

УДК 537.86:621.38

КИРИЧЕНКО Ю. В.

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Исследован обмен энергией между электроном и электромагнитной волной, вращающихся в азимутальном направлении в высокочастотном коаксиальном резонаторе с радиальным электростатическим полем. Показано, что волне передается в основном потенциальная энергия электрона. Результаты слабо зависят от номера азимутальной гармоники собственной волны резонатора.

Нелинейные явления в СВЧ усилителях и генераторах, работа которых основана на взаимодействии вращающихся электронов с вращающимися электромагнитными полями, широко описаны в литературе ([1—5]). Поскольку замедление волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов является довольно трудной задачей [6], особое место занимают устройства, в которых отсутствуют сложные замедляющие системы. Конструктивной простотой отличаются приборы типа орбитрон [7], в которых электроны удерживаются на близких к круговым орбитах электрическим полем тонкой заряженной нити, образующей внутренний цилиндр коаксиального резонатора. При этом электроны могут быть нерелятивистскими, так как в поле заряженной нити они представляют собой неизохронные осцилляторы, что необходимо для

группировки электронов. Механизм усиления возмущений в орбитроне связан с особенностью азимутальной группировки электронов в логарифмическом потенциале. Электроны смещаются против направления действующей азимутальной силы. Поэтому расталкивающие силы, возникающие за счет флуктуации в электронном уплотнении, приводят с течением времени не к уменьшению уплотнения, как это имеет место в приборах *O*-типа, а к его усилению (эффект отрицательной массы).

При нелинейном анализе работы гирорезонансных приборов и приборов с центробежной электростатической фокусировкой (ЦЭФ) коэффициенты полезного действия и усиления вычисляются как функции продольной координаты резонатора или волновода [1—5]. Связано это с тем, что в указанных системах «отработавшие» электроны выводятся из пространства взаимодействия за счет продольной (дрейфовой) скорости. В орбитроне же электроны выходят из пространства взаимодействия, оседая на заряженную нить. При этом продольная скорость электронов V_z близка к нулю. В этом случае необходим анализ коэффициента полезного действия как функции азимутального угла. В [8—12] построена линейная теория неустойчивостей цилиндрического слоя электронов в приборах орбитронного типа. В настоящей работе исследуется нелинейная стадия развития неустойчивостей в режиме усиления собственных волн коаксиального резонатора при вращении электронов в поле положительно заряженной нити.

Поскольку плотность электронного облака в орбитроне мала (соответствующая плазменная частота на порядок меньше частоты генерируемых волн [7]), достаточно ограничиться кинематическим приближением, то есть пренебречь полем пространственного заряда. Рассмотрим высокодобротный коаксиальный цилиндрический резонатор, неограниченный вдоль оси z (используется цилиндрическая система координат r, φ, z). Внутренний радиус внешнего цилиндра резонатора равен r_2 , радиус нити — r_1 ($r_1 \ll r_2$). Последняя создает радиальное электростатическое поле $E_0(r) = 2Q / r$ (Q — линейная плотность заряда). Согласно экспериментальным данным [7], траектории электронов близки к окружностям. Поэтому будем полагать, что в отсутствие поля ВЧ электроны движутся по окружности радиуса r_0 . Их скорость не зависит от r_0 и равна $V_0 = \sqrt{2eQ / m_e}$ (где $e < 0, m_e$ — заряд и масса электрона), а полная энергия электрона $W_{r_0} = m_e V_0^2 / 2 + 2eQ \ln(r_0 / r')$, где r' — координата точки отсчета потенциальной энергии. ВЧ поле представляет собой вращающуюся в азимутальном направлении аксиально однородную собственную H -волну (H_z, E_r, E_φ) коаксиального резонатора [8]. В случае малых плотностей, что имеет место в орбитроне, и после завершения переходных процессов справедливо приближение заданного поля, в котором компоненты электрического ВЧ