

О ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ ЛИНЕЙНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ
ЗА СЧЕТ ВНУТРИИМПУЛЬСНОГО ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ПУЧКЕ
(экспериментальные результаты)

В.А.Вишняков, В.В.Закутин, В.А.Кушнир, Г.Л.Фурсов, А.М.Шендерович
Харьковский физико-технический институт АН УССР
Харьков, З10108

Аннотация

В работе рассмотрена возможность доускорения пучка линейного ускорителя с помощью цепочки пассивных резонаторов. Показана возможность получения в таких резонаторах ускоряющего поля в сотни киловольт на сантиметр при имеющихся в линейных ускорителях импульсных токах пучка в сотни миллиампер. Полученность и возможность практической реализации данного метода ускорения. В экспериментах при импульсном токе пучка 400 мА была получена напряженность электрического поля более 300 кВ/см. Экспериментально осуществлен сдвиг фазы ускоряемого пучка на 180° путем удлинения его траектории в системе из 4-х короткоимпульсных магнитов. При импульсном токе пучка 200 мА достигнуто 100%-ное прохождение пучка через такую дефлекторную систему, и в цепочке из 7 пассивных резонаторов получен прирост энергии частиц ~ 1,8 MeV.

Развитие физики атомного ядра и элементарных частиц требует увеличения интенсивности и энергии пучков в линейных ускорителях электронов. Традиционный метод увеличения энергии существующих ускорителей состоит в увеличении числа ускоряющих секций и систем их высокочастотного питания: модуляторов, кlyстронов, волноводных трактов, систем электропитания и т.д. и является весьма трудоемким и дорогостоящим. Поэтому значительный интерес представляет поиск более простых и эффективных методов увеличения энергии существующих ускорителей. В настоящей работе рассматривается возможность использования для этой цели пассивных ускоряющих структур, с помощью которых осуществляется перераспределение энергии пучка ускорителя: часть его частично скрывается за счет энергии, отдаваемой другими частицами (идеология автоускорения, см., напр., работу 1). При этом сгруппированный пучок электронов в импульсе линейного ускорителя возбуждает высокочастотные колебания в резонансном элементе, настроенном на частоту следования сгустков ω_0 либо ее гармонику. Для остальных частиц создаются такие фазовые условия, что они попадают в ускоряющее поле и приобретают дополнительную энергию. Благодаря резонансному характеру взаимодействия эффекта доускорения пучка не происходит при импульсных токах пучка в сотни миллиампер, имеющихся в существующих ЛУЭ. При этом для ускорения пучка не требуется использования дополнительных источников высокочастотного питания и связанных с этим оборудования, так что данный метод прост и экономичен. Этот метод доускорения уже рассматривался ранее 2-9. В настоящей работе рассматривается возможность практической реализации доускорения пучка в системе слабосвязанных пассивных резонаторов.

Для осуществления доускорения целесообразно использовать резонаторы с колебаниями типа E_{010} , в котором электрическое поле имеет только продольную составляющую E_z , не зависящую от продольной координаты z . При точной настройке цилиндрического резонатора на n -ю гармонику частоты повторения сгустков

$$E_{z\max} = \frac{16 J_n v Q}{\sqrt{n^2 \omega_0^2 d R a}} \cdot \frac{J_1(\sqrt{\frac{Q}{n}})}{J_1^2(v)} \sin \frac{\omega_0 d}{2v}, \quad (I)$$

где J_n - n -я гармоника тока пучка; Q, R, d - добротность, радиус и продольный размер резонатора; a, v - радиус и скорость пучка; c - скорость света; v - корень функции Бесселя J_0 . Оптимальное значение n , при котором $E_{z\max}$ - наибольшее значение, определяется фазовой протяженностью сгустка², а также конструктивными соображениями (углом пролета, отверстиями для пролета пучка, электрической прочностью и т.д.). Для линейных ускорителей, работающих в десятисантиметровом диапазоне, наиболее близким к оптимальным является выбор $n = 2$. Оценка по формуле (I) показывает, что, например, при $n = 2, Q = 10^4$,

$$\sqrt{\frac{Q}{R}} \ll 1, \frac{\omega_0 d}{2v} \ll 1 \text{ и импульсном токе пучка } 250 \text{ мА}$$

$$E_{z\max} = 500 \text{ кВ/см.}$$

Сдвиг фазы ускоряемых частиц можно осуществить за счет удлинения их траектории с помощью системы импульсных магнитов, либо путем инверсии фазы в системе высокочастотного питания. Достоинством первого метода является его быстродействие, поэтому он и был использован в проведенных нами экспериментах.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. I.

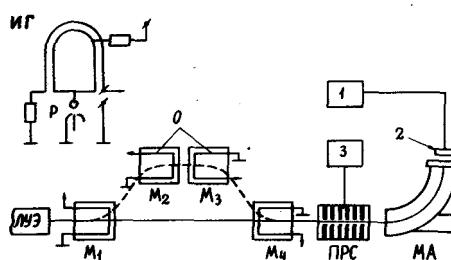


Рис. I. Схема эксперимента по доускорению пучка. МА - магнитный анализатор энергии частиц, 1, 2 - система измерения импульсного тока на выходе анализатора, 3 - измеритель наведенного пучком высокочастотного сигнала.

