

GaAs. При этом эффективность модулятора $\eta = 3,8\%$, что в пересчете на линейный участок модуляционной характеристики соответствует глубине модуляции, равной 37% . Расчетное значение эффективности модулятора при $P = 16$ Вт и $Q_{\text{экс}} = 120$ дает величину $\eta = 3,6\%$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Методы модуляции и сканирования света. М., 1970, 295 с. [2] Коваленко В. Ф. Введение в электронику сверхвысоких частот. М., 1955, 344 с.

Поступила в редакцию
15.10.80

УДК 621.384.633.5

УСКОРЕНИЕ В КЛАССИЧЕСКОМ ЦИКЛОТРОНЕ ЭЛЕКТРОНОВ

Л. А. Саркисян

(НИИЯФ)

Общеизвестно, что в классическом циклотроне (постоянное во времени азимутально-симметричное магнитное поле, спадающее с ростом радиуса) невозможно ускорить электроны до релятивистских энергий ввиду неизохронности магнитного поля. Ускорение электронов в циклотронном режиме стало возможным в изохронном циклотроне с азимутальной или пространственной вариацией магнитного поля. В созданных до сих пор электронных циклотронах, предназначенных для моделирования ускорения протонов до энергии покоя E_0 (частота радиальных бетатронных колебаний $Q_r \leq 2$), электроны были ускорены до энергии $\sim 410\text{--}445$ кэВ при среднем токе пучка до $1,5$ мА [1, 2]. Лишь в работе [3] был рассмотрен кольцевой электронный циклотрон до энергии 2 МэВ (с прохождением целых резонансов $Q_r = 2, 3, 4$ и 5) при среднем токе пучка $\sim 10\text{--}50$ мА. Следует подчеркнуть, что ввиду малости массы электрона по отношению к массе ионов напряженность магнитного поля в центре H_0 электронных циклотронов составляла $10\text{--}40$ Э. В классических ионных циклотронах H_0 изменяется от ~ 5 до 16 кЭ.

Для ускорения электронов в циклических ускорителях до энергии в несколько десятков мегаэлектронвольт используют бататроны и микротроны [4]. В микротроне электроны движутся в постоянном во времени и практически однородном вдоль радиуса магнитном поле при уровне поля $\sim 1000\text{--}3000$ Э. Допуск на поле $N \sim N^{-2}$, где N — число орбит. Как и в циклотроне, ускорение частиц происходит под действием переменного электрического поля постоянной частоты. Используемый диапазон высоких частот в микротронах равен $\sim 3000\text{--}6000$ МГц, в то время как в циклотронах он равен $\sim 3\text{--}25$ МГц. Эти отличия привели к различным режимам ускорения и отсюда к различной конструкции ускорителей. В циклотронах из-за высокого уровня H_0 используют электромагниты Ш-образной формы. Максимальный диаметр полюсов классического циклотрона равен $3,1$ м, вес электромагнита ~ 2000 т. В микротронах из-за низкого уровня поля электромагниты более компактны. Максимальный диаметр полюсов равен 2 м, вес — 20 т. Ускорение ионов в циклотроне происходит в камере при рабочем вакууме $\sim 2\text{--}5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Движение ионов начинается из центра (где установлен ионный источник) по раскручивающейся спирали за счет электрического поля одного или двух дуантов (напряжение на дуанте до 100 кВ). Вывод ионов из камеры осуществлен с помощью

электростатического канала. В микротроне рабочий вакуум равен $\sim 2-3 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Источник электронов и резонатор расположены на краю вакуумной камеры (напряженность электрического поля в резонаторе составляет 300—700 кВ/см). Электроны движутся по орбитам — окружностям увеличивающегося радиуса, имеющим общую точку касания, где расположен резонатор. Вывод электронов осуществлен за счет магнитного канала.

В последние годы несколько отечественных классических циклотронов с диаметром полюсов 120 см (НИИЯФ МГУ, Уральский политехнический институт) и 73 см (МИФИ) было переведено в режим варьирования энергии ионов [5]. Это достигнуто за счет введения в магнитную систему циклотронов дополнительных концентрических и гармонических токовых катушек (установленных внутри и снаружи вакуумной камеры), обеспечивающих формирование требуемого радиального спада поля в широком диапазоне уровней H_0 (от 5 до 16 кЭ), коррекцию медианной плоскости и первой гармоники поля. Наличие катушек позволяет создавать однородное вдоль радиуса магнитное поле для уровней поля H_0 от 1 до 3 кЭ, который используется в микротронах. Таким образом, для перевода циклотрона в микротронный режим необходимо сформировать однородное вдоль радиуса магнитное поле и в вакуумной камере вместо ионного источника, дуантов и дефлектора установить электронный источник, резонатор и магнитный канал. При этом сохраняется система откачки циклотрона. Для питания резонатора используется мощный импульсный магнетрон.

Предварительное рассмотрение показало, что в 120-см циклотроне при зазоре камеры 13 см (длина волны ВЧ в резонаторе равна 10 см) электроны могут быть ускорены до энергии ~ 15 МэВ (магнитное поле 1070 Э) и до ~ 30 МэВ (магнитное поле ~ 2000 Э) при числе орбит ~ 30 . В 73-см циклотроне при зазоре камеры 9 см (длина волны ВЧ 7 см) электроны могут быть ускорены при поле 1530 Э и десяти орбитах до ~ 5 МэВ и до ~ 10 МэВ при поле ~ 2730 Э. Ток в импульсе 30—100 мА. Импульсная мощность магнетрона до 2 МВт.

Предложенный циклотрон-микротрон расширяет круг физических и прикладных работ, проводимых на классическом циклотроне, при минимальных конструктивных изменениях и материальных затратах. Используя электромагниты действующих классических циклотронов, с диаметром полюсов от 1,2 до 1,5 м при напряженности магнитного поля ~ 3 кЭ можно ускорить электроны до энергии от 30 до 50 МэВ (максимальная энергия электронов, достигнутая на действующих микротронах, составляет 32 МэВ). При зазорах вакуумных камер циклотронов $\sim 25-30$ см возможно использовать резонаторы с длиной волны $\sim 20-25$ см, что благоприятствует ускорению электронов в квазинепрерывном режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Martin J. A., Mann J. E. Beam characteristics in cyclotron analogue II. — Nucl. Inst. and Meth., 1962, 18, 19, p. 461—468. [2] Аносов В. Н. и др. Электронная модель релятивистского кольцевого циклотрона с жесткой фокусировкой. — Атомная энергия, 1968, 25, вып. 6, с. 539—541. [3] Саркисян Л. А. Электронный циклотрон для радиационной химии. — Материалы Всесоюз. конф. по разработке и практич. применению электронных ускорителей. Томск, 1975, с. 165—166. [4] Капица С. П., Мелехин В. Н. Микротрон. М.: Наука, 1969. [5] Саркисян Л. А., Кирьянов Е. Ф., Воробьев Ю. В. Модернизация стадацдцатисантиметрового циклотрона. — Приб. и техн. эксперимента, 1979, № 1, с. 19—21.