

04:09;12

СВЧ-пробой воздуха, инициированный электромагнитным вибратором малой длины

© К.В. Александров, Л.П. Грачев, И.И. Есаков

Московский радиотехнический институт РАН,
117519 Москва, Россия
e-mail: esakov@dataforce.net

(Поступило в Редакцию 29 марта 2007 г.)

Приведены результаты экспериментов по инициации электрического пробоя воздуха при давлении в десятки-сотни Торр в линейно-поляризованном квазиоптическом СВЧ-пучке с помощью параллельного электрической составляющей СВЧ-поля металлического цилиндрического электромагнитного вибратора со сферически закругленными концами. Длина вибратора существенно меньше длины волны поля. По результатам опытов определено поле на вершине вибратора в зависимости от его длины. Подобрана аналитическая зависимость, аппроксимирующая в исследованном диапазоне длины вибратора экспериментальную зависимость этого поля от отношения длины вибратора к его диаметру. Рассмотрена возможность использования полученных результатов для локальных измерений величины поля в квазиоптическом СВЧ-пучке путем определения максимального давления воздуха, при котором происходит его электрический пробой, инициированный помещенным в заданную точку СВЧ-пучка электромагнитного вибратора малой длины.

PACS: 84.30.Ng, 07.57.-c

Введение

Эксперименты показывают, что электрический разряд в воздухе сравнительно высокого давления p в десятки-сотни Торр в квазиоптическом электромагнитном (ЭМ) пучке СВЧ-диапазона длин волн λ энергетически эффективно взаимодействует с возбуждающим его ЭМ-полем [1]. Это позволяет рассматривать различные пути практического применения разряда [2] и стимулирует дальнейшие исследования его физических свойств.

Лабораторные опыты с таким разрядом, зажженным в зоне Френеля линейно-поляризованного квазиоптического ЭМ-пучка, как правило, проводятся в „ЭМ безэховой“ герметичной камере, давление воздуха в которой можно контролируемо снижать относительно атмосферного давления [3–5]. При этом в большинстве схем разрядная область достаточно удалена от формирующих ЭМ-пучок элементов и стенок рабочей камеры. В результате обратное влияние разряда на источник СВЧ-излучения практически отсутствует и поле в разрядной области представляет собой суперпозицию неизменного исходного ЭМ-поля с амплитудой его электрической составляющей E_0 и поля, обусловленного нарабатывающейся плазмой. В связи с этим в исследованиях стоит задача определения локальных значений исходного поля E_0 в предполагаемой разрядной области. Модельный расчет их по заданным характеристикам ЭМ-излучателя и мощности СВЧ-пучка P_{MW} дает лишь оценки, которые требуют экспериментального уточнения.

В работе [6] рассматривается возможность измерения поля E_0 в различных точках линейно-поляризованного квазиоптического ЭМ-пучка путем помещения в выбранную его точку металлического шарика диаметром

$2a \ll (\lambda/2)$. Современный уровень техники генерации ЭМ-волн СВЧ-диапазона не позволяет осуществить инициацию электрического пробоя воздуха атмосферного p помещением в ЭМ-пучок шарика даже при предельной сфокусированности этого пучка. В такой постановке пробой может реализоваться лишь при пониженных давлениях. Предложенная в [6] методика предполагает экспериментальное определение максимального давления воздуха p_{br} , при котором шарик еще инициирует его электрический пробой. В указанной работе дается схема пересчета измеренного p_{br} в локальное значение E_0 . Однако развитая в [6] теория справедлива лишь при значениях параметра $(a p_{br}) \gtrsim 2.4 \text{ cm} \cdot \text{Torr}$ и при частоте столкновений плазменных электронов с молекулами воздуха ν_c , примерно равной или превышающей циклическую частоту СВЧ-поля ω . Отметим, что в рассматриваемом случае для расчета ν_c можно пользоваться оценкой $\nu_c \approx 5 \cdot 10^9 p \text{ (1/s)}$ [7], где давление p , как и в аналогичных приводимых ниже в тексте формулах, имеет размерность Торр. Из данных условий следует, что такой способ экспериментального измерения E_0 при диаметре шарика масштаба в несколько миллиметров применим лишь при сравнительно высоком давлении p_{br} , уровня десятков-сотен Торр, а следовательно, высоких значениях E_0 . Для воздуха амплитуда минимального, критического СВЧ-поля, обеспечивающего его самостоятельный неинициированный пробой [7],

