

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.643

ФОРМИРОВАНИЕ РЕЗОНАТОРОВ СТРУКТУРЫ SDTL СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ УЧАСТКАМИ

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

^a Институт ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

*E-mail: irybakov@inr.ru

Поступила в редакцию 11.06.2023 г.

После доработки 15.06.2023 г.

Принята к публикации 19.06.2023 г.

Ускоряющая структура SDTL (Separated Drift Tube Linac), работающая на колебании TM₀₁₀, не содержит фокусирующих элементов в трубках дрейфа. Применение SDTL на частотах порядка 300 МГц для ускорения ионов водорода на низких, порядка единиц МэВ, энергиях затруднено существенным распылением сгустков в меж резонаторных промежутках. Предложена методика формирования геометрии резонаторов SDTL, в которых частицы проходят один или два периода в фазе – 90°. Определены границы регулировки величины поля в группирующих периодах. Приводятся примеры резонаторов.

Ключевые слова: ускоритель, ускоряющая структура, группирователь

DOI: 10.56304/S2079562924050439

1. ВВЕДЕНИЕ

Структура SDTL [1], работающая на колебании TM₀₁₀, (4–7 ускоряющих зазоров), реализует короткие резонаторы, в сравнении с классическими резонаторами Альвареца, и не содержит фокусирующих элементов в трубках дрейфа. Это позволяет лучше оптимизировать структуру по ВЧ характеристикам, упрощает изготовление и настройку структуры. Но при применении SDTL для ускорения ионов водорода на малых энергиях, порядка единиц МэВ, происходит значительное продольное распыление сгустков в межрезонаторных промежутках. Для компенсации этого эффекта рассмотрена возможность построения резонаторов с изменениями в геометрии отдельных периодов, позволяющими им проводить продольное группирование сгустков.

2. ПОСТРОЕНИЕ РЕГУЛЯРНЫХ РЕЗОНАТОРОВ SDTL

При построении структуры SDTL основными принципами являются настройка всех периодов на рабочую частоту и обеспечение постоянства поля на оси резонатора. Второе условие можно описать исходя из уравнений Максвелла с помощью интеграла по площади контура в периоде структуры (см. рис. 1а):

$$\mu_0 \omega \oint_S H_\phi dr dz = \oint_{ABCD} E_\tau dl = \int_B^C E_z dz = E_{z0} D, \quad (1)$$

где контурный интеграл берется по ограничивающему период контуру, а интеграл по площади — по площади, ограниченной контуром.

Как видно из рис. 1а, крайние периоды резонатора отличаются от внутренних. Каждый внутренний период содержит по две полу-штанги с каждой стороны, а крайние — только по одной полу-штанге. Штанги повышают собственную частоту периодов на величину порядка нескольких сотен кГц. В структуре SDTL не предусмотрено элементов стабилизации распределения поля (резонансных штырей), что декларируется как ее достоинство при изготовлении и настройке. При этом необходима компенсация расстройки крайних периодов по частоте [2]. Уменьшать в них радиус резонатора не целесообразно с точки зрения изготовления резонатора. Трубки дрейфа изготавливаются с жесткими требованиями по точности и уровню шероховатости их поверхности, поскольку на торцах их развивается максимальная напряженность электрического поля. Остается — как единственная — возможность изменения торцевой стенки в крайних периодах резонатора.

На рис. 1б приведен график зависимости плотности изменения частоты от радиуса вдоль торцевой стенки из теоремы возмущений:

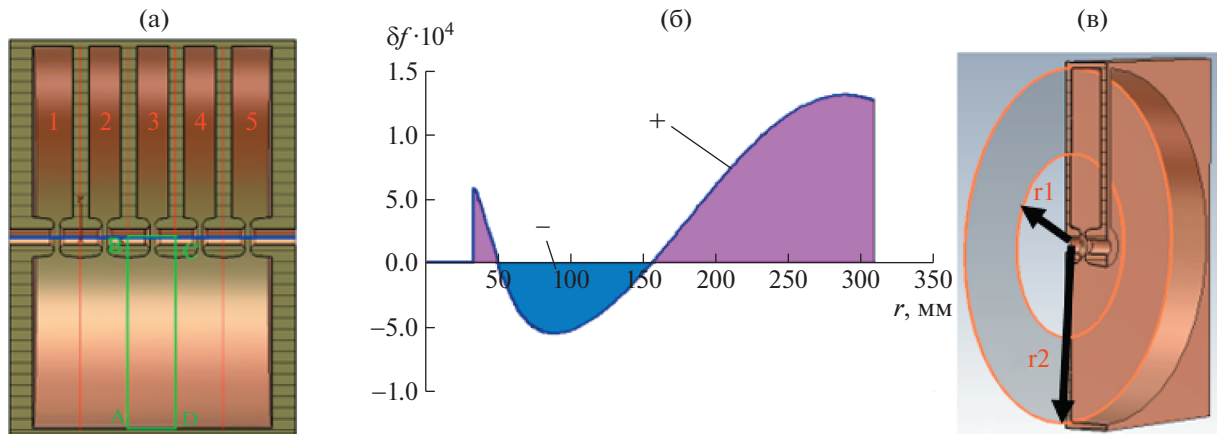


Рис. 1. Регулярный резонатор SDTL: (а) общий вид и контур интегрирования, (б) зависимость плотности изменения частоты от радиуса вдоль торцевой стенки, (в) кольца для подстройки частоты конечных периодов.

