

О СПОНТАННОМ И ИНДУЦИРОВАННОМ ИЗЛУЧЕНИИ ЧАСТИЦ НА ВЫСШИХ ГАРМОНИКАХ В ОНДУЛЯТОРЕ С ЭЛЛИПТИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Е.Г. Бессонов, Е.Б. Гаскевич

УДК 538.561

Исследована зависимость спектрально-угловой интенсивности, степени циркулярной поляризации и коэффициента усиления источников ондуляторного излучения на основной и высших гармониках от величины магнитного поля ондуляторов с эллиптически поляризованным магнитным полем.

В работе /1/ было обращено внимание на возможность эффективного генерирования ондуляторного излучения (ОИ) с высокой степенью циркулярной поляризации на высших гармониках в источниках ОИ, использующих эллиптически поляризованное магнитное поле вида $\vec{H} = \vec{e}_x H_{xм} \cos k_0 z + \vec{e}_y H_{yм} \sin k_0 z$, где $k_0 = 2\pi/\lambda_0$; λ_0 — длина периода ондулятора. В работе /2/ были получены общие выражения, описывающие спектрально-угловые и поляризационные характеристики излучения частиц в таких ондуляторах. Отмечалось, что при полях $H_{xм} \approx H_c$, $H_{yм} \gg H_c$, где $H_c = 2\pi mc^2/e\lambda_0$ — характеристическое поле ондулятора, степень циркулярной поляризации ОИ на высших гармониках может достигать значений $\xi_2 \approx 0,94$. Основываясь на результатах работы /2/ и известной связи между спонтанными и индуцированными процессами в источниках ОИ, можно найти коэффициент усиления источника индуцированного ОИ, т.е. лазера на свободных электронах (ЛСЭ), использующего ондуляторы с эллиптически поляризованным магнитным полем /3/.

В работе проведены исследования зависимости спектрально-угловой интенсивности и степени циркулярной поляризации источников спонтанного некогерентного ОИ, а также коэффициента усиления ЛСЭ на основной и высших гармониках от напряженности и степени циркулярной поляризации магнитного поля ондуляторов для случая, когда электронный пучок, усиливаемое и спонтанное ОИ движутся в направлении оси ондулятора.

Если в источнике спонтанного и индуцированного ОИ используется ондулятор с эллиптически поляризованным магнитным полем и электронный

пучок, обладающий малым угловым и энергетическим разбросом, то спектрально-угловую интенсивность, степень циркулярной поляризации и коэффициент усиления излучения, испускаемого в направлении оси ондулятора, можно представить в виде:

$$\frac{\partial^2 I}{\partial \omega \partial \nu} = \frac{K}{\omega_1} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\partial I_k}{\partial \omega} f_k, \quad \xi_{2k} = \frac{2\beta_{xm}\beta_{ym}b_{xk}b_{yk}}{\beta_{xm}^2 b_{xk}^2 + \beta_{ym}^2 b_{yk}^2}, \quad (1)$$

$$a_k = (4\pi^2 K^3 \lambda_0^2 i / \gamma^3 S_{ef} i_A) k |\vec{e}_{k1}|^2 f'_k,$$

где $f_k = \sin^2 \sigma_k / \sigma_k^2$, $f'_k = \partial f_k / \partial \sigma_k$; $\partial I_k / \partial \omega = mc^2 K \omega_k^3 |\vec{e}_{k1}|^2 i / \gamma^2 \Omega^2 k i_A$ — угловое распределение ОИ на k -ой гармонике ($k = 1, 3, 5, \dots$); $\Omega = k_0 c$; K — число периодов ондулятора; $\omega_k = k \omega_1$; $\omega_1 = \Omega / (1 - \bar{\beta})$; $\bar{\beta} = \beta [1 - (\beta_{xm}^2 + \beta_{ym}^2) / 4\beta^2]$; $\beta_x(y)_m = H_y(x)_m / H_c \gamma$; $\sigma_k = \pi k K (\omega - \omega_k) / \omega_k$; $|\vec{e}_{k1}|^2 = (P_{xm}^2 b_{xk}^2 + P_{ym}^2 b_{yk}^2) / 4$; $P_x(y)_m = \gamma \beta_x(y)_m$; $b_{xk} = J_{(k-1)/2}(k d_z) - J_{(k+1)/2}(k d_z)$; $b_{yk} = J_{(k-1)/2}(k d_z) + J_{(k+1)/2}(k d_z)$; $d_z = (\beta_{xm}^2 - \beta_{ym}^2) / 8\beta(1 - \bar{\beta})$; $i_A = mc^3 / e$; i — ток пучка частиц; $\beta = v/c$ — относительная скорость частиц пучка. Входящие в (1) функции f_k и f'_k достигают максимальных значений $f_k \max = 1$ и $f'_k \max = 0,54$ при значениях $\sigma_k = 0$ и $\sigma_k = -1,3$ соответственно. Если $p_{xm} \gg 1$, $p_{xm} \gg p_{ym}$, то $d_z \approx 1/2$ и величины $|\vec{e}_{k1}|^2$ и ξ_2 для гармоник $k \gg 1$ можно представить в виде [2]:

