

А. И. ЛУЧАНИНОВ, канд. техн. наук,
В. М. ШОКАЛО, канд. техн. наук,
А. А. ЩЕРБИНА

ДВУХПОЛУПЕРИОДНЫЕ ПРИЕМНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ РЕКТЕНН

Реализация космических и наземных линий передачи энергии СВЧ лучом предполагает создание простых и технологичных конструкций ректенн, имеющих высокий КПД преобразования энергии СВЧ в энергию постоянного тока η и низкий уровень побоч-

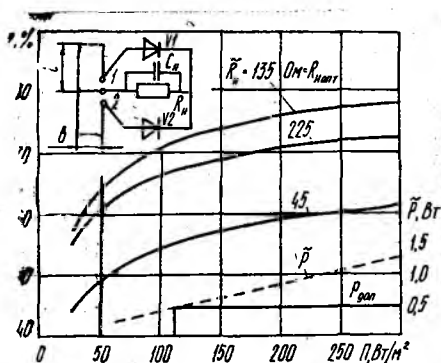


Рис. 1

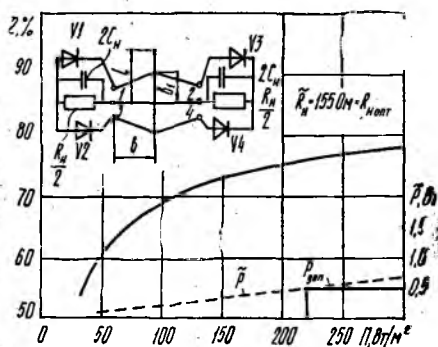


Рис. 2

ного излучения. Ректенны состоят из большого числа приемно-выпрямительных элементов (ПВЭ), объединенных схемой сбора мощности постоянного тока. Каждый из ПВЭ представляет собой излучатель, нагруженный схемой выпрямления на диодах Шоттки. Успех проектирования ректенны с улучшенными параметрами во многом зависит от правильного выбора типа и схемы ПВЭ, надежного выбора параметров этой схемы. Детальному рассмотрению этих вопросов посвящена работа, основное внимание в которой уделено однополупериодным схемам ПВЭ [1]. В последнее время, однако, разработчиков привлекают и двухполупериодные ПВЭ. Эти схемы обеспечивают лучшие возможности работы ректенны при больших уровнях падающей мощности. Привлекает также простота и технологичность двухполупериодных ПВЭ. На базе этих ПВЭ можно выполнить в едином технологическом цикле модули ректенн совместно со схемой сбора мощности постоянного тока.

Исследованы характеристики двухполупериодных ПВЭ. Анализируются два типа подобных ПВЭ, использующих расположенные

над экраном шунтовые или петлевые излучатели. Схемы этих ПВЭ и все необходимые для последующего анализа обозначения приведены в верхней части рис. 1, 2.

Двухполупериодные ПВЭ являются разновидностью многофазных антенн с нелинейными многополюсниками (АНМ), использующих многодиодовые излучатели. Общие подходы к анализу таких антенн изложены в [1]. Используя результаты этой работы, можно получить для комплексного сопротивления излучателя на основной частоте и частотах гармоник $Z(nf_0) = R(nf_0) + jX(nf_0)$ следующие соотношения: на входах петлевого излучателя (точки 1, 2 на рис. 1):

$$Z(nf_0) = Z_{11} + Z_{12}, \quad n = 2, 4, 6, \dots; \quad (1)$$

$$Z(nf_0) = Z_{11} - Z_{12}, \quad n = 1, 3, 5, \dots; \quad (2)$$

на входах шунтового излучателя (точки 1, 3 и 2, 4 на рис. 2)

$$Z(nf_0) = Z_{11} + Z_{13} + Z_{12} + Z_{14}, \quad n = 2, 4, 6, \dots; \quad (3)$$

$$Z(nf_0) = Z_{11} - Z_{13} + Z_{12} - Z_{14}, \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (4)$$

В выражениях (1)–(4) Z_{ik} представляют собой элементы матрицы $[Z]$ собственных и взаимных сопротивлений эквивалентного линейного многополюсника, включающего излучатель и усредненную диффузионную емкость диодов C_d , подключенных ко входам излучателя.

Для выпрямления СВЧ энергии с максимальным КПД необходимо обеспечить такой режим работы ПВЭ, при котором излучатель извлекал бы из падающего поля максимальную мощность $\tilde{P} = e_x^2 / 4R(f_0)$, где e_x — ЭДС холостого хода на входных клеммах излучателя при заданной плотности потока мощности падающего поля Π ; $R(f_0) = \text{Re}[Z(f_0)]$.

