

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.643

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРУБОК ДРЕЙФА В СТРУКТУРАХ IH И SPR

© 2025 г. И. В. Рыбаков^а, *, В. В. Парамонов^а

^аИнститут ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

*E-mail: irybakov@05.ru

Поступила в редакцию 13.04.2024 г.

После доработки 13.05.2024 г.

Принята к публикации 28.05.2024 г.

Структуры IH (Inter digital H-type) и SPR (Split Ring) применяются для ускорения ионов на участке низких энергий и используются при относительно низких значениях рабочей частоты. Представлена процедура выбора параметров Трубок Дрейфа (ДТ) для достижения высокой ВЧ эффективности и одновременного подавления действия дипольной паразитной составляющей электрического поля при заданной электрической прочности. С помощью современного программного обеспечения в электростатическом 3D приближении накоплена база данных вариантов ДТ по шести свободным геометрическим параметрам. Выбор конечного варианта осуществляется с помощью последовательной интерполяции базы данных. Для расчета динамики частиц в выбранных вариантах ДТ выводятся также коэффициенты Фурье разложения ускоряющего поля на оси.

Ключевые слова: ускоритель, ускоряющая структура, трубки дрейфа

DOI: 10.56304/S207956292501018X

ВВЕДЕНИЕ

Структуры Inter Digital H-type (IH) [1] (рис. 1а) и Split ring (SPR) [2] (рис. 1б) применяются для ускорения ионов на участке низких энергий и используются при относительно низких значениях рабочей частоты. Ускорение происходит в электрическом поле между соседними ДТ, в пространстве между которыми сосредоточена основная часть электрического поля. Рабочим является π вид колебаний. Малые расстояния между трубками дрейфа $l_g = \alpha l_c = \alpha \beta \lambda / 2 \ll \lambda$, $\alpha < 1$, $\beta \ll 1$ где α , l_c , β , λ – коэффициент зазора, длина периода (ячейки), относительная скорость частиц и длина волны рабочего колебания соответственно, позволяют проводить оценочные расчеты распределений электрического поля между ДТ в 3D электростатическом приближении и использовать для описания понятия колебательных систем с сосредоточенными параметрами – контуров.

МЕТОДИЧЕСКАЯ ОСНОВА

ВЧ эффективность ускоряющей структуры определяется величиной погонного эффективного шунтового сопротивления Z_e

$$Z_e = \frac{(E_0 T l_c)^2}{P_s}, \quad Q = \frac{\omega W_0}{P_s}, \quad E_0 = \frac{\int_{l_c}^{\square} E_z(0, z) dz}{l_c}, \quad (1)$$

где T – коэффициент пролетного времени, E_0 – средняя по периоду напряженность электрического поля, Q – добротность структуры, W_0 – запасенная энергия, P_s – мощность ВЧ потерь в поверхности. Используем также определения шунтового R_{sh} и характеристического R_{ch} сопротивления структуры

$$R_{shunt} = \frac{(E_l l_c)^2}{P_s} = \frac{Z_e}{T^2}, \quad (2)$$

$$R_{ch} = \frac{R_{shunt}}{Q} = \frac{(E_l l_c)^2 P_s}{\omega W_0 P_s} = \frac{(U)^2}{\omega W_0} = \frac{Z_e}{Q T^2},$$

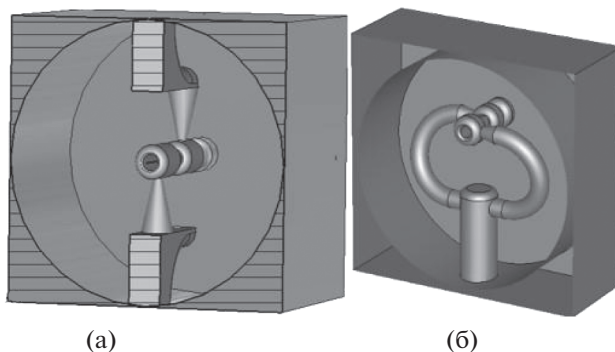


Рис. 1. Геометрия структур IH (а) и SPR (б).

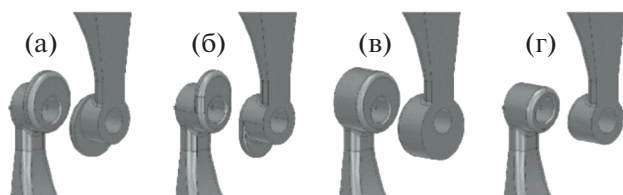


Рис. 2. Конфигурации ДТ для компенсации действия поперечной составляющей поля.

