

УДК 533.951.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ КОЛЕБАНИЙ НА АНОМАЛЬНОМ ЭФФЕКТЕ ДОПЛЕРА

Д. В. Горожанин, Б. И. Иванов, М. И. Капчинский

Исследовано возбуждение несимметричных типов колебаний в спиральном резонаторе электронным пучком в магнитном поле. Генерация сопровождается увеличением энергии поперечного движения электронов пучка. Исследовано соотношение между этой энергией и полной энергией циклотронной волны.

Аномальный (сверхсветовой) эффект Доплера (АЭД) был теоретически предсказан и исследован Франком и Гинзбургом [1–4]. В дальнейших работах (см., например, [5]) было показано, что излучение электронов на АЭД сопровождается возбуждением в электронном потоке медленных циклотронных волн (МЦВ) отрицательной энергии. Исследование АЭД представляет интерес для физики пучково-плазменного взаимодействия [6, 7], генерации СВЧ колебаний [8–10], колективных методов ускорения, в частности, авторезонансного метода ускорения (АРУ) [11, 12]. К настоящему времени имеется небольшое число экспериментальных работ по АЭД и МЦВ. Так, в [13] исследовано усиление поперечных МЦВ при взаимодействии слаботочечного электронного пучка с замедляющей структурой типа сдвоенной гребенки. В [14] в режиме конвективной неустойчивости при взаимодействии электронного пучка со спиральной структурой исследовалось усиление аксиально-симметричных МЦВ, представляющих интерес для АРУ. Аналогичные эксперименты, проведенные на крупной установке с релятивистским пучком, описаны в [15]. В перечисленных работах определены резонансные условия усиления МЦВ, измерены соответствующие инкременты. В настоящей работе на установке с нерелятивистским пучком исследуется генерация на АЭД несимметричных МЦВ в режиме абсолютной неустойчивости. (Как известно, несимметричные МЦВ являются перспективными для СВЧ генераторов на АЭД.) Изучаются такие общие черты АЭД, как резонансные условия генерации, увеличение поперечной энергии осцилляторов при генерации, режим насыщения. Особое внимание уделяется исследованию соотношения между полной энергией циклотронной волны и кинетической энергией поперечного движения электронов пучка. Теоретически установлен и экспериментально подтвержден простой вид этого соотношения: независимо от конфигурации пучка и типа возбужденной циклотронной моды оно равно отношению частоты волны к электронной циклотронной частоте.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для возбуждения в электронном пучке МЦВ, являющихся волнами отрицательной энергии, необходимо обеспечить их резонансную связь с волнами положительной энергии, распространяющимися, например, в плазме, в пучках, в электродинамических структурах. При этом основные черты АЭД и МЦВ можно исследовать независимо от типа волн положительной энергии. В экспериментальном отношении с этой целью удобно использовать собственные волны замедляющих электродинамических структур.

В данной работе исследуется возбуждение МЦВ в режиме стоячих волн с выделением нужной неустойчивости внешним объемным резонатором. В этом случае электронный пучок взаимодействует с внешней замедляющей структурой, заключенной в объемный резонатор с достаточно высокой добротностью. При выполнении условий резонанса на АЭД происходит усиление или генерация выбранного типа колебаний в резонаторе и возбуждение МЦВ в пучке. Остальные типы колебаний, для которых не выполняются либо условия резонанса на АЭД, либо резонансные граничные условия, не возбуждаются. Отметим, что схема резонаторного возбуждения аксиально-симметричных МЦВ экспериментально реализована в [15], где использовался тип колебаний с $q=1$ (q — число полуволн по длине резонатора). Поскольку полуширина электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) при отсутствии других факторов уширения определяется временем пролета электронов через резонатор [16, 17]:

$$\frac{\Delta\Omega}{\Omega} \sim \frac{1}{\Omega\tau} = \frac{v_\phi}{\omega L} \frac{v_0}{|v_0 - v_\phi|} = \frac{1}{\pi q} \frac{v_0}{|v_0 - v_\phi|}, \quad (1)$$

при малых q она может быть довольно велика, что и наблюдается в эксперименте [15, 16]. В (1) $\Delta\Omega$ — полуширина ЭЦР, Ω — электронная циклотронная частота, τ — время пролета, ω и v_ϕ — частота и фазовая скорость волны, L — длина резонатора, v_0 — продольная скорость электронов. Получение одномодового режима в случае усиления МЦВ с $q=1$ возможно при достаточно большом начальном уровне колебаний, как в [15]. В режиме генерации типы колебаний с $q \sim 1$ могут возбуждаться одновременно, поэтому в данном случае для получения одномодового режима следует выбирать тип колебаний с большим q .

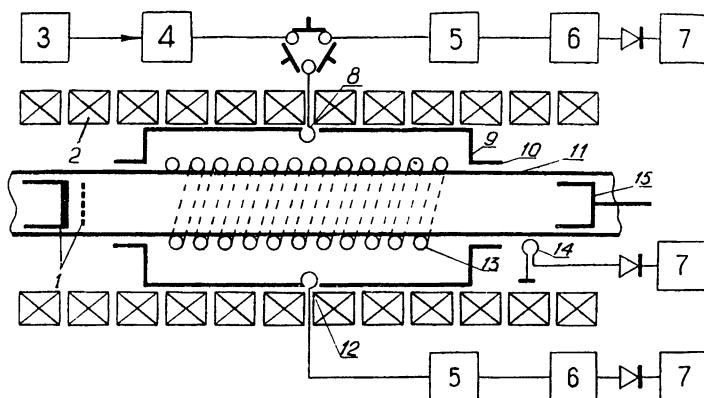


Рис. 1. Схема измерений:

1 — электронная пушка, 2 — соленоид, 3 — ВЧ генератор, 4 — ферритовый вентиль, 5 — ступенчатый аттенюатор, 6 — волномер, 7 — осциллограф, 8, 12 — петли связи, 9 — резонатор, 10 — запредельные волноводы, 11 — кварцевая труба, 13 — спираль, 14 — приемная индуктивная петля, 15 — коллектор.

