

ПОЛУЧЕНИЕ ПУЧКА СВЕРХБЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ
ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ЦЕЛЕЙ

А. А. ВОРОБЬЕВ, Б. А. КОНОНОВ, В. А. МОСКАЛЕВ, Л. С. СОКОЛОВ

Сверхжесткое рентгеновское излучение, возникающее при торможении электронов, ускоренных в бетатроне, успешно применяется в современной медицине для лечения глубоко расположенных опухолей. Применение для этой цели непосредственно пучка ускоренных электронов дает возможность во много раз сократить время облучения при минимальном поражении прилегающих здоровых тканей. В нашей работе рассматривается вывод электронов, ускоренных до энергии 15 мэв, из камеры бетатрона.

В бетатроне ускоряемые электроны движутся по равновесной орбите, радиус которой определяется условием $A=300 B \cdot r$, где A — энергия электронов в эв, B — магнитная индукция на орбите в гауссах и r — радиус орбиты в см. Изменяя величину магнитной индукции B при заданной величине A , соответственно изменяем величину радиуса орбиты электронов. Таким путем можно увеличить радиус орбиты электронов до внутренней поверхности боковой стенки камеры и через окно вывести электроны наружу. В нашем бетатроне $r=13$ см и $B=4000$ гс при энергии 15 мэв.

В Томском политехническом институте осуществлен вывод ускоренных электронов из камеры индукционного ускорителя на 15 мэв в трех вариантах.

1. Методом увеличения радиуса равновесной орбиты электронов с помощью специальной „заорбитной“ смещающей катушки.

2. Методом удаления электронов за пределы действия магнитного поля бетатрона с помощью немагнитного канала.

3. Методом отклонения ускоренных электронов в электрическом поле конденсатора.

Было сконструировано смещающее устройство, с помощью которого электроны, ускоренные в бетатроне до 10 мэв, отводились на стенку камеры.

Пучок электронов, падая на стекло, вызывал его свечение. В этих опытах размеры катушки были $20 \div 70^\circ$ по азимуту, а радиальный размер 35 мм. Ширина импульса тока в катушке составляла 30 мк/сек. Катушка располагалась на азимуте инжектора; при этом светящееся пятно на стенке камеры появлялось на азимуте 135° .

Второй метод вывода ускоренных электронов из камеры бетатрона состоит в следующем. Немагнитный канал создается внутри магнитного шунта, изготовленного из листовой трансформаторной стали Э4АА. Шунт помещается на радиусе 165 мм в направлении касательной к мгновенной орбите на этом азимуте. В конце ускорения электронов импульс тока смещающей обмотки нарушает соотношение между магнитными потоками в центре и на орбите. В результате электроны начинают движение по развертывающейся спирали и попадают в немагнитный канал шунта. Магнитное поле внутри канала весьма слабо (десятки эрстед) и электроны,

двигаясь в нем практически по прямолинейной траектории, выходят за пределы магнитного поля ускорителя. Электроны выпускаются в атмосферу через алюминиевое окно толщиной 0,2 мм, имеющее размеры 10×40 мм. Шунт одинаково хорошо выводит электроны любой энергии в пределах от 5 до 15 мэв.

Регулирование положения магнитного шунта дает возможность в известных пределах изменять направление электронного пучка в пространстве.

Выведенный электронный ток в пучке, измеренный на расстоянии 5 см от окна с помощью цилиндра Фарадея и усилителя постоянного тока составляет 10^{-11} а.

В третьем варианте пластины отклоняющего конденсатора расположены на радиусе 163 мм. Отклоняющий конденсатор состоит из 2 пластин длиной 47 мм, изогнутых в соответствии с радиусом кривизны электронной орбиты. Внутренняя (отсекающая) пластина изготовлена из танталовой жести, толщина которой выбирается из условий обхода электронами лобовой поверхности ее, и механической и электрической прочности. В нашем случае толщина отсекающей пластины 50 микрон. Внешняя (отклоняющая) пластина изготовлена из нержавеющей стали толщиной 1 мм. Расстояние между пластинами 2 мм. Ускоренные электроны уводятся с орбиты с помощью обычной расширительной обмотки, питаемой импульсным током. Электроны движутся по развертывающейся спирали, шаг которой на радиусе расположения отклоняющего конденсатора достигает значительной величины; электроны, таким образом, получают возможность войти в конденсатор. На отклоняющую пластину конденсатора к моменту смещения электронов подается положительный импульс напряжения до 25 кВ, который обеспечивает напряженность поля между пластинами около 80 кВ/см. Электроны, подвергаясь действию этого электрического поля, приобретают дополнительное ускорение в радиальном направлении и покидают ускорительную камеру. Электроны выходят из камеры бетатрона через алюминиевую фольгу толщиной 30 микрон. Выведенный электронный пучок с энергией электронов 5 мэв хорошо сфокусирован и имеет размеры сечения 5×8 мм на расстоянии 50 мм от выводного окна. Размеры пучка электронов на расстоянии 50 см от окна увеличиваются до 12 см в ширину и 6 см в высоту.

Для вывода электронов, ускоренных до энергии 10 мэв, длина пластин отклоняющего конденсатора несколько увеличена.

Электронный ток в пучке, выведенном этим методом, измерен с помощью цилиндра Фарадея и гальванометра и составляет не менее $4 \cdot 10^{-9}$ а, интенсивность излучения в рентгенах составляет при этом 3300 р/мин в непосредственной близости от выводного окна.

Интересно отметить, что при некотором положении отклоняющего конденсатора наблюдается устойчивый вывод электронного пучка с энергией электронов как 5 мэв, так и 10 мэв, даже при отсутствии напряжения на отклоняющей пластине за счет взаимодействия электронного пучка с пластиной конденсатора. Размеры сечения электронного пучка при этом остаются практически неизменными при достаточно хорошей фокусировке его. Однако электронный ток в этом пучке ниже, примерно, в 20 раз, чем в случае вывода электронов электрическим полем конденсатора.

В обоих вариантах вывода электронного пучка из камеры ускорителя инжектор расположен вне плоскости равновесной орбиты.

Полученный электронный пучок может быть с успехом применен в медицине для электронной терапии злокачественных опухолей.

В настоящее время ведутся работы в направлении усовершенствования методов, увеличения тока в выведенном пучке электронов, а также вывода электронов, ускоренных до энергии 25 мэв.