

РАЗРАБОТКА КОМПАКТНЫХ УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР ДЛЯ КОМПЛЕКСОВ ПРИКЛАДНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Ю.А. Свистунов¹, А.Д. Овсянников²

¹ФГУП "НИИЭФА им. Д.В. Ефремова", Санкт-Петербург, Россия

E-mail: svistunov@iuts.niefa.spb.su;

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: ovs74@mail.ru

Дается обзор применения ускоряющих структур с высокочастотной квадрупольной и переменнo-фазовой фокусировкой в диапазоне рабочих частот 325...450 МГц в современных электро- и ядерно-физических комплексах прикладного назначения. Рассматриваются проблемы моделирования и изготовления таких структур. Демонстрируется новый подход к оптимизации динамики частиц и геометрии электродов в резонаторах с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка резонансных структур линейных ускорителей ионов в диапазоне частот 325...450 МГц началась с конца восьмидесятых – начала девяностых годов прошлого века. Возможность этих разработок была обусловлена соответствующим развитием производственных технологий и компьютерных средств численного моделирования физических процессов в ускорителях. Первым крупным успехом было создание в США ускорителя отрицательных ионов водорода с рабочей частотой 425 МГц для эксперимента BEAR в 1989 году. На базе разработок СОИ впоследствии были созданы фирмой AccSys Technology коммерческие линейные ускорители протонов и дейтронов с выходной энергией 2 и 0.9 МэВ соответственно, ускоряющие структуры которых работали также на частоте 425 МГц. Следует отметить, что 2-МэВ ускоритель протонов PL-2 с высокочастотной квадрупольной фокусировкой (RFQ) разрабатывался как начальная часть 11-МэВ ускорителя для PET-комплекса. В настоящее время ускоряющие структуры типа RFQ в указанном диапазоне частот разрабатываются для ускорителей прикладного назначения и как начальная часть ус-

корительных комплексов высоких энергий, в тех случаях, когда не требуются большие средние и импульсные токи. Важным достоинством таких ускорителей являются их малые габариты, которые сочетаются, как правило, с высокой яркостью пучка. Все представленные в таблице ускорители работают при нормальной температуре. Изготовление ускоряющих структур в этом диапазоне частот производят на высокоточном оборудовании, поскольку допуски на геометрические размеры резонаторов и выполненные модуляции электродов RFQ составляют микроны. Результаты математического моделирования ускоряющих структур и динамики частиц должны быть жестко согласованы с возможностями изготовления. В случае требований ограничения длины ускоряющей структуры RFQ желательно при расчете геометрии электродов использовать математические методы теории управления для выбора основных параметров канала ускорителя.

В таблице приведены, по данным конференции LINAC 2008 (Виктория, Британская Колумбия), параметры линейных ускорителей ионов в диапазоне рабочих частот 324...433 МГц как действующих, так и находящихся в различных стадиях разработки.

Действующие и проектируемые ускорители ионов в диапазоне частот 324...433 МГц

Проект, лаборатория	Тип частиц, рабочая частота	Состав ускорителя	Энергия (МэВ)	Ток (мА) Ip/Iav	L (м)	Статус
SNS, Oak Ridge	H ⁺ /402.5	RFQ/DTL	2.5/86	38/1.6	3/30	действующий
CSNS, IHEP, Beijing	H ⁺ /324	RFQ/DTL	3.5/81	30/2.1	3.6/50	проект
J-PARC, KEK	H ⁺ /324	RFQ/DTL	3.0/50	27/0.3	3/27	достигнутый результат
PEFP, KAERJ	H ⁺ /350	RFQ/DTL	3.0/20	20/10 ⁻³	/18.61	тестовые испытания
LINAC4, CERN	H ⁺ /352.2	RFQ/ИH, DTL	3.0/160	40/0.96	/80	проект
FNAL LNAC, FNAL	H ⁺ /325	RFQ/CH	/10			проект
TRASCO RFQ, LNL, Legnaro	H ⁺ /352.2	RFQ	5	30	7.2	проект для ADS
NG, NIEFA-IGCAR	D ⁺ /433	RFQ	1	10/10 ⁻²	1.2	в стадии разработки

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ. ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ

