

УДК 537.312

## ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ КРУГЛЫМ СВЕРХПРОВОДЯЩИМ ВОЛНОВОДОМ

ГАШИМОВ А.М., ГУМБАТОВ С.Г., АХМЕТ НАИР

*Институт Физики НАН Азербайджана*

Рассматриваются возможности применения круглых волноводов, изготовленных из высокотемпературных сверхпроводников, для передачи СВЧ электромагнитной энергии на большие расстояния.

### 1. Введение

Открытие высокотемпературных сверхпроводников [1] и успехи в этой области (например, [2,3,4]) сделало возможным использование таких материалов в изготовлении сверхпроводящих волноводов для передачи СВЧ - энергии на большие расстояния.

В [5] подчеркнуты основные технические преимущества передачи энергии по волноводам. Известно, что современные линии передач переменного и постоянного токов имеют ряд недостатков, вызванных открытым выполнением этих линий. Такие линии подвержены действию грозových разрядов, в них могут возникать перенапряжения, коронные разряды и т.д. Подобные явления не происходят при передаче энергии по волноводам, так как волновод может быть расположен в земле. Волноводная линия при прочих равных условиях дешевле кабельной, поскольку в волноводе отсутствует второй провод и не требуется дорогостоящей изоляции. По эти же причинам потери энергии в волноводе меньше, чем в кабеле. Экономичность такого метода передачи зависит от мощных СВЧ – генераторов с высоким коэффициентом преобразования постоянных токов в токи высокой частоты и от устройства для обратного преобразования СВЧ – энергии в постоянный ток.

Данная работа посвящена рассмотрению перспектив использования высокотемпературных сверхпроводников для передачи СВЧ – энергии на большие расстояния.

### 2. Поведение сверхпроводников в СВЧ – поле

В случае, когда  $T=0$ , в сверхпроводнике нет квазичастиц, которые могли бы поглощать кванты любой энергии. Поглощение электромагнитных волн начинается лишь тогда, когда

$$\hbar\omega_{кр}=2\Delta(0) \quad (1)$$

где  $\omega_{кр}$  - критическая угловая частота,  $2\Delta(0)$  – ширина энергетической щели сверхпроводника при  $T=0$ ,  $\hbar=1,054 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка. Эта энергия, нужная для разрушения сверхпроводящей (куперовской) пары. В пределе, когда  $\hbar\omega \gg 2\Delta(0)$ , разница между сверхпроводником и нормальным металлом пропадает, т.е. связь между током и полем стремится к той, что имеет место в нормальном металле. При низких температурах  $\hbar\omega_{кр}=2\Delta=3,52 K_B T_{кр}$ . Если учесть, что  $\omega_{кр}=2\pi f_{кр}$ , то:

$$f_{кр}=3,52 K_B T_{кр}/2\pi\hbar \quad (2)$$

где  $K_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана,  $f_{кр}$  – критическая частота,  $T_{кр}$  – критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние. Из формулы (2) следует, что если  $T_{кр} = 1\text{К}$ , то  $f_{кр} \approx 73,4$  ГГц. Если предположить, что формула (2) также применима и для высоких критических температур, то у высокотемпературных сверхпроводников  $f_{кр}$  достигнет нескольких тысяч ГГц. Поскольку энергия электромагнитной волны с частотами  $f \ll f_{кр}$  не сможет разрушить сверхпроводимость сверхпроводника, то из формулы (2) следует, что в СВЧ области (0,1-100 см или  $3 \cdot 10^{11}$ - $3 \cdot 10^8$  Гц) высокотемпературные сверхпроводники будут сохранять своё сверхпроводящее свойство.

