

10;12
©1994 г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ СТРУМ-90

Г.М.Иванов, В.И.Курилко, Л.А.Мазненко, А.Н.Опанасенко,
П.М.Рябка, С.А.Черенщиков

Изложены методики и результаты исследования характеристик сильнооточной ускоряющей структуры СТРУМ-90 с рабочим типом колебаний $\theta = 4\pi/3$, впервые предложенной Н.И.Айзацким, предназначенной для ускорения пучка электронов с высоким значением предельного заряда в режиме запасенной энергии. В результате измерений получено значение последовательного сопротивления резонансной гармоники $R \cong 120 \text{ Ом/см}^2$. Кроме того, реализован режим ускорения пучка с импульсным током 10 А и длительностью импульса 10 нс. Анализ энергетических характеристик подтвердил преимущество применения таких структур для ускорения пучков с большими предельными зарядами по сравнению с традиционными структурами с $\theta < \pi$ (для одного и того же диапазона длин волн). Экспериментально подтверждена теоретически указанная ранее возможность фокусировать пучок поперечным полем несинхронной аксиально-симметричной пространственной гармоники.

Введение

С целью увеличения предельного ускоренного заряда в ЛУЭ, работающих в режиме запасенной энергии, авторы работы [1] предложили использовать ускоряющие секции с рабочим типом колебания $\theta > \pi$. Отличительной особенностью таких секций является более низкое значение последовательного сопротивления резонансной гармоники, чем в аналогичных структурах с набегом фазы $\theta < \pi$. Это приводит к уменьшению потерь энергии пучка на когерентное излучение и, следовательно, к увеличению предельного ускоренного заряда в режиме запасенной энергии. Кроме того, как было показано в [2,3], основная гармоника поля такой структуры обладает фокусирующим действием. При определенных параметрах пучка это может обеспечить поперечную СВЧ фокусировку ускоряемых частиц без применения дополнительных фокусирующих полей.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования электродинамических характеристик ускоряющей структуры СТРУМ-90 с рабочим типом колебаний $\theta = 4\pi/3$, а также результаты исследования фокусирующих свойств этой структуры. Данная секция представляет собой отрезок круглого диафрагмированного

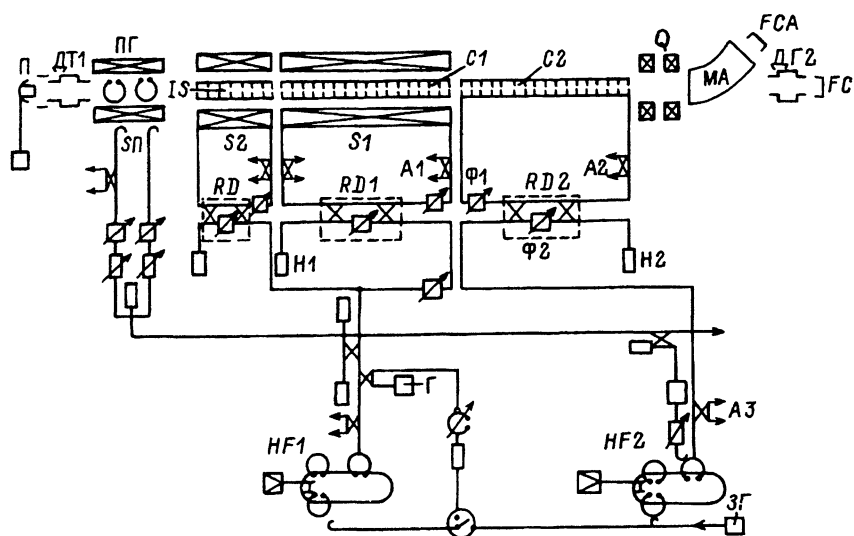


Рис. 1. Схема экспериментального стенда.

