

УДК 537.3/5; 537.8; 544.2
 EDN: THNIQT

PACS: 52.55.-s; 52.55.He; 84; 84.60.-h



Магнитный диполь – генератор электромагнитной энергии

В. Г. Колесник, Е. В. Урусова, Е. С. Басова, И. И. Садыков,
 Ю. С. Ким, С. В. Сим, М. В. Урусов, Е. В. Урусов

Рассмотрены взаимодействия скрещенных магнитных и электрических полей, наложенных на заряженные частицы, формирующие вращающуюся петлю тока в открытой резонансной камере в атмосфере воздуха. Петля тока представляет собой низкотемпературную плазму из частиц воздуха. Обсуждаются способы и инженерные аспекты для резонансной накачки магнитной и электрической энергий в плазме и возможность генерации электромагнитной энергии. Рассматриваются фазовые преобразования магнитной, электрической и кинетической энергий в двух инерциальных системах отсчета. На основе теоретических расчетов и экспериментов была разработана и изготовлена экспериментальная установка «Магнитный V диполь», которая может быть использована как в процессах получения водорода, рудоподготовки для эффективного комплексного извлечения полезных компонентов минерального сырья и промышленных отходов, так и для фундаментальных исследований в области процессов в холодной плазме.

Ключевые слова: магнитный диполь, холодная плазма, фазовые превращения энергии, резонансная накачка, генерация энергии, многомодовая модуляция, петля тока, электрическое, магнитное поля, группировка частиц.

DOI: 10.51368/2307-4469-2024-12-2-140-158

Введение

Независимо от способа реализации основным вкладом в стоимость водорода, производимого методом электролиза, являются затраты на электроэнергию (70–90 %). Плазменное устройство является генератором электроэнергии, которая используется для получения

водорода, например, электролитическим способом. Для этого можно использовать одну из разработанных конструкций электролизной ячейки с популярной сейчас протонообменной мембраной, или другого электролита.

Данная работа является продолжением работ, посвященных созданию расчетных и экспериментальных моделей для исследова-

Колесник Виктор Григорьевич¹, с.н.с., к.т.н.
 E-mail: kolesnik.mvd@gmail.com

Урусова Елена Викторовна¹, с.н.с., к.т.н.

Басова Евгения Сергеевна¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

Садыков Ильхом Исмоилович¹, д.х.н., академик.

Ким Юн Сик², Президент Компании Шиндонг Энерком Инк., д.э.н.

Сим Сергей Вадимович², гл. специалист.

Урусов Максим Валерьевич³, вед. специалист.

Урусов Егор Валерьевич⁴, вед. специалист.

¹ Институт ядерной физики АН РУз.

Узбекистан, 100214, г. Ташкент, М.-Улугбекский р-н, пос. Улугбек, ул. Хуросон, 1.

² Shindong Enercom Inc.

Узбекистан, 100070, г. Ташкент, Яккасарайский р-н, улица Глилки, 1А.

³ Рязанский Государственный Радиотехнический Университет.

Россия, 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

⁴ Московский Технологический Институт.
 Россия, 105318, Москва, Измайловский вал, 2.

Статья поступила в редакцию 9.01.2024

После доработки 14.03.2024

Принята к публикации 28.03.2024

Шифр научной специальности: 1.3.9; 1.3.13

© Колесник В. Г., Урусова Е. В., Басова Е. С., Садыков И. И., Ким Ю. С., Сим С. В., Урусов М. В., Урусов Е. В., 2024

ния физических механизмов взаимодействия сильных электрических и магнитных скрещенных полей с одной стороны и заряженных частиц с другой стороны. Частицы воздуха являются в системе рабочим телом или топливом, образующим квазинейтральную низкотемпературную плазму (1000–1500 °С). Частицы в процессе ионизации увеличивают свою кинетическую энергию при взаимодействии с электростатическим полем. Происходит генерация холодной резонансной плазмы с широким (в частности, микроволновым СВЧ) спектром резонансных частот. Возникает ток плазмы.

Плазма генерируется в наложенных скрещенных полях: квазипостоянное электрическое поле (5 кВ) и наложенное магнитное поле соленоидальной обмотки ($\sim 0,13$ Тл). Ионизованные частицы воздуха обоих знаков замыкают анод-катодное пространство и образуют вращающуюся петлю тока. Плазма непрерывно удерживается плазменной петлей тока любое длительное время. Вокруг петли тока возникает вихревое электромагнитное поле в виде замкнутых волн с круговой поляризацией.

В наложенном магнитном поле частицы группируются в сгусток, который можно называть компенсированным зарядом [1]. Траектория движения частиц в общем случае описывается трохоидой. Энергия сгустка увеличивается в каждом цикле. Магнитное поле, как видно из эксперимента, играет доминирующую роль по сравнению с другими видами энергии в этом «энергетическом оркестре». Скорости и количество энергии разных фаз взаимно дополняют друг друга. При достижении определенного уровня энергии баланс поглощения и излучения электромагнитной энергии сгустка смещается в сторону излучения.

Фокусирующая магнитная система представляет трехканальную линию из ферритовых колец и ленточных магнитопроводов с намотанными на них соленоидальными и тороидальными обмотками. Пучок заряженных частиц сжимается (до диаметра ~ 5 мм) на стационарной орбите в скрещенных полях. Движение электронов и ионов направлено встречно (бифилярно), увеличивая ток и суммарную энергию частиц. Магнитная и электрическая составляющие волн, сдвинутые по фазе, образуют соленоидальные колебания

энергии, что является на сегодняшний день самым дешевым способом производства электрической энергии.

Мы рассматриваем процессы в двух системах отсчета: лабораторной (ЛС) и системе центра масс (ЦМ) сгустка частиц. В ЦМ-системе происходит поглощение и излучение, содержащее спектр в области низких частот питающего контура (несколько Гц) и высоких частот, соответствующих резонансным частотам молекул, электронов, ионов (до 10^{19} Гц). Там же в ЦМ наблюдается характерная топология поля – распределение электрического и магнитного вихревого поля, которое было нами впервые зарегистрировано на фото и названо «двойной конус» (ДК).

Магнитный поток по оси ЦМ соединяется в перекрестии с электрическим полем и создает ток частиц из электронов, ионов. В ЦМ расположен электрический заряд, который является источником подпитки двойного конуса (ДК). ДК является новым, найденным нами и описанный в ряде изобретений и статей, регулятором движения электромагнитной энергии в соответствии с классической электродинамикой.

В данной работе представлены как теоретические подходы к описанию процессов для создания теоретической модели, так и физико-технические проработки для создания устройств и их технической реализации.

Вопросы получения плазмы в качестве топлива для питания установки решены путем поочередного использования («переключения») режимов ионизации и перехода из электрической в магнитную фазу энергии. В работе это рассматривается в теоретических подходах и обсуждается на основе экспериментальных результатов, хорошо согласующихся с теорией. Полученные результаты направлены на создание промышленной машины для получения электрической энергии. Изготовлен лабораторный демонстрационный образец и получена мощность с высоким КПД.

На базе более ранних работ в области физики ускорителей (кикер-магнит, ускоритель SILUET) [2–7] и взаимодействия СВЧ-излучения с минералами [8–12], создано плазменное устройство «Магнитный V диполь»

(MVD) – генератор СВЧ-электроэнергии, которую только и можно успешно использовать, в частности, для получения водорода, например, электролитическим способом, который является самым экологически чистым, но и самым энергозатратным; для разрушения минеральных структур и увеличения извлекаемости благородных и редких металлов. В качестве топлива основным компонентом являются молекулы азота воздуха – самого дешевого сырья. Возможно использование и других составов (водород вместе с более тяжелыми элементами), которые будут наиболее эффективными для выработки энергии в конкретных условиях. Основным отличием проведения реакций в низкотемпературной плазме является их обратимость и отсутствие отходов как таковых [13]. Стоимость водорода, редких и цветных металлов по нашей технологии резко снижается.

Известны различные способы и устройства генерации электроэнергии. К ним относятся гидротурбины, парогенераторы, атомные реакторы, ветряные и приливные электростанции, солнечные модули и др. Важным показателем является углеродный след при производстве электроэнергии. Отходы загрязняют атмосферу, запасы углеводородов конечны, радиоактивные отходы опасны. Особо перспективными для производства

электроэнергии представляются способы, использующие СВЧ-энергию и в качестве топлива водород. При использовании источников питания на частоте 50 Гц, – КПД преобразований уменьшится примерно вдвое, что представляется экономически выгодным.

Генератор MVD

Работа установки MVD

Экспериментальная плазменная установка MVD была разработана на основе экспериментов и теоретических расчетов [1, 14–20]. Катод – труба диаметром $D = (2 \div 160)$ мм (использовалось несколько сечений), анод – стержневой электрод диаметром $d = (20 \div 60)$ мм, введенный в катод коаксиально. Система представляет собой открытый объемный резонатор в атмосфере воздуха или другого газа.

Поле в системе MVD формируется как суперпозиция скрещенных наложенных полей: квазипостоянное электрическое, квазипостоянное магнитное и образующееся вокруг сгустка частиц вихревое электромагнитное поле. MVD представляет собой систему из трех вложенных колебательных контуров (рис. 1) с общей нагрузкой в виде плазменной вращающейся петли тока (4), сформированной из частиц ионизированной материи.

