

Бипериодическая ускоряющая структура с внутренними ячейками связи с повышенным коэффициентом связи

© Е.А. Савин, Н.П. Собенин

Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,
115409 Москва, Россия
e-mail: es-abyss@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 21 мая 2012 г.)

Приведены результаты исследования по повышению коэффициента связи бипериодической ускоряющей структуры при сохранении высокого значения эффективного шунтового сопротивления и других электродинамических характеристик.

Введение

При создании линейных ускорителей электронов (ЛУЭ) на стоячей волне прикладного назначения наибольшее распространение получили бипериодические ускоряющие структуры (БУС) с внутренними ячейками связи [1]. Основным преимуществом ЛУЭ на стоячей волне в БУС перед ЛУЭ на бегущей волне является возможность значительного сокращения длины ускоряющей структуры для получения нужного прироста энергии при одной и той же заданной мощности СВЧ-источника. Поэтому очевидно, что такая структура должна иметь прежде всего большое значение эффективного шунтового сопротивления. Из других электродинамических характеристик БУС важным являются коэффициент связи между ячейками, добротность, групповая скорость, максимальные значения электрического и магнитного полей на поверхности структуры, коэффициент перенапряженности электрического поля, времяпролетный фактор. Ускорители с большим коэффициентом связи имеют лучшую стабильность к изменению параметров ускоренного пучка, менее жесткие допуски на изготовление ускоряющей структуры, лучшую стабильность работы СВЧ-генератора. В настоящей работе представлены результаты исследований по оптимизации геометрии БУС с внутренними ячейками связи в отношении повышения коэффициента связи до 15% при несущественном изменении погонного эффективного шунтового сопротивления и других электродинамических характеристик.

1. Электродинамические характеристики БУС и модель расчета

Для характеристики эффективности ускоряющих резонаторов при небольшом токе пучка вводится понятие погонного эффективного шунтового сопротивления

$$r_{sh.ef} = \frac{\int_0^l |E_z(z) \exp(ik_z z)|^2 dz}{P_{loss} l}, \quad (1)$$

где $E_z(z)$ — комплексная амплитуда ускоряющего поля, l — длина структуры, P_{loss} — потери мощности, k_z — продольное волновое число.

Важной электродинамической характеристикой для резонаторов является добротность

$$Q = 2\pi \frac{W_{stor}}{(W_{scat.res})_{T_0}} = \omega_0 \frac{W_{stor}}{P_{scat.res}}, \quad (2)$$

где W_{stor} — энергия, запасенная в магнитном и электрическом полях резонатора; $(W_{scat.res})_{T_0} = P_{scat.res} T_0$ — энергия, рассеиваемая в резонаторе за период колебаний, а $P_{scat.res}$ — мощность, рассеиваемая в активном сопротивлении при резонансе.

Отметим также коэффициент связи структуры, определяемый через частоты видов колебаний π , $\pi/2$ и 0:

$$K = \frac{|f_\pi - f_0|}{f_{\pi/2}}. \quad (3)$$

Для получения большого коэффициента связи БУС необходимо, чтобы угол раствора щелей, через которые осуществляется связь по магнитному полю, был максимально возможным. Однако надо избегать перекрытия щелей в диафрагмах ячейки связи, чтобы минимизировать связь соседних ускоряющих ячеек. Кроме того, края

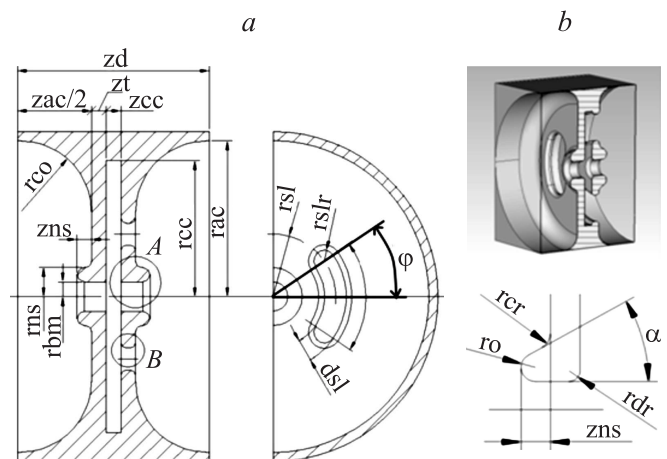


Рис. 1. Геометрические размеры структуры.

