



(51) МПК
H01Q 1/36 (2006.01)
H05H 1/00 (2006.01)
H01Q 5/314 (2015.01)
H05H 1/46 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

H01Q 1/366 (2021.05); *H01Q 5/314* (2021.05); *H05H 1/0081* (2021.05); *H05H 1/4615* (2021.05)

(21)(22) Заявка: 2020135498, 28.10.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
28.10.2020

Дата регистрации:
30.09.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 28.10.2020

(45) Опубликовано: 30.09.2021 Бюл. № 28

Адрес для переписки:

119234, Москва, ул. Ломоносовский пр-кт, 27,
 стр. 1, Московский государственный
 университет имени М.В. Ломоносова, Фонд
 "Национальное интеллектуальное развитие"

(72) Автор(ы):

КОВАЛЕВ Александр Сергеевич (RU),
 КЛЕНОВ Николай Викторович (RU),
 ВОЖАКОВ Всеволод Андреевич (RU),
 АДЖЕЛОВ Сергей Сергеевич (RU),
 ТЕРЕШОНОК Максим Валерьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
 образовательное учреждение высшего
 образования «Московский государственный
 университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ)
 (RU)

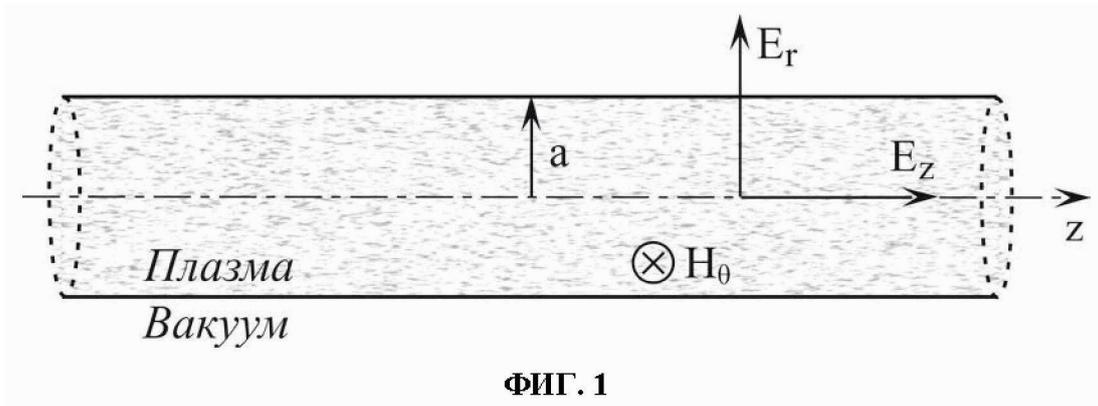
(56) Список документов, цитированных в отчете
 о поиске: RU 2171555 C1, 27.07.2001. US
 6369763 B1, 09.04.2002. US 20140144584 A1,
 29.05.2014. KR 102070544 B1, 29.01.2020. US
 10601125 B2, 24.03.2020. US 10211522 B2,
 19.02.2019.

(54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЯХ КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ

(57) Реферат:

Заявленный способ относится к радиотехнике с эксплуатацией особенностей плазмы в конденсированных средах и может быть использован для проектирования устройств радиотехники, включая передающие и приемные плазменные антенны (ПА). Техническим результатом является повышение точности определения характеристик поверхностных электромагнитных волн при проектировании ПА. Заявленный способ определения характеристик поверхностной электромагнитной волны содержит выбор дополнительного столба ионизированного газа, измерение величин постоянного напряжения для двух столбов ионизированного газа, определение значения

приэлектродного падения потенциала, определение значения напряженности электрического поля, измерение величины давления в ионизированном газе, определение концентрации электронов, определение диэлектрической проницаемости плазмы, определение величины скин-слоя, определение сопротивления единицы длины, определение волнового сопротивления ДПО, определение волнового числа и длины волны для ПЭВ, определение величины частотозависимого импеданса, силы тока, напряжения, выделяемой на единицу длины мощности, коэффициента полезного действия. 7 з.п. ф-лы, 12 ил.



RU 2756460 C1

RU 2756460 C1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.
H01Q 1/36 (2006.01)
H05H 1/00 (2006.01)
H01Q 5/314 (2015.01)
H05H 1/46 (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC

H01Q 1/366 (2021.05); *H01Q 5/314* (2021.05); *H05H 1/0081* (2021.05); *H05H 1/4615* (2021.05)

(21)(22) Application: **2020135498, 28.10.2020**

(24) Effective date for property rights:
28.10.2020

Registration date:
30.09.2021

Priority:

(22) Date of filing: **28.10.2020**

(45) Date of publication: **30.09.2021 Bull. № 28**

Mail address:

**119234, Moskva, ul. Lomonosovskij pr-kt, 27, str.
1, Moskovskij gosudarstvennyj universitet imeni
M.V. Lomonosova, Fond "Natsionalnoe
intellektualnoe razvitie"**

(72) Inventor(s):

**KOVALEV Aleksandr Sergeevich (RU),
KLENOV Nikolai Viktorovich (RU),
VOZhAKOV Vsevolod Andreevich (RU),
ADZhEMOV Sergei Sergeevich (RU),
TERESHONOK Maksim Valerevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe biudzhethnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniia «Moskovskii gosudarstvennyi
universitet imeni M.V.Lomonosova» (MGU)
(RU)**

(54) **METHOD FOR DETERMINING CHARACTERISTICS OF SURFACE ELECTROMAGNETIC WAVES IN FINITE-LENGTH PLASMA FORMATIONS**

(57) Abstract:

FIELD: radio engineering.

SUBSTANCE: claimed method relates to radio engineering with the exploitation of plasma features in condensed media and can be used for the design of radio engineering devices, including transmitting and receiving plasma antennas (PA). The claimed method for determining the characteristics of a surface electromagnetic wave includes the selection of an additional column of ionized gas, measuring the DC voltage values for two columns of ionized gas, determining the value of the near-electrode potential drop, determining the value of the electric field strength, measuring the pressure in the ionized gas, determining

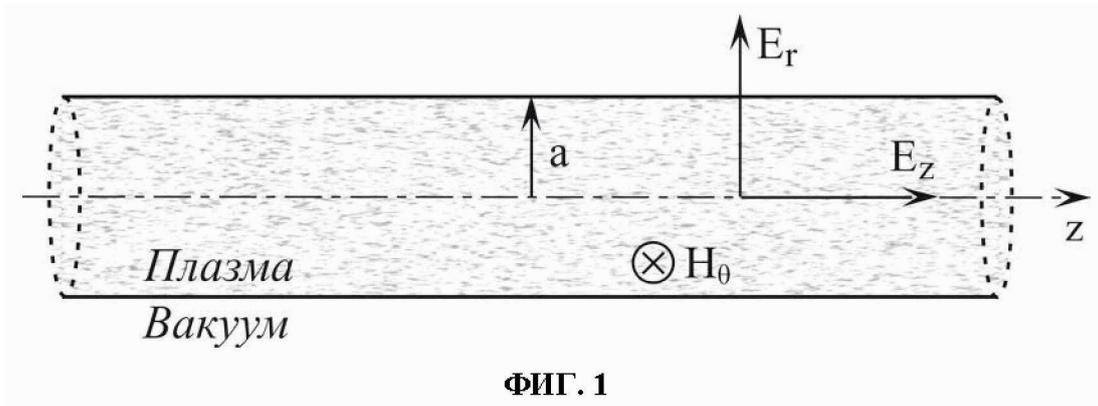
the electron concentration, determining the permittivity of the plasma, determining the value of the skin layer, determining the resistance of the unit length, determining the wave resistance of the DPO, determining the wave number and wavelength for SEW, determining the frequency-dependent impedance, current strength, voltage allocated per unit length of power, efficiency coefficient.

EFFECT: increased accuracy of determining the characteristics of surface electromagnetic waves when designing PA.

8 cl, 12 dwg

RU 2 756 460 C1

RU 2 756 460 C1



ФИГ. 1

RU 2756460 C1

RU 2756460 C1

Область техники, к которой относится изобретение

Изобретение относится к радиотехнике, а именно, к газоразрядным приборам и устройствам, электронным устройствам, эксплуатирующим особенности плазмы в конденсированных средах, и может быть использовано для проектирования устройств радиотехники, включая передающие и приемные плазменные антенны (ПА), в которых вместо традиционного металла в качестве «рабочего тела» используется ионизированный газ. Способность таких антенн принимать/излучать электромагнитные волны определяются характеристиками поверхностных волн в плазменных образованиях конечного размера.

