

МАЗЕРЫ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ С БРЭГГОВСКИМИ РЕЗОНАТОРАМИ

*И.Е.Ботвинник, В.Л.Братман, А.Б.Волков, Н.С.Гинзбург,
Г.Г.Денисов, Б.Д.Кольчугин, М.М.Офицеров, М.И.Петелин*

Применение высокоселективных открытых резонаторов, основанных на резонансном рассеянии волн гофрированными металлическими стенками, позволило реализовать эффективные "силы точные" мазеры на свободных электронах – убитрон и, впервые, мазер на циклотронном авторезонансе.

Выдвинутое в работе ¹ предложение об использовании доплеровского преобразования частоты излучения электронов-осцилляторов, перемещающихся с релятивистской поступательной скоростью v_{\parallel} ,

$$\omega = kv_{\parallel} + \Omega \quad (1)$$

породило несколько классов когерентных и квазикогерентных источников электромагнитных волн в диапазоне $1 - 10^{-11}$ см (в (1) $\omega_1 k$ – частота и волновой вектор волны, Ω – частота колебаний частиц). Соответствующие источники когерентного (коллективного, индуцированного) излучения – лазеры и мазеры на свободных электронах (ЛСЭ и МСЭ) – обеспечивают излучение с импульсной мощностью порядка 10^4 Вт на волне $3,4$ мкм ² и $10^6 \div 3 \cdot 10^7$ Вт на волнах от 1 см до 0,4 мм (см., например, ³). Однако ЛСЭ и МСЭ, используемые в качестве инжекторов сильноточные электронные ускорители ³, из-за отсутствия (в режиме сверхызлучения) или несовершенства систем обратной связи обладали до сих пор низкой эффективностью и низкой степенью когерентности сигнала.

Основная трудность в создании электродинамических систем, адекватных сильноточным МСЭ и ЛСЭ, заключается в необходимости одновременно удовлетворить требованиям, чтобы такая система 1) обеспечивала селективное возбуждение моды, образованной потоком лучей, которые распространялись бы под малым углом ϕ к поступательной скорости частиц ¹: $\phi \lesssim \gamma^{-1}$ (γ – релятивистский фактор электронов), и 2) могла бы транспортировать интенсивный электронный поток. Решением проблемы может служить использование высокоселективных резонаторов в виде отрезка металлического волновода с гофрированной боковой стенкой ⁴, где при брэгговском условии

$$k_{\parallel}^{+} - k_{\parallel}^{-} \approx 2\pi/d \quad (2)$$

реализуется резонансное рассеяние волн (k_{\parallel}^{\pm} – продольные волновые числа попутной и встречной электронов волн, d – период гофрировки).

Наряду с совершенствованием электродинамических систем развитие МСЭ и ЛСЭ должно включать в себя и совершенствование активного вещества. Очевидно, что каждому типу инжекторов и каждому частотному диапазону должен соответствовать свой наиболее удобный способ придания электронам осцилляторного движения. Пока же в большинстве работ в качестве осцилляторов использовались электроны, колеблющиеся с баунс-частотой $\Omega = \Omega_b = 2\pi v_{||}/D$ в периодическом магнитном поле (D – период поля). МСЭ и ЛСЭ соответствующего типа – убитроны – действительно весьма перспективны для продвижения в оптической, а возможно и в более коротковолновые диапазоны. Что же касается относительно длинных волн, то здесь наиболее привлекателен мазер на циклотронном авторезонансе (МЦАР) ⁵, где электроны, вращающиеся с частотой $\Omega = \omega_H = eH_0/mc\gamma$ в однородном магнитном поле H_0 , взаимодействуют с волной, фазовая скорость которой $\omega/k_{||}$ близка к скорости света. В таких условиях, близких к авторезонансу ⁶, отклонения частиц от синхронизма с волной, вызванные изменением их энергий и поступательных скоростей, почти полностью компенсируют друг друга: $\Delta\omega_H \simeq -\Delta(k_{||}v_{||})$. Благодаря этому МЦАР, согласно теории, должен обладать более высоким КПД и быть менее чувствительным (адаптивным) к начальному разбросу скоростей электронов, чем другие МСЭ и ЛСЭ.