где $U = E_l$ — эквивалентная разность потенциала на периоде. Квази сосредоточенная аппроксимация параметров структур позволяет провести аналогию с колебательным контуром, для которого

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (3)$$

где L , C , R — индуктивность, емкость и сопротивление элементов контура. Учитывая (2) и (3), из (1) получим

$$Z_c = \frac{2QT^2}{\omega C} = \frac{2T^2}{R\omega^2 C^2}. \quad (4)$$

Для величины погонного эффективного шунтового сопротивления Z_{el} , с учетом частотной зависимости $R \sim R_0 \sqrt{f}$ сопротивления от частоты f и соотношение $\omega = 2\pi f$,

$$Z_{el} = \frac{Z_c}{l_c} = \frac{2Z_e}{\beta\lambda} = \frac{1}{cR_0\pi^2\beta C^2} \frac{T^2}{f^{\frac{3}{2}}}. \quad (5)$$

Для максимальной величины Z_{el} на заданной частоте f_0 необходимо получить максимальную величину отношения

$$Z_{el} \sim \frac{T^2}{\beta C^2}. \quad (6)$$

Величины T и C в (6) определяются из 3D расчета распределения электрического поля с использованием соотношения $W_0 = CU^2/2$.

Необходимость обеспечения электрической прочности структуры, зависящей от величины максимальной напряженности электрического поля $E_{s,max}$ на поверхности ДТ, является ограничением при выборе параметров ДТ. Параметр перенапряжения χ , зависит только от геометрических параметров ДТ,

$$\chi = \frac{E_{s,max}}{E_0 T}. \quad (7)$$

Структуры ИН и SPR не обладают осевой симметрией. Необходимы штанги для крепления ДТ, так же находящиеся близко к осевой области, что приводит к существованию на оси структуры поперечной составляющей электрического поля E_y

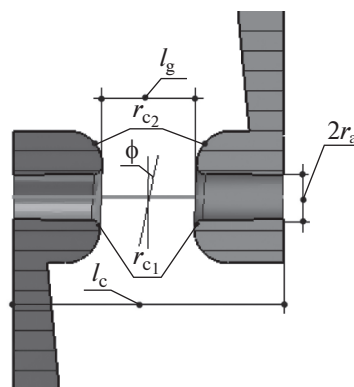


Рис. 3. Обозначения характерных размеров конфигурации ДТ со скошенными торцами.

на оси структур и росту эффективного поперечного эмиттанса сгустков [3]. Для подавления влияния E_y наиболее рассматриваемым является изменение формы ДТ с целью как уменьшения E_y по величине, так и снижения интегрального действия при пролете зазора. Для рабочей частоты 750 МГц в [4] приведено сравнение известных конфигураций ДТ, показанных на рис. 2, начиная с известных ранее конфигураций, рис. 2а, 2б, и заканчивая предложенной в [5] конфигурацией со скошенными торцами ДТ, рис. 2г.

Конфигурации на рис. 2а, 2б имеют большую площадь торцевой поверхности ДТ, следовательно должны иметь большую емкость зазора и согласно (6), при прочих равных, приводить к понижению Z_{el} структур. Этот вывод полностью подтверждается результатами прямых расчетов структур. Поэтому в дальнейшем рассматривается только форма ДТ со скошенными торцами, рис. 2г, для которой обозначения характерных размеров показано на рис. 3.

Для характеристики действия дипольной составляющей E_y на оси используем величину [6]

$$T_y = \left(\int_{-\frac{l_c}{2}}^{\frac{l_c}{2}} E_y(0, z) \cos\left(\frac{2\pi z}{\beta\lambda}\right) dz \right) / E_0. \quad (8)$$

Величина необходимого угла наклона торцов ДТ ϕ определяется из условия $T_y = 0$.

БАЗА ДАННЫХ

Геометрия трубок на рис. 3 описывается шестью свободными параметрами. Для покрытия, с возможным применением масштабирования, области применения структур по частоте от ~80 МГц до ~750 МГц и энергии протонов <20 МэВ, параметры изменяются пределах