10 Уровень техники

Плазменные антенны имеют ряд преимуществ, так как они допускают электрическое, а не механическое управление своими характеристиками: их можно быстро «выключить», тем самым радикально уменьшив эффективную площадь рассеяния (ЭПР); их антенные характеристики можно относительно просто перестроить, изменяя параметры плазмы. Электрическое управление характеристиками ПА реализуется за счет изменения свойств плазменного образования. ПА также могут работать в режиме фильтра - пропускать сигналы на высоких частотах без всякого взаимодействия, одновременно с этим принимая/получая сигналы на более низких частотах.

При этом особенности поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ) в ПА, существенно влияющие на возможность определения их характеристик, вытекают из особенностей используемых в таких устройствах долгоживущих плазменных образований (ДПО). Так, известно использование ПЭВ в ДПО, реализованное на основе диэлектрической трубки с несколькими контактами, соединяющими трубку с источником высокочастотного (ВЧ) сигнала (US6369763B1). В местах соединения контактов находятся ионизаторы, к которым поступает энергия от источника. Изменение поля излучения антенны производится за счет выборочной ионизации областей внутри камеры с использованием нескольких контактов. Специфическая форма устройства позволяет возбуждать в ионизированном газе поверхностные волны в различных пространственных конфигурациях и формировать эффективную поверхность антенны необходимых размеров; выборочная ионизация обеспечивает дополнительную гибкость при выборе параметров антенны. Особенности работы таких антенн с использованием трубки цилиндрической формы подробно описаны в патенте US6492951B1. Известна также петлевая форма диэлектрической трубки (US5560776).

Известно использование ПЭВ в ДПО в составе ПА на основе плазменной генерации между электродами (RU 2255394 C2). Известны также антенны и антенные системы (US 5594456, US 5963169, US 5990837, US 6369763, RU 94039011), конструктивно представляющие собой диэлектрические газоразрядные трубки, внутрь которых закачан аргон или смесь аргона с парами ртути. Известна ионизация плазмы в трубках с помощью газового разряда за счет энергии источника высокого напряжения (ионизатора), где информационный ВЧ радиосигнал подается на отдельный электрод или электроды (US7274333B1, Alexeff; US7453403B1, Anderson; US7965241B1, Marquis; US6087993B1, Anderson, Aliksnoras).

Также известны различные способы управления характеристиками ПЭВ в ДПО. Чаще всего характеристики регулируются изменением плотности плазмы и частоты столкновений частиц плазмы, но для более точной настройки могут понадобиться иные способы реконфигурации ДПО. Например, известно, что при определенных условиях плазменный столб будет занимать лишь часть диэлектрической трубки, и меру этого заполнения трубки плазмой можно регулировать, изменяя подаваемую мощность

(US2004/0061650A1). Известны также способы, использующие не одиночные антенны, а их совокупность. В частности, известен способ, использующий возможность реконфигурации совокупности антенн, образующих плазменно-антенную решетку (US2004/0130497A1). Однако этот способ подразумевает потребление больших мощностей, поэтому в реальности может применяться при использовании антенн лишь очень малых размеров. Известно использование для тех же целей только двух антенн (US2014/0144584A1), что, с точки зрения размеров антенны является более выгодным, а также системы из любого количества антенн с возможными режимами работы: приема, передачи, отражения и преломления сигнала (US2011/0025565A1). Известен способ изменения конфигурации вибраторной плазменной антенны (и характеристик ПЭВ), который зависит от конструкции вибратора. Например, известен способ реконфигурации с помощью поршня (RU2544806C1).

Однако все перечисленные решения содержат лишь эмпирические подходы к выбору способов проектирования ПА и управления их свойствами. Известные способы определения характеристик поверхностной электромагнитной волны в ДПО (без чего невозможна оптимизация процесса приема/передачи сигнала при помощи ПА) базируются на публикациях, посвященных решению уравнений Максвелла для бесконечно длинного цилиндра, однородно заполненного плазмой, в случае азимутально-симметричной ПЭВ [Кролл Н., Трайвелпис А. Основы физики плазмы, М.: Мир, 1975]. Это решение также может быть получено из уравнений теории волноводов с диэлектрическими вставками путем подстановки в них выражений для диэлектрической проницаемости плазмы [Стрэттон Д. Теория электромагнетизма, М.: Гостехиздат, 1948]. Однако данный подход весьма далек от описания реальной ситуации. Во-первых, ДПО имеет конечную длину. Поэтому, существенную роль играет отражение от конца антенны: поле внутри плазмы всегда является суперпозицией прямой и отраженной волн. Во-вторых, не существует плазменных цилиндров с однородным распределением концентрации электронов по радиусу плазмы. Для реального пространственного распределения концентрации электронов поведение электрического и магнитного полей будет существенно отличаться от предсказаний на основании формулы для «однородного случая». Кроме того, концентрация электронов может существенно меняться и вдоль плазменного столба, что также не описывается известными решениями.

Наиболее близким к заявляемому решению является способ расчета характеристик ПЭВ, возбуждаемой внешним источником ВЧ сигнала в ДПО, реализованном в виде столба ионизированного газа (Применение телеграфных уравнений для моделирования характеристик плазменных антенн / А. С. Ковалев, В. А. Вожаков, Н. В. Кленов и др. // Физика плазмы. - 2018. - Т. 44, № 2. - С. 211-216). Способ включает определение по представленным в публикации формулам таких характеристик как напряженность электрического поля, сила тока и напряжения в ПЭВ, мощность, выделяемая в ПЭВ, мощность излучения ПЭВ и полная потеря мощности в ПЭВ, частото-зависимый импеданс КПД для ПЭВ.

Однако в опубликованной работе представлена лишь теоретическая модель для расчета характеристик ПЭВ; отсутствует описание реализуемого на практике способа определения характеристик поверхностных электромагнитных волн в ПА, так как все характеристики долгоживущего плазменного образования (ДПО), в котором возбуждается поверхностная волна, с самого начала предполагаются известными. Однако использование данных из литературы для ДПО с другой спецификой ведет к большим относительным отклонениям результатов расчетов от реальных значений

параметров (до 50%). Экспериментальное определение концентрации электронов в ДПО имеет в данном случае существенные особенности, не вытекающие очевидным образом из уровня техники. Во всех публикациях определение характеристик ПЭВ, а также измерение электрофизических параметров ДПО, включая и концентрацию электронов, производят не напрямую, все величины вычисляют по сложному алгоритму, исходя из физической модели плазмы и ее взаимодействия с детектором. Это подразумевает регистрацию сигнала детектора, его оцифровку и обработку, причем можно выделить (а) детектор типа зонд, непосредственно контактирующий с плазмой, и (б) детектор электромагнитного излучения для радиочастотного или оптического диапазона, располагаемый за пределами ДПО (RU2587468 C2). Однако зондовый метод определения концентрации электронов неприменим для плазменных образований в диэлектрических трубках малого диаметра, а детекторный метод требует использования дорогостоящего оборудования и сложных математических методов обработки сигнала. В результате применения известного способа для ПЭВ в конкретном ДПО определяемые характеристики не будут соответствовать реальным. Также дополнительно проведенные исследования показали, что при использовании низкочастотного источника для создания ДПО наиболее эффективным является использование диэлектрической трубки U-образной формы, выполненной в виде короткозамкнутой линии, на электроды которой подается в противофазе напряжение выбранной частоты.

Технической проблемой является расхождение между существующими потребностями к точности определения характеристик поверхностных электромагнитных волн при проектировании ПА и имеющимися возможностями, подразумевающими уже на этапе определения характеристик используемой ДПО применение либо неточных зондовых, либо дорогостоящих и трудоемких детекторных методов.

Раскрытие изобретения

Техническим результатом изобретения является разработка простого и более точного способа определения характеристик поверхностных электромагнитных волн в плазменных образованиях за счет использования телеграфных уравнений при учете конечности их размера.

