

ОСОБЕННОСТИ УСКОРЕНИЯ И НАГРЕВА ЭЛЕКТРОНОВ В ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОМ РАЗРЯДЕ

*О.Ф. Ковник, Е.А. Корнилов, Н.С. Педенко, И.Ф. Харченко
ННЦ ХФТИ, г.Харьков, Академическая ул., 1, 61108, Украина
kornilov@kipt.kharkov.ua.*

Приведены результаты исследования ускорения (до 80 кэВ) части электронов плазмы (до 10%), и нагрева электронов и ионов основной компоненты плазмы в пучково-плазменном разряде, в условиях $\omega_{pe} > \omega_{H0}$, $n_b/n_{pe} \sim 5 \cdot 10^{-3}$, электронным пучком (с энергией 5 кэВ, ток до 100 мА) в магнитном поле до 0.2 Тл с плотностью плазмы $n_{pe} \sim 10^{11}$ эл/см³. Определена область локализации ускоренных электронов по рентгеновскому излучению из пучково-плазменного разряда. Показано, что большая часть ускоренных электронов движется навстречу пучку. Приведена диаграмма направленности движения высокоэнергетичных электронов в ППР, движущихся навстречу пучку. Исследовано распределение амплитуды возбуждаемых высокочастотных колебаний вдоль высокочастотных колебаний движения пучка. Показано, что область локализации высокоэнергетичных электронов 'привязана' к максимальной амплитуде возбуждаемых колебаний. Определена временная корреляция электронной температуры и плотности плазмы (n_{pe}). Изучена корреляция между амплитудой высокочастотных и низкочастотных колебаний, плотностью и температуры электронов плазмы в пучково-плазменном разряде

Пучково-плазменный разряд (ППР) открыт давно [1-8], однако, до настоящего времени не существует замкнутой модели описания этого явления в виду сложных физических процессов протекающих в нем. Экспериментально установлено, что возникновение ППР в магнитном поле обусловлено доионизацией газа плазменными электронами, ускоренными в поле высокочастотных колебаний (СВЧ) колебаний, возбуждаемых пучком в плазме. Трудность создания модели состоит в том, что, процессы, протекающие в ППР, обусловлены взаимосвязанными нелинейными явлениями в пучке и плазме, при возбуждении колебаний "большой" амплитуды. Эти процессы маскируют детальный сценарий развития и поддержания разряда. При математическом моделировании ППР не удается связать воедино возбуждение колебаний с ускорением электронов, ионизацией ими плазмообразующего газа и динамически изменяющиеся в пространстве и времени параметры пучка и плазмы. Сложность, при этом, представляет необходимость учета плотного спектра различных типов собственных волн, мод СВЧ колебаний плазменного волновода, с которыми может взаимодействовать пучок, и к тому же, и их стохастический характер [8]. Определенный прогресс в описании ППР достигнут в работах, развивающих теорию мощных пучково-плазменных СВЧ генераторов [9-11]. В этих работах впервые определен вклад пондеромоторных сил, возбуждаемых электронно-плазменных мод СВЧ колебаний в возбуждение низкочастотных (НЧ) ионных колебаний, и поддержание разряда. Результаты этих работ находят подтверждение в экспериментальных исследованиях [9-10]. Для создания теории ППР необходимо дальнейшее развитие экспериментальных исследований, позволяющих выявить каскады