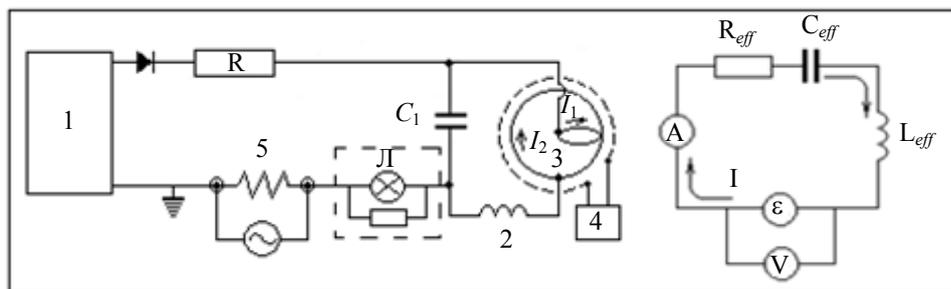


Рис. 1. Схема измерений MVD

Результирующее движение будет происходить в области центра масс (ЦМ) системы в некотором объеме V , по сложной траектории, называемой трохойдой. Частицы петли тока (ПТ) ускоряются, поглощая энергию электростатического поля. При ускоряющем напряжении $U_d = (5 \div 10)$ кВ кинетическая энергия частиц за один оборот достигает 10 кэВ.

На рисунке 1 принципиальная электрическая схема и схема движения энергии (указана стрелкой). RLC контур вместе с полями в камере можно называть статором. При введении ротора, то есть заряженных частиц, последние увлекаются электрическим полем и увеличивают кинетическую энергию. Частицы вращаются вокруг линий магнитного поля.

При этом петля тока (ПТ), вращаясь, индуцирует вокруг себя вихревое магнитное поле, увеличивая его в каждом цикле. Параметры электропитания установки, например, следующие: $P = 200$ кВт; $U = 5$ кВ; $I = 40$ А.

Кинетическую энергию ионы увеличивают в электрическом поле, что можно определить соотношением $W_k = \frac{m\upsilon^2}{2} = qU$;

$\upsilon = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$ – линейная скорость ионов или электронов, зависящая от напряжения и массы частицы.

Задавая частоту приложенного импульсного выпрямленного тока $f = 50$ Гц, можно определить радиус орбиты ионов и электронов $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$; $\upsilon = \omega R \rightarrow R = \frac{\upsilon}{\omega}$.

Катод и анод помещены в соленоид с индукцией $B = 0,13$ Тл. «Пружинка» (рис. 2) является спиральной петлей тока.

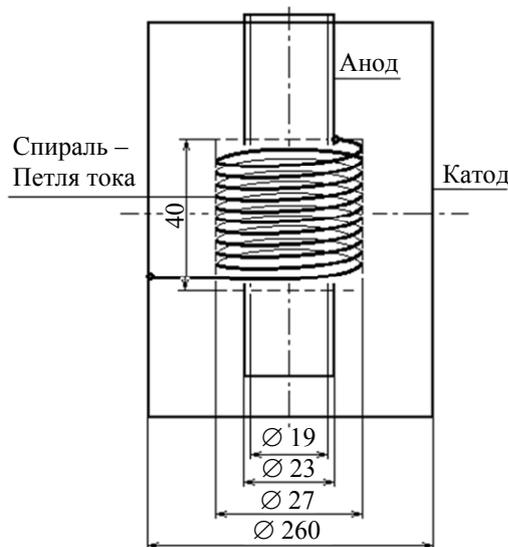


Рис. 2. Плазменная верхняя камера с петлей тока частиц в виде спирали, «пружинка»

Она образована ионизованными частицами воздуха, число витков примерно равно 10 (наблюдается на фотографиях). Это плазмоид или замагниченная плазма, которая находится в поле соленоида, расположенного вокруг плазменной камеры, например, соосно. В спектре частот присутствуют высокие резонансные частоты частиц сырья, модулированные более низкой частотой питающего контура.

Ионизация, концентрация, заряд, ток и мощность в импульсе

Проводились расчеты объема камеры, занимаемого плазмоидом-«пружинкой». Он составил 2,1 литра.

Так как в камере находится воздух, то при ионизации могут образовываться положительные и отрицательные ионы в соответствии с составом атмосферы, а также электроны. В воздухе присутствуют: азот 78,1 %; кислород 20,93 %; углекислый газ 0,03–0,04 %; гелий, неон, аргон криптон и др. 1 %. Ионы могут быть однозарядными, а также с другими степенями ионизации. Чем ниже потенциал ионизации, тем меньше энергии затрачивается на создание иона. Так как в воздухе преобладает молекулярный азот, то наиболее вероятным будет образование молекулярных ионов азота N_2^+ с потенциалом ионизации 15,5 эВ, а также других ионов с наиболее низкими потенциалами ионизации ($O_2^+ - 12,1$ эВ, $O^+ - 13,6$ эВ, $H^+ - 13,6$ эВ, $N^+ - 14,5$ эВ, $H_2^+ - 15,5$ эВ, $H_2^+ - 15,5$ эВ).

Учитывая число Лошмидта при нормальных условиях, найдем число частиц в нашем объеме: $N_V = N_L V \approx 2,69 \cdot 10^{25} \cdot 2,1 \cdot 10^{-3} \approx 5,65 \cdot 10^{22}$ частиц. Основное уравнение МКТ идеального газа $p = nkT$, где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; n – концентрация частиц, м^{-3} ; T – абсолютная температура, К. Отсюда концентрация частиц $n = \frac{p}{kT}$.

Вычислим концентрацию частиц при трех возможных значениях давления в камере диполя: $p_0 = 1$ атм = 101325 Па; $p_1 = 8$ атм = 810600 Па; $p_2 = 10$ атм = 1013250 Па.

Температуру примем $t \text{ }^\circ\text{C} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ (холодная плазма, что имеет место в экспериментах), абсолютная температура $T = t \text{ }^\circ\text{C} + 273 = 1273$ К.

$$n_0 = \frac{p_0}{kT} = \frac{101325}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1273} \approx 5,77 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3};$$

$$n_1 = \frac{p_1}{kT} = \frac{810600}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1273} \approx 4,61 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3};$$

$$n_2 = \frac{p_2}{kT} = \frac{1013250}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1273} \approx 5,77 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

Число частиц можно вычислить, зная объем, по формуле $N = nV_o$.

$$N_0 = n_0 V_o \approx 5,77 \cdot 10^{24} \cdot 2,1 \cdot 10^{-3} \approx 1,21 \cdot 10^{22} \text{ частиц;}$$

$$N_1 = n_1 V_o \approx 4,61 \cdot 10^{25} \cdot 2,1 \cdot 10^{-3} \approx 9,69 \cdot 10^{22} \text{ частиц;}$$

$$N_2 = n_2 V_o \approx 5,77 \cdot 10^{25} \cdot 2,1 \cdot 10^{-3} \approx 1,21 \cdot 10^{23} \text{ частиц.}$$

Проверим, совпадают ли вычисленные значения числа частиц при заданной температуре и атмосферном давлении с числом Лошмидта $n_L \approx 2,69 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ при н.у. (0 °С и атмосферном давлении). В нашем объеме по Лошмидту должно содержаться $N_L = n_L V_o \approx 2,69 \cdot 10^{25} \cdot 2,1 \cdot 10^{-3} \approx 5,65 \cdot 10^{22}$ частиц. Число отличается при атмосферном давлении, но порядок тот же. Рассчитаем отношение $\frac{N_L}{N_0} \approx \frac{5,65 \cdot 10^{22}}{1,21 \cdot 10^{22}} \approx 4,66$ раза. Наш расчет

меньше, чем по Лошмидту, что соответствует теории, так как температура плазмы выше, чем газа при н.у., $T = 1273 \text{ К}$.

Суммарный заряд (при условии полной ионизации всех частиц) ионизованных молекул азота N_2^+ для трех значений давления, с учетом того, что азота в среднем 78,1 % в воздухе (табл. 1). Будем считать, что длительность импульса тока τ ионизованных час-

тиц равна половине периода колебаний тока питания. Частота, период и длительность импульса тока равны соответственно: $f = 50 \text{ Гц}$; $T = 0,02 \text{ с} = 20 \text{ мс}$; $\tau = T/2 = 10 \text{ мс}$. Тогда для ионизованных молекул азота при атмосферном давлении $I = \frac{Q_0}{\tau} \approx \frac{1,51 \cdot 10^3}{10^{-2}} \approx 1,51 \cdot 10^5 \text{ А} \approx 151 \text{ кА}$. Мощность тока $P = IU$ при $U = 5 \text{ кВ}$ соответственно равна $P = 1,51 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^3 \approx 7,57 \cdot 10^8 \text{ Вт} \approx 757 \text{ МВт}$ в импульсе.

В первых трех левых колонках таблицы 1 получаются огромные значения тока (килоамперы), мощности (мегаватты), энергии (мегаджоули). Эти значения предполагают полную ионизацию сырья. Однако, полной ионизации достичь невозможно, на это потребуется огромная энергия. В этом нет необходимости.

Если на ионизацию частиц энергия питания $P = 200 \text{ кВт}$; $W = P\tau = 200 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^{-6} = 4 \text{ Дж} = 4 \cdot 6,2415 \cdot 10^{18} \approx 2,5 \cdot 10^{19} \text{ эВ}$ будет использована полностью, тогда при концентрации частиц $n_0 = 5,77 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ и числе частиц азота $N_{0a} = 9,46 \cdot 10^{21}$ (соответствует расчетному при температуре 1000 °С и атмосферном давлении, в объеме камеры $V = 2,1 \text{ л}$) мы будем иметь только часть из них ионизованными: $N_i = 5 \cdot 10^{15}$ ионизованных молекул азота, наиболее распространенных в воздухе, что составит лишь 0,0000528 % = $5,28 \cdot 10^{-5} \%$ от общего числа ионизованных молекул азота. Поэтому нет необходимости создавать в камере избыточное давление.

