

## 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 5 марта 2014 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  $\approx 1-2$  GeV является весьма высокой. При малых внутренних диаметрах кольца (несколько десятков нанометров) одновременно имеет место каналированное излучение и синхротронное излучение.

### 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-диапазонов.

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.

### 1. 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 электростатическом 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 электронов 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 предполагаемом 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]

$$N = 1.3 \cdot 10^{17} EI, \quad (1)$$

где  $E$  — в GeV,  $I$  — в А.

В наиболее сильноточных СИ ток ограничен значением

$$I = 0.1-0.3 \text{ А}. \quad (2)$$

В нашем случае ток может достигать значений  $I \sim 10^4$  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 инъекции 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  $\geq 1$  GeV. Для получения таких энергий необходимы большие и дорогие ускорители. Само накопительное кольцо с вакуумом на уровне  $10^9$  Torr также является массивным и дорогим устройством.

В рассматриваемом устройстве дополнительный ускоритель для инъекции не нужен. Пучок электронов небольшой энергии (несколько десятков keV) 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  $\gamma$ ) 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  $R = 1$  см можно получить оптический спектр ( $\lambda \sim 10^{-4}$  см) при  $\gamma = 20$  (т.е. энергия электрона 10 MeV). При этом расходимость пучка  $\sim 1/20 \sim 5 \cdot 10^{-2}$  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.

## 2. Излучение электрона при движении в кольце. Нерелятивистский случай

Частица, движущаяся в кольце с радиусом  $R$ , излучает вследствие центростремительного ускорения. При этом интенсивность излучения,  $W$ , равна [4]

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

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

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.

**Таблица 1.** Интенсивность,  $W$ , излучения, eV/s, для разных энергий,  $E$ , и разных радиусов кривизны кольца,  $R$

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

Как видно из табл. 1, при энергии 1 keV и радиусе  $R = 100$  см потери энергии  $\sim 10^{-6}$  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  $R = 1$  см интенсивность возрастает в сравнении с предыдущим случаем на 8 порядков. Если принять для последнего случая, что характерная энергия излучения  $\sim 10^{-4}$  eV, то получаем, что 1 электрон излучает  $\sim 2.5 \cdot 10^6$  photon/s.

Если использовать электронную пушку с энергией электронов 100 keV и мощностью 1 kW, то после выпуска такого пучка в кольцо с радиусом  $R = 1$  см такой источник будет излучать  $\sim 1.5 \cdot 10^{23}$  photon/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.

## 3. 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:

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

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

При этом характерная длина волны излучения

$$\lambda \sim \frac{10^2}{\gamma} = \frac{10^2}{8 \cdot 10^9} \approx 10^{-8} \text{ cm}. \quad (5)$$

Это соответствует энергии  $\sim 10$  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 ( $v \approx c = 3 \cdot 10^{10}$  cm/s) по кольцу с радиусом  $R = 100$  cm частица совершает  $\sim 5 \cdot 10^7$  грс. 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  $0.1$  mA =  $6 \cdot 10^{11}$  particles/s, то ток в кольце будет равен 5 A, при этом пучок будет излучать в секунду мощность, равную  $W = 6 \cdot 10^{11} \cdot 4.5 \cdot 10^{12} = 4.5 \cdot 6 \cdot 10^{23} = 45$  kW.

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

Количество фотонов, излучаемых кольцом в 1 mrad угла, оценивается по формуле

$$N_{\text{phot}} = 1.3 \cdot 10^{17} EI, \quad (6)$$

где  $E$  — в GeV,  $I$  — в A.

В нашем случае  $E = 1$  GeV,  $I = 5$  A получаем  $N_{\text{phot}} = 6.5 \cdot 10^{17}$  photons/swrad.

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

$$N(\lambda) = 2.46 \cdot 10^{16} IE \eta (\lambda/\lambda_c) \Delta\lambda/\lambda, \quad (7)$$

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

#### 4. 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 электрона в кольце открываются новые возможности использования этого эффекта.

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

Таблица 2. Максимальные энергии фотонов

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

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 ( $l_n = 1$  nm, 10 nm, 1  $\mu$ 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 канализованной частицы в канале с диаметром  $2l_n$  равна

$$W_m = 2\Omega_0 \gamma^{2/3}, \quad (8)$$

где  $\Omega_0$  — частота колебаний частицы без учета релятивистского фактора

$$\Omega_0 = \frac{1}{l_n} \sqrt{\frac{2U_B}{m_0}}, \quad (9)$$

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

Мощность излучения канализованной частицы равна [5]

$$I = \frac{l_n^2 e^2 \Omega_0^4}{3c^3} \gamma^2 \quad (10)$$

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

#### Заключение

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

В рентгеновском и гамма-диапазоне 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 м<sup>2</sup>. На такой базе можно оборудовать небольшой госпиталь с высокой пропускной способностью. Ввиду легкости источника ( $\leq 10$  kg) весьма привлекательно его использование в космосе, например на 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  $4\pi$ .

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

## Список литературы

- [1] *Кумахов М.А.* Патент 2462009 С1. Бюл. № 16. 2012.
- [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. 672 с.
- [4] *Соколов А.А., Тернов И.М.* Релятивистский электрон. М.: Наука, 1974. 391 с.
- [5] *Kumakhov M.A.* // Phys. Lett. A. 1976. Vol. 54. P. 17.
- [6] *Kumakhov M.A., Komarov F.F.* Radiation from charged particles in solids. American Institute of Physics, 1988.