

ФОРМИРОВАНИЕ КОЛЬЦА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

*С. А. Кононогов, А. М. Рязанов, В. В. Саночкин,
Ю. М. Терешкин, В. Б. Хромченко*

В работе приведены результаты исследования возможности формирования релятивистского электронного кольца в постоянном магнитном поле при использовании в качестве внутреннего инжектора электронного синхротрона с циклотронным предускорением. Выработаны требования, предъявляемые к пространственному распределению магнитного поля в области ускорения. Экспериментально показана возможность формирования релятивистского электронного кольца в постоянном магнитном поле с индукцией до 1.2 Тл. Радиус орбиты ускоренных электронов 1.6 см. Энергия удержания 6 МэВ.

Принцип построения циклического резонансного электронного ускорителя с орбитой, расположенной внутри ускоряющего резонатора, — электронного синхротрона с циклотронным предускорением (ЭСЦП) — использовался при создании специализированного источника синхротронного излучения, введенного в состав стандарта яркости в «вакуумной» части ультрафиолетового излучения [1, 2, 3]. Особенностью этого ускорителя является также отсутствие внешнего инжектора, что дает возможность существенно уменьшить размеры орбиты электронов по сравнению с традиционно используемыми ускорительными системами и тем самым увеличить мощность, излучаемую электронами в виде синхронного излучения. Процесс ускорения в ЭСЦП показан диаграммой на рис. 1, а, отображающей изменение магнитного поля во времени и синхронизацию включения ускоряющего высокочастотного поля. При показанной синхронизации реализуется «безрадиационный» режим ускорения, характеризующийся отсутствием гамма-квантов тормозного излучения, так как при уменьшении магнитного поля в присутствии ускоряющего высокочастотного поля происходит замедление ускоренных электронов до энергий, близких к тепловым.

Импульсный характер работы синхротрона накладывает определенные ограничения на области использования его синхротронного излучения. Вместе с тем получение постоянного во времени потока оптического излучения способствовало бы уменьшению погрешности воспроизведения единицы действующим стандартом яркости.

На рис. 1, б показан процесс ускорения и последующего удержания пучка электронов на стационарной орбите. Ускоряющее ВЧ поле с амплитудой $E_{\text{вч}}$ включается в момент, предшествующий достижению магнитным полем B значения $B_0 = \omega_0 t_0 / e$, которое соответствует циклотронному резонансу электронов, где t_0 — масса покоя электрона, e — его заряд, ω_0 — круговая частота ускоряющего поля.

Магнитное поле, обеспечивающее ускорение с последующим удержанием электронов (рис. 1, б), сформировано наложением в области ускорения импульсного магнитного поля B^i на постоянное магнитное поле B^c . При этом импульсное и постоянное поля в фазе ускорения направлены встречно, а их величины связаны соотношением $|B_m^i| \geq |B^c - B_0|$.

Технически такое наложение магнитных полей осуществлено расположением в межполюсном зазоре постоянного магнита импульсной магнитной системы (рис. 2, а). При этом форма постоянного магнитного поля корректируется сменными полюсными наконечниками различной конфигурации (рис. 2, б). Для того чтобы пространственная форма импульсного магнитного поля не зависела от степени насыщения полюсных наконечников в постоянном магнитном поле, они покрыты слоем меди толщиной 0.3 мм. Закон изменения