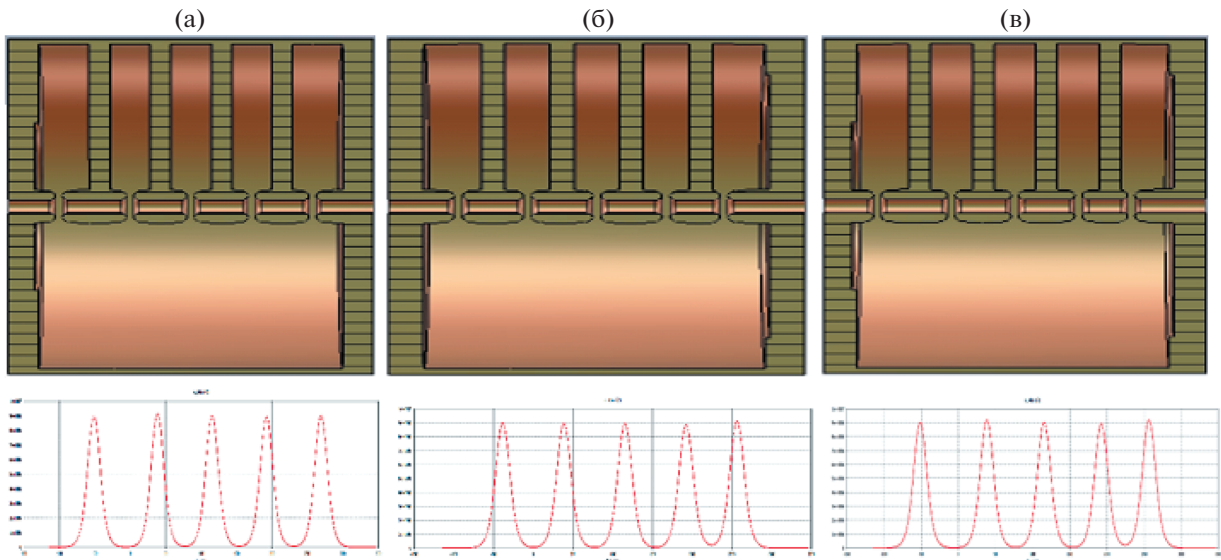


Рис. 2. Резонаторы SDTL с модифицированными конечными периодами и распределение поля E_z в них: (а) входной период, (б) выходной период, (в) одновременно входной и выходной периоды.

$$\frac{\delta f}{\delta V} \sim 2\pi r(\mu_0 H_\phi^2 - \epsilon_0 E_z^2). \quad (2)$$

Синим на рис. 1б отмечена область, в которой смещение стенки внутрь резонатора дает понижение частоты, розовым — область повышения частоты. Из рис. 1б очевидно, что при использовании сплошного диска с внешним диаметром 250 мм и больше [1] есть две части с разнонаправленным действием — часть с $r < 160$ мм понижает частоту а часть с $r > 160$ мм — повышает. Поэтому в дальнейшем для подстройки частоты целесообразно использовать два кольца разнонаправлен-

ного действия с суммарным эффектом, повышающим частоту, как показано на рис. 1в.

3. ПОСТРОЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ РЕЗОНАТОРОВ SDTL

Если регулярные ускоряющие периоды частица проходит в синхронной фазе поля ϕ_s , то группирующий период проходит при фазе -90° , причем длина периода SDTL $D = \beta\lambda$ соответствует 360° . Для формирования первого (входного) периода как группирующего его центр необходимо расположить на расстоянии $\Delta l = \beta\lambda(360^\circ + 90^\circ - |\phi_s|)/360^\circ$ от центра последующего. После подстройки по частоте