П — электронная пушка; ДТ1, ДТ2 — пролетные датчики тока; ПГ — предгруппирователь; СП, S1, S2 — соленоиды; IS — инжекционная секция; C1 — ускоряющая секция с $\theta = \pi/2$; C2 — исследуемая секция с $\theta = 4\pi/3$; RD, RD1, RD2 — регулируемые направленные ответвители; A1, A2, A3 — индикаторы СВЧ мощности; H1, H2 — нагрузки; Ф1, Ф2 — фазовращатели; HF1, HF2 — источники СВЧ мощности КИУ-53; Q — квадрупольные линзы; MA — магнитный анализатор энергии частиц; FCA, FC — цилиндры Фарадея.

волновода, состоящего из 23 ячеек и двух трансформаторов типа волны общей длиной $L = 170$ см [1]. Эксперименты были проведены на универсальном инжекционном комплексе ЛУЭ-300 ННЦ ХФТИ [4], схема которого представлена на рис. 1. Особенностью этого стенда является регулируемая волноводная система рекуперации СВЧ мощности, позволяющая значительно повышать запасенную энергию в ускоряющей секции. Испытываемая структура была установлена на место второй ускоряющей секции (C2 на рис. 2), третья демонтирована.

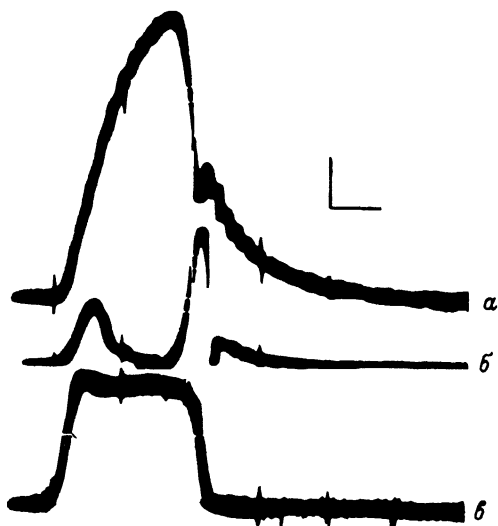


Рис. 2. Осциллограммы огибающих СВЧ импульсов.

a — на входе секции; б — в нагрузке, в — на выходе источника мощности.

Содержание испытаний заключалось в исследовании электрической прочности секции, измерении коэффициента увеличения высокочастотной мощности в резонансном кольце и последовательного сопротивления полезной гармонике, а также в измерении плотности тока пучка в зависимости от энергии последнего и параметров поля в структуре. В режиме запасенной энергии экспериментально исследованы энергетические характеристики ускоренного пучка электронов наносекундной длительности. Ниже представлены результаты перечисленных измерений.

Коэффициент увеличения СВЧ мощности

Ускоряющая ячейка настраивалась в оптимальный режим [5], при котором достигалось максимальное накопление энергии поля в резонансном кольце, о чем свидетельствовал максимум сигнала детектора (A_2) на входе секции. Для этого случая осциллограммы огибающих СВЧ импульсов на входе секции, в нагрузке и на выходе источника СВЧ мощности представлены на рис. 2, $a-b$ соответственно. С учетом ослабления сигнала в линии питания $\cong 0.02$ дБ максимальный коэффициент увеличения циркулирующей мощности кольца секции СТРУМ-90 составил $K_{\max} \approx 3.6$ (при длительности импульса запитки $\tau_s \cong 2$ мкс).

Электрическая прочность секции

После тренировки ускоряющей ячейки по методике, изложенной в работе [6], при уровне подаваемой в резонансное кольцо мощности $P \cong 20$ МВт и длительности импульса $\tau_s \cong 2$ мкс достигнутая амплитуда циркулирующей мощности составила $P_{\max} \cong 70$ МВт. При этом частота электрических пробоев в испытываемой секции не превышала одного пробоя в час.