К настоящему времени на основе теоретических и экспериментальных исследований составлено достаточно полное представление о поведении сверхпроводников на СВЧ. Поверхностный импеданс сверхпроводников  $Z_s(\omega)$  выражается как:

$$Z_s(\omega) = R + iX \quad (3)$$

где  $R$  – действительная часть поверхностного импеданса, обычно называемого поверхностным сопротивлением,  $X$  – мнимая часть. Величины  $R$  и  $X$  могут быть определены по изменению амплитуды и фазы волны, отражённой от металлической поверхности. Действительная часть определяет потерю энергии электромагнитной волны при отражении, и может быть найдена по выделению тепла в металле при помещении его в высокочастотное поле. Для сверхпроводников поверхностный импеданс мал, что означает малость тангенциальных составляющих электрического поля на границе сверхпроводника

Особенностью сверхпроводников на СВЧ, является то, что переход в сверхпроводящее состояние не резкий. В работе [6] изучена зависимость поверхностного сопротивления алюминия от температуры и частоты. Показано, что при  $\omega = 0$  и  $T \rightarrow 0$  в сверхпроводящем состоянии сопротивление почти полностью исчезает. Однако, на сверхвысоких частотах поверхностное сопротивление будет отличаться от нуля даже при  $T=0$ , оно быстро увеличивается с ростом частоты. Сильное увеличение поверхностного сопротивления с ростом частоты объясняется тем, что вследствие скин-эффекта электрический ток при больших частотах течет преимущественно сквозь поверхностный слой проводника. Это приводит к уменьшению действующего сечения проводника и, как следствие, к увеличению сопротивления проводника. При сверхвысоких частотах ток практически существует только в тонком поверхностном слое.

### 3. Распространение СВЧ электромагнитных волн в круглом сверхпроводящем волноводе

Волновод представляет собой металлическую трубу прямоугольного или круглого сечения, в полости которой происходит распространение электромагнитной волны, и является направляющей системой. В волноводах возможно распространение лишь направленных волн, имеющих составляющие поля в направлении распространения, т.е. поперечно электрических (Н волн), поперечно магнитных (Е волн) и других волн более сложных типов. Длины волн должны быть короче критических, определяемых размерами волновода.

При сверхвысоких частотах (выше 1 ГГц) передача энергии направленными волнами в волноводах становится более экономичной и технически целесообразной, чем по линиям. Подобно направленным волнам в линиях, волны в волноводах могут рассматриваться как результат наложения двух или более плоских волн, распространяющихся зигзагообразным путём под углом к стенкам и испытывающих многократные отражения от последних. При распространении волны вдоль волновода

возникает потеря энергии в проводящих стенках волновода и заполняющем его диэлектрике. Эти потери вызывают затухание волны.

Рассмотрим более подробно вопрос о затухании волн при их распространении вдоль волноводов и выборе оптимальных размеров волноводов с учётом этого затухания. Как известно, для обычных волноводов затухание из-за конечной величины проводимости стенок определяется с помощью условий Шукина - Леонтовича. Если поток вектора Умова - Пойнтинга вдоль волновода обозначить через  $P_{y-п}$ , а потери в стенках на единицу длины волновода – через  $P_1$ , то коэффициент затухания  $\alpha$  можно записать в следующей форме.

$$\alpha = P_1 / P_{y-п} \quad (4)$$

Наиболее перспективными для передачи электроэнергии на большие расстояния являются круглые волноводы с волной типа  $H_{01}, H_{02}, \dots, H_{0n}$ , так как они имеют самый низкий коэффициент затухания.

Малое затухание волн типа  $H_{0n}$  объясняется следующим образом. При распространении волны  $H_{01}$  на стенках волновода не появляются электрические заряды. Кроме того, у стенок волновода только одно составляющее поля  $H_z$  не равно нулю. Следовательно, распространение волны  $H_{01}$  сопровождается только круговым током в стенках волновода, а продольный ток отсутствует. Сравнительно малые затухания волны  $H_{01}$  при передаче энергии вдоль волновода бегущими волнами обеспечиваются в том случае, если частота  $f$  волны в несколько раз больше критической  $f_{кр}'$ . Для волны  $H_{01}$  в круглом волноводе [7]:

$$f_{кр}' = 0.183/r \quad (5)$$

а соответствующая длина волны  $\lambda_{кр} = 1,64 r$

где  $r$  – радиус волновода. Здесь и далее  $r$  в метрах.

