СИНХРОТРОН НА 80 MeV

Синхротронный принцип ускорения релятивистских частиц, предложенный в 1945 г. В. И. Векслером[1, 2] и несколько позднее Макмилланом[3], позволил на порядок повысить максимальный предел достижимых энергий для электронов. Основными преимуществами синхротрона по сравнению с бетатроном являются: несущественность электромагнитного излучения для успешной работы прибора (вплоть до энергий 10^9 eV) и возможность применения кольцевого магнита вместо сплошного, поскольку ускорение производится высокочастотным электрическим полем, так что центральный магнитный поток не является необходимым.

Так же как и в циклотроне, ускорение производится в синхротроне с помощью высокочастотного электрического поля частоты ω_0, сосредоточенного в одном или нескольких узких промежутках. Для сохрачения условия резонанса

$$\omega_0 = \frac{ceH}{mc^2} \tag{1}$$

электрического поля с движением электрона с массой m в магнитном поле напряжённости H, магнитное поле нарастает во времени, компенсируя нарастание релятивистской массы m в процессе ускорения. Работа синхротрона основана на принципе автофазировки [1,2,3], заключающемся в том, что частица сама «выбирает» момент прохождения через ускоряющий промежуток так, чтобы её энергия росла в соответствии с приращением магнитного поля. Некоторый прирост энергии за счёт э. д. с. индукции и потеря энергии на излучение (при больших энергиях) сказываются лишь в том, что электрон берёт от электрического поля несколько меньшую или несколько большую энергию так, чтобы суммарный прирост энергии соответствовал приросту магнитного поля. Строгие расчёты, проведённые рядом авторов [4,5,6], подтвердили предварительные расчёты в оригинальных работах [1—3].

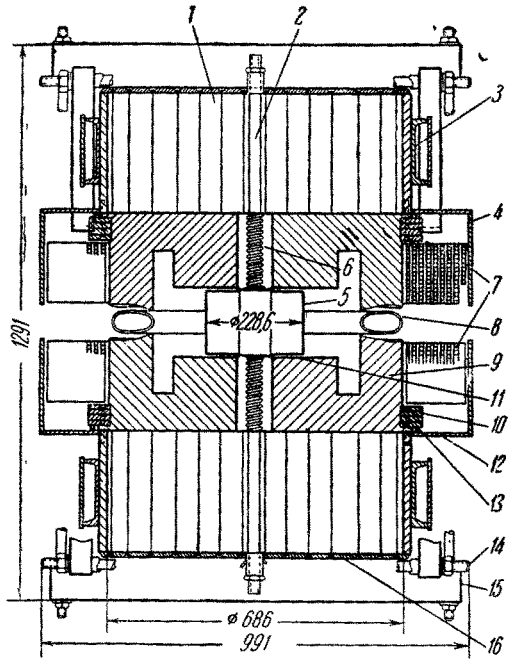

Рис. 1. Вид магнита синхротрона сбоку.

1 — ярмо, *2* — латунная трубка, *3* — стяжная балка, *4* — короб обмотки, *5* — сердечник, *6* — спираль для водяного охлаждения, *7* — обмотки электромагнита, *8* — камера, *9* — полюсный наконечник, *10* — текстолитовое кольцо, *11* — регулирующий воздушный зазор, *12* — отверстие для охлаждения, *13* — возбуждающая обмотка, *14* — стяжной болт, *15* — стяжная балка, *16* — трубки для охлаждения.

К 1947 г. было построено несколько небольших синхротронов для проверки принципа [7,8]. В том же году запущен синхротрон компании «Дженерал Электрик» с максимальной энергией электронов 70 MeV (по последним данным максимальная энергия повышена до 80 MeV).