Технический результат достигается при реализации способа определения характеристик поверхностной электромагнитной волны (включая напряженность электрического поля, силу тока и напряжения в ПЭВ, мощность, выделяемую в ПЭВ, мощность излучения ПЭВ и полную потерю мощности в ПЭВ, частото-зависимый импеданс, коэффициент полезного действия (КПД) для ПЭВ), возбуждаемой внешним источником высокочастотного сигнала (с амплитудой по напряжению U_0 и частотой ω) в долгоживущем плазменном образовании, реализованном в виде столба ионизированного газа конечной (фиксированной) длины L_1 , включающего:

– выбор (использование) дополнительного столба ионизированного газа длиной L_2 , имеющего форму и газовый состав, аналогичный первому столбу длиной L_1 , при этом $L_2=(1,5\div 2,0)L_1$;

– измерение величин постоянного напряжения U_1 и U_2 для двух столбов ионизированного газа длиной L_1 и L_2 , по меньшей мере для одного значения постоянного тока I , пропускаемого через ДПО длиной L_1 и L_2 , выбранного из диапазона значений от 0,05А до 1А,

– определение значения приэлектродного падения потенциала U_c по формуле

$$U_c = \frac{U_2 * L_1 - U_1 * L_2}{L_1 - L_2},$$

– определение значения напряженности поля E в ДПО длиной L_1 для выбранного значения тока I по формуле

$$E = \frac{U_1 - U_c}{L_1},$$

– измерение величины давления в ионизированном газе p ,
– определение концентрации электронов N_e в ДПО по формуле

$$N_e = \frac{mv}{e^2} * \frac{I}{E * S},$$

где m – масса электрона, v – частота столкновений электронов с атомами с учетом измеренного давления в ионизированном газе p , e – заряд электрона, S – площадь поперечного сечения ДПО,

– определение диэлектрической проницаемости плазмы ϵ_p по формуле

$$\epsilon_p = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i\nu)},$$

где i – мнимая единица, $\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 N_e}{\epsilon_0 m}}$ – плазменная частота, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, ω – частота внешнего источника высокочастотного (ВЧ) сигнала,

– определение величины скин-слоя δ для ПЭВ в данном ДПО по формуле:

$$\delta = \frac{c}{\omega_p} \left(1 + \frac{2\nu}{\omega} \right)^{\frac{1}{2}},$$

где c – скорость света,

– определение сопротивления единицы длины ДПО R по формуле:

$R = (i\omega\epsilon_0\epsilon_p\pi a^2)^{-1}$ при толщине скин-слоя больше радиуса плазменного образования

а,
 $R = \left(i\omega\epsilon_0\epsilon_p 2\pi a \delta \left(1 - \frac{\delta}{2a} \right) \right)^{-1}$ при толщине скин-слоя меньше радиуса плазменного образования а,

– определение волнового сопротивления ДПО W по формуле $W = \left(\frac{R + i\omega L}{i\omega C} \right)^{\frac{1}{2}},$

где $L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{l_0}{a} \right)$ – индуктивность единицы длины ДПО, $C = 2\pi\epsilon_0 / \ln \left(\frac{l_0}{a} \right)$ – емкость единицы длины ДПО относительно окружающего пространства, l_0 – длина, на которой создана ПЭВ, μ_0 – диамангнитная восприимчивость вакуума,

– определение волнового числа k и длины волны λ для ПЭВ по формулам

$$k = (-i\omega C(R + i\omega L))^{\frac{1}{2}}, \lambda = 2\pi/k,$$

– определение величины частото-зависимого импеданса Z_0 для ПЭВ через выражение

$$Z_0 = \frac{\cosh(ikl_0) + \frac{W}{Z_{sf}} * \sinh(ikl_0)}{\frac{1}{Z_{sf}} \cosh(ikl_0) + \frac{1}{W} * \sinh(ikl_0)},$$

где Z_{sf} – импеданс на дальнем конце ДПО,

– определение напряженности электрического поля в ПЭВ по формуле

$$E(z) = U_0 ik \left(\frac{W}{Z_0} \cosh(ikz) - \sinh(ikz) \right),$$

где z – координата выбранной точки ПЭВ по оси ДПО,

– определение величины силы тока в ПЭВ по формуле

$$I(z) = U_0 \left(\frac{1}{Z_0} \cosh(ikz) - \frac{1}{W} \sinh(ikz) \right),$$

– определение величины напряжения в ПЭВ по формуле

$$U(z) = U_0 \left(\cosh(ikz) - \frac{W}{Z_0} \sinh(ikz) \right),$$

– определение величины мощности P , выделяемой в ПЭВ на единицу длины по формуле

$$P(z) = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(E(z)I^*(z)),$$

– определение величины мощности излучения ПЭВ P_{rad} и полной потери мощности в ПЭВ P_{loss} по формуле

$$P_{\text{rad}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \frac{\pi}{3} \frac{1}{\lambda^2} \left| \int_0^{l_0} I(z) dz \right|^2, \quad P_{\text{loss}} = \int_0^{l_0} P(z) dz,$$

– определение величины коэффициента полезного действия η для ПЭВ по формуле

$$\eta = \frac{P_{\text{rad}}}{P_{\text{rad}} + P_{\text{loss}}}.$$

При этом импеданс Z_{sf} на дальнем конце ДПО принимают равным импедансу емкости шара с радиусом столба ионизированного газа:

$$Z_{\text{sf}} = (i\omega 4\pi\varepsilon_0 a)^{-1}.$$

При электродном падении потенциала U_c и, как следствие, концентрации электронов N_e в ДПО могут быть определены для одного значения постоянного тока I и пары значений напряжений U_1 и U_2 , или для набора значений постоянного тока I в диапазоне от 0,05А до 1А и двух измеренных вольт-амперных характеристик $U_1(I)$ и $U_2(I)$.

Характеристики (ПЭВ) определяют при концентрации электронов в плазме $N_e > 10^{17} \text{ м}^{-3}$.

Дополнительный столб ионизированного газа длиной L_2 выбирают с давлением газа равным давлению газа в столбе ионизированного газа длиной L_1 .

Напряжение U_0 предпочтительно измеряют в точке подвода ВЧ сигнала к плазменному столбу.

Частота ω ВЧ сигнала выбирают из диапазона от 10 МГц до 1 ГГц, а давление ионизированного газа составляет менее 1 Торр.

Заявляемый способ позволяет за счет выполнения последовательности операций со столбом ионизированного газа (плазмы) конечной длины при выполнении описанных условий и с учетом краевых эффектов и неоднородного распределения электронов по радиусу столба определить величины напряженности электрического поля, силы тока, напряжения, выделяемой на единицу длины мощности, коэффициента полезного действия. Решаемая задача состоит в определении с использованием косвенных методов, не требующих дорогостоящего оборудования (включающего радиочастотную безэховую камеру), характеристик устройств радиотехники, включая передающие и приемные плазменные антенны (ПА), в которых в качестве «рабочего тела» вместо традиционного

металла используется ионизированный газ.

Изобретение может быть использовано при проектировании плазменных антенн и радиотехнических комплексов на их основе.

Перечень фигур, чертежей и иных материалов

5 Изобретение поясняется следующими чертежами.

Фиг. 1. Схематическое изображение столба ионизированного газа в исследуемом плазменном образовании.

10 Фиг.2. График, представляющий реальную и мнимую части амплитуды магнитного поля вне плазмы для бесконечно длинного столба. Вычисления выполнены по формулам, следующим из уравнений Максвелла (кривые 1 и 3), и по предлагаемой в данном способе приближенной формуле (кривые 2 и 4). Результаты получены для концентрации электронов $N_e = 10^{17} \text{ м}^{-3}$, радиуса плазмы $a = 1 \text{ см}$, частоты поля 500 МГц и давления газа аргона $p = 0,5 \text{ Торр}$.

15 Фиг. 3. График, представляющий входной импеданс антенны как функцию концентрации электронов.

Фиг. 4. График, представляющий напряжение в антенне как функцию координаты для концентрации электронов 10^{18} м^{-3} , частоты волны 300 МГц, давления аргона 0.3 Торр, радиуса плазмы 1 см, длины антенны 0,25 м.

