

Генерирование столь больших токов будет производиться резким затормаживанием четырех 20-тонных металлических дисков, вращающихся между полюсами магнита (который предназначался для циклотрона). Сверхмощный ток будет сниматься с подвижных дисков струями расплавленного натрия и калия. Весь генератор будет помещен в атмосферу гелия.

В Швейцарии в начале 1960 г. введен в эксплуатацию синхрофазотрон на 25 000 Мэв.

## § 106. Линейные ускорители электронов и ионов

Аппараты, в которых ускоряемые заряженные частицы движутся прямолинейно, называют *линейными ускорителями*.

Линейные ускорители применялись в ядерной физике еще до изобретения циклотрона (в 1927—1932 гг.). Их называли *ускорительными трубками*. Это были аппараты, в которых ускорение электронов и ионов производилось постоянным электрическим полем высокого напряжения (в отличие от современных линейных ускорителей, питаемых ультракоротковолновыми генераторами).

Ускорительные трубки, предназначенные на напряжение, превосходящее 300 тыс. в, приходилось устраивать в виде многокамерной системы, подразделенной на секции с таким расчетом, чтобы на соседних электродах устанавливалась разность потенциалов не более 250—300 тыс. в. Первая ускорительная разрядная трубка на высокое напряжение порядка 2 млн. в была построена в 1931 г. Ланге и Брашем. Общее представление о такого рода трубках могут дать рис. 392 и 393, где показаны внешний вид и схема электроноускорительной трубки на 3—4 млн. в, построенной в 1938 г. в Украинском физико-техническом институте К. Д. Синельниковым, А. К. Вальтером и др. Трубка имеет длину 11 м и укреплена между колоннами электростатического генератора Ван-дер-Граафа (т. II, § 10, 1959; в предыдущих изданиях § 19).

На такое же напряжение порядка 3 млн. в в 1939 г. была построена трубка в Ленинграде (она изготовлена из микалекса и имеет около 100 дискообразных промежуточных электродов).

Источниками высокого постоянного напряжения для электронных и ионных трубок обычно служит генератор Ван-дер-Граафа или же высоковольтные трансформаторы с умножением выпрямленного напряжения по схеме, представленной на рис. 394. В этой схеме несколько высоковольтных ртутных выпрямителей включены последовательно так, что через цепь, образуемую выпрямителями, заряд одного знака (на схеме — отрицательный) стекает в землю. Тогда заряд другого знака (на схеме — положительный) сосредоточивается на верхних пластинах конденсаторов, две цепочки которых подключены к обоим концам вторичной высоковольтной обмотки трансформатора. Когда нагрузка невелика, на каждом конденсаторе получается удвоенное максимальное напряжение вторичной обмотки трансформатора. При  $n$  конденсаторах в каждой ветви во внешнюю

цель, если она создает малую нагрузку, подается напряжение около  $2nV_0$ .

Применив указанную схему, Кокрофт и Уолтон в 1932 г. впервые получили ядерные превращения, вызванные искусственно ускоренными частицами. Описанная схема умножения напряжения оказалась практически пригодной для питания ускорительных трубок напряжением порядка 2 млн. в и позволяет получать электроны, протоны и дейтоны с энергией 2 Мэв и  $\alpha$ -частицы с энергией 4 Мэв при интенсивности пучка (как и в случае применения генератора Ван-дер-Граафа) порядка десятков микроампер.

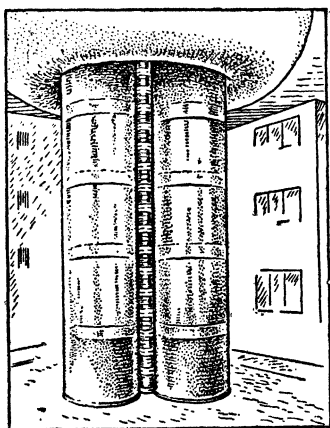


Рис. 392. Внешний вид ускорительной трубки на 3 000 000 в (трубка укреплена между колоннами генератора Ван-дер-Граафа).

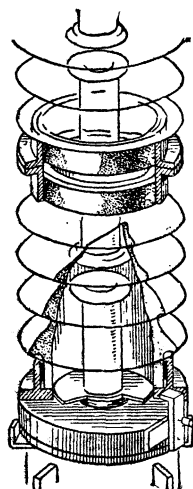


Рис. 393. Схема секций ускорительной трубки на 3 000 000 в.