Разрез магнита синхротрона показан на рис. 1. Магнит сделан по типу бетатронных магнитов фирмы «Дженерал Электрик» [10]. Его основное отличие — отсутствие центральной части полюсных наконечников — позволяет существенно снизить вес магнита и его реактивную мощность. Полюсные наконечники имеют кольцеобразную форму и сделаны из тонких (0,35 *мм*) листов динамной стали, из которых набраны отдельные секторы. Профиль полюсных наконечников подобран с помощью испытаний на специальной модели (в половину натуральной величины) так, чтобы магнитное поле между полюсами спадало по радиусу по закону $H \sim r^{-\frac{3}{8}}$, что обеспечивает устойчивость радиального и вертикального движения электронов. Ширина кольцевых полюсов составляет 10 *см*. Для того чтобы орбиты электронов в процессе синхротронного ускорения лежали в этом узком кольце, начальная энергия электронов должна быть достаточно велика. Поэтому начальное ускорение до энергии $\sim$2 MeV производится в бета-

тронном режиме, причём центральный ускоряющий магнитный поток проходит через небольшой центральный сердечник (см. рис. 1), который при переходе к синхротронному режиму быстро насыщается и не оказывает влияния на дальнейшее ускорение электронов. Общий вес магнита — около 8 *т*, радиус синхротронной орбиты 29,3 *см* (частота электрического поля 163 MHz), максимальное поле на орбите при ускорении до 70 MeV $H_m = 8100$ гаусс. В магните применена система водяного охлаждения полюсов и ярем и воздушного охлаждения центрального сердечника.

Магнитное поле создаётся намагничивающими катушками (по 130 витков на каждом полюсе), соединёнными в резонансный контур с конденсаторной батареей ёмкостью 14,4 *мкф*. Частота изменения магнитного поля 60 *гц*, развиваемая реактивная мощность (при $E = 70$ MeV) — 3000 *ква*, напряжение — около 23 *кв*. Контур возбуждается двумя первичными двухвитковыми катушками, питающимися от индукционного реактора.

Пирексовая вакуумная камера тороидальной формы с толщиной стенок ~ 6 *мм* имела два отростка для инжектора (электронной пушки обычного бетатронного типа) и для мишени. Через отросток для мишени производилась откачка камеры.

Из камеры был вырезан сектор в 57° и заменён сектором из специального стекла 707-*Dg* с малыми диэлектрическими потерями, на котором смонтирована ускоряющая система синхротрона — четвертьволновая резонансная полость (рис. 2), возбуждаемая генератором через коаксиальную линию. Для получения разности потенциалов 100 *в* в зазоре эндовибратора подводимая мощность должна составлять 250 *вт*.

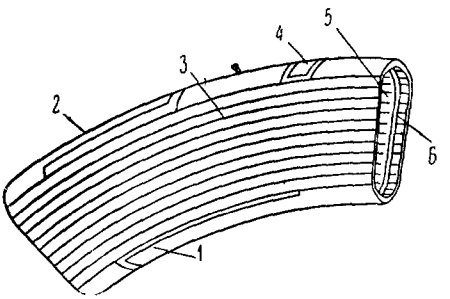

Рис. 2. Схема эндовибратора.

1 — полоска для настройки, *2* — полоска для связи, *3* — разрывы в серебряном покрытии (для уменьшения токов Фуко), *4* — изолированная площадка для измерительного прибора, *5* — соединение соседних полосок, *6* — ускоряющий промежуток.

Представляют интерес сообщения об опытах, произведённых на синхротроне для изучения зависимости его эффективности от различных параметров. За меру интенсивности принята интенсивность тормозного рентгеновского излучения, возникающего при попадании электронов на внутреннюю или наружную мишень после выключения высокочастотного электрического поля (наружной мишенью служил инжектор).