Уравнения движения частицы в структуре с RFQ имеют вид [1]:

$$\frac{d^2z}{d\tau^2} = 4 \frac{eU_L T}{W_0 L} \cos(Kz) \cos(\tilde{\omega}\tau + \varphi_0) = F_z, \quad (1)$$

$$\frac{d^2x}{d\tau^2} = \left(\frac{eU_L \kappa}{W_0 a^2} + 4\pi \frac{eU_L T}{W_0 L^2} \sin(Kz) \right) \times$$

$$\times \cos(\tilde{\omega}\tau + \varphi_0) x = Q_x x$$

$$\frac{d^2y}{d\tau^2} = \left(-\frac{eU_L \kappa}{W_0 a^2} + 4\pi \frac{eU_L T}{W_0 L^2} \sin(Kz) \right) \times$$

$$\times \cos(\tilde{\omega}\tau + \varphi_0) y = Q_y y$$

где $\tau = ct$, $\tilde{\omega} = 2\pi\omega/c$, U_L – напряжение между электродами, T – эффективность ускорения, W_0 – энергия покоя, L – длина периода, ω – частота ускоряющего поля, φ_0 – начальная фаза, c – скорость света, $K = 2\pi/L$, a – минимальный радиус на периоде, $\kappa = 1 - (4T/\pi)$.

Уравнения для огибающих пучка в плоскостях x , $\frac{dx}{d\tau}$ и y , $\frac{dy}{d\tau}$ согласно определению [2] можно записать в виде:

$$\frac{dS_{11}^{x,y}}{d\tau} = 2S_{12}^{x,y}, \quad (4)$$

$$\frac{dS_{12}^{x,y}}{d\tau} = Q_{x,y} \cdot S_{11}^{x,y} + S_{22}^{x,y}, \quad (5)$$

$$\frac{dS_{22}^{x,y}}{d\tau} = 2Q_{x,y} \cdot S_{12}^{x,y}. \quad (6)$$

Динамику частиц в плоскости, перпендикулярной оси пучка, в случае микроканонического распределения заряда можно описать уравнениями [1]:

$$\frac{d^2x}{d\tau^2} = \left(\frac{eU_L \kappa}{W_0 a^2} + 8\pi \frac{eU_L T}{W_0 L^2} \sin(kz) \right) \cos(\tilde{\omega}\tau + \varphi_0) x -$$

$$- 2 \frac{I}{4\pi\epsilon_0 \nu r_x r_y W_0} \left(1 - \frac{r_x - r_y}{r_x + r_y} \right) x = \tilde{Q}_x x, \quad (7)$$

$$\frac{d^2y}{d\tau^2} = \left(-\frac{eU_L \kappa}{W_0 a^2} + 8\pi \frac{eU_L T}{W_0 L^2} \sin(kz) \right) \cos(\tilde{\omega}\tau + \varphi_0) y -$$

$$- 2 \frac{I}{4\pi\epsilon_0 \nu r_x r_y W_0} \left(1 + \frac{r_x - r_y}{r_x + r_y} \right) y = \tilde{Q}_y y, \quad (8)$$

где $\nu = \frac{dz}{dt}$; r_x и r_y – полуоси эллиптического цилиндра; I – средний ток.

Заметим, что и в этом случае возможно рассматривать уравнения для огибающих (4)-(6), следует только подставить в них \tilde{Q}_x и \tilde{Q}_y вместо Q_x и Q_y соответственно, а при вычислении \tilde{Q}_x и \tilde{Q}_y следует

$$\text{считать } r_x = \sqrt{S_{11}^x}, \quad r_y = \sqrt{S_{11}^y}.$$

При исследовании динамики заряженных частиц часто бывает полезно в качестве независимой переменной рассматривать продольную координату z . В частности, это целесообразно сделать, когда не учитывается взаимодействие частиц.

Перейдем к независимой переменной z . Уравнение продольного движения (1) в этом случае можно записать в следующей форме:

$$\frac{d\varphi}{dz} = \frac{\tilde{\omega}}{\beta}, \quad \frac{d\beta}{dz} = \frac{F_z}{\beta}, \quad (9)$$

где $\varphi = \tilde{\omega}\tau + \varphi_0$ – текущая фаза частицы, $\beta = \frac{v}{c}$ – приведенная скорость.