Последовательное сопротивление

В длиннопulseм слаботочном режиме пучка значение последовательного сопротивления R ускоряющей гармонике измерено по приращению энергии электронов ΔW при заданном уровне СВЧ мощности P , подаваемой на вход секции. Приращение энергии частиц определялось из сравнения спектров, снятых магнитным спектраллизатором (МА) при отключенном (входной спектр) и включенном (выходной спектр) питании исследуемой структуры. В первом случае в режиме полной связи регулируемого направленного ответвителя RD_2 (рис. 1), когда рекуперация СВЧ мощности отсутствует, с помощью фазовращателя подбирали такую входную фазу волны, при которой разность между наибольшими значениями энергии выходного и входного спектров была максимальной: $\Delta W_{\max} = W_{\max}^{\text{out}} - W_{\max}^{\text{in}}$. Это значит, что частицы с данной энергией ΔW_{\max} были расположены на гребне ускоряющей волны. Поэтому для вычисления последовательного сопротивления можно использовать следующую формулу:

$$R = \left[\frac{\Delta W_{\max} \alpha}{e \sqrt{P} (1 - \exp(-\alpha L))} \right]^2, \quad (1)$$

где α — коэффициент затухания поля, e — заряд электрона.

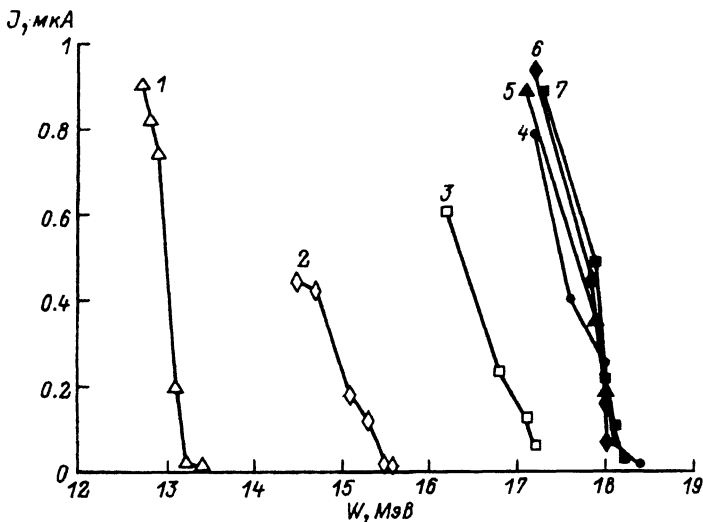


Рис. 3. Высокоэнергетические части спектров пучка.

1 — СВЧ питание секции отключено, при наличии СВЧ мощности в секции для следующих значений шкалы фазовращателя: 2 — 45, 3 — 135, 4 — 75, 5 — 90, 6 — 105, 7 — 110 дел.

На рис. 3 представлены входные и выходные высокоэнергетические части спектров, из которых семейство выходных получено при разных положениях фазовращателя. Видно, что при СВЧ мощности на входе структуры $P \cong 8$ МВт приращение энергии частиц, попавших в фазу с максимальным полем, составляет $\Delta W_{\max} \cong 5.1$ МэВ. Подставляя значения этих величин в формулу (1) и учитывая коэффициент затухания $\alpha = 4.6 \cdot 10^{-4}$ 1/см, получим следующее значение последовательного сопротивления ускоряющей гармоники $R \cong 120$ Ом/см². Оценочная погрешность этой величины не превышает 20%.

Кроме того, измерения последовательного сопротивления были проведены и при оптимально настроенном кольце, что дало возможность провести эти измерения при высоких уровнях мощности. В этом случае энергию частиц измеряли по положению максимума спектра при максимальном повернутом (магнитным анализатором) токе. Результаты этих измерений представлены на рис. 4 в виде зависимости приращения энергии ΔW от уровня циркулирующей СВЧ мощности в секции P (экспериментальные точки 1); здесь же штриховая кривая 2 аппроксимирует указанные экспериментальные точки при ранее полученном значении $R \cong 120$ Ом/см². Из этого рисунка видно, что последовательное сопротивление, найденное из измерений максимального смещения высокоэнергетического края спектра, в пределах оцененной погрешности совпадает с соответствующим значением, полученным из измерений энергии частиц по положению максимума спектра.