Таблица 1

Расчет числа ионизованных частиц и мощности тока плазмы в импульсе

$V, \text{ м}^3$	2,1E-3	2,1E-3	2,1E-3	2,1E-3	2,1E-3	2,1E-3
$T, \text{ К}$	1273	1273	1273	1273	1273	1273
$p, \text{ атм}$	1	8	10	Любое неотрицательное давление		
$n = p/kT, \text{ м}^{-3}$	5,77E+24	4,61E+25	5,77E+25	1,524E+17	3,049E+18	1,524E+19
$N = nV$	1,21E+22	9,68E+22	1,21E+23	3,20E+14	6,40E+15	3,20E+16
$N_a = 0,781N$	9,46E+21	7,56E+22	9,46E+22	2,5E+14	5E+15	2,5E+16
$Q = eN_a, \text{ Кл}$	1,51E+03	1,21E+04	1,51E+04	4E-5	8E-4	4E-3
$I = Q/t, \text{ А}$	1,51E+05	1209737,76	1514140,32	2	40	200
$P = IU, \text{ Вт}$	7,57E+08	6048688800	7570701600	10 кВт	200 кВт	1МВт
$W = QU, \text{ Дж}$	7,57E+06	6,05E+07	7,57E+07	0,2	4	20
$W_1, \text{ эВ}$	4,73E+25	3,78043E+26	4,73169E+26	1,25E+18	2,5E+19	1,25E+20

Несомненно, на ионизацию в реальности используется только часть энергии электропитания. Также часть энергии импульса преобразуется в электромагнитное излучение. Для достижения высокой мощности тока плазмы необходима достаточная мощность тока питания для преодоления потенциала ионизации для большого процента частиц воздуха. Поэтому ввод сверхвысокочастотной энергии является особо важным.

Магнитные резонансы

Магнитное поле, сформированное в верхней плазменной камере, представляет собой замкнутые магнитные волны с круговой поляризацией, с высокочастотными гармониками резонансных частот ионов и электронов. Можно говорить о разных видах резонансов на разных уровнях: резонанс кристаллической структуры, молекулярный, ионный и электронный магнитный резонанс и т.д. вплоть до самых высоких частот ядерного и спинового магнитного резонанса. Частицы сырья при ионизации в магнитном поле можно рассматривать как микро- или нано-осцилляторы, а модулированные токовые импульсы как нанофракталы. Такие модулированные импульсы наблюдались ранее в экспериментах с кикер-магнитом [2, 3] (рис. 3).

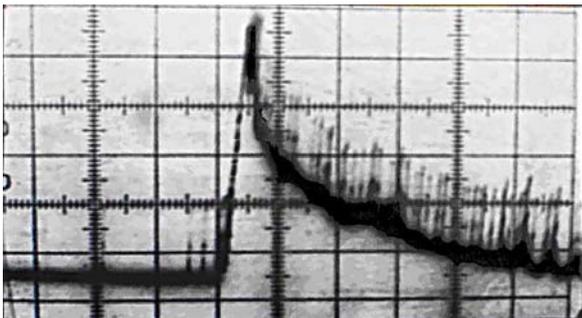


Рис. 3. Фото: ток RLC контура кикер-магнита совместно с током частиц, ускоритель 70 ГэВ/с (Серпухов)

На фото рисунка 3 видна многомодовая резонансная структура импульсов тока кикер-магнита. Там же низкочастотная компонента сигнала (жирная линия) модулирована высокочастотной компонентой тока частиц (мелкие вертикальные риски). Продолжительность импульса тока 5 мсек. На высокочастотной моде ток частиц превосходит ток кикер-

магнита в 1,5–2 раза. Ток высоких частот управляет системой векторных преобразований в целом.

Следом за электрическим полем, создающем ионизацию, подается ток в соленоид, который формирует соленоидальное магнитное поле $B \approx 0,13$ Тл. Ионизованные частицы воздуха будут испытывать воздействие этого поля, образуя круговые траектории движения вокруг оси соленоида.

Вектор магнитной индукции соленоида направлен по оси катушки или камеры в плоскости, перпендикулярной круговому движению частиц. При этом будет наблюдаться ионный и электронный циклотронный резонансы в поле соленоида [21, 22]. Сила Лоренца магнитного поля $F_L = \frac{q}{c}[\mathbf{v} \cdot \mathbf{B}]$ вызывает

Ларморовскую прецессию движущихся заряженных частиц вокруг направления магнитного поля [23]. С другой стороны, она является центробежной силой: $F_L = (m\upsilon^2)/r =$

$= qB\upsilon$, где υ – скорость частицы; м/с, m – ее масса, кг; B – индукция магнитного поля, Тл; r – радиус орбиты прецессии вокруг направления B . Резонансная циклотронная частота определяется выражением $\omega_p = \frac{Bq}{m_0}$. Ее можно

представить для ионного циклотронного резонанса $\omega_i = \frac{ZeB}{m_{0i}}$, где z – число положительных

или отрицательных элементарных зарядов иона, e – элементарный заряд, равный заряду электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Для электронного циклотронного резонанса соответственно

$\omega_e = \frac{eB}{m_{0e}}$. Скорость можно найти из равенства

кинетической энергии и энергии приложенного электрического поля $W_k = \frac{m\upsilon^2}{2} = qU$;

$$\upsilon = \sqrt{\frac{2qU}{m}}; \upsilon = \frac{qBr}{m}; r = \frac{\upsilon m}{qB}.$$

Пусть частицы находятся в плазменной камере, где происходит ионизация за счет энергии электрического поля с разностью потенциалов $U = 4,5$ кВ при нормальном атмосферном давлении и 20°C . U – ускоряющее напряжение, $I = 1,76$ кА – сила тока в катушке.

Для разных ионов скорости, частоты циклотронного резонанса в магнитном поле соленоида, импульсы и радиусы траекторий движения имеют различные значения. Расчет проводился для трех значений индукции магнитного поля (B1, B2 и B3, таблица 2), соответствующих трем вариантам исполнения соленоида. Индукция зависит от тока I , A , длины катушки l , m , числа ампер-витков n : $B = \mu_0 n I / l$.

Расчет энергии заряженных частиц (строка 7 таблицы 3) для напряжения U показал, что наибольшей энергией будут обладать шестизарядные ионы золота Au^{6+} (27 кэВ), второе место займут ионы кремния Si^{4+} и углерода C^{4+} (по 18 кэВ). Самую большую скорость (строка 8 там же) приобретут в заданном напряжении электроны ($3,987 \cdot 10^7$ м/с) и ионы

углерода C^{4+} ($1,075 \cdot 10^6$ м/с). При этом, самые малые значения импульса (строка 11 там же) будут у электрона, протона и иона водорода H^+ , а самые большие у Pt^{4+} и Au^{6+} .

Эти результаты, полученные расчетным путем на основе классических представлений, позволяют примерно представить процесс поглощения заряженными частицами энергии наложенного магнитного поля. Электроны будут ускоряться до больших скоростей, однако будут обладать меньшими энергией и импульсом, радиус траектории меньше ионного на пару порядков. Самыми большими энергией и импульсом будут обладать самые тяжелые с большим зарядом ионы золота Au^{6+} , хотя большую скорость из ионов будут набирать ионы углерода C^{4+} .

Таблица 2

Расчет значений индукции

Витки n	20	50	100
Ток I (А)	1760	1760	1760
Длина катушки l (м)	0,5	0,5	0,5
Напряженность магнитного поля $H = nI/l$ (кА/м)	70,4	176	352
Индукция $B = \mu_0 H$ (Тл)	B1 = 8,849E-02	B2 = 2,212E-01	B3 = 4,425E-01

Таблица 3

Расчет скорости, энергии, импульса и циклотронной резонансной частоты для различных видов частиц

1. Частица	$-e$	$+p$	H^+	O^{2+}	N^{2+}	Si^{4+}	C^{4+}	Au^{6+}	Pt^{4+}
2. Заряд q , e	-1	+1	+1	+2	+2	+4	+4	+6	+4
3. Масса m_0 , а.е.м.	0,000549	1,00728	1	16	14	28	12	197	195
4. Масса m_0 , кг	9,10 E-31	1,6721 E-27	1,6606 E-27	2,6569 E-26	2,3248 E-26	4,6496 E-26	1,9927 E-26	3,2713 E-25	3,2380 E-25
5. q/m_0 , Кл/кг	-1,76 E+11	9,57 E+07	9,64 E+07	1,20 E+07	1,38 E+07	1,38 E+07	3,21 E+07	2,93 E+06	1,98 E+06
6. Валентн. Z	1	1	1	2	2	4	4	6	4
7. Энергия $W = ZU$, эВ	4500	4500	4500	9000	9000	18000	18000	27000	18000
8. Скорость v , (м/с) $= \sqrt{\frac{2qU}{m_0}}$	3,978 E+07	9,280 E+05	9,312 E+05	4,656 E+05	4,978 E+05	7,039 E+05	1,075 E+06	3,981 E+05	9,439 E+05
9. Импульс $p = mv$, (кг·м/с)	3,620 E-23	1,552 E-21	1,546 E-21	1,237 E-20	1,157 E-20	3,273 E-20	2,143 E-20	1,302 E-19	3,056 E-19
10. Циклотронная резонансная частота f (Гц) $f_p = qB/2\pi m_0$ и длина волны λ (м) $\lambda = c/f_p$ для трех значений магнитной индукции B1, B2, B3									
11. B1 f_1 (Гц)	2,48E+9	1,35E+6	1,36E+6	1,69E+5	1,94E+5	1,94E+5	4,52E+5	4,13E+4	2,79E+4
12. B1 λ_1 (м)	1,20E-1	2,26E+1	2,22E+2	1,78E+3	1,57E+2	1,55E+3	6,64E+2	7,26E+3	1,08E+4
13. B2 f_2 (Гц)	6,2E+9	3,37E+6	3,35E+6	4,23E+5	4,86E+5	4,86E+6	1,13E+6	1,03E+5	6,76E+4
14. B2 λ_2 (м)	4,84E+0	8,90E+1	8,96E+3	7,09E+4	6,17E+4	6,17E+3	2,65E+2	2,91E+3	4,43E+3
15. B3 f_3 (Гц)	1,24E+0	7,14E+5	6,79E+6	8,46E+5	9,72E+5	9,72E+5	2,26E+6	2,06E+5	1,40E+5
16. B3 λ_3 (м)	2,42E-2	4,20E+2	4,40E+1	3,50E+2	3,10E+2	3,10E+2	1,33E+2	1,46E+3	2,14E+3

Величины, характеризующие интенсивность резонанса, зависят от соотношения заряда к массе частицы и от магнитной индукции. Наши расчеты хорошо согласуются с литературными данными.