20 Фиг. 5. График, представляющий силу тока в антенне как функцию координаты для концентрации электронов 10^{18} м^{-3} , частоты волны 300 МГц, давления аргона 0.3 Торр, радиуса плазмы 1 см, длины антенны 0,25 м.

25 Фиг. 6. График, представляющий электрическое поле в антенне как функцию координаты для концентрации электронов 10^{18} м^{-3} , частоты волны 300 МГц, давления аргона 0.3 Торр, радиуса плазмы 1 см, длины антенны 0,25 м.

Фиг. 7. График, представляющий выделяемую в плазме мощность на единицу длины для концентрации электронов 10^{18} м^{-3} , частоты волны 300 МГц, давления аргона 0.3 Торр, радиуса плазмы 1 см, длины антенны 0,25 м.

30 Фиг. 8. График, представляющий коэффициент полезного действия антенны как функцию концентрации электронов для различных давлений используемого газа для давлений используемого ионизированного газа 0,1; 0,3 и 1 Торр (кривые 5, 6 и 7 соответственно).

35 Фиг. 9. График, представляющий вольт-амперные характеристики плазменных образований в примере осуществления описываемого способа.

Фиг. 10. График, представляющий зависимость приэлектродного падения потенциала от величины постоянного тока I , протекающего через ДПО

Фиг. 11. График, представляющий мощности излучения и потерь в ПЭВ, давление газа 1 Торр, концентрацию электронов $3 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$.

40 Фиг. 12. Электрическая схема установки, используемой для исследования излучения от ПЭВ в ДПО, где 1 – вход для подачи аргона, 2 – форвакуумный насос, 3 – генератор импульсов, 4 – ЛАТР.

Осуществление изобретения

45 На первом этапе определения характеристик поверхностных волн в плазме и, как следствие, параметров излучения плазменной антенны с целью определения концентрации электронов при заданных условиях должны быть определены характеристики ДПО, в котором и возбуждаются ПЭВ. Для этого необходимо получить вольт-амперные характеристики двух плазменных столбов одной формы и газового

состава, отличающиеся только длиной. В этом случае приэлектродное падение

потенциала U_c вычисляют по формуле $U_c = \frac{U_2 * L_1 - U_1 * L_2}{L_1 - L_2}$, где U_1 и U_2 – напряжение на плазменных антеннах, а L_1 и L_2 – их длины. Схематическое изображение

5 рассматриваемого столба ионизированного газа представлено на фиг. 1. Величину напряженности электрического поля в рассматриваемом столбе плазмы вычисляют по формуле $E = \frac{U - U_c}{L}$. Концентрацию электронов на оси плазмы определяют как

10 $N_e = \frac{\sigma * m * \nu}{e^2}$, где m – масса электрона, e – заряд электрона, σ – проводимость плазмы (определяемые из уровня техники), ν – частота столкновений электронов.

На втором этапе расчета и оптимизации характеристик поверхностной электромагнитной волны в плазменном образовании конечного размера в рамках предлагаемого способа предполагают, что для диэлектрической проницаемости плазмы 15 выполняется условие $|\epsilon_p| \gg 1$. Необходимые условия реализуются для концентраций электронов в плазме $N_e > 10^{17} \text{ м}^{-3}$, частоты волны менее 1 ГГц и давления газа менее 1 Торр. Далее ϵ – есть либо диэлектрическая проницаемость плазмы

20 $\epsilon_p = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i\nu)}$ внутри столба ионизированного газа, либо $\epsilon = 1$ вне столба плазмы;

$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 N_e}{\epsilon_0 m}}$ – плазменная частота, ν – частота столкновений электронов, N_e –

25 концентрация электронов, m – масса электрона, ω – частота, для которой вычисляют величину диэлектрической проницаемости. Связь частоты столкновений электронов ν с давлением плазмы и напряженностью электрического поля известна из уровня техники [Райзер, Ю.П. Физика газового разряда, 2 изд. М.: Наука, 1992].

Полный ток в плазме вдоль оси z определяют по формуле:

$$I(z) = 2\pi i \omega \epsilon_0 \epsilon_p \int_0^a r E_z(z) dr, (1)$$

30 где i – мнимая единица, величина $\pi \approx 3.1415$ известна из справочной литературы, z и r – координаты выбранной точки в цилиндрической системе.

Выражение для компоненты магнитного поля на границе плазмы имеет вид:

$$H_\theta(a, z) = I(z) / 2\pi a. (2)$$

35 В этом выражении a – радиус плазменного образования.

Вне плазмы, при $|\epsilon_p| \gg 1$, правую часть уравнения $\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r H_\theta) = i \omega \epsilon_0 \epsilon E_z$, можно положить равной нулю. Это дает величину магнитного поля вне плазмы:

$$H_\theta(r, z) = H_\theta(a, z) \cdot \frac{a}{r}. (3)$$

40 где θ – угол в цилиндрической системе координат.

На фиг. 2 представлены для случая бесконечно длинного столба плазмы реальные и мнимые части амплитуды магнитного поля, вычисленные по формулам, следующим из уравнений Максвелла, и по предлагаемой в рамках данного способа приближенной формуле (3). Как можно заметить, расхождение между результатами вычислений по 45 обоим формулам небольшое даже при $N_e = 10^{17}$. При $N_e = 10^{18}$ и более предсказания двух подходов становятся неразличимыми. Это позволяет использовать для описания области вне плазмы величину магнитного поля, вычисленную по приближенной формуле

(3), предназначенной для расчета и оптимизации реальных плазменных антенн конечной длины. После подстановки этого магнитного поля в уравнение $\frac{dH_\theta}{dz} = -i\omega\varepsilon_0\varepsilon E_r$ и интегрирования по радиусу получают:

$$\frac{dl}{dz} = -i\omega CU, \quad (4)$$

где $U = \int_a^b E_r dr$ - величина напряжения на поверхности плазмы в точке z,

$C = 2\pi\varepsilon_0/\ln\left(\frac{l_0}{a}\right)$ - емкость единицы длины ДПО относительно окружающего пространства, l_0 - длина, на которой создана ПЭВ (это верно при условии, что эта величина меньше длины волны, что обычно выполняется).

Из точного решения следует, что величины радиального электрического поля вне плазмы $E_r(r > a)$ и внутри плазмы $E_r(r < a)$ вблизи границы плазмы относятся как:

$$\frac{E_r(r < a)}{E_r(r > a)} = \frac{1}{\varepsilon_p}$$

При $|\varepsilon_p| \gg 1$, $E_r(r < a) \ll E_r(r > a)$. Следовательно, $\int_0^a E_r dr \ll U$. То есть, разница потенциалов между центром и границей плазмы много меньше U, и ею можно пренебречь.

После подстановки значения магнитного поля, определяемого формулой (2), в уравнение $\frac{dE_r}{dz} - \frac{dE_z}{dr} = -i\omega\mu_0 H_\theta$ и его интегрирования по радиусу получают уравнение:

$$\dots \quad (5)$$

где $L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{l_0}{a}\right)$ - индуктивность единицы длины плазменного столба, R -

сопротивление единицы длины плазмы, причем $R = (i\omega\varepsilon_0\varepsilon_p\pi a^2)^{-1}$ при толщине скин-слоя больше радиуса плазменного образования; и $R = \left(i\omega\varepsilon_0\varepsilon_p 2\pi a \delta \left(1 - \frac{\delta}{2a}\right)\right)^{-1}$ при характерной толщине скин-слоя $\delta = \frac{c}{\omega_p} \left(1 + \frac{2\nu}{\omega}\right)^{\frac{1}{2}}$ меньше указанного значения.

$$W = \left(\frac{R+i\omega L}{i\omega C}\right)^{\frac{1}{2}} - \text{волновое сопротивление столба плазмы.}$$

Необходимо отметить, что при выводе формулы (5) продольное электрическое поле вдали от антенны, то есть на расстояниях больше длины антенны полагалось равным 0. Это допустимое предположение, так как на таких расстояниях электрическое поле уже уменьшается как $1/r^2$.

Уравнения (4) и (5) представляют собой обыкновенные телеграфные уравнения для столба плазмы. Из них следует выражение для волнового вектора k, определяющего длину волны $\lambda = 2\pi/k$ и декремент затухания β :

$$k = (-i\omega C(R + i\omega L))^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Полученные выражения позволяют определять все необходимые на практике характеристики рассматриваемой ПЭВ, сформированной под действием ВЧ сигнала с амплитудой по напряжению U_0 , приложенного к ДПО в точке с координатой $z=0$.

