

УДК 621.384.6:533.951

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С РЕЗОНАТОРНОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СТРУКТУРОЙ ТИПА H

Д. В. Горожанин, У. А. Добранос, Б. У. Иванов

При взаимодействии электронного пучка с резонатором типа H исследованы вопросы: аномальный эффект Доплера на электронной циклотронной частоте с возбуждением в электронном пучке медленных циклотронных волн, аномальный эффект Доплера на плазменной частоте с возбуждением медленных плазменных волн, энергетические соотношения для медленных плазменных волн, влияние отраженных электронов и циклотронного поглощения на развитие неустойчивостей.

Резонаторные замедляющие структуры типа H (резонаторы типа H) применяются в линейных ускорителях ионов [1]. От резонаторов на быстрых H -волнах (применяемых, например, в гиротронах) они отличаются наличием кольцевых электродов ("трубок дрейфа"), расположенных на оси резонатора и закрепленных поочередно на встречных штыревых либо гребенчатых подвесках (рис. 1). Такая структура обеспечивает наличие медленной пространственной гармоник

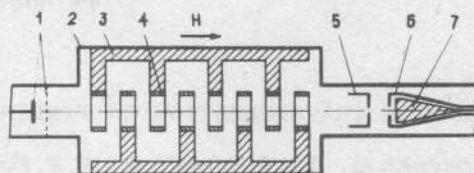


Рис. 1.

и продольного ВЧ поля на оси (противоположного по фазе в соседних зазорах: π -тип), что создает условия для резонансного ускорения заряженных частиц. В связи с разработкой новых методов ускорения ионов волнами плотности заряда (ВПЗ) - медленными циклотронными и медленными плазменными волнами (МЦВ и МПВ), распространяющимися в интенсивных электронных пучках (ЭП) [2, 3] - предложено использовать структуры типа H в качестве систем для эффективного возбуждения ВПЗ

на аномальном эффекте Доплера (АЭД) [4 - 8]. При этом могут быть выполнены такие существенные требования, как аксиальная симметрия и малая фазовая скорость возбуждаемых ВПЗ, высокие напряженности ВЧ полей, хорошая связь с электронным пучком, большой предельный ток при распространении ЭП в структуре, достаточная механическая стабильность и точность изготовления. Особо нужно отметить следующее важное преимущество резонаторов типа *H*: благодаря трубкам дрейфа, задающим вблизи оси аксиально-симметричное ВЧ поле, они могут возбуждать на основном типе колебаний аксиально-симметричные ВПЗ с замедлением $\sim 10^{-1} - 10^{-2}$. В то же время такие известные структуры, как спираль, многозаходная спираль, лайнер с резистивными стенками и другие, с наибольшим инкрементом возбуждают ВПЗ дипольного типа с азимутальным индексом $|m| = 1$ (см. [2], с. 145), которые не пригодны для ускорения ионов. (В [9, 10] экспериментально исследовалось возбуждение несимметричных, с $m = -1$, и усиление симметричных, с $m = 0$, МЦВ при взаимодействии ЭП со спиральными структурами на АЭД.) Помимо ВПЗ, для ускорения ионов могут быть использованы собственные колебания резонаторов типа *H*, возбуждаемые интенсивными ЭП на циклотронной [4, 7] либо черенковской [11] неустойчивости. Структуры типа *H* могут оказаться полезными и для решения некоторых задач электроники СВЧ: физические исследования, применение в длинноволновых ЛБВ и ЛОВ и т. д. Следует отметить, что теоретически такие структуры исследованы мало. В настоящей статье приводятся результаты экспериментальных исследований возбуждения МЦВ и МПВ, а также ряда физических эффектов при взаимодействии ЭП мощностью $10^2 - 10^4$ Вт с резонатором типа *H*. Часть данного материала кратко изложена в [6, 12]. Эксперименты по возбуждению МЦВ большой амплитуды при взаимодействии интенсивного ЭП с резонатором типа *H* описаны в [8].

1. Условия эксперимента. Дисперсионные зависимости. Схема эксперимента приведена на рис. 1. В нее входят электронная пушка 1, резонатор типа *H* 2 с кольцевыми электродами 4, закрепленными на встречных плоских гребенчатых подвесках 3, коллектор электронов (цилиндр Фарадея) 5, коаксиальный ВЧ коллектор 6, 7. Вся система помещалась в однородное магнитное поле, создаваемое соленоидом. Резонатор имел в своей средней части две СВЧ петли связи, расположенные напротив друг друга вблизи стенок. Петли связи (на рисунке не показаны) и подвески 3 находились во взаимно перпендикулярных плоскостях. Резонатор возбуждался либо внешним ВЧ генератором, либо пучком. Регистрация колебаний производилась ВЧ приемником или, после детектирования, осциллографом. Коаксиальный ВЧ коллектор (КК), с наружным экраном 6 и внутренним проводником 7,

соединялся согласующим коническим переходом с ВЧ кабелем и далее с ВЧ приемником. КК использовался для измерения ВЧ составляющей тока ЭП (см. ниже, разд. 3) и для отражения части ЭП назад, в резонатор (разд. 4).