Известно, что резонансные частоты электронов лежат в ультрафиолетовой области спектра, а резонансные частоты ионов лежат в инфракрасной области оптического диапазона. В плазменной камере MVD процесс резонансного возбуждения начинается с долей мегагерц и заканчивается УФ областью спектра (10^{16} – 10^{18}) Гц. Мы можем, например, взять резонансные частоты, соответствующие крайним и средним значениям ИК- и УФ-диапазонов, и решить обратную задачу по нахождению индукции магнитного поля вокруг частиц в соответствии с резонансной частотой по формуле $B_c = 2f_p m_0 / q$. Также и для длинноволнового (ДВ), коротковолнового (КВ) и СВЧ-диапазонов.

Чем выше частота излучения, тем выше индукция локального магнитного поля, окружающего прецессирующую частицу или сгусток частиц – ПТ. По результатам расчетов можно сказать, что в оптическом диапазоне электроны могут создавать магнитную индукцию в интервале от единиц до 10^6 Тл, протоны – (10^4 – 10^9) Тл, ионы – (10^4 – 10^{11}) Тл. Например, в ультрафиолетовом диапазоне для тяжелых ионов золота Au^+ , серебра Ag^+ , свинца Pb^{4+} значения индукции могут достигать 10^{11} Тл. Для диапазонов радиоволн и СВЧ значения индукции будут меньше – (10^4 – 10^8) Тл.

Магнитное поле, сформированное в верхней плазменной камере, содержит резонансные частоты заряженных частиц воздуха. Его можно рассматривать как замкнутые магнитные волны с круговой поляризацией, многомодовой модуляцией гармоник высоких резонансных частот ионов и электронов низкой частотой питающего контура.

В верхнюю плазменную камеру необходимо подавать аргон для запуска, так как он активизирует процесс и вносит в спектр свои высокие резонансные частоты.

Устройство нижней камеры. Как возникает СВЧ-излучение

В нижней плазменной камере формируется «шнур», который образует траекторию час-

тиц сырья. В качестве сырья можно использовать различные составы или воздух. В результате электромагнитного взаимодействия частиц сырья со специальным образом сформированными электромагнитными полями возникает СВЧ-излучение на частотах циклотронного резонанса заряженных частиц. В нижней камере, выполненной в виде трубки и с внутренним диаметром от 19 мм до 35 мм, находится материальная среда (воздух, состав газов), которая движется по трубке под давлением со скоростью примерно 3 м/с.

Две тороидальные плазменные камеры расположены в одной плоскости и соединены между собой крест-накрест. Радиус камеры $r = 350$ мм; $l = 2\pi r = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,35 \approx 2,2$ м. Расстояние между камерами около $s = 1,5$ м. Сырье будет совершать циклическое движение по траектории, общая длина которой составит $L = 2l + 2s = 2 \cdot 2,2 + 2 \cdot 1,5 \approx 7,4$ м.

Тогда объем нижней камеры рассчитаем таким образом:

$$L = 7,4 \text{ м}; r = 19 \text{ мм} = 19 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$S = \pi r^2 = 3,14 \cdot 19^2 \cdot 10^{-6} = 1,134 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

$$V = SL = 1,134 \cdot 10^{-3} \cdot 7,4 = 8,38 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 = 8,38 \text{ л.}$$

По ходу движения потока наложены магнитные поля, которые осуществляют сжатие и группировку пучка из частиц по оси.

Вокруг каждой кольцевой части установлены обмотки, которые выполнены на пермаллоевых дисках из специального сплава с высокими магнитными свойствами и резонансом в полосе частот до 25 кГц. Обмотки (4 двойные, 8 на каждом диске) намотаны многожильным алюминиевым проводом с сечением 25 мм^2 с изоляцией до 20 кВ из шитого полиэтилена (типа СИП-3) (рис. 4). Дисков с обмотками 6 штук, 48 обмоток. Диски «наде-ты» на левую и правую кольцевые части по 3 на каждую часть, по 24 обмотки на левый и правый блоки.

Трубка нижней камеры была установлена с внутренним диаметром до 35 мм. Диаметр пучка достигал 10 мм с током до 1–2 кА на частоте 50 Гц. На трубку одеты ферритовые линзы в форме дисков через 41 мм. Коробочки и тороидальные трансформаторы были установлены, как запланировано. Параметры сверялись по эмпирическим и справочным дан-

ным, подбирались по источнику питания на 6–10 кВ. Питание соленоида было в пределах 50 В на ток в диапазоне 1–2 кА, совместно с током конденсатора для петли тока.



Рис. 4. Фото фрагмента установки с плазменной камерой и тремя уровнями магнитных линз: 1, 2 – тороиды; 3 – соленоиды; 4 – пучок частиц в камере, в магнитных линзах

Индуктивность обмоток на пермалловых дисках может варьироваться в зависимости от задаваемых параметров колебательного RLC контура – выбранной частоты 23 кГц и подбираемой емкости. Обмотки осуществляют первичное сжатие пучка (примерно до 20 мм). Так как пермаллой, служащий сердечником обмоток, имеет низкую частотную полосу, то ток спирали, модулированный высокими частотами, практически не может создавать высокочастотную модуляцию в обмотках на диске. Обмотки соединены последовательно со спиральной петлей тока (например, 10 витков спирали или ампер-витков) в верхней камере гальванически, и образуют с ней единый первичный колебательный контур, куда также входит пучок заряженных частиц, циркулирующий в нижней камере. Так как скорость движения пучка мала, будем для простоты представлять его в виде одного витка с током или ампер-витка. Другой вид обмоток, также расположенных по пути следования пучка, «надеты» на камеру (камера представляет собой трубу с ферритовыми кольцами) и соединяющие трубки в перекрестье – это отдельные магнитные линзы 24 штуки, выполненные в виде «коробочек». Сердечники этих

обмоток набраны из ферритовых пластин прямоугольной формы, которые по 4 плотно соединены в магнитный сердечник. Поверх ферритового сердечника намотаны тороидальные (12 штук) или полоидальные обмотки (12 штук).

Таким образом, на каждую половину (блок) приходится по 6 тороидальных и 6 полоидальных линз. Индуктивность этих магнитных линз велика и находится в пределах (0,6–0,8) Тл. Направление вектора индукции в тороидальных линзах по оси камеры, в полоидальных в плоскости поперечного сечения. Они осуществляют вторичное сжатие или фокусировку пучка (примерно до 15 мм) и управляют траекторией движения частиц сырья с помощью энергии магнитного поля. Для передачи сигнала, модулированного СВЧ резонансными частотами ионов и электронов, на пермалловых дисках изготовлены обмотки, которые будут передавать СВЧ модулированный сигнал на тороидальные и полоидальные «коробочки». С правого верхнего блока ток подается на правый нижний, а с левого верхнего на левый нижний. Мы создаем возможность получить на выходе внизу полную синусоиду с положительной и отрицательной частью, Этот ток теперь модулирован высокими СВЧ резонансными частотами. Амплитуда тока частиц, СВЧ ускоренных, по фронту магнитного поля (см. рис. 3) возрастает более, чем в 6–10 раз в сравнении с импульсом кикер-магнита. Также возрастает плотность частиц. Ускоряющее напряжение $U = 4,5$ кВ, сила тока $I = 1,76$ кА в магнитном поле соленоида, где находится пучок частиц.

Окончательное, самое сильное сжатие пучка (до 5 мм) осуществляется с помощью ферритовых колец (размеры: внешний 83 мм и внутренний диаметр 35 мм), которые также «надеты» на траекторию пучка, всего 106 штук, по 53 кольца на каждый блок. Они создают постоянное магнитное поле с индукцией (0,1–0,15) Тл. Они значительно меньше по диаметру, расположены ближе к пучку, поэтому осуществляют самое сильное сжатие. Для стабильного подмагничивания ферритовых колец служит пучок заряженных частиц в нижней камере, образующий виток с током, индуцирующий вокруг себя вихревое магнитное поле

и образующий индуктивную связь с ферритовыми кольцами.

Таким образом, по оси движения пучка в нижней камере расположены три типа магнитных линз: обмотки на пермалловых дисках, тороидальные и полоидальные магнитные линзы на ферритовых сердечниках и ферритовые кольца. Все типы линз отстоят друг от друга на равном расстоянии, с шагом 41 мм, чтобы обеспечить равномерность сжатия пучка. Все виды полей связаны индуктивно через пучок нижней камеры, с несущей частотой 50 Гц и высокими резонансными частотами, которые модулированы циклической частотой 50 Гц. Топология комплексного магнитного поля представляет собой сложную картину из суперпозиции полей этих линз и собственного поля пучка.

Фазовые переходы энергии в системе MVD

Из рассмотрения динамики заряженных частиц в поле, являющемся комбинацией скрещенных электромагнитного и электростатического полей, следует, что по мере роста скоростей, частицы в системе будут группироваться. В среднем по времени происходит перекачка энергии поля в энергию движения в ЦМ системы. При этом возможно увеличение энергии электромагнитной волны, предварительное фазирование или группирование могут отсутствовать. Закономерности физических процессов можно представить, исходя из схемы эквивалентного колебательного контура (см. рис. 1), элементами которого являются пучок и область взаимодействия, как уже разбиралось выше [5].

В результате взаимодействия пучка и волны в фазе или в противофазе автоматически обеспечивается режим преобразования энергии электромагнитного поля в кинетическую энергию пучка или электромагнитное излучение. Имеет место механизм параметрического резонанса (раздел *Магнитные резонансы*). Его эффективность зависит от соотношения между законом изменения параметров группировки и пространственной структурой волн, генерируемых в системе.

