

М. А. Федоров

## К ВОПРОСУ О ПОГРЕШНОСТЯХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МОЩНОСТИ НА НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Задача повышения точности и надежности полупроводниковых преобразователей представляет существенный интерес в связи с большими возможностями их применения, так как они пригодны в равной мере для измерения тока, напряжения и мощности в широком диапазоне частот и значений измеряемых величин.

Известно, что предел повышения точности полупроводниковых приборов устанавливается стабильностью характеристик и значительной температурной зависимостью полупроводниковых диодов. В полупроводниковых ваттметрах дополнительным источником погрешностей может явиться некоторое отклонение вольтамперной характеристики от квадратичной кривой, а также отсутствие полного подобия используемых диодов.

В работе [1] характеристики полупроводниковых диодов упрощенно представлялись полиномом второй степени. В настоящей работе используются аппроксимации рабочих участков характеристик диодов полиномом более высоких степеней.

Идеализированная вольтамперная характеристика рабочих участков германиевых или кремниевых диодов может быть представлена выражением:

$$i = g_0 U + b U^2, \quad (1)$$

где  $b = \left( \frac{d^2 i}{d U^2} \right)_0 = \left( \frac{d g}{d U} \right)_0$ .

Для этого случая характеристика проводимости может быть описана уравнением прямой:

$$g = g_0 + b \cdot U, \quad (2)$$

где  $g_0$  — проводимость в рабочей точке.

Реальные диоды имеют характеристики проводимости, представленные на рис. 1.

Наиболее пригодными из них для умножения являются характеристики германиевых диодов типа Д9Ж, Д2Г, Д2Е и кремниевых типа Д10Б, Д106А.

Для получения зависимости (2) требуется деформация этих характеристик соответствующими сопротивлениями.

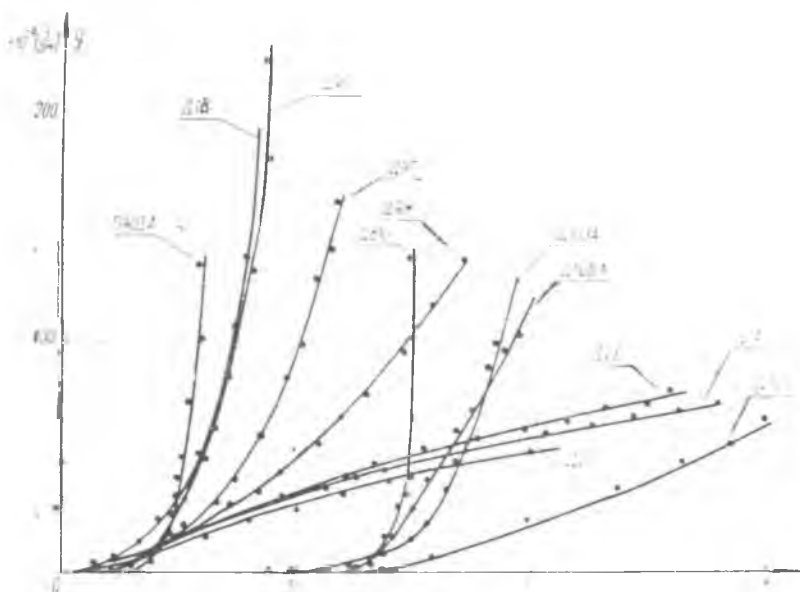


Рис. 1. Характеристики проводимости полупроводниковых диодов и триодов в диодном режиме.

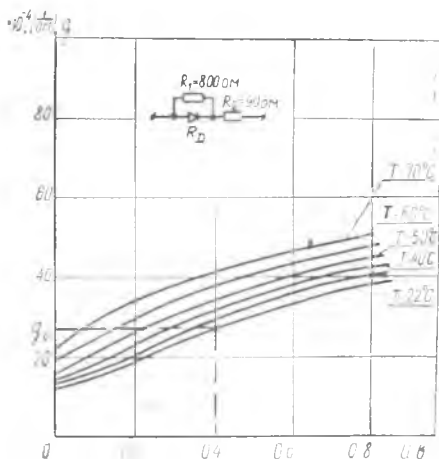


Рис. 2. Деформированная характеристика проводимости диода Д2Г.

