

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

Волкова Марина Геннадьевна,

кандидат психол. наук, доцент,

ЯВВУ ПВО,

г. Ярославль;

Рыбникова Елена Владимировна

кандидат пед. наук, доцент,

ЯрГУ им. П.Г.Демидова,

г. Ярославль

ВЛИЯНИЕ ВРАЩЕНИЯ МАГНЕТРОНА НА ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНА

Аннотация. Проведен анализ влияния вращения магнетрона вокруг собственной оси на кинетическую энергию электрона вблизи анода.

Ключевые слова: магнетрон, кинетическая энергия электрона, энергия магнитного и электрического полей.

Принцип действия магнетрона основан на возможности преобразования в скрещенных электрическом и магнитном полях энергии постоянного тока в энергию колебаний. Наиболее распространен цилиндрический многорезонансный магнетрон – вакуумный прибор, где цилиндрический катод помещен внутрь сегментированной анодной системы, выполняющей роль собственно анода и содержащей систему резонаторов (колебательных контуров). Магнитное поле, параллельное оси магнетрона, создается электромагнитом. Наиболее используемый вид резонаторной системы основан на колебаниях, при которых число полуволн равно числу резонаторов (π -колебания, при которых напряжения и токи в соседних резонаторах сдвинуты по фазе на 180°). По количеству резонаторов и способу их связи определяют вид колебаний. Резонаторная система, состоящая из восьми резонаторов,

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

имеет четвертый вид колебаний. Резонаторные системы в магнетроне могут настраиваться на определенную частоту или диапазон сверхвысоких частот. По числу ячеек (щелей между сегментами анода) различают зоны рабочих режимов магнетрона, что обусловлено неоднородностью анодного тока. Поэтому в магнетроне присутствуют три поля: постоянное электрическое поле, постоянное магнитное поле и переменное электрическое поле СВЧ.

Пространство взаимодействия в магнетроне условно подразделяется на две области. Первая область непосредственно прилагает к катоду. Здесь влияние переменного электрического поля, создаваемого за счет переменного напряжения на сегментах анода, минимально. В данном случае электроны, испускаемые с катода, возвращаются обратно. Вторая область занимает все остальное пространство вплоть до анода – это область обмена энергией. Здесь, попадая под влияние переменного поля, электроны тормозятся и отдают энергию переменному электромагнитному полю резонаторов. Отвод энергии осуществляется через один из резонаторов [1, с. 159].

Рассмотрим движение электрона в магнетроне. Уравнение движения заряженной частицы в скрещенных постоянных электрическом и магнитном полях имеет вид:

$$m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = e\vec{E} + \frac{e}{c} [\vec{v}, \vec{B}], \quad (1)$$

Где u – скорость электрона в неподвижной системе отсчета, например, в которой ось z совпадает с осью магнетрона, а плоскость xu – с его радиальным сечением.

В классической механике при описании движения подвижной системы отсчета в правой части уравнения движения добавляются силы инерции. Таким образом, рассмотрим вращение системы координат,

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

связанной с магнетроном, относительно некоторой неподвижной системы отсчета с постоянной угловой скоростью. Пусть магнетрон вращается вокруг своей оси, тогда электроны также будут участвовать во вращательном движении с угловой скоростью ω , поэтому уравнение движения во вращающейся системе будет представлено в следующем виде:

$$m \cdot \frac{d\vec{v}'}{dt} = \vec{F}_L + \vec{F}_{цб} + \vec{F}_{кор}, \quad (2)$$

где $\vec{F}_L = e\vec{E} + \frac{e}{c}[\vec{v}, \vec{B}]$ - сила Лоренца,

$\vec{F}_{цб} = m\omega^2\vec{R}$ - центробежная сила инерции,

$\vec{F}_{кор} = 2[\vec{v}, \vec{\omega}]$ - сила Кориолиса,

\vec{v}' - скорость электрона в системе отсчета, связанной с магнетроном.

К уравнению движения электронов необходимо добавить уравнения поля в магнетроне. Наличие высокочастотного поля существенно усложняет задачу. Таким образом, траектории электронов в магнетроне имеют достаточно сложный вид. Оценить влияние дополнительного вращения магнетрона вокруг собственной оси на энергию выхода, регистрируемую датчиком, возможно с помощью функциональной зависимости кинетической энергии электрона при движении вблизи анода, поскольку подлетающий к аноду электрон отдает свою энергию полю СВЧ [2, с. 63-68].

