

# ПРЯМОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА В СВЧ ИЗЛУЧЕНИЕ

*В.В.Рыбаков, А.П.Смахтин*

*Московский авиационный институт (Государственный технический университет)  
Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4,  
intdep@mai.ru*

Рассмотрена физическая модель прямого преобразования кинетической энергии плазменного потока при его торможении в поперечном магнитном поле в монохроматическое СВЧ-излучение. При этом СВЧ-излучение распространяется вдоль магнитных силовых линий и выполняется условие циклотронного резонанса. Рассматриваемое преобразование лежит в основе рабочего процесса плазменного электромагнитного генератора (ПЭМГ). На основе анализа дисперсионного соотношения в приближении кинематики волновых процессов определены условия возникновения и тип неустойчивости в ПЭМГ. Исследованы механизмы преобразования энергии в ПЭМГ и приведены оценки эффективности процесса.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Успехи в области генерации СВЧ-излучения в широком диапазоне частот служат хорошей основой для широкого применения энергии электромагнитного излучения в различных отраслях промышленности и в научных исследованиях. К этой группе задач, в основном, относятся процессы СВЧ-разогрева и приготовления пищи, сушки древесины, интенсификации процесса затвердевания бетона в строительстве, вулканизации резины, различных применений в медицине, СВЧ нагрева плазмы в установках термоядерного синтеза и т.д.

Для генерации СВЧ-излучения миллиметрового диапазона, который является весьма перспективным для решения упомянутых выше задач, используются различные схемы гиротронных и плазменно-пучковых СВЧ-приборов, преобразующих энергию электронного пучка в СВЧ-излучение. Данное обстоятельство накладывает определенные ограничения на величину выходной мощности СВЧ-генератора, его эффективность и ресурс работы. Кроме того, используемые при этом мощные источники электронов требуют сверхвысоких рабочих напряжений, что также вызывает определенные эксплуатационные трудности.

Одним из возможных путей решения указанных выше проблем, сопровождающих генерацию электромагнитного излучения коротковолновой части СВЧ-спектра, является использование прямого преобразования энергии плазменного потока в монохроматическое СВЧ-излучение при торможении плазмы в поперечном магнитном поле. Фактически речь идет о создании СВЧ-прибора, основанного на известном механизме магнитогидродинамического (МГД) преобразования энергии потока проводящей жидкости в поперечном магнитном поле в электрическую энергию. В отличие от известных схем МГД генераторов постоянного или переменного токов, работающих со слабо электропроводящими потоками в режиме интенсивных соударений электронов потока рабочего тела с ионами и атомами последнего, в рассматриваемой схеме плазменного электромагнитного генератора (ПЭМГ) необходимо реализовать бесстолкновительный коллективный режим

торможения плазменного потока в поперечном магнитном поле за счет возникающих в плазменном потоке самосогласованных индукционных продольных и поперечных электрических полей.

## 2. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЭМГ

Интенсивное СВЧ излучение, генерируемое плазменным потоком при взаимодействии с поперечным магнитным полем, было зафиксировано в экспериментах, результаты которых опубликованы в [1,2]. В работе [3] на основе анализа дисперсионных соотношений для поперечных электромагнитных колебаний, распространяющихся при выполнении условия циклотронного резонанса вдоль магнитного поля при торможении в нем плазменного потока, было найдено условие возникновения так называемой отрицательной СВЧ-проводимости плазменного потока или условие возбуждения СВЧ-колебаний.

Однако остается не вполне ясной физическая картина протекающих в плазменном потоке явлений и прежде всего вопросы динамики плазменного потока в поперечном магнитном поле при излучении плазмой СВЧ-волн; механизма торможения плазменного потока и преобразования части его кинетической энергии, т.е. в основном кинетической энергии тяжелых ионов в СВЧ-излучение; механизма группировки вращающихся электронов плазменного потока в магнитном поле под действием СВЧ-поля и т.д. Все эти взаимосвязанные вопросы рабочего процесса ПЭМГ составляют суть физической модели ПЭМГ, описанию которой посвящена данная работа.

