

ПРОЕКТ РАЗРЕЗНОГО МИКРОТРОНА-РЕКУПЕРАТОРА ДЛЯ ЛАЗЕРА
НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

В.Г.Вещеревич, Н.А.Винокуров, П.Д.Воблый, Н.Г.Гаврилов,
Э.И.Горникер, Г.Н.Кулипанов, И.В.Кулцов, Г.Я.Куркин,
А.Д.Орешков, В.М.Петров, И.В.Пинаев, И.К.Седляров,
А.Н.Скринский, А.С.Соколов

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

В Институте ядерной физики СО АН СССР ведутся работы по созданию разрезного микротрона-рекуператора непрерывного действия на энергию электронов 35 МэВ, предназначенного для лазера на свободных электронах (ЛСЭ). Используемый в ЛСЭ электронный пучок будет отдавать свою энергию ВЧ-системе микротрона, проходя ее в тормозящей фазе по тем же микротронным орбитам в обратной последовательности. Схема микротрона приведена на рис.1. Его габаритные размеры ограничены размерами уже существующего помещения, планируемого для его расположения. Микротрон состоит из инжектора (1); двух магнитных систем 180-градусного сепарирующего поворота (2); общего (для электронов с разными энергиями) прямолинейного промежутка, где установлены ВЧ-резонаторы (3), магниты систем инжекции (4) и выпуска (5) и соленоидальные магнитные линзы (6); четырех отдельных прямолинейных промежутков с магнитными квадрупольными линзами (7); магнитной системы ЛСЭ (8); установленной в четвертом прямолинейном промежутке; и поглотителя пучка (9).

Электронная пушка инжектора (1.1) с рабочим напряжением 300 кВ испускает электронные сгустки длительностью 1 нс с частотой повторения 45 МГц. После прохождения модулирующей энергию (скорость) электронов ВЧ-резонатора (идентичного всем остальным ВЧ-резонаторам микротрона)

в группирующем прямолинейном промежутке (1.2) сгусток продольно сжимается до длительности 150 пс и затем ускоряется в двух ВЧ-резонаторах (3) инжектора с суммарной амплитудой ускоряющего напряжения 1.6 МВ в равновесной фазе $\varphi_0 = 29^\circ$ до энергии 2.1 МэВ. Инжекция электронов в общий прямолинейный промежуток микротрона осуществляется с использованием 180-градусного магнитного зеркала и двух одинаковых знакопротивоположных 65-градусных поворотных магнитов с параллельными краями (4). Данная магнитная система 180-градусного поворота является ахроматичной, и ее горизонтальная и вертикальная оптические матрицы взаимно совпадают и имеют вид матрицы пустого промежутка.

Амплитуда рабочего напряжения ВЧ-резонаторов общего прямолинейного промежутка микротрона с учетом пролетного фактора электронов составляет 800 кВ для одного и, соответственно, 9.6 МВ для двенадцати. Эти ВЧ-резонаторы отстоят друг от друга на половину длины волны $\lambda = 165$ см, соответствующей их резонансной частоте $f = 180$ МГц.

Сепарирующий 180-градусный поворот (2) для первых трех дорожек микротрона полностью аналогичен уже рассмотренной выше магнитной системе инжекции, т.е. это 180-градусное магнитное зеркало и по два 65-градусных поворотных магнита на каждой дорожке. Изменение длины орбиты при переходе на соседнюю дорожку микротрона составляет одну длину волны его ВЧ-системы. Выбор именно такого типа поворота и его ахроматичность обусловлены необходимостью обхода пучком ВЧ-резонаторов общего прямолинейного промежутка, уменьшением горизонтального размера пучка и упрощением согласования β -функций на трех отдельных прямолинейных промежутках, где расположены квадрупольные линзы (7).

Четвертый прямолинейный промежуток предназначен для магнитной системы ЛСЭ (8). Для увеличения его длины 180-градусный ахроматический поворот на четвертой дорожке состоит из двух 90-градусных поворотов. Расстояние между 90-градусными магнитами таково, что длина четвертой дорожки отличается от длины третьей дорожки примерно на 2.5 длины волны ВЧ-напряжения микротрона. На выходе из магнитной системы ЛСЭ установлены два ВЧ-резонатора для компенсации средних потерь энергии электронами в ЛСЭ. Эти ВЧ-резонаторы и датчик горизонтального смещения пучка, установленный за 90-градусным поворотным магнитом, стабилизируют энергию электронов на выходе из четвертого прямолинейного промежутка. Попав с четвертой дорожки вновь на общий прямолинейный промежуток, но уже в тормозящей фазе ВЧ-напряжения, электроны отдадут свою энергию ВЧ-резонаторам, проходя в том же направлении те же три дорожки микротрона, но в обратной последовательности, и с помощью магнитов системы выпуска (5) (идентичных магнитам системы инжекции) выводятся и сбрасываются на поглотитель (9).