Эксперименты проводились на установке, описанной ранее [14]. Схема измерений приведена на рис. 1. Замедляющая структура, представляющая собой отрезок спирали, намотанной на кварцевую трубу, помещалась в объемный многомодовый резонатор. Параметры резонатора со спиралью: длина резонатора 30 см, внутренний диаметр 10,2 см, диаметр отверстий в торцах 3,5 см, длина запредельных волноводов 4 см, диаметр спирали 3,5 см, диаметр провода спирали 0,07 см, шаг 0,46 см, намотка спирали правая. При холодных

измерениях и в режиме усиления резонатор со спиралью возбуждался посредством петли связи от СВЧ генератора мощностью ~ 1 Вт. Идентичная петля связи использовалась для определения уровня СВЧ мощности, возбуждаемой в резонаторе. Измеренное ослабление мощности, вносимое петлями связи: возбуждающей — 21 дБ, приемной — 25 дБ. Поскольку длина замедленной волны значительно меньше размеров резонатора, то в резонаторе возбуждался спектр дискретных частот. Тип колебаний определялся методом возмущений. Для большинства измерений с электронным пучком использовался тип колебаний с числом вариаций электрического поля по азимуту $|m| = -1$, по радиусу $n = 1$, по оси $q = 18$. При взаимодействии электронного пучка с внешней структурой, вообще говоря, могут возбуждаться колебания на разных частотах. Для выделения нужного типа колебаний в схеме регистрации применялся резонансный волномер, настроенный на определенную частоту. Детектированный сигнал с волномера подавался на осциллограф, позволяющий устанавливать корреляцию сигнала генерации СВЧ с величиной напряжения и тока пучка. Для выбранного типа колебаний частота $f = \omega / 2\pi = 1727$ МГц, фазовая скорость $v_f = 5,53 \cdot 10^9$ см/с, продольное волновое число $k_z = 1,96$ см $^{-1}$, что находится в удовлетворительном согласии с дисперсионным уравнением экранированной спирали для случая несимметричных волн с $|m| = 1$. Электронный пучок создавался помещенной в магнитное поле пушкой, состоящей из подогревного гексаборидного катода и сеточного анода. Пучок проходил вдоль оси кварцевой трубки через область взаимодействия со спиральным резонатором и попадал на коллектор. Эксперимент проводился при следующих значениях параметров: энергия пучка $W_e = 15 \div 30$ кэВ, ток $I_e = 0,1 \div 1$ А, длительность импульса ~ 100 мкс, диаметр катода 1 см, напряженность магнитного поля $H = 200 \div 600$ Э, неоднородность и нестабильность во времени магнитного поля $< 1\%$, давление остаточного газа $\leq 10^{-6}$ Tor. При выполнении условия резонанса на АЭД

$$\omega = k_z v_0 - |\Omega|, \quad (2)$$

где ω и k_z — заданные частота и продольное волновое число, v_0 — скорость электронов, $\Omega = eH/\gamma m_0 c$ — электронная циклотронная частота (e и m_0 — заряд и масса покоя электрона, γ — релятивистский фактор, c — скорость света в вакуме), наблюдалась генерация СВЧ колебаний в спиральном резонаторе на заданном типе колебаний и увеличение поперечной составляющей скорости электронов в пучке. Посторонние неустойчивости наблюдались на других частотах и при других параметрах пучка и напряженности магнитного поля.

На рис. 2 представлена $\omega - k_z$ -диаграмма, на которой изображены линии, соответствующие МЦВ для энергии пучка 20 кэВ (прямая 1 — $\omega = k_z v_0 - |\Omega|$) и волне в спиральном резонаторе

(с поправкой на диэлектрик) с азимутальным волновым числом $m = -1$ (2). Точка пересечения этих линий означает выполнение условия (2). Волна спирали имеет положительную энергию и отрицательную групповую скорость, а МЦВ является волной отрицательной энергии и имеет положительную групповую скорость. Как известно [18], в этом случае реа-

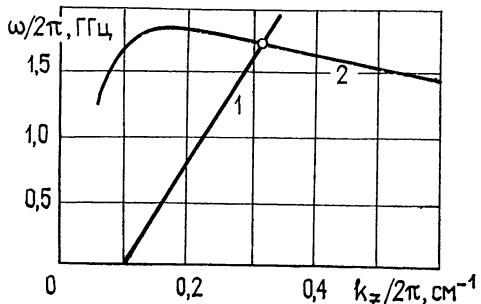


Рис. 2.

лизуется режим абсолютной неустойчивости, иными словами, имеет место генерация колебаний типа лампы обратной волны на АЭД [10]. При этом излучение электронов, обусловленное АЭД, сопровождается раскачкой поперечных колебаний частиц пучка, т. е. увеличением поперечной кинетической энергии электронов в пучке [2]. Энергия излучения и энергия поперечных колебаний черпаются из кинетической энергии направленного движения пучка. Возбуждение СВЧ колебаний на заданной частоте при выполнении условия (2) регистрировалось при подаче сигнала с приемной петли связи на резонансный волномер и далее на осциллограф. Уровень поступающей с петли связи СВЧ мощности $\sim 0,1 \div 0,5 \text{ Вт}$, что соответствует, с учетом коэффициента связи, мощности, генерируемой пучком в спиральном резонаторе, $\sim 10 \div 50 \text{ Вт}$. Увеличение поперечной составляющей скорости электронов при возбуждении в пучке МЦВ регистрировалось с помощью осевого и поперечного токоприемников. Первый представлял собой цилиндр Фарадея (с диаметром, меньшим диаметра пучка) и служил для измерения плотности продольной составляющей тока пучка (j_z), второй — плоский зонд сечением $2 \times 3 \text{ см}^2$, плоскость которого была ориентирована перпендикулярно сечению пучка и проходила через ось пучка, — служил для регистрации поперечной составляющей плотности тока пучка (j_{\perp}). Во избежание наводок плоский зонд был экранирован заземленным сетчатым экраном.

