

## ИНТЕНСИВНОЕ АННИГИЛЯЦИОННОЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННО-ПОЗИТРОННОГО ПОТОКА

Быков А. М., кандидат физико-математических наук, доцент,  
Дзедолик И. В., кандидат физико-математических наук, доцент

Создание источников коротковолнового интенсивного когерентного излучения в рентгеновском и гамма-диапазоне для исследовательских и технологических целей является в последние годы весьма актуальной задачей релятивистской электроники [1,2].

Альтернативным способом генерации коротковолнового излучения гамма-диапазона являются аннигиляционные процессы при взаимодействии позитронного пучка с электронами, связанными в атомах неподвижной мишени [3], а также при взаимодействии сонаправленных релятивистских электронного и позитронного пучков, распространяющихся в фокусирующем магнитном поле [4]. В первом случае имеет место когерентное гамма-излучение низкой интенсивности. Во втором случае возникающие при аннигиляции электронно-позитронных пар гамма-кванты в силу выполнения закона сохранения импульса для такой системы  $\mathbf{p}_- + \mathbf{p}_+ = \hbar\mathbf{k} + \hbar\mathbf{k}$  (где  $\mathbf{p}_-$  – импульс электрона,  $\mathbf{p}_+$  – импульс позитрона,  $\hbar\mathbf{k}$ ,  $\hbar\mathbf{k}$  – импульсы гамма-квантов,  $\hbar = h / 2\pi$ ) будут направлены в узкий конус с углом раствора  $1/\gamma$  (где  $\gamma = E / m_0 c^2$  – безразмерная энергия частицы), т.е. будет генерироваться узконаправленное гамма-излучение относительно высокой интенсивности, зависящей от плотности электронного и позитронного пучков.

Интенсивность аннигиляционного гамма-излучения немодулированных по плотности электронного и позитронного пучков пропорциональна числу  $N$  пар прореагировавших электронов  $e^-$  и позитронов  $e^+$ . Однако, как известно, интенсивность излучения можно существенно повысить, если сгруппировать излучатели так, что их сгустки будут находиться в пространстве в одной и той же фазе волны излучения. В последнем случае интенсивность аннигиляционного излучения будет пропорциональна квадрату числа излучателей  $N^2$  – пар прореагировавших электронов и позитронов.

Учитывая симметричность функции распределения относительно перестановок любой пары электронов и позитронов в силу их тождественности и отсутствия корреляции между частицами для средней спектральной интенсивности получаем выражение [5]:

$$I(\omega) = \left\langle |\mathbf{E}(\omega)|^2 \right\rangle = N\Psi(\omega) + N(N-1)\Phi(\omega) \quad (1)$$

$$\Psi(\omega) = \int d^3 r \int d^3 p |\mathbf{E}(\omega, \mathbf{r}, \mathbf{p})|^2 f_1(\mathbf{r}, \mathbf{p})$$

где

$$\Phi(\omega) = \int d^3 r_1 \int d^3 r_2 \int d^3 p_1 \int d^3 p_2 \mathbf{E}(\omega, \mathbf{r}_1, \mathbf{p}_1) \mathbf{E}^*(\omega, \mathbf{r}_2, \mathbf{p}_2) f_2(\mathbf{r}_1, \mathbf{p}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{p}_2)$$

$$\text{Введем фактор когерентности излучения } S(\omega) = \Phi(\omega) / \Psi(\omega), \quad (2)$$

$$\text{тогда (1) представляем в виде } I(\omega) = \Psi(\omega) \left[ N(1 - S(\omega)) + N^2 S(\omega) \right] \quad (3)$$

В предельных случаях при  $S(\omega)=1$  излучение полностью когерентное в том смысле, что его мощность пропорциональна квадрату числа излучателей, а при  $S(\omega)=0$  излучение не когерентное.

Во взаимодействующих в вакууме параллельных релятивистских электронном и позитронном пучках имеют место следующие процессы: электрон-электронное, позитрон-позитронное и электрон-позитронное рассеяние, комптоновское рассеяние фотонов на частицах, аннигиляция и рождение электронно-позитронных пар. Все эти процессы являются процессами второго порядка и протекают во взаимодействующих электронном и позитронном пучках одновременно. Однако эффективное сечение процесса аннигиляции  $\sigma = \pi r_0^2 c / v$ , пропорциональное  $1/v$  (где  $v$  – относительная скорость аннигилирующих частиц в движущейся системе отсчета,  $r_0 = e^2 / m_0 c^2$ ), будет преобладать при малых относительных скоростях электронов и позитронов, что имеет место в сонаправленных электронном и позитронном пучках.