причинно связанных явлений и роль в них СВЧ электронных и ионных колебаний плазмы. В представляемом сообщении не рассматривается начальная стадии разряда, образование плотности плазмы больше чем плотность пучка. Она достаточно полно исследовалась в работе [14]. Данные исследования выполнены в условиях "установившегося" разряда.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований одной из разновидностей ППР в магнитном поле, в котором образуется плазма с плотностью на два-три порядка выше плотности пучка ($n_b/n_{pe} \sim \omega_{be} / \omega_{pe} \sim 10^{-3}$), а ее диаметр (n_{pe}) более чем на порядок превосходит его диаметр, при этом электронно-плазменная частота (ω_{pe}), больше электронно-циклотронной (ω_{H0}), $\omega_{pe} > \omega_{H0}$. Как показано нами в [1, 2], в плазме ППР, при определенных условиях, наблюдаются электроны с энергией в 4-20 раз большей энергии инжектируемого пучка (5 кэВ). Ускорение электронов до энергии 20...80 кэВ в ППР до настоящего времени не находит исчерпывающего объяснения. В данном сообщении, приводятся дополнительные данные о связи основных характеристик плазмы, таких как плотность, температура электронов и ионов; энергия ускоренных электронов, ее взаимосвязь с возбуждаемым пучком колебаниями.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И ДИАГНОСТИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальные исследования проведены на установке, используемой в работах [1,2,12,13] Схема эксперимента и диагностик измерений представлена на рис.1

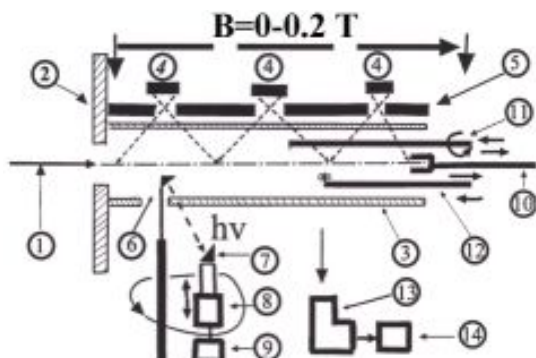


Рис 1. Схематическое изображение установки и диагностики измерений

Электронный пучок (1) (энергия 1...5 кэВ, ток 20...80 мА, диаметр 0,5 см) инжектировался в стеклянную трубу (3) (диаметр 10 см, длина 40 см), являющейся камерой взаимодействия пучка с плазмой, размещаемую в однородном магнитном поле напряженностью до 0.2 Тл. Пушка установлена в камере, из которой пучок через фланец (2) из мягкого железа инжектировался в камеру взаимодействия. В камере поддерживалось давление 10^{-3} Па, при изменении давление в области взаимодействия (3) в пределах 10^{-2} ...0.13 Па (плазмообразующие газы Н, Не, N₂, Аг). Ток пучка измерялся подвижным вдоль области взаимодействия коллектором, перекрывающим ее внутреннее сечение (10). В экспериментах для измерения плотности и температуры плазмы использовались как подвижные вдоль и перпендикулярно магнитному полю зонды Ленгмюра (11,12), так и оптический метод (13,14) [12,13]. Регистрация амплитуды, возбуждаемых пучком СВЧ колебаний в плазме, осуществлялась закрытыми и открытыми дипольными зондами-антеннами. Их спектр исследовался панорамными анализаторами спектра и резонансными волномерами. Энергетический спектр ионов плазмы ППР исследовался электростатическими анализаторами.

Главной целью излагаемых экспериментов являлось изучение корреляции между появлением быстрых электронов в ППР и возбуждаемыми пучком колебаниями. Эту информацию можно получить на основании анализа интенсивности рентгеновского излучения. Для этого вдоль камеры взаимодействия пучка с плазмой размещались несколько камер-обскур (4). Рентгеновское излучение выводилось из области взаимодействия, через окна в стеклянной трубе (3), затянутые пленкой из майлара толщиной несколько микрон, и регистрировалось на фото пленке высокой чувствительности в кассетах из свинца (4). Рентгеновское излучение в кассету вводилось через светонепроницаемую алюминиевую фольгу. Одновременное экспонирование пленок в кассетах и проявление в одинаковых условиях позволяло получить изображение источника рентгеновского излучения, а степень почернения-пространственное распределение интенсивности. Исследовалась изотропность скоростей высокоэнергетических

электронов ППР. Для этого регистрировалось излучение с зонда-мишени (6), изготовленной из материала с большим атомным номером (W, Рu), погруженного в плазму. В зонде плоской мишени диаметром 3mm была открыта одна сторона, вторая закрывалась фторопластом. Плотность вольфрама, примерно, в девять раз больше плотности фторопласта. По этому, интенсивность тормозного излучения, при падении электрона на фторопласт должна быть в девять раз меньше, чем при падении на пластину вольфрама. Под углом 45° к открытой плоскости мишени размещался сцинтилятор-кристалл CsJ (7). Зонд вместе со сцинтилятором мог вращаться вокруг своей оси (6, 7, 8) Система регистрации рентгеновского излучения (6, 7, 8, 9) имела "порог" чувствительности по энергии 10 KeV.