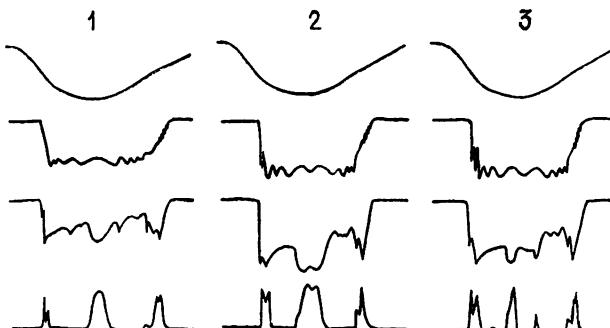


Рис. 3. Длительность развертки 250 мкс, $H=218 \text{ Э}$, $I_e=0,2 \text{ А}$, 1— $U=16 \text{ кВ}$, 2— $U=16,5 \text{ кВ}$, 3— $U=17 \text{ кВ}$.

На рис. 3 представлены серии осциллограмм, указывающих корреляцию сигнала генерации СВЧ с величиной напряжения и тока пучка. В каждой серии верхний луч изображает импульс ускоряющего напряжения на пушке (U), второй и третий лучи (сверху) изображают импульсы тока на осевой коллектор (I_z) и на поперечный коллектор (I_{\perp}), нижний луч — детектированный СВЧ сигнал с петли связи на заданной частоте, пропорциональный амплитуде генерируемых пучком СВЧ колебаний в спиральном резонаторе. Серии 1, 2, 3 (по вертикали) сняты при различных амплитудах ускоряющего напряжения на пушке и расположены в порядке увеличения амплитуды. Условия резонанса (2) выполнялись для ускоряющего напряжения серии 1 в момент, соответствующий максимуму напряжения. При этом наблюдается максимум СВЧ генерации. При увеличении ускоряющего напряжения (серии 2, 3) импульс СВЧ генерации раздваивается, так как условия генерации выполняются слева и справа от максимума напряжения. Уменьшение полуширины генерируемых СВЧ импульсов в сериях 2, 3 объясняется более быстрым прохождением резонанса по v_0 , а различие между левым и правым резонансами — различной скоростью их прохождения. Имеет место корреляция между импульсами генерации и «провалами» на импульсе тока на осевой коллектор,

а также «выбросами» на импульсе тока на поперечный коллектор. Этот факт объясняется увеличением в условиях резонанса поперечной составляющей скорости электронов в пучке и, следовательно, их ларморовского радиуса. При этом увеличивается ток на поперечный коллектор (I_{\perp}), обязанный «раскрутке» электронов; кроме того, при увеличении диаметра пучка уменьшается плотность тока на осевой коллектор. Следует также отметить, что на приведенных осциллографмах, кроме генерации МЦВ на АЭД, наблюдается также генерация, соответствующая связи медленных плазменных волн электронного пучка с несимметричной ($m=-1$) волной спирального волновода, что, как известно, называется генерацией на эффекте Черенкова или генерацией типа ЛОВ. Данная генерация имеет место при выполнении условия синхронизма $v_0 = v_{\phi}$ и на осциллографах (рис. 3) видна примерно при половинном значении амплитуды напряжения.

На рис. 4 приведена зависимость резонансного значения скорости электронов от напряженности внешнего магнитного поля для ано-

мального эффекта Доплера. Сплошной линией показана теоретическая зависимость, рассчитанная из соотношения (2), точками — данные эксперимента. В этих измерениях, как уже отмечалось, определенная частота генерации выделялась с помощью резонансного волнометра.

В другой серии измерений колебания регистрировались с помощью нерезонансной индуктивной петли 14 (рис. 1), расположенной вблизи пучка после спирального резонатора. При этом наблюдалась серия частот, возбуждающихся одна за другую через приблизительно

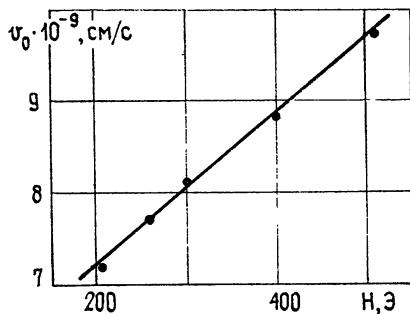


Рис. 4.

равные интервалы по мере изменения скорости пучка при неизменном магнитном поле (рис. 5). Генерация каждой из частот сопровождалась увеличением тока на поперечный коллектор. Зная генерируемые частоты, напряженность магнитного поля и определяя скорость электронов из ускоряющего напряжения на пушке, можно из (2) найти набор соответствующих k_z и построить зависимость $\omega(k_z)$ (см. рис. 6). На рис. 6 точками 1 обозначены значения k_z , рассчитанные по формуле (2), а точками 2 — значения k_z , задаваемые граничными условиями $k_z L = q\pi$ ($q=16 \div 22$). Сплошной линией изображена теоретическая дисперсия экранированной спирали для несимметричной волны с $m=-1$. Расчет дисперсии проводился по формулам, приведенным в [19], при этом поправка на диэлектрик учитывалась путем введения нормировочного множителя ($K=0,7$). Из сопоставления расчетных и экспериментальных данных следует, что генерируемые на АЭД частоты соответствуют собственным частотам спирального резонатора. Некоторое отличие значений 1 и 2 объясняется погрешностью в определении скорости пучка, которая составляет около 5%. Различие в экспериментальной и теоретической дисперсиях при больших k_z объясняется более сильным влиянием диэлектрика в области коротких длин волн.

