

## ДВОЙНОЙ РЕЗОНАНС В ЛИНЕЙНО ПОЛЯРИЗОВАННОМ ОНДУЛЯТОРЕ

Л.С. Богданкевич, П.К. Гелхвицдзе, В.С. Иванов, С.И. Кременцов,  
М.Д. Райзер, А.А. Рухадзе, А.В. Федотов

УДК 533.951.7

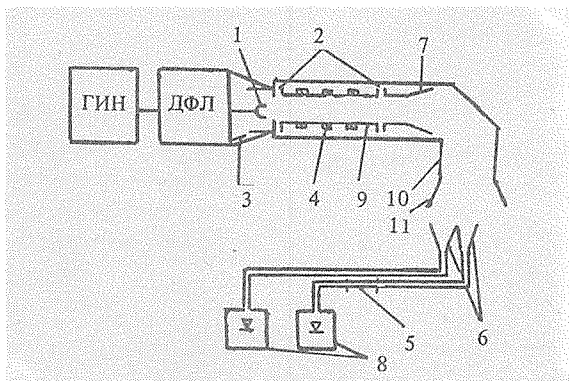
*Исследовано однопроходное усиление одной моды шумового излучения на длине волны  $\sim 9$  мм (мода  $H_{01}$ ) в линейно поляризованном резонансном ондуляторе в условиях, когда период ларморовского вращения электронов пучка в однородном продольном магнитном поле близок ко времени пролета электроном пространственного периода ондулятора.*

В последние годы внимание исследователей привлекает вынужденное ондуляторное излучение сильнооточных релятивистских электронных пучков (РЭП) в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн  $/1/$ . Особый интерес вызывает резонансный ондулятор, в котором достигается максимальный коэффициент усиления излучения.

В  $/2, 3/$  исследовалось усиление внешнего сигнала в циркулярно и линейно поляризованных резонансных ондуляторах и показана возможность достижения высоких коэффициентов усиления излучения в миллиметровом диапазоне. В настоящей работе изложены результаты исследований однопроходного усиления шумового излучения (сверхизлучения). Аналогичные исследования в широкой области длин волн миллиметрового диапазона проведены в  $/4/$  с использованием сплошного электронного пучка, взаимодействующего одновременно с несколькими радиальными модами электромагнитных волн. Нами исследовано сверхизлучение на одной резонансной моде  $H_{01}$  с длиной волны  $\sim 9$  мм, для чего тонкий трубчатый электронный пучок инжектировался в максимуме радиального распределения данной моды.

Принципиальная схема установки приведена на рис. 1. Польный РЭП со средним диаметром 18,5 мм и толщиной 0,15 мм эмиттировался графитовым катодом (1) ускорителя "Терек-1" и распространялся по волноводу из нержавеющей стали с внутренним диаметром 35,5 мм, расположенному внутри магнитной системы. Эксперименты проводились при энергии электронов  $\sim 700$  кэВ, токе пучка  $\sim 2$  кА и длительности импульса  $\sim 20$  нс. Магнитная система ондулятора (4) состояла из 10 медных колец с внутренним диаметром 4 см, шириной 1,5 см, расположенных с периодом  $l_0 = 3,5$  см. Магнит-

ное поле создавалось разрядом батареи конденсаторов (255 мкФ) на внешний соленоид; частота процесса  $\sim 70$  Гц. Электромагнитная волна распространялась по волноводу (9), сверхразмерному волноводу (10) и через рупор (11) излучалась в свободное пространство. Частота излучения определялась системой запердельных волноводов (5), а мода — посредством перемещений и поворотов приемного рупора (6) на апертуре выходного рупора (11). Мощность излучения измерялась с помощью криогенных полупроводниковых детекторов, причем использовался волноводный преобразователь моды  $H_{01}$  круглого волновода в моду  $H_{01}$  прямоугольного волновода.



