

Увеличение темпа ускорения в структуре с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой

О.К. Беляев, А.В. Жеребцов, В.А. Тепляков
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Ускоряющая структура с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ или RFQ в зарубежном обозначении), предложенная в [1], широко применяется и как начальная часть ускорителей ионов (НЧУ), и как самостоятельная физическая установка. Обеспечивая практически стопроцентный захват ионов, их фокусировку и ускорение, такой ускоритель тем не менее применяется до энергий $2\div 3$ МэВ/нуклон [2], так как с ростом β не удается обеспечить высокий темп ускорения. Темп ускорения определяется приростом энергии иона на единицу длины периода ускорения, т.е. $\Delta W / \Delta z = q \mathcal{G} U \cos(\varphi_c) / L_y$. Синхронная фаза φ_c по завершении формирования сгустков достигает своего конечного значения (порядка -30°) и в дальнейшем не изменяется. По существу, темп ускорения в конце ускорителя определяется максимальным значением эффективности ускорения \mathcal{G} . Напряжение должно обеспечить необходимую жесткость фокусировки $U / (R_0 / \lambda)^2$ и ограничено сверху электрической прочностью электродов. В применяемых в настоящее время электродах с продольной синусоидальной модуляцией (рис. 1а) величина \mathcal{G} не превышает значений $0.3\div 0.4$. Максимальный темп ускорения на выходе ускорителя при этом не превышает значений $0.6\div 0.7$ МэВ/м.

В следующих за НЧУ секциях ускорителя (ускоритель Альвареса или ускоритель с пространственно-периодической квадрупольной фокусировкой (ППКФ)) темп ускорения составляет $1.5\div 2$ МэВ/м. Скачок в темпе ускорения при переходе из НЧУ увеличивает рассогласование пучка с каналом ускорителя по продольному движению и увеличивает продольный эмиттанс. Увеличение темпа ускорения в структуре ПОКФ позволило бы ослабить эти явления и расширить область ее применения как самостоятельной физической установки.

В предлагаемой работе рассмотрена возможность увеличения темпа ускорения путем изменения формы электродов. В работе [3] было показано, что переход от традиционной продольной синусоидальной модуляции ускоряющих электродов (рис. 1а) к трапециевидальной (рис. 1б) позволяет получить большее значение эффективности. В первом приближении она определяется известным соотношением [2]:

$$\mathcal{G} \cong \frac{\sin(\pi\alpha)}{\pi\alpha}, \quad \text{где } \alpha = g / \beta\lambda, \quad g - \text{длина зазора.} \quad (1)$$

\mathcal{G} увеличивается при уменьшении относительной длины зазора α . В применении к ПОКФ «зазор» можно определить как участок, где $E_z \neq 0$, т.е. практически весь период ускорения $\beta\lambda / 2$. Но если вершину синусоиды «обрезать» (рис. 1б), то длина «зазора» уменьшится и, согласно соотношению (1), \mathcal{G} увеличится.

В ИФВЭ в 1997 году осуществлен физический пуск ускорителя на частоте 148.5 МГц на энергию 1.8 МэВ (НЧУ-1.8), в котором синусоидальная модуляция электродов переходила в трапециевидную (рис. 2). На выходе был достигнут темп ускорения 1.3 МэВ/м (рис. 3).

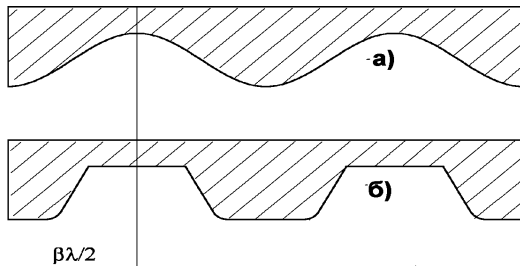


Рис. 1. Синусоидальная и трапециевидная модуляция электродов ПОКФ.

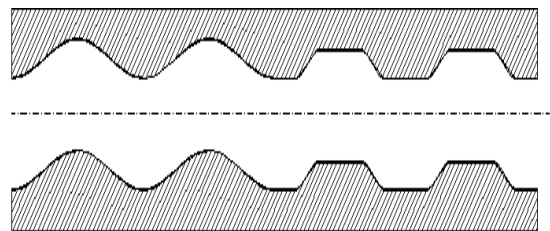


Рис. 2. Ускоряющая структура с переходом от синусоидальной к трапециевидной модуляции. (Структура N1).

