

Эффект многократного бесконтактного поворота заряженных частиц в полом круглом стеклянном кольце

© М.А. Кумахов, Р.И. Тегаев

Институт рентгеновской оптики,
125315 Москва, Россия
e-mail: iroptic@list.ru

(Поступило в Редакцию 2 октября 2012 г.)

Впервые представлены экспериментальные результаты существования нового физического эффекта — многократного (многомиллионного) поворота заряженных частиц в круглом полом наэлектризованном стеклянном кольце. Эксперименты проведены для электронных и ионных пучков. Представлена теоретическая модель взаимодействия частиц с наэлектризованной стенкой канала. Экспериментально обнаружен эффект ускорения частиц в круге, когда в нем установлен электрод с небольшим потенциалом ~ 2 кВ. При этом частицы ускоряются до сотен киловольт. При взаимодействии ускоренных частиц с тонкой вольфрамовой нитью, установленной в круге, возникает интенсивное излучение, лежащее в жестком рентгеновском и γ -диапазонах. Кратко обсужден ряд важных применений эффекта многократного поворота.

Введение

Поворот пучка заряженных частиц в современной технике осуществляется в основном в магнитных полях. В однородном магнитном поле, частицы движутся по окружности, при этом радиус окружности определяется законом Лармора. На этом принципе основана работа циклических ускорителей, синхротронов, коллайдеров и т.д. [1].

Современная физика высоких энергий и ускорительная техника эффективно используют возможность движения частиц в магнитных полях. Однако эта техника имеет серьезные ограничения.

Радиус частицы, энергия частицы и величина магнитного поля жестко связаны. При увеличении энергии частиц необходимо увеличивать радиус и величину магнитного поля. При больших энергиях $\sim 10^{12}$ эВ необходимо использовать поле — порядка нескольких Тесла и радиус — больше одного километра. Такие большие коллайдеры и ускорители крайне дороги. Кроме того, токи в магнитных полях невелики, обычно меньше 1 А.

В работе [2] была обоснована принципиально новая возможность управления траекториями заряженных частиц — их многократный бесконтактный поворот в диэлектрических каналах с наэлектризованными стенками. При этом электризация стенок производится самими частицами, которые инжектируются в полый канал, имеющий форму круга [2]. Обзор по прохождению заряженных частиц в стеклянных конусообразных капиллярах с наэлектризованными стенками содержится в [3] и ссылках в этом обзоре.

1. Прохождение заряженных частиц в полом кольцевом круге

При прохождении заряженной частицы, например электрона, по кругу, на электрон действуют две силы.

Центростремительная сила F_c :

$$F_c = \frac{2E}{R}, \quad (1)$$

где E — энергия частицы, R — радиус круга. Эта сила „стремится“ выбросить частицу из круга.

Электростатическая сила F_e , возникает при взаимодействии электрона с наэлектризованной внутренней стенкой кольца. Эта сила удерживает частицу в круге. Эту силу можно оценить в первом приближении по формуле

$$F_e \approx \frac{2U_b x}{l^2}, \quad (2)$$

где U_b — величина потенциального барьера, l — полуширина канала в круге (внутренний радиус кольца), координата x отсчитывается от центра канала.

Величина потенциального барьера связана с электрической прочностью материала круга U_s , соотношением

$$U_b = QU_s d, \quad (3)$$

где Q — заряд частицы, d — толщина стенки круга.

Например, для стекла марки С-48-3 и ситалла СТ-50-2 $U_s = 2 \cdot 10^5$ и $2.5 \cdot 10^5$ В/мм соответственно при комнатной температуре [4]. Частица будет двигаться в круге при условии $F_e > F_c$, т.е.

$$\frac{U_b x}{l^2} > \frac{E}{R}, \quad (4)$$

максимальное значение x равно 1, т.е.

$$\frac{U_b}{l} > \frac{E}{R}, \quad (5)$$

или при

$$R > \frac{lE}{U_b}. \quad (6)$$

В наших экспериментах (см. ниже) при $E \approx 15$ – 20 кеВ, $R \approx 14$ см, d (толщина стенок круга)