Р и с. 1. Принципиальная схема установки: 1 — катод, 2 — токовые шунты, 3 — емкостный делитель напряжения, 4 — магнитная система ондулятора, 5 — запердельный волновод, 6 — два измерительных тракта, 7 — рупор, 8 — криогенные полупроводниковые детекторы, 9 — волновод ондулятора, 10 — сверхразмерный волновод, 11 — излучающий рупор.

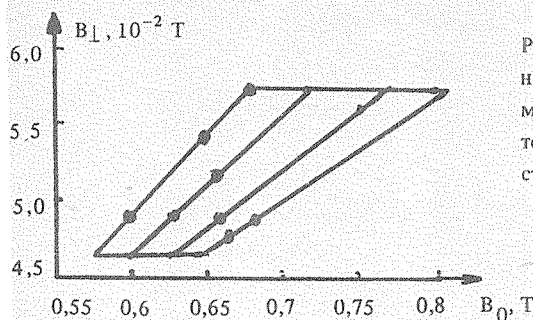
Приближенно квазистатическое магнитное поле рассматриваемого ондулятора определяется выражением:

$$\vec{B} = B_z \vec{e}_z + B_r \vec{e}_r, \quad B_r = B_{\perp} I_1(k_0 r) \sin k_0 z, \\ \vec{B}_z = \vec{B}_0 + B_{\perp} I_0(k_0 r) \cos k_0 z, \quad (1)$$

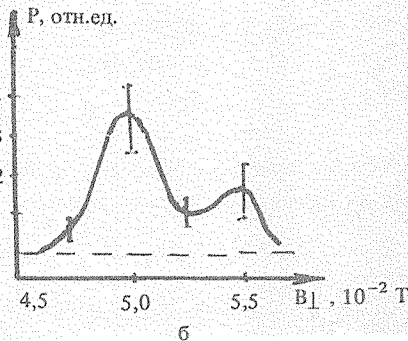
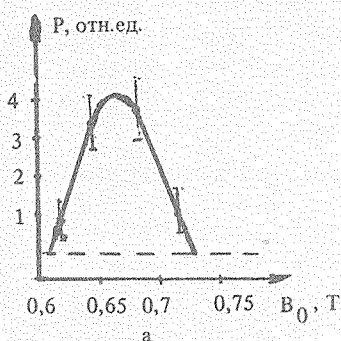
где  $k_0 = 2\pi/l_0$ , а отношение  $B_{\perp}/B_0$  можно менять путем изменения напряжения на обмотках соленоида и выбором момента ввода РЭП в систему (длительность импульса РЭП на три порядка меньше периода магнитного поля). Продольная  $B_0$  и поперечная  $B_{\perp}$  составляющие магнитного поля измерялись

с помощью оригинальных датчиков с высоким пространственным разрешением /5/. Путем экспериментального подбора оптимальной конфигурации магнитного поля на входе в ондулятор достигалось прохождение РЭП через систему практически без потерь электронов и без изменения радиуса пучка.

Измерения показали, что излучение сосредоточено в области длин волн  $0,8 \div 1,0$  см, причем оно максимально в определенном диапазоне значений  $V_0$  и  $V_1$  при  $V_1/V_0 \approx 0,1$  (рис. 2), за пределами которого интенсивность падает примерно на 20 дБ. Основная доля излучаемой мощности соответствует моде  $H_{01}$  и составляет 50 кВт. На рис. 3а, б приведены зависимости интенсивности излучения от  $V_0$  (при  $V_1 = \text{const}$ ) и от  $V_1$  (при  $V_0 = \text{const}$ ), имеющие явно резонансный характер.



Р и с. 2. Диапазон значений продольной  $V_0$  и поперечной  $V_1$  компонент магнитного поля ондулятора, при которых интенсивность излучения достигает максимального значения.



