

УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ВАРИАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ТОЧКАХ ГЕНЕРАЦИИ ПУЧКОВ

З. Л. Артемьева, Е. М. Мороз, К. Н. Шорин, А. С. Яров

УДК 621.384.63

На основе анализа угловых распределений синхротронного излучения, генерируемого в условиях локальной вариации напряженности магнитного поля в точках формирования пучков, показана возможность увеличения их направленности и интенсивности путем формирования в слабых магнитных полях, введенных в прямолинейные промежутки.

Применительно к пучкам синхротронного излучения (СИ), выводимым с круговых участков орбит электронов в ускорителях, спектрально-угловое распределение СИ исследовалось многими авторами теоретически и экспериментально [1 - 6]. В этих исследованиях напряженность H_0 магнитного поля, одинаковая для всех участков формирования выводимых пучков, предполагалась однозначно связанной с энергией E ускоренных электронов и могла изменяться лишь одновременно с ней.

В настоящей работе рассмотрена зависимость угловых распределений и интенсивности СИ от величины напряженности $H_T \neq H_0$ магнитного поля, локально варьируемой в точках формирования выводимых пучков без изменения энергии циркулирующих электронов.

Приведенный ниже расчет, а также эксперимент (на синхротроне с энергией ~ 600 МэВ) показали возможность существенного увеличения направленности и интенсивности генерируемых в определенной области спектра пучков СИ при их формировании в относительно слабых магнитных полях, внесенных в промежутки, разделяющие сектора магнитов синхротронов.

Известная [6] формула

$$I(\lambda, \psi) = \frac{27}{32\pi^3} \frac{e^2 c}{R^3} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 \gamma^8 [1 + (\gamma\psi)^2]^2 \times \\ \times \left[K_{2/3}^2(\xi) + \frac{(\gamma\psi)^2}{1 + (\gamma\psi)^2} K_{1/3}^2(\xi) \right], \quad (1)$$

описывающая спектрально-угловое распределение интенсивности СИ, генерируемого моноэнергетическим электроном на круговой орбите радиуса R , может быть преобразована в приведенные к единице (при равенстве нулю отсчитываемого от плоскости орбиты угла ψ направления излучения) вертикально-угловые распределения СИ в ускорителе с произвольной формой замкнутой орбиты:

$$\frac{I_{\sigma}(\lambda, \psi)}{I(\lambda, 0)} = \frac{I_{\sigma}(\lambda, \psi)}{I_{\sigma}(\lambda, 0)} = \left[1 + (\gamma\psi)^2 \right] \frac{K_{2/3}(\xi)}{K_{2/3}(\xi_0)} \Bigg|^2 \quad (2)$$

для σ -компоненты излучения (с электрическим вектором, лежащим в плоскости орбиты),

$$\frac{I_{\pi}(\lambda, \psi)}{I(\lambda, 0)} = \frac{I_{\pi}(\lambda, \psi)}{I_{\sigma}(\lambda, 0)} = \left[1 + (\gamma\psi)^2 \right] \left[(\gamma\psi) \frac{K_{1/3}(\xi)}{K_{2/3}(\xi_0)} \right]^2 \quad (3)$$

для π -компоненты излучения (с электрическим вектором, нормальным плоскости орбиты),

$$I_{\Sigma} = \frac{I_{\sigma}(\lambda, \psi) + I_{\pi}(\lambda, \psi)}{I_{\sigma}(\lambda, 0)} = \left[\frac{1 + (\gamma\psi)^2}{K_{2/3}(\xi_0)} \right]^2 \left\{ K_{2/3}^2(\xi) + \frac{[(\gamma\psi)K_{1/3}(\xi)]^2}{1 + (\gamma\psi)^2} \right\} \quad (4)$$

для суммарной по обеим компонентам интенсивности СИ. Здесь λ - исследуемая длина волны СИ, K - функции Макдональда дробных порядков, γ - отношение полной энергии E электронов к их энергии покоя,

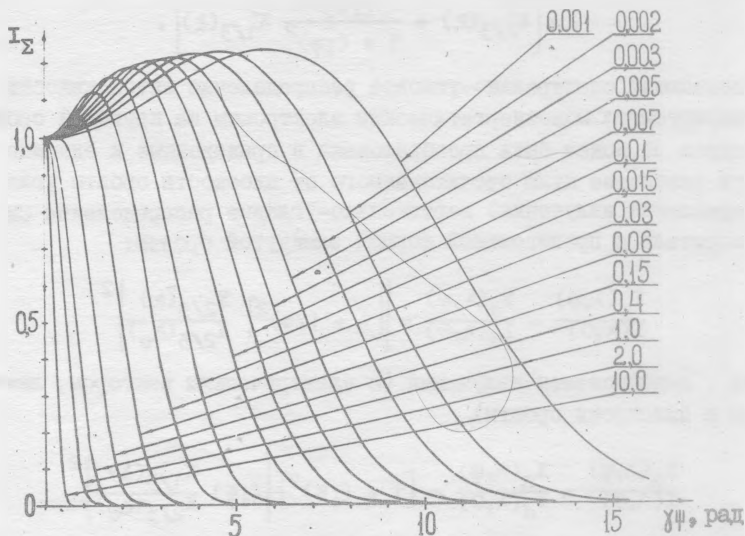
$$\lambda_0 = 6,42 \cdot 10^{10} / \gamma^2 H_T, \text{ нм} \quad (5)$$