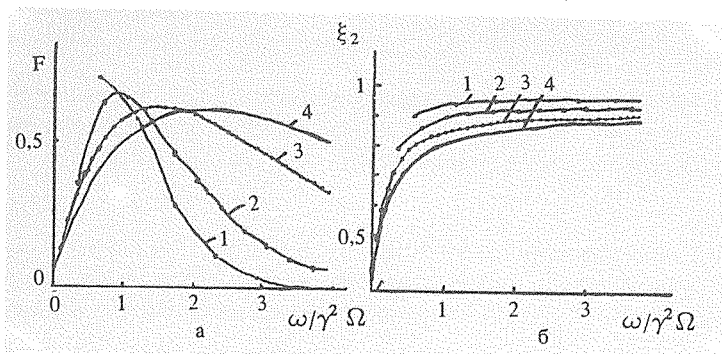
$$|\vec{e}_{k1}|^2 = \frac{4(p_{ym}^2 + 1)}{3\pi^2 p_{xm}^2} \left[(p_{ym}^2 + 1) K_{2/3}^2 \left(\frac{\omega_k}{\omega_c} \right) + p_{ym}^2 K_{1/3}^2 \left(\frac{\omega_k}{\omega_c} \right) \right], \quad (2)$$

$$\xi_{2k} = 2p_{ym} \sqrt{1 + p_{ym}^2} / (1 + 2p_{ym}^2),$$

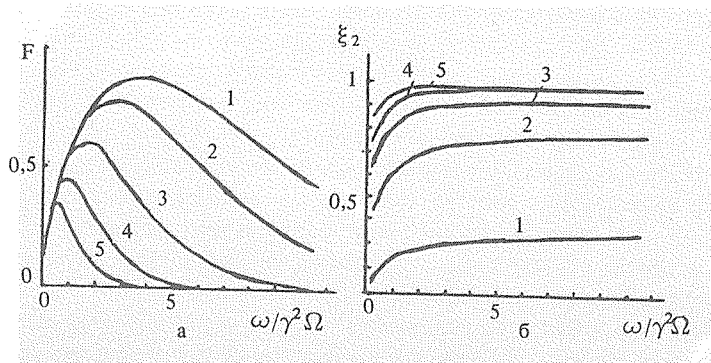
где $K_\nu(x)$ — функция Макдональда; $\omega_c = 3\Omega \gamma^2 p_{xm} / (p_{ym}^2 + 1)^{3/2}$.

Из (1) следует, что зависимость спектрально-угловой интенсивности и коэффициента усиления источников ОИ от частоты и напряженности поля он-

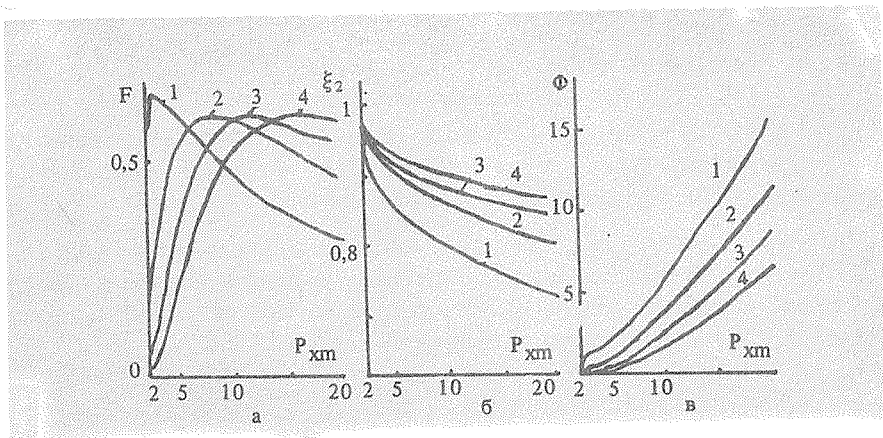
дудлятора определяется соответственно функциями $F = 2\omega_k^2 |\vec{e}_{k1}|^2 / \Omega^2 \gamma^4$ и $\Phi = 2\omega_k |\vec{e}_{k1}|^2 / \Omega \gamma^2$. Эти функции нормированы условием: $F = \Phi = 1$ при $p_{xм} = p_{yм} = 1$ ($H = H_c$), $k = 1$. При этом функция F принимает максимальное значение, что соответствует оптимальным условиям генерирования спонтанного ОИ в спиральном ондуляторе /2,4/. Если $p_{xм} \gg 1$, $p_{yм} \ll p_{xм}$, то функция F , согласно (2), достигает максимального значения $F_m < 1$ на частоте $\omega \approx \omega_c$. В этом случае спектр ОИ, описываемый функцией F , по форме близок к спектру синхротронного излучения, испускаемого частицами под углом $\Theta = p_{yм} / \gamma$ к плоскости орбиты синхротрона.