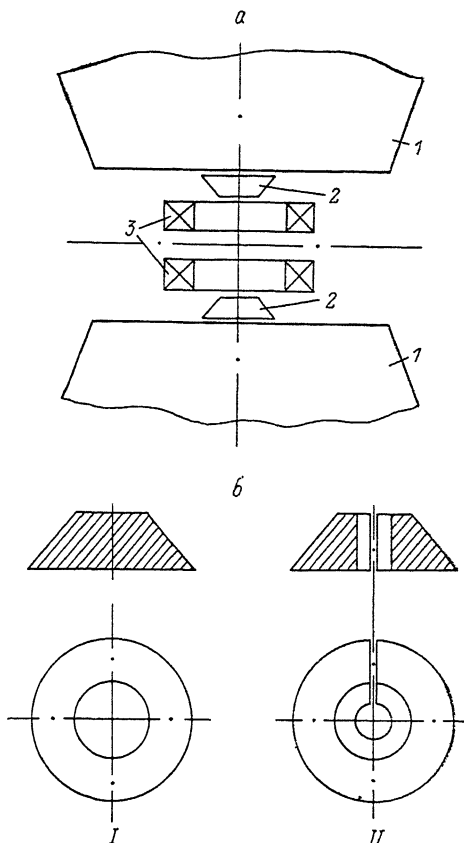
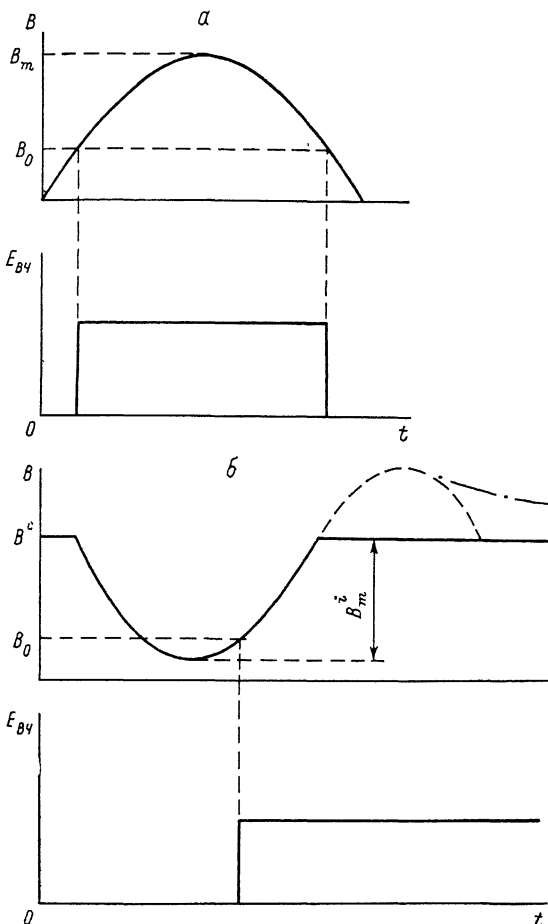


Рис. 1. Диаграммы основных процессов в ускорительных установках.

а — ускорение с последующим замедлением электронного пучка в спадающем магнитном поле (электронный синхротрон с циклотронным предускорением), б — удержание релятивистских электронов в постоянном магнитном поле после формирования электронного кольца.

Рис. 2. Магнитная система установки для формирования кольца релятивистских электронов в постоянном магнитном поле.

а — схема расположения элементов: 1 — полюса постоянного магнита, 2 — полюсные наконечники, 3 — электромагнит импульсного магнитного поля. б: I, II — типы полюсных наконечников.

во времени импульсного магнитного поля может быть в достаточной степени произволен. Ограничение на скорость изменения магнитного поля определяется величиной напряженности ускоряющего ВЧ поля [1]. Что касается пространственного распределения магнитного поля, то для данного ускорителя разрешенный диапазон изменения показателя спада суммарного магнитного поля $n = -\frac{r}{B} \frac{\partial B}{\partial r}$ определяется условием устойчивости $0 < n < 0.25$. Это приводит к жестким требованиям на пространственную корреляцию двух составляющих ведущего магнитного поля: импульсной и постоянной.

Для магнитного поля, создаваемого двумя источниками, показатель спада n определяется выражением

$$n = \frac{n' B^i + n^c B^c}{B^i + B^c}, \quad (1)$$

где n^i и n^c — показатели спада импульсного B^i и постоянного B^c магнитных полей.

