

# Методы увеличения коэффициента связи в бипериодических ускоряющих структурах

В.В. Парамонов

*Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия*

## Введение

Наряду с эффективным шунтовым сопротивлением  $Z_e$  коэффициент связи  $k_c$ , определяющий стабильность распределения ускоряющего поля по отношению к погрешностям изготовления и нагрузке пучком, является одной из основных характеристик ускоряющей структуры (УС).

Применяемые и исследуемые для ускорения частиц до высоких энергий структуры можно разделить на две группы – структуры с малой ( $k_c \approx 3 \div 5\%$ ) и большой ( $k_c \approx 30 \div 40\%$ ) связью. К первой группе относятся структуры с боковыми (SCS) [1], внутренними (OCS) [2], кольцевыми (ACS) [3], коаксиальными (CCS) [4] ячейками связи. Ко второй группе относятся структура с шайбами и диафрагмами (DAW) [3] и структура с поперечными стержнями [5]. Каждая из структур имеет как достоинства, так и недостатки.

В данной работе рассмотрены методы повышения  $k_c$  для структур первой группы и предложена новая УС, сочетающая как хорошие радиотехнические, так и технологические параметры.

## 1. Критерии оптимизации ячеек связи

Все упомянутые выше УС являются компенсированными с рабочим колебанием  $\pi$ -вида. В компенсированных УС на рабочей частоте должны совпадать частоты двух колебаний, имеющих разную четность распределения поля относительно середины периода УС – рабочего колебания и колебания связи. Применяя единый электродинамический подход к исследованию дисперсионных свойств компенсированных УС, можно показать [6], что величина групповой скорости  $\beta_g$  (или связанный с ней  $k_c = \frac{4\beta_g}{\pi\beta_p}$ ) равна

$$\frac{\beta_g}{\beta_p} = \left| \frac{\pi \int_V (\epsilon_0 \vec{E}_a \vec{E}_c - \mu_0 \vec{H}_a \vec{H}_c) dv}{\sqrt{2W_a W_c}} \right|, \quad W_a = \frac{\mu_0}{2} \int_V |\vec{H}_a|^2 dv, \quad W_c = \frac{\mu_0}{2} \int_V |\vec{H}_c|^2 dv, \quad (1)$$

где  $\beta_p$  – относительная скорость ускоряемых частиц,  $V$  – объем полупериода;  $\vec{E}_a, \vec{H}_a, \vec{E}_c, \vec{H}_c$  – распределения электрического и магнитного полей рабочего и колебания связи соответственно. Учитывая различную четность и близкий к  $TM_{01}$  для большинства структур тип колебаний, можно показать, что  $\epsilon_0 \left| \int_V (\vec{E}_a \vec{E}_c) dv \right| \ll \mu_0 \left| \int_V (\vec{H}_a \vec{H}_c) dv \right|$ .

В тоже время связь между ячейками в УС первой группы осуществляется с помощью щелей связи, прорезаемых в перегородках между ячейками. Рассмотрение щелей связи как отрезка линии или волновода позволяет получить [7] следующую оценку для  $k_c$ :

$$k_c \sim \frac{\Delta l_s^3 H_{as} H_{cs}}{t \sqrt{W_a W_c}}, \quad (2)$$

где  $\Delta$ , и  $l_s$  – ширина и длина щели;  $t$  – толщина перегородки между ячейками;  $H_{as}, H_{cs}$  – напряженность магнитных полей рабочего колебания и колебания связи в месте расположения щели.

Из приведенных (1), (2) выражений очевидно, что для повышения  $k_c$  необходимо обеспечить как можно большую величину  $H_a H_c$  в месте взаимодействия рабочего колебания и колебания связи. Это может быть достигнуто за счет выбора формы и размеров ячеек, а также за счет выбора места расположения щели связи (объема взаимодействия полей  $H_a, H_c$ ).

Однако ускоряющая ячейка должна быть оптимизирована для достижения максимальной величины  $Z_e$ , (это условие подразумевает как можно более равномерное распределение магнитного поля по поверхности ячейки) и обеспечения допустимой максимальной величины электрического поля  $E_{asmax}$  на поверхности. Возможности оптимизации ускоряющей ячейки для увеличения  $k_c$  ограничены, и в основном следует оптимизировать ячейку связи. При этом необходимо учитывать следующие ограничения:

I. Введение щелей связи приводит к понижению частот как ускоряющей  $\delta f_a$  ячейки, так и ячейки связи  $\delta f_c$ . Можно показать [7], что

$$\delta f_a \sim \frac{H_{as}^2}{W_a}, \quad \delta f_c \sim \frac{H_{cs}^2}{W_c}, \quad (3)$$

и оптимизируя ячейку связи по  $(H_{cs}/\sqrt{W_c})_{max}$  нужно предусматривать необходимость настройки на рабочую частоту с учетом щели связи.

