СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Hiraoka T. J. Sci. Hiroshima Univ., Ser. A—11, 1968, 32, p. 153. [2] Свирина Е. П., Немчинов Ю. В. Вестн. Моск. ун-та. Сер. Физ. Астрон., 1973, 14, № 2, с. 247. [3] Мяликгулыев Г., Пузей И. М., Джамбаров Е. Изв. АН Туркм. ССР, сер. физ.-техн., хим и геол., 1981, № 2, с. 125. [4] Кондорский Е. И., Штраубе Э. ЖЭТФ, 1972, 63, № 1(7), с. 356. [5] Mori N., Fukuda Y., Ukai T. J. Phys. Soc. Japan, 1974, 37, p. 1263.

Поступила в редакцию
22.07.82

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1983, Т. 24, № 3

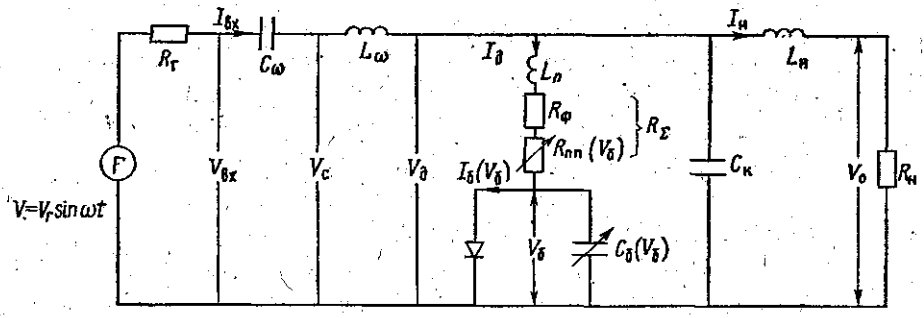
УДК 621.314:621.385.6

## РАСЧЕТ ПОТЕРЬ В ВЫПРЯМИТЕЛЬНОМ ДИОДЕ РЕКТЕННЫ

**Г. П. Бояхчян, С. К. Лесота, Ф. Н. Масловский, А. В. Рачников, И. Г. Самбур**

*(кафедра радиофизики СВЧ)*

Среди различных критериев, используемых для оценки технических характеристик функциональных частей системы передачи энергии СВЧ-лучом и в частности ректенн, наиболее важным является их КПД. КПД ректенны (антенна+выпрямитель), которая используется для приема и преобразования энергии СВЧ в энергию постоянного




Эквивалентная электрическая схема элемента ректенны: $V_г$ — амплитуда напряжения на генераторе, $R_г$ — внутреннее сопротивление генератора, $C_\omega$, $L_\omega$ — емкость и индуктивность последовательного контура, $\omega^2 L_\omega C_\omega = 1$, $L_п$ — индуктивность подводящих проводов в диоде, $R_ф$ — сопротивление подложки, омических контактов, подводящих элементов в диоде, $R_{пп}(V_б)$ — сопротивление толщи полупроводника, $C_б(V_б)$ — емкость барьера, $C_к$ — емкость корпуса диода, $L_н$ — индуктивность фильтра постоянного тока, $R_н$ — сопротивление по постоянному току

тока, определяется в основном эффективностью работы ее элемента [1—4]. Элемент ректенны состоит из полуволнового вибратора, согласующего фильтра НЧ, диода с барьером Шоттки (ДБШ), фильтра и нагрузки. Основные потери мощности в процессе преобразования энергии в элементе ректенны имеют место в ДБШ и в общем случае зависят от уровня принимаемой СВЧ-мощности. Поэтому для достижения высокой эффективности работы элемента ректенны необходима оптимизация параметров ДБШ и режима его работы для каждого уровня принимаемой СВЧ-мощности. Этому вопросу посвящена настоящая работа.

Рассмотрим идеализированную эквивалентную электрическую схему элемента ректенны (рисунок), предназначенную для исследования собственных потерь в ДБШ, которые имеют место только на сопротивлениях: барьера Шоттки; подложки, контактов $R_ф$; полупроводника $R_{пп}(V_б)$. На этой схеме отсутствуют омические потери на элементах фильтров, в СВЧ-трактах и т. п.

Система уравнений, описывающих электрическую схему элемента ректенны (см. рисунок), имеет вид:

$$\begin{cases} V_{вх} = V_г \sin \omega t - I_{вх} R_г; \; C_ω \dfrac{dV_с}{dt} = C_ω \dfrac{dV_{вх}}{dt} - I_{вх}; \; L_ω \dfrac{dI_{вх}}{dt} = V_с - V_д; \\ C_к \dfrac{dV_д}{dt} = I_{вх} - I_д - I_н; \; L_н \dfrac{dI_н}{dt} = V_д - I_н R_н; \\ L_п \dfrac{dI_д}{dt} = V_д - V_б - I_д R_Σ; \; C_б(V_б) \dfrac{dV_б}{dt} = I_д - I_б(V_б), \end{cases} \tag{1}$$

$$I_б(V_б) = IS(\exp(eV_б/kT_0) - 1), \; C_б(V_б) = (eεNS^2/2(V_{bi} - V_б))^{1/2}, \tag{2}$$
$$R_{пп}(V_б) = (d - W(V_б))/e^μ NS, \; W(V_б) = (2ε(V_{bi} - V_б)/eN)^{1/2},$$