Наряду с питанием ускорительных трубок постоянным напряжением в 30-х годах неоднократно делались попытки использовать для питания линейных ускорителей переменное напряжение. Но тогда еще не было подходящих (по очень высокой частоте и большой мощности) высокочастотных генераторов. Поэтому эти попытки стали считать бесплодными, и до 1944—1945 гг. господствовало мнение, что разработка линейных ускорителей, питаемых переменным током, бесперспективна. В послевоенные годы положение радикально изменилось в связи с опытом, накопленным в создании радиолокационных установок.

Прототипом современных высокочастотных линейных ускорителей является прибор, который еще в 1924 г. сконструировал Видероз. Схема этого прибора показана на рис. 395. Ионы, образуемые

газовым разрядом в левой части трубки и проникающие в осевой канал трубки, многократно ускоряются одним и тем же переменным напряжением в зазорах между электродами 1—6. Все нечетные электроды (1, 3, 5,) соединены параллельно, как и все четные (2, 4, 6,) и приключены к полюсам высокочастотного генератора. Внутри цилиндрических электродов ионы движутся без ускорения, по инерции. Положительные ионы, ускоряемые полем электрода 1, когда этот электрод имеет максимальный отрицательный потенциал, движутся далее внутри электрода 1 как раз в течение того промежутка времени (половину периода изменения напряжения), по истечении которого отрицательный потенциал сообщается электроду 2. Таким образом, в зазоре между электродами 1 и 2 ионы вновь приобретают ускорение и с возросшей скоростью движутся внутри электрода 2. Чтобы к зазору перед электродом 3 эти ионы пришли точно через полпериода (когда потенциал третьего электрода максимально отрицателен), путь ионов внутри электрода 2 должен превышать их путь внутри электрода 1 во столько раз, во сколько раз в зазоре 1—2 возросла их скорость. Поэтому цилиндрические электроды ускорителя Видероз конструируются по точному расчету с закономерно возрастающей их длиной.

В 1934 г. Бимс несколько усовершенствовал устройство линейного ускорителя, разработав подачу напряжения на электроды импульсом, который посылался одновременно для всех электродов по нагруженной линии, где он распространялся с такой скоростью, что к каждому электроду импульс приходил в нужный момент. Это устранило необходимость увеличивать осевую длину электродов при увеличении числа каскадов. Бимс получил с таким ускорителем протоны с энергией в несколько мэгаэлектронвольт.

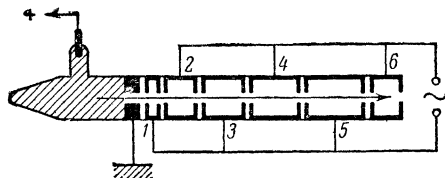


Рис. 395. Принципиальная схема ускорителя Видероз.

В современных линейных ускорителях импульс ускоряющего электрического поля подается по тому же прямолинейному каналу (волноводу), в котором происходит ускоренное движение частиц. Генераторами импульсов служат магнетроны и клистроны (т. II, § 98, 1959; в предыдущих изданиях § 103), создающие сотни раз в

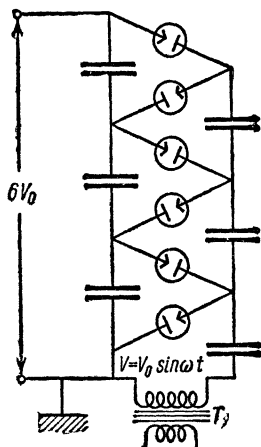


Рис. 394. Каскадная схема повышения выпрямленного напряжения.

секунду кратковременные импульсы переменного (тысячи мегагерц) напряжения. Продолжительность каждого импульса составляет несколько микросекунд, а мощность, отдаваемая в импульсе, — миллионы ватт. Распространение этого импульса высокочастотного напряжения в полой металлической трубе — в волноводе — представляет собой движение электромагнитных волн, поле и скорость которых определяются геометрическими и физическими свойствами волновода. Важно, что в волноводах с проводящими стенками распространяющиеся в них волны имеют составляющую электрического вектора по оси волновода, отличную от нуля. Если бы электрический вектор был перпендикулярен к оси движения (как в свободных плоских электромагнитных волнах), то поле волны не ускоряло бы заряженных частиц, движущихся в направлении оси волновода.

Чем больше электропроводность стенок волновода, тем медленнее рассеивается в стенках энергия электромагнитного импульса. Поэтому волноводы изготавливают из лучших проводников: меди, серебра. При гладких стенках волновода импульс электромагнитного поля обгонял бы ускоряемые частицы. Поэтому распространение им-

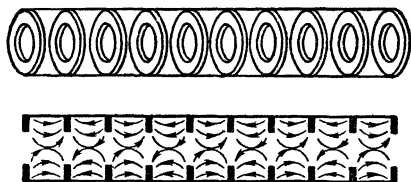


Рис. 396. Схема волновода линейного ускорителя электронов.

