

01:09

Индуцированное поле электромагнитного вибратора, расположенного над помещенным в сверхвысокочастотный пучок проводящим экраном

© Л.П. Грачев, И.И. Есаков, П.Б. Лавров, А.А. Раваев

Московский радиотехнический институт РАН,
117519 Москва, Россия
e-mail: grachev@mrtiran.ru

(Поступило в Редакцию 11 января 2011 г. В окончательной редакции 9 июня 2011 г.)

Приведены результаты расчетов индуцированного поля цилиндрического электромагнитного вибратора со сферически закругленными концами. Вибратор располагался над плоским экраном, помещенным в линейно поляризованный квазиоптический сверхвысокочастотный пучок. Плоскость экрана перпендикулярна вектору Пойнтинга излучения. Ось вибратора параллельна вектору возбуждающей его электрической компоненты поля. В расчетах при неизменном диаметре вибратора и уровне исходного поля варьируются длина вибратора и его расстояние до экрана. В результате подтверждено, что индуцированное поле вибратора с длиной, близкой половине длины волны поля, максимально у концов вибратора, а зависимость его величины от длины вибратора имеет резонансный характер. В расчетах получены данные о степени укорочения „полуволнового“ вибратора, обеспечивающей максимальный уровень индуцированного поля. Численное моделирование дало и в определенной степени неочевидный результат. Оно выявило, что величина индуцированного поля резонансного полуволнового вибратора существенно возрастает при его приближении к экрану на расстояния, меньшие четверти длины волны поля. При этом растет добротность характеризующего вибратор эквивалентного электромагнитного колебательного контура, а само индуцированное поле все в большей степени локализуется между обращенной к экрану поверхностью концов вибратора и экраном. Выполненные натурные эксперименты качественно подтвердили теоретические выводы. Полученные результаты позволяют существенно расширить возможный диапазон применения электромагнитных вибраторов в качестве инициаторов электрического пробоя газов высокого давления для зажигания сверхвысокочастотных разрядов в квазиоптических пучках с малым уровнем исходного поля.

Введение

Газовый электрический разряд в электромагнитном (ЭМ) квазиоптическом пучке сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона длин волн λ может быть зажжен и при уровне электрической составляющей исходного ЭМ поля E , меньшем критического E_{cr} , т.е. минимального пробойного уровня, необходимого для осуществления самостоятельного безэлектродного электрического пробоя газа при заданном его давлении p [1]. В этом случае пробой должен быть каким-либо способом инициирован, т.е. необходимо дополнительными средствами в заданной локальной области СВЧ-пучка обеспечить условия электрического пробоя.

Один из способов пробоя газа в квазиоптическом СВЧ-пучке с $E < E_{cr}$ заключается в помещении в пучок линейного ЭМ-вибратора [2]. При его длине $2L \approx (\lambda/2)$ индуцированное поле вибратора максимально в области его концов-полюсов и может существенно превышать возбуждающее его поле.

Традиционно ЭМ-вибраторы используются в антенной технике для излучения и приема ЭМ-волн метрового диапазона λ , и для этих целей их характеристики достаточно изучены [3–5]. Использование же вибратора в качестве инициатора СВЧ-пробоя имеет свои особенности. В этом случае важно не распределение тока по его длине, а существенное превышение поля на полюсах

вибратора E_{pol} по сравнению с исходным возбуждающим его полем E . Кроме того, в сантиметровом диапазоне длин волн отношение λ к диаметру вибратора $2a$, от которого зависит его степень укорочения, обеспечивающая максимум E_{pol} , может быть существенно меньше этого параметра, характерного для метрового диапазона λ [3,4]. Эти соображения и обосновывали ранее проведенные исследования свойств ЭМ-вибраторов именно как инициаторов СВЧ-пробоя газа [2].