На рис. 2 изображена деформированная характеристика диода типа Д2Г и схема включения диода и деформирующих сопротивлений.

Схема ваттметра, использующая суммарностный метод,

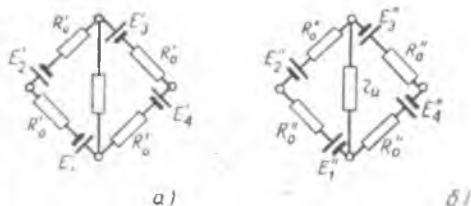


Рис. 3. Схема замещения преобразователя мощности: а — прямое направление тока; б — обратное направление тока.

представлена на рис. 4. Здесь рабочая точка на характеристике диода (рис. 2) выбирается напряжением смещения  $+U_{см}$ , которое подается от стабилизированного выпрямителя.

Представим реальную характеристику диода в виде ряда Маклорена:

$$i = \frac{i^I(0)}{1!} U + \frac{i^{II}(0)}{2!} U^2 + \frac{i^{III}(0)}{3!} U^3 + \frac{i^{IV}(0)}{4!} U^4 + \dots \quad (3)$$

или

$$i = g_0 U + \sum_1^n \frac{bn}{n!} U^n \quad (4)$$

и

$$g = g_0 + \sum_1^k \frac{bn}{n!} U^{n-1}, \quad (5)$$

где  $b_n = \left(\frac{di}{dU}\right)^{(n)}$ ;  $n$  — порядок степени.

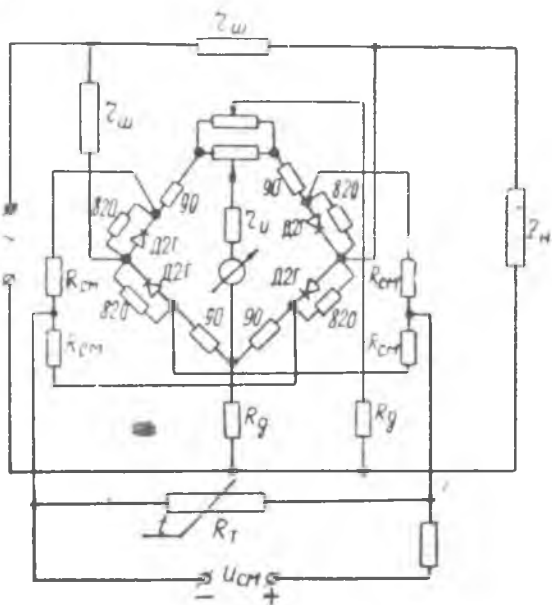


Рис. 4. Схема преобразователя мощности на полупроводниковых диодах.

Пользуясь методом наложения и методом эквивалентных э. д. с., можно получить из рис. 3

$$E = R_0 \cdot \Delta i = R_0 \cdot \left. \begin{array}{l} \sum_1^{\kappa} \frac{bn}{n!} U^n; \\ b_n = \left( \frac{di}{dU} \right)^{(n)}. \end{array} \right\} \quad (6)$$

Мгновенное значение тока выхода измерителя

$$i_b = \frac{(E_1 + E_2) - (E_3 + E_4)}{2(R_0 + r_u)} - \frac{(E_1 - E_2) - (E_3 - E_4)}{2(R_0 + r_u)}. \quad (7)$$

Если рабочая точка находится на середине линейного участка характеристики  $g = f(U)$ , а характеристики диодов совпадают, то имеем:

$$\left. \begin{array}{l} E_1 = E_2; \quad g'_0 = g'_0; \\ E_3 = E_4; \quad b' = b''. \end{array} \right\} \quad (8)$$

Тогда мгновенное значение тока выхода равно:

$$i_b = \frac{2}{g_0 \left( 1 + \frac{g_0}{g_u} \right)} \left\{ \left[ \sum_1^{\kappa} \frac{bn}{n!} (u_i - u_u)^n \right] - \left[ \sum_1^{\kappa} \frac{bn}{n!} (u_i - u_u)^n \right] \right\}. \quad (9)$$

Здесь  $U_i$  — мгновенное значение напряжения на диоде, пропорциональное измеряемому току;  $U_u$  — мгновенное значение напряжения на диоде, пропорциональное измеряемому напряжению.