Пучок линейного ускорителя⁹ с энергией ~10 MeV (ЛУЭ) возбуждал систему из 7 слабосвязанных пассивных резонаторов (ПРС), настроенных на

вторую гармонику частоты ускорителя. Добротность резонаторов составляла 10000. После достижения максимального поля в резонаторах (постоянная времени $0,5 \text{ мс}$) включалась короткоимпульсная дефлекторная система, состоящая из четырех ферритовых магнитов M_1, M_2, M_3 и M_4 , которая удлинила траекторию частиц на $\sim 2,5 \text{ см}$, т.е. на половину длины волн пассивных резонаторов. Прошедшие дефлекторную систему частицы ускорились в ПРС. Питание дефлекторной системы осуществлялось от импульсного генератора ИГ с волновым сопротивлением $\sim 4 \Omega$ и величиной зарядного напряжения 18 кВ. Длительность импульса составляла 100 нс . Энергия частиц измерялась магнитным анализатором МА с разрешением, регулируемым от 1 до 6%.

Результаты измерений при отключенной дефлекторной системе показаны на рис.2.

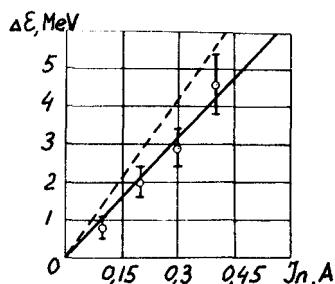


Рис.2. Зависимость потери энергии частиц пучка в цепочке пассивных резонаторов от импульсного тока пучка. Штриховой и сплошной линиями показаны результаты расчетов при фазовой протяженности сгустка соответственно 0 и 40° , точками показаны экспериментальные результаты.

Из рисунка видно, что при импульсном токе пучка 400 мА потери энергии составляют 4,6 МэВ, что соответствует напряженности возбуждаемого поля более 300 кВ/см. Результаты измерений хорошо согласуются с расчетом при фазовой протяженности сгустка 40° , характерной для данного ускорителя.

Эксперименты по доускорению проводились при импульсном токе пучка 200 мА. Разработанная методика транспортировки пучка обеспечила 100%-ное прохождение пучка через дефлекторную систему в течение 100 нс, так что величина ускоряемого импульсного тока также составляла 200 мА. Результаты измерений приведены на рис.3.

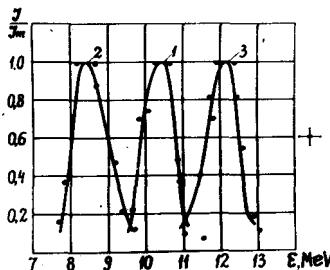


Рис.3. Энергетические спектры: 1 - пучка ускорителя, 2 - пучка, потерявшего энергию в пассивных резонаторах, 3 - пучка, ускоренного в пассивных резонаторах.

Из рисунка видно, что имеет место увеличение энергии частиц на $\sim 1,8 \text{ MeV}$ за счет потери энергии другими частицами ($\sim 2 \text{ MeV}$). Разница $0,2 \text{ MeV}$ связана с уменьшением поля в резонаторах за время нарастания поля в магнитах при включении дефлектора ($\sim 85 \text{ нс}$). Из рисунка 3 также видно, что ширина спектра при доускорении пучка практически не изменяется. Следовательно, дефлекторная система мало изменяет фазовую протяженность сгустка ускорителя.

Таким образом, в проведенных экспериментах получена напряженность ускоряющего поля в сотни киловольт на сантиметр, осуществлен быстрый сдвиг фазы частиц на 180° со 100% -ной транспортировкой их через дефлектор и эффективное их доускорение. Полученные результаты показывают перспективность и возможность практической реализации метода доускорения пучков линейных ускорителей с помощью системы пассивных резонаторов. Данного метода предполагается использовать для увеличения энергии линейных ускорителей электронов ХФТИ АН УССР.

Литература

- Казанский Л.Н., Кислецов А.В., Лебедев А.И. Автоускорение в интенсивных электронных пучках. - Атомная энергия, 1971, т.30, вып.1, с.27-29.
- Вишняков В.А., Ракитянский А.А., Терехов Б.А., Шендлерович А.М. Некоторые новые возможности увеличения энергии и течения ускорения в линейных резонансных ускорителях. - Украинский физический журнал, 1982, т.27, №10, с.1469-1475.
- Вишняков В.А., Закутин В.В., Кушнир В.А., Ромасько В.П., Фурсов Г.Л., Шендлерович А.М. Экспериментальное исследование получения больших ускоряющих полей для доускорения пучка линейного резонансного ускорителя в пассивной резонансной структуре. - Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. - Дубна, 1985, т.1, с.175-177.
- Вишняков В.А., Закутин В.В., Кушнир В.А., Шендлерович А.М. Методы увеличения энергии существующих линейных резонансных ускорителей. Обзор М.: ЦНИИатоминформ, 1984.
- Бойко В.А., Воронков Р.М., Даниличев В.А. и др. Резонаторный ускоритель, возбуждаемый пучком. - В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Серия: Линейные ускорители, 1977, вып. 2(5), с.36.
- Богданович Б.Ю., Останин В.А., Шальнов А.В., Яненко В.В. Линейный ускоритель электронов с использованием энергии поля для улучшения пучка. - В кн.: Ускорители. - М., 1981, вып. 20, с.72.
- Воргушин М.Ф., Мудролюбов В.Г. ВЧ-система резонаторного ускорителя с возбуждением электронным пучком. - Труды XIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. - Дубна, 1983, т.1, с.172.
- Бойко В.А., Воронков Р.М., Симонов К.Г. и др. Автоускорение модулированного пучка. - ХФТИ, 1982, т.52, вып. II, с.2163.
- Фурсов Г.Л., Кислецов В.М., Кашаев И.А. и др. Линейный ускоритель электронов на средний ток 1 мА. - Атомная энергия, 1979, т.46, с.336-340.