В качестве объективных данных, полученных в результате проведения расчетов и оценок, принятых в той области техники, к которой относится заявленное изобретение, в таблице 1 ниже представлены результаты расчетов длины волны и декремента затухания, выполненные на основе точных формул и предлагаемого способа (записаны в скобках) для бесконечно длинного столба плазмы.

Таблица 1. Характеристики поверхностной волны в плазме для различных её частот

N_e (m^{-3})	10^{17}	10^{18}	10^{19}
Частота волны (МГц)	100		
Длина волны (м)	1.36 (1.7)	2.8 (2.8)	2.94 (2.97)
Затухание (м)	0.4 (0.54)	3.2 (3.3)	25.5 (20)
Частота волны (МГц)	300		
Длина волны (м)	0.53 (0.58)	0.91 (0.92)	0.98 (0.98)
Затухание (м)	0.26 (0.38)	2.4 (2.46)	16.7 (11)
Частота волны (МГц)	1000		
Длина волны (м)	0.11 (0.14)	0.26 (0.26)	0.29 (0.29)
Затухание (м)	0.1 (0.2)	1.4 (1.6)	10.6 (6.5)

Как видно из приведенных данных, наблюдается удовлетворительное согласие между предсказаниями в рамках точной модели для бесконечного столба плазмы и предложенного упрощенного способа для той же системы.

В качестве объективных данных, полученных в результате проведения расчетов и оценок, принятых в той области техники, к которой относится заявленное изобретение, представлены величины:

частото-зависимого импеданса (результат расчета представлен в виде графика на фиг. 3)

$$Z_0 = \frac{\cosh(ikl_0) + \frac{W}{Z_{sf}} * \sinh(ikLl_0)}{\frac{1}{Z_{sf}} \cosh(ikl_0) + \frac{1}{W} * \sinh(ikl_0)},$$

распределения напряжения вдоль оси ДПО (результат расчета представлен в виде графика на фиг. 4)

$$U(z) = U_0 \left(\cosh(ikz) - \frac{W}{Z_0} \sinh(ikz) \right),$$

распределения силы тока вдоль оси ДПО (результат расчета представлен в виде графика на фиг. 5)

$$I(z) = U_0 \left(\frac{1}{Z_0} \cosh(ikz) - \frac{1}{W} \sinh(ikz) \right),$$

распределения абсолютной величины напряженности электрического поля вдоль оси ДПО (результат расчета представлен на фиг. 6)

$$E(z) = U_0 ik \left(\frac{W}{Z_0} \cosh(ikz) - \sinh(ikz) \right),$$

мощности P , выделяемой в антенне на единицу длины (результат расчета представлен в виде графика на фиг. 7)

$$P(z) = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(E(z)I^*(z)),$$

мощности излучения антенны P_{rad} и полной потери мощности в плазме

$$P_{rad} = \sqrt{\frac{\mu_0 \pi}{\varepsilon_0}} \frac{1}{3 \lambda^2} \left| \int_0^{l_0} I(z) dz \right|^2, \quad P_{loss} = \int_0^{l_0} P(z) dz,$$

коэффициента полезного действия (результат расчета представлен в виде графика на фиг. 8)

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_{loss}}.$$

Способ характеризуется тем, что импеданс на дальнем конце столба ионизированного газа принимается равным импедансу Z_{sf} емкости шара с радиусом столба плазмы:

$$Z_{sf} = (i\omega 4\pi\epsilon_0 a)^{-1}.$$

Примеры реализации изобретения

С целью измерения концентрации электронов в плазменных образованиях при демонстрации осуществимости описываемого способа были сняты на одном и том же измерительном стенде вольт-амперные характеристики двух U-образных столбов ионизированного газа, отличающихся только длиной. Один столб имел полную длину L_1 0,39 м, другой - 0,75 м. Диаметр плазменного столба в обеих лампах составлял 0,015 м, в качестве газовой смеси использовался аргон с примесью паров ртути. Измеренные зависимости представлены на фиг. 9.

Это позволило построить зависимость приэлектродного падения потенциала от величины постоянного тока I , протекающего через ДПО. Полученная зависимость приведена на фиг. 10.

На основании этих данных были определены значения модуля напряженности электрического поля в плазме как функции величины постоянного тока. Это позволило найти концентрацию электронов N_e в ДПО (N_e лежит в диапазоне $0,5 \dots 3 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$), причем управляя величиной постоянного тока I , протекающего через ДПО, можно установить на требуемом значении величину N_e .

Для выбранных значений N_e при помощи предложенного способа были определены характеристики созданной ПЭВ (напряженность электрического поля, сила тока и напряжения в ПЭВ, мощности, выделяемой в ПЭВ, мощности излучения ПЭВ и полной потери мощности в ПЭВ, частото-зависимого импеданса и коэффициента полезного действия (КПД) для ПЭВ). Пример полученных зависимостей для мощности излучения и потерь в ПЭВ приведен на фиг. 11.

Предложенный способ характеризуется тем, что для измерения концентрации электронов в плазме N_e используют измерение приложенного к плазме напряжения и величины тока в плазме, а также давления газа. Напряжение в плазме антенны измеряют с помощью специальных электрических зондов, вставленных в плазму. Ток в антенне измеряют с помощью датчиков магнитного поля, помещенных на поверхность антенны. Давление газа в антенне измеряют с помощью манометра, подсоединенного через отросток в трубке антенны. Возможность осуществления перечисленных измерительных операций известна из уровня техники [Хаддлстоун Р., Леонард С. (ред.) Диагностика плазмы. М.: Мир, 1967. 516 с. Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969. 293 с. Орлов К. Е. Диагностика низкотемпературной плазмы: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. 110 с].

В рассматриваемом примере реализации источник постоянного тока, необходимый для формирования ДПО, мог обеспечивать напряжение до 1.2 кВ. Ток через плазму менялся в пределах от 50 до 500 мА. Одновременно на трубки подавалось напряжение от ВЧ генератора Г4-139. ВЧ генератор мог работать в диапазоне до 600 МГц. Импеданс ПА измерялся прибором RigExpert A-600.

Излучение от ПЭВ исследовалось с помощью известного из уровня техники SDR-

приемника. Схема установки, используемой для таких измерений, приведена на фиг. 12. В данном примере реализации удалось подтвердить достижение заявленного технического результата за счет сравнения определенной при помощи данного способа частоты, соответствующей максимуму мощности излучения от ПЭВ, с максимумом излучения, зафиксированного SDR-приемником. В таблице 2 ниже приведены результаты такого сравнения.

Таблица 2. Сравнение результатов применения предлагаемого способа с данными объективного контроля.

Измеряемая величина	Результат применения способа	Результат объективного контроля	Относительная погрешность
Частота, соответствующая максимуму мощности излучения от ПЭВ	199,82 МГц	200,03 МГц	0,4%

Предложенный способ определения характеристик поверхностных электромагнитных волн для реальных антенн конечной длины позволяет реализовать на практике ряд упомянутых выше преимуществ. Проведенные экспериментальные исследования образцов ПА показали, что полученный уровень принимаемого сигнала на частоте 330 МГц уступает результатам, достигнутым на простых металлических аналогах. Но при этом возможен эффективный прием сигнала в более широкой (на фоне характеристик металлической антенны) полосе частот, достигающей 47 МГц.