пульса в волноводах замедляют до точного согласования его скорости в любом месте волновода со скоростью в этом же месте ускоряемых частиц; для этой цели внутри волновода помещают металлические диафрагмы или коаксиальные с волноводом полевые металлические цилиндры. Следует отметить, что каждый импульс высокочастотного на-

пряжения, посылаемый в волновод, можно рассматривать по теореме Фурье как совокупность электромагнитных волн с кратными частотами, с разными амплитудами и разными фазовыми скоростями распространения. При проектировании линейного ускорителя выбирают одну из этих волн («основную волну»), несущую достаточную энергию, и добиваются совпадения скорости распространения этой волны со скоростью ускоряемых частиц. Для такого согласования скоростей соответственно расширяют сквозной канал в диафрагмах (цилиндрах) или должным образом варьировуют при продвижении в длину расстояние между диафрагмами и сечение самого волновода.

За последние годы в научной литературе обсуждались самые разнообразные геометрические формы «периодической структуры» волнопроводов. При этом выяснилось, что хотя некоторые геометрические формы обеспечивают несколько большую эффективность ускорителя, чем простые диафрагмы или цилиндрические ячейки, но для соблюдения нужной точности в изготовлении волновода практи-

чески пригодны только наипростейшие структуры (чтобы гарантировать расчетный режим, волноводы ускорителей при их значительных габаритах приходится изготавливать с допуском примерно до 10 микрон).

В линейных ускорителях для электронов применяют волноводы с кольцевыми диафрагмами (по три-пять диафрагм на длину основной волны). Схема такого волновода дана на рис. 396, а на рис. 397 показан вид линейного ускорителя электронов, построенного

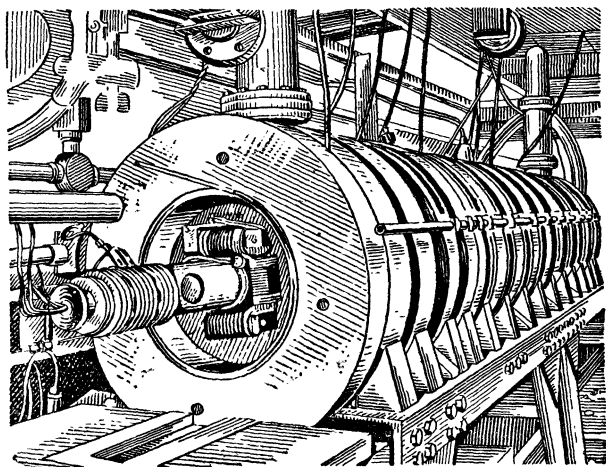


Рис. 397. Линейный ускоритель электронов.

Джинстоном в 1948 г., на относительно небольшую энергию — порядка 4 Мэв; на переднем плане видна электронная пушка, которая инжектирует электроны в ускоритель.

Линейный ускоритель электронов в Станфорде (США) при длине 60 м рассчитан на ускорение электронов до 1000 Мэв. (Первая 24-метровая секция этого ускорителя была введена в эксплуатацию в 1951 г.)

Подобный ускоритель электронов (на 1000 Мэв) построен также в Орсе (Франция).

Для ускорения протонов считают практически наиболее пригодной структуру волновода, схематически изображенную на рис. 398. Протоны ускоряются в промежутках между цилиндрами, имеющими диаметр в несколько сантиметров, и экранируются от высокочастотного поля этими «трубками дрейфа», когда направление поля противоположно их движению. Трубки дрейфа монтируются на металлических стержнях.

Когда достигнуто правильное согласование скоростей частиц и волны, то ускоряемые частицы *все время остаются в ускоряющем*

*их поле волны.* Понятно, что не все частицы, вводимые в ускоритель, захватываются ускоряющим полем волны. На рис. 399 дан график продольной компоненты электрического поля волны для фиксированного момента времени и пунктиром отмечено расчетное среднее

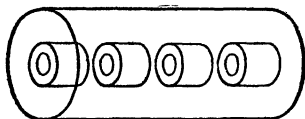


Рис. 398. Схема волновода линейного ускорителя протонов.

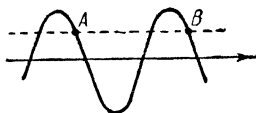


Рис. 399. График продольной компоненты электрического поля в волноводе.

значение напряженности ускоряющего поля. Волна движется слева направо с возрастающей фазовой скоростью. Положительно заряженные частицы, движущиеся в том же направлении с той же начальной скоростью и оказавшиеся в положении *A*, *B* и т. д., удерживаются в постоянном ускоряющем электрическом поле расчетной величины.