Принимая во внимание условие устойчивости, связь между показателями спада постоянной и импульсной составляющих магнитного поля на орбите можно выразить неравенством

$$0.25, \frac{B^i + B^c}{B^i} - n^c \frac{B^c}{B^i} < n^i < -n^c \frac{B^c}{B^i}, \quad (2)$$

записанным в предложении $B^i \leq 0$, $B^i + B^c > 0$ в рабочей области магнитных полей. Неравенство (2) можно представить в графическом виде на плоскости (n^i, n^c) (рис. 3). Область разрешенных значений n^i и n^c ограничена параллельными прямыми, одна из которых проходит через точку $n^i = n^c = 0$, а вторая расположена ниже на величину $|B^i + B^c/B^i| \cdot 0.25$. Так как в начальный период ускорения магнитное поле удовлетворяет условию $B = B_0^i + B^c \simeq B_0$, а при достаточно большой энергии удерживаемых электронов $B^i \simeq B^c \gg B_0$, то ширина Δn области устойчивости в начальный период ускорения мала ($\Delta n \ll 1$) и уменьшается с увеличением B^c . В процессе ускорения при уменьшении $|B^i|$ ширина области устойчивости увеличивается вместе с изменением наклона границ устойчивости. Таким образом, наиболее жесткие требования к согласованию формы магнитных полей предъявляются в начальный период ускорения, когда суммарное магнитное поле мало по сравнению с уровнем постоянного магнитного поля B^c . Ширина запрещенных полос у границ области устойчивости зависит от амплитуды и спектра азимутальных гармоник ведущего магнитного поля. Составляющие азимутальных гармоник результирующего магнитного поля для конкретной магнитной системы пропорциональны абсолютным значениям соответствующих составляющих магнитного поля. Так как уровень суммарного магнитного поля на начальном этапе ускорения мал, то относительная величина гармоник может быть весьма большой. Увеличение относительной величины азимутальной неоднородности магнитного поля приводит к расширению полосы резонанса при $n=25$, которая может составлять значительную долю от размера области устойчивости или даже перекрыть ее. Опыт магнитных измерений импульсного магнитного поля в ЭСЦП дает значение относительной амплитуды первой гармоники в пределах 0.3 % [4]. При этом оценка ширины области параметрического резонанса приводит к значению $\Delta n_3 = 0.1$ при $B^c/B_0 \simeq 20$. Существенное сужение разрешенной области из-за азимутальной неоднородности магнитных полей налагает дополнительные требования на степень допустимой азимутальной неоднородности, а также на допустимую несоосность магнитных систем импульсного и постоянного полей. Снижения требований к степени азимутальной симметрии можно достигнуть, если добиться сближения фаз некоторых, наиболее сильных, азимутальных гармоник неоднородности составляющих магнитного поля. Такая

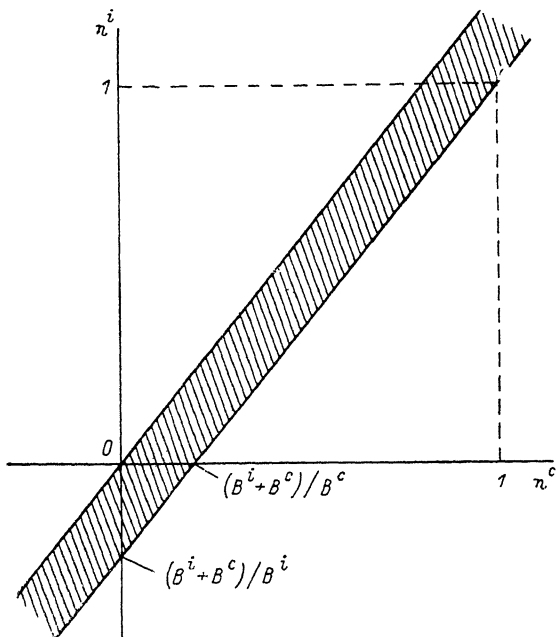


Рис. 3. Область устойчивости для аксиально-симметричного магнитного поля, создаваемого двумя источниками.

