

СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

53(048)

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ И АСТРОНОМИИ
И ОТДЕЛЕНИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ АКАДЕМИИ НАУК СССР****(27 — 28 февраля 1985 г.)**

27 и 28 февраля 1985 г. в конференц-зале Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР состоялась совместная научная сессия Отделения общей физики и астрономии и Отделения ядерной физики АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

27 февраля

1. Я. Б. Файнберг. Некоторые вопросы плазменной электроники.
2. М. В. Кузелев, А. А. Рухадзе, П. С. Стрелков, А. Г. Шкварунец. Релятивистская плазменная СВЧ электроника.

28 февраля

3. Г. Т. Зацепин, О. Г. Ряжская. Служба поиска коллапсов звезд в Галактике.

4. В. Н. Гаврин, Г. Т. Зацепин, О. Г. Ряжская. Современное состояние и перспективы проблем детектирования солнечных нейтрино.

5. В. С. Березинский. Нейтринная астрофизика высоких энергий. Краткое содержание трех докладов приводится ниже.

621[3.029.6+.38](048)

М. В. Кузелев, А. А. Рухадзе, П. С. Стрелков, А. Г. Шкварунец. Релятивистская плазменная СВЧ электроника. 1. Введение. Плазменная СВЧ электроника как наука родилась в 1949 г. работами А. И. Ахиезера и Я. Б. Файнберга¹, Д. Бома и Э. Гросса², предсказавших явление индуцированного черенковского излучения электромагнитных волн в плазме пучком быстрых электронов. Это явление открывало возможности эффективного усиления и генерации электромагнитных волн сантиметрового и миллиметрового диапазонов, освоения больших токов электронных пучков и достижения высоких мощностей излучения. Параметры плазменных приборов намного превосходили по оценкам аналогичные параметры приборов вакуумной СВЧ электроники.

Первые же эксперименты показали, что электронные пучки в плазме действительно эффективно возбуждают электромагнитные поля большой амплитуды. Однако эти поля оказались запертыми внутри плазмы и плохо излучались наружу. Это препятствие, обусловленное малостью фазовых скоростей возбуждаемых волн, оказалось трудно преодолимым и сводило на нет все преимущества плазменной электроники. Итог исследований до середины 60-х годов был подведен в монографии³, которая хотя и высказывала оптимизм, но отмечала пока еще неконкурентоспособность приборов плазменной электроники с приборами вакуумной СВЧ электроники. Однако это положение со временем не изменилось.

В начале 70-х годов плазменная СВЧ электроника вновь возродилась, но уже в виде релятивистской. Это возрождение связано с именем М. С. Ра-

биновича, который предложил использовать появившиеся тогда мощные релятивистские электронные пучки для генерации электромагнитного излучения⁴. Ниже обсуждаются достижения этой науки за последние 10 лет и ее перспективы по работам⁴⁻¹⁴.

2. Преимущества релятивистской плазменной СВЧ электроники. В вакуумных СВЧ приборах ток пучка меньше предельного вакуумного тока⁵

$$I_0 = 17 \frac{(\gamma^{2/3} - 1)^{3/2}}{(\Delta/r_b) + 2 \ln(R/r_b)} \text{ (кА);} \quad (1)$$

здесь $\gamma = 1 + (\epsilon/mc^2)$ — релятивистский фактор, R — радиус резонатора, r_b — средний радиус трубчатого электронного пучка с толщиной $\Delta \ll r_b$. Предельный ток (1) ограничивает мощности вакуумных СВЧ приборов. В плазменных же СВЧ приборах можно использовать пучки с током до

$$I_{b, \max} = \gamma \left(\frac{1 - \gamma^{-2}}{1 - \gamma^{-2/3}} \right)^{3/2} I_0. \quad (2)$$

При $\gamma = 3$ ($\epsilon = 1$ МэВ) ток $I_{b, \max} \approx 7I_0$ намного превосходит величину, используемую в релятивистской вакуумной СВЧ электронике.