Обобщая результаты измерений последовательного сопротивления R , проведенных двумя способами (по максимальному смещению высокоэнергетической части спектра и положения максимума спектра), следует заключить, что величина этого сопротивления составляет $R \cong 120$ Ом/см² при оцененной погрешности не больше 20%. Отметим, что полученные результаты в пределах допустимой погрешности удо-

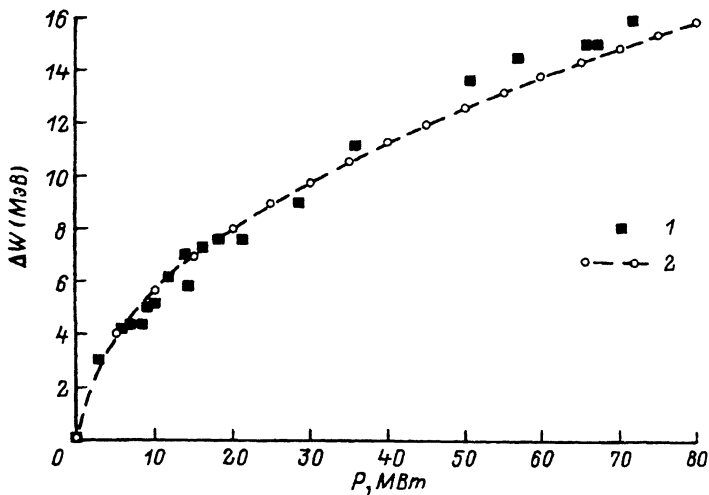


Рис. 4. Зависимость приращения энергии пучка от циркулирующей в структуре мощности.

влетворительно согласуются с расчетными оценками, проведенными на основе простейшей модели слабосвязанных резонаторов [7]. Согласно этой модели, отношение последовательных сопротивлений R_1/R_2 возбуждаемых гармоник в структурах с одинаковыми значениями a/b (см., например, [8]) имеет следующую зависимость от набегов фазы на периоде (θ_1, θ_2):

$$\frac{R_1}{R_2} = \left| \frac{\operatorname{tg} \theta_1/2}{\operatorname{tg} \theta_2/2} \right| \left(\frac{\theta_2}{\theta_1} \right)^2. \quad (2)$$

Сравнивая стандартную секцию с $R_1 \cong 600 \text{ Ом/см}^2$ и $\theta_1 = \pi/2$ [9] с исследуемой $\theta_2 = 4/\pi/3$, получим, что расчетное значение отношения $(R_1/R_2)_T \cong 4.1$ отличается от найденного экспериментальным путем $(R_1/R_2)_e \cong 5$ на $\cong 20\%$.

Ускорение сильноточных наносекундных пучков

На данном стенде также проведены эксперименты по ускорению с помощью структуры СТРУМ-90 сильноточных пучков с импульсными токами порядка 10 А и длительностями около 10 нс. На рис. 5 представлены энергетические спектры пучка с зарядом $Q \cong 120 \text{ нКл}$, измеренные при выключенной (кривая 1) и включенной (кривая 2) испытуемой структуре с максимальной циркулирующей импульсной мощностью, равной $P \cong 50 \text{ МВт}$. Как показывает анализ этих спектров, при ускорении пучка в СТРУМ-90 в силу небольшого эффективного последовательного сопротивления ширина спектра на полувысоте в абсолютных величинах увеличилась на 11%, а в относительных уменьшилась на 14%.

Исходя из полученных экспериментальных данных, можно заключить, что при запитке резонансного кольца от источника мощностью