Иницирующий пробой вибратор может располагаться и над помещенным в ЭМ-пучок плоским экраном. В этом случае ближайшая к экрану пучность поля с амплитудой E_0 , образованная падающей и отраженной волнами, находится на расстоянии от плоскости экрана $h = \lambda/4$. Кажется естественным помещение инициатора именно в пучность поля, так как с уменьшением h возбуждающее его поле E уменьшается, стремясь к нулю. Однако все не так очевидно. Эквивалентная схема вибратора длиной $2L \lesssim (\lambda/2)$ представляет собой последовательный колебательный контур [3,5]. Добротность Q этого контура существенно зависит от его активного сопротивления R . У вибратора из металла величина R определяется в основном его сопротивлением излучения R_{Σ} . В свою очередь известно, что при помещении вибратора над экраном его сопротивление R_{Σ} снижается с уменьшением h [3,5]. В результате при приближении вибратора к экрану на расстояния $h < (\lambda/4)$ добротность

Q возрастает, и определенный этим рост отношения E_{pol}/E может скомпенсировать падение E .

Возникает естественный вопрос, как изменится способность ЭМ-вибратора осуществлять инициацию СВЧ-пробоя газа при его приближении к экрану. Ответу на этот вопрос и были посвящены описываемые в настоящей работе исследования. В них первоначально выполнялось численное моделирование, а затем — натурный эксперимент. При моделировании рассчитывался модуль электрической компоненты поля в окрестности вибратора. В натурном эксперименте определялось максимальное давление воздуха $p = p_{\text{br}}$, при котором фиксировался его СВЧ-пробой. Для облегчения сравнения результатов численных и натуральных экспериментов в обоих случаях по возможности соблюдалась тождественность постановки задач. В них исследовались вибраторы одинаковой формы. Частота f колебаний ЭМ-поля была одной и той же. Совпадали и диапазоны варьирования длины $2L$ вибратора и расстояния h его оси до экрана.

Численное моделирование

Трехмерное (3D)-моделирование рассматриваемой электродинамической задачи осуществлялось с применением традиционного сеточного метода (метода конечных элементов) и с привлечением программного продукта Microwave Studio из пакета CST Studio Suite 2009 компании „Computer Simulation Technology“. Для повышения достоверности получаемых результатов применялись два „движка“ программы с временным (Time-Domain) и частотным (Frequency-Domain Solver) представлениями возбуждающих сигналов и полей и соответственно с прямоугольной и тетрагональной сетками. Естественно, в обоих случаях применялись „адаптация“ сетки, а также и ее локальное усиление (refinement) в проблемной области, т. е. на концах вибратора.

Численное моделирование показало, что более достоверные и точные результаты при моделировании „тонких“ высокочастотных объектов, у которых, как минимум, один и характерных размеров $2a \ll \lambda$, а другой, напротив, соизмерим с длиной волны $2L \approx \lambda$, обеспечивает „частотный движок“. Цена этого — более высокие требования к вычислительным ресурсам и прежде всего к оперативной памяти.

Постановку задач демонстрирует рис. 1. На нем показано проходящее через ось вибратора сечение „счетного“ объема, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда. Ограничивающая его нижняя плоскость является идеальным проводником. Через верхнюю плоскость в объем поступает линейно поляризованное ЭМ-излучение с плоским фазовым фронтом. Его вектор Пойнтинга Π перпендикулярен плоскости ввода излучения в рассматриваемый объем. Верхняя и боковые ограничивающие параллелепипед плоскости радиопрозрачны для ЭМ-излучения из него. Как показано на рис. 1, в расчетный объем помещен ЭМ-вибратор. Его ось параллельна вектору электрической составляющей

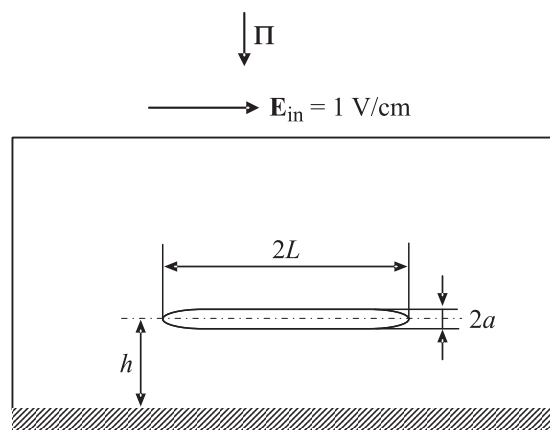


Рис. 1. Схема численного моделирования.