- характеристическая длина волны СИ, выраженная через напряженность H_T магнитного поля в точках генерации СИ,

$$\xi_0 = \lambda_0 / 2\lambda, \quad (6)$$

$$\xi = \xi_0 [1 + (\gamma\psi)^2]^{3/2}. \quad (7)$$

На рис. 1 дана соответствующая формуле (4) и пригодная для любого синхротрона сетка кривых I_{Σ} вертикально-угловых распределений суммарного СИ для различных значений параметра λ_c/λ , связанного с величиной поля H_T в точках генерации соотношением (5).



Р и с. 1. Расчетные кривые вертикально-углового распределения интенсивности I_{Σ} синхротронного излучения для разных значений релятивистского фактора γ электронов и параметра λ_c/λ излучения

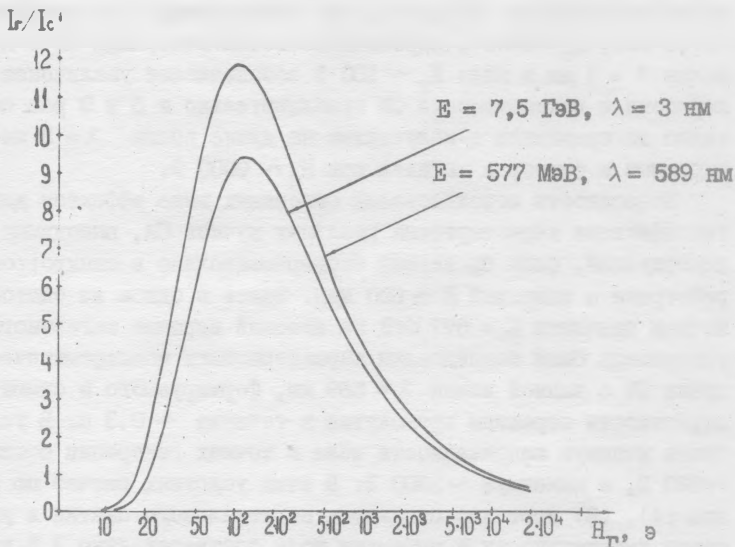
Легко видеть, что увеличение λ_c/λ , вызываемое уменьшением H_T при неизменных E и γ , резко увеличивает направленность СИ на длине волны λ . При этом в определенной области длины волны λ можно добиться существенного увеличения интенсивности излучения, приходящегося на единицу горизонтального угла ψ . Это подтверждается иллюстрируемой рис. 2 формулой

$$\frac{I_T}{I_c} = \left[\frac{H_c}{H_T} \frac{K_{2/3}(k_0)}{K_{2/3}(k_{0,c})} \right]^2, \quad (8)$$

сравнивающей интенсивность I_T СИ, генерируемого при $\psi = 0$ в локальном поле напряженностью H_T , с интенсивностью I_c такого

же излучения, генерируемого на круговых участках орбиты с величиной поля H_C . В соотношении (8) $\xi_{0,c}$ вычисляется заменой H_T на H_C в соотношениях (5), (6), определяющих ξ_0 .

Рассмотрим на примерах несколько следствий описываемого соотношениями (2), (3), (4), (8) явления.



Р и с. 2. Расчетная зависимость от величины поля H_T отношения интенсивностей СИ, выводимого из промежутков (I_T) и секторов магнита (I_C), для указанных длин волн излучения и энергий электронов

В синхротроне-рейстрекке с $E \sim 600$ МэВ, при величине поля в секторах магнита $H_C \sim 10000$ Э и минимуме рассеянного поля $H_T \sim 600$ Э в центре промежутков, перемещение точки генерации СИ оптического диапазона (например, с $\lambda = 589$ нм) из секторов магнита в середину промежутка сопровождается изменением λ_c/λ от 0,01 до 0,16, что соответствует, согласно (4), (8), уменьшению приблизительно в 2,5 раза вертикальной угловой расходимости СИ и увеличению в 6 раз его интенсивности.

В этом же синхротроне уменьшение поля в промежутке до ~ 100 Э (оптимум эффекта при $\lambda = 589$ нм) вызывает изменение

λ_c/λ от $\sim 0,01$ до ~ 1 , что соответствует вертикальному сжатию потока СИ приблизительно в 5 раз и увеличению его интенсивности в ~ 12 раз.