Параметры ЭП: энергия до 30 кэВ, ток до 1 А, длительность импульса около 100 мкс, диаметр пучка 1 см, пучок сплошной. ЭП распространялся по оси системы в вакууме при давлении, не превышающем 10^{-6} Тор. Параметры магнитного поля: напряженность H_0 до 1500 Э, нестабильность во времени и неоднородность в пространстве на оси резонатора менее 1%.

Параметры резонатора: длина $L = 300$ мм, внутренний диаметр 100 мм, частота основного (π) типа колебаний $\omega/2\pi = 625$ МГц, добротность $Q = 3500$, погонное шунтовое сопротивление $R_{ш} = 9$ МОм/м. Замедляющая структура состояла из четырех пространственных периодов $D = 72$ мм. Длина кольцевого электрода $l = 18$ мм, его наружный (внутренний) диаметр 30(22) мм, длина зазора между электродами $l_z = 18$ мм ($D = 2l + 2l_z$). На основном типе колебаний (1-я пространственная гармоника) распределение ВЧ поля по длине резонатора вблизи оси, измеренное методом возмущающего тела, может быть приблизительно представлено выражением

$$E \approx E_0 \cos \frac{2\pi}{D} z \cos \frac{\pi}{L} z = \frac{1}{2} E_0 \cos(k_0 + k_z)z + \frac{1}{2} E_0 \cos(k_0 - k_z)z, \quad (1)$$

т.е. вблизи оси поле является суперпозицией волн с постоянными распространения

$$k = \pm(k_0 + k_z), \quad k' = \pm(k_0 - k_z), \quad k_0 \approx \frac{2\pi}{D}, \quad k_z \approx \frac{\pi}{L}, \quad (2)$$

причем k_z определяется граничными условиями менее точно, чем k_0 ; всего лишь одной полуволной по длине резонатора, к тому же поправки в k_z вносят отверстия для пропуска ЭП и другие факторы.

На рис. 2 представлена $\omega - k$ -диаграмма, на которой показаны исследуемые в данной работе виды взаимодействия ЭП с собственными волнами пространственно-периодической структуры (ППС) резонатора. Дисперсионные зависимости ВПЗ, возбуждаемых в ЭП, изображены для случая малой электронной концентрации (n_e):

$$\omega^2 \gg \omega_b^2 = \frac{4\pi n_e e^2}{m\gamma^3}, \quad (3)$$

где ω - частота колебаний, ω_b - ленгмюровская плазменная частота

пучка, e и m - заряд и масса электрона, γ - релятивистский фактор.

Экспериментальные точки на дисперсионной кривой ППС определены для частот резонатора $\omega_r^{(n)}$, возбуждаемых на эффекте Черенкова пучком со скоростью $v_0^{(n)}$:

$$\omega_r^{(n)} \approx K^{(n)} v_0^{(n)}, \quad K^{(n)} = n \pi / L, \quad (4)$$

где $n = 5, \dots, 9$, L - длина резонатора. Штриховой линией на рис. 2 отмечена частота основного типа колебаний ($\omega_r / 2\pi = 625$ МГц).

Пересечение дисперсионных кривых означает выполнение условий синхронизма между собственными волнами пучка и структуры, приводящее к резонансному взаимодействию волн [13 - 15]. В работе исследуются следующие виды взаимодействия.

1) Взаимодействие МПВ пучка (разд. 3, 4; рис. 2, прямые 1 и 1') с попутными прямой и обратной волнами структуры (в формуле (4)

$n = 8$ и $n = 7$), т.е. неустойчивость типа ЛБВ и ЛОВ на коллективном эффекте Черенкова (АЭД на плазменной частоте)

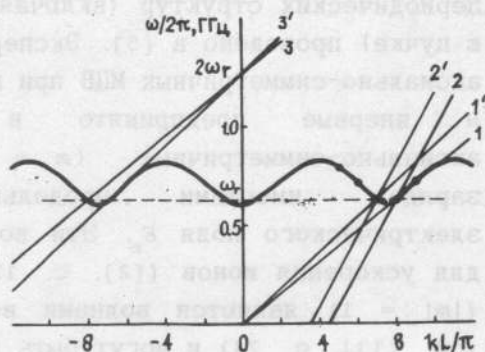


Рис. 2.

$$\omega_r = (K_0 \pm K_z) v_0 = \omega_q, \quad \omega_q = q \omega_b, \quad (5)$$

где v_0 - скорость ЭП, q - коэффициент редукции плазменной частоты в ограниченном по радиусу ЭП (см. [13], с. 70; q определяется частотой колебаний, радиусом и скоростью пучка и слабо зависит от радиуса окружающего пучок проводника; в условиях эксперимента $q \approx 0,3$).