Расчет матрицы $[Z]$ и вектора-столбца e_x для петлевого и шунтового излучателей проводился с учетом величины C_d по следующим выражениям:

$$[Z] = z_c E - z_c ([Z' + z_c E]^{-1}); \quad (5)$$

$$e_x = z_c E ([Z' + z_c E]^{-1} e'_x). \quad (6)$$

В соотношениях (5), (6) матрица $[Z']$ и вектор-столбец e'_x характеризуют излучатель без учета емкости диода; через E обозначена единичная матрица, а z_c — это реактивное сопротивление емкости диода C_d на расчетной частоте.

При проведении вычислений элементы матрицы Z_{ik} для излучателя с каждой конкретной геометрией определялись методом интегральных уравнений в тонкопроволочном приближении и условии, что излучатели расположены над идеально проводящим бесконечным экраном. Также предполагалось, что на поверхностях излучателей выполняются граничные условия Леонтовича—Щукина:

$$\vec{n}(\vec{r}) \times \vec{E}(\vec{r}) = Z_s [\vec{n}(\vec{r}) \times (\vec{n}(\vec{r}) \times \vec{H}(\vec{r}))], \quad (7)$$

где \vec{n} — нормаль к поверхности проводника в точке \vec{r} ; \vec{E} , \vec{H} — векторы напряженности электрического и магнитных полей; Z_{si} — поверхностное сопротивление i -го проволочного отрезка. В основу алгоритма расчета было положено интегральное уравнение относительно плотности поверхностного тока излучателя

$$\vec{n}(\vec{r}) \times \left[\iint \vec{E}(\vec{r}, \vec{r}') d\vec{r}' - Z_s (\vec{n}(\vec{r}) \times \vec{J}(\vec{r})) \right] = -\vec{n}(\vec{r}) \times \vec{E}^{ст}(\vec{r}), \quad (8)$$

где $\vec{E}(\vec{r}, \vec{r}')$ — напряженность электрического поля в точке \vec{r} , создаваемая плотностью тока $\vec{J}(\vec{r}')$; $\vec{E}^{ст}(\vec{r})$ — напряженность поля стороннего источника в точке \vec{r} . Интегрирование в (8) проводится по поверхности всех проводников излучателя.

Для решения (8) использовался традиционный подход. Искомое распределение плотности тока $\vec{J}(\vec{r})$ представлялось в виде разложения по системе кусочно-синусоидальных функций и с применением метода Галеркина уравнение (8) сводилось к системе линейных уравнений

$$([Z''] + [Z_{экр}]) I = V, \quad (9)$$

где $[Z'']$ — матрица собственных и взаимных сопротивлений отрезков; $[Z_{экр}]$ — матрица, учитывающая наличие экрана; $I >$ — вектор-столбец коэффициентов в разложении токов; $V >$ — вектор-столбец возбуждающих воздействий.

Конкретные расчеты выполнялись в предположении, что в двухполупериодных ПВЭ используются диоды, типа 3А208А, а рабочая частота ректенны $f_0 = 2,45$ ГГц. Выбор размеров излучателей осуществлялся путем целенаправленного их перебора до достижения резонансных размеров, когда вычисленная величина $Im[Z(f_0)] = 0$. При вычислениях усредненная за период выпрямления диффузионная емкость диода Шоттки моделировалась в линейном приближении. Было принято типовое значение $C_d = 0,25$ пФ. В результате при расстоянии до экрана $kh_{экр} = 0,95$ определены следующие резонансные размеры излучателей (см. рис. 1, 2); петлевой вибратор — $kl = 1,36$, $kb = 0,205$; шунтовой

Таблица 1

Тип излучателя	n					
	1	2	3	4	5	6
Петлевой	89,7	18—j 5,3	14—j 77,4	10,5—j 35,6	3,7—j 52,5	1,5—j 38,5
Шунтовой	155	0,06—j 123	36,8—j 50	0,5—j 45	3,4—j 49	0,7—j 41,3

вibrator: $kl=1,61$; $kb=0,6$, $kb_1=0,35$. Радиус проводников излучателей в обоих случаях выбирался равным $ka=0,00314$, что соответствует условию тонкопроволочного приближения. Здесь $k=2\pi/\lambda$ — волновое число свободного пространства. Значения величины $Z(nf_0)$ при резонансных размерах вибраторов указаны в табл. 1.

При расчетах энергетических параметров ПВЭ, построенных на основе этих излучателей, выпрямительные диоды моделировались резистивным нелинейным элементом с вольт-амперной характеристикой (ВАХ) вида

$$I = I_s [\exp(\alpha u) - 1], \quad (10)$$

где I — ток через диод; u — напряжение на переходе; I_s — ток насыщения; $\alpha = q/(kT)$ — постоянный коэффициент; $q = 1,6 \times 10^{-19}$ — заряд электрона; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ — постоянная Больцмана; m — коэффициент неидеальности характеристики диода; T — температура перехода, К.