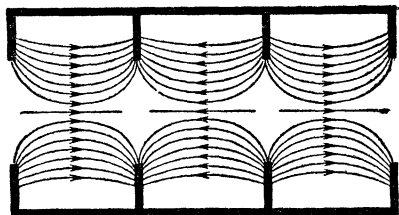


Рис. 400. Электрическое поле в волноводе с кольцевыми диафрагмами. Силовые линии замыкаются в стенках волновода.

Частица, немного обгоняющая *B*, попадет в поле, которое несколько затормозит ее и вернет в *B*, а частица, несколько отстающая от *A*, получит увеличенное ускорение и догонит *A*. Таким образом, волна захватит частицы, несколько отличающиеся по скорости от фазовой скорости волны, если эти частицы не слишком опережают или не слишком отстают от частиц *A*, *B*, движущихся в устойчивой фазе с точной скоростью волны. Но частицы, значительно отстающие по скорости от частиц *A*, *B* и попадающие в тормозящую часть поля, станут двигаться еще медленнее и не будут захвачены волной.

Ускоряемые частицы, захваченные волной, двигаясь в волноводе, *группируются в сгустки*, так как направление силовых линий в мгновенной картине поля противоположно в смежных ячейках (рис. 400). Когда сгустки ускоряемых частиц при своем движении переходят в соседнюю ячейку, то к этому моменту времени изменяющееся электрическое поле приобретает направление и величину, благоприятствующие дальнейшему ускорению частиц.

Обеспечение правильной фазы высокочастотных импульсов поля, распространяющихся в волноводе, является сложной задачей, для решения которой требуется сочетание точного расчета и точного изготовления всех частей линейного ускорителя. Эта задача в осо-

бенности сложна для ускорителей ионов, где скорость основной волны должна возрастать по длине волновода в строгом соответствии с увеличением скорости ионов (скорость электронов, разогнанных до энергии в несколько мегаэлектронвольт, практически постоянна, так как ничтожно отличается от скорости света).

Выброс частиц из линейных ускорителей происходит в такт с подаваемыми в волновод импульсами напряжения.

Ускорители электронов работают на сантиметровых или дециметровых волнах.

Протонные ускорители могут работать на метровых волнах. Протонный ускоритель, построенный в 1948 г. Калифорнийским университетом в Беркли, питается 23-импульсными генераторами на триодах (при частоте 200 *Мгц*) с мощностью импульса в 1,5 млн. *вт*. Он имеет длину 12,2 м и диаметр около 1 м. Протоны подаются в этот аппарат, ускоренные генератором Ван-дер-Граафа до 4 *Мэв*, и выходят из ускорителя с энергией 32 *Мэв*.

Линейный ускоритель протонов в Харуэлле (Англия) рассчитан на ускорение протонов до 600 *Мэв* с большой интенсивностью протонного пучка (несколько миллиампер, а не микроампер, как в других установках).

Средняя напряженность ускоряющего электрического поля в линейных ускорителях приблизительно пропорциональна корню квадратному из мощности, вводимой на единицу длины. В соответствии с этим на каждом метре длины линейного ускорителя относительно небольшой мощности электроны или протоны приобретают ускорение примерно 3—6 *Мэв*, а в ускорителях очень большой мощности до 8—15 *Мэв* на метр пробега.

### § 107. Лабораторные источники нейтронов. Замедлители нейтронов в ядерных реакторах

В лабораториях для получения нейтронов чаще всего пользуются радио-бериллиевым источником: какую-либо радиоактивную соль в количестве 200 *мг* чистого радия смешивают с 1 *г* бериллия и смесь помещают в запаянную трубочку. Такой источник в результате бомбардировки ядер бериллия альфа-частицами, возникающими при распаде радия, дает около 2 млн. нейтронов в секунду, которые проходят через стенки трубки. В радио-бериллиевой смеси проникновение  $\alpha$ -частицы в ядро бериллия  $\text{Be}^9$  вызывает выброс нейтрона из образовавшегося промежуточного ядра, которое после этого превращается в ядро изотопа углерода  $\text{C}^{12}$ . Превращение  $\text{Be}^9 + \alpha \rightarrow \text{C}^{12} + n$  сопровождается выделением энергии 5,5 *Мэв*. Так как среди продуктов распада радия имеются такие, которые испускают  $\alpha$ -частицы с энергиями вплоть до 7,7 *Мэв*, то получающиеся нейтроны могут иметь энергию до 13,2 *Мэв*.