возбуждающего поля. Граничные условия для полей на поверхности вибратора соответствуют идеальной проводимости его материала.

Параметры расчетов были следующими. Частота ЭМ-колебаний — $f = 2.45$ GHz. Амплитуда электрической компоненты излучаемого в расчетный объем поля — $E_{\text{in}} = 1$ V/m. Диаметр цилиндрического вибратора со сферически закругленными концами $2a = 3$ mm. Его длина варьируется в диапазоне $2L = 46$ –61 mm. Расстояние оси вибратора до проводящей плоскости задается следующими дискретными значениями $h = 53, 45, 31, 20, 10, 7, 5$ и 3 mm.

На рис. 2 в виде графиков помещены результаты расчетов для разных зависимостей h от $2L$ отношения максимального значения модуля электрической компоненты индуцированного поля E_{pol} к полю E_{in} . Это отношение

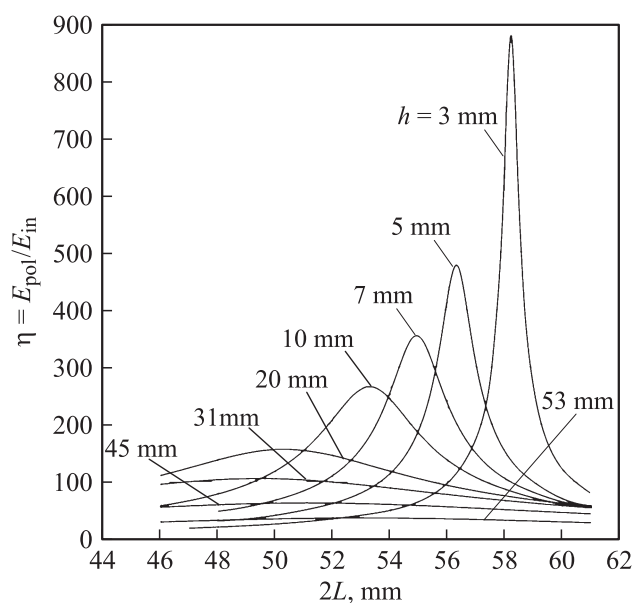


Рис. 2. Расчетные зависимости относительного максимального значения модуля индуцированного поля вибратора η от его длины $2L$ при различных расстояниях h вибратора от экрана, указанных на рисунке.

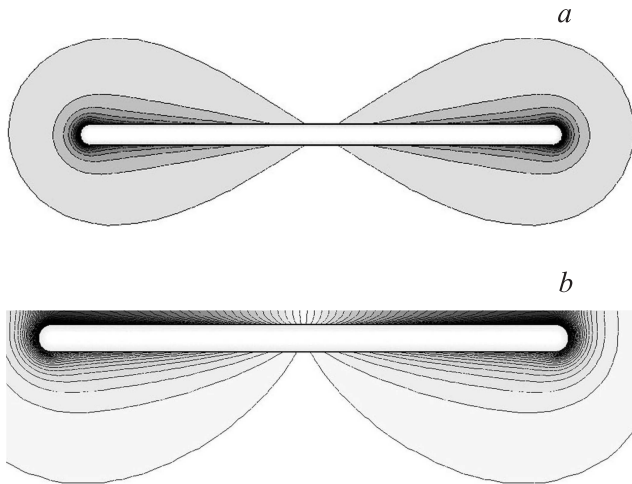


Рис. 3. Характерные примеры расчетного распределения индуцированного поля вблизи ЭМ-вибратора. h , мм: a — 3, b — 31.

можно условно назвать коэффициентом усиления по полю η .