Представляет интерес определение отношений W_{\perp}/W , P_{\perp}/P , где W и P — энергия и мощность СВЧ колебаний, излучаемых пучком на АЭД, а W_{\perp} и P_{\perp} — возникающее при этом увеличение энергии и мощности поперечного движения электронов. Проведенные вычисления баланса энергий при излучении на АЭД дали, в частности, следующий результат:

$$W_{\perp}/W = |\Omega|/\omega = v_0 v_{\phi}^{-1} - 1. \quad (3)$$

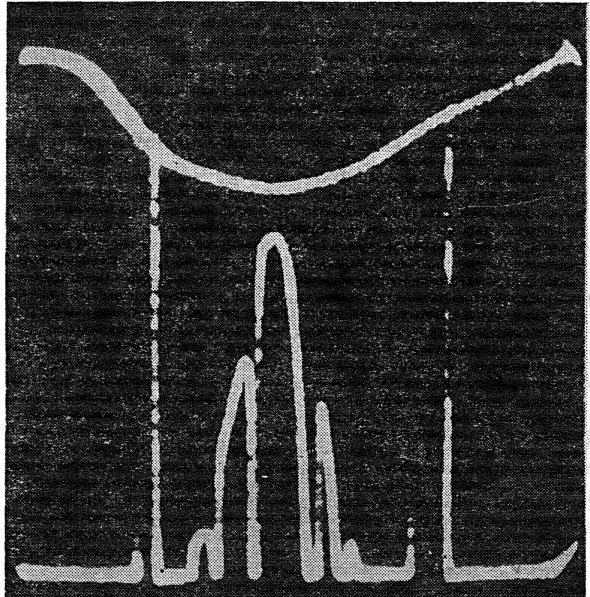
При этом предполагается $\omega_b^2 \ll \Omega^2$ и малое изменение продольной скорости пучка:

$$\Delta v_0(v_0 - v_{\phi})^{-1}, \Delta \gamma/\gamma \ll \Delta \Omega/\Omega \ll 1, \quad (4)$$

где $\Delta \Omega$ — полуширина ЭЦР, ω_b — ленгмюровская частота пучка. В стационарном режиме соотношение (3) справедливо и для мощностей

$$P_{\perp}/P = |\Omega|/\omega. \quad (5)$$

Рис. 5. Осциллограммы:
ускоряющего напряжения на
пушке (верхний луч),
огибающей СВЧ сигнала с
приемной индуктивной петли
(нижний луч). Длительность
развертки 250 мкс. Видна
генерация на частотах
1675 МГц, 1702 МГц,
1727 МГц.



Экспериментально P и P_{\perp} находились следующим образом. Мощность P определялась из осциллограмм, подобных приведенным на рис. 3, в максимуме генерации путем сравнения с известной мощностью стандартного генератора с учетом затухания, вносимого петлей связи и градуированным ступенчатым аттенюатором (с шагом 1 дБ). При этом затухание, вносимое аттенюатором, подбиралось так, чтобы показания детектирующего узла были одинаковыми как при измерении, так и при калибровке. В случае однородности условий по сечению пучка величина P_{\perp} определяется формулой

$$P_{\perp} = \frac{1}{2} m_0 v_0 \sigma \left[\int_0^{\infty} v_{\perp}^2 f(v_{\perp}) dv_{\perp} - \int_0^{\infty} v_{\perp}^2 f_0(v_{\perp}) dv_{\perp} \right], \quad (6)$$

где σ — сечение пучка, $f(v_{\perp})$ — функция распределения электронов по поперечным скоростям в максимуме СВЧ генерации, $f_0(v_{\perp})$ — то же в отсутствие генерации.

При наличии выраженного максимума в функции распределения используем приближение

$$f_0(v_{\perp}) \approx n_0 \delta(v_{\perp} - v_{\perp 0,m}), \quad f(v_{\perp}) \approx n_0 \delta(v_{\perp} - v_{\perp,m}).$$

Тогда

$$P_{\perp} \approx \frac{1}{2} m_0 n_0 v_0 \sigma (v_{\perp,m}^2 - v_{\perp 0,m}^2) = \frac{1}{2} m_0 n_0 v_0 \sigma \Omega^2 (r_{L,m}^2 - r_{L0,m}^2), \quad (7)$$

где $v_{\perp 0,m}$ — наиболее вероятная поперечная скорость электронов пучка в отсутствие генерации, $v_{\perp,m}$ — то же в максимуме мощности СВЧ генерации, $r_{L0,m}$ и $r_{L,m}$ — ларморовские радиусы электронов пучка, соответствующие вышеобозначенным скоростям.