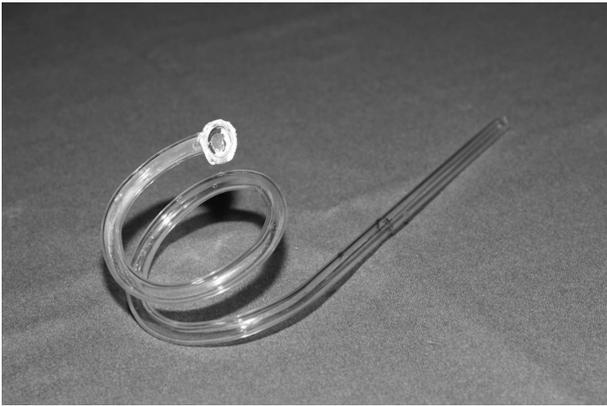


Рис. 1. Спиралевидный капилляр, на котором был осуществлен поворот на 675° .

$\approx 3 \text{ mm}$ и $l \approx 3 \text{ mm}$ условие (6) легко выполнялось, т.е. электроны стабильно поворачивались в полом стеклянном круге.

2. Эксперименты по однократному повороту электронов

Первые эксперименты были проведены в конце мая—начале июня 2010 года. При этом использовались стеклянные капилляры с радиусом $\sim 20 \text{ mm}$, внутренним диаметром 6 mm и толщиной стенки $\sim 1 \text{ mm}$. Нам удалось повернуть пучки на 360° .

Другой успешный эксперимент по бесконтактному повороту электронов был осуществлен осенью 2010 г. Внешний диаметр капилляра составляет 140 mm , внутренний — 7 mm . При этом с высокой точностью удалось получить 100% трансмиссию пучка при повороте на 360° .

Следующий поворот пучка был на 675° . Эта поворотная система показана на рис. 1. Ее параметры следующие: внешний диаметр равен 70 mm , внутренний — 5 mm . При этом также удалось получить 100% трансмиссию пучка при ее повороте на 675° .

3. Эксперименты по многократному повороту частиц

Указанные в разд. 2 эксперименты представляют собой однократное прохождение электронов по незамкнутой траектории. После этих экспериментов одним из авторов (М.А. Кумахов) был предложен принципиально новый эксперимент — эксперимент по многократному прохождению частиц по замкнутой траектории, когда частица многократно, многие десятки и сотни миллионов раз проходит по одному и тому же кругу, т.е. по замкнутой территории [2].

Эксперименты проводились при средних давлениях и при высоком вакууме в круге. Результаты существенно

отличаются. Поэтому отдельно рассмотрим эти эксперименты.

3.1. Эксперименты при средних давлениях

Вакуум в круге составлял $5 \cdot 10^{-5} \text{ Torr}$. Он достигался с помощью форвакуумного и турбомолекулярного насосов.

Были изготовлены 2 круга из кварцевого стекла диаметрами 50 и 25 cm . В обоих случаях входные параметры источников электронов — их ускоряющие напряжения и токи были одинаковы и составляли соответственно 15 kV и $50 \mu\text{A}$. Измерения показали, что величина накопленного в круге тока вследствие многократного вращения в круге диаметром 50 cm составила 50 A за время 22 s , а в круге диаметром 25 cm — за время 13 s .

Появление тока в круге сопровождается ярким свечением светло-голубого цвета. Ток в районе 3 A появляется в доли секунды и затем накапливается. Когда ток достигает значения $\sim 50 \text{ A}$, он перестает расти. Это связано с ионизационными процессами на остаточном газе, вследствие чего происходит потеря электронов.

Для получения больших токов необходим высокий вакуум на уровне $10^{-10} - 10^{-11} \text{ Torr}$.

3.2. Эксперименты при высоком вакууме

Эксперимент проводился на кварцевом круге радиусом 14 cm . Внутренний диаметр был несколько миллиметров. Вакуум составлял 10^{-10} Torr , энергия электронов 20 keV .

Первый удачный эксперимент был выполнен в конце апреля 2011 г. В этом эксперименте удалось получить в круге ток $\sim 100 \text{ A}$ при токе инжекции $300 \mu\text{A}$. В дальнейшем в мае 2011 г. удалось получить ток около 850 A . Однако в этих экспериментах токи получались кратковременные, так как быстро нарушался вакуум. В последующем удалось получить стабильный пучок на уровне 500 A , который вращался в круге около 5 min . Во всех этих экспериментах метод инжекции пучка был недостаточно хорошим.