Из графиков следует, что зависимости $\eta(2L)$ имеют резонансный характер. При этом в расчетном диапазоне варьирования величины h с ее уменьшением характеризующие эти зависимости значения коэффициента Q растут. Растет и величина полевого коэффициента усиления η_{\max} , соответствующая резонансной длине вибратора. Так, при $h = 3$ мм величина η_{\max} достигает почти 900, хотя при этом h величина возбуждающего инициатора поля E с учетом отражения ЭМ-излучения от экрана составляет 30% от E_{in} . Из графиков также следует, что резонансные длины вибраторов $2L_{\text{res}} < (\lambda/2)$. При этом по мере уменьшения h коэффициент укорочения $\chi = (\lambda/2)/2L_{\text{res}}$ сначала увеличивается, а затем при $h < (\lambda/4)$ — уменьшается.

Используемая выше величина поля E_{pol} — это именно максимальное значение модуля индуцированного поля. При ее определении выполненное моделирование тоже дало важный результат. Из него следует, что и при наличии экрана индуцированное поле максимально в области концов вибраторов, но его пространственное распределение существенно зависит от размера h .

Для примера на рис. 3, a, b приведены распределения полей вблизи инициаторов резонансной длины соответственно при $h = 31$ и 3 мм. На них вдоль каждой линии, нанесенной в пространстве около инициатора, модуль электрической компоненты поля одинаков. Сравнение их величин можно оценить по степени почернения изображений.

Рисунки иллюстрируют следующий результат расчетов. Индуцированные поля максимальны вблизи концевых поверхностей вибратора. При сравнительно больших h они распределены практически симметрично относительно оси вибратора. При его приближении к экрану эти поля начинают все в большей степени концентрироваться между полюсными поверхностями

вибратора, обращенными к экрану, и самим экраном. При этом и расположенные на поверхности вибратора „точки“ максимума E_{pol} смещаются от его оси по направлению к экрану к линиям сопряжения основной цилиндрической поверхности вибратора и его концевых полусфер.

Экспериментальная установка, методика выполнения опытов и их результаты

Экспериментальная установка содержит оборудование, формирующее квазиоптический СВЧ-пучок, и рабочую камеру.

Схема СВЧ-части установки приведена на рис. 4. В нее входит магнетрон, генерирующий ЭМ-колебания, которым в „свободном“ пространстве соответствует $\lambda = 12.24$ см. С выхода магнетрона ЭМ-волна распространяется по прямоугольному волноводу с внутренним сечением 9×4.5 см. Волноводный тракт оканчивается рупорной антенной длиной 15 см в форме обелиска с входным сечением 9×4.5 см и квадратным излучающим раскрытием размером 9×9 см. Сформированный линейно поляризованный ЭМ-пучок излучается вертикально вниз в центральную область герметичной „СВЧ-безэховой“ рабочей камеры. Давление воздуха в ней p_c может устанавливаться в диапазоне от атмосферного значения до $p_c \approx 3$ Торр и измеряться с точностью ± 1.5 Торр. В плоскости соединения рупора с волноводом расположена радиопрозрачная пластина, которая герметизирует волноводный тракт. Давление воздуха в нем всегда является атмосферным. Давление воздуха в рупоре отслеживает давление p_c .

В опытах на расстоянии $H = 71$ мм от излучающего раскрытия рупора перпендикулярно вектору Π помещается прямоугольный алюминиевый лист размером 12×12 см. На нем по оси ЭМ-пучка устанавливается

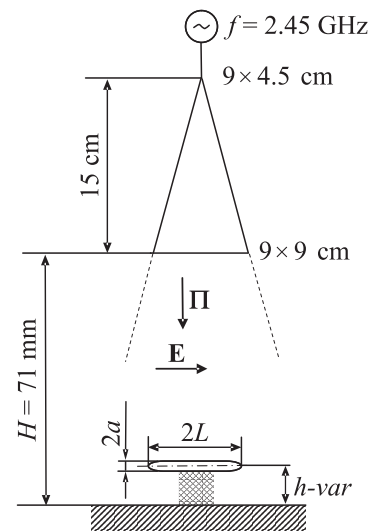


Рис. 4. Схема СВЧ-части экспериментальной установки.