В вакуумных СВЧ приборах частота усиливаемых волн жестко связана с размерами резонатора, и менять ее плавно практически невозможно. В плазменных же приборах эта частота зависит также от плотности плазмы⁶

$$\omega = \sqrt{\omega_p^2 - k_{\perp}^2 u^2 \gamma^2}, \quad (3)$$

где $\omega_p = \sqrt{4\pi e^2 n_p / m}$, а $k_{\perp}$ — поперечное волновое число усиливаемой волны. Изменением плотности плазмы n_p в интервале

$$k_{\perp 1}^2 u^2 \gamma^2 > \omega_p^2 > k_{\perp 0}^2 u^2 \gamma^2, \quad (4)$$

где $k_{\perp 0}$ и $k_{\perp 1}$ — низшие поперечные волновые числа, можно изменять частоты ω в широком интервале.

Из (3) и (4) следует еще одно преимущество релятивистской плазменной СВЧ электроники. Именно, с ростом γ увеличивается критическая плотность плазмы, выше которой в системе возможно усиление, а вместе с ней растет частота усиливаемой волны, $\omega \leq \omega_p \approx k_{\perp} c \gamma$, что в γ раз превосходит частоты усиливаемых волн в вакуумных системах. Более того, если в вакуумных параметрических системах⁷ можно получать коротковолновое излучение с $\omega \approx k_{\perp} c \gamma^2$, то в соответствующих плазменных источниках $\omega \approx k_{\perp} c \gamma^3$.

Наконец, фазовая скорость волн, усиливаемых релятивистскими пучками, $\omega/k \approx u \approx c$. Коэффициент отражения таких волн от границы плазмы⁸

$$\kappa = \frac{1 - (u/c)}{1 + (u/c)} \approx \frac{1}{4\gamma^2} \ll 1. \quad (5)$$

Малость величины κ снимает проблему вывода СВЧ излучения из плазмы, не говоря уже о том, что высокоэффективные усилители и генераторы СВЧ могут быть реализованы только с использованием низкодобротных резонаторов, что обеспечивается при $\kappa \ll 1$.

Реализация указанных преимуществ релятивистской плазменной СВЧ электроники требует создания систем с очень большими магнитными полями:

$$\Omega^2 = \frac{e^2 B_0^2}{m^2 c^2} \gg (\gamma^2 - 1)^2 \omega_p^2. \quad (6)$$

При $\gamma \approx 3$ и $n_p \approx 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ условие (6) выполняется при $B_0 > 50 \text{ кГс}$.

3. Достижения и перспективы релятивистской плазменной СВЧ электроники. Экспериментальные достижения по получению одномодовой генерации в релятивистской плазменной

СВЧ электроники ограничиваются работами ^{8, 9}, где были реализованы два типа плазменных СВЧ генераторов на ТЕМ-моде (основная мода кабельной волны) плазменного резонатора с тонкой трубчатой плазмой с радиусом r_p и толщиной $\Delta r \ll r_p$ (рис. 1). Оба типа генераторов работали на релятивистском пучке с энергией $\epsilon \approx 450$ кэВ и током $I_b \approx 1-8$ кА. В эксперименте ⁸ пучок инжектировался внутри плазменного цилиндра, т. е. $r_p > r_b$, а в эксперименте ⁹ пучок обдувал плазменный цилиндр, т. е. $r_p < r_b$. Исследовались структура возбуждаемой пучком моды, мощность излучения из плазмы, частотный спектр, зависимость этих величин от плотности плазмы, тока пучка и места его инжекции, от углового разброса электронов пучка. Наличие критической плотности плазмы, выше которой происходит возбуждение волн,