щелей связи должны быть максимально приближены к обечайке ячейки связи, где магнитное поле максимально. Оболочка модели — медь.

Рассчитываемая модель состоит из двух ускоряющих полуячеек и одной ячейки связи. На рис. 1 изображена модель с обозначением всех размеров.

Для каждого варианта геометрии БУС проводилась настройка на частоту вида колебаний $\pi/2$ на рабочей частоте как ускоряющей ячейки, так и ячейки связи. Для этого в первом случае использовались электрические стенки на торцах резонансного макета. Изменяли радиусы обечайки ускоряющих полуячеек гас до получения вида колебаний $\pi/2$ на рабочей частоте. Затем использовали магнитные стенки, и настройка ячейки связи осуществлялась изменением радиуса ее обечайки гсс. Для проверки правильности настройки резонансного макета рассчитывалась продольная составляющая электрического поля на оси структуры с электрическими стенками на торцах. В настроенной структуре поле в ячейке связи должно быть равно нулю. На рис. 2 изображены топография силовых линий электрического поля и распределение модуля продольной составляющей электрического поля на оси настроенного резонансного макета.

При проведении исследований по повышению коэффициента связи БУС с внутренними ячейками связи была использована геометрия дуального ЛУЭ [2]. Ускоряющая структура этого ЛУЭ рассчитана на частоту 2856 МГц. Для этого ускорителя удалось поднять коэффициент связи регулярной секции (с фазовой скоростью волны, равной 0.999 скорости света) до 10.3% с обычно используемых значений 5% [1]. Все геометрические размеры этой БУС приведены в табл. 1, а ее ЭДХ — в табл. 2. Так, в таблице указаны значения частот вида колебаний $\pi/2$ при настройке ускоряющей ячейки f_a и ячейки связи f_c . Приведено погонное значение эффективного шунтового сопротивления $r_{sh.ef.}$, коэффициент связи K , добротность Q . Зная коэффициент пролетного времени T , можно по формуле (1) найти шунтовое сопротивление. Через E_c/E_a обозначено отношение напряженностей поля в ячейке связи к напряженности поля в соседних

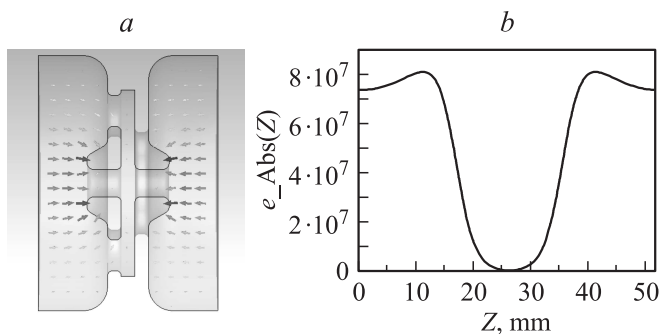


Рис. 2. Топография силовых линий электрического поля (а) и распределение модуля продольной составляющей электрического поля на оси настроенного резонансного макета (b).

Таблица 1. Геометрические размеры

zd	zac	rac	zns	rco	α , deg	ro	rbm	rns	zt
52.40	40.40	40.28	4.00	13.50	30.00	2.00	4.00	8.00	4.00
rsl	φ^{o*} , deg	wsl/2	dsl	rslr	rclsr	zcc	rcc	rcr	rdr
19.00	25.5	16.91	12.00	6.00	1.50	4.00	31.31	2.2	1.5

ускоряющих ячейках. Коэффициент перенапряженности поля представлен как отношение максимальной напряженности электрического поля на поверхности ячейки к напряженности ускоряющего поля E_{max}/E_{acc} . Приведено и максимальное значение напряженности магнитного поля на поверхности ячейки H_{max} .

В приведенных ниже результатах исследований оставались неизменными радиус отверстия в диафрагме rbm, период структуры zd, толщина диафрагмы zt, длина ячейки связи zcc. Исследовалась зависимость ЭДХ от таких размеров, как положение средней линии щели связи rsl, ширина щели связи dsl, радиус скругления обечайки ускоряющей ячейки rco.