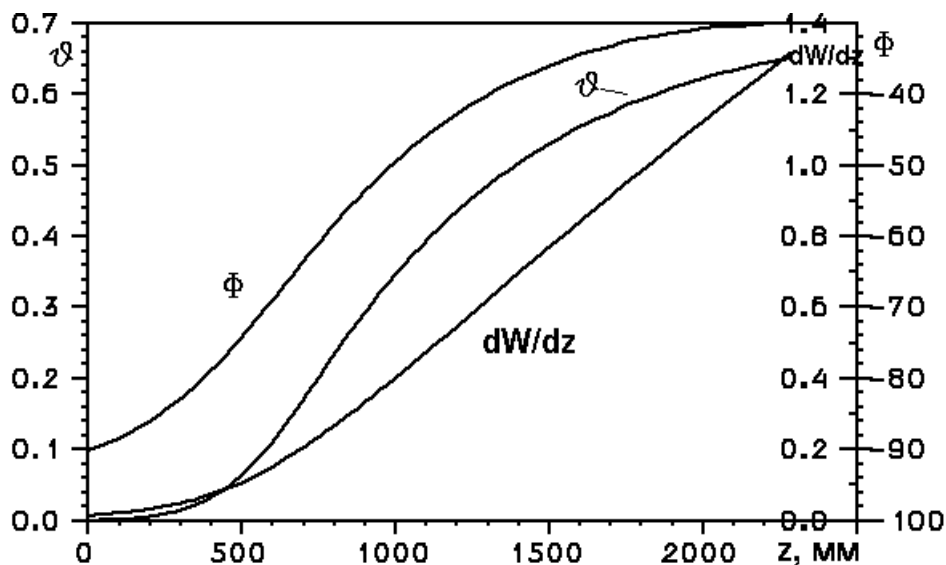


Рис. 3. Распределение основных параметров НЧУ-1.8 по длине ускорителя.

Длина установки НЧУ-1.8 составляет 2.4 м, в то время как длина аналогичной установки на энергию 2 МэВ с синусоидальной модуляцией электродов превышает 4 м. Уменьшение длины установки приводит к снижению потерь ВЧ-мощности.

На рис. 4 показана форма и взаимное расположение соседних (разнополярных) электродов с прямоугольной модуляцией (структура N2). В этой структуре участки ускорения и фокусировки пространственно разделены. Достижимый высокий темп ускорения, делает данную структуру по свойствам промежуточной между классической схемой ПОКФ и ППКФ. На рис.4 показано пространственно-временное распределение ВЧ-поля, а также эпюры распределения потенциала поля.

Максимальную разность потенциалов на оси можно получить введением в вырез электрода трубки дрейфа, как показано на рис. 5 (структура N3). На этом же рисунке показаны соответствующие эпюры потенциала поля.

Как следует из рис. 4 и 5, конфигурация внешнего поля здесь существенно сложнее, чем в структуре с синусоидальной модуляцией. При расчете потенциала и компонент поля использовалась методика [4].

Для сравнения трех предлагаемых структур были произведены расчеты геометрических размеров ускорителей на частоте 297 МГц и численное моделирование динамики пучка. Расчеты проводились для различных выходных энергий, но с одинаковыми исходными параметрами: ток пучка 40 мА, напряжение на резонаторе 80 кВ, максимальная напряженность электрического поля на поверхности электродов 300 кВ/см, токопрохождение 100%, энергия инжекции выбрана равной 2.5 МэВ.

Результаты расчетов приведены в таблице.

Из полученных результатов следует, что эмиттанс выходного пучка для всех трех структур отличается незначительно. В структуре N1 максимальный темп ускорения достигается в конце ускорителя, что обеспечивает согласование пучка по продольному движению с последующими секциями ускорителя и делает предпочтительным ее использование в качестве НЧУ. В структурах N2 и N3 темп ускорения максимален в начале. Высокий средний темп приводит к уменьшению длины ускорителя и потерь ВЧ-мощности в стенках, что важно при использовании их как самостоятельных физических установок.

Поскольку все три структуры являются модификацией ПОКФ, они могут быть установлены либо в 2Н -, либо в 4К-резонаторах.