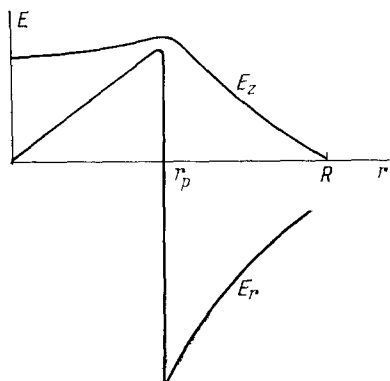


Рис. 1

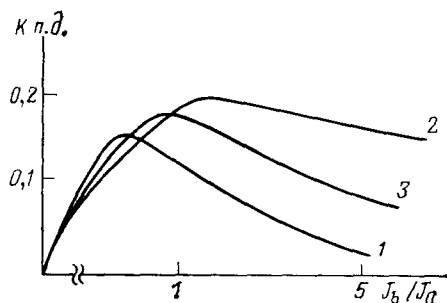


Рис. 2

ее величина, зависимость частоты излучения от плотности плазмы, стартовый ток пучка (либо критическая длина резонатора) для возбуждения генератора и структура поля возбуждаемой моды не только качественно, но и количественно хорошо согласуются с теорией ¹⁰.

Мы здесь приведем зависимость мощности излучения от тока пучка, которая описывается лишь в рамках нелинейной теории, развитой в работах ¹¹⁻¹³, и которая вскрывает новые перспективы сильноточной плазменной СВЧ электроники. В работах ¹¹⁻¹⁴ было показано, что характер взаимодействия релятивистского электронного пучка с плазмой определяется параметром $\mu = (I_b/I_0)^{1/3}$. При $\mu \ll 1$ механизм взаимодействия сводится к вынужденному черенковскому излучению электромагнитных волн электронами пучка. Если при этом неустойчивость носит одночастичный характер, то эффективность (к. п. д.) излучения растет с током как $I_b^{1/3}$. Однако при $\mu > 1$ механизм пучковой неустойчивости существенно изменяется, он приобретает характер безызлучательного фазового перехода и сопровождается глубокой модуляцией самого пучка. В результате резко падает КПД излучения как I_b^{-1} (кривая 1 на рис. 2).

В работах ¹² показано, что выбором места инжекции пучка можно ослабить действие ВЧ пространственного заряда пучка и даже полностью скомпенсировать его. При этом неустойчивость остается излучательной и при $\mu \gg 1$, к. п. д. излучения существенно возрастает и падает с током слабо, как $I_b^{-1/3}$ (кривая 2 на рис. 2).

Медленное падение КПД излучения с током (кривая 3 на рис. 2), как $I_b^{-1/2}$ при $\mu \gg 1$, должно наблюдаться и при коллективном механизме пучковой неустойчивости, который реализуется при инжекции сильноточного пучка в плазму докритической плотности ¹³, либо когда пучок и плазма сильно разведены в пространстве ¹⁴.

Зависимости мощности излучения от тока пучка, наблюдаемые в экспериментах ^{8,9} и приведенные на рис. 3 и 4 соответственно, свидетельствует скорее об одночастотном механизме неустойчивости с большим ВЧ пространственным зарядом пучка в области больших токов. Поэтому необходимо

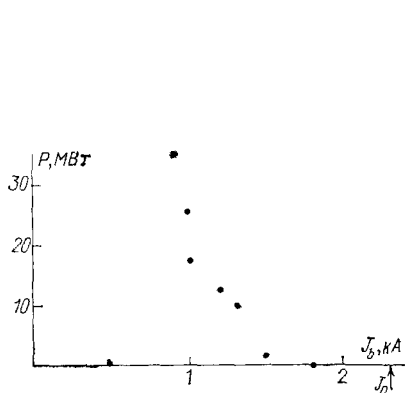


Рис. 3.