2. Варианты повышения коэффициента связи

2.1. Изменение радиуса скругления обечайки ускоряющей ячейки

При увеличении радиуса скругления обечайки ускоряющей ячейки (rco) увеличиваются шунтовое сопротивление и добротность структуры. Однако щели в диафрагмах теперь не будут находиться в области максимального магнитного поля как в ускоряющих ячейках, так и в ячейках связи, и коэффициент связи будет естественно уменьшаться. С целью выбора оптимального значения радиуса скругления обечайки проведено исследование характера изменения основных ЭДХ (погонного эффективного шунтового сопротивления, коэффициента связи и добротности) от этого параметра (выбраны значения 7.10 и 13 mm) для следующих вариантов расположения и размеров щелей связи: вариант 1 (рис. 3, а). Постоянное значение положения щели связи (rsl=19.32 mm), ее ширина (dsl=12 mm) и раствор ($\varphi = 26^\circ$). Вариант 2 (рис. 3, б). Ширина (dsl=12 mm) и раствор ($\varphi = 26^\circ$) неизменны, а положение каждой из этих щелей связи изменялось так, чтобы ее верхняя кромка совпадала с началом скругления обечайки.

Для каждого из этих вариантов проводилась настройка на частоту 2856 МГц как ускоряющих ячеек, так и ячеек связи. На рис. 4, а приведены соответствующие зависимости погонного эффективного шунтового сопротивления, $r_{sh.ef.}$ (штриховые линии), коэффициента связи K (сплошные линии), а на рис. 4, б — добротности Q (сплошные линии) и параметра и $r_{sh.ef.}/Q$

Таблица 2. Электродинамические характеристики

$f_{\pi/2}$, MHz	f_{couple} , MHz	k , %	$r_{sh.ef.}$, MOhm/m	T	Q	$r_{sh.ef.}/Q$, Ohm/m	E_{acc} , MV/m	E_{max}/E_{acc}	H_{max} , MA/m
2856.1	2856.1	10.1	82.55	0.81	16129	5118	51.4	3.55	0.27

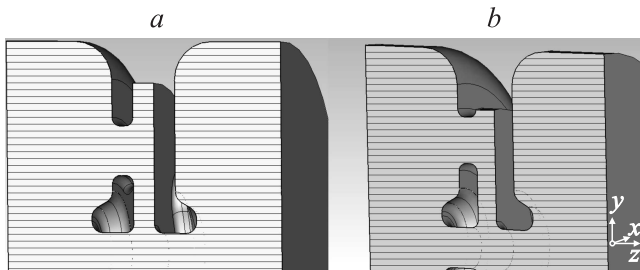


Рис. 3. Геометрия структуры: варианты 1 (a) и 2 (b).