Уравнения поперечного движения (2), (3) будут иметь вид:

$$\frac{d^2x}{dz^2} = \frac{1}{\beta^2} \left(Q_x x - \frac{dx}{dz} F_z \right), \quad (10)$$

$$\frac{d^2y}{dz^2} = \frac{1}{\beta^2} \left(Q_y y - \frac{dy}{dz} F_z \right). \quad (11)$$

Используя эти уравнения, можем выписать аналогичные уравнениям (4)-(6) уравнения для огибающих

$$\frac{dS_{11}^{x,y}}{dz} = 2S_{12}^{x,y}, \quad (12)$$

$$\frac{dS_{12}^{x,y}}{dz} = \frac{Q_{x,y}}{\beta} \cdot S_{11}^{x,y} - \frac{F_z}{\beta^2} S_{12}^{x,y} + S_{22}^{x,y}, \quad (13)$$

$$\frac{dS_{22}^{x,y}}{dz} = 2 \frac{Q_{x,y}}{\beta} \cdot S_{12}^{x,y} - 2 \frac{F_z}{\beta^2} S_{22}^{x,y}. \quad (14)$$

Рассмотрим различные постановки задач оптимизации динамики пучка. Следует отметить, что развиваемый подход позволяет проводить поэтапную оптимизацию и рассматривать задачи оптимизации различной сложности. Типовой сценарий оптимизации включает следующие шаги:

- оптимизацию продольного движения в эквивалентной бегущей волне [3] (с использованием методики совместной оптимизации динамики синхронной частицы и пучка траекторий, возмущенных по начальным данным). На этом этапе выбирается закон изменения синхронной фазы и интенсивности ускорения вдоль канала с учетом ряда ограничений, влияющих на качество группирования и захвата частиц пучка в режим ускорения, а также на качество фокусировки пучка;

- выбор основных параметров канала ускорителя с ПOKФ (длин ячеек, величин апертуры и модуляции, напряжений на электродах и т.д.) на основе результатов, полученных на первом этапе, и дальнейшей оптимизации канала [4];

- построение согласующей секции [5].

Рассмотрим подробнее задачу оптимизации поперечного движения. Эта проблема может решаться различными путями, в зависимости от стоящих перед проектировщиком ограничений и приоритетов. Эту проблему также целесообразно разбивать на

отдельные подзадачи и решать их последовательно (поэтапно). Рассмотрим постановки соответствующих задач оптимизации.

Задача 1. Рассмотрим задачу оптимизации поперечного движения вдоль движения синхронной частицы.

Продольное движение синхронной частицы считаем известным, выбранным на этапе оптимизации продольного движения. Функции $U_L(z)$, $T(z)$, $L(z)$ – фиксированы. В качестве управления на данном этапе можно рассматривать минимальный радиус на пространственном периоде $a = a(z)$.

Введем функционал:

$$I(a) = \int_0^Z \Phi(S_{11}(z), a(z)) dz, \quad (15)$$

где

$$\Phi(s, a) = \begin{cases} 0, & s < a^2 \\ (s - a^2)^2, & s \geq a^2 \end{cases}. \quad (16)$$

Величина S_{11} , входящая в функционал, определяется при решении уравнений (12)-(14) при продольном движении, определяемом уравнениями (9), при начальных условиях, соответствующих синхронной частице. Величина z — продольная координата, соответствующая выходу из ускорителя. Поставленная задача является стандартной задачей оптимизации программного управления. Для ее решения можно применить методы оптимизации, использующие первую вариацию функционала.

Задача 2. Рассмотрим задачу оптимизации поперечного движения пучка траекторий.

Пусть заданы матрицы $S_0^{x,y}(\varphi_0, \beta_0)$, $(\varphi_0, \beta_0) \in M_0$.

Рассмотрим функционал, определенный на пучке траекторий:

$$I(a) = \int_{0M} \int_{z,u} \Phi(S_{11}^{x,y}(z, \varphi_z, \beta_z)) d\varphi_z d\beta_z + \int_{M_{Z,u}} G(S^{x,y}(Z, \varphi_Z, \beta_Z)) d\varphi_Z d\beta_Z. \quad (17)$$

Здесь функция Φ определяется так же, как и в задаче 1, а функция G оценивает отклонение элементов матриц $S_0^{x,y}(\varphi_0, \beta_0)$ от заданной величины.

Первое слагаемое в функционале (17) обеспечивает фокусировку пучка. Минимизация второго слагаемого обеспечивает, в частности, минимизацию эффективного эмиттанса пучка на выходе ускорителя.

Таким образом, используемые при оптимизации функционалы (приведенные в данной работе и ранее [3, 4]) описывают достаточно широко различные возможности оптимизации продольного и поперечного движений. Возможно также проводить совместную оптимизацию движения синхронной частицы и динамики пучка в целом.