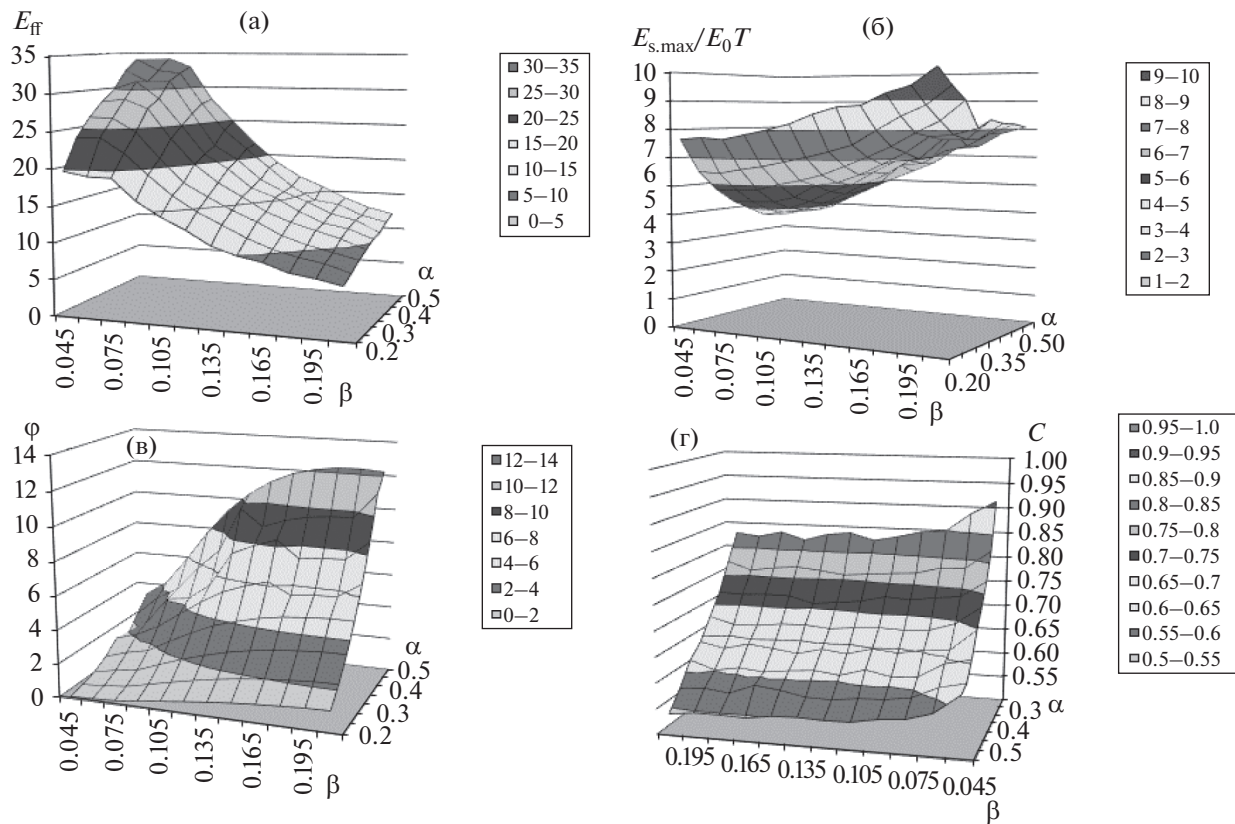


Рис. 4. Поверхности (а) ВЧ эффективности $\sim T^2/(\beta C^2)$, (б) коэффициента перенапряжения $\chi = E_{s,max}/E_0 T$, (в) компенсирующего угла наклона торцов ДТ ϕ и (г) емкости периода C при $r_a = 3.5$ мм, $r_{c1} = 2$ мм, $r_{c2} = 6$ мм

$$\begin{aligned}
 l_c &= \frac{\beta \lambda}{2}, \quad 0.045 \leq \beta \leq 0.21, \\
 \alpha &= \frac{l_g}{l_c}, \quad 0.2 \leq \alpha \leq 0.65, \\
 0.003\lambda &\leq r_a \leq 0.0095\lambda, \\
 0.0008\lambda &\leq r_{c1} \leq 0.004\lambda, \\
 1.3r_{c1} &\leq r_{c2} \leq 4r_{c1}, \\
 0 &\leq \phi \leq 24^\circ.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Накопленная база содержит ~ 40000 вариантов геометрий ДТ с различным сочетанием размеров. Для каждого варианта вычислены характеристики — E_0 , T , χ , C , T_y , а также коэффициенты гармоник E_{zn} , E_{zn}/E_0 ($n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$), разложения ускоряющего поля на оси в ряд Фурье.

Дальнейшая обработка базы до определения искомого варианта ДТ на заданной частоте и энергии частиц производится с помощью последовательной интерполяции. Накопленная база данных позволяет исследовать зависимости вычисляемых величин от размеров ДТ. На рис. 4 показаны поверхности зависимостей характеристик структур от α и β .

