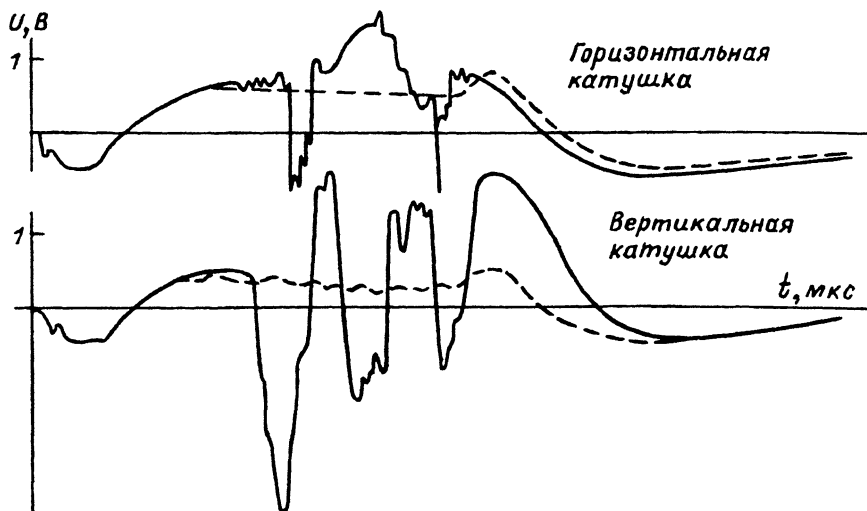


Рис. 11. Осциллограммы низкочастотного электромагнитного поля, зарегистрированного внутри замкнутого металлического цилиндра, при возникновении на его поверхности СВЧ разряда.

Появление электромагнитного поля внутри замкнутого металлического объема при воздействии на него СВЧ излучения, возможно, определяется рядом причин, а именно наличием низкочастотных составляющих поля, которые при достаточной амплитуде могут проникать внутрь цилиндра, обнаруженным мерцанием поверхностных разрядов, возникающих при воздействии СВЧ излучения на металлы, асимметрии расположения поверхностного разряда на цилиндре (со стороны падения СВЧ излучения), наличием различных контактных точек в металлических конструкциях, имеющих сопротивление, отличное от основного материала (например, места контакта дна и корпуса), и т.д.

Выводы

1. Характерной особенностью разрушения (нарушение целостности) металлических фольг толщиной 90–900 мкм интенсивным непрерывным излучением ($10^4 - 10^5$ Вт/см²) является не равномерное их плавление (испарение) за счет поглощения энергии излучения в скин-слое, а точечное эрозионное разрушение за счет возникновения СВЧ разрядов у поверхности этих фольг, локализованных в определенных местах поверхности, способствующих их появлению. Такой характер разрушения требует минимального энергозатрата, при котором общий нагрев всей разрушаемой фольги происходит до температур, существенно меньших температуры плавления.

2. Состояние поверхности мишени, а именно наличие шероховатости или включений из материалов с электропроводностью, отличной от электропроводности мишени, может оказать существенное влияние на появление приповерхностных разрядов.

Механизм развития разрядов при наличии шероховатостей, по-видимому, аналогичен механизму взрывной эмиссии. Характерным

отличием в нашем случае является более низкое значение напряженности действующего электрического поля ($\sim 2 \cdot 10^3$ В/см).

Развитие приповерхностных разрядов при наличии включений с электропроводностью, меньшей, чем остальной материал мишени, определяется большим джоулевым нагревом этих участков, образованием областей повышенного давления газа, в котором может произойти пробой.

3. Интенсивный разряд у поверхности металлической фольги, образующей замкнутую полость (например, цилиндрическую), является причиной генерации внутри этой полости низкочастотного (вплоть до 40 Гц) вторичного электромагнитного поля.

Список литературы

- [1] Нейлос Э.Дж. // ТИИЭР. 1978. Т. 66. № 3. С. 5
- [2] Применение СВЧ энергии в технологических процессах и научных исследованиях. VI Всесоюз. научно-практическая конф. Саратов, 1991.
- [3] Brown W.C. // Proc. IEEE. 1974. Vol. 62. N 1. P. 11.
- [4] Зацер Ю.И., Ланцбург Е.Я. // ДАН СССР. 1992. Т. 324. № 5.
- [5] Батанов Г.М., Грицинин С.И., Косый И.А. и др. // Тр. ФИАН. СВЧ разряды высокого давления. М.: Наука, 1985. Т. 160. С. 174.
- [6] Месяц Г.А. // Письма в ЖТФ. 1975. Т. 1. Вып. 19.
- [7] Страттон Дж.А. Теория электромагнетизма. М.: Гостехиздат, 1948.
- [8] Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М., 1957.

Институт динамики геосфер
Москва

Поступило в Редакцию
30 декабря 1992 г.
В окончательной редакции
25 марта 1993 г.