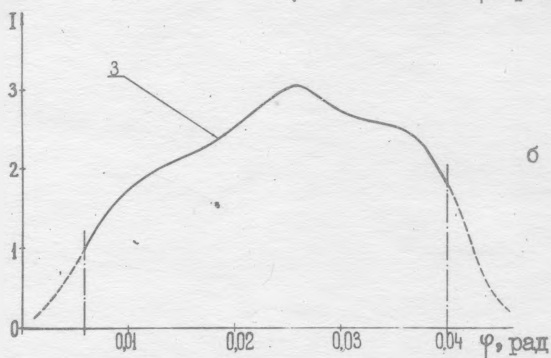
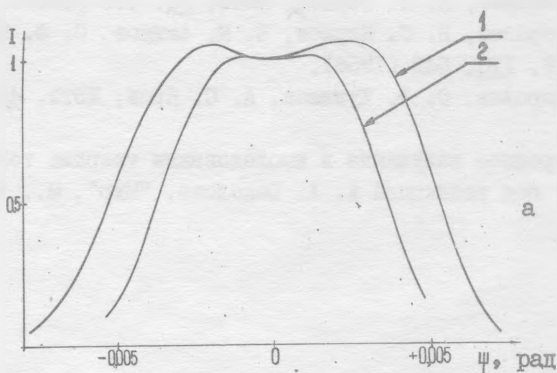
В синхротронах с энергией $E \sim 6,7$ ГэВ описываемый эффект столь же результативен в области вакуумного ультрафиолета, что, по-видимому, представляет интерес для рентгенолитографии с высоким разрешением. Например, для синхротрона с параметрами $E \sim 7,5$ ГэВ, $N_c \sim 8000$ Э перемещение точек генерации СИ с длиной волны $\lambda = 3$ нм в поле $H_T \sim 100$ Э обеспечивает увеличение направленности и интенсивности СИ приблизительно в 5 и 9 раз соответственно по сравнению с излучением на длине волны $\lambda = 3$ нм, генерируемым в секторах магнита при $N_c \sim 8000$ Э.

Возможность использования описанных выше эффектов для интенсификации характеристик реальных пучков СИ, выводимых из ускорителей, была проверена экспериментально в синхротрон-рейстрекке с энергией $E \sim 600$ МэВ. Здесь в одном из опытов при точном значении $E = 577$ МэВ на плоской вершине магнитного цикла ускорителя были исследованы характеристики монохроматического пучка СИ с длиной волны $\lambda = 589$ нм, формируемого в симметричной окрестности середины промежутка в течение $\sim 0,3$ с. В условиях опыта минимум напряженности поля в точках генерации составил ~ 580 Э, а максимум ~ 3800 Э. В этих условиях расчет по формулам (4), (8) дает для ожидаемых вертикального сжатия и увеличения интенсивности в минимуме поля соответственно 1,9 и 3,3 в максимуме. В опыте (см. рис. 3) наблюдались сжатие в 1,5 (3,а) и увеличение интенсивности (3,б) в 2,9 раза.

В другом эксперименте на синхротроне с $E \sim 600$ МэВ в один из промежутков было введено подбираемое по наблюдаемому эффекту сжатия импульсное магнитное поле, ослабляющее величину H_T . Здесь наблюдаемая вертикально-угловая расходимость генерируемого в минимуме магнитного поля пучка СИ оптического диапазона составила $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ рад против $\sim 10^{-2}$ для того же пучка, генерируемого в секторах магнита синхротрона, а увеличение интенсивности составило $\sim 3,5$.

Авторы благодарны Ю. М. Александрову, П. А. Кирейко, Г. С. Пашенко, В. А. Орлову, В. Е. Писареву за помощь, оказанную на разных этапах работы.

Поступила в редакцию
11 июля 1979 г.



Р и с. 3. Эксперимент по наблюдению эффектов увеличения направленности и интенсивности пучка СИ с $\lambda = 589$ нм в синхротроне на $\sim 0,6$ ГэВ. Микрофотограмма 2 вертикального (по углу ψ) и максимум микрофотограммы 3 горизонтального (по углу φ) распределений интенсивности I излучения (в относительных единицах) соответствуют минимуму поля H_T в промежутке

Л и т е р а т у р а

1. J. Schwinger, Phys. Rev., 70, 798 (1946).
2. J. Schwinger, Phys. Rev., 75, 1912 (1949).
3. А. А. Соколов, И. Н. Тернов, ЖЭТФ, 31, 473 (1956).
4. Ф. А. Королев, В. С. Марков, Е. М. Акимов, О. Ф. Куликов, ДАН СССР, 110, 542 (1956).
5. Ф. А. Королев, О. Ф. Куликов, А. С. Яров, ЖЭТФ, 43, 1653 (1962).
6. Синхротронное излучение в исследовании твердых тел. Сборник статей под редакцией А. А. Соколова, "Мир", М., 1970 г.