Действительно, при энергии электрона $\sim 20 \text{ keV}$, скорость электрона составляет $\sim 8.3 \cdot 10^9 \text{ cm/s}$. Поэтому в круге радиусом $\sim 140 \text{ mm}$ такой электрон вращается с частотой 10^8 s^{-1} .

При токе инжекции $300 \mu\text{A}$, если бы удалось инжектировать 100% частиц, то в круге ток был бы равен $3 \cdot 10^4 \text{ A}$. Мы же получили только 100 A , т.е. в 300 раз меньше. Это означает, что в этих экспериментах только $1 \mu\text{A}$ тока из 300 попадает в круг. Поэтому были предприняты серьезные усилия по улучшению инжекции. Эти усилия увенчались определенным успехом осенью 2011 г.

При токе инжекции $\sim 0.3 \text{ mA}$ удалось получить ток в круге, равный $\sim 3 \text{ kA}$, т.е. ток в круге увеличивается в 10 миллионов раз по сравнению с током инжекции. При этом коэффициент захвата электронов в круг близок к

10%. При этом удалось добиться определенной стабильности и повторяемости результатов. Для дальнейшего увеличения тока в круге необходимо улучшить условия захвата.

4. Ускорение электронов в круге

Авторами был выполнен эксперимент, когда ускоряющий электрод был введен внутри круга. Он представлял собой тонкую вольфрамовую нить микронных размеров. На него подавалось плюсовое напряжение 2 кВ.

Начальная энергия электронов, инжектируемых в круг, была 17 кеВ. Ток в круге более 10 А взаимодействовал с этим электродом. При этом пучок электронов не останавливался на электроде, а продолжал ускоряться с каждым поворотом на 2 кВ. Измерения, выполненные с помощью системы свинцовых фильтров, показали, что энергия электронов была не меньше, чем несколько сотен киловольт.

5. Новый источник мощного электромагнитного излучения

Соударение части электронного пучка с вольфрамовой нитью приводило к возникновению тормозного излучения. Это было, во-первых, весьма интенсивное излучение, что фиксировалось нашим дозиметром. Во-вторых, оно было направленное, что говорит о том, что энергия электронов была выше 0.5 меВ. При отключении ускоряющего напряжения (2 кВ), интенсивное излучение продолжалось.

6. Эксперимент по повороту ионного пучка

Схема эксперимента изображена на рис. 2. Круг радиусом 140 мм и внутренним диаметром 7 мм был изготовлен из кварцевого стекла. Первоначально круг откачивался до давления $5 \cdot 10^{-5}$ Торр с помощью форвакуум-

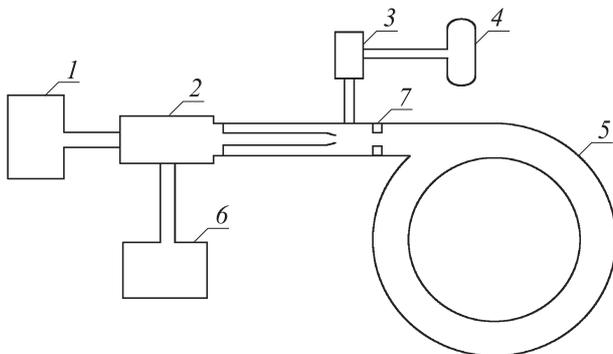


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 — блок питания источника, 2 — источник электронов, 3 — натекатель, 4 — газ, 5 — круг из кварцевой трубки, 6 — вытягивающий анод, 7 — диафрагма.

ного и турбомолекулярного насосов, затем в зону ввода электронного пучка с ускоряющим напряжением 25 кВ и током $200 \mu\text{A}$ через механический индиевый натекатель запускался газ (гелий) до давления $2 \cdot 10^{-4}$ Торр. Ионный ток (гелий) на входе в круг составлял $8 \mu\text{A}$ при ускоряющем напряжении 27 кВ. Измерения величины ионного тока в круге показали, что ток в течение долей секунд возрастает до 3.5 А, а затем в течение 8 с достигает значения 10 А. В случае увеличения инжектируемого тока можно получить и более высокие токи в круге.

