

Новый мощный источник направленного электромагнитного излучения

© М.А. Кумахов

Институт рентгеновской оптики,
143005 Одинцово, Московская область, Россия
e-mail: mkumakhov@mail.ru

(Поступило в Редакцию 13 декабря 2013 г.)

Показано, что на базе эффекта бесконтактного многократного поворота пучков заряженных частиц в кольцевом канале можно реализовать новый источник электромагнитного излучения в широком спектральном диапазоне. Для нерелятивистских электронов можно реализовать излучение от субмиллиметровых волн до радиодиапазона. При релятивистских энергиях излучение становится направленным. При этом можно реализовать излучение в инфракрасном, оптическом, ультрафиолетовом диапазонах. При высоких энергиях излучение имеет место в рентгеновском и гамма-диапазонах. Подробно обсуждены отличия нового источника от источников синхротронного излучения. Так как в кольцевом канале можно реализовать большие токи, интенсивность излучения при энергиях $\approx 1-2 \text{ GeV}$ является весьма высокой. При малых внутренних диаметрах кольца (несколько десятков нанометров) одновременно имеет место каналирование и синхротронное излучения.

Введение

Интенсивные и направленные источники излучения, работающие в широком диапазоне энергий, представляют большой интерес для науки и техники.

В рентгеновском диапазоне эффективно используются синхротронные источники излучения, а в более мягком диапазоне (оптическом и инфракрасном) лазерные пучки.

В настоящей работе обсуждается новый источник излучения. Появление этого источника связано с открытием нового физического эффекта — бесконтактного многократного прохождения пучков электронов через стеклянные капилляры, изогнутые в виде кольца, стенки которых наэлектризованы самим пучком электронов. Эффект был теоретически обоснован в [1] и обнаружен экспериментально в [2]. При высоком вакууме пучки электронов проходят сотни миллионов и миллиардов раз через кольцо практически без потерь электронов. При этом электроны испускают в зависимости от их энергий излучение от радиочастот вплоть до рентгеновского и гамма-диапазона.

Рассматриваемый источник является уникальным по своим физическим характеристикам. К тому же этот источник крайне прост и дешев. Поэтому он, несомненно, найдет в самое ближайшее время широкое применение.

Отличия от синхротронного источника (СИ)

Принципиальное отличие от СИ связано с тем, что движение частиц происходит не в магнитном поле, как в случае СИ, а в электрическом поле. Это приводит к следующим особенностям.

1. Рассмотрим простейший случай, когда электрон движется по круговой траектории.

При движении электрона в магнитном поле, при фиксированном значении магнитного поля и фиксированном значении энергии электрона электрон движется по кругу с фиксированным радиусом. Поэтому при строительстве СИ приходится жестко выбирать радиус для ускорителя, когда сделан выбор энергии и магнитного поля [3].

В рассматриваемом случае ситуация другая. При фиксированном радиусе можно выбирать самые разнообразные энергии. Это крайне важно для практических применений, так как просто изменяя энергии в одном и том же устройстве, можно получить излучение в самом широком диапазоне — от радиочастот до гамма-излучения.

2. При одной фиксированной энергии электрона можно получить самые разные энергии излучения. Например, для релятивистского электрона с энергией $E \gg m_0 c^2$, где m_0 — масса покоя электрона, c — скорость света, спектр излучения при движении по кругу с радиусом R имеет максимум на длине волны $\sim R/\gamma^3$, где $\gamma = \frac{E}{m_0 c^2}$.

В предлагаемом устройстве можно иметь широкий диапазон радиусов, от сантиметров до десятков метров.

3. В предлагаемом устройстве так же, как и в СИ, можно реализовать ондулятор и вигглер.

4. В предлагаемом устройстве интенсивность излучения на много порядков может превосходить интенсивность в СИ. Общее количество квантов, излучаемых электронным пучком в миллирадиан радиального угла, равно [3]:

$$N = 1.3 \cdot 10^{17} EI,$$

где E (GeV), I (A).

В наиболее сильноточных СИ ток ограничен значением

$$I = (0.1 - 0.3) \text{ А.}$$

В нашем случае ток может достигать значений $I \sim 10^4 \text{ А}$, т.е. при одинаковых энергиях и радиусах траектории интенсивность в предлагаемом устройстве может превосходить интенсивность СИ на 4 порядка.