где $W(V_б)$ — ширина обедненного слоя, $N$ — концентрация доноров, $d$ — толщина, $μ$ — подвижность электронов, $V_{bi}$ — высота барьера со стороны полупроводника, $S$ — площадь барьера, $ε$ — диэлектрическая проницаемость полупроводника, $k$ — постоянная Больцмана, $T_0$ — абсолютная температура диода, $I$ — плотность обратного тока насыщения через барьер, $e$ — заряд электрона.

В реальных диодах и при больших КПД имеют место ограничения на рабочие напряжения на барьере $V_б$:

$$V_б < V_{bi}, \; |V_б|_{max} < V_{пр}, \; W(V_б) < d, \tag{3}$$

где $V_{пр}$ — напряжение лавинного пробоя барьера. Для диодов Au—GaAs, которые обладают малыми потерями и наиболее перспективны для использования в ректеннах, $V_{пр}$ равно [5]:

$$V_{пр} = 500(10^{21}/N)^{3/4}, \text{ где } [N] = м^{-3}, \; [V_{пр}] = В. \tag{4}$$

Система уравнений (1) с учетом условий (3) численно решалась на ЭВМ. Определялся КПД преобразования СВЧ-мощности $P_{вх}$ в мощность постоянного тока $P_{вых}$ в элементе ректенны как отношение $P_{вых}/P_{вх}$ при оптимальной величине нагрузки $R_н$ и заданных параметрах ДБШ $N$, $S$, $d$. Относительные потери на барьере ($η_б$) и на сопротивлении $R_Σ(η_R)$ определялись из выражений

$$η_б = \int_T I_б V_б dt / \int_T I_н^2 R_н dt, \; η_R = \int_T I_д^2 R_Σ dt / \int_T I_н^2 R_н dt. \tag{5}$$

При малых $η_б$ и $η_R$ КПД $\simeq 1 - η_б - η_R$.

Рассмотрим потери на барьере $η_б$. Исходя из вида вольт-амперной характеристики диода, которая для обычно используемых диодов Au—GaAs с параметрами $N = 10^{21}—10^{23}$ м$^{-3}$, $S = 10^{-10}—10^{-8}$ м$^2$, $d = 10^{-7}—10^{-5}$ м имеет крутой излом при значении напряжения на барьере $\sim$0,7 В, для потерь на барьере $η_б$ из (5) можно получить приближенное выражение:

$$η_б \simeq 0{,}7/V_0 = 0{,}7/\sqrt{P_{вых} R_н}. \tag{6}$$

Из (6) видно, что потери на барьере не зависят непосредственно от параметров диода, а определяются режимом его работы. Из (6) также следует, что при заданном уровне выходной мощности потери на барьере можно уменьшить, увеличивая величину выходной нагрузки

$R_н$ или, что то же самое, напряжение $V_0$. Однако пределы увеличения $R_н$ и $V_0$ ограничены, так как при этом: 1) могут быть нарушены условия (3) вследствие увеличения максимального обратного напряжения на барьере; 2) могут увеличиться потери $\eta_R$ за счет увеличения тока через емкость барьера $C_б(V_б)$.

Рассмотрим потери $\eta_R$. Они характеризуются отношением сопротивлений $R_\Sigma/R_н$ (диод «открыт») и $R_\Sigma/X_{сб}$ и $R_\Sigma R_н/X_{сб}^2$, где $X_{сб}=1/\omega C_б(V_0)$ (диод «закрыт»). Следовательно, для того чтобы уменьшить потери $\eta_R$ и создать возможность для увеличения величины выходной нагрузки, необходимо уменьшить $R_\Sigma$ и $C_б$. В то же время, как следует из соотношений (2), $R_\Sigma$ и $C_б$ имеют противоположные по характеру изменений зависимости от параметров $N$, $d$ и $S$ полупроводника диода. Кроме того, условия (3) накладывают определенные ограничения на режим работы диода при заданных $N$, $S$, $d$. Анализ взаимосвязанности выражений $\eta_б$, $R_\Sigma/R_н$, $R_\Sigma/X_{сб}$, $R_\Sigma R_н/X_{сб}^2$ и результаты численных расчетов на ЭВМ позволяют предложить следующую методику минимизации потерь $\eta_R$ и $\eta_б$ в ДБШ.

1. Задаем режим работы диода, т. е. величины выходной мощности и выходной нагрузки, и вычисляем $|V_б|_{max}\simeq 2V_0-V_{bi}$ и максимально возможную концентрацию доноров в полупроводнике диода.