2) Взаимодействие МЦВ пучка (разд. 2; рис. 2, прямые 2 и 2') с попутными прямой и обратной волнами структуры ($n = 8$ и $n = 7$), т.е. неустойчивость в случае АЭД на циклотронной частоте

$$\omega_r = (K_0 \pm K_z) v_0 = \omega_H, \quad \omega_H = \frac{eH_0}{mc\gamma}, \quad (6)$$

где ω_H - электронная циклотронная частота, H_0 - напряженность магнитного поля, c - скорость света.

3) Взаимодействие быстрых циклотронных волн (БЦВ) пучка (прямые 3, 3') с встречными прямой и обратной волнами структуры в случае двойного резонанса (см. разд. 5), когда при $\omega_H = 2\omega_r$ одновременно

выполняются условия возбуждения попутных волн структуры на коллективном эффекте Черенкова (5) и циклотронного поглощения встречных волн структуры на нормальном эффекте Доплера (НЭД):

$$\omega_r = (k_0 \pm k_z)v_0 + \omega_H \quad (7)$$

(Поглощение на НЭД экспериментально исследовалось в [16, 17].)

2. Возбуждение медленных циклотронных волн. Теоретическое исследование возбуждения МЦВ с помощью пространственно-периодических структур (включая случай $\lambda_b \sim D$, где λ_b - длина волны в пучке) проведено в [5]. Экспериментальное исследование возбуждения аксиально-симметричных МЦВ при взаимодействии ЭП со структурами типа *H* впервые предпринято в [6]. Следует отметить, что аксиально-симметричные ($m = 0$) МЦВ являются волнами плотности заряда, имеющими продольную составляющую напряженности электрического поля E_z . Эти волны (МЦВПЗ) могут быть использованы для ускорения ионов ([2], с. 129). В отличие от них поперечные МЦВ ($|m| = 1$) являются волнами возмущения поперечной скорости пучка (см. [13], с. 74) и могут быть использованы в СВЧ генераторах.

Эксперимент проводился при энергии пучка $W = 10 \div 30$ кэВ, токе $I = 10^{-2} \div 1$ А. Возбуждаемые пучком в резонаторе типа *H* колебания через волномер, настроенный на определенную частоту, подавались на детектор и далее на осциллограф. В первую очередь исследовались условия возбуждения колебаний на основной моде в зависимости от скорости пучка и напряженности магнитного поля. Обнаружено возбуждение колебаний (мощностью $\sim 1 - 10$ Вт) при параметрах, удовлетворяющих генерации на АЭД (6).

Получены соответствующие осциллограммы (аналогичные приведенным в [9] на рис. 3), на которых верхний луч представляет импульс напряжения на пушке, нижний - огибающую ВЧ импульса генерации. В серии *a, б, в* магнитное поле фиксировалось, а напряжение на пушке увеличивалось от *a* к *в*. Условия подбирались так, что резонансное возбуждение МЦВ в случае *a* осуществлялось в максимуме напряжения, а в случаях *б* и *в* - слева и справа от максимума. Соответственно в случае *a* наблюдался один пик генерации, в случаях *б* и *в* - два пика. Численные значения для случая *a*: $H = 170$ Э, $v_0 = 6,1 \cdot 10^9$ см/с, $k_0 + k_z = 1,0$ см⁻¹, $(\omega + \omega_H)/v_0 = 1,1$ см⁻¹, т.е. условие (6) выполнялось.

В другой серии осциллограмм (*г, д, е*) напряжение на пушке было фиксированным, а магнитное поле уменьшалось от *г* к *е*. При этом резонансное возбуждение МЦВ в случае *г* осуществлялось в максимуме

напряжения, а в случаях *д* и *е* - слева и справа от этого максимума, так как в соответствии с (6) резонансное условие с уменьшением *H* должно выполняться при меньших скоростях электронов. Численные значения для случая *г*: $v_0 = 6,4 \cdot 10^9$ см/с, $H = 195$ Э, $(\omega + \omega_H)/v_0 = 1,1$ см⁻¹ $\approx k_0 + k_z$, т.е. и в этом случае условие (6) выполняется. Аналогичные серии измерений были выполнены и при других параметрах эксперимента.