пенопластовая стойка с прямоугольным поперечным сечением размером 3×3 см. На верхнюю плоскость этой стойки также симметрично оси пучка помещается алюминиевый цилиндрический ЭМ-вибратор со сферически закругленными концами конкретной длины $2L$ и диаметром $2a = 3$ мм. Его ось идет вдоль вектора \mathbf{E} . Высота пенопластовой стойки обеспечивает требуемое расстояние от оси вибратора до поверхности экрана h .

Контрольные измерения по методике, изложенной в работе [6], дали в ближайшей к экрану пучности ЭМ-волны при $h = 31$ мм значение амплитуды поля $E_0 = 173$ В/см.

Опыты при конкретном значении h начинались с вибратора наибольшей длины $2L = 61$ мм $\approx \lambda/2$. Он помещается на пенопластовую стойку, и при атмосферном давлении p_c включается СВЧ-генератор. В опытах при всех h при этом давлении вибратор не инициирует пробой, и p_c с шагом $\Delta p_c = 30$ Торг начинает уменьшаться до регистрации пробоя. Факт пробоя надежно регистрируется визуально через кварцевый иллюминатор на боковой поверхности рабочей камеры. После регистрации факта пробоя давление p_c увеличивается на 30 Торг и делается выдержка в несколько минут. Затем p_c начинает уменьшаться, но уже с шагом $\Delta p_c = 3$ Торг. Таким образом, максимальное давление воздуха, при котором данный ЭМ-вибратор инициирует его пробой $p_c = p_{br}$, определяется с точностью до 3 Торг. Затем ЭМ-вибратор укорачивается, цикл измерений давления p_{br} с меньшим размером $2L$ повторяется.

Укорочение вибратора происходит с одного и того же конца, т.е. форма другого его конца в каждом цикле при конкретном h остается неизменной. Имеющиеся данные по исследованию свойств плазмы глубоко подкритического СВЧ-разряда в воздухе констатируют, что при $p \gtrsim 100$ Торг температура газа в плазменной области превышает 1000 К [1]. Это может приводить к тепловой эрозии поверхности вибратора. Для ее недопущения в опытах СВЧ-излучение включается на короткое время $\tau_{pul} = 0.2$ с. При этом в них при неизменных условиях пробой в последовательных включениях СВЧ-генератора даже при $p_c < p_{br}$ носит нерегулярный характер. Это связано с возможным отсутствием около концевой, полюсной поверхности вибратора с усиленным полем E_{pol} свободных электронов, кладущих начало пробойной лавине. Для ликвидации этой нестабильности в опытах синхронно с включением СВЧ-излучения поверхность одного из полюсов вибратора освещается ультрафиолетовым (УФ) излучением, генерируемым плазмой расположенного вне ЭМ-пучка импульсного искрового высоковольтного разрядника. В опытах УФ-излучение освещает конец вибратора с неизменной геометрией. Эксперименты показали, что при наличии УФ-подсветки пробой воздуха при $p_c = p_{br}$ носит регулярный характер.

Результаты измерений p_{br} в виде графиков $p_{br}(2L)$ при фиксированных h приведены на рис. 5.

Из графиков следует их качественное совпадение с расчетными зависимостями, помещенными на рис. 2.