$$E_{cr} = 42 p \sqrt{1 + (\omega/\nu_c)^2} \text{ V/cm.}$$

Следовательно, указанным величинам p_{br} соответствует $E_0 \gtrsim 10^3 \text{ V/cm}$ или плотности потока ЭМ-энергии

$$P = E_0/(2Z_0) \gtrsim 10^3 \text{ W/cm}^2,$$

где $Z_0 = 120\pi$; Ω . При максимальной сфокусированности ЭМ-пучка, при которой характерный поперечный размер его фокусной области примерно равен λ , эти значения Π дают уровни мощности ЭМ-пучка $P_{MW} \approx \Pi \lambda^2$ в десятки-сотни киловатт.

Изложенная в работе [6] методика может быть расширена в сторону существенно меньших значений E_0 , а следовательно P_{MW} , если несколько поступиться локальностью данной методики измерения поля. Для этого в выбранную „точку“ СВЧ-пучка вдоль его вектора E_0 помещается ЭМ-вибратор. Действительно, если амплитуда поля на полюсах шарика, где вектор E_0 перпендикулярен его поверхности, $E_{pol} = 3E_0$ [8], то на полюсах, например, проводящего цилиндра со сферически закругленными концами даже небольшой длины $2L < (\lambda/2)$ она будет существенно большей. При этом пространственные структуры полей, „прижатых“ к их полюсной поверхности, могут быть подобными. В этом случае для пересчета измеренного в опыте давления p_{br} в значение поля E_{pol} можно использовать разработанную в [6] схему, учитывающую влияние на процесс ионизации воздуха диффузию плазменных электронов из области усиленного поля с $E \geq E_{cr}$. Остается найти связь между E_{pol} и E_0 в зависимости от длины $2L$ и диаметра $2a$ рассматриваемого ЭМ-вибратора. Такая связь в определенном диапазоне отношения $2L/2a$ в электростатическом поле дана, например, в работе [9], но она требует опытного подтверждения. В качестве ориентира может быть использована и данная в [8] формула для отношения E_{pol}/E_0 для вытянутого вдоль электростатического поля проводящего эллипсоида вращения в зависимости от отношения его полуосей L/a , при $L \geq a$.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментов по определению давления воздуха p_{br} для ряда цилиндрических ЭМ-вибраторов различной длины $2L < (\lambda/2)$ и неизменного диаметра $2a \ll (\lambda/2)$ со сферически закругленными концами, помещаемых в фокус линейно поляризованного квазиоптического СВЧ-пучка неизменной мощности P_{MW} параллельно его вектору E_0 . Затем по изложенной в [6] методике эти p_{br} пересчитываются в значениях амплитуд поля на полюсах вибраторов E_{pol} . По результатам эксперимента с шариком и опыта по безэлектродному, неиницированному пробоем воздуха определяется амплитуда исходного поля E_0 в фокусе ЭМ-пучка. Это позволяет построить график зависимости отношения E_{pol}/E_0 от отношения $2L/2a$. И наконец, с использованием данных работы [8] подбирается аппроксимирующее эту зависимость аналитическое выражение. В него включена поправка, учитывающая для сравнительно больших $2L$ начало процесса резонансного взаимодействия ЭМ-вибратора с СВЧ-полем.

Приводимые в работе данные позволяют в практических схемах сравнительно локально измерять значения поля в ЭМ-пучке малого уровня мощности.

Условия экспериментов и их результаты

Опыты проводились на установке, подробно описанной в работе [10]. В установке вертикально поляризованное импульсное СВЧ-излучение с ТЕМ-структурой поля и $\lambda = 8.9$ см фокусируется в центральной области ЭМ безэховой герметичной рабочей камеры. В фокусной плоскости пучок имеет „гауссово“ распределение амплитуды своей электрической составляющей E со значением $E = E_0$ на оси пучка и отсчитываемыми от нее характерными размерами, равными 5.2 и 2.5 см соответственно, вдоль и поперек вектора E . По оси пучок однороден на расстоянии от фокусной плоскости, примерно равном ± 3 см. Элементы конструкции установки, в том числе и элементы, формирующие ЭМ-пучок, удалены от фокусной области на расстояния, не меньше 25 см.

Опыты выполнялись с одиночными СВЧ-импульсами с прямоугольной огибающей длительностью $\tau_{pul} = 40 \mu s$. Мощность пучка P_{MW} в импульсах оставалась неизменной. Время между импульсами выдерживалось не меньшим десяти секунд.