В случае однородного по сечению пучка СВЧ поля (что для моды $|m|=1$ выполняется, если радиус пучка значительно меньше радиуса спирали), однородности $f_0(v_\perp)$ по сечению и вытекающей из этих условий однородности $f(v_\perp)$ по сечению для определения $f_0(v_\perp)$, $f(v_\perp)$, $v_{\perp 0,m}$, $v_{\perp,m}$ можно использовать «дырочный» зонд, устройство которого изображено на рис. 7. Часть электронов пучка выпускается через отверстие в коллекторе (радиус отверстия $r_0 \ll r_L$) и попадает на люминесцентный экран, расположенный на расстоянии $l = \pi v_0 / \Omega$ от отверстия. Пунктиром изображены проекции электронных траекторий, ведущие центры которых движутся параллельно осям и смешены от нее на

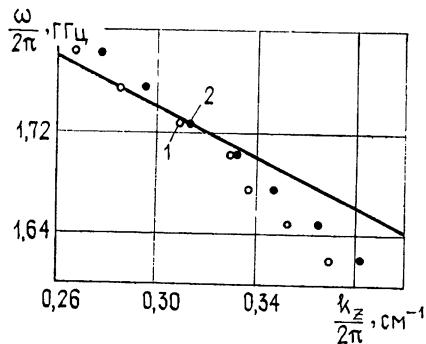


Рис. 6.

величину r_{L0} . Очевидно, что набор электронов с продольной скоростью v_0 и поперечной скоростью $v_\perp = \Omega r_{L0}$ высветит на экране окружность радиусом $r = 2r_{L0}$. Измеряя распределение свечения экрана по радиусу $J(r)$ и учитывая, что $J(r) \propto f(\Omega r/2)/2\pi r$, можно определить $f(v_\perp) = f(\Omega r/2) = AJ(r)r (r \gg r_0)$, где A — коэффициент пропорциональности. В наших измерениях, учитывая, что $f_0(v_\perp)$ имеет выраженный максимум, мы ограничились определением $r_{L0,m}$. При этом для выполнения условия постоянства v_0 использовались импульсы ускоряющего напряжения (и тока пучка) прямоугольной формы.

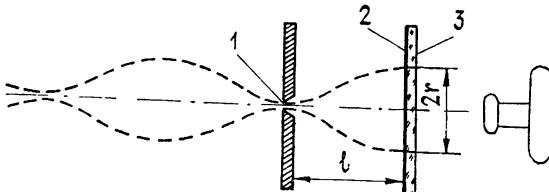


Рис. 7. Схема измерения поперечной скорости электронов с помощью „дырочного“ зонда.

1—диафрагма в коллекторе, 2—люминесцентный слой; 3—подложка

Величина $r_{L,m}/r_{L0,m}$ в выражении (7) определялась по осциллограммам, подобным приведенным на рис. 3, из которых находилось отношение поперечных токов на плоский зонд, расположенный вдоль магнитных силовых линий и проходящий через ось пучка:

$$\frac{I_{\perp}}{I_{\perp 0}} = \frac{\int_0^{\infty} v_{\perp} [1 - \Delta(v_{\perp})] f(v_{\perp}) dv_{\perp}}{\int_0^{\infty} v_{\perp} [1 - \Delta(v_{\perp})] f_0(v_{\perp}) dv_{\perp}} \approx \frac{v_{\perp,m} [1 - \Delta(v_{\perp,m})]}{v_{\perp 0,m} [1 - \Delta(v_{\perp 0,m})]} \approx \frac{r_{L,m}}{r_{L0,m}}, \quad (8)$$

где $I_{\perp 0}$ — ток на зонд в отсутствие СВЧ генерации, I_{\perp} — то же в максимуме генерации, Δ — коэффициент вторичной эмиссии, который счи-

тался мало изменяющимся в условиях данного эксперимента: $\Delta(v) \approx \approx \text{const}$, так как $v_0 \gg v_\perp$ и $v \approx \text{const}$.

Из осцилограмм, подобных приведенным на рис. 3, в широком диапазоне параметров установлена линейная связь между P и P_\perp . Подробное определение отношения этих величин было проведено при токе пучка $I_e = 0,15 \text{ A}$, ускоряющем напряжении 15 kV , сечении пучка $\sigma = 0,8 \text{ см}^2$, напряженности магнитного поля 180 Э и указанных выше параметрах спирального резонатора. При этом на частоте $f = 1727 \text{ МГц}$ была получена мощность генерации на АЭД $P = 15 \text{ Вт}$. Величина P_\perp оценивалась по формуле (7), где значение $r_{L0,m}$ измерялось «дырочным» зондом, а $r_{L,m}/r_{L0,m}$ — поперечным зондом, $r_{L0,m} = 0,1 \text{ см}$, $I_\perp/I_{\perp 0} = 1,4$, откуда по формуле (7) $P_\perp = 4,1 \text{ Вт}$.

При сопоставлении отношений $\omega/|\Omega| = 3,5$ и $P/P_\perp = 3,7$ видно, что равенство (5) выполнено с хорошей точностью.

Отметим, что условия (4) здесь также выполнены. Экспериментально определенная полуширина (по расстройке резонанса, приводящей к уменьшению генерируемой мощности в 2 раза) $(\Delta\Omega/\Omega)_{0,5} = 2,7 \cdot 10^{-2}$. Относительное изменение продольной скорости электронов при излучении на АЭД в данном случае составляет $\Delta v_0/v_0 = 4,1 \cdot 10^{-3}$. При таком Δv_0 относительное изменение частоты волны в системе координат, связанной с пучком, остается меньше полуширины ЭЦР: $\Delta v_0/(v_0 - v_\Phi) = 1,8 \cdot 10^{-2} < (\Delta\Omega/\Omega)_{0,5}$, поэтому излучение не приводит к нарушению резонанса.