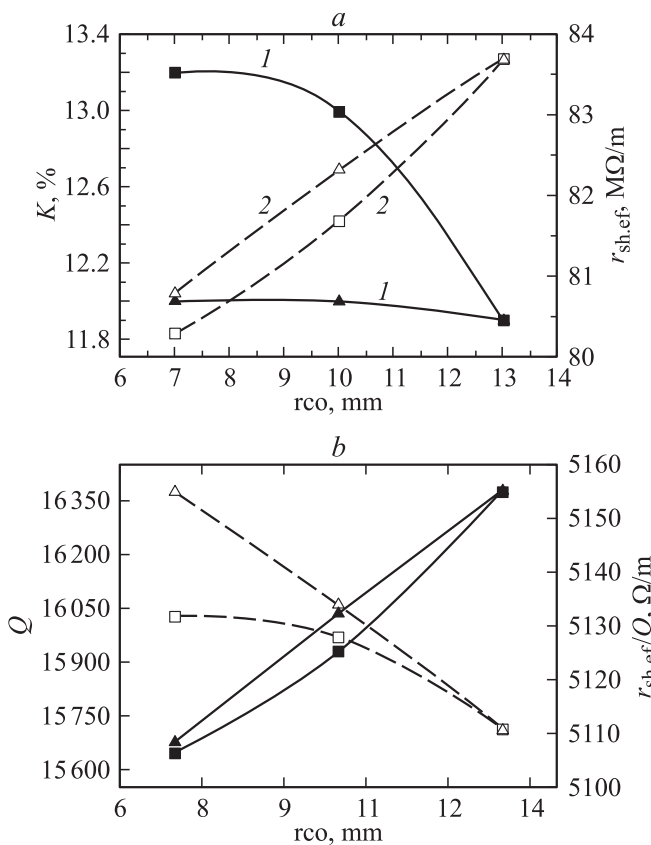


Рис. 4. Зависимости $r_{sh.ef.}$, K , Q и $r_{sh.ef.}/Q$ от r_{co} для двух вариантов (1 — r_{sl} меняется, 2 — r_{sl} неизменно).

(штриховые линии). Очевидно, что для варианта 2, когда щель связи находится в области с большим магнитным полем, наблюдается в сравнении с вариантом 1 увеличение коэффициента связи до 10% при несущественном уменьшении погонного эффективного шунтового сопротивления и добротности (менее 0.6%). Значение

коэффициента перенапряженности электрического поля E_{max}/E_{acc} изменяется от 3.2 до 3.6.

2.2. Изменение ширины щели связи

Рассмотрим теперь влияние изменения ширины щели связи на ЭДХ. При увеличении ширины щели связи d_{sl} (от 9 до 13 mm) приходится уменьшать раствор щели связи φ (от 30 до 25°), чтобы не было перекрытия щелей, повернутых на 90° в соседних диафрагмах. Так же приходилось уменьшать положение центра щели связи r_{sl} (от 21.4 до 19.82 mm), чтобы кромка щели оставалась на скруглении обечайки ячейки. На рис. 5, a приведены зависимости $z_{sh.ef.}$ (штриховая линия), K — сплошная линия, а на рис. 5, b — Q (сплошная линия) и $r_{sh.ef.}/Q$ (штриховая линия) от параметров d_{sl} и φ . Коэффициент перенапряженности поля не превышает 3.4.

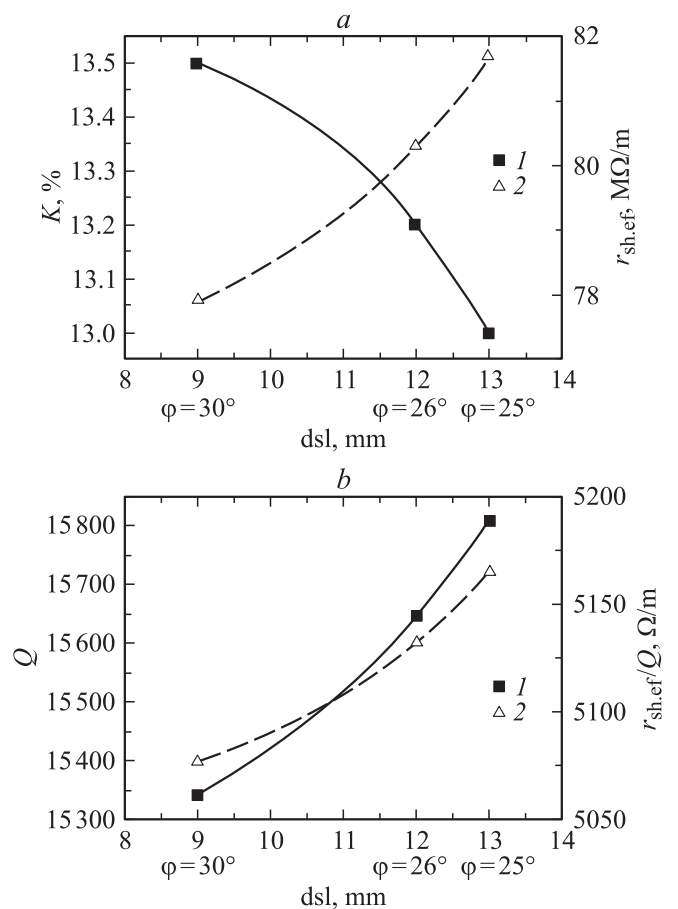


Рис. 5. Зависимости $r_{sh.ef.}$, K , Q и $r_{sh.ef.}/Q$ от параметров d_{sl} и φ .