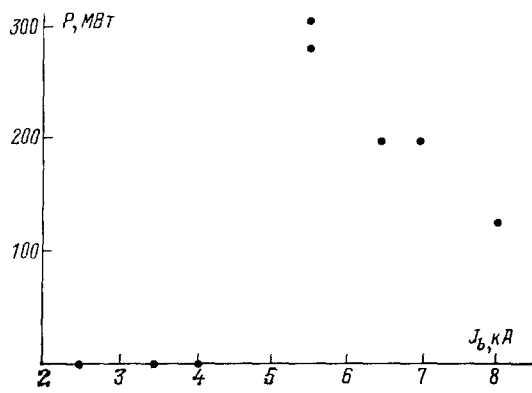


Рис. 4

проведение дальнейших исследований с целью реализаций указанных выше высокоэффективных режимов работы плазменных СВЧ генераторов

4. **З а к л ю ч е н и е.** Таким образом, релятивистская плазменная СВЧ электроника, в особенности экспериментальная, сделала только первые шаги. Теория уже сегодня сформулировала ряд физических проблем, связанных с релятивизмом и сильноточностью электронных пучков, которые требуют экспериментального исследования. Много проблем и у теории, например обобщение результатов, полученных для приборов с черенковским возбуждением волн, на другие механизмы возбуждения.

Однако уже из результатов работ ^{8,9} следует, что релятивистская плазменная СВЧ электроника может успешно конкурировать с вакуумной электроникой. Об этом свидетельствует не только хорошее согласие экспериментов с теорией, но и значения достигнутых мощностей излучения в сантиметровом диапазоне длин волн (≈ 200 МВт) и к.п.д. излучения ($\approx 10-15\%$), сравнимые со значениями вакуумных приборов. Если добавить, что в экспериментах реализована значительная перестройка частоты излучения в интервале 1,8—3,2 см, то можно надеяться, что не далек тот день, когда будут создаваться новые уникальные плазменные усилители и генераторы СВЧ излучения и плазменная СВЧ электроника прочно утвердится в науке и технике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахнeзeр А. И., Фaйнбeрг Я. Б.— ДАН СССР, 1949, т. 65, с. 555.
2. Bohm D., Gross E.— Phys. Rev., 1949, v. 75, p. 1851.
3. Барнашевский Г. А., Богданов Е. В., Кислов В. Я., Чернов З. С. Плазменные усилители и генераторы СВЧ.— М.: Сов. радио, 1965.
4. Рабинович М. С., Рухадзе А. А.— Физ. плазмы, 1976, т. 2, с. 715.
5. Богданкевич Л. С., Рухадзе А. А.— УФН, 1971, т. 103, с. 609.
6. Агонов В. I., Bogdankevich L. S., Ruchadze A. A.— Plasma Phys., 1976, v. 18, p. 101.
7. Генераторы когерентного излучения на свободных электронах/Под ред. А. А. Рухадзе.— М.: Мир, 1983.
8. Кузелев М. В., Мухаметзянов Ф. Х., Рабинович М. С. и др.— ДАН СССР, 1982, т. 267, с. 829; ЖЭТФ, 1982, т. 83, с. 1352.
9. Стрелков П. С., Шкварунец А. Г.— В кн. Тезисы докладов IV Всесоюзного семинара по релятивистской СВЧ электронике.— М.: МГУ, 1984, с. 76.
10. Кузелев М. В., Мухаметзянов Ф. Х., Шкварунец А. Г.— Физ. плазмы, 1983, т. 9, с. 1137.
11. Айзацкий Н. И.— Ibidem, 1980, т. 6, с. 597.

12. К у з е л е в М. В. и др.— Письма ЖЭТФ, 1980, т. 6, с. 1388; Физ. плазмы, 1982, т. 8, с. 537; Письма ЖТФ, 1984, т. 10, с. 228.
13. Б л и о х Ю. П., К а р а с ь В. И., Л ю б а р с к и й М. Г. и др.— ДАН СССР, 1984, т. 275, с. 56.
14. К у з е л е в М. В., П а н и н В. А.— Изв. вузов. Сер. «Физика», 1985, № 3, с. 32.