магнитного поля B^c . Ширина запрещенных полос у границ области устойчивости зависит от амплитуды и спектра азимутальных гармоник ведущего магнитного поля. Составляющие азимутальных гармоник результирующего магнитного поля для конкретной магнитной системы пропорциональны абсолютным значениям соответствующих составляющих магнитного поля. Так как уровень суммарного магнитного поля на начальном этапе ускорения мал, то относительная величина гармоник может быть весьма большой. Увеличение относительной величины азимутальной неоднородности магнитного поля приводит к расширению полосы резонанса при $n=25$, которая может составлять значительную долю от размера области устойчивости или даже перекрыть ее. Опыт магнитных измерений импульсного магнитного поля в ЭСЦП дает значение относительной амплитуды первой гармоники в пределах 0.3 % [4]. При этом оценка ширины области параметрического резонанса приводит к значению $\Delta n_3 = 0.1$ при $B^c/B_0 \simeq 20$. Существенное сужение разрешенной области из-за азимутальной неоднородности магнитных полей налагает дополнительные требования на степень допустимой азимутальной неоднородности, а также на допустимую несоосность магнитных систем импульсного и постоянного полей. Снижения требований к степени азимутальной симметрии можно достигнуть, если добиться сближения фаз некоторых, наиболее сильных, азимутальных гармоник неоднородности составляющих магнитного поля. Такая

возможность, рассматриваемая совместно с требованием «радиальной корреляции», приводит к концепции пространственной корреляции составляющих магнитного поля. Степень достижения пространственной корреляции импульсной и постоянной составляющей магнитного поля по существу определяет возможности используемого метода получения релятивистского стационарного электронного кольца в части увеличения энергии удержания.