(57) Формула изобретения

1. Способ определения характеристик поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ), возбуждаемой внешним источником высокочастотного (ВЧ) сигнала с амплитудой по напряжению U_0 и частотой ω в долгоживущем плазменном образовании (ДПО), реализованном в виде столба ионизированного газа конечной длины L_1 , включающий определение напряженности электрического поля, силы тока и напряжения в ПЭВ, мощности, выделяемой в ПЭВ, мощности излучения ПЭВ и полной потери мощности в ПЭВ, частотозависимого импеданса и коэффициента полезного действия (КПД) для ПЭВ, отличающийся тем, что включает

– выбор дополнительного столба ионизированного газа длиной L_2 , имеющего форму и газовый состав, аналогичный первому столбу длиной L_1 , при этом $L_2 = (1,5 \div 2,0)L_1$;

– измерение величин постоянного напряжения U_1 и U_2 для двух столбов ионизированного газа длиной L_1 и L_2 , по меньшей мере для одного значения постоянного тока I , пропускаемого через ДПО длиной L_1 и L_2 , выбранного из диапазона значений от 0,05А до 1А,

– определение значения приэлектродного падения потенциала U_c по формуле

$$U_c = \frac{U_2 * L_1 - U_1 * L_2}{L_1 - L_2},$$

– определение значения напряженности поля E в ДПО длиной L_1 для выбранного значения тока I по формуле

$$E = \frac{U_1 - U_c}{L_1},$$

– измерение величины давления в ионизированном газе p ,

– определение концентрации электронов N_e в ДПО по формуле

$$N_e = \frac{mv}{e^2} * \frac{I}{E * S},$$

где m – масса электрона, ν – частота столкновений электронов с атомами с учетом измеренного давления в ионизированном газе p , e – заряд электрона, S – площадь поперечного сечения ДПО,

– определение диэлектрической проницаемости плазмы ϵ_p по формуле

$$\epsilon_p = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i\nu)},$$

где i – мнимая единица, $\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 N_e}{\epsilon_0 m}}$ – плазменная частота, ϵ_0 – диэлектрическая

проницаемость вакуума, ω – частота внешнего источника высокочастотного (ВЧ) сигнала,

– определение величины скин-слоя δ для ПЭВ в данном ДПО по формуле:

$$\delta = \frac{c}{\omega_p} \left(1 + \frac{2\nu}{\omega}\right)^{\frac{1}{2}},$$

где c – скорость света,

– определение сопротивления единицы длины ДПО R по формуле:

$R = (i\omega\epsilon_0\epsilon_p\pi a^2)^{-1}$ при толщине скин-слоя больше радиуса плазменного образования

a ,

$R = \left(i\omega\epsilon_0\epsilon_p 2\pi a \delta \left(1 - \frac{\delta}{2a}\right)\right)^{-1}$ при толщине скин-слоя меньше радиуса плазменного образования a ,

– определение волнового сопротивления ДПО W по формуле $W = \left(\frac{R + i\omega L}{i\omega C}\right)^{\frac{1}{2}}$,

где $L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$ – индуктивность единицы длины ДПО, $C = 2\pi\epsilon_0 / \ln\left(\frac{b}{a}\right)$ – емкость единицы длины ДПО относительно окружающего пространства, l_0 – длина, на которой создана ПЭВ, μ_0 – диамангнитная восприимчивость вакуума,

– определение волнового числа k и длины волны λ для ПЭВ по формулам

$$k = (-i\omega C(R + i\omega L))^{\frac{1}{2}}, \quad \lambda = 2\pi/k,$$

– определение величины частотозависимого импеданса Z_0 для ПЭВ через выражение

$$Z_0 = \frac{\cosh(ikl_0) + \frac{W}{Z_{sf}} * \sinh(ikl_0)}{\frac{1}{Z_{sf}} \cosh(ikl_0) + \frac{1}{W} * \sinh(ikl_0)},$$

где Z_{sf} – импеданс на дальнем конце ДПО,

– определение напряженности электрического поля в ПЭВ по формуле

$$E(z) = U_0 ik \left(\frac{W}{Z_0} \cosh(ikz) - \sinh(ikz) \right),$$

где z – координата выбранной точки ПЭВ по оси ДПО,

– определение величины силы тока в ПЭВ по формуле

$$I(z) = U_0 \left(\frac{1}{Z_0} \cosh(ikz) - \frac{1}{W} \sinh(ikz) \right),$$

– определение величины напряжения в ПЭВ по формуле

$$U(z) = U_0 \left(\cosh(ikz) - \frac{w}{z_0} \sinh(ikz) \right),$$

– определение величины мощности P , выделяемой в ПЭВ на единицу длины по формуле

$$P(z) = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(E(z)I^*(z)),$$

– определение величины мощности излучения ПЭВ P_{rad} и полной потери мощности в ПЭВ P_{loss} по формуле

$$P_{\text{rad}} = \sqrt{\frac{\mu_0 \pi}{\varepsilon_0} \frac{1}{3 \lambda^2}} \left| \int_0^{l_0} I(z) dz \right|^2, \quad P_{\text{loss}} = \int_0^{l_0} P(z) dz,$$

– определение величины коэффициента полезного действия η для ПЭВ по формуле

$$\eta = \frac{P_{\text{rad}}}{P_{\text{rad}} + P_{\text{loss}}}.$$

2. Способ по п.1, характеризующийся тем, что импеданс Z_{sf} на дальнем конце ДПО принимают равным импедансу емкости шара с радиусом столба ионизированного газа:

$$Z_{sf} = (i\omega 4\pi \varepsilon_0 a)^{-1}.$$

3. Способ по п.1, характеризующийся тем, что приэлектродное падение потенциала U_c и, как следствие, концентрацию электронов N_e в ДПО определяют для одного значения постоянного тока I и пары значений напряжений U_1 и U_2 или для набора значений постоянного тока I в диапазоне от 0,05А до 1А и двух измеренных вольт-амперных характеристик $U_1(I)$ и $U_2(I)$.

4. Способ по п.1, характеризующийся тем, что характеристики (ПЭВ) определяют при концентрации электронов в плазме $N_e > 10^{17} \text{ м}^{-3}$.

5. Способ по п.1, характеризующийся тем, что дополнительный столб ионизированного газа длиной L_2 выбирают с давлением газа, равным давлению газа в столбе ионизированного газа длиной L_1 .

6. Способ по п.1, характеризующийся тем, что напряжение U_0 измеряют в точке подвода ВЧ сигнала к плазменному столбу.

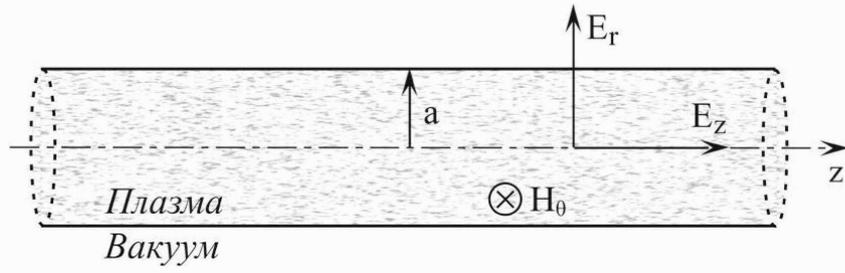
7. Способ по п.1, характеризующийся тем, что частота ω ВЧ сигнала лежит в диапазоне от 10 МГц до 1 ГГц.

8. Способ по п.1, характеризующийся тем, что давление ионизированного газа менее 1 Торр.