Мощность генерируемых колебаний резонансным образом зависела от напряженности магнитного поля. На рис. 3 представлена соответствующая резонансная зависимость для следующих параметров: $W = 28$ кэВ, $I = 250$ мА, экспериментальное значение резонансного магнитного поля $H = 236$ Э $\pm 10\%$, расчетное значение $H = 244$ Э. Относительная полуширина резонанса $(\Delta\omega_H)_{0,5}/\omega_H \approx 0,008$.

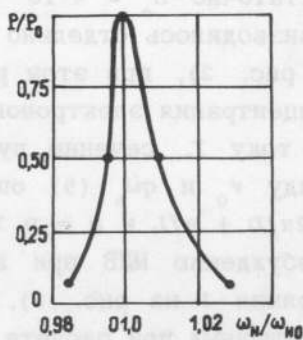


Рис. 3.

Экспериментально измерен ряд значений ω_H и v_0 , при которых в структуре возбуждаются колебания, резонансным образом зависящие от магнитного поля. В пределах ошибок измерений ($\sim 10\%$) эти значения удовлетворяют зависимости $\omega + \omega_H = kv_0$, где $k = k_0 \pm k_z \approx k_0$, т.е. условию генерации колебаний на АЭД (6). В данном случае специальных экспериментов по отдельной идентификации возбуждения МЦВ на прямой и обратной (*2* и *2'* на рис. 2) волнах структуры не проводилось.

Таким образом, в экспериментах наблюдалась генерация колебаний на АЭД при прохождении ЭП через резонатор типа *H* во внешнем резонансном магнитном поле. При этом в ЭП возбуждались МЦВ с фазовой скоростью $v_\phi = \omega/k < v_0$.

В развитие этих исследований проводились эксперименты по взаимодействию ЭП с мощностью $\sim 10^8$ Вт с резонатором типа *H* [8]. При этом в резонаторе возбуждались СВЧ колебания с активной мощностью около 1 МВт, а в пучке - МЦВ с амплитудой $E_z \sim 10^5$ В/см. Эти эксперименты создают базу для реализации новых перспективных методов ускорения ионов [2 - 4, 18].

3. Возбуждение медленных плазменных волн. Измерение энергетических соотношений. Для возбуждения МПВ при взаимодействии ЭП с резонатором типа *H* выполнялось условие (5); при этом энергия пучка $W = 5 - 10$ кэВ, ток $I = 1 - 100$ мА, $H_0 \approx 1$ кЭ, $\omega^2, \omega_H^2 \gg \omega_q^2$. Условия

эксперимента позволяли, в отличие от обычной ситуации для ЛБВ, ЛОВ (см. [15], с. 173), возбуждать МПВ отдельно от быстрой ПВ. Действительно, МПВ и БПВ разделяются, если $\omega_q > \Delta\omega_{0,5} = \Delta(\omega - kv_0) \approx \approx \Gamma m\omega + |k\delta v_0|$, $\Delta\omega_{0,5}$ - полуширина резонанса, $\Gamma m\omega$ - инкремент возбуждения колебаний, δv_0 - разброс электронов по скоростям. При резонансном возбуждении колебаний в случае малых токов ЭП экспериментальная полуширина $\Delta\omega_{0,5} \leq 0,01 \omega \approx 4 \cdot 10^7$ рад/с (см. также рис. 3). Отсюда найдем, что в нашем случае для разделения МПВ и БПВ достаточно $n_e \geq 4 \cdot 10^6$ см⁻³, $I \geq 3$ мА. Кроме того, возбуждение МПВ производилось отдельно на прямой и обратной волнах структуры (1 и 1' на рис. 2), при этом различие в энергии электронного пучка ~1 кэВ. Концентрация электронов в пучке n_e и плазменная частота определялись по току I , сечению пучка и ускоряющему напряжению. Для МПВ связь между v_0 и $q\omega_b$ (5) определялась при расчетных n_e , $k = k_0 + k_z = = 2\pi/D + \pi/L$ и $q = 0,3$. Экспериментальные значения, соответствующие возбуждению МПВ при взаимодействии ЭП с прямой волной структуры (прямая 1 на рис. 2), отклоняются от расчетных в пределах ошибок, допущенных при расчете q, k и измерениях (~10%).