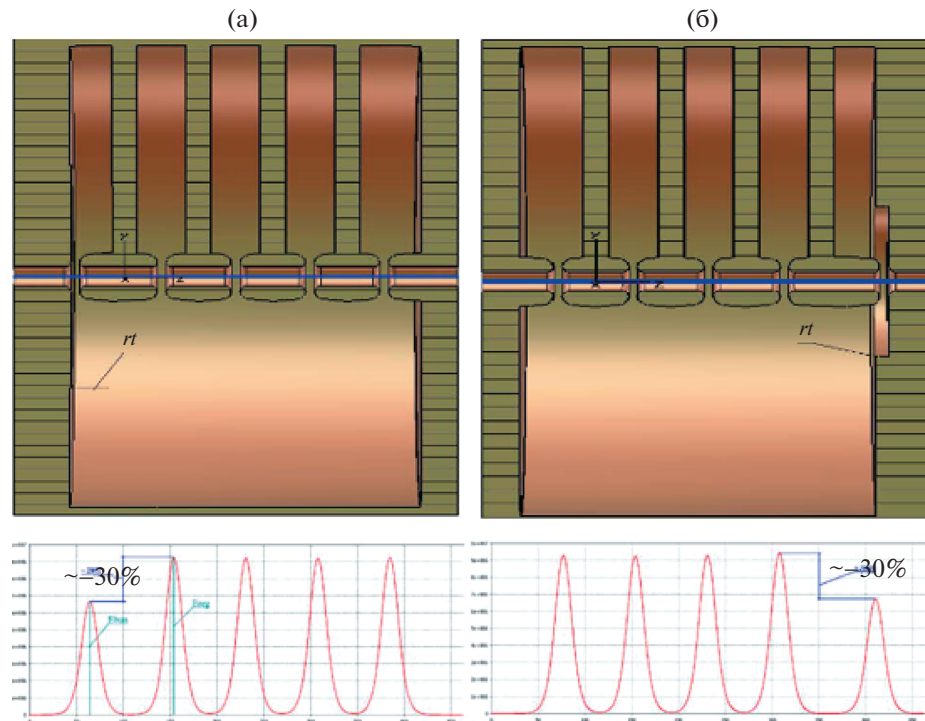


Рис. 3. Регулирование амплитуды поля E_z в модифицированных периодах SCTL: (а) входной период, (б) выходной период.

концевых полу ячеек соблюдается как условие равенства частот периодов, так и равномерность распределения поля на оси резонатора, как показано на рис. 2а.

Для формирования последнего (выходного) периода как группирующего существует только одно геометрически реализуемое решение. Его центр должен находиться соответственно на расстоянии $\Delta l = \beta\lambda(360^\circ - 90^\circ + |\varphi_s|)/360^\circ$ (рис. 2б) от предыдущего.

При соблюдении условий равенства частот периодов и равномерности поля в резонаторе нет ограничения и на изменение геометрии одновременно первого и последнего периодов, рис. 2в.

4. РЕГУЛИРОВАНИЕ АМПЛИТУДЫ ПОЛЯ В МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЗАЗОРАХ

Существенно большую свободу выбора в последующем регулировании динамики частиц может обеспечить свобода в выборе амплитуды поля в модифицированном периоде. Способ повышения амплитуды E_z в модифицированных периодах заключается в увеличении длины входного группирующего периода на $\sim\beta\lambda/6$, (а выходного на $\sim\beta\lambda/3$), длины периодов остаются без изменения. Рост амплитуды E_z при этом составит на 15% для входного зазора и 30% для выходного.

Но больший интерес представляет возможность снижения амплитуды E_z в модифицированных периодах. Для этого, по сравнению с геометриями на рис. 2 стенки резонатора устанавливаются таким образом, чтобы они совпадали (по оси z) с торцами крайних полу трубок. Это показано на рис. 3. Размещение стенки резонатора по торцу крайней полу трубки дрейфа для входного группирующего периода приводит к слабому повышению частоты на $\sim+1.5$ МГц, а для выходного периода — к существенному ~-8 МГц ее понижению. Подстройка такого смещения возможна только радиусом внешнего кольца (рис. 1в). Предложенная методика регулировки амплитуды поля позволяет снизить амплитуду поля в модифицированных периодах на величину до 30% (см. рис. 3). Более глубокая регулировка поля как во входном, так и выходном периоде возможна, но требует более существенного изменения их геометрии.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для резонаторов, работающих на колебании TM_{010} , разработана методика формирования как входного, так и выходного периодов, для придания им функции группирования пучка.

Настройка с помощью торцевых стенок позволяет полностью компенсировать смещение частоты рабочей моды и амплитуды поля в модифи-

цированных периодах без нарушения характеристик регулярных периодов резонатора.

Определены границы регулировки амплитуды поля в модифицированных периодах.

Возможность реализации резонаторов SDTL с группирующими зазорами дает дополнительную

свободу при построении ускоряющее-фокусирующего канала ускорителя на участке низких энергий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kamo T.* KEK Report No. 92-10. 1992.
2. *Wang S., Kato T., Paramonov V.* // Proc. Conf. LINAC-2004. 2004. P. 489.

Formation of SDTL Structure Cavity with Special Sections

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

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

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

Received June 11, 2023; revised June 15, 2023; accepted June 19, 2023

Abstract—Ускоряющая структура SDTL (Separated Drift Tube Linac), работающая на колебании TM₀₁₀, не содержит фокусирующих элементов в трубках дрейфа. Применение SDTL на частотах порядка 300 МГц для ускорения ионов водорода на низких, порядка единиц МэВ, энергиях затруднено существенным расплыванием сгустков в меж резонаторных промежутках. Предложена методика формирования геометрии резонаторов SDTL, в которых частицы проходят один или два периода в фазе — 90°. Определены границы регулировки величины поля в группирующих периодах. Приводятся примеры резонаторов.

Keywords: accelerator, accelerating structure, grouper