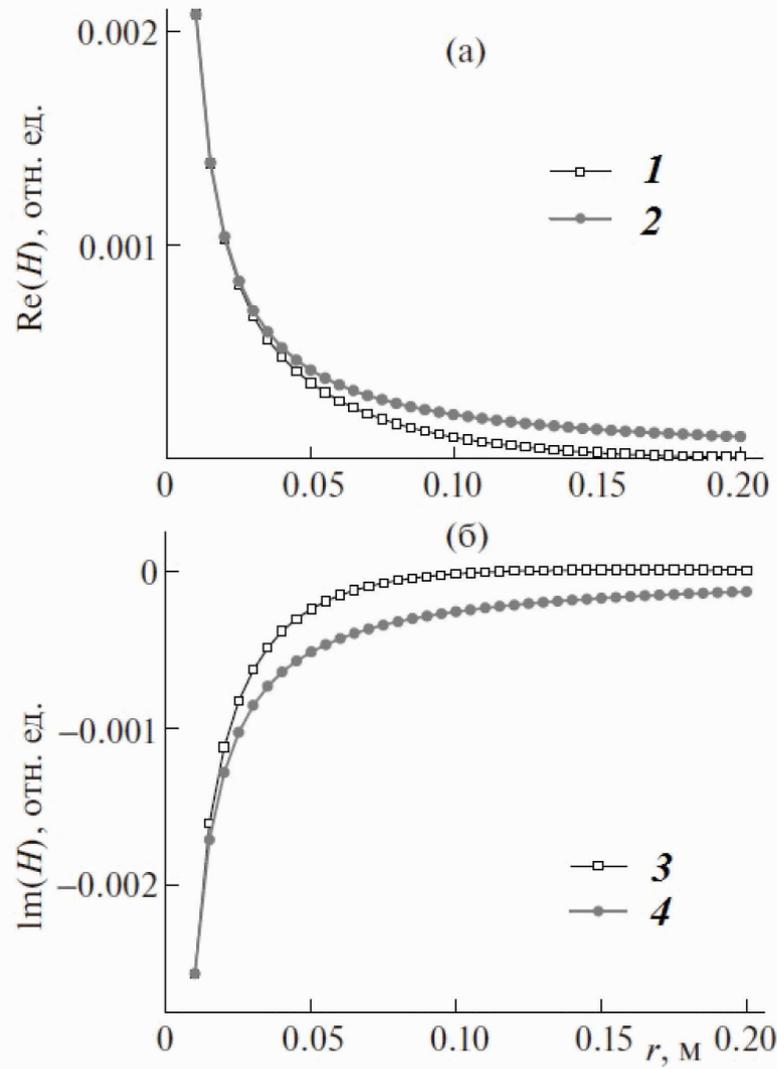
40

45

1

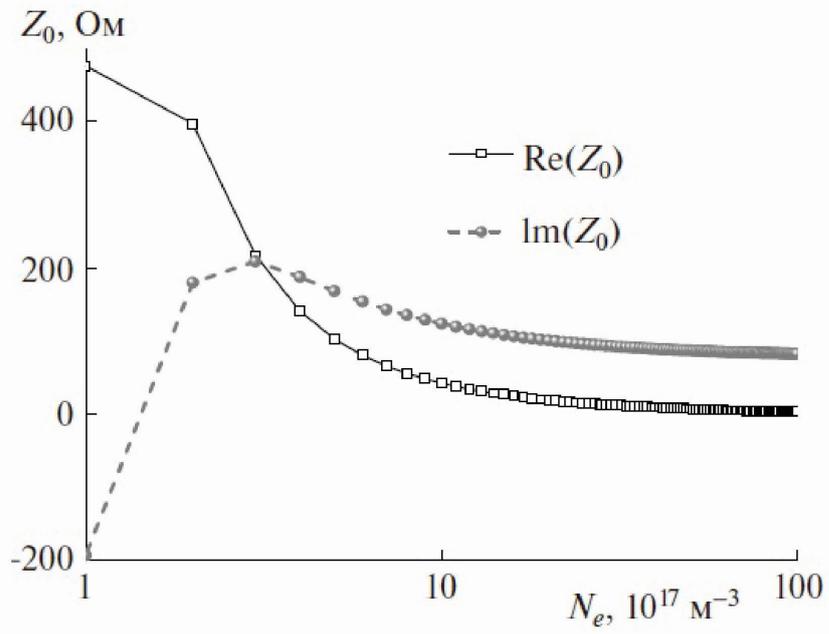


ФИГ. 1

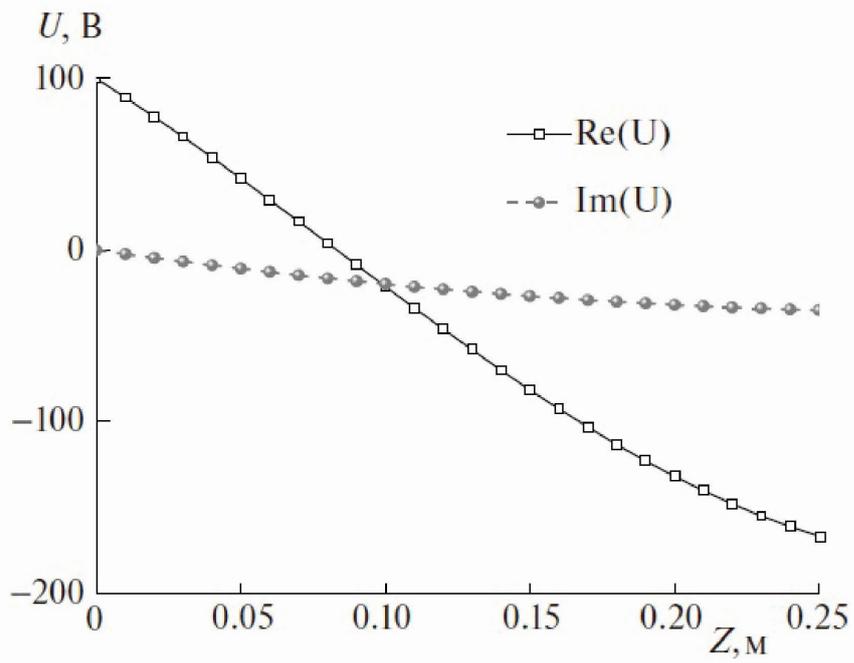


ФИГ. 2

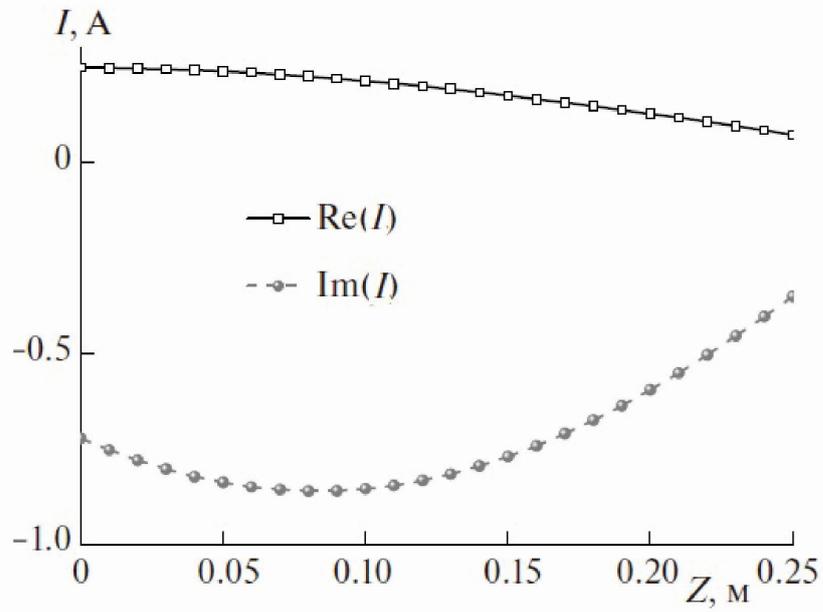
2



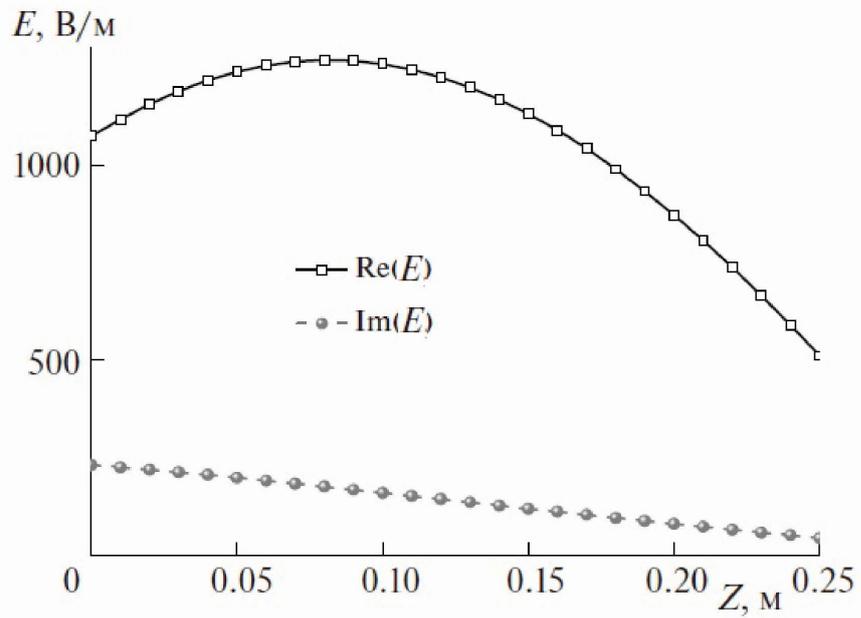
ФИГ. 3



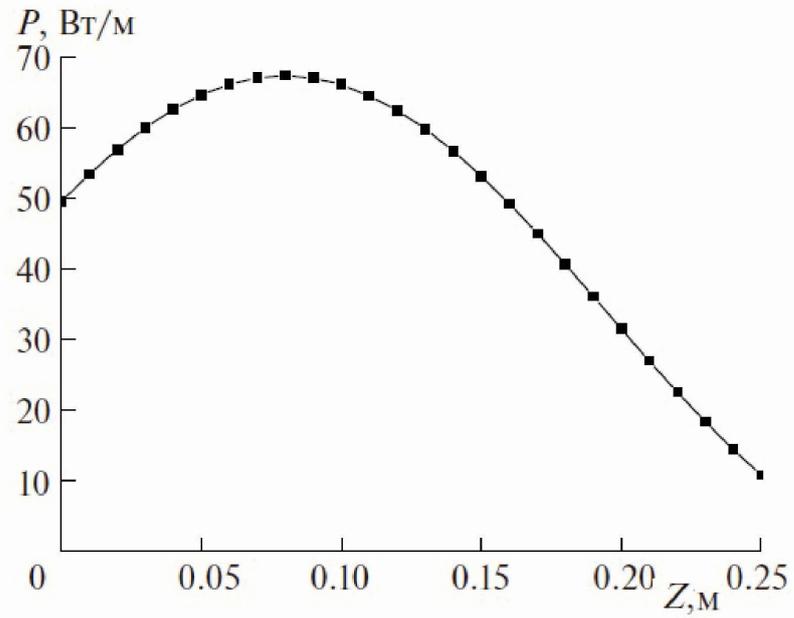
