

С 345

К-20



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

С.П. Капица

941

МИКРОТРОН

Автореферат диссертации, представленной на соискание
ученой степени доктора физико-математических наук

Дубна 1962 год

С.П. Капица

941

С 345
К-20

МИКРОТРОН

Автореферат диссертации, представленной на соискание
ученой степени доктора физико-математических наук

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

1. Введение

Электронный циклотрон — циклический ускоритель для ускорения релятивистских частиц был впервые предложен в 1944 г. В.И. Векслером^{1/}. Однако, первые исследования, в которых было экспериментально осуществлено ускорение по этому принципу, не привели к созданию сколько-нибудь эффективного ускорителя, а в результате последующего быстрого развития линейных ускорителей интерес к электронному циклотрону, позднее названному микротроном, был утерян.

Исходя из общих представлений о циклических ускорителях, мы пришли к выводу, что электронный циклотрон можно превратить в весьма эффективный источник быстрых электронов. Поэтому в 1957 году в Физической лаборатории Института физических проблем АН СССР были начаты работы по постройке и изучению этого типа ускорителей. Результатам этих исследований и посвящена данная диссертация.

2. Экспериментальные данные по микротрону (обзор литературы)

Первый ускоритель, в котором было экспериментально осуществлено ускорение электронов в режиме с переменной кратностью, был построен в 1948 году в Канаде. В этом ускорителе электроны ускорялись до энергий 4,8 Мэв при частоте переменного поля, соответствующей длине волны 10 см.

Этот ускоритель, который получил название микротрона, послужил прототипом ряда других микротронов, построенных в различных странах. Общим недостатком всех ускорителей, построенных по образцу канадского микротрона, является весьма малая интенсивность пучка, получаемого в результате эмиссии электронов со стенок резонатора. Импульсные значения тока ускоренных частиц достигали 1–2 ма.

В 1958 году в Лондоне был построен такой же микротрон на энергию 30 Мэв, однако, ток пучка был еще меньше (0,05 ма). Заметим, что повысить интенсивность тока, по-видимому, удалось на шведском микротроне на энергию 5 Мэв, однако, результаты этой работы известны только из частных сообщений.

На основании этих исследований можно заключить, что микротрон является очень простым ускорителем электронов до энергий 5–30 Мэв, однако, ток ускоренного пучка в этом приборе существенно ограничен несовершенством механизма инжекции.

3. Основные параметры микротрона ИФП и литература по нему

Работы по созданию и изучению электронного циклотрона в Институте физических проблем были первоначально поставлены с целью получить сгустки быстрых электронов. В экспериментах по релятивистской электронике, известных из литературы, в качестве источника сгустков, как правило, применяется линейный ускоритель.

Однако плотность электронов, которую можно достичь в линейном ускорителе, оказывается слишком малой (в основном из-за отсутствия достаточно эффективной поперечной фокусировки) по сравнению с плотностью электронов, которую можно достичь в микротроне.

В Советском Союзе микротрон впервые был построен в 1957-80 г.г. в Физической лаборатории Института физических проблем. Он имеет диаметр камеры 70 см и работает с магнетроном десятисантиметрового диапазона. В первых опытах был использован тороидальный резонатор; путем кропотливого подбора формы ускорительного резонатора удалось получить ток до 7 ма (в импульсе) на 12-ой орбите при энергии 6 Мэв. Полученный результат еще раз подтвердил, что только при коренном изменении принципа инжекции можно получить заметное увеличение тока.

Отказавшись от общепринятого тороидального резонатора и перейдя к резонаторам нового типа - к цилиндрическим резонаторам, в которых возбуждались колебания типа E_{010} , мы пользовались инжекцией электронов с горячего катода, расположенного на плоской стенке резонатора. Применение резонаторов нового типа и точные расчеты движения электронов в них дали возможность получить на построенном нами микротроне ток до 25 ма при энергии 7 Мэв и 8 ма при энергии 13 Мэв. Новый метод введения электронов на орбиту позволил также поднять магнитное поле в два раза и таким путем удвоить энергию пучка при сохранении прежних размеров магнита, а также плавно и в широких пределах изменять энергию электронов. Прежние микротроны таких возможностей не имели.

