

ИНДУЦИРОВАННОЕ СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛЫХ РЕЗОНАТОРАХ

А.В.Гапонов, А.Л.Гольденберг, Л.П.Григорьев,
И.М.Орлова, Т.Б.Панкратова, М.И.Петелин

Индукционное синхротронное излучение электронов, движущихся по винтовым траекториям в однородном магнитном поле или по трохоидальным траекториям в скрещенных однородных электрическом и магнитном полях, рассматривалось теоретически в ряде работ (см., например, [1-7]) применительно к усилителям и генераторам электромагнитных колебаний, использующим разнообразные электродинамические системы: колебательные контуры и линии передачи с сосредоточенными параметрами, обычные волноводы и полые резонаторы, квазиоптические резонаторы. Впервые индуцированное синхротронное излучение наблюдалось экспериментально в электронных вакуумных усилителях и генераторах с бегущими электромагнитными волнами [2,8,9]. В последнее время большое внимание уделяется взаимодействию винтовых электронных пучков с колебаниями полых резонаторов [10,11].

Эксперимент подтвердил возможность получения больших мощ-

ностей излучения уже при использовании обычных волноводов с поперечным сечением порядка λ^2 (λ - длина волны). Дальнейшее увеличение суммарной мощности излучения может быть до-видимому, достигнуто путем увеличения объема "активной среды" (поперечного сечения электронного пучка или объема неравновесной магнитоактивной плазмы), что, в свою очередь, делает необходимым переход к квазиоптическим электродинамическим системам "открытого" типа. Ниже описаны элементы

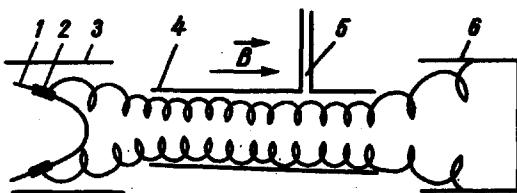


Рис. I. Принципиальная схема генератора электромагнитных колебаний, использующего индуцированное синхротронное излучение электронов: 1-катод, 2-антитрудящая поверхность, 3-анод, 4-резонатор, 5-вывод высокочастотной мощности, 6-коллектор, В-стatische магнитное поле

ти установок (рис. I) и приведены некоторые результаты наблюдения когерентного синхротронного излучения винтовых электронных потоков в "открытых" полых резонаторах с достаточно большим объемом. Эксперименты проводились на более высоких, нежели в [10, II], уровнях мощности.

Резонаторы. Самовозбуждение (генерация) электромагнитных колебаний на гирочастоте электронов (магнитное поле $H_0 = 3200$ э, $\lambda = 3,4$ см) наблюдалось в резонаторе, представляющем собой 20-см отрезок прямоугольного волновода (колебание типа TE_{11}). Электронный пучок вводился в максимум электрического поля с торца через запредельный волновод. Другой, открытый конец резонатора был соединен с волноводом большего сечения, служившим для вывода энергии и одновременно являвшимся коллектором.

Индукционное синхротронное излучение электронов на второй гармонике гироизменности ($H_0 = 4500$ э, $\lambda = 1,2$ см) наблюдалось в бочкообразном открытом резонаторе (колебания типа TE_{021}). Вывод энергии осуществлялся по волноводу, связанному с резонатором через отверстие в боковой стенке.

Электронный пучок. Создание неравновесного распределения электронов I) в больших объемах связано, как правило, со значительными трудностями. В магнитоактивной плазме для этого может быть использован, в частности, высокочастотный нагрев электронов с последующим сжатием магнитного поля. Однако наиболее простым путем является использование электронных пучков с сильно "закрученными" винтовыми траекториями в достаточно хорошем вакууме. В описываемой установке такой пучок создавался аксиально-симметричной электронной пушкой с коническим катодом. Плавность изменения магнитного и электрического статических полей в области пушки и в пространстве дрейфа обеспечивала сохранение аддабатического инварианта W_1/ω_n , где W_1 - энергия, соответствующая вращательному движению электронов, ω_n - их гироизменность. У электронов, покидающих катод, $W_{1K} = (mc^2/2)(E_{K1}^2/H_K^2)$, где H_K - магнитное поле на катоде, E_{K1} - перпендикулярная ему составляющая электростатического поля. При последующем движении электронов в нарастающем магнитном поле H их вращательная энергия увеличивается в H/H_K раз.

Результаты. Условия самовозбуждения электромагнитных колебаний при малых продольных скоростях электронов (нижние части кривых $I_{пуск}$ (V_{p-k}) на рис.2) находятся в удовлетворительном качественном соответствии с соотношением

$$I \geq I_{пуск} \approx \frac{2 \cdot 10^4}{Q} \frac{V}{\ell^2} \frac{\beta_1^3}{\beta_n^{2n}}, \quad (I)$$

где I - электронный ток, Q , V и ℓ - добродарность, объем и длина резонатора, $\beta_1 = v_1/c$ - отношение вращательной скорости электронов v_1 к скорости света c (параметр, характеризующий неизохронность вращения), $\beta_n = v_n/c$, v_n - продольная скорость электронов, $n = \omega/\omega_n = 32$ - отношение частоты генерируе-

мого излучения ω к гирочастоте электронов ω_h . Соотношение (I) справедливо, если частотный спектр сил, действующих на электроны со стороны переменного поля в резонаторе, настолько узок (ширина его порядка v_h/e), что интенсивность индуцированного излучения определяется в основном неэквидистантностью их энергетического спектра (неизохронностью вращения). При больших продольных скоростях становится существенным обычное "линейное" индуцированное поглощение, не учитываемое соотношением (I). Это объясняет расходжение эксперимента с рассчитанными по (I) кривыми при больших v_h (рис.2).