Из формулы (5) видно, что значения  $f_{кр}'$  находятся в интервале **0,16 – 1,64 ГГц** для радиусов **0,1 – 1,0 м**.

Сравнительно малые потери в волноводе также можно обеспечить высокой проводимостью материала его стенок. Сначала рассмотрим круглый волновод со стенкой, покрытой изнутри медью.

Коэффициент затухания волны  $H_{01}$ , для частот  $f \gg f_{кр}'$ , из-за потерь энергии в стенках идеального волновода, покрытых медью [7]:

$$\alpha = 2 \cdot 10^8 / r^3 f^{3/2} \quad (6)$$

Например, в волноводе с радиусом **1 м** на частоте **10 ГГц**  $\alpha = 0,02 \cdot 10^{-5}$  дБ/км.

Из формулы (6) видно, что затухание волны  $H_{01}$  быстро и беспредельно уменьшается с ростом частоты и радиуса волновода. С другой стороны, в больших волноводах на заданной частоте  $f$  ( $f \gg f_{кр}'$ ) могут распространяться и паразитные волны, имеющие значительно большие затухания, чем волна  $H_{01}$ .

Для передачи СВЧ – энергии на значительные расстояния пригодны линии с коэффициентом затухания не более **1 дБ/км**.

Уменьшение амплитуд  $E$  и  $H$ , составляющих поля вдоль волновода, приводит к уменьшению потока мощности по длине в цилиндрическом медном волноводе с радиусом  $r$ , которое происходит следующим образом [4]:

$$P = P_0 \exp(-3.5 \cdot 10^{-6} \lambda^{3/2} \cdot L / r^3) \quad (7)$$

где  $P_0$  – начальная передаваемая мощность,  $\lambda, r$  - в метрах.

КПД такой линии  $\eta$  будет как

$$\eta = P/P_0 = \exp(-3.5 \cdot 10^{-6} \lambda^{3/2} \cdot L/r^3) \quad (8)$$

Максимальная передаваемая мощность на волне  $H_{01}$  может быть записана в виде [8]:

$$P_{\max}(H_{01})(\text{ГВт}) = 4,46(2r)^2/M^2 \quad (9)$$

где  $M$  – коэффициент запаса по предельной напряженности электрического поля. Или по формуле [7]:

$$P_{\max} = 2r^2 E_{\max}^2 \cdot 10^{-3} \quad (10)$$

где  $E_{\max} = E_0/M$  – максимальная напряжённость поля, **кВ/см**,  $E_0$  – предельная (пробивная) напряженность электрического поля. Для волноводов, заполненных обычным воздухом при атмосферном давлении,  $E_0 = 30$  **кВ/см** [9]

Если положить  $r = 1$  м,  $M = 2$ , то передаваемая мощность  $P_{\max} = 4,46$  **ГВт**. КПД линии радиусом **1 м**, длиной **1000 км** будет равняться **98 %**.

В таблицах 1-3 приведены значения  $P_{\max}(H_{01})$ ,  $\eta$  и  $\alpha$ , вычисленные по формулам (9), (8) и (6) для частот  $f$ , равных **5; 10; 20 ГГц**, и  $r = 0,1-1,0$  м.

Таблица 1.

f = 5 ГГц					
R, м	P <sub>max</sub> (H <sub>01</sub> ), ГВт		η, %		10 <sup>3</sup> · α, дБ/км
	M=2	M=1,5	L= 500 км	L= 1000 км	
			0,1	0,17	
0,2	0,40	0,71	0	0	71
0,3	0,71	1,26	0	0	21
0,4	1,12	1,99	0	15	9
0,5	1,61	2,86	2	45	4,5
0,6	2,19	3,9	13	66	2,6
0,7	2,85	5,07	30	79	1,7
0,8	3,61	6,42	47	86	1,1
0,9	4,46	7,93	61	90	0,8
1,0			70	93	0,57

Из таблиц видно, что оптимальный вариант волновода нужно искать в уменьшении радиуса, начиная с  $r = 1,0$  м, и увеличении частоты электромагнитной волны и длины волноводной линии электропередачи, учитывая также экономические соображения.