При ускоряющем напряжении 27 кВ ионы гелия имеют скорость $1.14 \cdot 10^8$ см/с. Это означает, что при радиусе круга 14 см период обращения иона гелия в круге равен $7.7 \cdot 10^{-7}$ с. Соответственно частота обращения ионов гелия в круге равна $1.3 \cdot 10^6$ с⁻¹.

Если бы весь инжектируемый ток I_{inj} захватывался бы кругом, то начальный ток в круге I_{circ} должен был быть равен:

$$I_{circ} = I_{inj} 1.3 \cdot 10^6 = 10.4 \text{ A.}$$

Ток же составил 3.5 А, что говорит о том, что коэффициент захвата был на уровне 0.34.

В пользу того, что не весь инжектируемый ток захватывается в круг, говорит и тот факт, что в области захода ионного тока в круг имеет место заметный нагрев, хотя сам круг в целом остается холодным. При инжекции тока в круг возникает яркое светло-голубоватое свечение по всему кругу. Это связано с ионизационными и рекомбинационными процессами, связанными с взаимодействием ионов гелия с остаточным газом в круге. Одной из дальнейших задач является улучшение коэффициента захвата инжектируемого тока и увеличение самого значения тока инжекции до нескольких миллиампер. В течение нескольких секунд ток в круге достигает насыщения в районе 10 А.

Однако мы заметили, что, когда ток инжекции был несколько десятков микроампер, соответственно возрастал и ток насыщения в круге. Для получения килоамперных ионных токов в круге необходимо резко улучшить вакуумные условия в круге, что является нашей второй задачей.

7. Измерения тока в круге

Измерения производятся токовыми клещами ЛРРЛ 39 MR с током измерения от 0 до 10 кА. Контрольные измерения производились осциллографом GOS-652 G. Ввод пучка в круг из стекла производится через медный анод трубки (заземленный), который изолирован стеклянным или керамическим цилиндром. Данные, полученные на осциллографе, хорошо коррелируют с данными, полученными на токовых клещах.

8. Применения

Рассмотренный эффект найдет многочисленные применения [2]. Кратко рассмотрим некоторые из них.

8.1. Техника коллайдеров

Наиболее важным параметром коллайдеров является светимость пучка, пропорциональная квадрату плотности сталкивающихся частиц. Наибольшей яркостью обладает Большой адронный коллайдер (LHC) (CERN). В перспективе его светимость будет равна 10^{34} particle/cm²·с (сейчас на 2–3 порядка ниже).

Рассмотренная новая техника и полученные результаты говорят о возможности увеличения светимости по сравнению с коллайдером в CERN на несколько порядков. К тому же этот коллайдер будет намного меньше и дешевле.

8.2. Новые ускорители

На базе рассмотренного эффекта может быть создано новое поколение мощных дешевых компактных ускорителей, которые найдут широкое применение в технике и медицине.

8.3. Новый источник электромагнитного излучения

Круг с вращающимся в нем электронным пучком является новым источником направленного излучения в широком спектральном диапазоне от радиочастот до рентгеновского и гамма-излучения. По интенсивности он намного превзойдет существующие источники синхротронного излучения [2]. К тому же он на порядки будет дешевле.

8.4. Другие применения

Интересным применением является организация встречных пучков дейтерия и трития с выходом интенсивных термоядерных нейтронов. Оценки [2] показывают, что такой источник представляет большой практический интерес для энергетики. Имеется еще множество других применений [2].

Список литературы

- [1] Фетисов Г.В. Синхротронное излучение. М.: Физматлит, 2007.
- [2] Кумахов М.А. Патент РФ. № 2462009 от 08.06.2011.
- [3] Cassini A., Maunoury L., Muranaka T., Huber B., Bey K.P., Lebuins H., Delievre D., Ramillon J.M., Been T., Ikeda T., Kanai Y., Kojima T.M., Yamazaki Y., Khemiche H., Bundaleski M., Rongin P. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 2009. Vol. 267. N 4. P. 674–677.
- [4] Справочник по электротехническим материалам. М.: Энергоатомиздат, 1987. Т. 2. С. 207.