Рабочая камера заполнена воздухом атмосферного состава. Его давление может устанавливаться в диапазоне $10 \text{ Torr} \lesssim p \leq 1 \text{ atm}$ и измеряется с точностью $\pm 1.5 \text{ Torr}$.

В фокусе ЭМ-пучка могут последовательно помещаться цилиндрические ЭМ-вибраторы разной длины $5.5 \leq 2L \leq 26.5 \text{ mm}$. Они выполнены из алюминиевого провода диаметром $2a = 5.5 \text{ mm}$ и имеют сферически закругленные концы. При минимальной длине вибратор представляет собой шарик диаметром $2a \ll (\lambda/2)$. Вибраторы имеют перпендикулярное их оси отверстие диаметром 0.8 mm. Через него пропускается диэлектрическая нить, она натягивается примерно горизонтально в плоскости, перпендикулярной оси ЭМ-пучка. На нити вибратор висит вертикально вдоль вектора E пучка. При этом он с точностью до 2 mm помещается в фокус пучка симметрично его оси.

В опытах один из концов вибратора освещается импульсным ультрафиолетовым (УФ) излучением. Фронт УФ-импульса синхронизирован с фронтом СВЧ-импульса. УФ-излучение за счет поверхностного фотоэффекта обеспечивает гарантированное наличие на освещенном полюсе вибратора „начальных“ свободных электронов [6].

С каждым вибратором давление p в камере между последовательными СВЧ-импульсами снижается до регистрации СВЧ-пробоя воздуха. Шаг уменьшения p сначала относительно большой — 15–30 Torr. После регистрации в очередном СВЧ-импульсе пробоя p увеличивается на один шаг, а затем уменьшается уже плавно с шагом в 3 Torr. Это позволяет фиксировать p_{br} с такой точностью. При этом эксперименты показали, что после регистрации факта пробоя перед следующим включением СВЧ-импульса необходимо выдержать значительную паузу, масштаба минуты. Иначе, при малой паузе, определенное значение p_{br} будет завышенным.

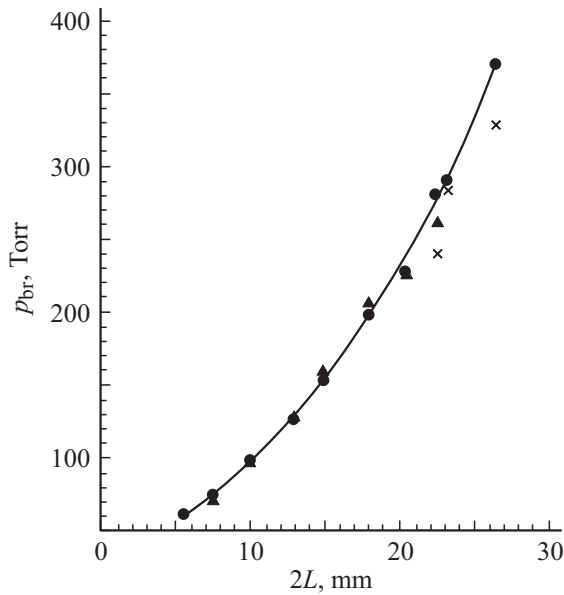


Рис. 1. Результаты экспериментов по инициации СВЧ-пробоя воздуха ЭМ-вибратором.

В опытах в фокус СВЧ-пучка сначала помещается ЭМ-вибратор наибольшей длины, а затем — вибраторы с последовательно уменьшающейся длиной. Это позволяет существенно сузить диапазон варьирования p до регистрации пробоя. Давление p_{br} , полученное с предыдущим вибратором, является как бы опорным давлением, при котором вибратор с меньшей длиной еще не инициирует пробой.

Факт пробоя надежно регистрируется визуально. При изменении p он носит резко выраженный пороговый характер. В последовательных СВЧ-импульсах с паузами между ними, большими минутами, при варьировании p в районе p_{br} значение p_{br} имеет разброс в диапазоне 6 Торр.

Результаты экспериментов „точками“ и аппроксимирующей линией в координатах $p_{br}-2L$ представлены на рис. 1. Одинаковые значки соответствуют одной „сквозной“ опытной серии, серии же — разным дням. Разброс значений p_{br} при одинаковых $2L$ в разных сериях лежит в пределах 10%. Выяснение причин этой нестабильности требует дополнительных исследований.

