

## ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ И ПРОГНОЗИРУЕМЫЕ КОНЕЧНЫЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ КОРОТКИХ УСКОРЯЮЩИХ РЕЗОНАТОРОВ В УСКОРИТЕЛЕ ИОНОВ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ

*А. П. Дуркин*<sup>а, 1</sup>, *А. А. Коломиец*<sup>а</sup>, *Л. Ю. Овчинникова*<sup>а, б</sup>,  
*В. В. Пармонов*<sup>а, 2</sup>

<sup>а</sup> Институт ядерных исследований РАН, Москва

<sup>б</sup> АО НИИ «Феррит-Домен», Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены характеристики коротких ускоряющих резонаторов на основе Interdigital H и SPlit Ring структур, применимых для ускорения ионов в области низких энергий. Показано, что прогнозируемые конечные ВЧ-характеристики резонаторов различаются незначительно при явном преимуществе SPR в технологии изготовления и настройки. Общим свойством этих структур является наличие на оси пучка дополнительной дипольной составляющей электрического поля, с необходимостью приводящей к дополнительному росту эмиттанса пучка при ускорении. Сформулированы основные закономерности движения частиц при наличии дипольной составляющей. Приведены примеры возможности уменьшения нежелательных эффектов в динамике частиц.

The characteristics of short accelerating cavities based on Interdigital H and SPlit Ring structures, which are applicable for ion acceleration at low energies, are considered. It is shown that the expected realized RF characteristics of the resonators differ insignificantly with a clear advantage of SPR in manufacturing and tuning technology. A common property of these structures is the presence on the beam axis of an additional dipole component of the electric field, which necessarily leads to an additional increase in the beam emittance upon acceleration. The main patterns of particle motion in the presence of a dipole component are formulated. Examples of the possibility of reducing undesirable effects in particle dynamics are given.

PACS: 29.20.Ej; 29.27.–a

### РАССМАТРИВАЕМЫЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

Для ускорения ионов в области низких энергий широко распространена Interdigital H (IH) структура [1]. Менее известна структура SPlit Ring (SPR) [2]. Без внешней цилиндрической обечайки резонаторов эти структуры показаны на рис. 1, а, б.

---

<sup>1</sup>E-mail: durkinap@inr.ru

<sup>2</sup>E-mail: paramono@inr.ru

Электромагнитные системы структур создают на держателях трубок дрейфа и соседних трубках знакопеременное распределение потенциала  $\pm V$  (рис. 2, а), обеспечивая продольное ускоряющее поле  $E_z$  (рис. 2, б). В то же время наличие держателей трубок дрейфа с таким распределением потенциала с необходимостью вызывает

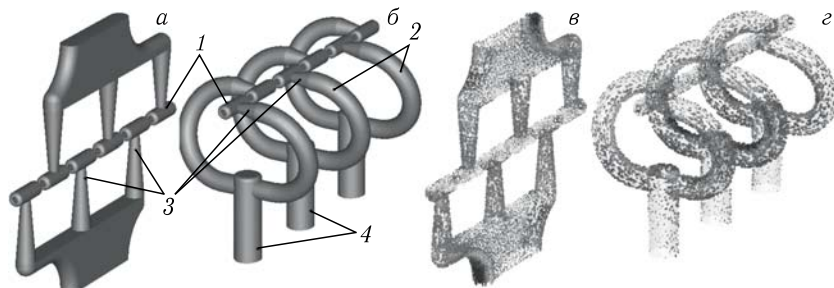


Рис. 1. Структуры IH (а) и SPR (б): 1 — трубки дрейфа; 2 — вибраторы SPR; 3 — держатели трубок дрейфа; 4 — держатели вибраторов SPR. Распределения поверхностных токов рабочего колебания по поверхности структур IH (в) и SPR (г)

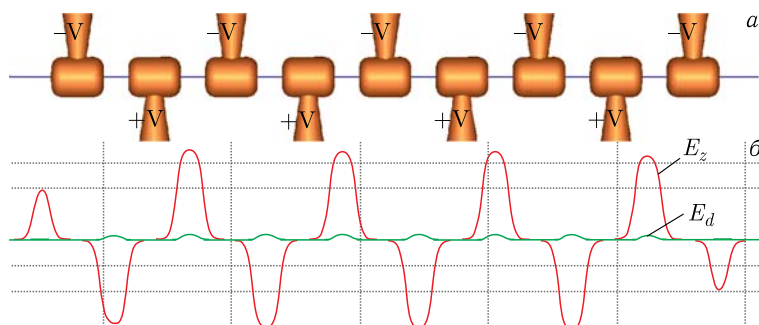


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Распределение потенциала по трубкам дрейфа (а) и соответствующие распределения продольного ускоряющего поля  $E_z$  (красная линия) и дополнительного поля диполя  $E_d$  (зеленая линия) на оси пролетного канала (б)