Р и с. 1. Зависимость спектрально-угловой интенсивности (а) и степени циркулярной поляризации (б) ОИ от частоты для случая $p_{yм} = 1$ и $p_{xм} = 2$ (1), 3 (2), 6 (3), 9 (4).



Р и с. 2. Зависимость спектрально-угловой интенсивности (а) и степени циркулярной поляризации (б) ОИ от частоты для случая $p_{xм} = 6$ и $p_{yм} = 0,2$ (1), 0,6 (2), 1,0 (3), 1,4 (4), 1,8 (5).



Р и с. 3. Зависимость спектрально-угловой интенсивности (а), степени циркулярной поляризации (б) ОИ и коэффициента усиления ЛСЭ (в) от поперечного импульса частиц p_{xm} для случая $p_{ym} = 1$ и значений $\omega/\Omega\gamma^2 = 1$ (1), 2 (2), 3 (3) и 4 (4).

На рис. 1 представлены графики функций F и ξ_{2k} для случая $p_{ym} = 1$ и различных значений p_{xm} . Видно, что интенсивность ОИ остается достаточно большой на частотах $\omega_k > \Omega\gamma^2$. При этом степень циркулярной поляризации $\xi_2 > 0,8$.

На рис. 2 представлены графики зависимости функций F и ξ_{2k} от частоты для случая $p_{xm} = 6$ и различных значений p_{ym} . Видно, что при $p_{ym} > 1$ жесткость ОИ быстро ($\propto 1/p_{ym}^3$) падает. При $p_{ym} < 0,6$ заметно падает степень циркулярной поляризации ОИ. Отсюда следует, что при $p_{xm} \gg 1$ для генерации жесткого ОИ ($\omega > \Omega\gamma^2$) с высокой степенью циркулярной поляризации $\xi_2 > 0,7 \div 0,9$ величину p_{ym} следует выбирать в пределах $0,6 < p_{ym} < 1$.

На рис. 3 представлены графики зависимости функций F , ξ_{2k} , Φ от поперечного относительного импульса частиц $p_{xm} = N_{ym}/N_c$ для случая $p_{ym} = N_{xm}/N_c = 1$ и различных значений ω . В расчетах использовались значения соответствующих функций на частотах ω_k , наиболее близких к заданной частоте ω . Из рисунка видно, что коэффициент усиления ЛСЭ быстро ($\propto p_{xm}^{4/3}$) растет с ростом p_{xm} , а степень циркулярной поляризации падает слабо, оставаясь выше значения $\xi_2 = 0,7$.

Из рис. 1–3 видно, что величины F , ξ_{2k} , Φ в рассматриваемых условиях достаточно хорошо описываются асимптотическими формулами (2).

Эллиптически поляризованное магнитное поле может быть создано, например, с помощью универсального спирального ондулятора [5]. Такой ондулятор позволяет оперативно изменять вид поляризации (линейную на

циркулярную, циркулярную левую на циркулярную правую) как на основной, так и на высших гармониках. Результаты, приведенные в настоящей работе, применимы также к ондуляторам с линейно и циркулярно поляризованным магнитным полем /2-9/.

Поступила в редакцию 22 марта 1985 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бессонов Е. Г. Тезисы докладов VI Всесоюзной конференции по физике ВУФ излучения и взаимодействию излучения с веществом. М., МГУ, 1982, с. 108.
2. Бессонов Е. Г. Препринт ФИАН № 18, 1982.
3. Бессонов Е. Г. Труды IV Всесоюзного семинара по релятивистской ВЧ электронике "Мощные генераторы и усилители на релятивистских электронных потоках". М., МГУ, 1985, с. 67; Препринт ФИАН № 238, 1984.
4. Алферов Д. Ф., Башмаков Ю. А., Бессонов Е. Г. ЖТФ, 43, 2126 (1973).
5. Алферов Д. Ф., Башмаков Ю. А., Бессонов Е. Г. ЖТФ, 46, 2392 (1976).
6. Coisson R. IEEE J. of Quantum Electr., QE-17, 1409 (1981).
7. Зарецкий Д. Ф., Нерсесов Э. А. ЖЭТФ, 81, 517 (1981).
8. Colson W. D. Phys. Rev. A, 24, 639 (1981).
9. Becker W. Zeits. Physik., B, 42, 87 (1982).