Основные результаты исследований микротрона изложены в работах С.П.Капицы, В.П.Быкова и В.Н.Мелехина^{/3/, /4/}. Описание численных расчетов и их результатов дано в работе С.П.Капицы, В.Н.Мелехина, Г.П.Прудковского и И.Г.Крутиковой^{/5/}.

Группировка электронов, ускоренных в переменном электрическом поле и двигающихся в однородном магнитном поле, рассмотрена автором в^{/2/}. Результаты измерений и исследований пакетировки пучка в микротроне изложены в работе В.П.Быкова^{/6/}, а также в его диссертации^{/10/}. Исследования вертикальной фокусировки микротрона, показавшие преимущества применения горизонтальных щелей, дано в работе В.Н.Мелехина^{/8/}. Ограничение тока в микротроне за счет эффектов когерентного излучения от ступок рассмотрено в работе С.П.Капицы и Л.А.Вайнштейна^{/7/}. В.П.Быковым также оценен предельный ток ускорителя, обусловленный силами пространственного заряда на первых орбитах^{/11/}, и даны оценки требуемой однородности ведущего магнитного поля ускорителя^{/9/, /11/}. Некоторые области применения сильноточного микротрона рассмотрены в^{/10/}.

Успешный опыт работы с первым микротроном и детальный анализ происходящих в нем процессов дал возможность нам в 1980 г. приступить к проектирова-

нию и постройке мощного микротрона на энергии 30-40 Мэв с диаметром камеры 1100 мм, работающего от магнетрона 10-сантиметрового диапазона.

Перечисленные выше работы проведены под руководством автора.

4. Основные свойства микротрона

Микротрон - это циклический ускоритель, в котором энергия, сообщаемая частице за цикл, сравнима с ее энергией покоя. Именно этим микротрон коренным образом отличается от всех других ускорителей релятивистских частиц. Сильное ускоряющее поле в микротроне дает возможность легко осуществить вывод частиц из ускорителя и дало нам возможность эффективно вводить электроны в режим ускорения. С другой стороны, большие изменения в энергии, происходящие от орбиты к орбите, и малое число орбит затрудняют применение приближенных методов, использующих адиабатичность процессов ускорения в ускорителях со слабыми полями. Это заставило нас развить численные методы расчета с использованием быстродействующей вычислительной техники и аналоговых машин.

Магнитное поле в микротроне в основном ведет частицы и возвращает их в резонатор. Магнитной фокусировки, в отличие от других ускорителей, в микротроне нет, фокусировка частиц в микротроне происходит только за счет действия ускоряющего высокочастотного поля в резонаторе, а автофазировка приводит к эффективной группировке и большой моноэнергетичности электронов в пучке.

Максимальная энергия, которую можно получить в микротроне, зависит от двух факторов: от допустимого числа орбит и напряженности постоянного магнитного поля H при заданной частоте ускоряющего напряжения, точнее, от отношения магнитного поля H к его циклотронному значению H_0 . Число орбит определяет предельно допустимую неоднородность магнитного поля, которая обратно пропорциональна квадрату числа орбит. Поэтому увеличение энергии путем увеличения числа орбит неизбежно будет связано с большими техническими трудностями обеспечения однородного магнитного поля. По-видимому, при современном уровне техники предельное число орбит порядка 50-100; при этом требуемая однородность магнитного поля будет порядка 0,01%. Возможно, что специальной корректировкой магнитного поля можно несколько увеличить указанное число орбит. Естественный путь увеличения энергии заключается также в увеличении H/H_0 при заданной длине волны. С учетом возможности увеличения числа орбит и увеличения H/H_0 сейчас следует считать реальным создание эффективных микротронов на энергии до 100 Мэв.

Величина тока пучка, естественно, связана, в первую очередь, с мощностью источника сверхвысокой частоты. Физическое ограничение тока происходит из-за излучения пучка в резонаторе (возбуждение дополнительного поля ускоряемыми ступками) и когерентного излучения при движении в магнитном поле в камере

ускорителя. С увеличением N/N_0 величина предельного тока увеличивается в самом грубом приближении пропорционально N/N_0 .

Теоретическая оценка предельного тока приводит к значению порядка 1 ампера. Эта оценка требует экспериментальной проверки, так как расчетным путем учесть все детали механизма ускорения, излучения и радиационной деформации сгустка пока не представляется возможным. Естественно, что ускоритель на предельные энергии и токи, для работы которого необходимы мощности не менее десятка мегаватт, может быть только ускорителем импульсного действия.

