

И. Р. ДОБРЯНСКИЙ, С. М. ЗОЛОТАРЕВ, Л. В. МАКАРОВА

К ВОПРОСУ ОБ ИЗМЕРЕНИИ МАЛЫХ ЕМКОСТЕЙ *p-n* ПЕРЕХОДОВ ДИОДОВ СВЧ

Известные достоинства параметрических усилителей и умножителей частоты на нелинейной емкости обуславливают их широкое применение в радиоэлектронных устройствах. Для инженерных расчетов, связанных с проектированием таких устройств, а также теоретического анализа работы устройств требуется точное знание характеристики $C_{обр} = f(U_{обр})$ конкретного диода. В настоящее время отсутствует прибор, позволяющий снимать подобные характеристики для емкостей порядка 1 пф на частотах порядка сотен мегагерц.

В статье рассматриваются вопросы, связанные с теоретическим обоснованием режима работы прибора, а также даются рекомендации по технической реализации выбранного метода построения прибора.

Из всех рассмотренных методов измерения очень малых емкостей (метод двух генераторов, измерение с помощью моста переменного тока, метод сравнения, метод делителя) был выбран метод емкостно-реостатного делителя с большим коэффициентом деления напряжения. Этот метод при высокой точности измерения относительно прост и позволяет измерять диоды с пониженной добротностью барьерной емкости.

Блок-схема устройства, реализующего выбранный метод измерения емкостей *p-n* переходов, приведена на рис. 1.

Для измерения емкости C_x необходимо иметь высокостабильный генератор высокой частоты ГСС, эталонное сопротивление R_0 и высокочувствительное регистрирующее устройство, причем $|x_c| \gg R_0$.

Однако практически получить чистый дифференцирующий контур не удастся вследствие наличия паразитных емкостей, обратного сопротивления диода, переходного сопротивления контактируемого диода со стержнем. Была рассмотрена эквивалентная схема измерительной головки с учетом этих величин и построена логарифмическая амплитудная асимптотическая характеристика $10 \text{ мГц} \leq f \leq 5 \cdot 10^3 \text{ мГц}$. Рабочий участок, где характеристика меняется линейно при изменении емкости или частоты, составил

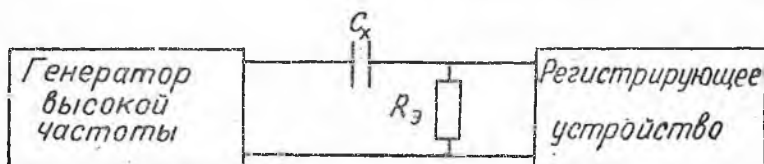


Рис. 1. Блок-схема устройства

$20 \lg A(\omega) = F[\lg(\omega)]$. Как видно, рабочая частота прибора может изменяться в широких пределах и ее необходимо уточнить, рассмотрев зависимость эквивалентных параметров варикапа от частоты. К основным эквивалентным параметрам варикапа следует отнести эквивалентную емкость $C'_з$ и эквивалентную проводимость $G'_з$ параллельной схемы замещения, эквивалентную емкость $C''_з$ и эквивалентное сопротивление $r'_з$ последовательной схемы замещения и связанную с ними добротность:

$$Q = \frac{\omega C'_з}{G'_з} = \frac{1}{\omega C''_з r'_з};$$

где ω — круговая частота.

Из рассмотрения моделирующей эквивалентной схемы, отражающей физические явления в варикапе, были получены выражения для перечисленных величин:

$$C'_з \approx C_n \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + (\omega\tau_n)^2}; \quad (1)$$

$$G'_з \approx g_n \frac{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{cp}}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + (\omega\tau_n)^2}; \quad (2)$$

$$C''_з \approx C_n \frac{1 + \frac{1}{(\omega\tau_n)^2}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}; \quad (3)$$

$$r_{\Sigma} = r_{\text{в}} + \frac{1}{g_{\text{н}} [1 + (\omega\tau_{\text{н}})^2]}; \quad (4)$$

$$Q = \omega\tau_{\text{н}} = \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ср}}}\right)^2}; \quad (5)$$