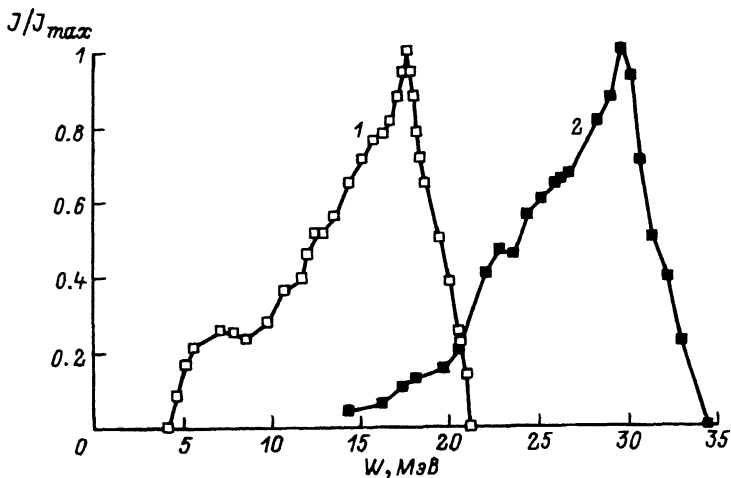


Рис. 5. Энергетические спектры наносекундного сильноточного пучка.

$P \cong 20$ МВт значение предельного заряда в испытываемой структуре составляет $Q_* \cong 1200$ нКл, что несколько превосходит теоретическую оценку этого параметра, приведенного в [1]. Отсюда следует, что структура типа СТРУМ-90 в режиме запасенной энергии может быть эффективно использована для ускорения сильноточных короткоимпульсных пучков электронов, отличающихся достаточно большими для данного диапазона частот ускоренными зарядами (порядка 1 мКл).

Особо следует подчеркнуть, что последний вывод, строго говоря, справедлив только для ускорителей на относительно небольшие энергии. Действительно, в многосекционных машинах, как было показано в [10], предельный заряд пучка может быть ограничен не столько величиной запасенной в ускоряющей структуре СВЧ энергии, сколько развитием поперечной неустойчивости. Понижение темпа ускорения с ростом θ может способствовать снижению соответствующего предельного заряда. Количественные же оценки требуют самостоятельного рассмотрения, которое авторы намерены провести.

Фокусирующие свойства секции

Эксперимент был проведен в режиме максимальной запасенной энергии в секции и наносекундной длительности пучка при малых токах. На расстоянии $l = 250$ см от выходного конца исследуемой секции в пролетном промежутке с помощью секционированного цилиндра Фарадея [11] была измерена зависимость плотности потока частиц на оси от фазы ϕ поля ускоряющей волны. Плотность тока измерялась как при включенном СВЧ питании исследуемой секции $i_n(P, W_0)$, так и при выключенном (СВЧ мощность в структуре отсутствует) $j_n(0, W_0)$ и нормировалась на полный ток пучка. Измерения были проведены при нескольких значениях циркулирующей в кольце мощности P и энергии электронов W_0 на входном конце секции. Энергия пучка определялась магнитным спектраллизатором (МА) по положению максимума

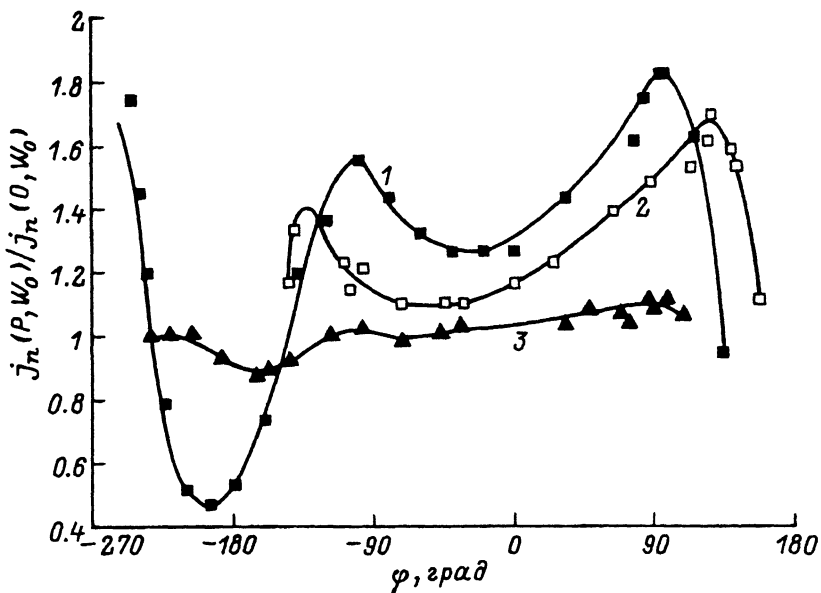


Рис. 6. W_0 , МэВ: 1, 3 — 13; 2 — 18; P , МВт: 1, 2 — 53; 3 — 13.