РЕЗУЛЬТАТИ ИССЛЕДОВАНИЙ

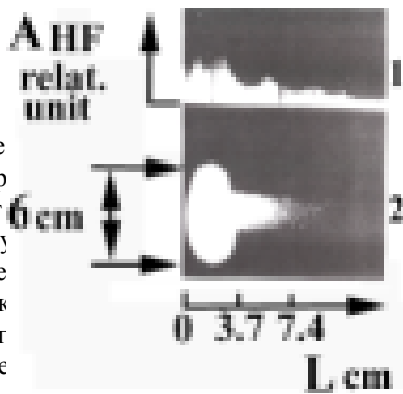
Одной из особенностей ППР, при выходе в "установившийся" режим "горения", является смена знака тока, принимаемого коллектором электронного пучка (10) [15]. Коллектор регистрирует ионный ток J^+ по величине в 2-3 раза больший инжектируемого пучка в камеру взаимодействия J_b . Можно было полагать, что этот эффект обусловлен исключительно установлением положительного потенциала плазмы, вблизи коллектора, при наличии вторичной эмиссии с его поверхности. Однако, измерения тока на изолированный фланец, через который вводится пучок в камеру взаимодействия (с противоположной стороны от коллектора), при "развитом" разряде, указывают на осаждение на его поверхность электронов J^- . Сумма токов осаждающихся на эти электроды в точности равна инжектируемому току пучка.

$$J_b + J^- + J^+ = J_b \quad (1)$$

где $J^+ = (3 \div 4) J_b$.

Для выяснения знака токов движущихся зарядов вдоль области взаимодействия использовался зонд с плоскими миниатюрными электродами. Зонд представлял собой две параллельно расположенные пластины в виде дисков диаметром 5 mm. Диски изолировались друг от друга. Плоскости дисков ориентировались строго перпендикулярно направлению магнитного поля. Электроды зонда, при погружении в плазму, могли принимать потоки частиц только на одну открытую поверхность диска. При перемещении зонда вдоль области взаимодействия, было установлена следующая закономерность. При удалении зонда от коллектора, диск, обращенный на встречу пучку, фиксирует положительный ток. На расстояниях до 10-15 см, от места входа пучка в камеру взаимодействия, на диске, обращенном к коллектору, появляется отрицательный ток. Причем, погружение зонда по радиусу в этом месте на глубину 1,5 см приводило к "гашению" разряда. Это позволяет считать, что токоприемный коллектор (10) принимает незакомненсированный поток ионов. Плазма ППР, в области взаимодействия, является генератором потоков заряженных частиц. Плазма разделяется на две области. В первой, прилежащей к электронной

пушке электр лежит камеру. Изме коллек достиг распре пучка, с энергией 1000 eV . Там же измерения и оценки энергии ионов, из соотношений (1) дают близкие, совпадающие значения. Следует отметить, что скорость ионов равна скорости продольных ионно-звуковых колебаний ($v_{\text{ион}} \approx v_{\text{ионно-звуковая}}$), где $\gamma=3$ постоянная адиабаты для электронов плазмы, k - постоянная Больцмана, T_e - температура, электронов, M - масса ионов плазмы. Исследования показали так же, что раздел указанных областей в ППР приходится на участок ПП взаимодействия, где амплитуда возбуждаемых СВЧ колебаний резко уменьшается. Максимум СВЧ колебаний лежит в области прилегающей к фланцу, через который пучок входит в область взаимодействия. В этой же области регистрируется и рентгеновское излучение из плазмы. На рис.2 представлено распределение амплитуды излучаемых из плазмы СВЧ колебаний на частоте $f=4,3\text{ ГГц}$ по длине области взаимодействия (1) и фотография рентгеновского излучения (2) из ППР.