Для обеспечения подходящей фокусировки как для ускоряемых, так и

для замедляемых электронов, магнитная система (за исключением четвертой дорожки) зеркально симметрична относительно линии, проходящей через центр прямолинейных промежутков. При этом согласованные β -функции имеют ту же симметрию.

С целью получения минимальной длины электронного сгустка (максимального пикового тока электронов) в магнитной системе ЛСЭ, продольное фазовое движение пучка в микротроне было оптимизировано посредством небольших вариаций значений равновесной энергии электронов на каждой из дорожек (и, соответственно, геометрии микротрона). Равновесные фазы четырех проходов через ВЧ-систему составляют $\varphi_1 = 21.9^\circ$, $\varphi_2 = 34.6^\circ$, $\varphi_3 = 47.6^\circ$, $\varphi_4 = 1.6^\circ$. На рис.2 приведена продольная фазово-энергетическая диаграмма положения электронного сгустка на четырех отдельных прямолинейных промежутках. Максимальный относительный разброс энергий электронов на четвертой дорожке составляет $\pm 0.5\%$. На диаграмме также видно, что после четвертого прохода через ВЧ-систему квадратичная абберрация продольной фокусировки отсутствует.

Длины прямолинейных промежутков микротрона таковы, что при инжекции электронных сгустков через каждые четыре периода его ВЧ-напряжения (т.е. с частотой 45 МГц) на общей дорожке ускоряемые и замедляемые сгустки равномерно распределены в продольном направлении (т.е. по времени прохода через резонаторы) с интервалом примерно равным 0.8 нс . В этом случае резко снижается взаимное влияние ускоряемых и замедляемых пучков с различными энергиями электронов друг на друга.

Расчеты продольной и поперечной динамики пучка показывают, что возможна устойчивая работа микротрона-рекуператора со средним током более 0.1 А . При этом окончательная группировка электронов происходит только на последней дорожке, что способствует получению большого (порядка 100 А) пикового тока при сохранении малых поперечных эмиттансов пучка.

Подписи к рисункам:

Рис.1. Общая схема разрезного микротрона-рекуператора: 1 - инжектор, 1.1 - электронная пушка инжектора, 1.2 - группирующий прямолинейный промежуток, 2 - магнитная система 180° -градусного сепарирующего поворота, 3 - ВЧ-резонаторы, 4 - магниты системы инжекции, 5 - магниты системы выпуска, 6 - соленоидальные магнитные линзы, 7 - квадрупольные магнитные линзы, 8 - магнитная система ЛСЭ, 9 - поглотитель пучка.

Рис.2. Продольная фазово-энергетическая диаграмма положения электронного сгустка: а - после группирующего прямолинейного промежутка, б - после инжекции на общий прямолинейный промежуток, 1,2,3,4 - на 1,2,3,4 прямолинейных промежутках, соответственно.

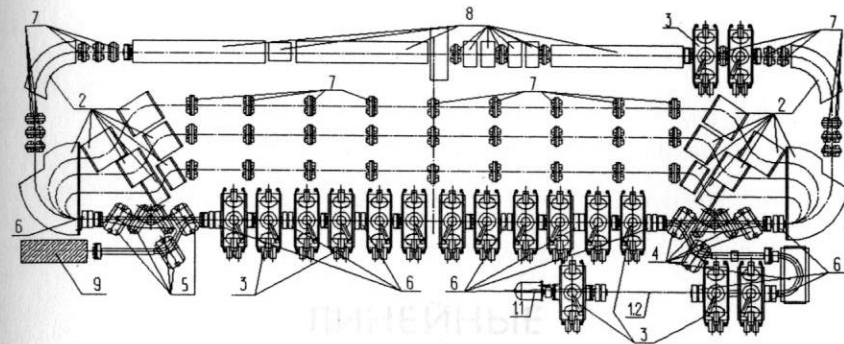


Рис. 1

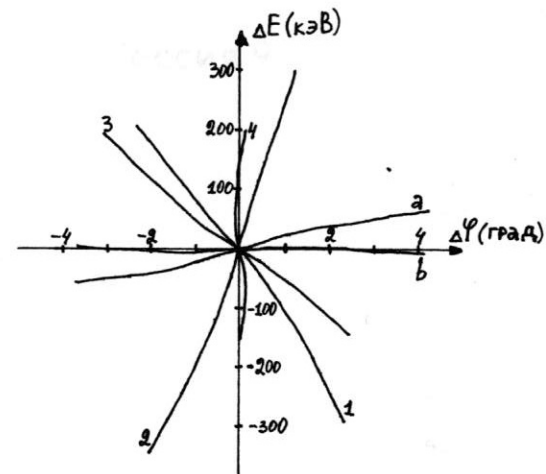


Рис. 2