Условие (5) можно трактовать как неустойчивость на АЭД для продольных осцилляторов [15, 19]. Согласно [20] при неустойчивости на АЭД энергия направленного движения осцилляторов идет как на ВЧ излучение, так и на увеличение внутренней энергии, в данном случае - энергии продольных колебаний. При излучении мощности $P_{ВЧ}$ энергия продольных колебаний возрастает в соответствии с энергетическими соотношениями (ЭС) [21]:

$$\frac{|W_{пл}|}{\tilde{W}_{||}} = \frac{|P_{пл}|}{\tilde{P}_{||}} = \frac{P_{ВЧ}}{\tilde{P}_{||}} = \frac{2v_{\phi}}{v_0 - v_{\phi}} = \frac{2\omega}{\omega_q}, \quad \frac{\tilde{W}_{||}}{W_{||}} = \frac{\tilde{P}_{||}}{P_{||}} = \frac{1}{2}, \quad (8)$$

где $W_{пл}$ - энергия плазменной волны, $\tilde{W}_{||}$ и $W_{||}$ - кинетическая и полная энергия продольных колебаний электронного пучка, $P_{пл}$, $\tilde{P}_{||}$, $P_{||}$ - соответствующие мощности, v_{ϕ} - фазовая скорость волны; формула выведена в приближении $\omega_q \ll \omega$, которое в экспериментах выполняется. Из (8) можно найти верхний предел эффективности преобразования (η) энергии направленного движения ЭП в ВЧ излучение на АЭД: как и для случая поперечных (ларморовских) осцилляторов [9] $\eta = v_{\phi}/v_0$.

При измерении ЭС ВЧ мощность, генерируемая пучком в резонаторе ($P_{ВЧ}$), определялась по абсолютной величине с использованием петель связи и детекторного устройства, предварительно откалиброванных с помощью генератора стандартных сигналов и ступенчатого аттенюатора. Одновременно по ВЧ составляющей плотности тока пучка (\tilde{j}) на

экранированный коллектор коаксиального типа (блоки 6, 7 на рис. 1), согласованный со входом селективного калиброванного приемника, определялась переменная составляющая скорости электронов в пучке (\tilde{v}), а по ней находилась кинетическая составляющая мощности продольных колебаний электронов в пучке:

$$\tilde{v} = \frac{\tilde{j}}{en_0} (1 - v_0/v_\phi), \quad \tilde{P}_{\parallel} = \frac{1}{2e} m \tilde{v}^2 I. \quad (9)$$

Таким образом, были экспериментально измерены ЭС для МПВ и с удовлетворительной точностью ($\approx 10\%$) подтверждено соотношение $\tilde{P}_{\parallel}/P_{\text{вч}} = \omega_q/2\omega$ для различных ω_q . Следует отметить, что измерения дисперсионной зависимости для МПВ и ЭС согласуются между собой и с формулами (5), (8) при одном и том же коэффициенте редукции $q \approx 0,3$.

4. Влияние отраженных электронов на развитие неустойчивостей. При взаимодействии ВПЗ пучка с периодической неограниченной структурой развивается либо конвективная неустойчивость (чему соответствует знак "+" в формулах (5) и (6) и прямые 1, 2 на рис. 2), либо абсолютная (знак "-" в (5) и (6) и прямые 1', 2' на рис. 2). В резонаторных структурах развивается глобальная неустойчивость (ГН), а различие между конвективной (КН) и абсолютной (АН) неустойчивостями практически исчезает ([14], § 65). Однако, как показано в данном разделе, с помощью некоторых приемов можно отличить, какая неустойчивость, КН или АН, лежит в основе наблюдаемой ГН. В соответствии с этим будем различать глобально-конвективную (ГКН) и глобально-абсолютную (ГАН) неустойчивости. Так же как и в разд. 3, изучались неустойчивости, развивающиеся в резонаторе при взаимодействии с ЭП в условиях возбуждения МПВ. Измерения проводились по схеме, в которой небольшая доля ($< 10\%$) ЭП, прошедшего через резонатор и возбудившего в нем колебания, отражалась обратно в резонатор путем подачи на электрод 7 (см. рис. 1) соответствующего потенциала. Расстояние от коаксиального коллектора 6, 7 (в данном случае - отражателя) до резонатора, т.е. длину пролета отраженных электронов, можно было менять. В зависимости от фазовых соотношений отраженный пучок (с возбужденной в нем МПВ) изменял условия возбуждения колебаний в резонаторе первичным пучком. Исследовалось влияние отраженных электронов на ГАН и ГКН в режимах стартового тока и насыщения колебаний. Энергия ЭП для возбуждения ГАН была больше, чем для ГКН на величину ~ 1 кэВ (см. прямые 1' и 1 на рис. 2). Как и следовало ожидать, в обоих режимах ГКН гораздо чувствительнее к отраженным электронам, чем ГАН. Кроме того, влияние отраженного пучка на ГКН и