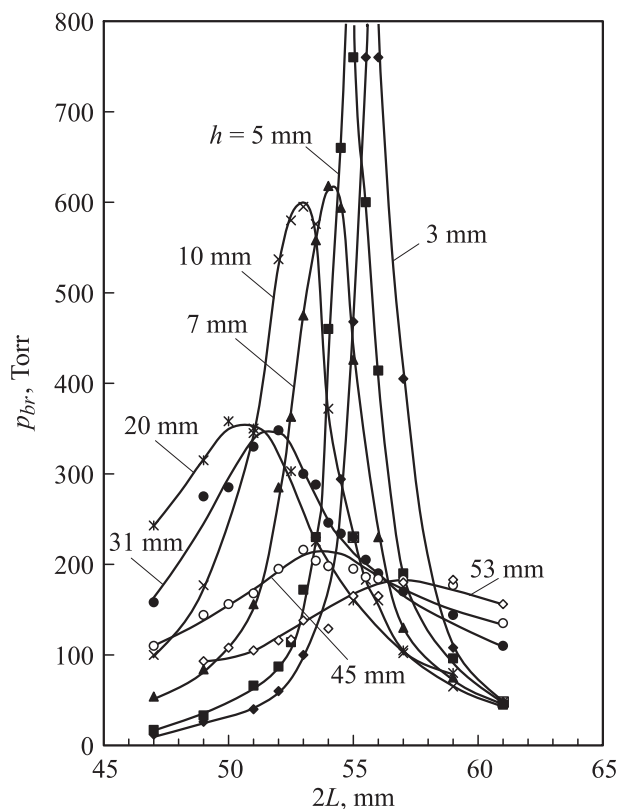


Рис. 5. Экспериментальные зависимости максимального давления воздуха p_{br} , при котором вибратор инициирует его электрический пробой, от длины вибратора $2L$ при различных расстояниях h вибратора от экрана, указанных около кривых на рисунке.

Экспериментальные графики имеют вид резонансных кривых. С уменьшением h характеризующий их параметр Q растет, растут и давления $p_{br \max}$, соответствующие резонансной длине вибратора. С уменьшением h

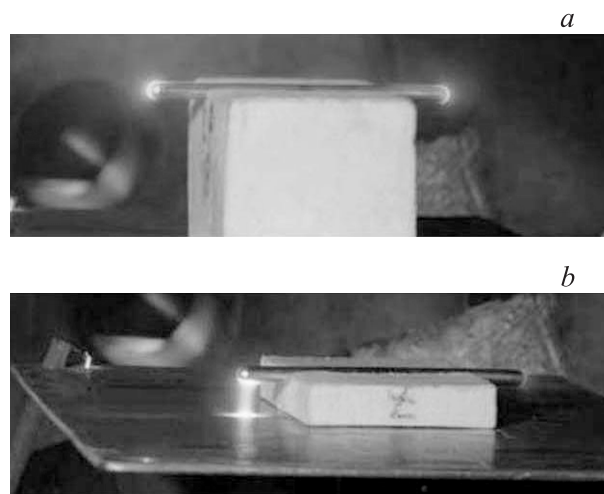


Рис. 6. Характерные примеры локализации плазменных областей инициированного ЭМ-вибратором СВЧ-разряда. h , мм: a — 45, b — 7.

коэффициент укорочения вибраторов резонансной длины χ сначала увеличивается, а затем уменьшается.

И, наконец, в опытах регистрируемые „вспышки“ возникающих в момент пробоя разрядных плазменных областей локализованы в районе концов вибратора. При этом при уменьшении h их форма менялась. При $h > 10$ мм эти области имеют вид полярных шапок, практически симметричных относительно оси вибратора. При $h < 10$ мм плазменные области локализованы между вибратором и экраном. При $h = 10$ мм в последовательных СВЧ-импульсах разрядные области реализовались случайным образом в одной из этих форм. Соответствующие характерные иллюстрирующие фотографии при $h = 45$ и 7 мм помещены на рис. 6.

Сравнение результатов численных и натуральных экспериментов

Как следует из приведенных выше данных, качественно результаты численных и натуральных экспериментов совпали. Проведем теперь по рис. 2 и 5 их количественное сравнение.

На рис. 7 помещены графики зависимостей $\eta_{\max}(h)$. На нем сплошной линией дан график, соответствующий расчетным значениям η_{\max} , а штриховой — опытным. При определении опытных η_{\max} принималось $E_{\text{in}} = E_0/2$. Пересчет же опытных значений $p_{\text{br}\max}$ в соответствующие