Из вида этих поверхностей следует как и известная закономерность, что требования высокой ВЧ эффективности и электрической прочности, рис. 4а, 4б, противоречивы, так и что учет в ВЧ эффективности емкости периода приводит к смещению максимума в область больших ($\alpha \sim 0.5$) величин коэффициента зазора, рис. 4а, что требует большей величины компенсирующего наклона торцов ДТ, рис. 4в.

ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ

Разработанная процедура применена для оптимизации формы ДТ в начальной части (НЧУ) разрабатываемого ЛУ протонов для протонной терапии [6]. НЧУ содержит 11 резонаторов структуры ИН, на частоте 476 МГц и предназначена для ускорения протонов от 1.56 до 13.74 МэВ.

На рис. 5 показаны конфигурации 1-го, 6-го и 11-го резонаторов до и после применения процедуры оптимизации формы ДТ. Для каждого резонатора рисунок поделен вертикальной линией, слева от которой показана начальная конфигурация, справа — после оптимизации формы ДТ. Оптимизация проведена поиском величин α , r_{c1} , r_{c2} и

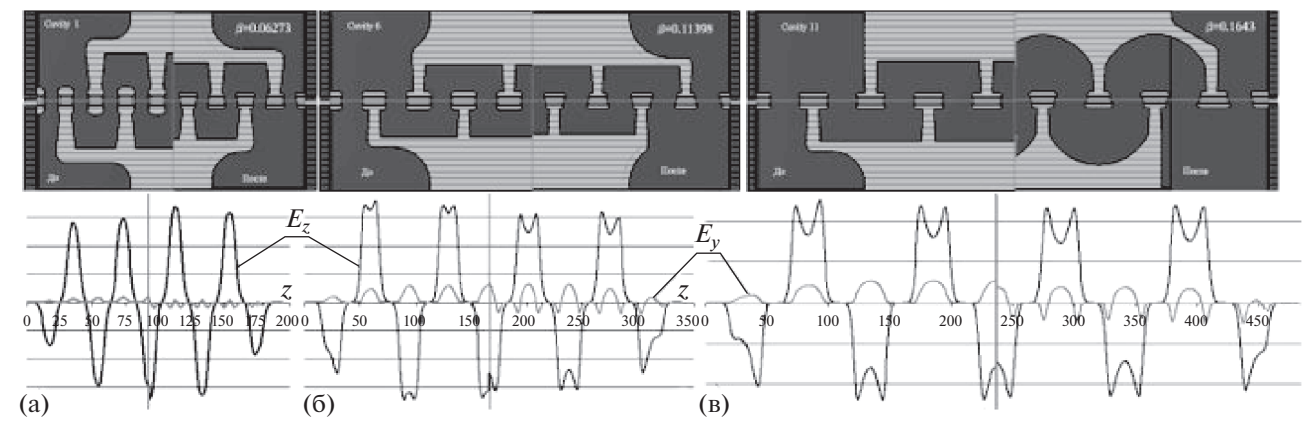


Рис. 5. Конфигурации первого (а), шестого (б) и одиннадцатого (в) резонаторов НЧУ ЛУ до и после применения процедуры оптимизации формы ДТ, распределение ускоряющего поля и поперечной дипольной составляющей в резонаторах.

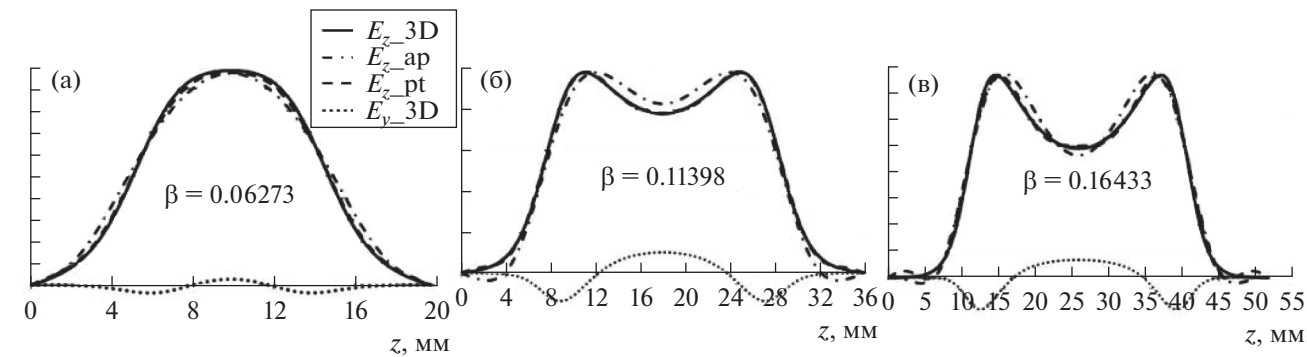


Рис. 6. Точность восстановления распределения ускоряющего поля по Фурье гармоникам для резонаторов ИН 1 (а), ИН 6 (б) и ИН 11 (в).