Соответственно резко возрастет также спектральная плотность излучения, так как она тоже пропорциональна циркулирующему току.

5. Метод инжекции пучка. Для работы СИ необходим дополнительный ускоритель [3]. На этом ускорителе получают необходимую энергию, и уже после этого пучок электронов направляется на накопительное кольцо СИ. В современных СИ энергия электронов $\geq 1 \text{ GeV}$. Для получения таких энергий необходимы большие и дорогие ускорители. Само накопительное кольцо с вакуумом на уровне 10^{-7} Pa также является массивным и дорогим устройством.

В рассматриваемом устройстве дополнительный ускоритель для инжекции не нужен.

Пучок электронов небольшой энергии (несколько десятков килоэлектрон-вольт) от небольшой электронной пушки направляют в устройство, и уже в устройстве с помощью стандартных методов СВЧ доводят до необходимой энергии.

6. Управление спектром излучения. Характерная длина волны излучения электрона при движении по кривой с радиусом R примерно оценивается по формуле $\lambda \sim R/\gamma^3$. Отсюда ясно, что, используя сложную форму кривой с разными R (а это легко сделать технологически), можно изменять при одной и той же энергии (т.е. при фиксированном γ) спектр излучения в широком диапазоне. Другие возможности заключаются в получении нужного спектра просто подбором кольца с нужным радиусом. При этом можно не только получить нужный спектр, но можно изменять направленность излучения. Например, при $R = 1 \text{ см}$ можно получить оптический спектр ($\lambda \sim 10^{-4} \text{ см}$) при $\gamma = 20$ (т.е. энергия электрона 10 MeV). При этом расходимость пучка $\sim 1/20 \sim 5 \cdot 10^{-2} \text{ rad}$. Однако если увеличить энергию до 50 MeV и одновременно увеличить радиус до 100 см , то можно получить оптическое излучение с расходимостью 10^{-2} rad . Это важное с практической точки зрения свойство рассматриваемого источника.

Излучение электрона при движении в кольце. Нерелятивистский случай

Частица, движущаяся в кольце радиусом R , излучает вследствие центростремительного ускорения.

При этом интенсивность излучения (W) равна [4]

$$W = \frac{2}{3} \frac{e^2}{R^2} \beta^4 c, \quad (1)$$

где $\beta = v/c$, c — скорость света, e — заряд электрона.

Таблица 1. Интенсивность излучения W (eV/s) для разных энергий E и радиусов кривизны кольца R

$R, \text{ cm}$	$E = 1 \text{ keV}$	$E = 10 \text{ keV}$	$E = 100 \text{ keV}$
100	$4.14 \cdot 10^{-6}$	$4.3 \cdot 10^{-4}$	$2.52 \cdot 10^{-2}$
10	$4.14 \cdot 10^{-4}$	$4.3 \cdot 10^{-2}$	2.52
1	$4.14 \cdot 10^{-2}$	4.3	$2.52 \cdot 10^2$
0.1	4.14	$4.3 \cdot 10^2$	$2.52 \cdot 10^4$

В табл. 1 приведены результаты расчетов для трех энергий — 1, 10, 100 keV для четырех радиусов 0.1, 1, 10, 100 см. Излучение в основном лежит на первой гармонике, т.е. длине волны порядка радиуса канала. Как видно из табл. 1, при энергии 1 keV и радиусе $R = 100 \text{ см}$ потери энергии $\sim 10^{-6} \text{ eV/s}$, т.е. в абсолютном вакууме такая система может излучать более десятка лет. Излучение направлено перпендикулярно плоскости вращения электрона.

При увеличении энергии электрона до 100 keV при радиусе $R = 1 \text{ см}$ интенсивность возрастает в сравнении с предыдущим случаем на 8 порядков. Если принять для последнего случая, что характерная энергия излучения $\sim 10^{-4} \text{ eV}$, то получаем, что 1 электрон излучает $\sim 2.5 \cdot 10^6$ фотонов/s.

Если использовать электронную пушку с энергией электронов 100 keV и мощностью 1 kW, то после впуска такого пучка в кольцо с радиусом $R = 1 \text{ см}$ такой источник будет излучать $\sim 1.5 \cdot 10^{23}$ фотонов/s, т.е. это достаточно компактный и интенсивный источник сантиметровых волн.