диаметром 3 см . Если предположить, что электроны пропорционально уменьшаются по длине шлейфа, то можно предположить, что электроны испытывают неупругие соударения на малых расстояниях, теряя свою энергию на ионизацию газа. Энергия электронов, по спектральным оценкам рентгеновского излучения, лежит в области десятков KeV. Сечение ионизации, для таких электронов, невелико. На длине "шлейфа" они не могут разменять свою энергию за счет парных соударений. Это дает основание предположить, что электроны испытывают сильное рассеяние на возбуждаемых СВЧ полях в плазме, совершая при этом сложные движения, в результате чего их реальный пробег между соударениями оказывается большим. К тому же, существование стационарно пространственно выделенной области рентгеновского излучения, обусловлено торможением на нейтральных атомах плазмообразующего газа, указывает на наличие "длительного" удержания электронов в выделенном пространстве. В радиальном направлении, относительно пучка, электроны удерживаются магнитным полем. Движение же в продольном направлении может быть ограничено только за счет наличия эффективных тормозящих сил.

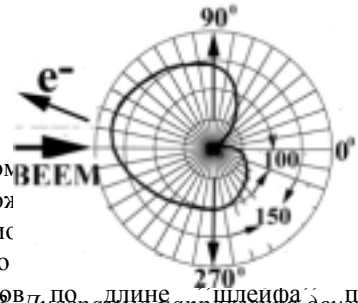


Рис.3. Диаграмма направления движения ускоренных электронов. Кривая изменения интенсивности рентгеновского излучения $0-150$ от. Энергия электронов, по спектральным оценкам рентгеновского излучения, лежит в области десятков KeV. Сечение ионизации, для таких электронов, невелико. На длине "шлейфа" они не могут разменять свою энергию за счет парных соударений. Это дает основание предположить, что электроны испытывают сильное рассеяние на возбуждаемых СВЧ полях в плазме, совершая при этом сложные движения, в результате чего их реальный пробег между соударениями оказывается большим. К тому же, существование стационарно пространственно выделенной области рентгеновского излучения, обусловлено торможением на нейтральных атомах плазмообразующего газа, указывает на наличие "длительного" удержания электронов в выделенном пространстве. В радиальном направлении, относительно пучка, электроны удерживаются магнитным полем. Движение же в продольном направлении может быть ограничено только за счет наличия эффективных тормозящих сил.

При погружении зонда-мишени в область плазмы, где наблюдается рентгеновское излучение, и при вращении его вокруг оси удалось установить, что электроны движутся под углом к силовым магнитным линиям и, к тому же, имеют большую продольную составляющую скорости. На рис.3 представлена зависимость изменения интенсивности рентгеновского излучения, при изменении угла поворота воль оси вольфрамовой мишени.

Колебания принимались остеклованной антенной-диполем длиной $0,3\text{ см}$, ориентированной по ее радиусу, на удалении $3,5\text{ см}$ от оси ППР. Как видно, из рис.2, ускоренные электроны сосредоточены в области сфероида симметричного относительно оси ППР, имеющего размер по радиусу $\sim 6\text{ см}$ и вдоль оси симметрии длиной $\sim 3,5\text{ см}$. (что составляет $3 \dots 5$ длин возбуждаемых СВЧ волн). От него тянется "шлейф" быстрых электронов в виде цилиндра

Ка
к уже указывалось выше, внесение зонда в глубь области, содержащей ускоренные электроны, вызывает "гашение" разряда. Приведенная диаграмма (рис.3) получена для зонда, расположенного на расстоянии 3 см от оси сфероида, где его влияние на разряд минимально. В начальном положении пластина

зонда ориентирована в плоскости а открытая поверхность часовая стрелка

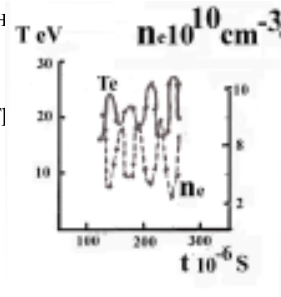


Рис.4. Зависимость температуры и плотности плазмы от времени

максимальная интенсивность рентгеновского излучения фиксируется для угла поворота 165° . Излучение под таким углом может формироваться только электронами движущимися в направлении противоположном движению электронного пучка.