II. Вторым ограничением является электрическая прочность структуры в переходном режиме. В стационарном режиме ячейки связи возбуждаются с малой амплитудой поля. В переходном режиме амплитуда поля в ячейках связи может достигать значительной величины [8]. Максимальная напряженность электрического поля в ячейках связи развивается в течение времени  $0 \leq \tau \leq L/(c\beta_g)$ , когда вдоль структуры распространяется нескомпенсированный поток  $P_k$  мощности от ВЧ-генератора. Здесь  $L$  – расстояние от точки ввода ВЧ-мощности до торца структуры,  $c$  – скорость света. Максимальная величина запасенной в ячейке связи ВЧ-энергии  $W_{cm}$  в переходном режиме может быть оценена сверху:

$$W_{cm} \leq \frac{P_k d}{2c\beta_g}, \quad d = \frac{\beta_p \cdot \lambda}{2} \quad (4)$$

Запасенной энергии  $W_{cm}$  соответствует максимальная величина напряженности электрического поля на поверхности ячейки связи  $E_{csmax}$ . Отношение  $E_{csmax}/W_{cm}$  зависит от формы, размеров ячейки и также должно быть ограничено при оптимизации.

III. Известно, что попытки увеличить  $k_c$ , увеличивая  $l_s$ , приводят к резкому уменьшению  $Z_e$ . Это объясняется перераспределением ВЧ-токов по поверхности ускоряющей ячейки. Максимальная плотность ВЧ-тока достигается на краях щели связи. На участках поверхности, прилегающих к середине щели, плотность ВЧ-токов минимальна. Данный дисбаланс распределения токов быстро возрастает с увеличением

$l_s$ . Увеличение  $k_c$  на 1% за счет увеличения  $l_s$  сопровождается уменьшением  $Z_e$  на  $2.5 \div 3\%$ . Увеличивать  $l_s$  следует в последнюю очередь, когда все другие резервы оптимизации исчерпаны.

## 2. Структура с боковыми ячейками

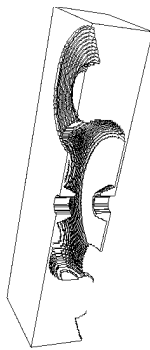


Рис. 1: SCS с модифицированной ячейкой связи.

Рассмотренные выше критерии оптимизации применены к SCS. Численное 3D моделирование выполнено с использованием программ MAFIA 3.20. В традиционной конфигурации ячеек SCS обеспечивает величину  $k_c \approx 5\%$  при ухудшении  $Z_e$  на 9% из-за влияния щелей связи. Модифицированная ячейка связи (рис. 1) имеет в 2 раза более высокое отношение  $H_{cs}/\sqrt{W_c}$ , однако прямое моделирование дает увеличение  $k_c$  в 1,4 раза при ухудшении  $Z_e$  на 7%. В SCS щели связи образуются пересечением двух тел вращения, что позволяют менять размеры и форму щели независимо от формы ячеек связи. Данная особенность структуры существенно ограничивает возможности оптимизации. Полученные для SCS результаты подтверждают справедливость примененных методов оптимизации, однако увеличение  $k_c$  5 до 7% не следует рассматривать как значительное.

## 3. Структура с внутренними ячейками

Проведенная оптимизация OCS для ускорителей протонов [9] со средней тепловой нагрузкой  $\approx 2 \div 3 \text{ kWt/m}$  позволила сформулировать следующие рекомендации для выбора размеров ячеек:

$0.015\lambda \leq 2l_c \leq 0.02\lambda$ ,  $0.008\lambda \leq t \leq 0.012\lambda$ ,  $7t \leq \Delta \leq 9t$ ,  $0.45R_a \leq r_s \leq 0.5R_a$ , где  $2l_c$  – длина ячеек связи;  $r_s$  – радиус расположения щелей связи;  $R_a$  – радиус ускоряющей ячейки.