При аннигиляции пары электрон-позитрон в свободном пространстве излучается два фотона, различающиеся энергией и импульсами. В движущейся системе импульсы аннигилирующих частиц распределены по сфере, т.е. в силу закона сохранения импульса для такой системы импульсы фотонов также будут распределены по сфере – излучение изотропно. При  $1-\beta \ll 1$  в лабораторной системе функции распределения излучения вдоль скорости движения частиц ( $\theta=0$ ) и в противоположном направлении ( $\theta=\pi$ ) относятся как [6]  $f(\theta)/f(0) = (1+\beta)/(1-\beta) \cong 4\gamma^2 \gg 1$ , т.е. релятивистский источник излучает вперед по направлению своего движения в узкий конус с углом раствора  $\theta \approx \gamma^{-1} \ll 1$ .

Если непрореагировавшие в области взаимодействия электроны и позитроны развести с помощью поперечного стационарного магнитного поля, развернуть электронный и позитронный пучки против хода основного пучка и направить электронный пучок на металлический анод, то при его торможении возникнет рентгеновское излучение с частотой  $\omega_R = m_0 c^2 (\hbar)^{-1} \gamma$ . Позитронный пучок можно направить вновь в область взаимодействия на повторный цикл.

Фотоны рентгеновского излучения, генерируемого при торможении непрореагировавших электронов на аноде, распространяются против движения гамма-квантов. Скорости распространения

гамма-квантов и релятивистских частиц близки. При выполнении условий фазового синхронизма [7]:

$$\omega_{\gamma} (1 - \beta) = \omega_R (1 + \beta), \quad (4)$$

(где  $\omega_{\gamma}$  - частота гамма-квантов,  $\omega_R$  - частота рентгеновских фотонов), электроны и позитроны будут группироваться в единые сгустки под воздействием пондеромоторной силы - комбинационной силы попутного гамма-излучения и встречного рентгеновского излучения. При этом «время жизни»  $\tau = L/c\beta$  - время пролета частиц через область взаимодействия значительно превышает время спонтанных квантовых переходов. следовательно, при выполнении условий синхронизма (4) электронно-позитронный поток будет модулироваться по плотности, а мощность его излучения будет расти пропорционально  $N^2$ .

Таким образом, для генерации интенсивного направленного гамма-излучения возможно использование релятивистских электронного и позитронного пучков с малыми значениями эмиттанса, т.е. с параметрами, реализуемыми в настоящее время в современных малогабаритных ускорителях. Процессы аннигиляции электронно-позитронных пар в таких пучках позволяют с максимально возможным КПД трансформировать энергию частиц в энергию поля излучения. При этом возможна плавная перестройка частоты гамма-излучения в результате изменения кинетической энергии частиц электронного и позитронного пучков.

#### Литература.

1. Barletta W.A., Bonifacio R., Pierini P. High brilliance, femtosecond X-ray sources//SSRI. 92/02 Workshop on Fourth Generation Light Sources. Feb. 24-27. - 1992.
2. Курилко В.И., Гкач Ю.В. Физические механизмы формирования когерентного излучения в ультрарелятивистском ЛСЭ//Успехи физических наук. - 1995. - Т.165, вып.3. - С.241-261.
3. Перина Я. Квантовая статистика линейных и нелинейных оптических явлений. - Москва: Мир.- 1987. - 368 с., ил.
4. McMaster W.H. Matrix Representation of Polarization//Review of Modern Physics. - 1961. - V.33, N1. - P.8-28.
5. Корхмазян Н.А., Геворкян Л.А., Петросян М.Л. Влияние плотности распределения электронов на когерентность излучения сгустков//Журнал технической физики. - 1977.-Т.47, Вып.8. - С.1583-1597.
6. Бредов М.М., Румянцев В.В., Топтыгин И.Н. Классическая электродинамика. - Москва: Наука. - 1985. - 400 с., ил.
7. Дзедолик И.В. Индуцированное излучение релятивистского электронного потока в поле полихроматической электромагнитной волны//Радиотехника и электроника. - 1990. - Т.35, вып.9. - С.1954-1963.