ГАН оказывается противофазным (при малой длине пролета). Это объясняется тем, что в случае ГКН отраженные электроны влияют на положительную обратную связь через отраженную волну резонатора, а в случае ГАН - через падающую волну. В резонаторе отраженная и падающая волны находятся в противофазе: значит, если одна неустойчивость отраженным пучком усиливается, то другая подавляется. На рис. 4а, б, где приведена зависимость генерируемой ВЧ мощности от тока пучка для конкретных условий эксперимента, видно, что при включении отражателя пучка стартовый ток для ГАН уменьшается (рис. 4а), т.е. неустойчивость усиливается, а для ГКН - увеличивается (рис. 4б), т.е. неустойчивость подавляется. (На рис. 4а, б темные точки соответствуют включенному отражателю, светлые - выключенному.)

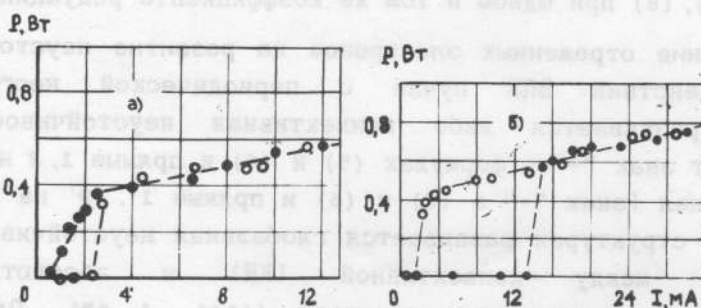


Рис. 4.

Исследования в режиме насыщения (рис. 5) проводились при фиксированном токе пучка ($I = 18$ мА). Отражатель был включен и его положение менялось, начиная от минимального расстояния до резонатора (чему на рис. 5 соответствует $z = 30$ см) до максимального ($z = -2$ см). Видно, что уровень ВЧ мощности для ГАН (верхняя кривая) и ГКН (нижняя кривая) изменяются с периодами:

$$I_{\text{АН}} = \frac{\pi}{K_{\text{АН}}} \approx \frac{\pi}{K_0 - K_z}, \quad I_{\text{КН}} = \frac{\pi}{K_{\text{КН}}} \approx \frac{\pi}{K_0 + K_z}, \quad (10)$$

причем области генерации на ГКН чередуются с зонами срыва (показаны пунктиром). Перемещая отражатель, можно с достаточной точностью определить продольную постоянную распространения и идентифицировать ГКН или ГАН. На рис. 5 видна зависимость фазового сдвига для ГКН и ГАН от положения отражателя: если при $z = 27$ см (т.е. почти сразу после резонатора) ГКН и ГАН находятся в противофазе, то при $z = 11$ см - в фазе. Вычисляя при $K_{\text{КН}} = K_0 + K_z$, $K_{\text{АН}} = K_0 - K_z$ расстояние Δz , на котором возникает разность фаз $\Delta\varphi = \pi$, получим при $K_z = \pi/L$

(см. (2)): $\Delta z = \frac{1}{2}L = 15$ см, что совпадает с экспериментом. Отметим также, что с увеличением длины пролета влияние отраженных электронов уменьшается, что, по-видимому, связано с кинетическими эффектами, нарушающими фазировку электронов.

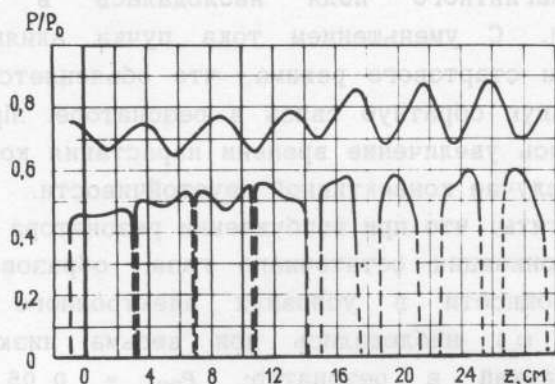


Рис. 5.