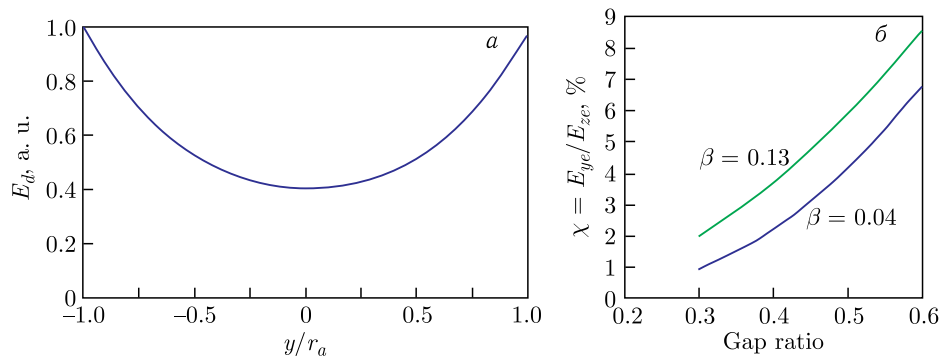


Рис. 3. Типичное распределение поля  $E_d(y, L_p/2)$  в середине ускоряющего зазора (а) и зависимости отношения амплитуд дипольной и ускоряющей составляющих поля (б)

в ускоряющем зазоре наличие дополнительного поперечного поля  $E_d$  в плоскости держателей трубок дрейфа (см. рис. 2), что является общим свойством рассматриваемых структур. В пролетном канале резонатора распределение поля можно представить как сумму осесимметричного поля  $\mathbf{E}_{ac}(r, z)$  и дополнительного поля диполя  $E_d(y, z)\mathbf{y}_0$  в плоскости  $xz$

$$\mathbf{E} = (\mathbf{E}_{ac}(r, z) + E_d(y, z)\mathbf{y}_0) \cos(\omega t + \phi_0). \quad (1)$$

Распределение поля диполя  $E_d(y, z)$  нелинейно в пределах радиуса апертуры  $r_a$  (рис. 3, а), и амплитуда дополнительного поля возрастает с ростом относительной скорости частиц  $\beta$  и коэффициента зазора — отношения длины зазора  $L_g$  к длине периода  $L_p$  (рис. 3, б).

Как видно из рис. 2, б, ускоряющая и дипольная составляющие поля имеют разные сдвиги фаз на период  $\pi$  и  $2\pi$  соответственно. В соседних зазорах синхронная частица испытывает противоположное по знаку действие дипольной составляющей.

### ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ПУЧКА

Дипольная составляющая приводит к отклонению центра пучка от оси канала. В бесконечной периодической структуре в соседних зазорах величины дипольной составляющей одинаковы. При прохождении первого зазора частицы получают прирост поперечного импульса, приводящего к поперечному смещению при прохождении трубки дрейфа. К моменту прохождения следующего зазора поле  $E_d$  меняет знак и полученный ранее прирост поперечного импульса компенсируется. Но полученное ранее поперечное смещение сохраняется. При прохождении последующих зазоров процесс периодически повторяется, приводя к нарастанию смещения.

Рассмотрим сгусток частиц с конечной фазовой шириной, условно нарезанный по оси  $z$  на тонкие диски. Дипольная составляющая зависит от времени согласно (1), и поперечный сдвиг каждого диска зависит от фазы его влета в зазоры. В целом сгусток поворачивается под углом к оси ускорителя. Поперечная проекция повернутого сгустка является наложением всех сечений, поэтому ее площадь может заметно вырасти. Эффективный эмиттанс сгустка возрастает.

В резонаторах с малым числом ускоряющих зазоров,  $n \in [5 \dots 9]$ , на распределение поля дипольной составляющей сильное влияние оказывают торцевые области, поэтому трудно обеспечить равномерное распределение  $E_d$  по зазорам. Типичные распределения  $E_d$  по оси резонатора, реализуемые при  $n = 5$  и  $n = 6$ , показаны на рис. 4. Неравномерность распределения  $E_d$  усложняет оценку эффекта компенсации.