Из многочисленных теоретических и экспериментальных работ, посвященных проблеме взаимодействия плазменных потоков с поперечным магнитным полем, следует вывод о том, что движение плазменного потока в этом случае представляет собой дрейф замагниченных электронов плазменного потока в скрещенных **E-B**-полях и движение с той же скоростью ионов поперек магнитных силовых линий, ибо они, как правило, при практически используемых величинах индукции магнитного поля **B** незамагничены и как бы не подвержены его влиянию. Электрическое поле **E** является поляризационным и имеет сложную трехмерную топографию.

Если выбрать декартовы координаты таким образом, что плазменный поток направлен вдоль оси  $X$  и линии индукции однородного поперечного магнитного поля  $\mathbf{B}$  направлены вдоль оси  $Z$ , то дрейф электронов обусловлен наличием поперечной составляющей поля электрической индукции  $E_y$ , возникающей вследствие поляризации плазменного потока. Не останавливаясь подробно на структуре поляризованного электрического поля  $\mathbf{E}$ , что будет подробно проанализировано в 3 разделе работы, отметим лишь, что оно имеет все три составляющие  $\mathbf{E} = E_x + E_y + E_z$ .

Основная идея создания ПЭМГ состоит в том, что в этом СВЧ-преобразователе энергии, с одной стороны, протекают процессы, схожие с рабочими процессами в МГД-преобразователях энергии, в которых при замыкании электродов магнитогидродинамического канала на нагрузку, во внешней цепи МГД-генератора и по плазменному потоку протекает поперечный постоянный или переменный ток  $\mathbf{J}_y$ , взаимодействие которого с магнитным полем  $\mathbf{B}$  порождает продольную тормозящую сила Ампера  $\mathbf{F}_x = [\mathbf{J}_y \cdot \mathbf{B}]$ . В ПЭМГ рабочий процесс должен быть организован протеканием по плазме СВЧ-токов, взаимодействующих с поперечным магнитным полем, и вследствие этого тормозящим плазменный поток. Это так называемая плазменная аналогия. С другой стороны, несомненно, что в ПЭМГ должны быть реализованы основные механизмы СВЧ-электроники, как принцип синхронизма и группировки вращающихся электронов в тормозящей фазе электрического поля волны. Что касается электронного СВЧ-прототипа ПЭМГ, то можно назвать такой преобразователь, как магнетрон на циклотронном резонансе. В этом случае роль катода играет отрицательный поляризованный заряд плазменного потока, а роль анода – положительный поляризованный заряд.

### 3. ВХОД ПЛАЗМЫ В ПОПЕРЕЧНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Описание процессов входа и движения плазмы в поперечном магнитном поле необходимо проводить в рамках двухжидкостной модели, с учетом того, что в большинстве рассматриваемых задач электроны замагничены, и их движение естественно описывать дрейфовым приближением, в то время как ионы замагничены и влиянием поперечного магнитного поля на их движение в первом приближении можно пренебречь. Как показывают результаты многочисленных теоретических и экспериментальных исследований, движение плазменного потока поперек магнитного поля происходит практически с постоянной скоростью, равной скорости плазменного потока до взаимодействия с магнитным полем. Этот вывод вытекает из анализа баланса энергии при движении плазмы поперек магнитного поля [ 4 ].

Рассмотрим следующую расчетную схему движения плазмы поперек магнитного: движение плазмы происходит вдоль оси  $X$ , поперечное магнитное поле направлено вдоль оси  $Z$ , т.е.  $\mathbf{B} = B_z$ .

При взаимодействии замагниченных электронов с поперечным магнитным полем на входе в него за время порядка периода циклотронного вращения