5. Влияние циклотронного поглощения на развитие неустойчивостей. В данном разделе исследован случай взаимодействия медленной плазменной волны (МПВ) и быстрой циклотронной волны (БЦВ) электронного пучка при одновременном выполнении равенств (5) и (7), что при $q\omega_b \ll \omega_r$ приводит к условию $\omega_H = 2\omega_r$. Постановка эксперимента такая же, что и в разд. 3. Возбуждение резонатора пучком происходило на основной частоте ω_r при выполнении условия (5). В режиме насыщения при изменении внешнего магнитного поля (при фиксированных параметрах пучка) наблюдалось снижение уровня ВЧ мощности вблизи $\omega_H = 2\omega_r$ и срыв колебаний вблизи $\omega_H = \omega_r$. Вблизи $\omega_H = \omega_r$ срыв колебаний объясняется циклотронным поглощением ВЧ мощности электронами плазмы, образуемой при ионизации остаточного газа пучком и ВЧ полем. По измерениям, основанным на сдвиге собственной частоты резонатора типа *H*, концентрация электронов плазмы $n_p \leq 10^6$ см⁻³. Хотя она приблизительно на порядок меньше, чем концентрация электронов пучка, все же, благодаря большому времени взаимодействия с ВЧ полем, циклотронное поглощение на электронах плазмы может подавить генерацию на коллективном эффекте Черенкова, особенно вблизи ее порога, что и наблюдается. (Циклотронное поглощение в электронных пучках и в плазме экспериментально и теоретически исследовалось в [16, 17, 22].) В области $\omega_H = 2\omega_r$ снижение уровня ВЧ мощности объясняется тем, что одновременно с (5)

выполняется условие (7) возбуждения встречной БЦВ, которая выносит положительную энергию из резонатора (в отличие от МПВ, которая выносит из резонатора отрицательную энергию, что приводит к его возбуждению). Влияние БЦВ на уменьшение уровня МПВ вблизи $\omega_n = 2\omega_r$ увеличивалось с ростом тока пучка. Аналогичная зависимость СВЧ генерации от магнитного поля наблюдалась в релятивистском карсинотроне [23]. С уменьшением тока пучка влияние БЦВ вновь проявлялось вблизи стартового режима, что объясняется воздействием БЦВ на положительную обратную связь в резонаторе. При этом вблизи $\omega_n = 2\omega_r$ наблюдалось увеличение времени нарастания колебаний и даже срыв генерации в случае конвективной неустойчивости.

Следует отметить, что при возбуждении резонатора типа *H* внешним ВЧ генератором ионизация остаточного газа, образование плазмы и поглощение ВЧ мощности в условиях электронного циклотронного резонанса ($\omega_r = \omega_n$) наблюдались при весьма низком уровне ВЧ мощности, поступающей в резонатор: $P_{ВЧ} = 0,05$ Вт. Методом возмущений, с помощью диэлектрического шарика с известными параметрами, было определено, что при $P_{ВЧ} = 0,05$ Вт напряженность поля в центральных зазорах резонатора ≈ 50 В/см. В таком поле при полуширине циклотронного резонанса $\approx 0,05$ электроны могут набрать энергию порядка 100 эВ, что достаточно для ионизации.

В работе экспериментально исследовано взаимодействие электронных пучков с новой для СВЧ электроники (но давно применяемой в линейных ускорителях ионов) резонаторной замедляющей структурой типа *H*. Обосновано применение резонаторов типа *H* для взаимодействия с электронными пучками на аномальном эффекте Доплера и генерации в пучках медленных аксиально-симметричных волн плотности заряда (циклотронных либо плазменных), которые являются весьма перспективными для ускорения интенсивных ионных пучков. Помимо возбуждения таких волн, получены следующие результаты.

Измерены энергетические соотношения для медленных плазменных волн электронного пучка. Наряду с энергетическим соотношением для медленных циклотронных волн [9], они определяют верхний предел эффективности преобразования кинетической энергии направленного движения электронного пучка в энергию ВЧ излучения или энергию ускоренных ионов.

Исследовано влияние отраженных электронов на развитие неустойчивостей в системе с длительным взаимодействием - в данном случае при взаимодействии пучка со структурой типа *H*. Выявлены различия в поведении глобальной неустойчивости в зависимости от того, кинетическая или абсолютная неустойчивость лежит в ее основе.

Отраженные электроны могут быть использованы для управления неустойчивостями.

Исследовано влияние циклотронного поглощения (на электронах плазмы и на встречной быстрой циклотронной волне, по отдельности) при возбуждении неустойчивости на коллективном эффекте Черенкова. Установлено, что даже малая концентрация электронов плазмы (по оценкам, не выше 10^6 см^{-3}) приводит к срыву неустойчивости в случае равенства электронной циклотронной частоты и частоты колебаний. Влияние циклотронного поглощения на быстрой циклотронной волне (при электронной циклотронной частоте равной удвоенной частоте колебаний) велико в области стартовых токов и может приводить к срыву неустойчивости; с ростом тока пучка в режиме насыщения это влияние уменьшается, а затем снова нарастает.