где $C_{\text{п}}$ — нелинейная емкость p - n перехода;
 $g_{\text{н}}$ — активная составляющая проводимости p - n перехода;

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{\text{в}} C_{\text{п}}}}$ — частота собственного резонанса варикапа;

$\tau_{\text{в}} = C_{\text{п}} \tau_{\text{в}}$ — высокочастотная постоянная времени варикапа;

$\omega_{\text{ср}} = \frac{1}{C_{\text{п}}} \sqrt{\frac{g_{\text{н}}}{r_{\text{в}}}}$ — средняя частота, на которой потери, вносимые $g_{\text{н}}$ и $r_{\text{в}}$, равны;

$\tau_{\text{н}} = \frac{C_{\text{п}}}{g_{\text{н}}}$ — низкочастотная постоянная времени варикапа;

$r_{\text{в}}$ и $L_{\text{в}}$ — соответственно сопротивление и индуктивность выводов.

У современных СВЧ диодов $r_{\text{в}} = (0,1 \div 1)$ ом.

Полагая $\tau_{\text{н}} = 13,4 \cdot 10^{-7}$ сек;

$\tau_{\text{в}} = 2,33 \cdot 10^{-11}$ сек;

$L_{\text{в}} = 10^{-9}$ гн;

$C_{\text{п}} = 1 \cdot 10^{-12}$ ф

и решив уравнения 1—5 на ЭВМ «Проминь» в пределах $f = (50 \div 230)$ мгц, строим графики рис. 2.

Исследуя зависимость эквивалентных параметров от частоты, можно сделать следующие выводы.

1. Барьерная емкость p - n переходов не зависит от частоты, и ее измерение может производиться в широких частотных пределах.

2. Добротность барьерной емкости достигает максимума на $f_{\text{ср}}$, где потери, вносимые $g_{\text{н}}$ и $r_{\text{в}}$, равны.

3. Эквивалентное сопротивление достаточно высоко, а эквивалентная проводимость достаточно мала на частотах $f \leq f_{\text{ср}}$.

4. Исходя из п. 2 и 3, делаем вывод, что измерять емкость СВЧ диодов следует на частотах $f \leq f_{\text{ср}}$, но так, чтобы добротность барьерной емкости не падала ниже $0,707 Q_{\text{max}}$, то есть на частотах $f = 77 \div 200$ мгц.