Комплексное электромагнитное поле, сформированное в верхней плазменной камере, передается путем взаимной индукции или гальванической связью частицам сырья в нижней камере, и сопровождает пучок в трубке нижней камеры. Там ионизованные частицы набирают энергию, взаимодействуя с магнитным полем линз, установленных по ходу движения пучка.

Энергия этого электрического поля может быть снята с пучка на нагрузку, которая должна быть невелика, чтобы в системе оставалась достаточная для работы мощность. Но нагрузка не должна быть совсем малой, так как с увеличением числа оборотов нарастает суммарная энергия пучка. Таким образом, если для начала работы системы используется электрическое поле питания, то в результате электромагнитных преобразований мы получаем пучок достаточно высокой мощности. Эту мощность можно снимать и использовать как электроэнергию. Проектируемая мощность в нижней камере на выходе может быть различной, в зависимости от задачи, например 10 кВт–200 кВт–1 МВт.

Экспериментальный запуск модуля (инжектора)

Все расчеты и объяснения, приведенные в данной работе, сделаны для модуля с малой мощностью, примерно на порядок ниже реальных устройств, которые будут выполнены для практического применения. Реальная установка с необходимой мощностью может иметь модульную архитектуру и состоять из блоков.

Расчет силы тока и мощности

Расчеты (табл. 4) были сделаны для работы на резонансных частотах, например, 2,415 ГГц (СВЧ), ($\sim 10^9$ – 10^{10}) Гц для электронного резонанса, ($\sim 10^4$ – 10^6) Гц для ионного резонанса (табл. 3, раздел *Магнитные резонансы*). В MVD процесс резонансного возбуждения начинается с долей мегагерц и заканчивается УФ областью спектра (10^{16} – 10^{18}) Гц.

Таблица 4

Расчет силы тока и мощности при заданном значении сопротивления нагрузки и напряжения при различных значениях мощности инжектора-установки на частоте $\sim 10^{11}$ Гц

Общая мощность P , Вт	Общий ток I , А	Ток установки I_y , А	КПД P_H/P , %	Сопротивление установки R_y , Ом	Мощность установки P_y , Вт
1000	12,5	10,39474	20	6,4	800
10000	125	122,8947	2	0,64	9800
200000	2500	2497,895	0,1	0,032	199800
1000000	12500	12497,89	0,02	0,0064	999800
10000000	125000	124997,9	0,002	0,00064	9999800

Схема инжектора с нагрузкой, где производились измерения, представлена на рисунке 1. Сопротивление лампы накаливания с вольфрамовой спиралью при комнатной температуре измерено $R = 3,8$ Ом. При работе спираль разогревается до ~ 2500 °С. Ее сопротивление увеличивается примерно в 10 раз: $R_n = 38$ Ом. К лампе параллельно присоединена цепь сопротивлений. Общее сопротивление нагрузки составило $R_H = 32$ Ом. Напряжение измерено $U = 80$ В. Ток нагрузки с одной лампой $I_H = U/R_H = 2,5$ А, мощность нагрузки с одной лампой $P_H = 200$ Вт – 20 % от полной мощности выделяется на нагрузке. Для трех ламп сопротивление нагрузки $R_1 = 225$ Ом, ток нагрузки $I_{л1} = 0,3(5)$ А, мощность на нагрузке $P_{л1} = 28,(4)$ Вт. Лампы соединены последовательно.

Полная общая мощность 1 кВт; 10 кВт; 200 кВт; 1 МВт; 10 МВт.

Можно использовать модуль для генерации электромагнитной энергии на высоких или низких частотах. Для разрушения кри-

сталлической решетки минерального сырья [16–20], получения водорода можно, например, использовать высокочастотный сигнал. Также его применение может быть полезным для фундаментальных научных исследований. Но для промышленности, где требуются большие мощности для работы агрегатов, необходимо генерировать энергию на стандартной частоте 50 Гц.

Чтобы приблизить экспериментальный модуль к промышленным частотам, высокие частоты модулируются частотой 50 Гц, на которой снимается общая мощность. Поэтому были сделаны расчеты для работы устройств на этой частоте.

При запуске установки на выходе была установлена лампа накаливания с вольфрамовой спиралью, закороченной сопротивлением, которая загоралась. Иногда устанавливали 2 или 3 лампы (фото, рис. 5). При этом наблюдалось увеличение мощности и появление ультрафиолетового излучения (рис. 6).

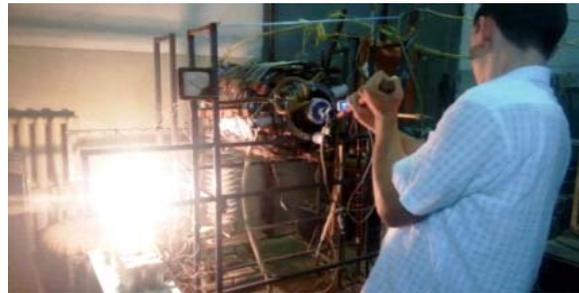


Рис. 5. Фрагменты экспериментальных работ с вольфрамовыми лампами и сопротивлением нагрузки



Рис. 6. Фото генерация энергии ультрафиолетового диапазона

Измерения (табл. 5) были выполнены на двух работающих блоках с плазменной Петлей тока (устройства верхнего уровня). Нагрузка – одна, две или три киловаттные лампы с вольфрамовой спиралью. Мощность блоков питания 20 кВт или 30 кВт. При 20 кВт наблюдается резонанс в контуре установки, как результат резонанса на нагрузке выделяется большая мощность. Были подсчитаны средние значения КПД для случая 20 кВт (11,96 %) и 30 кВт (3,42 %), их отношение соответственно составило 3,5 раза.

КПД системы при включении на 20 кВт значительно эффективнее, чем при включении на 30 кВт, в 3,5 раза. Можно предположить,

что при 20 кВт лучше выполняются условия резонанса системы и колебательный RLC контур имеет более высокую добротность $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$. При этом разность фаз между током и напряжением равна нулю: $\varphi = 0$, $\cos\varphi = 1$. Индуктивное и емкостное реактивные сопротивления становятся равны: $X_L = X_C$, $X_L = \omega L$, $X_C = \frac{1}{\omega C}$. Тогда полное сопротивление при резонансе равно активному сопротивлению: $Z_{res} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R$ и минимально при заданном R .

Таблица 5

Данные замеров силы тока и напряжения, расчет мощности и КПД на нагрузке при частоте 50 Гц

Напряж. на ИП U , В	Ток ИП I , А	Мощн. ИП P , Вт	Напряж. на нагр. U_1 , В	Ток на нагр. I_1 , А	Мощн. на нагр. P_1 , Вт	Мощн. блоков питан. $P_{\text{бп}}$, Вт	Число ламп	КПД, %
1700	0,8	1360	180	0,8	144	20000	3Л	10,59
1500	0,85	1275	80	0,7	56	30000	2Л	4,39
1700	0,78	1326	50	0,7	35	30000	1Л	2,64
1000	0,9	900	150	0,8	120	20000	2Л	13,3
1900	0,85	1615	80	0,65	52	30000	3Л	3,22

Можно использовать установку для генерации не только переменного, но и постоянно-го напряжения.

Один из главных факторов – упорядочение силовых линий магнитного и электрического полей: важно как их взаимно расположить. Угол φ – фазовый угол между векторами напряженности электрического и магнитного полей, между электрической и магнитной фазами энергии. Он определяет винтообразное движение и набор состояний или фаз энергии системы.

На фото (рис. 7) со сжатой фольгой видны две волны, которые переплелись, энергия этих волн «пожевала» фольгу, видны сжатия и растяжения. Обе волны электромагнитные, одно поле E переходит в другое H .



Рис. 7. Полоска Al фольги, деформированная под действием магнитной волны, прошедшей вдоль полоски

Таких процессов, где один вид энергии переходит в другой и обратно, можно привести целый ряд: $E \leftrightarrow H$ электрическое и магнитное поле; $v \leftrightarrow \nu$ частота и скорость; $t \text{ } ^\circ\text{C} \leftrightarrow \nu$ температура и скорость частиц и другие.

Если рассчитать параметры выходной мощности по известному измеренному значению выходного напряжения 80 В (см. рис. 5, на вольтметре), то можно примерно определить эффективность установки, то есть количество дополнительно выработанной электроэнергии, используемой на нагрузке модуля, работающего на высоких частотах. Лампа мощностью 1 кВт имеет при комнатной температуре (20 °С, $T_1 = 293$ К) сопротивление вольфрамовой спирали $R_1 = 3,8$ Ом (измерено). Лампа накаливания с вольфрамовой спиралью имеет интервал рабочих температур (2000–2800) °С и положительный температурный коэффициент электрического сопротивления $\alpha = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Сопротивление вольфрамовой спирали при нагреве до рабочей температуры можно рассчитать по формуле

$R_2 = R_0(1 + \alpha T_2)$, где $R_0 = \frac{R_1}{(1 + \alpha T_1)}$ – сопро-

тивление спирали при 0 °С. Сопротивление работающей разогретой спирали было рассчитано, оно примерно в 10 раз больше измеренного исходного: $R_2 = 38$ Ом. Параллельно к лампе присоединена цепь из нескольких сопротивлений. Сопротивление этой цепи найдено из измерений тока и напряжения и составило $R_3 = 231$ Ом. Тогда сопротивление нагрузки, в виде лампы с параллельной цепью сопротивлений, составит 32 Ом.

При напряжении 80 В сила тока нагрузки составит $I_H = \frac{U}{R} = \frac{80}{32} = 2,5$ А.

С другой стороны, при потреблении мощности в 1 кВт на напряжении 80 В сила тока составит: $I = \frac{P}{U} = \frac{1000}{80} = 12,5$ А (табл. 4). Это

полный ток в цепи на выходе установки. Лампа включена в цепь параллельно инжектору. Тогда $\Delta I = I_H = 12,5 - 2,5 = 10$ А – сила тока в инжекторе. Соответственно мощность, потребляемая нагрузкой, будет $P = I_H U = 2,5 \text{ А} \cdot 80 \text{ В} = 200$ Вт, что составляет 20 % от полной мощности. Если учесть, что в установке работает два независимых блока для создания синусоидального тока, то процент выделяемой мощности будет вдвое большим, то есть 40 %.