Дополнительно был выполнен эксперимент по безэлектродному пробоя воздуха. В этом опыте при той же мощности пучка P_{MW} воздух пробивался при максимальном давлении $p_{br0} = 29$ Торр.

Обсуждение

Определенное в опыте значение p_{br0} соответствует $\nu_c \approx 1.5 \cdot 10^{11}$ 1/с. В опытах p_{br0} — минимальное давление и, следовательно во всем исследованном диапазоне p , при заданном значении $\omega \approx 1.5 \cdot 10^{10}$ 1/с выполняется условие $\nu_c \gg \omega$. В этом случае для расчета амплитуды критического поля пробоя можно пользоваться

формулой

$$E_{cr} = 42p \text{ V/cm}, \quad (1)$$

для $p = p_{br0}$ в пренебрежении диффузии электронов из пробойной области с $E > E_{cr}$ она дает величину $E_0 \approx E_{cr} = 1.22 \text{ kV/cm}$.

Сравним это значение E_0 с величиной, получаемой в результате обработки результатов опыта с шариком, для которого $p_{brb} = 60$ Торр.

В работе [6] принято, что минимальное поле на полюсе шарика, при котором инициируется пробой воздуха,

$$E_{pol} = E_{cr} \xi \text{ V/cm}. \quad (2)$$

Здесь E_{cr} задается формулой (1) при полученном в опыте значении $p = p_{brb}$, а коэффициент ξ показывает, насколько поле E_{pol} должно превышать E_{cr} . Он учитывает диффузию электронов нарабатывающейся разрядной плазмы из области усиленного надкритического поля у полюса шарика в область докритического поля и на поверхность шарика. Очевидно, что исходное поле в точке расположения шарика

$$E_0 = E_{pol}/\chi, \quad (3)$$

где χ — коэффициент усиления поля на полюсе инициатора. Для шарика $\chi_b = 3$.

В работе [6] получено справедливое в определенном диапазоне параметров аналитическое выражение для расчета коэффициента ξ в воздухе:

$$\eta = \frac{(\xi^\beta - 1)^{(3/2)}}{7.2 \beta \xi^\beta}. \quad (4)$$

В (4) коэффициент $\eta = L_a/a$, где $L_a = \sqrt{D_a \nu_a}$ — диффузионная длина прилипания плазменных электронов, D_a — их коэффициент амбиполярной диффузии и ν_a — их частота прилипания. Кроме того, в (4) коэффициент β есть показатель степени в выражении, аппроксимирующем в районе E_{cr} частоту ионизации ν_i в виде

$$\nu_i = \nu_a (E/E_{cr})^\beta \text{ 1/s}$$

при $E_{cr} \leq E_0 \lesssim 3 \cdot E_{cr}$.

На рис. 2 зависимость (4) построена в виде графика $\xi(\eta)$ при следующих значениях входящих в нее величин: $\beta = 5.3$, $D_a = 1.4 \cdot 10^4/p \text{ (cm}^2/\text{s)}$ и $\nu_a = 2 \cdot 10^4 p \text{ (1/s)}$. Следовательно, на рис. 2 отложенный по горизонтальной оси коэффициент $\eta = 0.84/(a p)$ при размерности a в см, а p — в Торр. Описанный в [6] специально выполненный эксперимент показал, что при этих значениях β , D_a и ν_a формула (4) адекватна реальности в диапазоне $0 \leq \eta \lesssim 0.4$, т.е. при значении параметра

$$(a p) \gtrsim 2.4 \text{ cm} \cdot \text{Torr}. \quad (5)$$

В описываемых экспериментах

$$\eta = 0.84/(a \cdot p_{brb}) = 5.09 \cdot 10^{-2}.$$

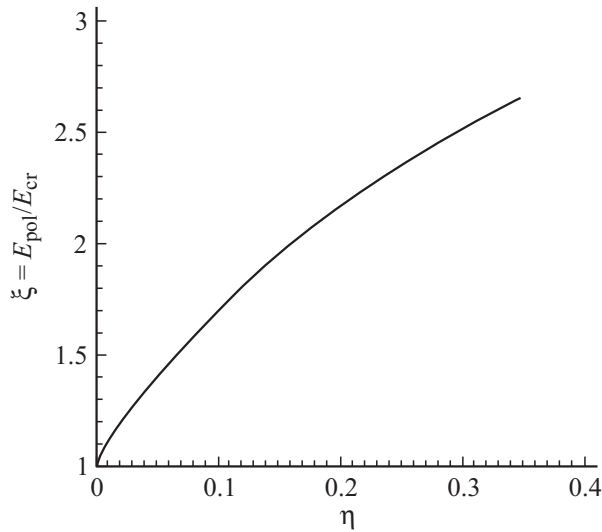


Рис. 2. Зависимость превышения пробойного поля на полюсе инициатора E_{pol} над критическим полем пробоя E_{cr} от диаметра инициатора a и давления воздуха p .