результаты приведены в табл. 1 в сравнении с исходными параметрами.

При сохранении электрической прочности структуры удается достичь существенного увеличения Z_e . Из приведенных распределений полей на оси резонаторов виден знакопеременное на периоде распределение E_y для уменьшения поперечного смещения частиц.

На рис. 6 приведены распределения ускоряющего поля, восстановленные по Фурье гармоникам из базы данных в сравнении с результатами прямого численного моделирования.

Сплошные линии показывают распределение E_z прямо рассчитанное по определенным параметрам ДТ. Пунктирные линии – это распределение E_z по гармоникам, когда коэффициенты

Таблица 1. Сравнение результатов с исходными параметрами

Параметр	ИН 1		ИН 6		ИН 11	
	до	после	до	после	до	после
β	0.06273	0.06273	0.11398	0.11398	0.16433	0.16433
Z_e , МОм	35.36	53.92 (+52%)	60.57	63.23 (+4.4%)	62.19	70.78 (+13.8%)
Q	6450	7625	9677	10378	11144	11894
$E_{s,max}/E_0 T$	6,6	7.7 (+16%)	7.2	7.7 (+7.0%)	8.4	7.7 (-8.3%)
φ , град.	0	6.34	0	12.98	0	14.24

определены из прямо рассчитанного распределения E_z . Штрихпунктирные линии соответствуют распределению E_z по коэффициентам, полученным из накопленной библиотеки после оптимизации с использованием последовательной интерполяции. Распределения поля совпадают с точностью 2%.

ВЫВОДЫ

Реализована процедура определения параметров трубок дрейфа в структурах ИИ и SPR для достижения одновременно высокой ВЧ эффективности, электрической прочности и подавления действия дипольной составляющей электрического поля.

Эффективность и точность процедуры подтверждается сравнением ее результатов с результатами прямого численного моделирования резонаторов начальной части ускорителя для протонной терапии.

Разработанная база данных включает в себя информацию, позволяющую восстанавливать распределение ускоряющего поля. Поэтому она так же является основой для окончательной разработки

параметров реального ускоряюще-фокусирующего канала, состоящего из резонаторов рассмотренного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Weis T. et al.* // Proc. Linear Accelerator Conf. Seeheim, Germany. 1984. P. 417.
2. *Schempp A. et al.* // Proc. Linear Accelerator Conf. New York, USA. 1979. P. 159.
3. *Durkin A.P. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2023. V. 20 (4). P. 750.
<https://doi.org/10.1134/s1547477123040234>
4. *Lopez Lopez R. et al.* // Proc. Int. Linear Accelerator Conf. (LINAC'22). Liverpool, UK. 2022. Geneva: JACoW Publ. P. 146.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-LINAC2022-MOPOGE04>
5. *Kurennoy S.S. et al.* // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2012. V. 15. P. 090101.
<https://doi.org/10.1103/physrevstab.15.090101>
6. *Facco A., Zvyagintsev V.* // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2011. V. 14. P. 070101.
<https://doi.org/10.1103/physrevstab.14.070101>
7. *Paramonov V.V., Durkin A.P., Kolomiets A.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2020. V. 17. P. 624.
<https://doi.org/10.1134/S1547477120040366>

Optimization of the Drift Tubes Parameters for the IH and SPR Structures

I. V. Rybakov^{1, *} and V. V. Paramonov¹

¹ *Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

**e-mail: irybakov@inr.ru*

Received May 13, 2024; revised May 13, 2024; accepted May 28, 2024

Abstract—IH (Inter digital H-type) and SPR (Split Ring) structures are applied for ion acceleration at low energy range on relatively low frequencies. A procedure for selecting the Drift Tubes (DT) parameters to achieve high RF efficiency and simultaneous suppression of the parasitic dipole component of the electric field with given electrical strength is presented. With a modern software in the 3D electrostatic approximation database of DT options has been accumulated for six free geometric parameters. The choice of the final option is carried using sequential polynomial interpolation of the database. For the beam dynamics calculations Fourier coefficients of the accelerating field are carried.

Keywords: accelerator, accelerating structure, drift tubes