Р и с. 3. Зависимость интенсивности излучения: а) от продольной компоненты магнитного поля ондулятора  $V_0$  при  $V_1 = 5 \cdot 10^{-2}$  Т; б) от поперечной компоненты магнитного поля ондулятора  $V_1$  при  $V_0 = 0,68$  Т. Пунктирная линия – уровень шума.

Естественно считать, что интенсивность излучения пропорциональна поперечной составляющей скорости электронов в магнитном поле ондулятора (1). С учетом постоянства полной скорости  $\beta_{\perp}^2 + \beta_{\parallel}^2 = \beta^2$ , где  $\beta_{\parallel} = u_{\parallel}/c$ ,  $\beta_{\perp} = u_{\perp}/c = (1/c)(u_{\perp}^2 + u_{\parallel}^2)^{1/2}$ , а  $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$  из уравнений движения релятивистских электронов в поле (1) находим:

$$\beta_{\perp} = e^2 V_{\perp} V_0 (\beta^2 - \beta_{\perp}^2)^{1/2} [k_0^2 m^2 \gamma^2 c^4 (\beta^2 - \beta_{\perp}^2 - e^2 V_0^2 / m^2 c^4 \gamma^2 k_0^2)]^{-1}. \quad (2)$$

Отсюда видно, что величина  $\beta_{\perp}$  резонансно зависит от продольного магнитного поля  $V_0$ , причем ширина резонанса определяется неравенством

$$|\beta^2 - (eV_0 / m\gamma k_0 c^2)^2| < \beta_{\perp}^2. \quad (3)$$

Для резонансного магнитного поля и максимального значения  $\beta_{\perp}$  получаем оценку:

$$V_{Op} \approx 1 / ek_0 c^2 m\beta\gamma; \quad \beta_{\perp max} \approx (\beta^2 \beta_{\parallel} V_{\perp} / V_0)^{1/3}. \quad (4)$$

Частота усиливаемого пучком излучения для моды с критической частотой  $\omega_{кр}$  определяется известной формулой:

$$\omega = \gamma_{\parallel}^2 k_0 \beta_{\parallel} c [1 \pm \sqrt{\beta_{\parallel}^2 - (\omega_{кр} / \gamma_{\parallel} k_0 c)^2}]. \quad (5)$$

Измеренные значения длины волны излучения (9 мм) и моды колебаний ( $H_{01}$ ) позволяют по формуле (5) определить  $\beta_{\parallel} \sim 0,8$  и  $\beta_{\perp} \sim 0,4$ . Расчетные значения  $\beta_{\perp}$ ,  $V_{\perp} / V_0 \approx 0,08$ ,  $V_{Op}$  и ширина резонансной области по  $V_0$  (порядка  $\beta_{\perp}^2 / \beta^2 \approx 0,25$ ) хорошо согласуются с экспериментальными значениями. Резонанс по поперечной компоненте магнитного поля возможно связан с тем, что с ростом  $V_{\perp}$ , когда увеличивается  $\beta_{\perp}$  и падает  $\beta_{\parallel}$ , в системе может усиливаться излучение все с меньшей критической частотой, а в условиях эксперимента мода  $H_{01}$  не может возбуждаться при  $\beta_{\parallel} \leq 0,75$  ( $\beta_{\perp} \geq 0,48$ ).

Поступила в редакцию 31 июля 1984 г.

Институт общей физики АН СССР

После переработки 16 апреля 1985 г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Карбушев Н.И., Попонин В.П., Рухадзе А.А. Послесловие к сб. "Генераторы когерентного излучения на свободных электронах," М., Мир, 1983, с.224.
2. Parker R.H. et al. Phys. Rev. Lett., 48, № 4, 238 (1982).
3. Кач Ю.В. и др. Препринт ХФТИ 81-50, Харьков, 1981.
4. Gold S.H. et al. Proc. 5<sup>th</sup> Conf. High Power Particle Beam, Sept. 1983; San-Francisco, California, p. 612 (1983).
5. Федотов А.В. Препринт ФИАН № 85, М., 1983.