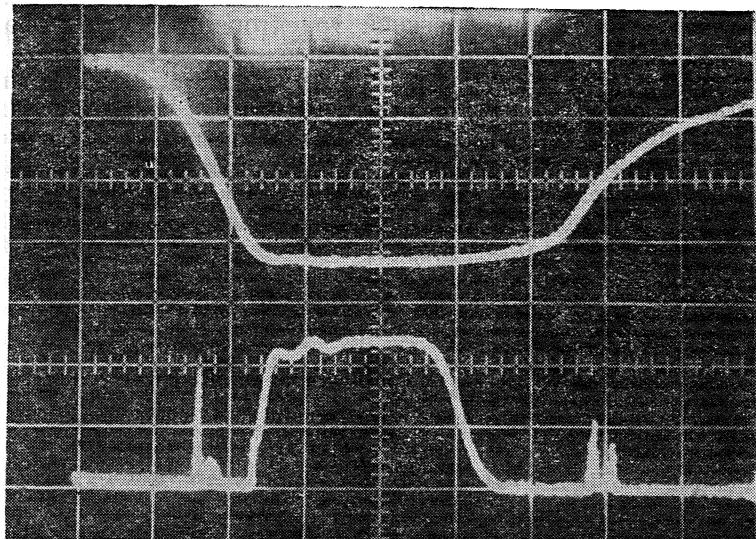


Рис. 8. $U = 17 \text{ кВ}$, $I_e = 210 \text{ мА}$, $H = 230 \text{ Э}$, $f = 1727 \text{ МГц}$. Разворотка 25 мкс/дел .

Нелинейное ограничение (насыщение) амплитуды колебаний, генерируемых на АЭД, определяется потерями продольной энергии пучка, приводящими к нарушению резонанса. В наших экспериментах насыщение наступало при увеличении тока пучка и увеличении времени развития неустойчивости (последнее обеспечивалось формированием импульсов напряжения и тока с плоской вершиной, что достигалось применением нелинейных сопротивлений, включаемых параллельно промежутку анод — катод электронной пушки). На рис. 8 верхняя осциллограмма представляет импульс напряжения на пушке, нижняя —гибающую СВЧ импульса генерации. Мощность СВЧ генерации в этом случае составляет 50 Вт , при этом относительное изменение продольной скорости превышает полуширину резонанса; $\Delta v_0/(v_0 - v_\Phi) = 3,4 \cdot 10^{-2} > (\Delta\Omega/\Omega)_{0,5}$.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для теоретического изучения ограничимся простейшей моделью электронного пучка. Будем считать, что в равновесном невозмущенном состоянии все частицы пучка движутся с одинаковыми скоростями вдоль силовых линий однородного внешнего магнитного поля. Энергетические характеристики такой среды рассмотрены в [20]. Для наших целей полученные там выражения для плотности энергии w и плотности потока энергии S в пучковой волне удобно представить в следующем виде:

$$w = \frac{E^2 + B^2}{8\pi} + \gamma^3 m_0 \frac{\rho}{e} v_0 v_z + \frac{1}{2} \gamma m_0 n_0 (v_{\perp}^2 + \gamma^2 v_z^2) - \frac{1}{2} \gamma m_0 n_0 v_0 \Omega \times \\ \times [\partial \xi_{\perp} / \partial z, \xi_{\perp}]_z, \\ S = \frac{c}{4\pi} [E, B] + \gamma^3 m_0 \frac{\rho}{e} v_0 v_z v_0 + \gamma^3 m_0 n_0 v_0 v_z v + \frac{1}{2} \gamma m_0 n_0 v_0 \Omega \times \\ \times [\partial \xi_{\perp} / \partial t, \xi_{\perp}]_z. \quad (9)$$

Здесь v_0 — невозмущенная скорость электронов пучка, v — вектор возмущения скорости с компонентами v_z и v_{\perp} , где ось z направлена вдоль скорости пучка v_0 , ρ — колебания плотности заряда в волне, ξ — смещение частиц от равновесной траектории, E и B — электрическое и магнитное поля волны. В выражении для S первое слагаемое является вектором Пойнтинга и описывает перенос энергии электромагнитным полем волны, а остальные члены учитывают перенос энергии движущейся средой. В выражении для w первое слагаемое представляет собой плотность энергии электромагнитного поля, второе слагаемое пропорционально амплитуде колебаний концентрации электронов, третье — соответствует кинетической энергии колебаний электронов в волне, в котором отражено различие между продольной и поперечными массами. Последний член соответствует потенциальной энергии вращающихся электронов во внешнем магнитном поле. Смысл его будет более ясным, если переписать последнее слагаемое в виде

$$- \frac{1}{2} \frac{en_0}{c} [v_0, \xi] \operatorname{rot} [H, \xi],$$

где $en_0 [v_0, \xi]/c$ — дипольный магнитный момент единицы объема среды, а $[H, \xi]/2$ — векторный потенциал внешнего магнитного поля в возмущенной точке.

Далее будем везде считать, что $\omega_b^2 \ll \Omega^2$. Тогда в циклотронных волнах максимальную величину имеют поперечные скорости и смещения, поэтому

$$w_{\text{ц.в}} = (1/2) \gamma m_0 v_{\perp}^2 - (1/2) \gamma m_0 n_0 v_0 \Omega [\partial \xi_{\perp} / \partial z, \xi_{\perp}]_z, \\ S_{\text{ц.в}} = (1/2) \gamma m_0 n_0 v_0 \Omega [\partial \xi_{\perp} / \partial t, \xi_{\perp}]_z. \quad (10)$$

В волноводных задачах физический смысл имеют не плотность энергии волны и ее потока, а погонная энергия W и мощность P — поток энергии, переносимый волной за единицу времени через поперечное сечение волновода:

$$W_{\text{ц.в}} = \int w_{\text{ц.в}} d^2x, \quad P_{\text{ц.в}} = \int S_{z,\text{ц.в}} d^2x,$$

где через x обозначена совокупность поперечных координат, а интегрирование проводится по поперечному сечению волновода. Как из-

вестно, погонная энергия и мощность бегущей волны связаны соотношением $P = v_g W$, где v_g — групповая скорость волны, которая в случае циклотронных волн совпадает со скоростью пучка, $P_{ц.в} = v_0 W_{ц.в}$.