электроны преобразуют свою поступательную скорость во вращательную, тем самым как бы останавливаясь в направлении оси  $X$ . При этом тяжелые незамагниченные ионы продолжают свое движение вдоль оси  $X$ , опережая электроны плазменного потока. Это ведет к возникновению продольной поляризации плазменного потока с образованием продольного электрического поля  $E_x$ , направленного против движения потока. Возникшая продольная поляризация вместе с поперечным магнитным полем создает электрический дрейф электронов плазменного потока в положительном направлении оси  $Y$  со скоростью  $V_y = E_x/B_z$ , в результате чего создается поляризация плазменного потока в направлении оси  $Y$  и соответствующее электрическое поле  $E_y > 0$ . Совместное действие электрического поля поляризованного поля  $E_y$  и магнитного поля  $B_z$  вызывает дрейф электронов в положительном направлении оси  $X$  со скоростью  $V_x = E_y/B_z$ , что, собственно говоря, и позволяет электронам плазмы и всей плазме в целом продолжать двигаться с постоянной скоростью в направлении оси  $X$  поперек магнитного поля. Напряженность электрического поля поляризации  $E_x < 0$  в процессе входа плазмы в поперечное магнитное поле возрастает по модулю, что приводит к возникновению поляризованного дрейфа электронов в положительном направлении оси  $X$ . Возрастающее во времени электрическое поле  $E_y$  вызывает ускорение электронов вдоль оси  $X$ . Вследствие этого электроны догоняют ушедшие вперед по потоку ионы. В ходе этого процесса происходит уменьшение по абсолютной величине поля продольной поляризации плазменного потока  $E_x$ . Расчеты показывают, что в момент, когда электроны догоняют ионы, электрическое поле продольной поляризации  $E_x = 0$  и поступательная скорость электронов  $V_x$  в 2 раза превышает скорость ионов. В результате электроны начинают опережать ионы, создавая электрическое поле продольной поляризации  $E_x > 0$ , т. е. направленной по потоку. При этом направление электрического дрейфа электронов в направлении оси  $Y$  меняется на противоположное, и происходит снижение электрического поля поперечной поляризации плазменного потока  $E_y$ . Как следствие, происходит уменьшение продольной скорости движения электронов  $V_x = E_y/B_z$ , и их начинают догонять ионы. В момент, когда ионы догонят тормозимые электроны, поступательная скорость последних  $V_x=0$ . Далее описанный динамический процесс электронов и ионов плазменного потока повторяется, имея колебательный характер. Характерная круговая частота равна [5]:

$$\omega^2 = \omega_{oi}^2 [1 + \omega_{oe}^2 / \omega_{ve}^2],$$

где  $\omega_{oi}$  – ионная плазменная частота;  $\omega_{oe}$  – электронная плазменная частота;  $\omega_{ve}$  – электронная циклотронная частота.

### 4. МЕХАНИЗМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА В СВЧ ИЗЛУЧЕНИЕ

Как видно из предыдущего раздела, движение плазменного потока поперек магнитного поля

происходит с практически постоянной скоростью в режиме дрейфового течения. Процесс дрейфа плазмы в данном случае представляет собой комплексный процесс, состоящий из электрического, поляризационного и инерционного дрейфов, которые обусловлены взаимосвязанными электрическими полями продольной и поперечной поляризации плазменного потока в поперечном магнитном поле. Скорость плазменного потока в поперечном магнитном поле сохраняет свое постоянное значение все то время, пока отсутствует какое-либо внешнее воздействие на плазменный поток. Однако скорость плазмы может быть увеличена, если величина напряженности электрического поля поперечной поляризации потока увеличена в результате подвода электрической энергии к плазменному потоку от внешнего источника электрической энергии. Ситуация кардинально меняется, если подвод энергии от внешнего источника заменить отводом энергии от плазменного потока, как это наблюдается в случае МГДГ. В этом случае общая разность потенциалов в поперечном направлении относительно плазменного потока замыкается на внешнюю нагрузку, и скорость плазменного потока снижается, а энергия плазмы преобразуется в электрическую энергию. Этот процесс может быть осуществлен или в режиме постоянного тока, или в режиме переменного тока. Очевидно, что этот процесс преобразования энергии плазменного потока может быть реализован также и в режиме протекания по плазменному потоку СВЧ-токов с целью получения СВЧ-излучения при соблюдении соответствующих условий.

Как показано в работе [3], условием возникновения отрицательной СВЧ-проводимости плазменного потока в поперечном магнитном поле, позволяющем генерировать СВЧ-энергию, является достаточно интенсивное уменьшение скорости плазменного потока. Более детальное исследование типа возникающей неустойчивости было проведено авторами данной работы с использованием метода Стэррока на основе анализа кинематики волновых пакетов в плазме [5].