Если же снизить отношение N/N_0 и использовать генератор, дающий непрерывную мощность в несколько сотен киловатт, то можно построить микротрон непрерывного действия.

5. Сравнение микротрона с другими ускорителями

В области небольших энергий микротрон можно сравнивать с бетатроном и электростатическим ускорителем. При одинаковой технической сложности микротрон имеет все преимущества перед бетатроном. В частности, мощность его пучка больше в 100-300 раз и более. Из микротрона возможно вывести моноэнергетический хорошо коллимированный пучок электронов, энергию которых можно изменять непрерывно.

Существующие электростатические ускорители электронов ограничены энергией в 3-5 Мэв, и по средней мощности своего пучка они сравнимы с импульсным микротроном. Единственное преимущество электростатических ускорителей заключается в большей моноэнергетичности пучка. Однако микротрон обладает столь малым энергетическим разбросом, что для большинства применений, где требуется большая однородность энергии электронов, микротрон вполне может заменить электростатический ускоритель.

Наиболее интересно сравнить микротрон с линейным ускорителем, который наиболее близок ему по механизму ускорения электронов, при энергиях до 30-100 Мэв.

По существу основное отличие линейного ускорителя от микротрона заключается в том, что линейный ускоритель есть машина последовательного соединения, а микротрон можно рассматривать как машину параллельного соединения с соответственно меньшими значениями характеристического сопротивления. Для микротрона существует пороговое значение мощности, начиная с которого в нем можно ускорять электроны. Мощность, необходимая для возбуждения линейных ускорителей, с такими ограничениями не связана. Однако фактическая мощность, необходимая для возбуждения линейного ускорителя при сравнимых энергиях пучка, заметно больше мощности, требуемой для возбуждения микротрона. Поэтому линейный ускоритель всегда будет ускорителем импульсного действия.

В области более высоких энергий микротрон не может конкурировать с линейным ускорителем, что видно особенно ясно из опыта успешной работы линейных ускорителей на энергию в миллиард электрон-вольт и постройки трехкилометрового ускорителя в Стэнфорде (США).

По своим предельным значениям силы тока линейные ускорители и микротроны (для последних имеются в виду теоретические оценки), несмотря на разные механизмы ограничения силы тока, примерно равноценны. Однако, в линейных ускорителях есть необычная возможность импульсного ускорения больших токов за счет накопленной в них электромагнитной энергии. В микротроне, из-за необходимости ускорения частиц до строго определенной энергии, такая возможность исключается.

По сравнению с линейными ускорителями несравненным преимуществом микротрона является его простота. Резонатор микротрона, к точности изготовления которого не предъявляется никаких особых требований, гораздо проще, чем диафрагмированный волновод линейного ускорителя. Микротрон в том виде, как он построен нами, не требует для инжекции сложной импульсной электронной пушки. Система высокочастотного возбуждения микротрона также существенно проще той сложной цепочки усилителей и сверхмощных клистронов, которые сейчас требуются для возбуждения линейного ускорителя. В микротроне можно применять мощные самовозбуждающиеся магнетроны, которые, благодаря своему широкому применению в радиолакации, отличаются большой надежностью и простотой в эксплуатации. В микротроне необходимо создание постоянного магнитного поля. Однако вследствие небольшой напряженности этого поля конструкция магнитов отличается простотой, и энергетические затраты, связанные с возбуждением магнита, невелики.

В отличие от линейных ускорителей, требования к вакууму в микротроне вполне умеренны, а объединение вакуумной камеры с магнитом существенно упрощает конструкцию ускорителя.

6. Результаты и выводы

Перечислим основные результаты данной работы.

а) Предложен и осуществлен микротрон нового типа. Этот микротрон является сильноточным ускорителем, в котором впервые осуществлено эффективное ускорение электронов в режиме переменной кратности. Эти результаты достигнуты благодаря использованию эффективного термокатода, точному расчету движения электронов в резонаторах новой формы, в которых осуществлена эффективная инжекция частиц в режим ускорения.