В циклотронных волнах движение частиц обладает круговой поляризацией, радиальная и азимутальная компоненты скорости равны по амплитуде $|v_r| = |v_\phi| = |v_\perp|$ и сдвинуты по фазе на 90° : $v_\phi/v_r = -i(\omega - k_z v_0)/\Omega$. Кроме того, в волне, фазовый множитель которой записан в виде $\exp[-i(\omega t - k_z z - \Omega \phi)]$, справедливо $v_\perp = -i(\omega - k_z v_0) \xi_\perp$. Подставляя эти соотношения в (10), найдем

$$W_{ц.в} = \frac{\omega}{\omega - k_z v_0} \frac{1}{2} \int \gamma m_0 n_0 |v_\perp|^2 d^2x = \frac{\omega}{\omega - k_z v_0} W_\perp, \quad (11a)$$

где $W_\perp = (1/2) \int \gamma m_0 n_0 |v_\perp|^2 d^2x$ — кинетическая энергия поперечного движения частиц на единицу длины пучка. Такое же отношение справедливо и для мощностей

$$P_{ц.в} = \omega P_\perp (\omega - k_z v_0)^{-1}, \quad (11b)$$

где $P_\perp = (1/2) \int \gamma m_0 n_0 v_0 |v_\perp|^2 d^2x$.

Дисперсионное уравнение медленной циклотронной волны $\omega - k_z v_0 = |\Omega|$, поэтому

$$W_{МЦВ} = -(\omega/|\Omega|) W_\perp, \quad P_{МЦВ} = -(\omega/|\Omega|) P_\perp. \quad (12)$$

В быстрой циклотронной волне $\omega - k_z v_0 = |\Omega|$, так что

$$W_{БЦВ} = (\omega/|\Omega|) W_\perp, \quad P_{БЦВ} = (\omega/|\Omega|) P_\perp. \quad (13)$$

В условиях эксперимента электронный пучок проходил через резонатор, излучая в нем энергию. В пучке при этом возбуждалась медленная циклотронная мода отрицательной энергии. Из энергетических соображений ясно, что сумма мощности, излучаемой пучком в резонаторе, и мощности возбужденной пучковой волны равна нулю: $P_{МЦВ} + P = 0$. Отсюда и из (12) вытекает проверяемое в эксперименте равенство $P/P_\perp = \omega/|\Omega|$.

Отметим большую общность формул (11) — (13). В то время как сами величины $W_{ц.в}$, $P_{ц.в}$, W_\perp и P_\perp достаточно сложным образом зависят от размеров волновода, параметров и геометрии пучка и характеристики волны, в частности от вида ее азимутальной симметрии и радиальной структуры полей (см. [21]), отношение этих величин выглядит очень просто и определяется лишь двумя параметрами задачи. Так если какой-нибудь частотно-стабильной антенной в пучке возбужден целый спектр циклотронных колебаний с различными азимутальными и радиальными индексами, то формулы (12) или (13) соответственно остаются справедливыми для всего волнового пакета.

Отмеченный выше универсальный характер формул (11) — (13) позволяет вывести их на основе простых качественных соображений. Кинетическую энергию поперечного движения электронов легко связать с полной энергией волнового пакета, измеренной в системе координат, в которой пучок покоятся. Поперечная кинетическая энергия в расчете на один электрон в лабораторной системе координат равна $W'_{\perp(0)} = p_\perp^2/2m_0$, где p_\perp — поперечный импульс частицы, а в сопровождающей системе отсчета $W'_{\perp(0)} = p'_\perp^2/2m_0$, где штрихованные величины относятся к сопровождающей системе координат. Поскольку $p'_\perp = p_\perp$, то $W'_{\perp(0)} = W'_{\perp(0)}/\gamma$. Если лоренц-фактор у всех электронов одинаков, то последнее соотношение справедливо и для всего пакета в целом, $W'_{\perp(п)} = W'_{\perp(0)}/\gamma$. В соответствии с [22] в сопровождающей си-

Системе отсчета полная энергия циклотронной волны $W'_{(n)}$ практически совпадает с $W'_{\perp(n)}$, поэтому $W_{\perp(n)} = W'_{(n)}/\gamma$ и $W_{(n)}/W_{\perp(n)} = \gamma W_{(n)}/W'_{(n)}$. С другой стороны, волновой пакет на частоте ω можно описать как совокупность квазичастиц с энергией $\hbar\omega$ каждая [20, 23], где \hbar — постоянная Планка. С этой точки зрения $W_{(n)} = N\hbar\omega$, а $W'_{(n)} = N\hbar\omega'$, где N — число квазичастиц, которое, конечно, одинаково в любой системе отсчета, $\omega' = \gamma(\omega - k_z v_0)$ — частота волны в сопровождающей системе отсчета. Таким образом, получили $W_{(n)}/W_{\perp(n)} = \omega/(\omega - k_z v_0)$. В этом выражении обе энергетические величины относятся к лабораторной системе координат, поэтому то же равенство справедливо и для погонных плотностей: $W_{ц.в.}/W_{\perp} = \omega/(\omega - k_z v_0)$, т. е. снова получилась формула (11).