Таблица 2

f = 10 ГГц					
r, м	P <sub>max</sub> (H <sub>01</sub> ), ГВт		η, %		10 <sup>3</sup> · α, дБ/км
	M=2	M=1,5	L= 500 км	L= 1000 км	
			0,1	0,17	
0,2	0,40	0,71	0	0	25
0,3	0,71	1,26	32	10	7,4
0,4	1,12	1,99	71	51	3,1
0,5	1,61	2,86	87	75	1,6
0,6	2,19	3,9	93	87	0,93
0,7	2,85	5,07	96	91	0,58
0,8	3,61	6,42	97	95	0,39
0,9	4,46	7,93	98	96	0,27
1,0			99	98	0,2

Глубина проникновения электромагнитного поля для меди определяется по формуле:

$$\Delta = 6.6 \cdot 10^{-2} \cdot f^{1/2} \quad (11)$$

На частоте **10 ГГц**  $\Delta \approx 10$  мкм. Следовательно, толщина медного покрытия стенок волновода может быть очень небольшой.

Теперь рассмотрим круглый сверхпроводящий волновод. Новые интересные возможности появляются при использовании таких волноводов для передачи энергии.

Таблица 3

f = 20 ГГц					
R, м	P <sub>max</sub> (H <sub>01</sub> ), ГВт		η, %		10 <sup>3</sup> · α, дБ/км
	M=2	M=1,5	L= 500 км	L= 1000 км	
0,1	0,05	0,1	4	0,16	70
0,2	0,17	0,32	67	45	8,75
0,3	0,40	0,71	89	79	2,59
0,4	0,71	1,26	95	90,4	1,1
0,5	1,12	1,99	97,5	95	0,56
0,6	1,61	2,86	98,5	97	0,32
0,7	2,19	3,9	99,1	98,1	0,2
0,8	2,85	5,07	99,4	98,8	0,14
0,9	3,61	6,42	99,6	99,1	0,096
1,0	4,46	7,93	99,7	99,4	0,07

В связи с тем, что потери в нём будут малы, КПД волноводных линий без учёта потерь на охлаждение будет достигать почти **100%**. Коэффициент затухания и КПД для волноводов, изготовленных из высокотемпературных сверхпроводников, определяется следующим образом [4]

$$\alpha_s(H_{01}) = (R_s / (r \cdot Z_0)) \cdot (\lambda / \lambda_{кр})^2 / [1 - (\lambda / \lambda_{кр})^2]^{1/2} \quad (12)$$

$$\eta_s = \exp \left\{ - [2R_s (\nu) / (r \cdot Z_0)] / [1 / \nu \cdot (\nu^2 - 1)^{1/2}] \right\} \quad (13)$$

Здесь  $R_s$  - поверхностное сопротивление высокотемпературного сверхпроводника,  $Z_0$  – импеданс свободного пространства,  $\nu = f / f_{кр}$ .

В таблицах 4 и 5 приведены значения коэффициента затухания и КПД, вычисленные по формулам (12) и (13) для круглого волновода, изготовленного из высокотемпературного сверхпроводника  $Y_1Ba_2Cu_3O_7$ . Значения  $R_s$  для  $Y_1Ba_2Cu_3O_7$  при температуре  $T = 77$  К в указанных частотах были взяты из работы [4], где приведена частотная зависимость поверхностного сопротивления  $Y_1Ba_2Cu_3O_7$ .