Как было установлено ранее, при задании на электронный пучок внешнее возмущение в виде СВЧ модуляции по скорости на электронно-плазменной частоте (ω_{pe}) и, в тоже время, равной удвоенной электронно-циклотронной частоте ($\omega_m = \omega_{pe} = 2\omega_{He}$), отдельная группа электронов плазмы приобретает энергию большую энергии электронного пучка [1,2]. Появление ускоренных электронов до высокой энергии, при отсутствии внешней модуляции, как правило, сопровождается возбуждением колебаний на двух частотах f_1, f_2 . [14]. Их возбуждение чередуется во времени с полу периодом ионно-звуковых колебаний. Для одной из частот выполняется вышеуказанный резонанс, т.е. $\omega_{pe} = 2\omega_{He}$. Так, в условиях регистрации диаграммы, представленной на рис 2 в спектре возбуждаемых СВЧ колебаний фиксируются два максимума на частотах $f_1 = 4,9$ ГГц и $f_2 = 7,5$ ГГц. Отмеченные частоты соответствуют электронно-плазменным частотам (ω_{p1}), при плотности плазмы $n_1 \sim 2,8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и (ω_{p2}), $n_2 \sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Амплитуда второго максимума ($\omega_{p2} = 2\pi \cdot 7,5$ ГГц) в пять раз меньше первого, а его частота в три раза больше электронно-циклотронной ($\omega_{p2} = 3\omega_{He}$). Оказалось, что температура и плотность электронов плазмы ППР, во второй пространственной области взаимодействия, (границащей с токоприемным коллектором пучка (где наблюдается ионный ток на плоский зонд), изменяется с такой же периодичностью, как и период изменения частоты f_1, f_2 во времени (рис 4). Причем, между параметрами плазмы и амплитудой СВЧ колебаний наблюдается корреляция. При возбуждении колебаний с резонансной частотой $f_1 = 4,9$ ГГц отмечается максимальное значение температуры электронов. Максимум же амплитуды с частотой $f_2 = 7,5$ ГГц соответствует максимальному значению плотности и минимальному значению температуры электронов плазмы. Т.е., при выполнении резонанса $\omega_e = \omega_p = 2\omega_{He}$ электроны плазмы в поле СВЧ волны приобретают энергию и ионизуют газ. Возрастает плотность плазмы и, вместе с этим, происходит отстройка от резонанса

$\omega_{pe} = 2\omega_{He}$ Электроны перестают набирать энергию. Плазма из локализованной области существования ускоренных электронов вытекает к коллектору. Понижение плотности плазмы восстанавливает резонанс, а вместе с этим, восстанавливаются и условия для ускорения электронов плазмы. После чего, становится возможной доионизация газа электронами, сопровождающаяся ростом плотности плазмы в ППР. На рис.4 приведена зависимость изменения температуры электронов и плотности плазмы в ППР.