Использованные при расчетах диоды рассчитаны на максимально допустимый уровень входной мощности $P_{\text{доп}} = 0,5$ Вт, до-

Таблица 2

Тип ПВЭ	$R_{\text{н. опт.}}$ Ом	Π , Вт/м ²	$P_{\text{вх.}}$ Вт	$P_{\text{о.}}$ Вт	$P_{\Sigma n} / P_{\text{вх.}}$, % при n				
					2	3	4	5	6
Петлевой	67,5	77	0,64	0,43	5,6	0,69	0,084	0,03	0,01
Шунтовой	155	157	1,36	0,97	0,01	1,61	0,007	0,29	0,06

пустимое обратное напряжение $U_{\text{обр. доп}}$ не менее 20 В, их ВАХ характеризуется параметрами: $I_s = 3 \cdot 10^{-4}$ А, $\alpha = 3,7 \text{ В}^{-1}$.

Результаты численных экспериментов по исследованию зависимостей коэффициента полезного действия петлевого и шунтового ПВЭ от плотности падающего потока мощности представлены на рис. 1, 2 соответственно. С учетом указанных ограничений на допустимые входную мощность $P_{\text{доп}}$ и обратное напряжение $U_{\text{обр. доп}}$ использованных при расчетах диодов установлено, что ПВЭ с петлевым вибратором и этими диодами может функционировать (т. е. $P \leq P_{\text{доп}}$, $U_{\text{обр}} \leq U_{\text{обр. доп}}$ при $\Pi = \Pi_{\text{макс}} \leq \leq 110$ Вт/м², а с шунтовым — при $\Pi = \Pi_{\text{макс}} \leq 220$ Вт/м² (рис. 1, 2).

(Здесь через R_n обозначено сопротивление нагрузки эквивалентного однофазного приемно-выпрямительного элемента и его оптимальное значение $R_{\text{н. опт}}$). Некоторые энергетические параметры этих ПВЭ для двух конкретных значений $\Pi < \Pi_{\text{макс}}$ (при оптимальном сопротивлении нагрузки $R_n = R_{\text{н. опт}}$ даны в табл. 2

(для петлевого ПВЭ $R_{\text{н. опт}} = R_{\text{н. опт}}/2$, для шунтового $R_{\text{н. опт}} = R_{\text{н. опт}}$). Здесь приняты следующие обозначения: $P_{\text{вх}}$ — мощ-

ность, извлекаемая ПВЭ из поля падающей волны ($P_{\text{вх}} = NP$, где N — количество входов в излучателе), $P_{\text{пл}}/P_{\text{вх}}$ — уровень мощности побочного излучения, P_0 — отдаваемая в нагрузку мощность постоянного тока. Из представленных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Оба типа ПВЭ могут функционировать при значительных плотностях потока мощности падающего СВЧ пучка, обеспечивая при этом приемлемое для современной техники ректенн значение КПД.

2. ПВЭ с шунтовым вибратором является хорошим фильтром побочного излучения на четных гармониках, а ПВЭ с петлевым вибратором — на нечетных гармониках, что обусловлено величинами импедансов $Z(nf_0)$ соответствующих излучателей (см. табл. 1).

3. При значениях $P \leq 110$ Вт/м² более рационально использовать петлевой ПВЭ, так как он в этом случае имеет более высокий КПД выпрямления.

Известно, что с целью достижения высокого значения КПД перехвата апертура ректенны облучается СВЧ пучком неравномерно (например, по закону Гаусса со спаданием значения P от центра к краю на 10 дБ) [3]. В связи с этим по результатам проведенных исследований можно рекомендовать в центральных зонах апертуры ректенны устанавливать шунтовые ПВЭ, а в зонах, удаленных от центра, петлевые. Такая компоновка апертуры обеспечит достижение не только максимального КПД, но и минимального уровня побочного излучения, так как наиболее интенсивная вторая гармоника будет существенно подавляться шунтовыми ПВЭ.

Список литературы: 1. Шифрин Я. С., Лучанинов А. И., Шокало В. М. Приемно-выпрямительные элементы ректенных систем. Харьк. ин-т радиоэлектроники. 1988. 181 с. Деп. в УкрНИИТИ 31.03.89, № 941. 2. Егоров А. И. Об эффективности передачи энергии электромагнитным пучком и преобразования ее в ректенне // Радиотехника и электроника. 1985. Вып. 4. С. 805—811. 3. Губо, Шверинг. Передача пучков электромагнитных волн в свободном пространстве. СВЧ энергетика/Под ред. Э. Окреса. М., 1971. Т. 1. С. 331—350.

! Поступила в редколлегию 20.06.89

УДК 621.317

Ю. Е. ХОРОШАЙЛО, канд. техн. наук,
Н. Е. ХОРОШАЙЛО, О. И. СТОЯН

КОНТРОЛЬ ПОРИСТОСТИ ТОНКИХ НЕФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНОК ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ

Развитие электронной микроскопии позволило получить наглядное представление о процессе образования тонких пленок на начальной стадии конденсации. Установлено, что пленки малой толщины представляют собой островковый конденсат, состоящий