Направленность излучения для нерелятивистских электронов можно увеличить, если сделать систему типа соленоида с большим количеством витков, по которым проходит ток. При этом диаметр витков много меньше длины соленоида. В ряде случаев можно добиться когерентности излучения, если период системы сделать близким к основной гармонике излучения.

Релятивистский случай. Синхротронное излучение

В релятивистском случае, когда $\frac{E}{m_0 c^2} = \gamma \gg 1$, излучение в кольце по его параметрам можно легко оценить, исходя из подобия траекторий и используя основные формулы СИ.

В этом случае интенсивность излучения можно оценить по известной формуле СИ:

$$W = \frac{2}{3} \frac{e^2 c}{R^2} \gamma^4.$$

Если взять $R = 100 \text{ см}$, $E = 1 \text{ GeV}$ (т.е. $\gamma = 2 \cdot 10^3$), то получим $W = 4.5 \cdot 10^{12} \text{ eV/s}$.

При этом характерная длина волны излучения

$$\lambda \sim \frac{10^2 \text{ cm}}{\gamma^3} = \frac{10^2}{8 \cdot 10^9} \approx 10^{-8} \text{ cm}.$$

Это соответствует энергии $\sim 10 \text{ keV}$, т.е. излучение лежит в рентгеновском диапазоне. При увеличении энергии пучка до 2 GeV начинается излучение в гамма-диапазоне в окрестности 100 keV .

При движении релятивистской частицы ($v \approx c = 3 \cdot 10^{10} \text{ cm/s}$) по кольцу с радиусом $R = 100 \text{ cm}$ частица совершает $\sim 5 \cdot 10^7$ оборотов в секунду. Это означает, что циркулирующий ток в рассматриваемом устройстве увеличивается в $5 \cdot 10^7$ раз по сравнению с током, который инжектируется в устройство.

С учетом этого фактора, если в круг ввести пучок с интенсивностью $0.1 \mu\text{A} = 6 \cdot 10^{11}$ частиц/s, то ток в кольце будет равен 5 A , при этом пучок будет излучать в секунду мощность, равную $W = 6 \cdot 10^{11} \times 4.5 \cdot 10^{12} = 4.5 \cdot 6 \cdot 10^{23} = 45 \text{ kW}$.

Для поддержания такой мощности излучения СВЧ ускоряющая система должна обладать минимум такой же мощностью. Если весьма грубо принять, что излучение в основном идет на энергии $\sim 10 \text{ keV}$, это означает, что кольцо излучает $\sim 2.7 \cdot 10^{19}$ фотон/s.

Количество фотонов, излучаемых кольцом в миллирадиан угла, оценивается по формуле

$$N_{\text{фот}} = 1.3 \cdot 10^{17} \cdot EI,$$

где E (GeV), I (A).

В нашем случае $E = 1 \text{ GeV}$, $I = 5 \text{ A}$, получаем $N_{\text{фот}} = 6.5 \cdot 10^{17}$ фотонов/s миллирадиан.

Спектральная плотность излучения вблизи $\lambda = \lambda_c$ (где λ_c — наиболее вероятная длина волны излучения) дается формулой

$$N(\lambda) = 2.46 \cdot 10^{16} IE \eta (\lambda/\lambda_c) \Delta\lambda/\lambda,$$

где η — универсальная функция для СИ. Принимая $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-3} = 0.1\%$, $\eta = 1$, при $\lambda = \lambda_c$ получаем $N(\lambda) = 2.5 \cdot 10^{14}$ фотонов/s (0.1%).

Так как в рассматриваемом источнике можно длительно удерживать огромные токи, то соответственно можно получить огромные потоки направленного рентгеновского и гамма-излучений. При этом, естественно, необходим мощный источник СВЧ поля для подпитки пучка в кольце.