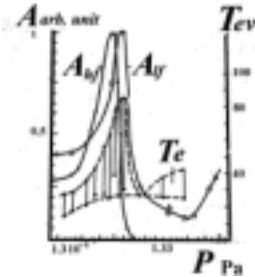


Рис.5. Зависимость амплитуды СВЧ (A_{hf}) и НЧ (A_{lf}) колебаний (относительные единицы) от давления в Pa

Далее процесс циклически повторяется. С увеличением тока пучка растет температура электронов плазмы, а, указанная, связь плотность - температура - частота - амплитуда колебаний повторяется через уменьшающиеся, хаотически изменяющиеся интервалы времени. При этом растет амплитуда НЧ колебаний в плазме. Из регулярных колебаний они превращаются в стохастические. Расширяется и их спектр. Увеличивается глубина модуляции температуры. Максимальное, же ее значение, достигается при максимальной амплитуде НЧ колебаний. Амплитуда СВЧ электронно-плазменных колебаний (ω_{pe}), при этом, резко уменьшается. Вместе с тем, потери энергии пучком остаются высокими, что свидетельствует о большом декременте их затухания. Та же зависимость температура электронов плазмы - амплитуда СВЧ колебаний отмечается и при изменении давления газа. Она представлена на рис.5. На рисунке вертикальными линиями отмечены значения температур, в пределах которых они изменяются во времени, при фиксированном давлении плазмообразующего газа в области взаимодействия.

ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Плазменно-пучковый разряд имеет высокую температуру электронов в условиях, когда частота возбуждаемых пучком колебаний одновременно равна электронно-плазменной и удвоенной электронно-циклотронной ($\omega = \omega_{pe} = 2\omega_{He}$). Этот резонанс разрушается с периодом НЧ колебаний (ионный звук), при возрастании плотности плазмы.

2. Как показывает экспериментальные исследования, максимум возбуждаемых СВЧ колебаний сосредоточен на входе пучка в плазму. Наблюдаемое накопление энергии колебаний на

входе в область взаимодействия обусловлено, по всей вероятности, нелинейным поведением плазмы, под действием возбуждаемых СВЧ колебаний. Косвенным подтверждением этому служит тот факт, что после "пробоя" плазмообразующего газа и "установления" разряда уменьшение длины взаимодействия пучка с плазмой, существенно не изменяет амплитуду СВЧ колебаний, на входе пучка в плазму до тех пор, пока коллектор не приближается к области с максимальной амплитудой СВЧ колебаний. К тому же введение зондов в плазму вне этой зоны существенно не влияет на его поддержание.

3. Основной вклад в ионизацию газа дают электроны, ускоренные в области пространства, где сконцентрирована энергия СВЧ волн. Плазма вытекает из этой области со скоростью ионно-звуковых волн. Неоднородность плазмы и нелинейное взаимодействие СВЧ и НЧ волн, возбуждаемых пучком, усиливает НЧ колебания, включая дрейфовые волны. Они обеспечивают аномальную диффузию плазмы поперек магнитного поля. В результате этого плазма занимает объем с радиусом много большим радиуса пучка. Максимальная температура электронов плазмы достигается в условиях возбуждения максимальной амплитуды НЧ колебаний. При этом СВЧ и НЧ колебания становятся нерегулярными. В результате этого электроны в поле ускоряющей волны имеют большую эффективную частоту соударений [17]. СВЧ колебания отдают большую часть своей энергии низкочастотным. В стохастических НЧ полях ускоряются и ионы плазмы].

4. В рамках существующих нелинейных теорий взаимодействия волн в плазме, развития турбулентности плазмы, в условиях возбуждения собственных плазменных СВЧ колебаний, трудно объяснить два наблюдаемых явления:

- существование стационарной пространственно ограниченной области плазмы, в которой возбуждаются плазменные колебания, и осуществляется ускорение электронов плазмы (процессы в этой области определяют в целом характеристики всего плазменного столба ППР);

- ускорение электронов плазмы в направлении противоположном движению электронного пучка, т.е. в направлении противоположном направлению фазовой скорости СВЧ волн, возбуждаемых пучком. Продольный размер указанной области ППР составляет $\sim 3 \dots 5$ длин СВЧ волн, возбуждаемых пучком. Можно было предположить, что под давлением СВЧ волн в плазме формируются каверны-резонаторы [18], в которых обеспечивается нагрев и ускорение электронов. Трансформация волн по спектру в область малых фазовых скоростей и частот обеспечивает ускорение "быстрых" ионов. Наблюдаемая цепочка взаимосвязанных явлений, в какой то мере, укладывается в схему формирования