Испытания показали, что точное положение бетатронной орбиты слабо влияет на работу синхротрона. Большая часть электронов переводится из бетатронного режима в синхротронный, причём изменение времени установления амплитуды напряжения в зазоре (от 2 до 20 *мксек*) и повышение амплитуды этого напряжения сверх определённой величины заметно не сказываются на интенсивности; повидимому, при этом захватываются практически все электроны. Снятые кривые зависимости выхода от момента включения высокой частоты, момента инжекции и энергии инжекции показывают сильную зависимость от этих факторов: ясно выражены оптимальные значения момента включения высокой частоты и момента инжекции; с повышением энергии инжекции интенсивность непрерывно растёт (в исследованном интервале энергий от 15 до 37 MeV). Исследование зависимости интенсивности от положения инжектора показало, что максимальная интенсивность получается при инжекторе, расположенном на радиусе, несколько превышающем радиус, соответствующий $n = 1$ ($H \sim r^{-n}$). В дополнительной работе [11] сообщается об измерениях, проведённых для изучения

влияния размеров камеры. Эффективные размеры камеры задавались положением специальных подвижных проволочных рамок, ограничивавших область включённых колебаний электронов. Опыты показали резкую зависимость интенсивности от высоты камеры (интенсивность быстро уменьшается и падает до нуля при высоте ~ 1 *см*) и от её радиальных размеров. (Вначале интенсивность падает из-за уменьшения области свободных бетатронных колебаний, затем — по мере приближения стенки к синхротронной орбите — из-за попадания электронов на стенку при переходе к синхротронному режиму.) Опыты показали резкую зависимость интенсивности от «клиренса» инжектора — расстояния между нитью и внутренним краем инжектора: добавление маленького щитка в 5 *мм* с внутренней стороны уменьшало интенсивность в 20 раз.

На синхротроне «Дженерал Электрик» было обнаружено и исследовано предсказанное Иваненко и Померанчуком электромагнитное излучение электрона, обращающегося в магнитном поле [12, 13]. При энергии ~ 70 MeV максимальная интенсивность приходится на область видимого излучения. Поэтому это излучение видно невооружённым глазом. В последней работе [13] определялся спектральный состав излучения, теоретически вычисленный Арцимовичем и Померанчуком [14]. Свет, испускаемый электронами, выходил через кварцевое окошко из камеры и направлялся в спектрометр с решёткой Вуда, содержащей 15 000 линий на дюйм. Интенсивность различных участков спектра измерялась с помощью фотоумножителя IP22 при максимальных энергиях 42,5, 60, 70 и 80 MeV. Измерения показали хорошее совпадение экспериментальных результатов с теоретически ожидаемыми. Величина полного излучения, определяемого с помощью термопары, позволяет определить число электронов, обращающихся по орбите. Оно оказалось равным 10^8.

Э. Л. Бурштейн

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Векслер, ДАН СССР, **44**, 393 (1944).
2. В. И. Векслер, Journ. of Phys. **9**, 153 (1945).
3. E. M. Mc Millan, Phys. Rev. **68**, 143 (1946).
4. М. С. Рабинович, Journ. of Phys. **10**, 523 (1946).
5. N. H. Frank, Phys. Rev. **70**, 177 (1946).
6. D. Bohm a. L. Foldy, Phys. Rev. **70**, 249 (1946).
7. R. D. Hill, Nature **159**, 774 (1947).
8. F. K. Goward a. D. E. Barnes, Nature **158**, 413 (1948).
9. F. R. Elder, A. M. Gurewitsch, R. V. Langmuir, a. H. C. Pollock, Journ. Appl. Phys. **18**, 810—818 (1948).
10. В. Ф. Вестендорп и Э. Э. Чарлтон, УФН **30**, 119 (1946).
11. F. R. Elder, R. V. Langmuir a. H. C. Pollock, Rev. Sci. Instr. **19**, 121—122 (1948).
12. F. R. Elder, A. M. Gurewitsch, R. V. Langmuir a. H. C. Pollock, Phys. Rev. **71**, 829 (1947). См. реферат М. С. Рабиновича, УФН **33**, 277 (1947).
13. F. R. Elder, R. V. Langmuir, a. H. C. Pollock, Phys. Rev. **74**, 52—56 (1948).
14. Л. А. Арцимович и И. Я. Померанчук, ЖЭТФ **16**, 379 (1946).