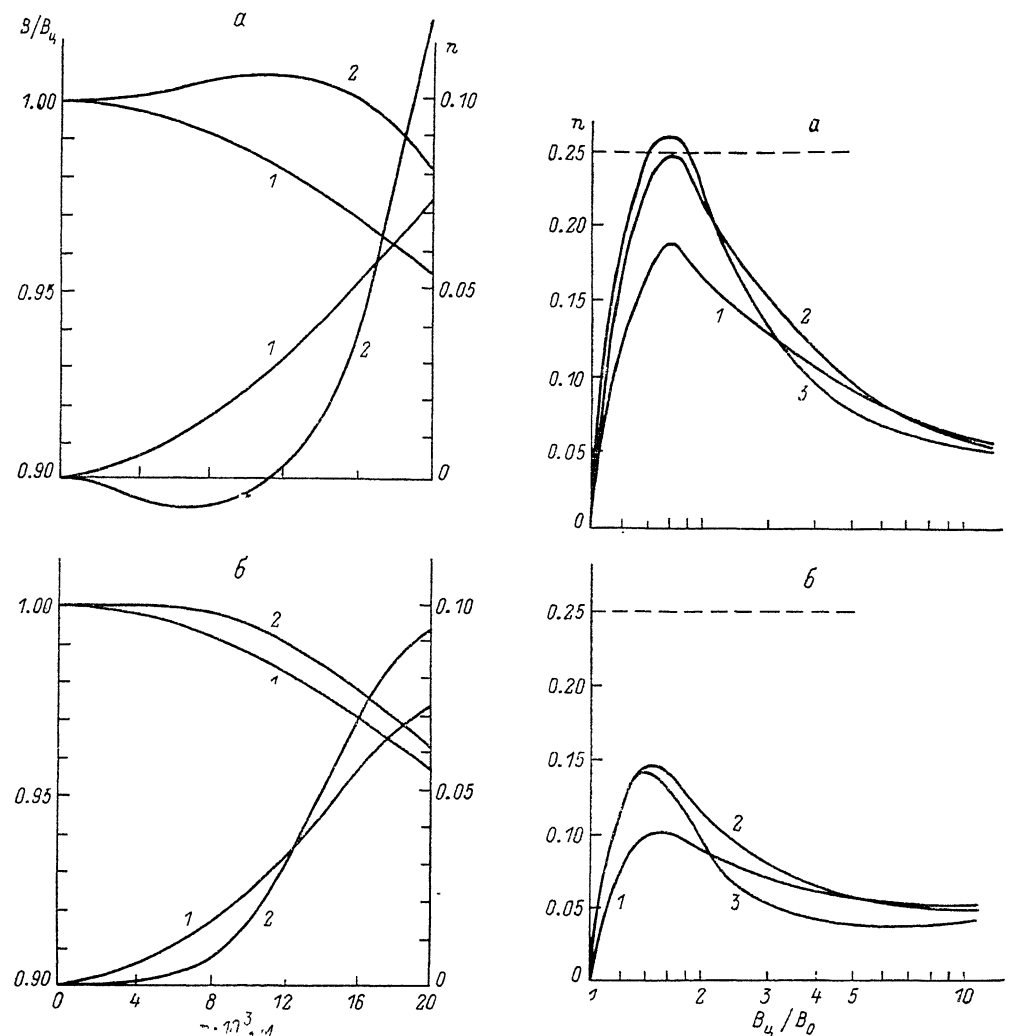


Рис. 4. Радиальное распределение магнитного поля и показателя спада.

a — полюсные наконечники типа I, *б* — полюсные наконечники типа II. 1 — постоянное магнитное поле $B_{\text{с}}=1.31$ Тл, 2 — импульсное магнитное поле.

Рис. 5. Зависимость показателя спада на равновесном радиусе от уровня магнитного поля (*n*-траектория).

a — полюсные наконечники типа I, *б* — полюсные наконечники типа II. $B_{\text{с}}$, Тл: 1 — 0.55, 2 — 0.891, 3 — 1.31.

Понятие разрешенной области значений n^s и n^c имеет смысл лишь для той точки траектории, в которой в данный момент находится ускоряемая частица. При изменении энергии и радиуса орбиты область разрешенных значений непрерывно меняет свою форму и площадь, так же как и значение показателя спада суммарного поля. Для анализа устойчивости движения электронов удобно рассматривать так называемую *n*-траекторию, под которой будем понимать зависимость показателя спада в области мгновенной равновесной орбиты от величины магнитного поля в центре магнитной системы, что позволяет легко интерпретировать экспериментальные результаты, поскольку значение

магнитного поля полностью определяет параметры электронного пучка при любом временном законе его изменения. Расчет n -траектории производился путем последовательного вычисления радиуса орбиты, соответствующих значений магнитных полей B^i , B^c и показателя n^i , n^c для набора значений энергии электрона при заданном значении $B_{\text{д}}$ постоянного магнитного поля в центре системы, которое определяло также радиальное распределение постоянного магнитного поля (из-за частичного насыщения полюсных наконечников). Радиальные распределения импульсного и постоянного магнитных полей тщательно промерялись с использованием известных методик [4]. На рис. 4 представлены результаты измерений радиального распределения импульсного и постоянного магнитных полей и соответствующие распределения показателей спада для двух типов полюсных наконечников (рис. 2, б). Наконечник типа II, кроме концентрации постоянного магнитного поля, способствует концентрации потока импульсного магнитного поля на оси системы, что приводит к лучшему взаимному согласованию формы полей. Приведены распределения лишь для максимальной индукции постоянного магнитного поля 1.31 Тл.

Результаты расчетов n -траекторий, соответствующих магнитным полям, формируемым с использованием различных полюсных наконечников (рис. 2, б), представлены в виде семейств кривых на рис. 5. Каждая кривая в семействе соответствует определенной величине индукции постоянного магнитного поля. Из анализа n -траекторий, построенных для полюсного наконечника типа I, следует, что в этом случае можно ожидать ускорения электронов до конечной энергии в постоянном поле с индукцией не более 0.89 Тл. Для полюсных наконечников типа II n -траектории при всех достижимых уровнях постоянного магнитного поля лежат ниже уровня $n=0.25$.