ФИГ. 4



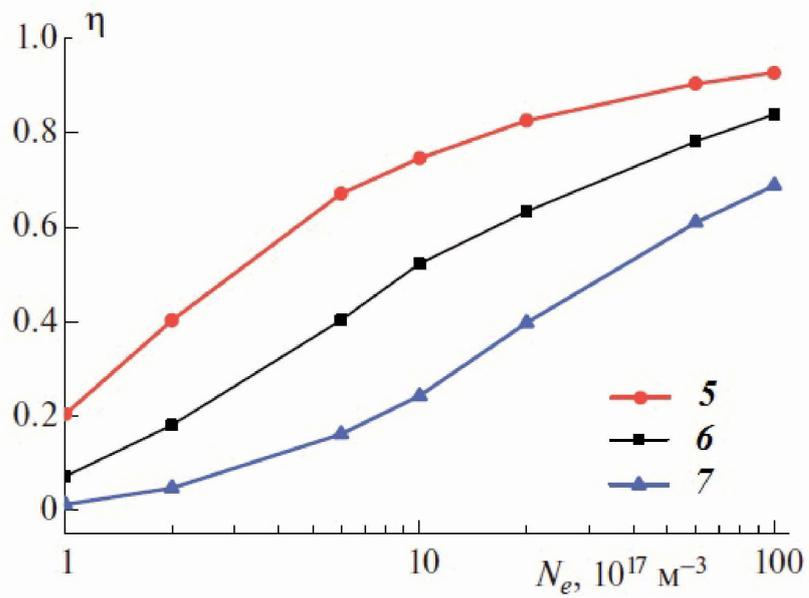
ФИГ. 5



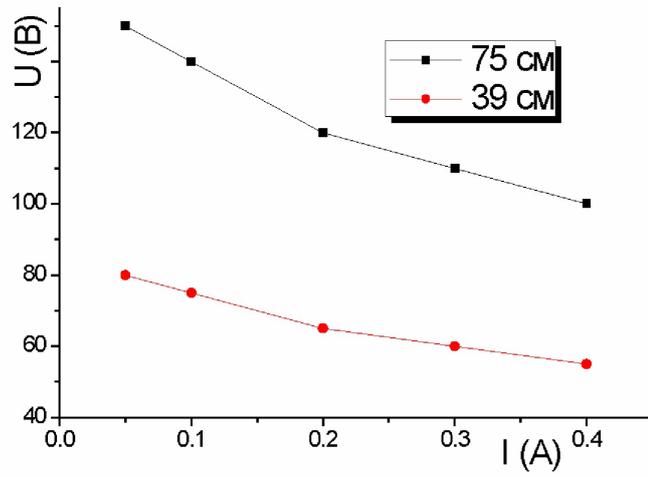
ФИГ. 6



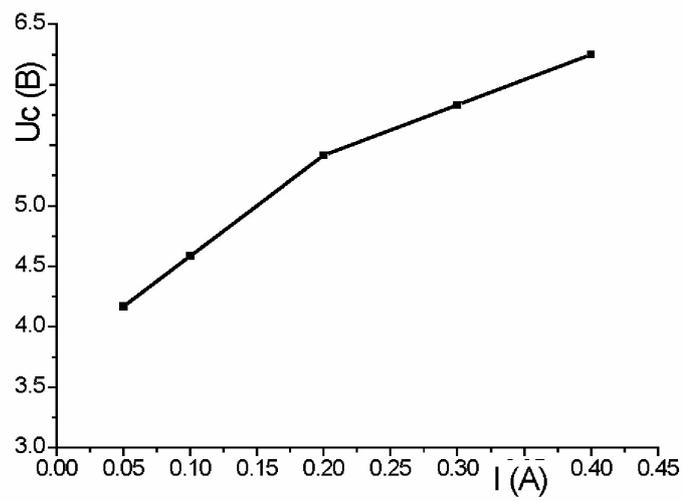
ФИГ. 7



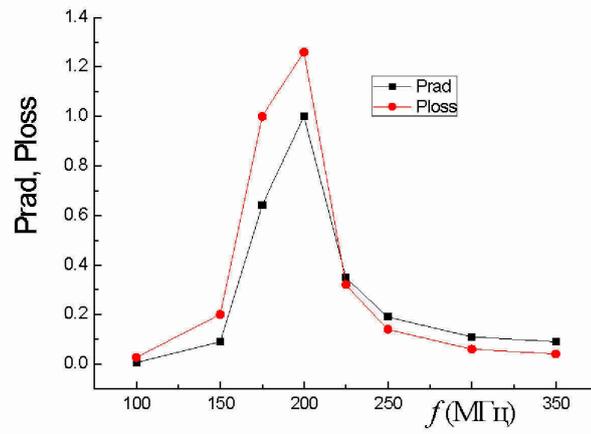
ФИГ. 8



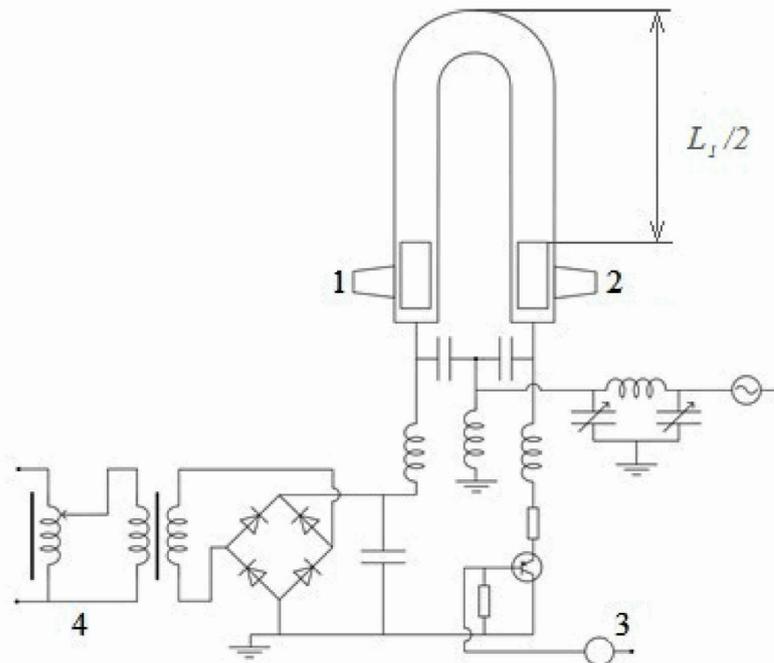
ФИГ. 9



ФИГ. 10



ФИГ. 11



ФИГ. 12