Рассмотрим основные закономерности движения частиц в ускоряюще-фокусирующем канале (УФК), состоящем из последовательности таких коротких ускоряющих резонаторов и расположенных между ними фокусирующих элементов. В приближении линейности по  $y$  поперечных сил в линзах и резонаторах движение центра каждого диска при наличии  $E_d$  описывается уравнением с периодическими коэффициентами

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = Q(z)y + f(z, \varphi), \quad (2)$$

где  $Q(z)$  — периодическая функция с периодом фокусировки  $L_f$  для равновесной частицы, описывающая обычные поперечные силы со стороны линз и ускоряющих резо-

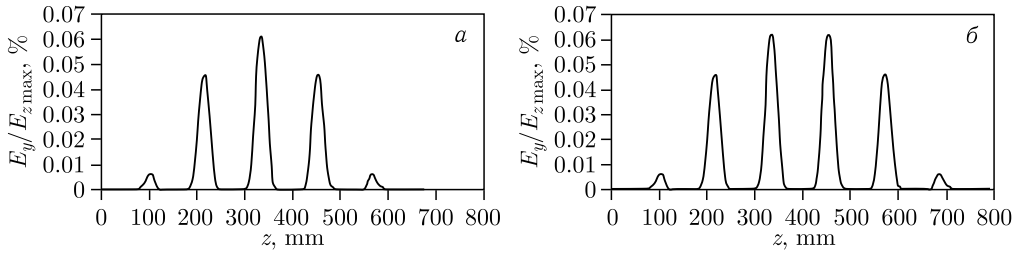


Рис. 4. Типичные распределения поля  $E_d$  по оси, реализуемые в резонаторах с  $n = 5$  (а) и  $n = 6$  (б) ускоряющими зазорами

наторов. Для всех остальных частиц  $Q(z)$  — квазипериодическая функция. Функция  $f(z, \varphi)$  подбирается для аппроксимации распределений  $E_d$ , например таких, как приведенные на рис. 4.

Можно показать, что решение уравнения (2) с нулевыми начальными условиями имеет вид

$$y(z) = \int_0^z f(\tau + \varphi) \rho_{\max} \rho(\tau) \sin(\mu(z - \tau) + \Theta(\tau)) d\tau, \quad (3)$$

где  $\rho(\tau)$  и  $\rho_{\max}$  — функция с периодом  $L_f$  и ее максимальное значение, модулирующая амплитуду синусоиды поперечных колебаний на периоде фокусировки;  $\mu$  — набег фазы поперечных колебаний на периоде фокусировки;  $\Theta(\tau)$  — функция с периодом  $L_f$ , описывающая добавку к фазе поперечных колебаний на периоде фокусировки.

Траектория центра каждого диска описывается произведением периодических функций с разными периодами колебаний. Осесимметричные силы дают период  $L_f$  и период поперечных колебаний частиц, дипольная компонента — период ВЧ-колебания и период фазовых колебаний частиц относительно синхронной. Эти длины периодов различаются в разы. Нет условий для резонансного нарастания поперечного смещения. Поэтому для каждого диска установится своя амплитуда колебаний вдоль всего УФК.

Даже приближенный дальнейший анализ решения (3) вовлекает множество свободных параметров — деталей построения УФК, ускоряющих резонаторов и характеристик сгустков. Получить разумную оценку в общей форме затруднительно.

В качестве примера рассчитан условный УФК для ускорения протонов от энергии 4 до 50 МэВ из коротких резонаторов ИН на частоте 324 МГц с  $n = 5$  ускоряющих зазоров и распределением  $E_d$ , показанным на рис. 4, а. На вход УФК ускорителя подано 11 частиц с нулевыми поперечными координатами и скоростями, равномерно, с шагом в  $4^\circ$  заполняющими фазовый отрезок  $40^\circ$ . Каждая частица представляла собой центр диска, входящего в канал в данной фазе. На рис. 5, а показан пучок траекторий центров дисков вдоль УФК. Видны отмеченные выше закономерности — наличие смещения центра сгустка, поворот сгустка под углом к оси ускорителя, т. е. рост поперечного эмиттанса и выход на установившуюся амплитуду поперечного отклонения для каждого диска. Прямое численное моделирование движения ансамбля частиц в рассчитанных 3D-полях в резонаторах ИН с  $n = 5$  и распределением  $E_d$ , подобным показанному на рис. 4, а, подтверждают существенный,  $> 10\%$ , рост поперечного эмиттанса при пролете резонатора.

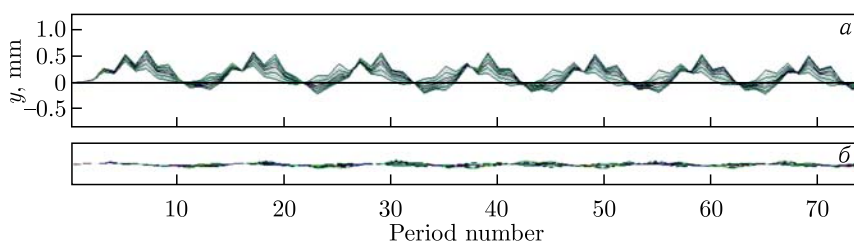


Рис. 5. Пучок траекторий центров дисков вдоль УФК из резонаторов с  $n = 5$  ускоряющих зазоров (а) и аналогичный пучок траекторий в УФК из резонаторов с  $n = 6$  (б)