Таблица 4

r, м	$\lambda_{кр}, м$	f = 1 ГГц, $\lambda=0,3$ м, $R_s=7 \cdot 10^{-6}$ Ом			f = 5 ГГц, $\lambda=0,06$ м, $R_s=8,75 \cdot 10^{-5}$ Ом		
		$10^5 \cdot \alpha_s(H_{01}),$ дБ/км	η, %		$10^5 \cdot \alpha_s(H_{01}),$ дБ/км	η, %	
			L= 500 км	L= 1000 км		L= 500 км	L= 1000 км
0,1	0,16		99,5	99	348	9,8	1
0,2	0,33	188	99	97,9	39	31,5	10
0,3	0,49	30	98,3	96,6	11,72	46,3	21,4
0,4	0,66	11	97,3	94,7	4,84	56,3	31,6
0,5	0,82	5,2	95,7	91,6	2,52	63,2	40
0,6	0,98	3	86	74	1,472	68,4	46,8
0,7	1,15	1,94			0,896	72,4	52,4
0,8	1,31	1,18			0,61	75,6	57
0,9	1,48	0,84			0,512	78	61
1,0	1,64	0,56			0,302	80,3	64,4

Из таблиц видно, что только при частотах, близких к критической, КПД волноводной линии приобретает самое большое значение. При слишком больших частотах, когда  $f \gg f_{кр}'$ , КПД линий сильно падает, что связано с большими потерями энергии. Большая потеря энергии объясняется тем, что с увеличением частоты увеличивается поверхностное сопротивление сверхпроводника, которое приводит в конечном итоге к большим омическим потерям энергии.

Таблица 5

r, м	$\lambda_{кр}, м$	f = 10 ГГц, $\lambda=0,03 м, R_s=3,75 \cdot 10^{-4} Ом$			f = 20 ГГц, $\lambda=0,015 м, R_s=1 \cdot 10^{-3} Ом$		
		$10^5 \cdot \alpha_s(H_{01}),$ дБ/км	$\eta_s, \%$		$10^5 \cdot \alpha_s(H_{01}),$ дБ/км	$\eta_s, \%$	
			L= 500 км	L= 1000 км		L= 500 км	L= 1000 км
0,1	0,16	355	0	0	234	0	0
0,2	0,33	42	0,7	0	27,9	0	0
0,3	0,49	12,5	3,6	0,1	8,31	0	0
0,4	0,66	5,23	8,4	0,7	3,45	0,1	0
0,5	0,82	2,67	13,7	1,9	1,78	0,5	0
0,6	0,98	1,56	19,2	3,6	1,03	1,2	0
0,7	1,15	0,967	24,3	6	0,644	2,3	0
0,8	1,31	0,647	29,1	8,5	0,436	3,6	0,1
0,9	1,48	0,442	33,5	11	0,304	5,3	0,2
1,0	1,64	0,333	37,5	14	0,223	7	0,5

#### 4. Перспективы использования высокотемпературных сверхпроводников для передачи СВЧ – энергии

Как отмечалось выше, для снижения потерь энергии при распространении СВЧ электромагнитной волны по волноводам внутренние поверхности стенок должны покрываться тонким слоем хорошо проводящего материала. Для изготовления волноводов с использованием высокотемпературных сверхпроводников необходимо решить вопросы, связанные с технологией [4].

Так как сверхпроводящие плёнки из **Y-Ba-Cu-O** керамики ( $T_{кр} > 90 К$ ) являются хрупкими, то их необходимо наносить на какой либо металл. К сверхпроводящим плёнкам на основе **Y-Ba-Cu-O**, используемым в сверхпроводящих резонаторах, предъявляются жёсткие требования: чистота, однородность, плотность, стабильность, микропрофиль поверхности. Кроме того, для них не должна иметь места десорбция кислорода при нагреве в вакууме. Плёнка не должна иметь дефектов на границах зёрен, необходима хорошая адгезия плёнки к поверхности медной или другой матрицы. Для нанесения качественных покрытий на рабочую поверхность медной оболочки сверхпроводящей СВЧ – структуры необходимо решить задачу обеспечения стабильности плёнки **Y-Ba-Cu-O** толщиной 1-2 мкм. Проблема заключается в оптимальном сопряжении кристаллографической структуры **Y-Ba-Cu-O** и меди.

Вероятность такого сопряжения возрастает, если параметр решетки меди увеличить от 3,61 Å до возможно близкого к параметрам решётки **Y-Ba-Cu-O**, у которой параметры решётки  $a=3,82$  и  $b=3,89$ .