2.3. Расширение ячейки связи в дрейфовой трубке

В месте соединения ячейки связи и пролетного канала делалось расширение z_{cc} на величину t (рис. 6). При этом размер $z_{ac}/2-z_{ns}$ уменьшался на такую же величину t . Размер R_c выбирался таким образом, чтобы при настройке ячейки связи верхняя кромка щели связи прилегла к обечайке, где магнитное поле достигает максимального значения.

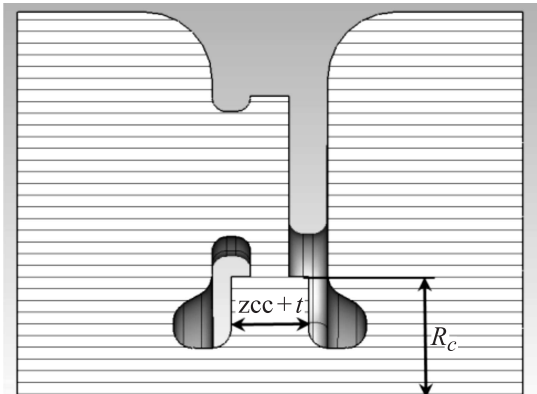


Рис. 6. Измененная ячейка связи.

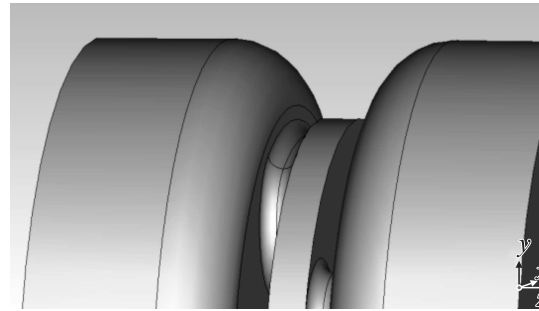


Рис. 8. Положение щелей связи.

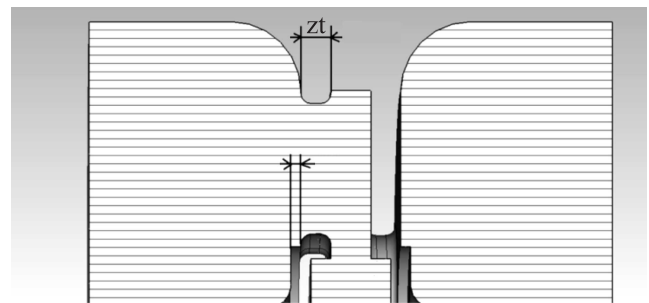


Рис. 9. Форма выточки.