В данной конфигурации OCS обеспечивает  $k_c \approx (14 \div 16)\%$  при ухудшении  $Z_e$  до 6% из-за влияния щелей связи. Структура в целом уступает SCS по величине  $Z_e$  не более чем на  $3 \div 5\%$  но имеет в 3 раза более высокий  $k_c$  и сохраняет технологические преимущества.

## 4. Структура с разрезными диафрагмами

Понятие “ячеек”, характерное для структур первой группы, свидетельствует о том, что в структуре можно выделить две ячейки, в которых сосредоточены поля

рабочего колебания и колебания связи. Взаимодействие колебаний происходит в ограниченной области, что и ограничивает  $k_c$  для данных структур. В тоже время для структур второй группы поля ускоряющего колебания и колебания связи перекрываются практически по всему объему, что обеспечивает большую величину  $k_c$ .

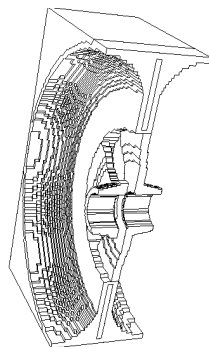


Рис. 2: Структура с разрезными диафрагмами.

Предлагаемая структура с разрезными диафрагмами (рис. 2) (Cutted Disk Structure) также относится ко второй группе. Структура образована последовательностью расположенных на оси пар полутрубок дрейфа. Расстояние между парами  $2l_a \gg 2l_c$  – расстояния между полутрубками в паре. Посередине пары полутрубок размещена диафрагма от радиуса полутрубок  $R_t$  до  $R_a$ . Диафрагма разрезается по радиусу от  $R_t$  до  $R_c$ ,  $R_c \ll R_a$ . Образовавшиеся лепестки диафрагмы поочередно присоединяются то к одной, то к другой полутрубке. Толщина лепестка с противоположной от крепимой полутрубки стороны уменьшается примерно до половины толщины диафрагмы, формируя окно связи в сторону второй полутрубки. Сформирована бипериодическая структура, в которой:

- ускоряющее колебание возбуждается в пространстве между парами полутрубок, ограниченном цилиндрической стенкой и двумя диафрагмами, и имеет характеристики распределенного;
- колебание связи имеет характеристики моды с квазисосредоточенными параметрами. Электрическое поле сосредоточено в пространстве между полутрубками, а магнитное поле вытеснено в пространство между парами, т.е. в ускоряющую ячейку (лепестки диафрагмы слабо искажают распределение моды связи).

Данное описание весьма схематично и направлено в основном на пояснение идеи CDS. Очевидно, что угловая протяженность окон и лепестков может быть различной. Может быть два (предпочтительно) три или четыре окна (лепестка) с каждой стороны диафрагмы.

Сформированная ячейка связи весьма компактна (фактически спрятана в трубку дрейфа), поэтому толщина диафрагмы невелика. Это позволяет получить высокое  $Z_e$  (расчетное 3D  $Z_e$  CDS на 5 ÷ 10% выше, чем у SCS и OCS).

Канал охлаждения может быть размещен в диафрагме (структура открыта со стороны внешней поверхности) достаточно близко к трубке дрейфа. Оценки показывают, что тепловая нагрузка на структуру 3 ÷ 5 кВт/м приводит к перепаду температур  $\approx 4^\circ$ .

Сильное перекрытие полей колебаний обеспечивает  $k_c \approx 30\%$  (рис.3, 4).  $k_c$  возрастает с увеличением углового раскрытия окон (сокращения раскрытия лепестков), но

при большом раскрытии окон быстро возрастает плотность тока на лепестках и  $Z_e$  структуры уменьшается. Структура имеет малые поперечные размеры  $2R_a \approx 0.66\lambda$  и проста в изготовлении.