сильной турбулентности в плазме [16-17]. Как показывает математическое моделирование [18], в условиях схлопывания каверн могут появляться электроны, движущиеся в противоположном направлении, относительно фазовой скорости возбуждаемых СВЧ волн, однако, их энергия не превышает энергию пучка, более чем в четыре раза. В эксперименте же, энергия группы ускоренных электронов превышает энергию пучка на порядок. Электроны, могли бы приобрести указанную энергию лишь в том случае, если в определенных местах они могли бы отразиться и за короткий интервал времени пройти в поле нескольких каверн-резонаторов в фазе, обеспечивающей непрерывное увеличение их энергии. Напряженность поля в локализованной области должна в этом случае превышать $1 \dots 5$ кВ/см, а электроны пучка должны сильно рассеиваться, приобретая поперечную составляющую скорости. В энергетическом спектре должны также присутствовать электроны с энергией большей энергии пучка. Схлопывание каверн, по видимому, не происходит, так как наличие ускоренных потоков ионов должно приводить к их рассасыванию.

То, что электронный пучок в ППР имеют сильно "размытую" функцию распределения электронов по продольным скоростям с наличием электронов, имеющих энергию большую энергии инжекции, отмечалось уже в первых экспериментах [1-2]. В работе [21] показано, что с возбуждением СВЧ колебаний имеет место увеличение перпендикулярной составляющей скорости у электронов пучка, относительно направления движения. Это обстоятельство приводит к тому, что механизм возбуждения колебаний меняется во времени, Черенковский сменяется Доплеровским. Тот факт, что в условиях эксперимента фиксируются резонансы с возбуждением гармоник электронно-циклотронной частоты ($2\omega_{He}$ и $3\omega_{He}$), дает основание предположить, что их появление возможно и обусловлено Доплеровским механизмом, как следствие рассеяния электронов на локализованных в пространстве областях большого электрического поля.

Существование локальной области, из которой ускоренные электроны и ионы движутся в противоположном направлении, может свидетельствовать и о формировании двойного слоя.

К тому же, появление в разряде быстрых ионов, может быть связано и с их ускорением в поле НЧ колебаний, возбуждаемых за счет нелинейного взаимодействия различных типов мод СВЧ колебаний. Управление спектром НЧ колебаний позволяет, как это следует из экспериментов [20] регулировать передачу энергии от пучка к ионам плазмы. Этот механизм ускорения ионов может проявляться при напряженности СВЧ полей меньше необходимой для появления каверн. Если учитывать

это и периодический характер изменения температуры, то наблюдаемые в эксперименте явления могут также найти объяснения и в рамках представления о развитии локальной неустойчивости, при взаимодействии типа волна - волна, волна – частица, рассматриваемой в работе [22].

5. Исследованные закономерности явлений в ППР позволяют понять возможности его использования для разработки ПП генератора СВЧ колебаний. В частности, полученные результаты показывают, что использовать возбуждаемые пучком колебания можно в том случае, если осуществлять преобразование колебаний в электромагнитные волны уже в области ввода пучка в плазму. Как нами было показано [18], это можно достичь путем введения участка продольной неоднородности магнитного поля, управления градиентами плотности плазмы и геометрическими размерами плазменного столба ППР разряда.

Все эти вопросы требуют дальнейшего исследования

Авторы признательны светлой памяти Е.В Лифшиц за оптические измерения и Я.Б. Файнбергу за поддержку исследований и обсуждение результатов, В.А. Буцу за обсуждение результатов.