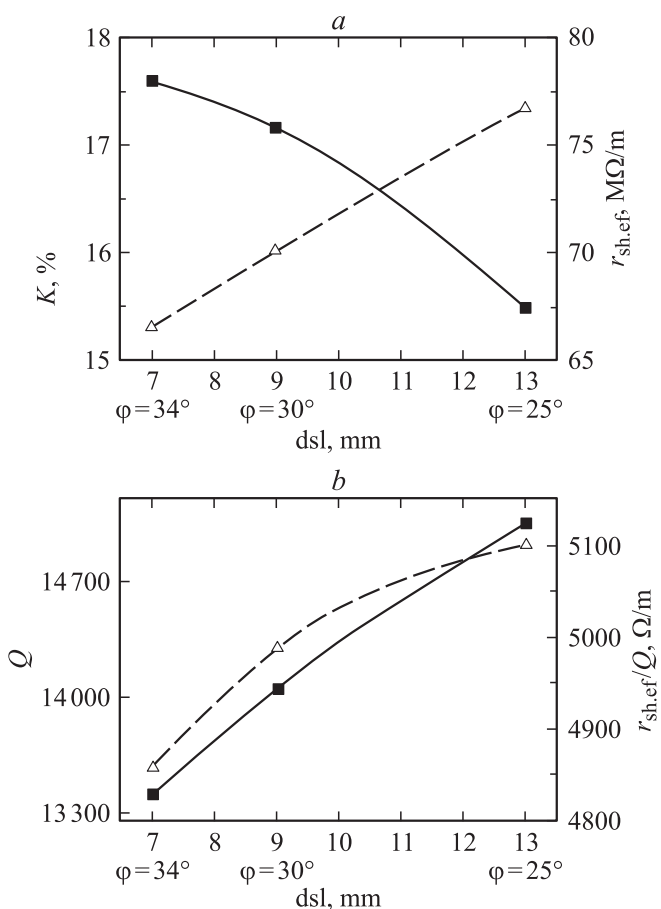


Рис. 7. Зависимости $r_{sh.ef.}$, K , Q и $r_{sh.ef./Q}$ от параметров dsl для конфигурации ячейки связи типа рис. 6.

Для такой конфигурации ячейки связи проводилось исследование зависимости ЭДХ от ширины щели магнитной связи dsl . При увеличении dsl (от 7 до 13 mm) приходилось уменьшать раствор щели связи φ (от 35° до 25°), чтобы избежать перекрытий щелей в соседних диафрагмах, а также уменьшать радиус положения центра щели связи (от 25.25 до 23.22 mm), чтобы кромка щели связи оставалась на скруглении обечайки.

На рис. 7, а приведены зависимости $r_{sh.ef.}$ (штриховая линия), K (сплошная линия), а на рис. 7, б — Q (сплошная линия) и $r_{sh.ef./Q}$ (штриховая линия) от размера dsl . Зависимости приведены для $r_{co} = 7$ mm, $t = 4$ mm. Как видно из рис. 7, а, коэффициент связи может достигать 17.5%, что на 35% превышает значение, приведенное в табл. 1. Величина погонного шунтового сопротивления уменьшается на 15%.

Видоизменением варианта с расширением ячейки связи в дрейфовой трубке является конструкция, в которой увеличена связь по магнитному полю за счет уменьшения толщины диафрагмы zt в месте расположения щелей связи. Размер R_c выбирался таким образом, чтобы щель связи находилась максимально близко к обечайке ускоряющей ячейки (рис. 8) (полного соприкосновения достичь невозможно).

Для такой конструкции с размерами $dsl = 13$ mm, $t = 3.8$ mm, $r_{co} = 7$ mm, $\varphi = 25^\circ$, $z_t = 2$ mm ($r_{cslr} = 1$ mm) при значении $R_c = 11.98$ cm получен коэффициент связи $K = 15.87\%$ при $r_{sh.ef.} = 80.8$ MΩm/m, $Q = 16090$, $E_{max}/E_{acc} = 3.2$.

Если в рассмотренной конструкции сделать еще выточку в диафрагме со стороны ускоряющей ячейки в

месте расположения щели связи (рис. 9), то коэффициент связи можно увеличить до 19% при уменьшении погонного эффективного шунтового сопротивления до 76 МΩ/м и $Q = 14100$.

2.4. Изменение размеров носика дрейфовой трубки

На рис. 10, *a, b* изображено изменение основных ЭДХ при изменении протяженности носика дрейфовой трубки *zns* (см. рис. 1): погонного эффективного шунтового сопротивления, $r_{sh.ef}$ (пунктирная линия), коэффициента связи K (сплошная линия), добротности Q (сплошная линия), параметра $r_{sh.ef}/Q$ (пунктирная линия). Зависимости получены при неизменных размерах $dsl = 9\text{ mm}$, $\varphi = 30^\circ$, 21.04 mm , $r_{co} = 7\text{ mm}$. С ростом *zns* коэффициент связи увеличивается, так как связь по электрическому полю уменьшается. Значение погонного эффективного сопротивления имеет оптимум при значении $zns = 5.8\text{ mm}$. Коэффициент перенапряженности поля с ростом *zns* в указанном интервале увеличивается от 3.4 до 4.5.