Используя бином Ньютона, после преобразования получим:

$$i = \frac{4}{\left( 1 + \frac{g_0}{g_u} \right)} \cdot \left[ \sum_1^{\kappa} \frac{bn}{n!} \left( C_n \left( \frac{i \cdot r_w}{2} \right)^{n-1} \cdot \frac{U}{4g_0 R_g} + C_n^3 \left( \frac{i \cdot r_w}{2} \right)^{n-3} \cdot \left( \frac{U}{4g_0 R_g} \right)^3 + \right. \right. \\ \left. \left. + \dots + \frac{C_n^m}{2} \cdot \left( \frac{i \cdot r_w}{2} \right)^{n-m} \cdot \left( \frac{U}{4g_0 R_g} \right)^m \cdot [1 - (-1)^m] + \dots + \right. \\ \left. \left. - \frac{C_n^n}{2} \cdot \left( \frac{U}{4g_0 R_g} \right)^n \cdot [1 - (-1)^n] \right] \right], \quad (10)$$

где коэффициенты  $C_n^1, C_n^3, C_n^5, \dots, C_n^n$  — могут быть найдены из треугольника Паскаля.

При появлении в вольтамперной характеристике степени выше второй погрешность кольцевого преобразователя равна:

$$\gamma_k = \sum_3 \frac{bn}{n!} \left\{ C_n^1 \cdot \left( \frac{i \cdot r_{ш}}{2} \right)^{n-2} + C_n^3 \left( \frac{i \cdot r_{ш}}{2} \right)^{n-4} \cdot \left( \frac{U}{4g_0 R_g} \right)^2 + \dots + \right. \\ \left. + \frac{C_n^m}{2} \cdot \left( \frac{i \cdot r_{ш}}{2} \right)^{n-(m+1)} \cdot \left( \frac{U}{4g_0 R_g} \right)^{m-1} \cdot [1 - (-1)^m] + \dots + \right. \\ \left. + C_n^n \cdot \left( \frac{U}{4g_0 R_g} \right)^{n-1} \cdot \frac{1}{i \cdot r_{ш}} \cdot [1 - (-1)^n] \right\}. \quad (11)$$

При строго квадратичной вольтамперной характеристике, т. е. при  $b_3 = b_4 = b_5 = \dots = 0$  и синусоидальной форме тока и напряжения, получим среднее значение выходного тока:

$$I_0 = \frac{1}{2} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \frac{b_2}{g_0} \cdot \frac{r_{ш}}{R_g} \cdot \frac{1}{\left( 1 + \frac{g_0}{g_u} \right)}, \quad (12)$$

где  $I, U$  — действующие значения тока и напряжения.

Полученное выражение (12) позволяет производить расчет преобразователей мощности с деформированными характеристиками диодов с точностью до 10%.

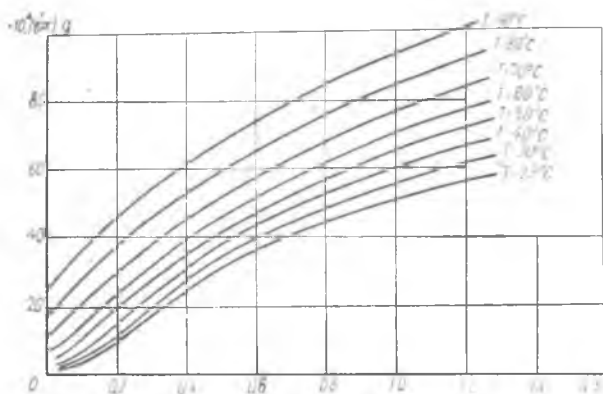


Рис. 5. Характеристика проводимости диода Д2Г.