Проведенные исследования, наряду с работой [8], где при взаимодействии интенсивного электронного пучка с резонатором типа H возбуждены медленные циклотронные волны плотности заряда большой амплитуды ($E_z \sim 100 \text{ кВ/см}$), создают экспериментальную основу для развития и реализации новых перспективных методов ускорения [2 - 4, 7, 11, 18].

В заключение авторы благодарят Я. Б. Файнберга, А. К. Березина, И. Н. Онищенко за интерес к работе и обсуждение результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Linear Accelerators/Eds. P.M. Lapostolle and A.L. Septier. - Amsterdam: Morth-Holland Publishing Company, 1970. Pt. C.
2. Collective Methods of Acceleration/Eds. N. Rostoker and M. Reiser. - Chur-London- New York: Harwood Acad. Publ., 1979.
3. Файнберг Я. Б., Буц В. А., Иванов Б. И. В кн.: Плазменная электроника. - Киев: Наукова думка, 1989. с. 252.
4. А. с. N 1343569, приоритет 10.10.83 г. /Иванов Б. И., Онищенко И. Н. - Оpubл. в Б. И. 1987. N 37. с. 238.
5. Блюх Ю. П., Бородкин А. В., Иванов Б. И. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Техника физического эксперимента. 1984. Вып. 2(19). с. 69.
6. Горожанин Д. В., Иванов Б. И. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Техника физического эксперимента. 1984. Вып. 2(19). с. 72.
7. Иванов Б. И., Онищенко И. Н. и др. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Техника физического эксперимента. 1987. Вып. 4(35). с. 40.
8. Гапанович В. Г., Иванов Б. И., Капчинский М. И. и др. // ЖТФ. 1990. т. 60. Вып. 1. с. 193.
9. Горожанин Д. В., Иванов Б. И., Капчинский М. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1984. т. 27. N. 7. с. 880.

10. Ivanov B.I., Gorozhanin D.V. et al. Proc. 3-rd Intern. Conf. on High Power Beams. - Novosibirsk: Inst. of Nucl. Phys., 1979. V.1. P. 327.
11. Абраменко Н. И., Гаврилов Н. М., Громов Е. В. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Техника физического эксперимента. 1985. Вып. 2(23). С. 48.
12. Горожанин Д. В., Иванов Б. И. Препринт ХФТИ 87-6. - М.: ЦНИИАтоминформ, 1987.
13. Лоиселл У. Связанные и параметрические колебания в электронике. - М.: ИЛ., 1963. - 352 с.
14. Лифшиц Е. М., Пятаевский Л. П. Физическая кинетика. - М.: Наука, 1979. - 528 с.
15. Рабинович М. И., Трубецков Д. И. Введение в теорию колебаний и волн. - М.: Наука, 1984. - 432 с.
16. Иванов Б. И. //ЖЭТФ. 1968. Т. 55. Вып. 1(7). С. 43.
17. Горожанин Д. В., Иванов Б. И., Капчинский М. И. //ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 11. С. 2177.
18. Маричев С. В., Маркеев А. М., Миронов П. В. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования. 1990. Вып. 7(15). С. 138.
19. Незлин М. В. //УФН. 1976. Т. 120. Вып. 3. С. 481.
20. Гинзбург В. Л., Франк И. М. //ДАН СССР. 1947. Т. 56. N 6. С. 583.
21. Капчинский М. И. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Техника физического эксперимента. 1985. Вып. 2(23). С. 65.
22. Горожанин Д. В., Иванов Б. И., Прищепов В. П. //ЖТФ. 1975. Т. 45. Вып. 1. С. 41.
23. Зайцев Н. И., Ковалев Н. Ф., Кольчугин Б. Д., Фуке М. И. //ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 8. С. 1611.

Харьковский физико-технический
институт АН Украины

Поступила в редакцию
11 сентября 1990 г.

EXPERIMENTAL STUDY OF ELECTRON BEAM INTERACTION WITH
A RESONANT H-TYPE SLOW-WAVE STRUCTURE

D. V. Gorozhanin, I. A. Dobranos, B. I. Ivanov

Electron beam-H-type cavity interaction studies were undertaken to investigate: the anomalous Doppler effect with the excitation of slow cyclotron and slow space-charge waves (SCW, SSCW) of the electron beam; energy relationships for SSCW; the influence of reflected electrons and cyclotron absorption on the instability growth.