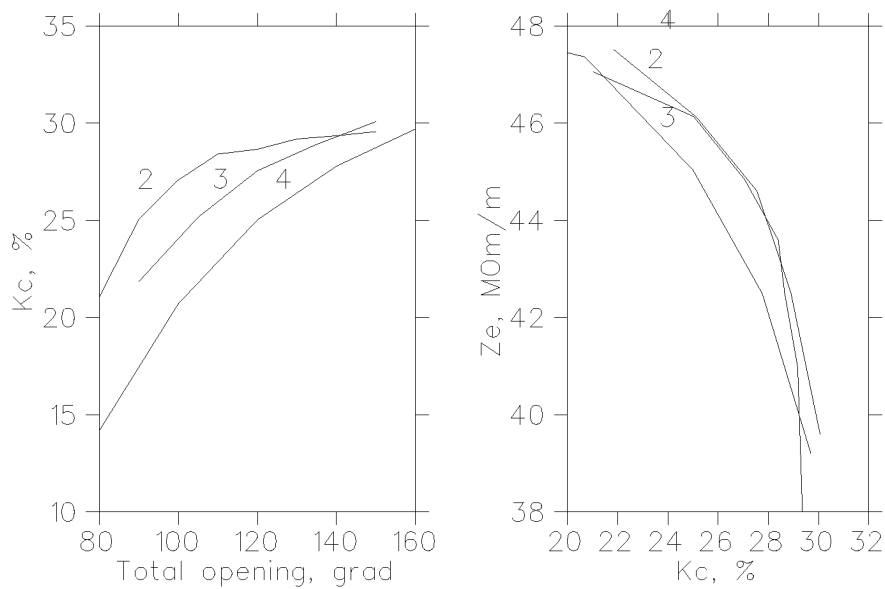


Рис. 3: Зависимость  $k_c$  от суммарного угла раскрытия (а) и зависимость  $Z_e$  от  $k_c$  при  $\beta_p = 0,6$  (в) для CDS.

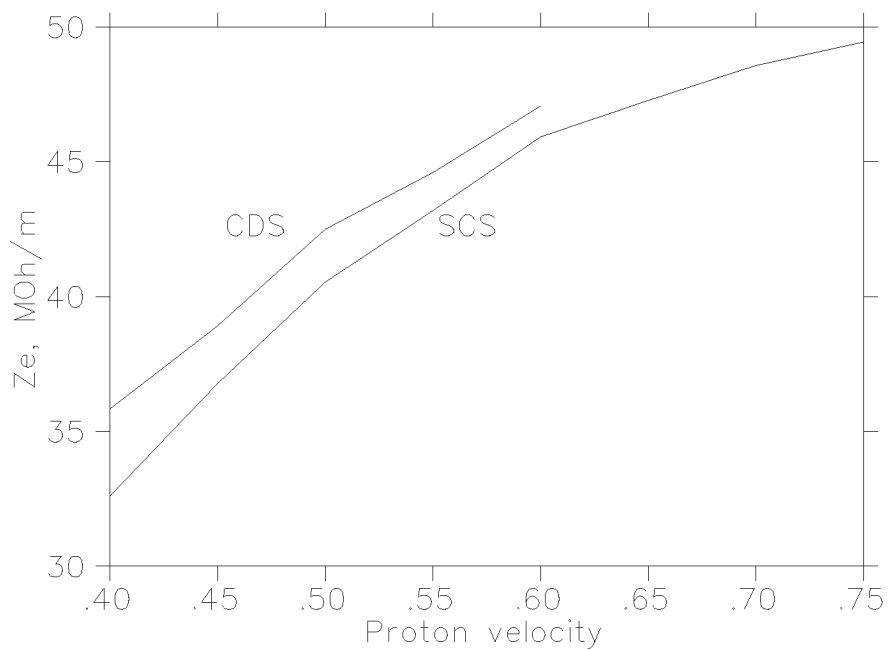


Рис. 4: Расчетные 3D зависимости  $Z_e$  от  $\beta_p$  для SCS ( $k_c = 5\%$ ), и CDS ( $k_c = 25\%$ ).

## Список литературы

- [1] E.A. Knapp et al. Rev. Sci. Instr., v. 39, p. 979, 1968.
- [2] T. Nishikawa et al. Rev. Sci. Instr., v. 37, p. 652, 1966.
- [3] V.G. Andreev et al. Proc. of the 1972 Proton Linac Conf. p. 114, 1972.
- [4] E. Tanabe et al. Proc. of the 1986 Linac Conf. p. 455, 1986.
- [5] А.А. Завадцев и др. Ускорит. заряж. частиц, Энергоатомиздат, М., стр. 47, 1983.
- [6] И.В. Гонин и др. Труды 10-го Совещания по Ускорит., Дубна, т.1, стр. 182, 1985.
- [7] Н.П. Собенин и др. Электродинамические характеристики ускоряющих резонаторов, Энергоатомиздат, М., 1993.
- [8] T.Kroc et al. Proc. of the 1992 Linac Conf. p. 187, 1992.
- [9] L.V. Kravchuk et al. The On-axis Coupled Structure for Proton Linacs, Proc. of the 1996 Linac Conf. Geneva, to be published.