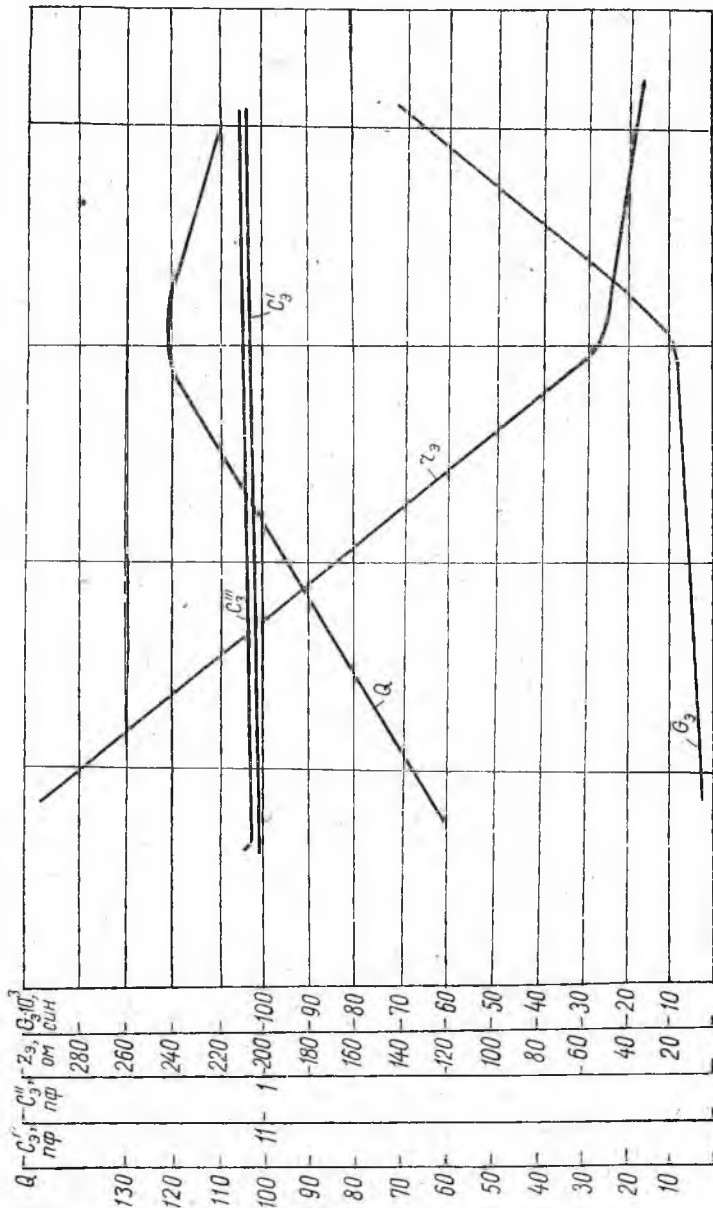


Рис. 2. Зависимость эквивалентных параметров варикапа от частоты

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАРИКАПА
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧЕГО ДИАПАЗОНА
ТЕМПЕРАТУР ПРИБОРА**

Из всех параметров варикапа наибольшей температурной зависимостью обладает обратный ток p - n перехода. Это может привести к снижению добротности барьерной емкости, повышению уровня собственных шумов и вызвать увеличение падения управляющего напряжения. Исследования, проведенные Лабутиным [1], показывают, что в обычных условиях работы обратный ток увеличивается примерно вдвое при повышении температуры на каждые 10° .

Изменение температуры влияет также на величину емкости и добротности p - n перехода. Влияние температуры на емкость p - n перехода характеризуется температурным коэффициентом емкости TKE_{Π} .

$$TKE_{\Pi} = \frac{1}{C_{\Pi}} \cdot \frac{dC_{\Pi}}{dT} = - \frac{n}{1 + \frac{u_0}{\varphi_c}} TK\varphi_c + (1-n)TK\varepsilon, \quad (6)$$

где φ_c — контактная разность потенциалов;

$TK\varphi_c$ — температурный коэффициент контактной разности потенциалов;

$n = \frac{1}{2}$ — для плавного перехода;

$n = \frac{1}{3}$ — для резкого перехода;

u_0 — напряжение смещения на переходе;

$TK\varepsilon$ — температурный коэффициент диэлектрической проницаемости полупроводника.

Зависимости $TKE_{\Pi} = f(T)$ при $u_0 = \text{const}$ рассмотрены Лабутиным [1]. Не меньший интерес представляет зависимость TKE_{Π} от постоянной составляющей смещения U'_0 .

Исследовав эту зависимость (рис. 3), приходим к выводу, что TKE_{Π} резко возрастает (до $6 \cdot 10^{-4}$) в области малых значений U'_0 и равен $TKE_{\Pi} = 1 \cdot 10^{-4}$ и практически не изменяется в области больших значений u_0 .

Определим зависимость добротности барьерной емкости от температуры. Физическая природа этой зависимости определяется областью частот, в которой используется варикап.