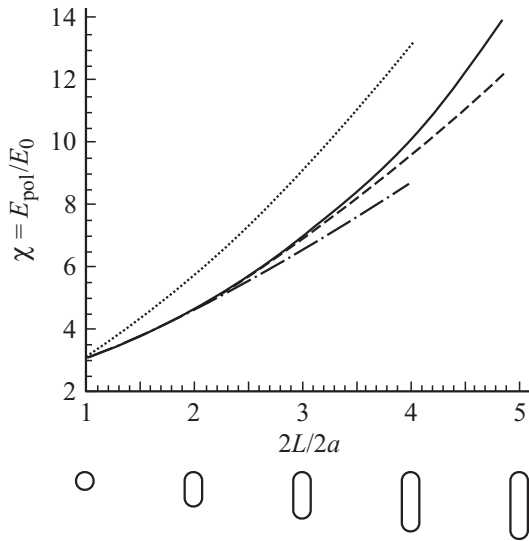


Рис. 3. Отношение поля на полюсе ЭМ-вибратора к исходному полю в зависимости от отношения длины вибратора к его диаметру.

Из графика на рис. 2 ему соответствует $\xi = 1.41$. Следовательно,

$$E_{pol} = 42p_{br} b \xi = 3.55 \text{ kV/cm}$$

и

$$E_0 = E_{pol}/\chi_b = 1.18 \text{ kV/cm.}$$

Видно, что поле E_0 , рассчитанное по результату эксперимента с шариком, практически совпадает с его значением, оцененным по результату безэлектродного СВЧ-пробоя воздуха.

На рис. 3 сплошной линией показан график зависимости $\chi = E_{pol}/E_0$ от отношения $2L/2a$ для исполь-

зованных в опытах вибраторов. При этом для них поля E_{pol} рассчитаны по формуле (2) при значениях E_{cr} , определенных по (1) с учетом экспериментальных $p = p_{br}$, а коэффициент ξ для каждого вибратора получен аналогично выполненному выше его расчету для шарика. Поле E_0 взято равным 1.2 kV/cm . Такой расчет ξ подразумевает, что в прижатой к околоосевой полюсной поверхности вибраторов области с $E > E_{cr}$ структура их поля идентична структуре поля шарика. У последнего вдоль отсчитываемого от центра шарика радиуса-вектора длиной r , направленного по вектору E_0 , собственное индуцированное поле спадает как $1/(r/a)^3$.

Аппроксимируем аналитически полученную в опытах зависимость $\chi(2L/2a)$.

Как было показано в работе [8], выражение для коэффициента усиления поля χ для вытянутого эллипсоида вращения

$$\chi = 1 + (1 - n^*)/n^*, \quad (6)$$

где коэффициенты формы

$$n^* = \frac{1 - e^2}{2e^3} \left(\ln \frac{1 + e}{1 - e} - 2e \right) \quad (7)$$

и эксцентриситет

$$e = \sqrt{1 + (2a/2L)^2}. \quad (8)$$

На рис. 3 зависимость (6) показана точечной линией. На нем видно, что линия располагается существенно выше экспериментальной зависимости — это естественно. При удлинении эллипсоида радиус кривизны его полюсной поверхности R уменьшается: $R = a(a/L)$. У экспериментальных ЭМ-вибраторов $R = a = \text{const}$. Следовательно, у вибратора одной длины с эллипсоидом при одинаковых $2a$ поверхностная плотность индуцированных зарядов на полюсе будет меньше. Будет меньше и пропорциональное этой плотности зарядов нормальное к поверхности индуцированное поле.