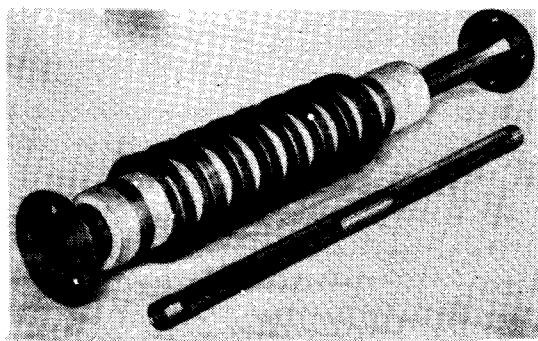


Рис. 1. Магнитная система и резонатор мазера на свободных электронах

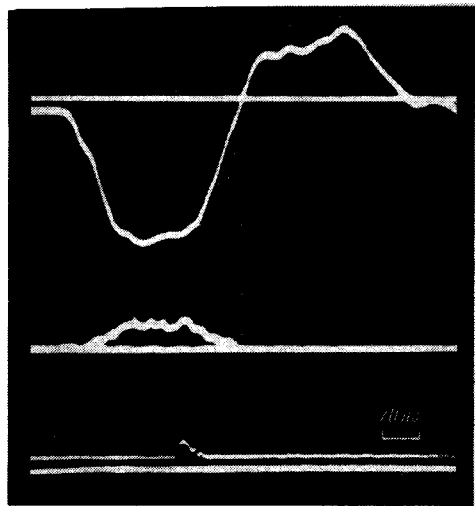


Рис. 3. Осциллограммы напряжения, тока и СВЧ излучения

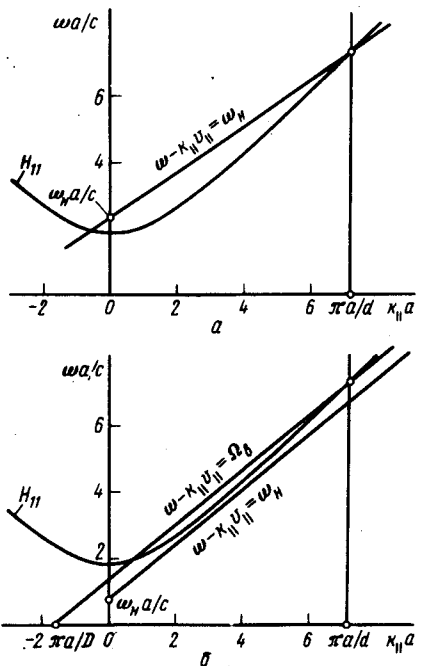


Рис. 2. Бриллюновская диаграмма генератора: а) режим МЦАР ($\Omega_b < \Omega_H$); б) режим убитрона ($\Omega_H < \Omega_b$)

Для проверки изложенных соображений была рассчитана на основе нелинейной теории ⁵ конструкция (рис. 1), в которой изменением параметров ускорителя и электронно-оптической системы можно было реализовать как режим убитрона, так и режим МЦАР (рис. 2). Трубчатый электронный лучок имел диаметр 6 мм, энергию частиц $350 \div 600$ кэВ, ток $0.4 \div 1.0$ кА и длительность 100 нс. Для уменьшения разбросов поперечных скоростей час-

тиц $\Delta\beta_{10}$ и радиусов их ведущих центров Δr_0 использовался двойной катод, помещенный в магнитное поле той же величины, что и на участке взаимодействия. Отпечатки на мишенях и фотографии свечения металлизированных лавсановых пленок, бомбардируемых диафрагмированным пучком (по методике ⁷), свидетельствуют, что $\Delta r_0 \leq 0,5$ мм, $\Delta\beta_{10} \leq 0,05$.