Представляет интерес применение полученных соотношений к методу АРУ, где для ускорения ионов предлагается использовать МЦВ релятивистского пучка. В начальной части ускорителя необходимо иметь сильно замедленную волну ($v_\phi \leq 0,1 c$), что позволило бы начать ускорение ионов с относительно низких энергий. Кинетическая энергия поперечных колебаний электронов W_{\perp} не может превышать первоначальную кинетическую энергию пучка $W_e = (\gamma - 1)m_0c^2$. В свою очередь, полная энергия МЦВ еще в $(v_0 - v_\phi)/v_\phi$ раз меньше. Таким образом, при малых v_ϕ лишь небольшая часть энергии пучка может перейти в энергию МЦВ и, следовательно, небольшая часть первоначальной энергии может пойти на ускорение ионов. Если под эффективностью системы возбуждения МЦВ понимать долю энергии пучка, которая переводится в энергию МЦВ, то она не может быть больше, чем

$$\eta_{пр} = v_\phi/(v_0 - v_\phi) = \omega / |\Omega| . \quad (14)$$

Конечно, это ограничение имеет смысл при $v_\phi < v_0/2$. Если при возбуждении МЦВ пучок тормозится и его энергия уменьшается на $\delta\gamma$, то эффективность системы возбуждения составляет

$$\eta = \delta\gamma\eta_{пр}/(\gamma - 1). \quad (15)$$

Схожие оценки, полученные из других соображений, приведены в [12]. Несмотря на ограничение (15) темп ускорения и ионный ток в АРУ могут быть существенно большими [11, 12], чем в ускорителях классического типа.

В заключение приводится краткая сводка результатов.

1) В работе экспериментально исследована генерация аксиально-несимметричных медленных циклотронных волн в режиме абсолютной неустойчивости, изучены резонансные условия генерации, режим насыщения, определены энергетические характеристики.

2) Экспериментально показано, что генерация колебаний на аномальном эффекте Доплера сопровождается увеличением поперечной кинетической энергии электронов в пучке.

3) Предложен метод, позволяющий измерить поперечные скорости электронов пучка и оценить кинетическую энергию волнового поперечного движения электронов.

4) Теоретически установлен и экспериментально подтвержден простой вид отношения полной энергии пучковой волны к кинетической энергии поперечного движения электронов, общий для различных конфигураций пучков и видов возбуждаемых колебаний.

5) Получена верхняя оценка для эффективности систем возбуждения медленных циклотронных волн.

Авторы благодарят Я. Б. Файнберга, Ю. П. Блиоха, В. А. Буца, И. Н. Онищенко, Л. А. Юдина за интерес к работе и обсуждение результатов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Франк И. М.—Изв. АН СССР. Сер. Физ., 1942, 6, № 1, с. 3.
2. Гинзбург В. Л., Франк И. М.—ДАН СССР, 1947, 56, № 7, с. 583.
3. Франк И. М.—УФН, 1959, 68, № 3, с. 397.
4. Гинзбург В. Л.—УФН, 1959, 69, № 4, с. 537.
5. Незлин М. В.—УФН, 1976, 120, № 3, с. 481.
6. Железняков В. В.—Изв. вузов—Радиофизика, 1959, 2, № 1, с. 14.
7. Файнберг Я. Б.—АЭ, 1961, 11, № 4, с. 313.
8. Пирс Дж. Лампа с бегущей волной.—М.: Сов. радио, 1952.
9. Шевчик В. Н., Трубецков Д. И. Аналитические методы расчета в электронике СВЧ.—М.: Сов. радио, 1970.
10. Братман В. Л., Гинзбург Н. С., Нусинович Г. С., Петелин М. И., Юлпатов В. К. В кн.: Релятивистская высокочастотная электроника.—Горький. ИПФ АН СССР, 1979, с. 157.
11. Sloan M. L., Dainton W. E.—Phys. Rev. Lett., 1973, 31, № 20, р. 1234.
12. Индыкул В. П., Панченко И. П., Шapiro В. Д., Шевченко В. И.—Письма в ЖЭТФ, 1974, 20, № 3, с. 153; Физика плазмы, 1976, 2, № 5, с. 775.
13. Барыбин А. А., Горин Ю. Н.—Радиотехника и электроника, 1969, 14, № 7, с. 1257.
14. Ivanov B. I., Gorozhanin D. V., Miroshnichenko V. A., Prishcherov V. P. Proc. 3-rd Intern. Conf. on High Power Electron and Ton Beams.—Novosibirsk, 1979, 1, p. 327.
15. Corgnet E., Davis H. A., Starke T. P., Rienstra W. W., Uglum J. R.—Phys. Fluids, 1981, 24, № 11, p. 2039.
16. Иванов Б. И.—ЖЭТФ, 1968, 55, № 7, с. 43.
17. Горожанин Д. В., Иванов Б. И., Прищепов В. П.—ЖТФ, 1975, 45, № 1, с. 41.
18. Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Физическая кинетика.—М.: Наука, 1979, § 64.
19. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны.—М.: Сов. радио, 1957, § 74.
20. Ago M., Daido Y., Takagi T.—J. Phys. Soc. Japan, 1972, 33, № 2, p. 519.
21. Капчинский М. И., Юдин Л. А.—ЖТФ, 1981, 51, № 9, с. 1984.
22. Шapiro В. Д., Шевченко В. И.—ЖЭТФ, 1962, 42, № 6, с. 1515.
23. Седзава Т.—ТИИЭР, 1978, 66, № 1, с. 17.

Поступила в редакцию
5 июля 1983 г.

OSCILLATION GENERATION USING ANOMALOUS DOPPLER EFFECT

D. V. Gorozhanin, B. I. Ivanov, M. I. Kapchinskij

Excitation of nonsymmetrical type oscillations in a helical resonator with an electron beam in a magnetic field was experimentally investigated. It was stated that oscillation generation involves an increase of energy of transversal motion of beam electrons. A ratio of that energy to the total energy of a cyclotron wave was studied both theoretically and experimentally.