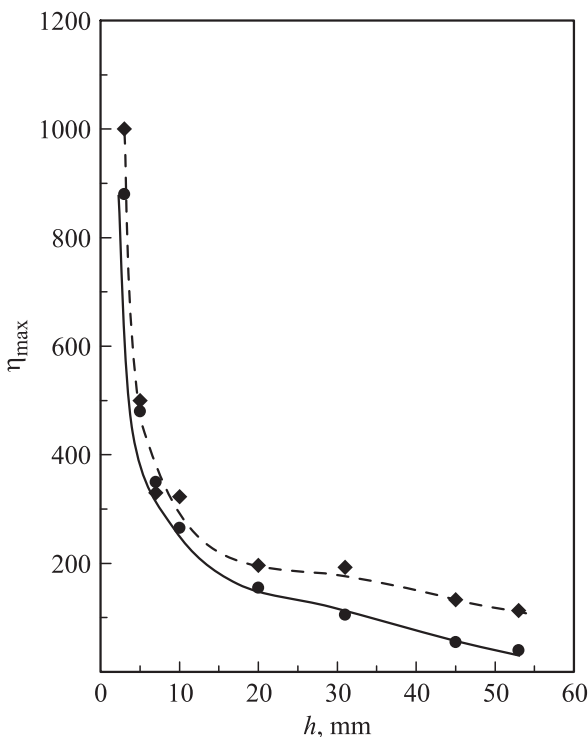


Рис. 7. Зависимости коэффициента усиления поля на полюсах вибратора резонансной длины от его расстояния до экрана. Сплошная линия — расчет, штриховая — эксперимент.

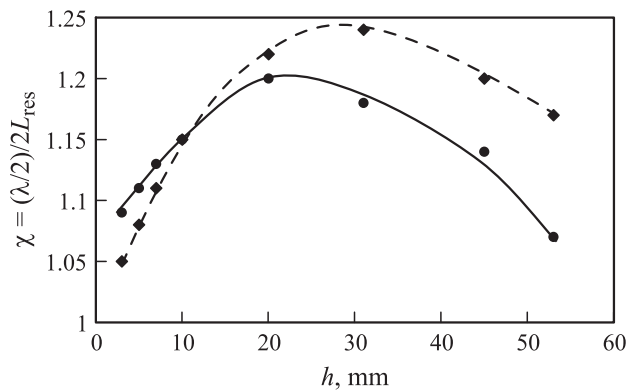


Рис. 8. Зависимости степени укорочения резонансного „полу-волнового“ вибратора от его расстояния до экрана. Сплошная линия — расчет, штриховая — эксперимент.

им поля E_{pol} выполнялся по следующей формуле [6]:

$$E_{\text{pol}} [\text{V/cm}] = 42p_{\text{br}} \xi. \quad (1)$$

В ней давление p_{br} имеет размерность Торр , а коэффициент ξ учитывает диффузию электронов из пространственно неоднородной области приполярного усиленного поля. В опытных условиях значение коэффициента ξ находится в диапазоне 1.12–1.27 [6].

Из рис. 7 следует, что при сравнительно больших значениях h величины η_{\max} , полученные по результатам численного моделирования и натурального эксперимента, количественно отличаются. Они близки при малых h . Этот результат можно интерпретировать следующим образом. В реальных опытах излучающий ЭМ-волну рупор находится сравнительно близко к отражающему экрану. В результате они образуют достаточно сложную электродинамическую систему с резонансными свойствами. Помещение в нее рассеивающего ЭМ-излучение вибратора дополнительно усложняет эту систему. Естественно, что при значительном приближении вибратора к экрану его влияние на характеристики этой системы уменьшается.

Указанное обстоятельство в еще большей степени влияет на параметр χ , характеризующий степень укорочения резонансного полуволнового вибратора. Соответствующие графики „теоретической“ и „опытной“ зависимостей $\chi(h)$ помещены на рис. 8. Их начертание соответствует рис. 7.

И наконец, построенные по данным рис. 2 и 5 графики теоретической и опытной зависимостей $Q(h)$ представлены на рис. 9. При этом использовалось общепринятое определение добротности

$$Q = \frac{2L_{\text{res}}}{\Delta 2L}, \quad (2)$$

где $\Delta 2L$ — оцененная по графикам полная ширина резонансных кривых по уровню $\eta_{\max}/\sqrt{2}$ или $p_{\text{br}\max}/\sqrt{2}$. На графиках на рис. 2 и 5 диапазон значений h отличен,