Накачка осцилляторной энергии в пучок производилась пространственно-модулированным магнитным полем с периодом $D = 2$ см. Модуляция осуществлялась вытеснением поля импульсного соленоида системой медных колец, имеющих радиальные разрезы (рис. 1). Такая конструкция выгодно отличается от широко применяемых систем сплошных колец тем, что не приводит к снижению продольного поля. В МЦАР использовались 3 кольца, в убитроне 12 колец.

Резонатор МСЭ представлял собой отрезок цилиндрического волновода кругового сечения с двумя брэгговскими зеркалами — периодически гофрированными участками, разделенными гладким участком. В качестве рабочей была выбрана волна $H_{1,1}^2$ с фазовой скоростью $0,97 c$; коэффициенты отражения волны от гофрированных участков составляли 0,9. Излучение выводилось дифракционным способом.

Частота излучения определялась полосовыми фильтрами. Идентификация моды проводилась на основе диаграммных и поляризационных измерений. Мощность измерялась полупроводниковыми датчиками на горячих носителях, к которым излучение поступало по калиброванному тракту, образованному выходным волноводом, приемным рупором и участком волновода сечением $3,6 \times 1,8$ мм².

В эксперименте была получена хорошо воспроизводимая одномодовая генерация на моде $H_{1,1}^2$ с длиной волны 4,3 мм. В режиме МЦАР достигнута мощность 6 МВт и КПД 4% (с учетом потерь в стенках резонатора электронный КПД 6%); преобразование частоты составляло $\omega/\omega_H = 3 \div 4$. В режиме убитрона получена мощность 2 МВт и КПД 1%; преобразование частоты $\omega/\Omega_b = 5$. Импульсы излучения имели длительность 5—30 нс (рис. 3). При замене резонатора отрезком гладкой трубы тех же размеров излучение в пределах точности измерений отсутствовало, т. е. было по крайней мере на два порядка менее интенсивным, чем с резонатором.

Проведенные эксперименты в совокупности с теоретическими представлениями свидетельствуют о перспективности сильноточных МСЭ с брэгговскими резонаторами и преимуществе МЦАР перед убитроном в диапазоне миллиметровых волн и длинноволновой части субмиллиметрового диапазона.

Авторы признательны В.И.Белосову, А.В.Гапонову-Грехову и А.Ш.Фиксу за полезные обсуждения.

Литература

1. Гинзбург В.Л. Изв. АН СССР, сер. физич., 1947, 11, 165.
2. Deacon D.A.G., Elias L.R., Madey J.M.J., Ramian G.J., Schwettman H.A., Smith T.I. Phys. Rev. Lett., 1977, 38, 892.
3. Granatstein V.L., Schlesinger S.P., Herndon M., Parker R.K., Pasour J.A. Appl. Phys. Lett., 1977, 30, 384; Parker R.K., Jackson R.H., Gold S.H., Freund H.P., Granatstein V.L., Efthimion P.C., Herndon M., Kinkead A.K. Phys. Rev. Lett., 1982, 48, 238.
4. Ковалев Н.Ф., Резников М.Г., Петелин М.И. Резонатор. Авт. свид. №720591 от 14.08.78. Бюлл. КДИО, 1980, №9; Братман В.Л., Гинзбург Н.С., Денисов Г.Г. Письма в ЖЭТФ, 1981, 7, 1320.
5. Bratman V.L., Ginzburg N.S., Petelin M.I. Optics Comm., 1979, 30, 409; Bratman V.L., Ginzburg N.S., Nusinovich G.S., Petelin M.I., Strelkov P.S. Int. J. Electronics, 1981, 51, 541.
6. Коломенский А.А., Лебедев А.Н. ДАН СССР, 1962, 145, 1259; Давыдовский В.Я. ЖЭТФ, 1962, 43, 886.
7. Кременцов В.И., Стрелков П.С., Шкварунец А.Г. ЖТФ, 1980, 50, 2469.