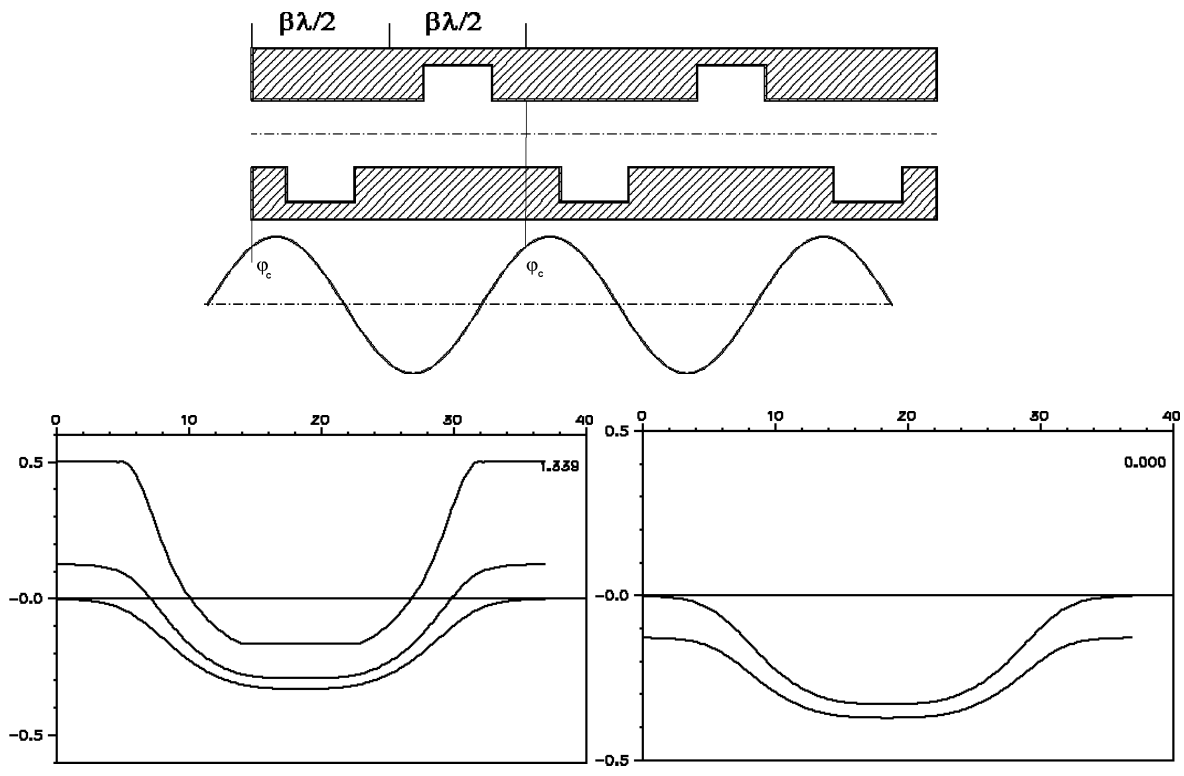


Рис. 4. Ускоряющая структура N2 (вверху) и распределения потенциала поля на периоде ускорения $U(z, r, 0)$ (слева) и $U(z, r, 0)$ (справа). $r : 0, 0.5R_a, R_a$.