энергетического спектра. Результаты эксперимента представлены на рис. 6 в виде семейства зависимостей отношения измеренных плотностей токов $j_n(P, W_0)/j_n(0, W_0)$ от фазы ϕ ускоряющей волны. Погрешность проведенных измерений не хуже $\pm 10\%$. Поскольку приращение энергии ΔW пучка в секции должно иметь косинусоидальную зависимость от ϕ , то мы приняли за начало отсчета фазу, соответствующую максимальному приращению энергии ($\Delta W = \Delta W_{\max} \cos \phi$). Как следует из данных, приведенных на рис. 6, для частиц пучка при определенных условиях имеет место фокусировка $j_n(P, W_0)/j_n(0, W_0) > 1$. При этом с увеличением энергии пучка (кривые 1 \rightarrow 2) и (или) с уменьшением циркулирующей мощности (кривые 1 \rightarrow 3) поперечное воздействие секции ослабляется. Наблюдаемая СВЧ фокусировка имеет два выраженных максимума, приблизительно симметрично расположенных относительно гребня ускоряющей волны ($\phi_1^{(\pm)} \cong \pm 100^\circ$ (кривая 1), $\phi_2^{(\pm)} \cong \pm 130^\circ$ (кривая 2), $\phi_3^{(\pm)} \cong \pm 90^\circ$ (кривая 3)). В окрестности положительных экстремальных фаз ($\phi_1^{(+)}$, $\phi_2^{(+)}$, $\phi_3^{(+)}$) достигается максимальная плотность пучка. По всей видимости, данный максимум лежит в интервале фаз, где происходит энергетическое сжатие сгустка, что может приводить к уменьшению поперечного разброса пучка, поскольку поперечное ускорение частицы убывает с ростом ее энергии как P/W^2 . Сильное падение плотности пучка и снижение токопроводимости (примерно в 9 раз) наблюдаются в случае $W_0 = 13$ МэВ, $P = 53$ МВт (кривая 1) в области фаз максимального торможения $\phi \approx -180^\circ$. В этих условиях значительная часть частиц полностью тормозится в секции или рассеивается в канале транспортировки.

Рассмотрим некоторые качественные оценки наблюдаемой СВЧ фокусировки частиц для случая, когда сгустки релятивистского пучка

находятся в фазе нулевого поля ускоряющей волны ($W = \text{const}$). Будем предполагать поперечное распределение частиц на входе секции гауссовым. В этих условиях, как следует из уравнений движения [2,3], при

$$q = \frac{|e|D\sqrt{PR_0}}{2\pi mc^2\gamma} \ll 1 \quad (3)$$

усредненные по быстроосциллирующей фазе несинхронной волны квадраты поперечных среднеквадратичных радиуса $\sigma^2(z)$ и расходимости $\vartheta^2(z)$ пучка в поле аксиально-несимметричной волны будут иметь следующий вид:

$$\sigma^2(z) = \frac{\vartheta_0^2 + v^2\sigma_0^2}{2v^2} - \frac{\vartheta_0^2 - v^2\sigma_0^2}{2v^2} \cos 2vz, \quad (4)$$

$$\vartheta^2(z) = \frac{\vartheta_0^2 + v^2\sigma_0^2}{2} + \frac{\vartheta_0^2 - v^2\sigma_0^2}{2} \cos 2vz. \quad (5)$$

Здесь q — безразмерная амплитуда радиальной СВЧ силы, действующей на частицы, расположенные на единичном радиусе от оси; R_0 — последовательное сопротивление фокусирующей гармоники; D — высота резонаторной чашки секции; $mc^2\gamma$, e — энергия и заряд электрона; σ_0 , ϑ_0 — среднеквадратичные разброс и расходимость пучка на входе секции; z — продольная координата; $v = \pi q/(\sqrt{2}D)$.