2. Из (6) оцениваем величину потерь на барьере $\eta_б$.

3. Используя (2), (3) и полученные значения $|V_б|_{max}$ и $N$, вычисляем минимальную толщину полупроводника $d$.

4. Подбираем площадь барьера $S$, используя (2) таким образом, чтобы отношения сопротивлений $R_\Sigma/R_н$, $R_\Sigma/X_{сб}$, $R_\Sigma R_н/X_{сб}^2$, характеризующие потери $\eta_R$, были одновременно малыми величинами.

5. Из полученных значений $S$ выбираем то наименьшее значение, при котором выполняется условие $4I_0<I_б(V_{bi})$.

6. Далее проводится вычисление точного значения КПД.

7. При неудовлетворительной величине полученного значения КПД необходимо повторить расчеты по пунктам 1—6 при измененной в ту или другую сторону величине нагрузки $R_н$.

Некоторые результаты по минимизации потерь в ДБШ в зависимости от параметров полупроводника диода приведены в таблице, откуда следует, что соответствующим выбором параметров ДБШ можно получить КПД преобразования более 90% в диапазоне изменений входной мощности от 0,1 до 5 Вт.

| $P_{вх}$, Вт | $N\cdot10^{-22}$, 1/м³ | $S\cdot10^{10}$, м² | $d\cdot10^{6}$, м | $R_н$, Ом | КПД$_{max}$ при $\lvert V_б\rvert_{max}^{обр} = V_{пр}$ | $\eta_б$ | $\eta_R$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,1 | 2,5 | 1 | 1,4 | 5000 | 0,92 | 0,07 | 0,01 |
| 0,5 | 1,7 | 3 | 1,8 | 2000 | 0,94 | 0,04 | 0,02 |
| 1 | 1,5 | 5 | 2 | 1000 | 0,94 | 0,03 | 0,03 |
| 3 | 1,1 | 20 | 3 | 500 | 0,94 | 0,02 | 0,04 |
| 5 | 1 | 30 | 5 | 300 | 0,94 | 0,01 | 0,05 |

Таким образом, результаты проведенных исследований сводятся к следующему.

1. Для определения собственных, омических потерь в ДБШ элемента ректенны предложена система нелинейных уравнений, связывающая электрические характеристики элемента ректенны, в частности КПД, с параметрами ДБШ.

2. Предложена методика минимизации потерь в ДБШ на Au—GaAs. Расчеты показали, что диоды этого типа могут обеспечить КПД преобразования энергии СВЧ в энергию постоянного тока более 90% в широком диапазоне изменений входной мощности (0,1—5 Вт).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Brown W. C. IEEE spectrum, 1973, 10, N 3, p. 38. [2] Ванке В. А., Лопухин В. М., Саввин В. Л. УФН, 1977, 124, № 4, с. 633. [3] Бояхчян Г. П., Ванке В. А., Лесота С. К. Радиотехн. и электроника, 1983, 28, № 2, с. 83. [4] Бояхчян Г. П. и др. Вестн. Моск. ун-та. Сер. Физ. Астрон., 1982, 23, № 5, с. 83. [5] Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. М.: Наука, М., 1973.

Поступила в редакцию
19.07.82

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1983, Т. 24, № 3

УДК 538.2:538.245

## О ПРИРОДЕ МЕХАНИЗМА ИМПУЛЬСНОГО ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ФЕРРИТОВ В СЛАБЫХ ПОЛЯХ

**О. С. Колотов, В. А. Погожев, Р. В. Телеснин**

*(кафедра общей физики для физического факультета)*

Импульсный режим работы поликристаллических ферритов используется в технике свыше 30 лет. Однако до сих пор отсутствуют однозначные представления о природе механизмов импульсного перемагничивания этих магнетиков. Такое состояние проблемы во многом объясняется трудностью наблюдения динамических доменов, возникающих в процессе импульсного перемагничивания поликристаллических ферритов. В то же время опыт исследования импульсного перемагничивания пермаллоевых пленок показывает [1—4], что важная информация о механизмах перемагничивания может быть получена из анализа внутреннего действующего поля (ВДП), которое характеризует силы, регулирующие поведение намагниченности. Отметим также, что ВДП является одним из основных параметров, используемых при расчете практических устройств на ферритовых сердечниках [5, 6]. Для многих случаев ВДП может быть найдено из сигнала перемагничивания с помощью соотношения [5, 7]

$$\dot{J}(t)=k(t)[H_{\text{п}}-H_e(t)], \qquad (1)$$

где $\dot{J}(t)$ — скорость изменения намагниченности, $k(t)$ — коэффициент пропорциональности, $H_{\text{п}}$ — напряженность перемагничивающего поля, а $H_e(t)$ — ВДП.

В настоящей работе анализ ВДП используется для исследования применимости модели роста зародышей обратной намагниченности [8, 9] к случаю импульсного перемагничивания поликристаллических ферритов. Предполагается, что подобный механизм действует при перемагничивании ферритов в интервале полей, который соответствует