Анализ типа неустойчивости для поперечных электромагнитных волн, распространяющихся вдоль магнитного поля в ПЭМГ, показал, что возникающая неустойчивость носит конвективный характер при выполнении условия  $\partial V_x / \partial x + v_{ei} < 0$  ( $v_{ei}$  - частота электрон-ион соударений). Анализ дисперсионного соотношения был проведен по методике кинематики волновых пакетов Стэррока. Условие  $\partial V_x / \partial x + v_{ei} < 0$  означает, что темп торможения плазменного потока, определяемый параметром  $\partial V_x / \partial x$  и определяющий темп преобразования энергии потока, должен быть больше по абсолютной величине уровня диссипативных потерь, определяемых параметром  $v_{ei}$ .

При этом СВЧ проводимость плазменного потока отрицательна, что позволяет генерировать СВЧ-излучение. Однако вопрос об эффективности ПЭМГ не может быть решен в рамках линейной модели, основанной на дисперсионном соотношении. Проблема эффективности требует более детального

изучения. Сначала необходимо рассмотреть проблему группировки электронов. Как известно, при циклотронном резонансе электроны группируются под действием различных физических механизмов.

1. На первой стадии группировки одна часть электронов плазменного потока замедляется и двигается из замедляющей фазы СВЧ-поля в ускоряющую фазу. В результате замедленные электроны соединяются с ускоряющимися электронами, образуя электронный сгусток. Этот процесс интенсифицируется под действием тех электронов, которые меняют свою фазу под действием нормальной компоненты электрической напряженности СВЧ поля.

2. На второй стадии электронный сгусток двигается из ускоряющей фазы в замедляющую под действием релятивистского эффекта. Этот эффект используется во всех СВЧ-генераторах на циклотронном резонансе. Очевидно, что эффективность ПЭМГ как СВЧ-преобразователя является функцией степени группировки электронов, которая, в свою очередь, является функцией СВЧ электрического поля. Корректное решение данной задачи затруднительно в силу нелинейности задачи.

Тормозящиеся электроны плазменного потока образуют ток намагничивания, который взаимодействует с поперечным магнитным полем и, как результат, тормозятся. По этой причине ионы плазменного потока опережают электроны и образуют продольную поляризацию плазменного потока. Это продольное электрическое поле обеспечивает преобразование кинетической энергии ионов в энергию вращения электронов и, как следствие, подпитывает энергией излучение электронов. Таким образом, кинетическая энергия плазменного потока преобразуется в СВЧ-излучение.

Результаты, полученные в итоге анализа перечисленных выше задач, положены в основу оценок возможных рабочих параметров технических устройств, создаваемых на основе прямого преобразования энергии плазменного потока в СВЧ-излучение и прежде всего оценки возможной эффективности преобразования энергии в ПЭМГ. В первом приближении эффективность преобразования энергии можно оценить величиной 40...50%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. И.Ю. Адамов, В.М. Залкинд, В.Г. Зыков, И.А. Степаненко. Микроволновое излучение плазмы при взаимодействии сталкивающихся плазменных потоков в поперечном магнитном поле // *Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза. Киев: Наукова Думка, 1971. Вып. 1, с.187-193.*
2. К.Б. Каргашев, В.И. Пистунович, В.В. Платонов, В.Д. Рютов, Е.А. Филимонова. Обнаружение быстрых электронов при инъекции плазменного сгустка в поперечное магнитное // *Письма в ЖЭТФ, 1972. Т. 15, вып. 1, с. 7-9.*
3. A.A. Temeev. Negative Conductance Becoming Excited in Magnetized Plasma at Heavy Gradient of Directed Electron Velocity // *Proc. XXIII ICPIG. 1997. V.5, p.84-85.*

4. И.И. Демиденко, И.С. Ломино и др. Плазменный переходной слой в неоднородном поперечном магнитном поле // *ЖТФ*. 1969. Т.39, вып. 1, с. 27-36.

5. В.В. Рыбаков, А.П. Смахтин. Динамика переходного слоя при взаимодействии плазменного потока с поперечным магнитным полем // *Тезисы докладов*

*XXVII Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, 2000, с. 219.*

6. А.А. Балмашнов, К.С. Головановский. К циклотронному нагреву электронов плазмы // *ЖТФ*, 1975, Т. XLV, вып. 4, с. 766-775.

7. А.А. Балмашнов. Циклотронный резонанс // Учебное пособие УДН. М. 1985, 15 стр.