Металлические подложки, на которые наносятся плёнки высокотемпературных сверхпроводников для использования в линиях передачи, должны иметь высокую теплопроводность и температуру плавления, низкое плавление паров при температуре отжига, быть не магнитными, иметь температурные коэффициенты расширения, близкие к высокотемпературным сверхпроводникам.

Плёнки из высокотемпературной керамики с самыми лучшими параметрами можно получить методом аксиального магнетронного распыления, разработанным в институте физики высоких энергий [10].

Плѐнки **Y-Ba-Cu-O** , нанесѐнные на рабочую поверхность гальванической меди с использованием твѐрдого раствора **Al-Cu**, имели лучшую адгезию, меньшую шероховатость поверхности и лучшую равномерность толщины покрытия на поверхностях сложной геометрии.

Как показали исследования, таким методом возможно получить достаточно равномерное покрытие толщиной порядка **1,5 мкм**. При этом поверхностное сопротивление этих плѐнок на частоте **1 ГГц** равно  **$10^{-6}$  Ом** .

### **5. Заключение**

Нам представляется, что полученные в последнее время результаты по высокотемпературной сверхпроводимости на сверхвысоких частотах и эффективные методы генерации СВЧ – колебаний и их преобразование в постоянный ток, вселяет надежду на создание линий передачи электроэнергии по волноводам. Дальнейшие успехи высокотемпературной сверхпроводимости могут создать реальную основу для практического осуществления таких линий передачи. Такие линии могут стать перспективными, если будут созданы материалы, переходящие в сверхпроводящее состояние при значительно более высоких температурах. Получение стабильных высокотемпературных сверхпроводников при комнатной температуре позволит практически реализовать дешѐвые сверхпроводящие СВЧ – линии передачи без криостатов. Сказанное выше позволяет сделать заключение о необходимости глубокого изучения всех проблем, связанных с использованием сверхпроводящих волноводов для передачи энергии.

Выражаем благодарность к.т.н. Мехтизаде Р.Н. и к.ф.-м.н. Курбанову К.Б. за полезные обсуждения.

1. Bednorz J.G., Miller K.A. Z.Phys., 1986, v. B 64, № 2, p. 189-194.
2. Cava R.J. Genie in a bottle // Nature, 2001, № 410, p.23.
3. Namatsu J., Nakagava N., Muzonaka T. et al. // Nature, 2001, № 410, p.63.
4. Диденко А.Н. Известия Академия Наук России, Энергетика, 2001, № 4, стр.3-25
5. Капица П.Л. Электроника больших мощностей. М.: Издательство АН СССР, 1962.
6. Maxwell E. // Progr. in Cryogenics. 1964, v. 4, p. 123.
7. Тиходеев Н.Н. Передача электрической энергии. Л.: Энергоатомиздат, 1984.
8. Диденко А.Н. Сверхпроводящие волноводы и резонаторы. М.: Сов. Радио, 1973.
9. Кухаркин Е.С.; Сестрорецкий Б.В. Электрическая прочность волноводных устройств. М.: Высш. шк. 1963.
10. Севрюкова Л.М. Дис. .... докт. физ.-мат. наук. М.: ИФВЭ, 1996.

### **ELEKTRİK ENERJİSİNİN DAİRƏVİ İFRATKEÇİRİCİ DALĞA DAŞIYICISI İLƏ ÖTÜRÜLMƏSİ**

**HƏŞİMOV A.M., HÜMBƏTOV S.H., AHMET NAYİR**

İfrat Yüksək Tezlikli elektromaqnit enerjisinin uzaq məsafələrə ötürülməsində yüksək temperaturlu ifratkeçiricilərdən hazırlanmış dairəvi dalğa daşıyıcısının tətbiq olunması imkanları araşdırılır

### **TRANSMISSION OF ELECTRICAL ENERGY BY ROUND SUPERCONDUCTING WAVEGUIDE**

**GASHIMOV A.M., GUMBATOV S.G., AHMET NAYİR**

Possibilities of application of round waveguide made from high temperature superconductors for transmission super high frequency electromagnetic energy on large distances are considered.