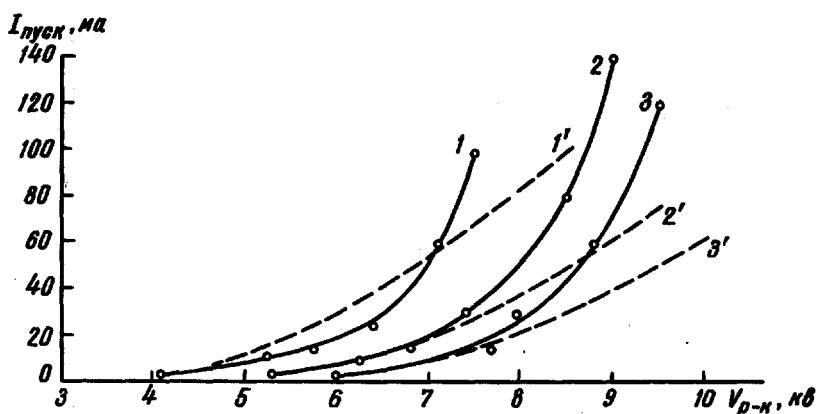


Рис. 2. Зависимость пусковых токов от напряжения резонатор-катод для генератора с $\omega \approx \omega_h$ ($Q = 200$, $V/c^3 = 3,5 \cdot 10^{-3}$) при разных напряжениях анод-катод: 1-9, 2-10, 3-12 кв. Сплошные линии — экспериментальные кривые, пунктирные линии построены по Ф-ле (I)

В исследованных установках мощность генерируемого излучения монотонно возрастала с увеличением вращательной и с уменьшением продольной скоростей электронов (рис.3), а также с ростом электронного тока. В генераторе с $\omega \approx \omega_h$ была получена мощность 6 вт при токе 80 ма, напряжении пучка 8 кв и $v_1 \sim 3v_h$, а в генераторе с $\omega \approx 2\omega_h$ — мощность 190 вт при токе 320 ма, напряжении пучка 19 кв и $v_1 \sim 3v_h$. Дальнейшему увеличению мощности пре-

пятствовали трудности охлаждения генераторов и, кроме того, в установке с $\omega \approx \omega_n$ – возникновение гирорезонансного разряда в остаточном газе. По тем же причинам не был достигнут и максималь-

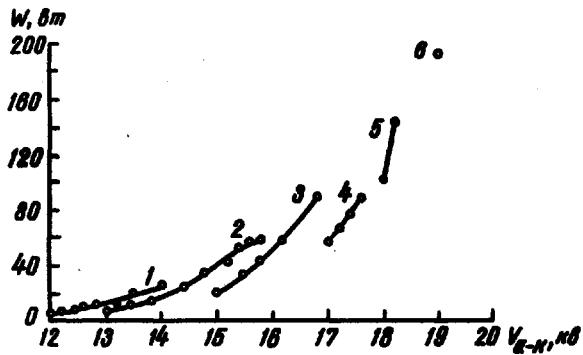


Рис. 3. Зависимость генерируемой мощности от напряжения анод-катод для генератора с $\omega \approx 2\omega_n$ при токе 320 мА и разных напряжениях резонансно-катор-катод: 1-12, 2-13, 3-15, 4-17, 5-18, 6-19 кВ

ный электронный коэффициент полезного действия, который по теоретическим расчетам может доходить до 19% [6]. В экспериментальных макетах мазеров с троходиодными электронными пучками и бегущими волнами к.п.д. достигает 10–15%.

Горьковский
научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступило в редакцию
9 сентября 1965 г.

Литература

- [1] J. Schneider, Phys. Rev. Lett., 2, 504, 1959.
- [2] А.В. Гапонов. Докл. на сессии научно-техн. об-ва радиотехн. и электр. им. А.С. Попова, М., июнь 1959 г.
- [3] А.В. Гапонов. Изв. вузов. Радиофизика, 2, 443, 1959; 2, 450, 1959; 4, 547, 1961.

- [4] В.В.Железняков. Изв. вузов. Радиофизика, 3, 57, 1960.
- [5] А.В.Гапонов, В.В.Железняков. Докл. на XIII ассамблеев URSI , Лондон, сентябрь 1960 г.
- [6] В.К.Юшатов. Докл. на IV Всесоюз. конф. МВССО по радиоэлектронике, Харьков, октябрь 1960 г.
- [7] А.В.Гапонов, В.К. Юшатов. Радиотехника и электроника, 7, 631, 1962.
- [8] R.H.Pantell, Proc. of the Symposium on Millimeter Waves, N.Y., 1959, p.301.
- [9] И.И.Антаков, В.М.Боков, Р.П.Васильев, А.В.Гапонов. Изв.вузов. Радиофизика, 3, 1033, 1960.
- [10] J. L.Hirshfield, J.M.Wachtel. Phys. Rev. Lett., 12, 533, 1964.
- [11] I.B.Bott. Phys. Lett., 14, 293, 1965.

I) Наи выгоднейшим является δ -образное распределение электронов по частотам свободных колебаний.