На рис. 11, *a, b* изображено изменение основных ЭДХ при изменении угла наклона носика дрейфовой трубки α (см. рис. 1): погонного эффективного шунтового сопротивления, $r_{sh.ef}$ (штриховые линии), коэффициента связи K (сплошная линия), добротности Q (сплошная

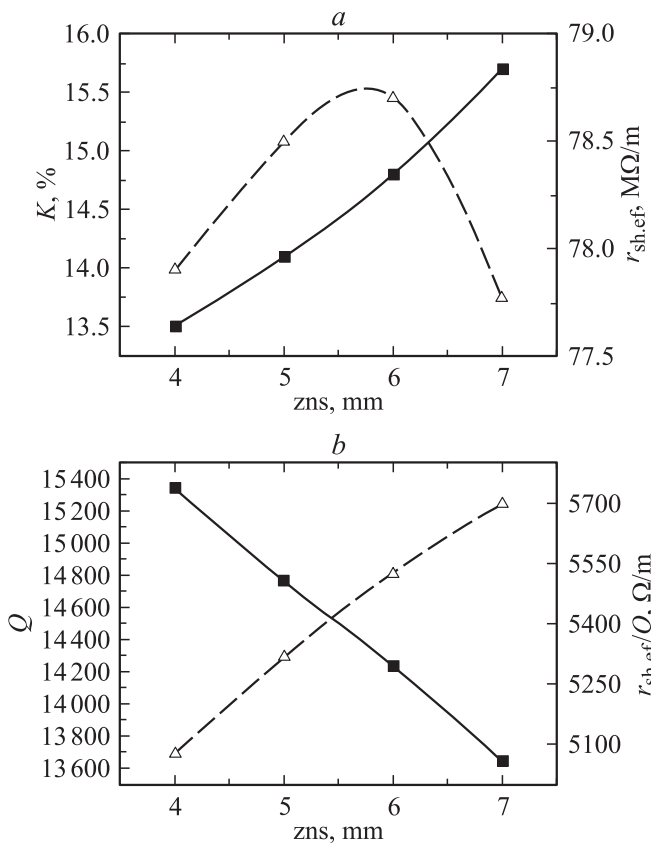


Рис. 10. Зависимости $r_{sh.ef}$, K , Q и $r_{sh.ef}/Q$ от протяженности носика дрейфовой трубки *zns*.

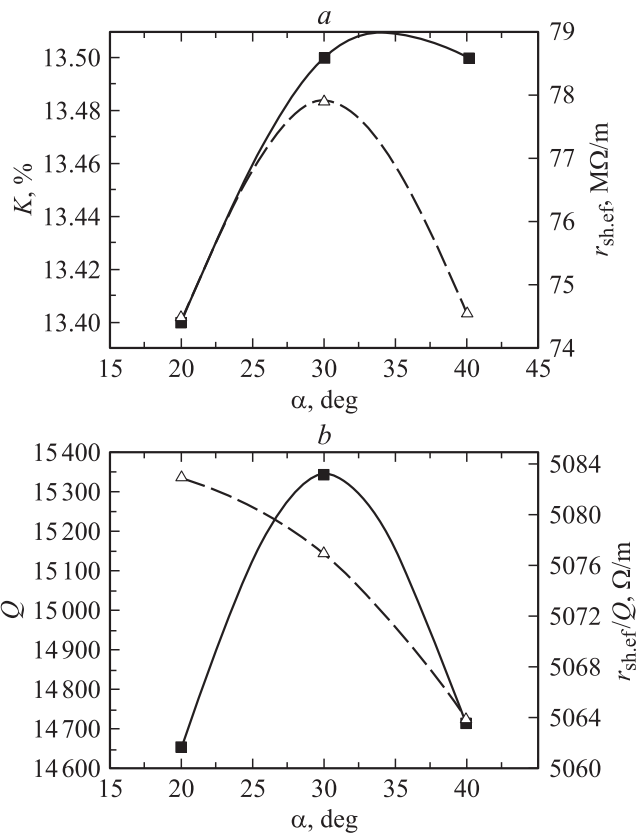


Рис. 11. Зависимости $r_{sh.ef}$, K , Q и $r_{sh.ef}/Q$ от угла наклона носика дрейфовой трубки α .