На основе разработанных методов можно рассматривать в различных постановках задачу минимизации эффективного эмиттанса пучка на выходе

ускорителя. При этом можно рассматривать совместную оптимизацию продольного и поперечного движения.

Разумеется, оптимизация с использованием уравнений огибающих, является лишь частью моделирования RFQ. Она дает приближенную информацию, например, о потерях частиц в структуре и величине эмиттанса на выходе ускорителя. Поэтому после проведения расчетов, описанных выше, обязательным является расчет динамики по трехмерной программе с возможно более тщательным учетом влияния сил объемного заряда методом "частица-частица" или "частица-сетка".

ПРОБЛЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Проведенные исследования показали, что при энергии инжекции протонов от 50 до 80 кэВ возможно иметь структуры почти со 100% захватом частиц в режим ускорения. При этом при выходной энергии от 2 до 5 МэВ темп ускорения превышал 1 МэВ/м. Расчеты проводились с помощью программ BDO-RFQ и LIDOS. Рассматривались структуры, предназначенные для ускорения протонов ($f=352$ МГц) и дейтронов ($f=433$ МГц). Нейтронный генератор, который изготавливается в НИИЭФА для Центра атомных исследований им. Индиры Ганди (Чиннаи, Индия) имеет в своем составе RFQ с рабочей частотой 433 МГц, который ускоряет дейтроны до энергии 1 МэВ. Как видно из таблицы, значения импульсного и среднего тока пучка не являются проблемными, однако по условиям размещения НГ длина RFQ не должна превышать 1,3 м. Выбор частоты 433 МГц, низкой энергии инжекции (25 кэВ) и, собственно, среднего радиуса канала ускорителя (1,8 мм) и напряжения на электродах (48 кВ) обуславливает очень жесткие допуски на отклонения геометрических размеров резонатора от номинала и не менее высокие требования к классу шероховатости внутренних поверхностей. Например, модуляция электродов должна быть выполнена с точностью 1...2 мкм, класс обработки поверхности не ниже 10-11 класса. Опыт НИИЭФА по разработке экспериментальных резонаторов RFQ с частотой 433 МГц, настройке и испытаниям (в том числе и при работе с пучком), позволил определиться с требованиями к оборудованию и с технологией изготовления.

ЛИТЕРАТУРА

1. I.M. Kapchinsky, V.A. Teplyakov. Linear Ion Accelerator with Spatially Homogeneous Strong Focusing // *Prib. Tekh., Eksp.* 1970, №2.
2. D.A. Ovsyannikov. *Modeling and Optimization of Charged Particle Beam Dynamics*. Leningrad: Leningrad State University, 1990, p.312.
3. B.I. Bondarev, A.P. Durkin, A.D. Ovsyannikov. New Mathematical Optimization Models for RFQ Structures // *Proc. of the 1999 Particle Accelerator Conf.* New York, 1999, p.2808-2810.
4. D.A. Ovsyannikov, A.D. Ovsyannikov, Yu.A. Svislunov, et al. Beam dynamics optimization: models, methods and applications // *NIM*. 2006, v.A558, p.11-19.

5. A.D. Ovsyannikov, D.A. Ovsyannikov, S.L. Chung.
Optimization of a Radial Matching Section // *Intern.
Journ. of Mod. Phys.* 2009, v.A24, №5, p.952-958.

Статья поступила в редакцию 08.09.2009 г.

**DESIGNING OF COMPACT ACCELERATING STRUCTURES FOR APPLIED COMPLEXES
WITH ACCELERATORS**

Yu.A. Svistunov, A.D. Ovsyannikov

Review of accelerating structures of working frequency diapason 325...450 MHz used in electrophysical and nuclear-physical complexes is given. Problems of modeling and manufacturing of such structures are considered. New ideas of particles beam optimization in RFQ are presented.

**РОЗРОБКА КОМПАКТНИХ ПРИСКОРЮЮЧИХ СТРУКТУР ДЛЯ КОМПЛЕКСІВ
ПРИКЛАДНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

Ю.А. Свистунов, А.Д. Овсянников

Дається огляд застосування прискорювальних структур з високочастотним квадрупольним і Змінно-фазовим фокусуванням у діапазоні робочих частот 325...450 МГц у сучасних електро- і ядерно-фізичних комплексах прикладного призначення. Розглядаються проблеми моделювання і виготовлення таких структур. Демонструється новий підхід до оптимізації динаміки частинок і геометрії електродів у резонаторах з просторово-однорідним квадрупольним фокусуванням.