Время релаксации в MVD плазменной камере

В наших экспериментах генерируется плотная холодная замагниченная плазма. Критерий замагниченности плазмы: $\omega_H \tau \gg 1$, где ω_H – частота магнитного наложенного ВЧ-поля, τ – время свободного пробега частицы (электрона или иона). К важнейшим свойствам плазмы относится квазинейтральность. Она соблюдается, если линейные размеры области, занимаемой плазмой, много больше дебаевского радиуса экранирования $l \gg r_D$ или $l \gg 5 \sqrt{\frac{T_e}{n}}$, где T_e – электронная температура, К; n – число частиц.

Время релаксации плазмы можно оценить, исходя из дебаевского радиуса $r_D = (T / 4\pi n e^2)^{1/2}$, где e – элементарный заряд,

T – температура плазмы. Дебаевский радиус характеризует пространственный масштаб областей декомпенсации заряда. Время, в течение которого эти области существуют, можно найти как отношение дебаевского радиуса к скорости наиболее быстрых частиц (электронов): $\tau \sim \frac{r_D}{v_e} \approx (T / 4\pi n e^2)^{1/2} (m_e / T)^{1/2} = (m / 4\pi e^2)^{1/2}$. Чем выше плотность плазмы, тем меньше масштабы декомпенсации зарядов в пространстве и времени. Внутри области, занятой плотной и холодной плазмой, нарушения квазинейтральности могут происходить только в пределах достаточно малых объемов [24].

Помимо хаотичного теплового движения частицы плазмы могут участвовать в упорядоченных коллективных процессах, из которых наиболее характерны продольные колебания пространственного заряда, называемые ленгмюровскими волнами. Их угловая частота $\omega_0 = (4\pi n e^2 / m)^{1/2}$ называется плазменной частотой (e и m – заряд и масса электрона).

Считается, что в газе, находящемся в равновесном состоянии, устанавливается максвелловское распределение частиц по энергиям. Таким образом, время релаксации плазмы и есть время установления исходного максвелловского распределения. Но во время релаксации протекает ряд процессов, часть из которых более быстрые, другие идут с меньшей скоростью.

Наиболее быстрым процессом [22], связанным со столкновениями, является обмен энергией между поступательными степенями свободы. Тогда, используя модель твердых упругих шаров для частиц газов А и В с определенными диаметрами и массами (m_A и m_B), принимая, что все столкновения происходят вдоль линии центров, получим выражение для времени установления максвелловского рас-

пределения $\tau_n = \frac{3 (m_A + m_B)^2}{4 m_A m_B} \frac{1}{z}$, где z – пол-

ное число столкновений. При $m_A = m_B$ формула принимает простой вид: $\tau_n \sim \frac{1}{z} = \tau_0$, где τ_0 – среднее время свободного пробега. Таким образом, установление равновесия по посту-

пательным степеням свободы в газе А происходит за время между двумя столкновениями. При $m_A \gg m_B$ время релаксации увеличивается $\tau_n \sim \frac{m_A}{m_B} \tau_0 > \tau_0$. То есть, обмен поступательной энергией между легкой и тяжелой компонентами затруднителен.

Ионы приближаются медленнее к максвелловскому распределению, чем электроны. Состояние равновесия для электронной компоненты достигается гораздо быстрее вследствие их малой массы, если только температура электронов не очень высокая, то есть если $\frac{T}{T_+} < \left(\frac{M}{m}\right)^{1/3} z^2$, где m и M – массы электрона и иона, а T и T_+ – их температуры соответственно.

Время установления максвелловского распределения между электронами и ионами относительно времени электронных столкновений таково: $\tau_{ei} / \tau_{ee} \sim M / m$. Равнораспределение между электронами и ионами устанавливается медленнее (примерно в $\frac{M}{m}$ раз), чем равновесие между электронами. Аналогично выполняется условие $\langle \tau_{ei} \rangle > \langle \tau_{ii} \rangle$ при соотношении ионной и электронной температуры $\left(\frac{T_+}{T}\right)^{3/2} \ll \left(\frac{M}{m}\right)^{1/2} \frac{z^2 n}{2(n+n_+)}$, где n и n_+ – концентрации электронов и ионов.

Установление равнораспределения энергии между электронами и ионами осуществляется уже после установления равновесных распределений для каждой компоненты. Только в этом случае распределения электронов и ионов на протяжении всего процесса можно считать максвелловскими.

Наиболее медленные процессы установления равновесия связаны в плазме с диссоциацией, ионизацией и электронным возбуждением. Время установления равновесной диссоциации по порядку величины равно $\tau_{\text{дис}} \sim (k_{\text{дис}} N)^{-1}$, где $k_{\text{дис}}$ – коэффициент диссоциации, который рассчитывается в соответствии с механизмом диссоциации. В обычных условиях термическая диссоциация происходит при столкновении молекул, энергия кото-

рых (внутренняя плюс кинетическая) превышает энергию диссоциации.

Процесс ионизации газа в плазме происходит за счет электрон-атомных столкновений: $A + e \rightarrow A^+ + e + e$. По аналогии с диссоциацией можно записать $\tau_{\text{ион}} \sim (k_{\text{ион}} N)^{-1}$, где $k_{\text{ион}}$ – коэффициент ионизации. При этом принимается, что электронный газ имеет максвелловское распределение с температурой электронов, которая может отличаться от температуры газа. Поскольку энергия возбуждения, диссоциации и ионизации одного порядка, то эти процессы могут идти параллельно $\tau_{\text{возб}} \leq \tau_{\text{ион}}$. При температурах (10 000–20 000) К наиболее медленным процессом является установление ионизационного равновесия.

Из проведенного рассмотрения можно определить последовательность релаксационных процессов в плазме: $\tau_n \ll \tau_{\text{дис}} < \tau_{\text{возб}} < \tau_{\text{ион}}$.

Для атмосферного воздуха при нормальном давлении экспериментально установлено [23], что стационарная концентрация электронов $n_{est} = 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ достигается за время ионизации-рекомбинации $\tau_{\text{ион}} = \tau_{\text{рек}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ с}$.

Для условий: $\frac{E}{p} = 30 \text{ В}/(\text{см} \cdot \text{Торр})$, давлении 10 Торр определена электронная температура $T_e = 18 \text{ 000 К}$; частота столкновений между ионами плазмы $\nu_i = 5 \cdot 10^4 \text{ Гц}$.

Из сопоставления времени релаксации для приведенных процессов можно сделать вывод, что в наших экспериментах время релаксации и установления максвелловского распределения τ_n можно считать примерно равным времени ионизации $2 \cdot 10^{-5} \text{ с}$. Этот параметр важен для работы MVD, так как ионы газа (воздуха) являются рабочим телом, их количество должно быть постоянным для стабильной работы системы. Время релаксации в плазменной камере должно быть невелико и как мы считаем, 20 мкс достаточно малое время, позволяющее поддерживать плазму в рабочем состоянии.

В соответствии с технологией резонансного возбуждения (векторных преобразований) электронов и ионов в скрещенных полях

MVD мы получаем эффективное взаимодействие ЭМ поля с веществом на высоких СВЧ-частотах (10^9 – 10^{10}) Гц, резонансных частотах ионов и электронов. СВЧ-волны всегда активно взаимодействуют с твердым телом в соответствии с известной зависимостью интенсивности излучения от четвертой степени частоты, вызывая разрушение связей (как ионных связей в кристаллической решетке, так и молекулярных связей в газе). Различается взаимодействие СВЧ с диэлектрическими структурами, которые насквозь пронизываемы для СВЧ-излучения и изменяют свои диэлектрические параметры, тангенс угла потерь. Другие процессы сопровождают взаимодействие СВЧ с металлами и ферромагнитными структурами, куда излучение часто проникает лишь на глубину скин-слоя, вызывая резонансное возбуждение на частотах на несколько порядков выше исходных параметров СВЧ, снижение индуктивности, возникновение бифилярных токов и другие эффекты. Возникает излучение на более высоких резонансных частотах.

На 50 Гц такое возбуждение создать невозможно. СВЧ-частоты позволяют производить возбуждение на частотах выше СВЧ-диапазона. Этот процесс мы смогли использовать в своих схемах, так как не пользуемся нейтронами. Мы решили этот вопрос без ядерных реакций и радиоактивности.

На основании приведенных процессов мы вводим в систему возбуждение СВЧ-частотами, как более эффективное. Это позволяет получить на резонансных СВЧ-частотах более высокий КПД: при одной лампе с вольфрамовой спиралью мощностью 1 кВт в качестве

нагрузки, горячей при напряжении 80 В и сопротивлении разогретой спирали в рабочем режиме до $2500\text{ }^\circ\text{C}$ $R_H = 32\text{ }\Omega$, ток нагрузки соответственно составил 2,5 А, общий ток установки 12,5 А при мощности $P_{\text{общ}} = 1\text{ кВт}$. Лампа, рассчитанная на мощность 1 кВт, ярко горит при потребляемой мощности 200 Вт, что невозможно при частоте 50 Гц. Значит, лампа потребляет всего $\frac{P_H}{P_{\text{общ}}} = 20\%$ от общей

мощности установки.

Были проведены замеры силы тока и напряжения, расчет мощности и КПД на нагрузке приборами, работающими на частоте 50 Гц. Нагрузка – одна, две или три киловаттные лампы с вольфрамовой спиралью. Мощность блоков питания 20 кВт или 30 кВт. При 20 кВт наблюдается резонанс в контуре установки, как результат резонанса на нагрузке выделяется большая мощность.