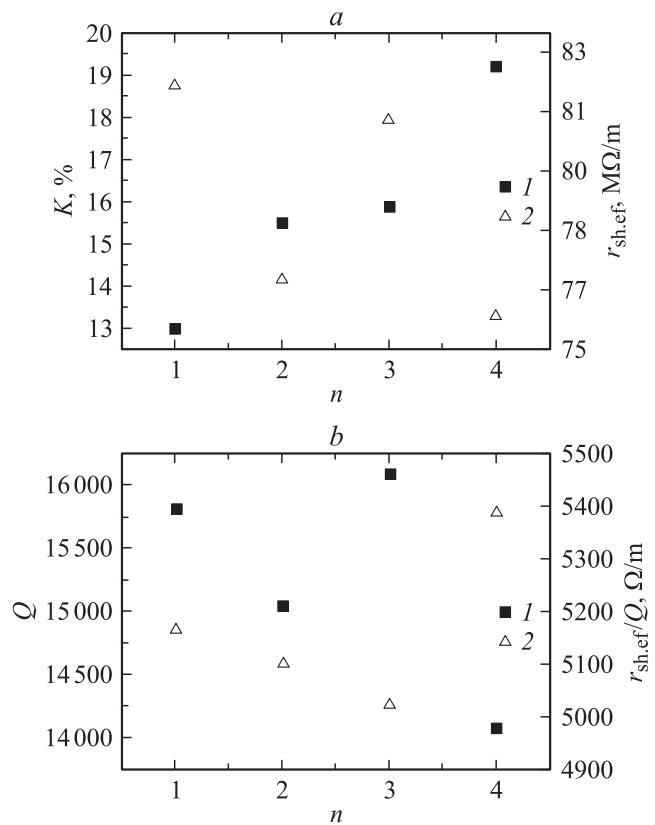


Рис. 12. Параметры $r_{sh.ef}$, K , Q и $r_{sh.ef}/Q$ для разных структур.

Таблица 3. Сравнение результатов

№	1	2	3	4
dsl,mm	13	13	13	13
$\varphi, ^\circ$	25	25	25	25
rac,mm	38.87	38.48	38.92	37.45
rco,mm	7	7	7	7
rsl,mm	19.82	23.22	21.63	22.65
rcc,mm	28	31.4	29.28	30.2
t, mm	—	4	3.8	4
zt,mm	4	4	2	2
R_c, mm	—	14.5	11.98	14.52
$f_{\pi/2}, \text{MHz}$	2856.01	2855.99	2856.01	2855.94
$f_{\text{couple}}, \text{MHz}$	2855.96	2856	2856.01	2855.94
$K, \%$	13	15.5	15.87	19.2
$ \beta_{\text{gr}} , \%$	19.5	22.4	22.5	26.9
$r_{\text{sh.ef.}}, \text{MOhm/m}$	81.67	76.77	80.8	75.84
T	0.81	0.81	0.77	0.81
Q	15811	15049	16088	14075
$r_{\text{sh.ef.}}/Q, \text{Ohm/m}$	5165	5101	5022	5388
$E_{\text{acc}}, \text{MV/m}$	51.3	50.1	53.3	52.9
$E_{\text{max}}/E_{\text{acc}}$	3.21	3.46	3.2	4.14
$H_{\text{max}}, \text{MA/m}$	0.256	0.332	0.347	0.44

линия) и параметра $r_{\text{sh.ef.}}/Q$ (штриховая линия). Зависимости получены при неизменных размерах $dsl = 9 \text{ mm}$, $zns = 4 \text{ mm}$, $rsl = 21.04 \text{ mm}$, $rco = 7 \text{ mm}$.

Заключение

В табл. 3 и на рис. 12 приведены результаты расчета для четырех предпочтительных вариантов рассмотренных структур:

1. Структура, изображенная на рис. 1.
2. Структура с расширением ячейки связи в дрейфовой трубке (рис. 6).
3. Структура с расширением ячейки связи в дрейфовой трубке и уменьшением длины щели связи путем расширения ускоряющей ячейки.
4. Структура с расширением ячейки связи в дрейфовой трубке и уменьшением длины щели связи при помощи выточки в ускоряющей ячейке в месте соприкосновения с щелью магнитной связи (рис. 8).

Список литературы

- [1] Вальдер О.А., Собенин Н.П., Зверев Б.В., Щедрин И.С. Диафрагмированные волноводы. Справочник. Энергоатомиздат, 1991.
- [2] Завадцев А.А., Завадцев Д.А., Собенин Н.П., Краснов А.А., Куцаев С.В. // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 2. С. 1–9.