Распределение  $E_d$  в резонаторе с  $n = 5$ , показанное на рис. 4, а, не обеспечивает компенсации прироста поперечного импульса при пролете частиц резонатора. Это лучше обеспечивается распределением  $E_d$  в резонаторе с  $n = 6$ , показанным на рис. 4, б. Для сравнения, на рис. 5, б в том же масштабе поперечного смещения показан аналогичный рис. 5, а пучок траекторий центров дисков вдоль УФК из резонаторов с  $n = 6$  и распределением  $E_d$  на рис. 4, б. Видно, что нежелательные особенности в динамике сгустка сохраняются, но по величине уменьшаются в разы.

## СРАВНЕНИЕ ПРОГНОЗИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУР

Характеристики сооружаемого линейного ускорителя (ЛУ) как функциональные, так и технико-экономические в немалой степени определяются сооруженной ускоряющей системой. В процессе разработки ускоряющей системы рассматривается ряд последовательных этапов — анализ характеристик периодической структуры, анализ сегментации этой структуры в резонаторы, технология изготовления, вопросы настройки и регулировки частоты. Результаты анализа на промежуточных этапах интересны. Но более важны конечные реализованные параметры.

ВЧ-эффективность ускоряющей структуры характеризуется величиной эффективного шунтового сопротивления  $Z_e$ . Как бесконечная периодическая структура при низких скоростях частиц,  $\beta \sim 0,05$ , ИН более чем в два раза превосходит SPR по этому параметру. Но с ростом  $\beta > 0,1$  разница уменьшается. Структуры качественно различаются в распределении магнитного поля рабочего колебания. Магнитное поле и соответствующее им распределение поверхностных токов в SPR сосредоточено на вибраторах, см. рис. 1, з. Магнитное поле ИН распределено у внешней цилиндрической поверхности и элементов крепления трубок дрейфа, см. рис. 1, в. При формировании коротких резонаторов длиной  $L_c = n\beta\lambda/2$  существенные дополнительные ВЧ-потери в торцевых стенках значительно снижают полное шунтовое сопротивление  $Z_{eT} = Z_e L_c$  резонаторов ИН. Во внешней поверхности резонаторов SPR рассеивается малая,  $\sim 5\%$ , часть ВЧ-мощности и существенного снижения  $Z_{eT}$  не происходит. Дополнительное снижение  $Z_{eT}$  резонаторов ИН вызывает необходимость выполнять для выравнивания распределения ускоряющего поля по длине подсечки на держателях, см. рис. 1, а, на поверхности которых реализуется максимальная плотность поверхностных токов, см. рис. 1, в. Такая проблема в резонаторах SPR отсутствует,

и держатели вибраторов являются бестоковыми, см. рис. 1, *з*. В результате расчетные величины  $Z_{eT}$  резонаторов ИИ и SPR сближаются. Сложная конструкция элементов резонатора ИИ [3] часто приводит к необходимости разборной конструкции с последующим болтовым соединением в местах высокой плотности поверхностных токов. В результате реализуемая величина  $Z_{eT}$  резонаторов ИИ составляет  $\sim 65\%$  от расчетной. Малые размеры вибраторов в резонаторах SPR позволяют применить для вибратора с держателем пайку высокотемпературными серебряными припоями, и реализуемая величина  $Z_{eT}$  составляет  $\sim 85\%$  от расчетной [4].

В результате прогнозируемые характеристики изготовленных резонаторов ИИ и SPR по ВЧ-эффективности различаются незначительно,  $\sim 10\%$ , при явном преимуществе SPR в технологии изготовления и настройки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Weis T., Klein H., Schempp A.* Linear Accelerators Excited in the TE<sub>111</sub>-Mode // Proc. of LINAC 84. 1984. P. 417–419; <https://accelconf.web.cern.ch/184/papers/thp0033.pdf>.
2. *Schempp A. et al.* A Heavy Ion Post-Accelerator with Coupled Spiral and Split-Ring Resonators // Proc. of LINAC 79. 1979. P. 159–163; <https://accelconf.web.cern.ch/179/papers/s3-6.pdf>.
3. *Poirier R.L. et al.* ISAC RF Structures and Commissioning // Proc. of EPAC 2000. 2000. P. 321–323; <https://accelconf.web.cern.ch/e00/PAPERS/TUOAF203.pdf>.
4. *Zavadtsev D. et al.* Construction and RF Test of the Debuncher for NICA Light Ion Beam Line // Proc. of the 26th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC 2018), Protvino, Russia, Oct. 1–5, 2018. P. 197–199; <http://jacow.org/rupac2018/papers/tupsa25.pdf>.

Получено 18 ноября 2022 г.