Эту особенность ЭМ-вибратора в (6) можно учесть эмпирически подобранным коэффициентом:

$$\chi = 1 + (1 - n^*)/n^* \left(1/\sqrt[3]{2L/2a} \right). \quad (9)$$

На рис. 3 эта зависимость показана штрихпунктиром. Видно, что с точностью до 5% она тождественна эксперименту при $2L \lesssim 0.27(\lambda/2)$. При больших длинах вибраторов начинает сказываться резонансный характер их взаимодействия с ЭМ-полем. В первом приближении в (9) это можно учесть следующим образом:

$$\chi = 1 + \frac{1 - n^*}{n^*} \frac{1}{\sqrt[3]{2L/2a}} \left[1 + \left(\frac{2L}{\lambda/2} \right)^2 \right]. \quad (10)$$

Эта зависимость также показана на рис. 3 пунктиром. Видно, что с точностью до 5% она описывает экспериментальную зависимость уже при $2L \lesssim 0.37(\lambda/2)$.

Заключение

Таким образом, приведенные в работе опытные данные и их анализ позволяют при известной величине электрической составляющей исходного СВЧ-поля E_0 рассчитать поле на полюсе проводящего цилиндрического ЭМ-вибратора со сферически закругленными концами $E_{\text{пол}}$, помещенного в исходное поле с ТЕМ-структурой параллельно его вектору E_0 . Приведенное в работе соответствующее аналитическое выражение справедливо при длине вибратора $2L$, меньшей величины, примерно равной 0.37 от половины длины волны ЭМ-поля λ и его диаметре $2a \ll (\lambda/2)$.

Полученные результаты позволяют также с помощью такого вибратора сравнительно локально измерять поля E_0 в различных точках квазиоптического линейно-поляризованного СВЧ-пучка, экспериментально определяя максимальное давление воздуха $p_{\text{бр}}$, при котором этот вибратор еще инициирует электрический пробой воздуха.

Данный способ измерения E_0 имеет следующие ограничения. ЭМ-вибратор по-прежнему должен иметь малую длину — $2L \lesssim 0.37(\lambda/2)$ и максимальный диаметр — $2a \ll (\lambda/2)$. Диапазон варьирования давления воздуха p снизу ограничен определенным соотношением между частотой столкновения плазменных электронов с молекулами воздуха ν_c и круговой частотой поля $\omega - \nu_c \gtrsim \omega$. Это условие в реальных установках, как правило, не является критическим. В них при уменьшении давления воздуха существенно раньше возникают трудности с вводом СВЧ-энергии в рабочую камеру, обусловленные электрическим пробоем по поверхности „вводных“ герметизаторов. В связи с этим в них надежно могут проводиться эксперименты лишь при p , ббльших нескольких десятков Торг. Естественное ограничение на давление воздуха сверху — $p = 1 \text{ atm}$. Минимальный диаметр ЭМ-вибратора при оцененном диапазоне варьирования p задается условием $(a p) \gtrsim 0.24 \text{ cm} \cdot \text{Торг}$. Оценки показывают, что, если измерения с шариком применимы при ожидаемых полях $E_0 \gtrsim 10^3 \text{ V/cm}$, то ЭМ-вибраторы диаметром масштаба миллиметра могут быть применены для измерений в СВЧ-полях с минимальным значением E_0 в десятки-сотни V/cm . Им соответствуют минимальные мощности предельно сфокусированных СВЧ-пучков $P_{\text{МВ}}$ масштаба сотен ватт.

Список литературы

- [1] Александров К.В., Грачев Л.П., Есаков И.И. и др. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 11. С. 52–60.
- [2] Esakov I.I., Grachev L.P., Khodataev K.V. et al. // 43rd AIAA Aerospace Sci. Meet. and Exhibit. 10–13 January 2005. Reno, Nevada. P. AIAA-2005-989.
- [3] Сборник трудов МРТИ АН СССР. Радиофизика. М., 1991. 291 с.

- [4] Сборник научных трудов ИПФ АН СССР. Высокочастотный разряд в волновых полях. Горький, 1988. 297 с.
- [5] Зарин А.С., Кузовников А.А., Шибков В.М. Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе. М.: Нефть и газ, 1996. 204 с.
- [6] Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В., Цыпленков В.В. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. Вып. 3. С. 411–415.
- [7] Мак-Доналд А. Сверхвысокочастотный пробой в газах. М.: Мир, 1969. 212 с.
- [8] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1959. 532 с.
- [9] Базелян Э.М., Ражанский И.М. Искровой разряд в воздухе. Новосибирск: Наука, 1988. 164 с.
- [10] Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В., Цыпленков В.В. Установка для исследования импульсного безэлектронного СВЧ-разряда в газах высокого и среднего давления. Препринт МРТИ АН СССР. М., 1990. 14 с.