Экспериментальная обработка метода формирования релятивистского электронного кольца в постоянном магнитном поле проводилась с целью уточнения требований к конфигурации суммарного магнитного поля, проверки достоверности расчетной модели и выбора направлений развития работы. Ниже приведены основные параметры экспериментальной установки.

Диаметр полюсов используемого электромагнита 250 мм при межполюсном зазоре 105 мм. Ток питания магнита стабилизировался до уровня 0.05 %. Максимальное магнитное поле с полюсными наконечниками составило 1.31 Тл.

Техника создания импульсного магнитного поля в принципе не отличалась от описанной в [2]. Ток в обмотках двухвиткового соленоида создавался генератором импульсов тока (ГИТ), в состав которого был включен дополнительно замыкатель нагрузки (кrouбар). Использование кrouбара позволило создавать в нагрузке импульсы тока различной формы, зависящей от момента включения кrouбара. Наиболее характерными являются сплошная, штриховая и штрихпунктирная кривые на рис. 1, б. Максимальное значение индукции импульсного магнитного поля составило 2 Тл, период изменения тока 25 мкс. Стабильность воспроизведения установленного значения индукции составляла $\sim 1\%$

Резонатор ускоряющего высокочастотного поля образован, как и в ЭСЦП, внутренней поверхностью витков электромагнита импульсного поля. Напряженность ускоряющего поля $\sim 5 \cdot 10^5$ В/м. Частота генератора ~ 3050 МГц. Длительность импульса ВЧ регулировалась в интервале 2.5—20 мкс. Устройство высокочастотного тракта подробно описано в [5].

В связи с относительно малой доступной длительностью ВЧ импульса требования к вакуумной системе не отличались от случая ЭСЦП. Это позволило также использовать отработанный в ЭСЦП метод инжекции из плазмы, образованной пробоем по поверхности диэлектрика.

Индикатором ускорения служили жесткие γ -кванты, образованные при сбросе пучка на мишень в спадающем магнитном поле при выключенном в момент достижения максимума магнитного поля ускоряющем напряжении. Изменение магнитного поля соответствовало вариантам, показанным на рис. 1, б штриховой и штрихпунктирной линиями. Момент появления γ -квантов определяется траекторией движения пучка в изменяющемся магнитном поле после прекращения действия ускоряющего поля и различается для частиц, выпав-

них из ускорения в разные моменты времени. Сравнение момента регистрации гамма-квантов с результатом траекторного анализа позволяет сделать заключение о моменте прекращения ускорения.

Экспериментально полученные максимальные значения уровней постоянных магнитных полей, для которых наблюдалось ускорение до максимальной энергии, определяемой суммарной величиной постоянного и импульсного магнитных полей, составило ~ 0.8 Тл для полюсных наконечников типа *I* и ~ 1.2 Тл для полюсных наконечников типа *II*.

Некоторое отличие этих значений от предсказанных расчетом определяется, по-видимому, учетом неоднородности азимутального распределения магнитных полей, а также возможными несоосностями и другими погрешностями установки магнитных систем.

Энергия электронов, соответствующая магнитному полю 1.2 Тл, составляет ~ 6 МэВ. Увеличение энергии удержания потребует более тщательного пространственного согласования форм постоянного и импульсного магнитных полей.

Литература

- [1] Грызлов А. В., Панасюк В. С., Рыжков В. М. и др. ЖТФ, 1972, т. 42, № 1, с. 13—18.
- [2] Велликанов С. П., Квочка В. И., Панасюк В. С. и др. Атомная энергия, 1976, т. 41, № 2, с. 113—117.
- [3] Аневский С. И., Квочка В. И., Панасюк В. С. и др. Измерительная техника, 1977, № 10, с. 3—5.
- [4] Саночкин В. В., Терешкин Ю. М. Измерительная техника, 1985, № 3, с. 16—17.
- [5] Панасюк В. С., Терешкин Ю. М., Хромченко В. Б. ПТЭ, 1984, № 1, с. 30—34.

Всесоюзный
научно-исследовательский институт
оптико-физических измерений
Москва

Поступило в Редакцию
24 февраля 1988 г.