Наиболее эффективно на нагрузке выделяется мощность (120 Вт с КПД 13,3 %) при включении двух ламп в качестве нагрузки при напряжении на нагрузке 150 В и суммарной мощности блоков питания 20 кВт, а также мощность на нагрузке (144 Вт с КПД 10,6 %) при включении трех ламп при напряжении на нагрузке 180 В и такой же мощности блоков питания 20 кВт (табл. 5). КПД системы при включении на 20 кВт значительно эффективнее, чем при включении на 30 кВт, в 3,5 раза. Вероятно, при 20 кВт лучше выполняются условия резонанса системы и колебательный RLC контур имеет более высокую добротность.



Рис. 8. Фрагменты MVD установки: два канала, независимо формирующих однополярные импульсы, которые при последующем наложении со сдвигом фазы на полпериода формируют на выходе синусоидальное ЭМ поле

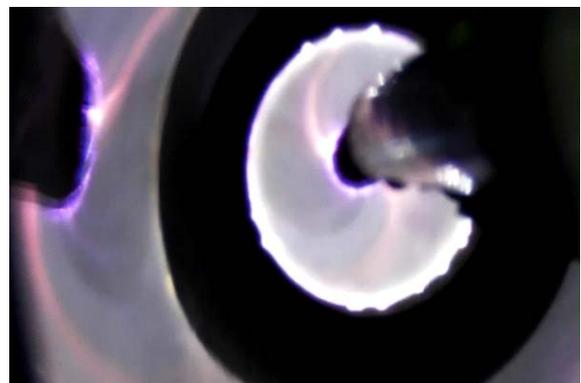


Рис. 9. Работа диполя MVD в воздухе (из видео), на границе появления ультрафиолетового излучения

Таким образом, из экспериментальных данных, полученных на установке (рис. 8, 9) видно, что в системе образуется положительный прирост мощности, которая выделяется на нагрузке. При включении двух параллельных блоков прирост мощности удваивается ($20 \cdot 2 = 40\%$; $13,3 \cdot 2 = 26,6\%$; $10,6 \cdot 2 = 21,2\%$).

При таких условиях выделяющейся мощности с резонансным возбуждением на ультрасверхвысоких частотах без дополнительных затрат мощности достаточно на производство водорода электролитическим способом из воды (в электролизере или же топливном элементе). Можно использовать установку в качестве генератора энергии и в том числе для получения водорода.

Заключение

Перед нашей исследовательской группой стояла задача создания установки для получения электромагнитной энергии способом электромагнитного взаимодействия частиц и волн, в атмосфере воздуха и без радиоактивного излучения. Поставленная задача выполнена как в виде теоретических рассмотрений, так и виде экспериментов.

Установка MVD была разработана на основе классических теоретических подходов, расчетов, симуляции и моделирования процессов, оптимизации результатов, и только потом выполнена разработка КД и создание уникальных узлов установки. Уникальность ее состоит в создании такой системы, которая использует одновременно целый ряд природных механизмов индукции, аккумуляции, ускорения, фокусировки и излучения электромагнитной энергии, сопровождающиеся фазовыми переходами из одного вида энергии в другой. Система не содержит магнетрона, не требует создания вакуума, при работе не возникает радиоактивного излучения.

Рабочим телом системы являются заряженные частицы воздуха – плазмоид или Петля тока, с непрерывным удержанием плазмы любое длительное время. Частицы рассматриваются как «ротор». Вокруг плазмоида возбуждается волна с круговой поляризацией, образованная движущимися и прецессирующими заряженными частицами в наложенных скрещенных электрическом и магнитном по-

лях. Волну можно рассматривать как «статор». Параметры «ротора» и «статора» согласованы, и представляют собой генератор энергии с высоким КПД в условиях резонанса. Процессы могут идти в твердом теле, в жидкой или газообразной среде. Во всех средах работают резонансные преобразовательные механизмы MVD.

Что можно сделать с помощью MVD:

1. Эффективное получение полезных материалов из промышленных отходов;
2. Исследование процессов взаимодействия вещества с электромагнитным полем в холодной конденсированной плазме;
3. Получение электроэнергии;
4. Получение водорода методом электролиза за счет энергии MVD.

Технический прогресс формирует повышение спроса на цветные, редкие, редкоземельные и благородные металлы, большое внимание уделяется проблемам утилизации техногенных образований горнорудных предприятий. К таким техногенным отходам относятся хвосты флотации, которые не требуют затрат на разведку, добычу, транспортировку и дорогостоящее измельчение. Особое внимание необходимо обратить на возможность использования MVD для комплексного извлечения всех полезных компонент такого сырья.

В каждом конкретном случае расчеты прибыли и экономической целесообразности, энергозатрат, окупаемости и рентабельности надо оценивать, исходя из состава сырья-отходов: чем в составе больше металлов, железа, тем выгоднее их будет перерабатывать. Например, золото, которое находится в сульфидной руде в ассоциации с сульфидом железа, по традиционной технологии кучного выщелачивания и цианирования извлекается 42–47%. По технологии с использованием MVD достигается повышение извлекаемости до 85% (по данным ЦНИЛ НГМК [8]). Эффективно разрушается титан и железо содержащий минерал ильменит, вплоть до восстановления и коагуляции металлов в спеке. Золошлаки, отходы ТЭС, могут полностью быть разделены на фракции с получением ряда ценных промышленных продуктов: концентрат металлов, в том числе редкоземельных, сульфат железа, жидкое стекло, технический кремний, кремнезем, глинозем, алунд, карборунд и др. В основе способов из-

влечения с MVD лежит эффективное резонансное поглощение на высоких резонансных частотах, при котором возникают явления эффективного разрушения кристаллической решетки минералов, намагничивания и др. с высоким КПД, близким к 90 % и более.

Аккумуляция и выделение энергии в плазменных процессах требует отдельного исследования. Эти процессы в настоящее время глубоко не изучены. Отдельным вопросом в этой связи является передача энергии из одной фазы (электрической, магнитной, сильного ядерных и слабого взаимодействий, кинетической, гравитационной) в другую. Также интересно исследовать переход энергии между высокочастотными и низкочастотными электромагнитными колебаниями, которые, как показывают эксперименты, подпитывают друг друга в процессе резонанса. И. Е. Тамм говорил: «я рад, что за свою жизнь познакомился с 15 видами энергии. Остальное человечество познает в дальнейшем». Возможно, эксперименты с MVD – путь к познанию новых неизвестных ранее видов энергии и их превращений.

Можно сформировать процесс для генерации электричества или для получения водорода способом электролиза воды. Если получить заданное количество энергии, необходимое для получения водорода, последнее будет происходить по заданной схеме в уже разработанных электролизных ячейках, например при повышении тока в 10 раз в нижних плазменных камерах, что составляет 2–3 килоампера.

Метод MVD генерации это получение электроэнергии за счет ионизации частиц с использованием баланса процессов поглощения и излучения электромагнитной энергии. При этом часть энергии используется для поддержания работы системы и электромагнитных преобразований, другая часть может быть выделена в качестве полезной мощности для использования.

В общепринятой практике создание промышленных термоядерных установок считается рентабельным при коэффициенте $Q \sim 22$ %. В нашей установке получены экспериментальные результаты увеличения мощности: $Q = 40$ %, что превышает все известные на сегодняшний день способы. Исследования

продолжаются, т. к. диапазон направлений исследования заложен уникальностью исследуемых закономерностей, например, для физики низких и высоких энергий, электродинамики, физики твердого тела, синтеза новых элементов, и новых механизмов производства водорода и электрической энергии.

Установка может быть использована для работ во многих фундаментальных и прикладных направлениях исследований. Все приведенные результаты подтверждены в экспериментах с использованием различных материалов в качестве топлива, ряд прикладных технологий запатентованы. Четырнадцать патентов поддержаны на международном уровне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колесник В. Г., Урусова Е. В., Басова Е. С., Ким Ю. С., Урусов М. В., Сим С. В., Урусов Е. В., Ким Д. Б. Способ генерации энергии компенсированного заряда. Патент на изобретение № IAP 06510 (РУз). 2021.
2. Колесник В. Г., Соловьёв М. И., Гулямов У. Г. Устройство для дозирования и управления заряженными частицами высоких энергий. ОИПОТЗ № 44. Авторское свидетельство СССР № 405186. 1973.
3. Колесник В. Г. Дозировка заряженных частиц высоких энергий на пузырьковые камеры: Дисс. канд. техн. наук. – Дубна, ОИЯИ, 1975.
4. Колесник В. Г., Водопьянов Ф. А. и др. Высоковольтный ускоритель электронов прямого действия СИЛУЭТ. Труды РТИ АН СССР, № 42. – Москва, 1982. С.33–42.
5. Колесник В. Г. и др. Ускорители прямого действия и СВЧ генераторы на их основе. – Ташкент: ФАН, 1990.
6. Колесник В. Г., Урусова Е. В. Способ преобразования энергии и устройство для его осуществления. Патент на изобретение № IAP 02184 (РУз). 2002.
7. Колесник В. Г., Урусова Е. В. и др. Способ получения ядерной энергии. Патент на изобретение № IAP 03701 (РУз). 2008.
8. Колесник В. Г., Урусова Е. В., Хван А. Б. и др. / Горный вестник Узбекистана. 2002. № 2. С.56–60.
9. Колесник В. Г., Урусова Е. В. Устройство для комплексного вскрытия и изменения структуры сырья с элементами металлов. Патент на изобретение № IAP 02287 (РУз). 2003.
10. Колесник В. Г., Басова Е. С., Урусова Е. В., Юлдашев Б. С. / Цветные металлы. 2003. № 2. С.16–18.
11. Колесник В. Г., Урусова Е. В., Басова Е. С. и др. Способ восстановления кремния и титана путем генерации ЭМ взаимодействий частиц SiO_2 , FeTiO_3 и магнитных волн. Патент на изобретение № 2561081 (РФ). 2015.