При работе на частотах выше $\omega_{\text{ср}}$ добротность зависит практически только от сопротивления $r_{\text{в}}$, причем

$$Q = \frac{1}{\omega C_{\Pi} r_{\text{в}}} = \frac{1}{\omega \tau_{\text{в}}}.$$

При этом температурный коэффициент сопротивления [1] равен:

$$TKC_{\text{в}} = \frac{B}{T}, \quad (7)$$

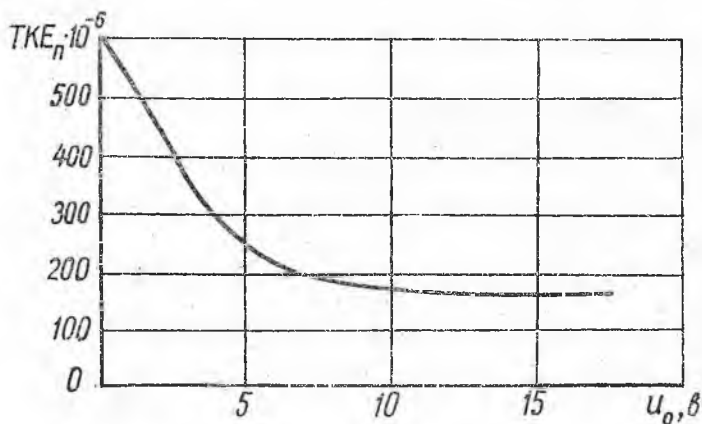


Рис. 3. Зависимость температурного коэффициента добротности от температуры

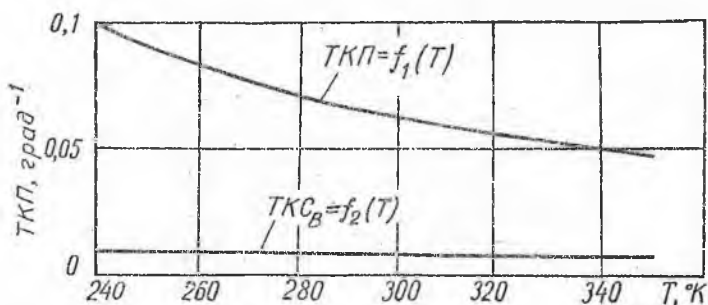


Рис. 4. Зависимость $ТКЕ_n = f(U_0)$

где B — постоянный коэффициент.

На частотах ниже $\omega_{ср}$ добротность варикапа зависит от проводимости g_n , причем

$$Q = \frac{\omega C_n}{g_n} = \omega \tau_n.$$

Температурный коэффициент проводимости [1] равен:

$$ТКП \approx \frac{\Delta \omega}{2KT^2}. \quad (8)$$

Произведя расчеты по формулам (7) и (8) в пределах изменения температур $240 \div 350^\circ\text{K}$, построим зависимости (рис. 4).

ВЫВОДЫ

1. Температурный коэффициент емкости диодов $TKE_n > 0$ и барьерная емкость с повышением температуры возрастают на 0,05% за 1°C ,

2. Вследствие интенсивного возрастания TKE_n при температурах $T^\circ\text{C} > 40^\circ$ температура измерительной головки должна быть меньше этой величины.

3. Вследствие уменьшения TKE_n с увеличением обратного напряжения температурная погрешность при измерении емкостей при больших значениях обратного напряжения будет уменьшаться.

4. Вследствие сильной зависимости добротности барьерной емкости от температуры при $\omega \leq \omega_{\text{ср}}$ необходима температурная стабилизация измерительной головки в пределах $25 \pm 8^\circ\text{C}$.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЕМКОСТИ ПРИ СМЕЩЕНИИ, ВКЛЮЧАЮЩЕМ В СЕБЯ ПОСТОЯННУЮ И СИНУСОИДАЛЬНУЮ СОСТАВЛЯЮЩИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ПРИБОРА

При смещении, включающем постоянную и синусоидальные составляющие $x = \varphi_k + u_0 + U_m \sin \omega t$, дифференциальная емкость варикапа выражается соотношением:

$$C = ax^{-n} = ax_0^{-n} [1 + x_m \sin \omega t]^{-n} = C_0 [1 + x_m \sin \omega t]^{-n}, \quad (9)$$

где $x_0 \doteq \varphi_k + u_0$ — исходное постоянное смещение;

$x_m = \frac{U_m}{u_0}$ — относительная амплитуда переменной составляющей смещения;

C_0 — исходное значение дифференциальной емкости при $x_m \rightarrow 0$.