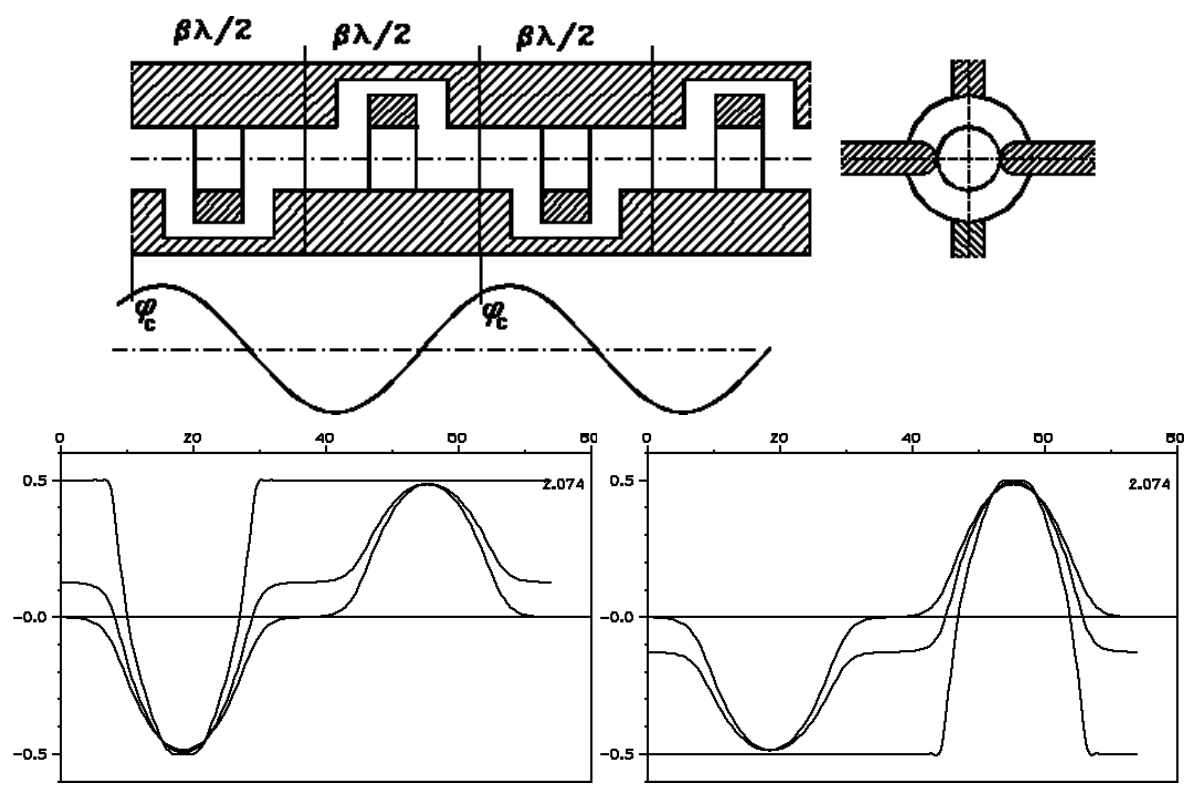


Рис. 5. Ускоряющая структура N3 (вверху) и распределения потенциала поля на периоде ускорения $U(z, r, 0)$ (слева) и $U(z, r, 0)$ (справа). $r : 0, 0.5R_a, R_a$.

Таблица результатов расчетов.

Вариант ускоряющей структуры Параметры	ПОКФ (N1)			ПОКФ (N1) +				
				+ N2		+ N2		
Энергия инжекции, $W_{инж}$, МэВ	0.08			2.5		2.5		
Выходная энергия $W_{вых}$, МэВ	5	8	2.5	5	8	5	8	
Радиус апертуры, R_a , мм	2.1	2.2	2.3	3.5	3.5	3.5	3.5	
Эффективность ускорения, Φ	0.01– 0.65	0.01– 0.7	0.01– 0.65	0.46– 0.57	0.46– 0.59	0.59– 0.81	0.59– 0.96	
Темп ускорения, МэВ/м	Максимальный	1.02	0.97	1.11	0.85	0.85	1.08	1.08
	Средний	0.76	0.68	0.71	0.81	0.71	1.05	1.06
Среднеквадратичный эмиттанс выходного пучка, μ см·мрад	0.057	0.064	0.059	0.064	0.068	0.065	0.071	
Длина ускорителя, м	6.6	11.8	3.6	3.0	7.8	2.4	5.2	

Список литературы

- [1] И.М. Капчинский, В.А. Тепляков. ПТЭ, 1970, 2, с.19, 4, с.17.
- [2] И.М. Капчинский. Теория линейных резонансных ускорителей. — Москва, Энергоиздат, 1982.
- [3] A. Zherebtsov. Using the 3D electric fields for calculations of the RFQ parameters. Proceedings of the Second Int. BDO Workshop, July 4-8 1995, St.-Petersburg, Russia.
- [4] А.В. Жеребцов, А.П. Мальцев. Расчет ускоряющего поля в линейном ускорителе УРАЛ-30 методом собственных функций в сочетании с методом Монте-Карло. - Препринт ИФВЭ 80-47, ОИ, Серпухов, 1980.