б) Проведено теоретическое и экспериментальное исследование ускорения электронов в микротроне. Основные экспериментальные результаты, полученные на микротроне Физической лаборатории Института физических проблем, находятся

в согласии с результатами численных расчетов и выводами теории. В этом ускорителе получена энергия в 7,6 Мэв при токе 25 ма (в импульсе) и энергия 12 Мэв при токе 5 ма. Измеренное значение коэффициента полезного действия составляет 12-15%.

в) Создание эффективного ускорителя стало возможным благодаря решению ряда технических задач: разработана конструкция магнитов с однородным магнитным полем и доступной вакуумной камерой, предложена конструкция перестраиваемых резонаторов, надежно работающих при больших напряжениях электрического поля, применен эффективный катод из борида лантана, разработаны система сверхвысокочастотного питания и системы измерения и управления ускорителем, обеспечивающие его надежную и устойчивую работу.

г) Детально изучена пакетировка пучка микротрона, для чего была создана система скоростной высокочастотной развертки с временным разрешением $2 \cdot 10^{-12}$ сек. Плотность электронов в сгустке размером $3 \times 4 \times 2$ мм составляет $2 \cdot 10^9$ эл/см³, а распределение заряда соответствует результатам вычислений.

д) Развита эффективные методы численного расчета траекторий, которые позволили детально изучить захват, ускорение и фокусировку частиц при их движении в микротроне.

е) Рассчитаны и осуществлены режимы, при которых удалось удвоить энергию пучка при прежнем числе орбит, а также непрерывно менять в 1,5 раза энергию электронов, что в ускорителях прежней конструкции было невозможным. Указаны пути дальнейшего увеличения энергии и более эффективного ввода частиц в режим ускорения.

ж) Исследована вертикальная фокусировка в новом резонаторе микротрона и предложены способы ее улучшения.

з) Выяснены основные требования к однородности поля магнита, которые ограничивают число орбит и энергию электронов в микротроне.

и) Разобраны основные факторы, ограничивающие ток пучка. Они связаны с возбуждением резонатора сгустками ускоряемых электронов и их когерентным излучением при круговом движении в поле магнита. Оценка предельного тока дает величину порядка ампера: при таких токах поля, создаваемые ускоряемыми электронами, уже могут влиять на ускорение и движение электронов.

Полученные результаты позволяют считать выясненными основные физические процессы, происходящие в микротроне. Они позволяют также сделать вывод, что в области средних и малых энергий микротрон должен стать эффективным источником электронов. Технически возможна постройка ускорителя непрерывного действия с мощностью пучка в десятки киловатт и более.

Основные преимущества микротрона, по сравнению с ускорителями других типов, мы видим в его простоте и гибкости, моноэнергетичности и пакетировке получаемого электронного пучка и возможности использовать сравнительно простые генераторы мощных сверхвысокочастотных колебаний.

Л и т е р а т у р а

1. В.И.Векслер. Доклады АН СССР, 43, 346 (1944).
2. С.П.Капица. "Об одном способе группирования быстрых электронов". ЖТФ, 29, 729 (1959).
3. С.П.Капица, В.П.Быков, В.Н.Мелехин. Микротрон с большим током. ЖЭТФ, 39, 997 (1960).
4. С.П.Капица, В.П.Быков, В.Н.Мелехин. Эффективный сильноточный микротрон. ЖЭТФ, 41, 389 (1961).
5. С.П.Капица, В.Н.Мелехин, И.Г.Крутикова, Г.П.Прудковский. Расчет движения электронов в микротроне. ЖЭТФ, 41, 378 (1961).
6. В.П.Быков. Исследование электронных пакетов в микротроне. ЖЭТФ, 40, 1659 (1961).
7. В.Н.Мелехин. Вертикальная фокусировка в микротроне. ЖЭТФ, 42, 822 (1962).
8. С.П.Капица, Л.А.Вайнштейн. Радиационное торможение электронных сгустков в микротроне. ЖЭТФ, 42, 821, (1962).
9. В.П.Быков. Движение электронов в микротроне с учетом неоднородности поля (в печати).
10. С.П.Капица. Новый эффективный источник быстрых электронов. Вестник АН СССР, № 10, 65, (1961).
11. В.П.Быков. Исследование группировки электронов в микротроне. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, ИФП, 1962.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 марта 1962 года.