Канализованное излучение в микро- и наноканалах

Канализованное излучение, теоретически предсказанное в [5], получило многочисленные подтверждения. Более тысячи исследований было посвящено этому эффекту в середине 80-х годов [6]. Сейчас с созданием компактных ускорителей и возможностью вращения

Таблица 2. Максимальные энергии фотонов

	$\hbar\omega_{\text{max}}$		$\hbar\omega_{\text{min}}$
$l_n = 1 \text{ nm}$ $U_B = 1 \text{ eV}$	62 keV		
$l_n = 1 \text{ nm}$ $U_B = 100 \text{ eV}$	620 keV	$l_n = 10 \text{ m}$ $U_B = 100 \text{ eV}$	6.2 keV
$l_n = 1 \text{ nm}$ $U_B = 10^4 \text{ eV}$	6.2 MeV	$l_n = 10 \text{ nm}$ $U_B = 10^4 \text{ eV}$	62 keV
$l_n = 1 \text{ nm}$ $U_B = 10^5 \text{ eV}$	19.5 MeV		
$l_n = 1 \mu\text{m}$ $U_B = 10^5 \text{ eV}$	$\sim 20 \text{ keV}$		

электрона в кольце открываются новые возможности использования этого эффекта.

В кристаллах интенсивность каналированного излучения (КИ) существенно превосходит интенсивность СИ. Однако в кристаллах реальный выход КИ резко ограничен деканализированием, связанным с рассеянием частиц на электронах кристалла.

Совершенно другая ситуация складывается с микро- и наноканалами, так как в изогнутых системах частицы могут находиться многие часы. Поэтому интересно оценить частоты излучения и его интенсивность в таких структурах.

В табл. 2 даны максимальные энергии фотонов для различных каналов ($l_n = 1 \text{ nm}$, 10 nm , $1 \mu\text{m}$) для разных потенциальных барьеров.

Как видно, мы имеем очень широкий диапазон энергий излучения — от мягкого рентгеновского излучения до жесткого гамма-излучения.

Максимальная частота излучения каналированной частицы в канале с диаметром $2l_n$ равна

$$W_m = 2\Omega_0 \gamma^{2/3},$$

где Ω_0 — частота колебаний частицы без учета релятивистского фактора

$$\Omega_0 = \frac{1}{l_n} \sqrt{\frac{2U_B}{m_0}},$$

m_0 — масса покоя частицы, U_B — величина потенциального барьера.

Мощность излучения каналированной частицы равна [5]

$$I = \frac{l_n^2 e^2 \Omega_0^4}{3c^3} \gamma^2,$$

при $E = 1 \text{ GeV}$ ($\gamma = 2 \cdot 10^3$), в канале с диаметром $2l_n = 2 \text{ nm}$ ($2 \cdot 10^{-7} \text{ cm}$), при $U_B = 10^4 \text{ eV}$, $I = 0.9 \cdot 10^6 \text{ eV/s}$, при $U_B = 10^5 \text{ eV}$, $I = 0.9 \cdot 10^8 \text{ eV/s} \approx 10^8 \text{ eV/s}$.

Заключение

Рассматриваемый источник в связи с его компактностью, малым весом, дешевой, высокой яркостью найдет многочисленные применения.

В рентгеновском и гамма-диапазонах его можно использовать для работ по материаловедению, в фармацевтике для получения новых лекарств, в медицине. Источник, например с 20 станциями, можно разместить на небольшом столе площадью 2–4 м². На такой базе можно оборудовать небольшой госпиталь с высокой пропускной способностью. Ввиду легкости источника (≤ 10 kg) весьма привлекательно его использование в космосе, например в МКС, для проведения дифрактометрических измерений при росте кристаллов в невесомости.

Имеются другие приложения, например создание остронаправленных источников в оптическом и инфракрасном диапазонах. Здесь в отличие от лазеров направление излучения лежит в одной плоскости с углом расходимости $\Delta\theta = 1/\gamma$, а в азимуте излучение идет в 4π .

Возможно создание небольших радаров с высокой угловой направленностью в миллиметровом и сантиметровом диапазонах.

Список литературы

- [1] Кумахов М.А. Patent application PU N 2011122945 08-06-2011, PCT/RU2012/000418, WO 2012/169932A2/.
- [2] Кумахов М.А., Тегаев Р.И. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 6. С. 147–150.
- [3] Фетисов Г.В. Синхротронное излучение. М.: Физматлит, 2007.
- [4] Соколов А.А., Тернов И.М. Релятивистский электрон. М.: Наука, 1974.
- [5] Kumakhov M.A. // Phys. Lett. A. 1976. Vol. 54. P. 17.
- [6] Kumakhov M.A., Komarov F.F. Radiation of Charged Particles in Solids. American Institute of Physics, 1988.