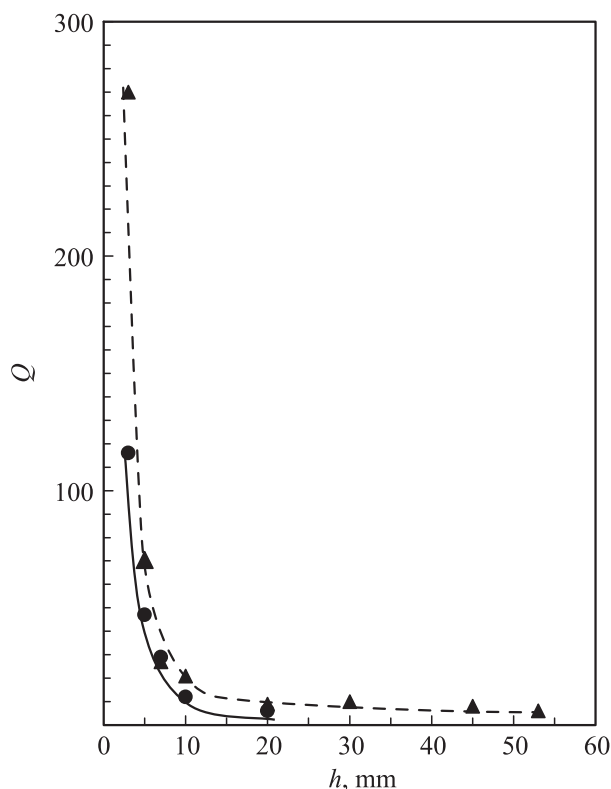


Рис. 9. Зависимости эквивалентной добротности резонансного „полуволнового“ вибратора от его расстояния до экрана.

что связано с фактической возможностью обработки набора теоретических и опытных данных. Близость значений Q на „пересекающихся“ участках показывает сравнительно высокую степень идентичности теоретического и опытного подходов к решению поставленной задачи. Величина Q характеризует именно ЭМ-вибратор и не должна зависеть от непринципиальных особенностей схем его возбуждения.

Знание величины Q позволяет оценить требования к точности выполнения резонансной длины вибратора по заданному требованию к его возможности инициировать пробой воздуха по $p_{br\max}/p_{br}$:

$$\Delta = \frac{2L_{res}}{Q} \sqrt{\left(\frac{p_{br\max}}{p_{br}}\right)^2 - 1}. \quad (3)$$

Например, по рис. 5 при $h = 7$ мм длина $2L_{res} = 54$ мм, давление $p_{br\max} = 620$ Торг, а величина $Q = 27$. Положим, что в пределах длины вибратора $2L = 2L_{res} \pm (\Delta/2)$ величина p_{br} не должна отличаться от $p_{br\max}$ более, чем на 3%, т.е. давление p_{br} должно лежать в диапазоне 600–620 Торг. Подставив в (3) соответствующие величины, получим $\Delta \approx 0.5$ мм. Следовательно, в соответствии с заданным требованием на практике необходимо обеспечить выполнение резонансной длины вибратора с точностью ± 0.25 мм.

Заключение

Таким образом, численное моделирование и натурный эксперимент показали, что величина индуцированного поля вблизи концов резонансного полуволнового вибратора, помещенного над находящимся в квазиоптическом СВЧ-пучке проводящим экраном, существенно возрастает при приближении вибратора к поверхности экрана на расстояния, меньше четверти длины волны поля. Полученные результаты позволяют существенно расширить возможный диапазон практического применения электромагнитных вибраторов в качестве инициаторов электрического пробоя газов высокого давления для зажигания СВЧ-зарядов в квазиоптических пучках с малым уровнем исходного поля.

Список литературы

- [1] Александров К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И., Федоров В.В., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 11. С. 52–60.
- [2] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 7. С. 60–67.
- [3] Драбкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г. Антенно-фидерные устройства. М.: Советское радио, 1974. 536 с.
- [4] Ротхаммель К. Антенны. М.: Энергия, 1979. 320 с.
- [5] Айзенберг Г.З., Белоусов С.П., Журбенко Э.М., Клигер Г.А., Курашов А.Г. Коротковолновые антенны. М.: Радио и связь, 1985. 536 с.
- [6] Александров К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 12. С. 26–30.