В нормальных режимах использования барьерной емкости (без выхода в область прямых смещений) $U_m < u_0$ и $x_m < 1$. Это позволяет при любом значении показателя n заменить выражение в скобках правой части уравнения (9) разложением в степенной ряд:

$$\begin{aligned} C &= C_0 \left[1 - nx \sin \omega t + \frac{n(n+1)}{2!} x_m^2 \sin^2 \omega t - \frac{n(n+1)(n+2)}{3!} x_m^3 \sin^3 \omega t \right] = \\ &= C_0 \left\{ 1 + \frac{n(n+1)}{4} x_m^2 + \frac{n(n+1)(n+2)(n+3)}{64} x_m^4 + \dots - \right. \\ &- \left[nx_m + \frac{n(n+1)(n+2)}{8} x_m^3 + \dots \right] \sin \omega t - \left[\frac{n(n+1)}{4} x_m^2 + \right. \\ &+ \left. \frac{n(n+1)(n+2)(n+3)}{48} x_m^4 + \dots \right] \cos 2\omega t + \\ &+ \left. \left[\frac{n(n+1)(n+2)}{24} x_m^3 + \dots \right] \sin 3\omega t + \dots \right\}. \end{aligned}$$

В случае резкого перехода $n = \frac{1}{2}$:

$$C_1 \approx C_0 \left[1 + \frac{3}{16} x_m^2 + \frac{105}{1024} x_m^4 - \frac{x_m}{2} \left(1 + \frac{15}{32} x_m^2 \right) \sin \omega t - \right. \\ \left. - \frac{3}{16} x_m^2 \left(1 + \frac{35}{48} x_m^2 \right) \cos 2\omega t + \frac{5}{64} x_m^3 \sin 3\omega t + \dots \right]. \quad (10)$$

В случае плавного перехода $n = \frac{1}{3}$.

$$C_2 \approx C_0 \left[1 + \frac{1}{9} x_m^2 + \frac{35}{648} x_m^4 - \left(\frac{1}{3} x_m + \frac{7}{108} x_m^3 \right) \sin \omega t - \right. \\ \left. - \left(\frac{1}{9} x_m^2 + \frac{35}{486} x_m^4 \right) \cos 2\omega t + \frac{7}{162} x_m^3 \sin 3\omega t + \dots \right]. \quad (11)$$

Из выражений (10) и (11) вытекает, что при смещении, включающем в себя синусоидальную составляющую, возрастает постоянная составляющая дифференциальной емкости за счет положительных постоянных членов, содержащихся в четных степенях тригонометрических функций.

Исследуя степень этого возрастания $\Delta C = f(x_m)$, приходим к выводу, что наибольшая погрешность измерений будет при малых обратных напряжениях на переходе, причем погрешность больше для диодов с плавным переходом. Увеличением емкости можно пренебречь при $x_m = 0,0001$, что при смещении $u_0 = 1$ в соответствует $U_m = 100$ мкв.

На основании изложенного можно предъявить следующие требования к прибору:

диапазон измеряемых емкостей $0,1 + 3$ пф;

диапазон частот прибора $f = 50 \div 230$ мГц;

уровень входного сигнала $U_{вх} \leq 100$ мкв;

рабочая температура прибора должна лежать в пределах $25 \pm 8^\circ\text{C}$;

прибор должен обеспечивать измерение емкости p - n переходов при изменении обратного напряжения от 0 до $8 \div 10$ в.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. К. Лабутин. Частотно-избирательные цепи с электронной настройкой. Издательство «Энергия», 1966.
2. Электронные приборы для измерения неэлектрических величин под ред. Смирнова.
3. В. С. Эткин, Е. М. Гершензон. Параметрические системы на полупроводниковых диодах, «Сов. радио», 1964.