12. Колесник В. Г., Урусова Е. В., Басова Е. С. и др. / Узбекский Физический Журнал. 2013. Т. 15. № 1–2. С. 101–111.
13. Полак Л. С., Синярев Г. Б., Словецкий Д. И. и др. Химия плазмы. – АН СССР, Сиб. отделение, Институт теплофизики. 1991. Т. 3. С.324.
14. Колесник В. Г., Вербицкий И. Л., Коваленко А. Д. Сообщения ОИЯИ, Р9-90-371. – Дубна, 1990.
15. Колесник В. Г., Урусова Е. В. Электронный прибор преобразования энергии. Авторское свидетельство. № 1819044 (СССР). 1990.
16. Kolesnik V. G., Urusova E. V., Basova E. S., Kim Y. S., Abu Shakra M. B., Sim S. V., Kim D. B. Method for obtaining silicon and titanium by generating electromagnetic interactions between SiO₂ and FeTiO₃ particles and magnetic waves. European Patent № 2698196. 2014.
17. Kolesnik V. G., Urusova E. V. et al. Method for obtaining silicon and titanium by generating electromagnetic interactions between SiO₂ and FeTiO₃ particles and magnetic waves. Patent of Ukraine № 107875. 2015.
18. Kolesnik V. G., Urusova E. V. et al. Method for obtaining silicon and titanium by generating electromagnetic interactions between SiO₂ and FeTiO₃ particles and magnetic waves. Patent of South Korea № 10-1622750. 2016.
19. Kolesnik V. G., Urusova E. V. et al. Method for obtaining silicon and titanium by generating electromagnetic interactions between SiO₂ and FeTiO₃ particles and magnetic waves. Patent of China № 1934636. 2016.
20. Колесник В. Г., Урусова Е. В., Басова Е. С. и др. Способ восстановления кремния и титана путем генерации ЭМ взаимодействий частиц SiO₂, FeTiO₃ и магнитных волн. Патент на изобретение № IAP 05421 (РУЗ). 2017.
21. Сликтер Чарльз. Основы теории магнитного резонанса – М.: Издательство «Мир», 1981.
22. Шавров В. Г., Щеглов В. И. Ферромагнитный резонанс в условиях ориентационного перехода. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018.
23. Арцимович Л. А., Сагдеев Р. З. Физика плазмы для физиков.– М.: Атомиздат, 1979.
24. Трубников Б. А. Теория плазмы: учебное пособие для вузов.– М.: Энергоатомиздат, 1996.
25. Васильева Р. В., Ерофеев А. В., Жуков Б. Г. и др. / ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 6. С.67–77.

PACS: 52.55.-s; 52.55.He; 84; 84.60.-h

Magnetic dipole is generator of electromagnetic energy

V. G. Kolesnik¹, E. V. Urusova¹, E. S. Basova¹, I. I. Sadykov¹, Yu. S. Kim²,
S. V. Sim², M. V. Urusov³ and E. V. Urusov⁴

¹Institute of Nuclear Physics Academy of Science
1 Khuroson st., Tashkent, Mirzo Uligbek, Ulugbek, 100214, Uzbekistan
E-mail: kolesnik.mvd@gmail.com

²Shindong Enercom Inc., South Korea, Seoul
1A Glinka st., Tashkent, Yakkasarai district, 100070, Uzbekistan

³Ryazan State Radio-technical University, Ryazan, Russia
59/1 Gagarina st., Ryazan, 390005, Russia

⁴Moscow Technology Institute, Russia
2 Izmailovsky Val, Moscow, 105318, Russia

Received 9.01.2024; revised 14.03.2024; accepted 28.03.2024

In the art interactions in cross magnetic and electrical fields applied on charged particles forming rotate current loop is distinguished in open resonant chamber in air atmosphere. Current loop is low temperature plasma consisting by air particles. Methods and engineering aspects for resonant pumping of magnetic and electrical energies into plasma, and possibility of electromagnetic energy generation are discussed. On the base of theoretical calculation and experiments Magnetic V dipole experimental setup was elaborated and manufactured. It can be used as in processes of hydrogen production, ore-preparation for

effective complex extraction of useful components from mineral raw material and industrial wastes, as for fundamental research in cool plasma processes field.

Keywords: magnetic dipole, cool plasma, phase energy transformation, resonant pumping, generation of energy, multi-mode modulation, current loop, electric, magnetic fields, particle grouping.

REFERENCES

1. Kolesnik V. G., Urusova E. V., Basova E. S., Kim Yu. S., Urusov M. V., Sim S. V., Urusov E. V. and Kim J. B. Sposob generatsii energii kompensirovannogo zaryada (Method of compensated charge energy generation). Patent on invention № IAP 06510 (Uzbekistan Republic). 2021.
2. Kolesnik V. G., Solov'ev M. I. and Gulyamov U. G. Ustroystvo dlya dozirovki i upravleniya zaryazhennymi chastitsami vysokikh energij. OIPOTZ № 44, Avtorskoye svidetel'stvo SSSR № 405186.1973.
3. Kolesnik V. G. Dozirovka zaryazhennykh chastits vysokikh energij na pusyr'kovyye kamery, dissertation of PhD in technic, Dubna, JINR, 1975.
4. Kolesnik V. G., Vodop'yanov F. A. et al. Vysokovol'tnyj uskoritel' elektronov pryamogo dejstviya SILUET. Trudy RTI AN SSSR, № 42, Moscow, 1982, pp. 33–42.
5. Kolesnik V. G. et al. Uskoriteli pryamogo dejstviya I SVCh generatory na ikh osnove, Tashkent, FAN, 1990.
6. Kolesnik V. G. and Urusova E. V. Sposob preobrazovaniya energii i ustrojstvo dlya yego osushchestvleniya. Patent on invention № IAP 02184 (Uzbekistan Republic). 2002.
7. Kolesnik V. G., Urusova E. V. et al. Method of nuclear energy production. Patent on invention № IAP 03701 (Uzbekistan Republic). 2008.
8. Kolesnik V. G., Urusova E. V., Khvan A. B. et al., Gornyj vestnik Uzbekistana, № 2, 56–60 (2002).
9. Kolesnik V. G. and Urusova E. V. Ustrojstvo dlya kompleksnogo vskrytiya i izmeneniya struktury syr'ya s elementami metallov. Patent on invention № IAP 02287 (Uzbekistan Republic). 2003.
10. Kolesnik V. G., Basova E. S., Urusova E. V. and Yuldashev B. S., Color metals, № 2, 16–18 (2003).
11. Kolesnik V. G., Urusova E. V., Basova E. S. et al. Sposob vosstanovleniya kremniya i titana putem generatsii elektromagnitnykh vzaimodejstvij chasits SiO₂, FeTiO₃ i magnitnykh voln (Method for obtaining silicon and titanium by generating electromagnetic interactions between SiO₂, and FeTiO₃ particles and magnetic waves). Patent on invention № 2561081 (Russian Federation). 2015.
12. Kolesnik V. G., Urusova E. V., Basova E. S. et al., Uzbekskij Fizicheskij Zhurnal **15**(1–2), 101–111 (2013).
13. Polak L. S., Sinyarev G. B., Slovetskij D. I. et al. Khimiya plasmy (Plasma chemistry), AN SSSR. Sibirskoye otdeleniye, Institut teplofiziki **3**, 324 (1991).
14. Kolesnik V. G., Verbitskij I. L. and Kovalenko A. D., Soobshzheniya OIYaI (JINR Reports), P9-90-371, Dubna, 1990.
15. Kolesnik V. G. and Urusova E. V. Elektronnyj pribor preobrazovaniya energii. Avtorskoye svidetel'stvo SSSR № 1819044. 1990.
16. Kolesnik V. G., Urusova E. V., Basova E. S., Kim Y. S., AbuShakra M. B., Sim S. V. and Kim D. B. Method for obtaining silicon and titanium by generating electromagnetic interactions between SiO₂ and FeTiO₃ particles and magnetic waves. European Patent №2698196. 2014.
17. Kolesnik V. G., Urusova E. V. et al. Method for obtaining silicon and titanium by generating electromagnetic interactions between SiO₂ and FeTiO₃ particles and magnetic waves. Patent of Ukraine № 107875. 2015.
18. Kolesnik V. G., Urusova E. V. et al. Method for obtaining silicon and titanium by generating electromagnetic interactions between SiO₂ and FeTiO₃ particles and magnetic waves. Patent of South Korea № 10-1622750. 2016.
19. Kolesnik V. G., Urusova E. V. et al. Method for obtaining silicon and titanium by generating electromagnetic interactions between SiO₂ and FeTiO₃ particles and magnetic waves. Patent of China № 1934636. 2016.
20. Kolesnik V. G., Urusova E. V., Basova E. S. et al. Sposob vosstanovleniya kremniya i titana putem generatsii elektromagnitnykh vzaimodejstvij chasits SiO₂, FeTiO₃ i magnitnykh voln (Method for obtaining silicon and titanium by generating electromagnetic interactions between SiO₂, and FeTiO₃ particles and magnetic waves). Patent on invention № IAP 05421 (Uzbekistan republic). 2017.
21. Sliker Charles. Fundamentals of the theory of magnetic resonance, Translation, second edition, ed. G. V. Skrotsky, Moscow, Izdatel'stvo "Mir" (Publishing house "Mir"). 1981.
22. Shavrov V. G. and Shzheglov V. I., Ferromagnitnyj rezonans v usloviyakh orientatsionnogo perekhoda (Ferromagnetic resonance under conditions of orientational transition), Moscow, FIZMATLIT, 2018.
23. Artsimovich L. A. and Sagdeev R. Z., Fizika plasmy dlya fizikov (Plasma physics for physicists), Moscow, Atomizdat, 1979.
24. Trubnikov B. A., Teoriya plasmy (Plasma theory). Uchebnoye posobiye dlya vuzov, Moscow, Energoatomizdat, 1996.
25. Vasil'eva R. V., Yerofeev A. V., Zhukov B. G. et al., ZhTF **79**(6), 67–77 (2009).