Приведем также выражение для квадрата среднеквадратичного разброса частиц $\sigma^2(L+l)$ в пролетном участке на расстоянии l от выхода секции длиной L

$$\sigma^2(L+l) = \sigma^2(L) + l^2\vartheta^2(L) + vl \left(\frac{\vartheta_0^2}{v^2} - \sigma_0^2 \right) \sin 2vL. \quad (6)$$

Как следует из полученных выражений, поперечное воздействие исследуемой структуры на пучок носит периодический характер с периодом v/π , который зависит от мощности циркулирующей в секции и энергии частиц (см. (3)). Результат этого воздействия зависит от значения пролетного фактора $2vL$, которое в условиях нашего эксперимента изменялось в пределах $0.2 \div 0.4\pi$, что аналогично действию достаточно толстой линзы. Величина же эквивалентного продольного соленоидального магнитного поля, обеспечивающего такую же фокусирующую силу, составляет около 360 Гс при импульсной мощности в кольце порядка 50 МВт [2].

Таким образом, экспериментальные исследования характеристик структуры типа СТРУМ-90 показали, что последняя имеет низкое последовательное сопротивление ускоряющей гармоники по сравнению с аналогичными структурами с $\theta < \pi$ и тем самым обеспечивает низкие потери энергии на излучение. Повышенная электрическая прочность секции позволяет с помощью системы рекуперации накапливать значительные уровни циркулирующей мощности. Эти свойства в наших условиях создают возможность повысить предельный заряд для таких секций (до уровня порядка 1 мкКл и больше) по сравнению с предельным зарядом имеющихся структур в данном диапазоне длин

волн. Обнаружение фокусировки ускоряемых частиц пучка несинхронной аксиально-несимметричной нулевой гармоникой дает основания ожидать эффективного применения данного типа структур на начальной стадии ускорения и формирования пучков.

Список литературы

- [1] Айзацкий Н.И., Биллер Е.З., Волобуев В.В. и др. // ВАНТ. Сер. Ядерно-физические исследования (теория и эксперимент). Харьков, 1991. Вып. 3(21). С. 16-18.
- [2] Степанов К.Н., Матненко А.А., Пазомов В.И. // ЖТФ. 1965. Т. 35. Вып. 4. С. 618-622.
- [3] Айзацкий Н.И., Буляк Е.В., Куриленко В.И. // Тр. XII Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна: ОИЯИ, 1992. Т. 1. С. 412-415.
- [4] Ажиппо В.А., Айзацкий Н.И., Гончаров В.П. и др. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 22. С. 1387-1389.
- [5] Крамской Г.Д., Муфель В.Б. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 3. С. 465-468.
- [6] Ажиппо В.А., Айзацкий Н.И., Дюков С.Н. и др. // Тр. XIII Междунар. конф. по ускорителям частиц высоких энергий. Новосибирск: Наука, 1987. Т. 2. С. 189-192.
- [7] Владимирский В.В. // ЖТФ. 1947. Т. 17. Вып. 11. С. 1277.
- [8] Вальднер А., Собенин Н.П., Зверев Б.В., Шедрин И.С. Диафрагмированные волноводы. Справочник. М.: Энергоиздат, 1991. 280 с.
- [9] Вальтер А.К., Гришаев И.А., Демьяненко Г.К. и др. // Тр. Междунар. конф. по ускорителям. М.: Атомиздат, 1964.
- [10] Буляк Е.В., Курилко В.И., Матненко Л.А. и др. // ЖТФ. 1993. Вып. 3. С. 120-127.
- [11] Рябка П.М., Солодовник В.Г. // Тр. XII Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1992. Т. 1. С. 67-70.

Харьковский физико-технический институт

Поступило в Редакцию
27 августа 1993 г.