Из выражения (11) видно, что на значение выходного тока влияют параметры нелинейного элемента  $g_0$  и  $b$ . Пренебрегаем температурными изменениями  $r_{ш}$  и  $R_g$ , так как они малы по сравнению с аналогичными изменениями  $g_0$  и  $b$  диода:

На рис. 5, 6 изображены соответственно характеристики недеформированных диодов  $g_0 = f(U, T)$  и  $b = f(U, T)$  и как следствие

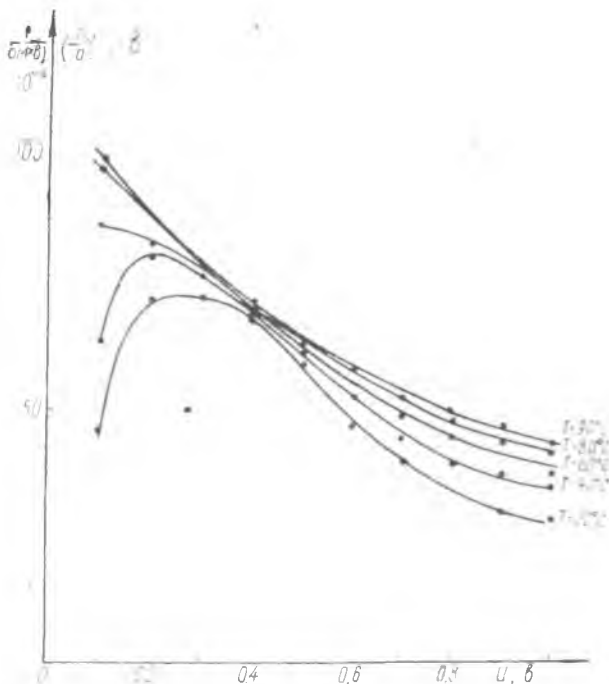


Рис. 6. Характеристика  $b = \left( \frac{dg}{du} \right)$  диода Д2Г.

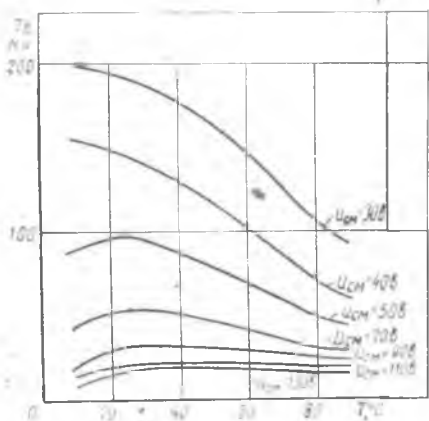


Рис. 7. Температурная зависимость выходного тока преобразователя мощности.

температурная зависимость выходного тока преобразователя мощности. Анализ рис. 5, 6, 7, а также выражения (11) позволяет сделать вывод, что здесь возможна температурная компенсация, которая заключается в следующем. Рабочая точка нелинейного элемента управления напряжением смещения, которое регулируется термистором  $R_T$  (рис. 3) в зависимости от температуры среды. Это позволяет изменять соответствующим образом  $g_0$  и  $b$ , чтобы выходной ток кольцевого преобразователя оставался неизменным.

Для напряжения смещения  $U_{см} = 40$  в возможна температурная компенсация в диапазоне температур от 10 до 80°C. В данном случае для температурной компенсации применялись термисторы типа ММТ-1.

В указанном диапазоне температур была достигнута компенсация до 2%. Точность может быть значительно повышена при соответствующем подборе характеристики термистора.

### ВЫВОДЫ

1. В данной работе исследованы характеристики различных германиевых и кремниевых диодов с точки зрения применения их в умножающих устройствах.

2. Показана возможность расчета их с учетом в вольтамперной характеристике степеней выше второй.

3. Предложены пути компенсации температурной погрешности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. М. Старобинский, М. А. Федоров. Высокочастотные полупроводниковые умножители. «Автоматические измерительные и регулирующие устройства». Научные труды вузов Поволжья, выпуск 1, Куйбышев, 1963.