Рассматривая решение данной задачи во вращающейся цилиндрической системе координат, и учитывая функциональную зависимость кинетической энергии электронов от расстояния, пройденного электроном от катода до анода, нужно учесть два режима работы маг-

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

нетрона: динамический и статический. В первом случае выражение для кинетической энергии электрона имеет вид:

$$W_K = eU_2 - \frac{e\omega_c B}{2} (r^2 - r_K^2) + \frac{1}{2} \frac{m}{e} \omega_c^2 r^2 \quad (3)$$

где $U_2 = U - \omega_c r A_{\varphi 1}$,

$A_{\varphi 1}$ - высокочастотная составляющая векторного потенциала,

$\omega_c = \frac{2\pi f_0}{n}$ - угловая частота движения высокочастотного поля,

f_0 - частота генерируемых колебаний,

n - номер вида колебаний.

Для оценки изменения кинетической энергии электрона при вращении магнетрона необходимо учесть следующее. Рабочая характеристика цилиндрического магнетрона показывает наличие критического значения магнитной индукции:

$$B_K = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{\frac{e}{m}}} \frac{\sqrt{U}}{r_a \cdot \left(1 - \frac{r_K}{r_a}\right)} \quad (4)$$

где r_a , r_K - радиусы анода и катода, U – напряжение между катодом и анодом.

При магнитном поле, меньшем критического, все электроны достигают анода, как если бы отсутствовало магнитное поле. При поле, большем критического, ни один электрон не достигает анода. При критическом значении магнитной индукции траектории электронов касаются поверхности анода. Таким образом, для оптимальной работы магнетрона необходимо выполнение условия (4).

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

Если потенциал катода принять нулевым, то зависимость критического значения магнитного поля (4) будет определяться лишь потенциалом анодной системы. Можно оценить влияние только механического вращательного движения на величину кинетической энергии электрона вблизи анода.

Поскольку движение электронов в магнетроне имеет достаточно сложный вид, примем для решения данной задачи следующие допущения:

1. Траектории электронов не пересекаются;
2. Электрическое и магнитное поля вдоль оси магнетрона однородны, а электрическое поле мало по сравнению с магнитным полем;
3. Движение рассматривается в нерелятивистском приближении;
4. При выходе с катода электроны имеют нулевую скорость, потенциал катода равен нулю;
5. Потенциал на каждом анодном сегменте постоянен и равен U_a .

Сила Лоренца и сила Кориолиса оказывают одинаковое влияние на движение электронов, центробежная сила способствует движению электронов по направлению к аноду, то есть добавим в решение (3) слагаемое, отвечающее за вращение магнетрона с угловой скоростью ω . В основном это отразится на радиальном направлении:

$$W_K = eU_2 - \frac{e\omega_c B}{2}(r^2 - r_K^2) + \frac{1}{2} \frac{m}{e} (\omega_c + 2\omega)r^2 \quad (5)$$

Для анализа будем использовать следующие данные: $r_a = 0,003$ м, $r_K = 0,008$ м, $U = 19,3$ кВ, тогда из формулы (4) $B = 0,19$ Тл, $f_0 = 2,8$ ГГц, $n = 4$, тогда $\omega_c = 4,4$ ГГц.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

Пусть вблизи анода проекция высокочастотной составляющей векторного потенциала на ось угла $A_{\varphi 1}$ равна нулю, тогда $U=19,1$ кВ есть напряжение на анодном сегменте.

Анализ зависимости кинетической энергии электронов от пройденного расстояния был проведен в среде MathCAD. Для сравнения были построены функциональные зависимости $W(r)$ в отсутствии и при наличии вращения, где при изменении r от катода к аноду энергия менялась от 5 до 35 кДж . При существенном различии частот в несколько порядков вклад частоты вращения магнетрона сравнительно мал.

В ходе эксперимента сравнивались величины кинетической энергии электронов, подлетающих к аноду в области обмена энергией, при отсутствии и наличии вращения магнетрона. Данные компьютерного моделирования сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Зависимость ΔW вблизи анода от частоты вращения магнетрона

$f_{ep}, 1/c$	50	100	150	200	250
$\Delta W_{r=ra}, Дж$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5

Результаты показывают, что изменение частоты вращения магнетрона в пределах 50-250 оборотов в секунду добавляет в кинетическую энергию электрона десятые доли джоулей. Эффект мал по сравнению с самой энергией, но присутствует. Для экспериментального подтверждения данной гипотезы необходимо использовать высокочувствительные датчики с большим динамическим диапазоном.

Несмотря на небольшие значения вносимой поправки, учитывающей вращение магнетрона, эффект, несомненно, представляет интерес.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Актуальные проблемы физики: Сборник науч. тр. молодых ученых, аспирантов и студентов. Выпуск 6 / Отв. за вып. д-р физ.-мат наук С.П. Зимин; Яросл.гос.ун-т. – Ярославль, ЯрГУ, 2007. – 262 с.*
2. *Винтизенко И.И., Новиков С.С., Заревич А.И. Релятивистский магнетрон с распределенным выводом СВЧ излучения // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31. – Вып. 9. – С. 63-68.*