ЛИТЕРАТУРА

- И.Ф. Харченко, Я.Б. Файнберг, Р.М. Николаев, Е.А. Корнилов, Е.И. Луценко, Н.С. Педенко. // *Ядерный синтез. Дополнение*; 1962, ч.3, с.1101; *ЖТФ*, 1961, т.31, №7, с.762.
- И.Ф. Харченко, Я.Б. Файнберг, Е.А. Корнилов, Р.М. Николаев, Е.И. Луценко, Н.С. Педенко // *Доклад на совещании по теоретической и прикладной гидродинамике*. Рига, 1960.
- L.D. Smulin, W.D. // *Getty. Phys. Rev. Lett.* 1963, p.9. *G. Appl. Phys.* 1963, v.3, p.3421.
- H. Hedval. // *G. Appl Phys.* 1962, v.33, 8, p.2426.
- G.E. Hopson. // *G. Appl. Phys.* 1963, v.34, p.2425.
- V. Piffel, M.Seidl, Sunka. I. Ulldshmiel. // *Thid Czhoelo. Conf.on. Electron and Vacuu. Phys. Transaction.* Praga. 1965.
- Р.А. Димирханов, А.К. Геворков, А.Ф. Попов, Г.А. Хоросанов. // *Конференция по исследованию физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза Калем*. 1965. Доклад CN 21/134.
- Е.А. Корнилов, Я.Б. Фаннберг, О.Ф. Ковпик. *Письма в редакцию ЖЭТФ*, 1964, т.4, № 4, с.147
- А.Н. Антонов, Ю.П. Блюх, О.Ф. Ковпик, Е.А. Корнилов, М.Г. Любарский, К.В. Матяш, В.О. Подобинский В.Г. Свиченский, Я.Б. Файнберг. // *Физика плазмы*, 2000, т.17, с.268.
- Ю.Блюх, М.Г. Любарский, Н.М. Землянский, В.И. Мирный, В.О. Подобинский, Г.В. Сотников, Я.Б. Файнберг. // *Физика плазмы*, 2003, т.29, с.336.
- Ю.П. Блюх, М.Г.Любарский, Я.Б. Файнберг, В.И. Подобинский. *ДАН Украины*, 2003, №6 .
- О.Ф. Ковпик, Е.А. Корнилов, Я.Б. Файнберг, И.Ф. Харченко // *ЖТФ*, 1965, т.35.№8, с.1372.
- Е.И. Лифшиц, Е.А. Корнилов. *Диагностика плазмы т. 11. Атомиздат. М.* 1968, с.416, // *Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза*. "Наукова думка". Киев 1971, с.169.
- О.Ф. Ковпик, Е.И. Лифшиц, Е.А. Корнилов. // *Физика плазмы и проблемы управляемого терм ядерного синтеза*, Киев,. "Наукова думка", 1971, с.161.
- О.Ф. Ковпик, Е.А. Корнилов, Я.Б. Файнберг, И.Ф. Харченко.//*Физика плазмы и проблемы управляемого терм ядерного синтеза*. Київ, 1963, "Наукова думка", В.4, с.45.
- О.Ф. Ковпик, Е.А. Корнилов, Я.Б. Файнберг, И.Ф. Харченко. // *ЖТФ*, 1965,т 35,№ 1, с.1348.
- Б.Б. Кадомцев. *Коллективные явления в плазме*. М: "Наука". Издательство ФМЛ, 1976.
- В.Н. Цытович. *Теория турбулентной плазмы* М: Атомиздат, 1971, с.320.
- Ю.С. Сигов. *Вычислительный эксперимент мост между прошлым и будущим физики плазмы*. Москва. Физматли. 2001, с.222.
- Е.А. Kornilov, О.Ф. Kovpik, S.M. Krivoruchko, Y.V. Fainberg // *Pasma Physics Report*, 1998. v.24, №116, p.1039.
- О.Ф. Ковпик, Е.А. Корнилов, С.М. Криворучко, С.С. Моисеев. Я.Б. Файнберг. // *Письма ЖЭТФ*, 1972, т.15, с.201.
- Е.Г. Шустин, В.П. Попович, И.Ф. Харченко. // *ЖЭТФ*, т.59, в.3(9), с.657.
- V.A. Buts, I.K. Kovalchuk, E.A. Kornilov, D.V. Tarasov. // *Вопросы атомной науки и техники*. Харьков, Изд. ННЦ ХФТИ, 2003. В печати.