

О. Б. Шарпан, канд. техн. наук

НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ВРЕМЕНИ ПОДГОТОВКИ К ЗАПУСКУ РЕЛАКСАЦИОННОЙ СТУПЕНИ НА ЛАВИННОМ ТРАНЗИСТОРЕ

Рассмотрим неустойчивость времени подготовки к запуску (ВПЗ) основной релаксационной ступени на лавинном транзисторе (ЛТ) [2].

Для определения ВПЗ t_n и его изменения Δt_n воспользуемся эквивалентной схемой (рис. 1) входной цепи ступени на ЛТ. Здесь C_0 — входная емкость ступени; $I_{R_6} = E_6/R_6$; $i_3(t)$ — ток запуска ступени; N — двухполюсник, отражающий нелинейное входное сопротивление ЛТ, имеющего N -образную вольт-амперную характеристику (ВАХ) со стороны входа [2]; R_3 — эквивалентное входное сопротивление ступени (до момента запуска ЛТ $R_3 \approx R_3 R_6 R_6' /$

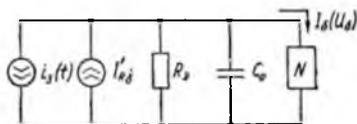


Рис. 1. Эквивалентная схема входной цепи ступени на ЛТ

$/ (R_3 R_6' + R_3 R_6 + R_6 R_6')$, где R_3 — внутреннее сопротивление источника тока запуска, $R_6' \div R_6$ — цепочка смещения в цепи базы ЛТ).

Процесс включения ступени связан с изменением напряжения U_6 и описывается нелинейным дифференциальным уравнением

$$C_0 \frac{dU_6}{dt} + I_6(U_6) - \frac{E_6}{R_6} + \frac{U_6}{R_3} + \tau_3(t) = 0. \quad (1)$$

Уравнение (1) нелинейно и в общем виде не решается. Однако, учитывая, что при работе ступени в ждущем режиме в течение основной части t_n $I_6(U_6) = -(E_k - U_0)/R_k \approx \text{const}$ оно приводится к линейному дифференциальному уравнению, решение которого имеет вид

$$\begin{aligned} vR_3(\tau - t_n) - E_6 \frac{R_3}{R_6'} - (E_k - U_0) \frac{R_3}{R_k} + \left[E_6 \left(\frac{R_6}{R_6' + R_6} - \frac{R_3}{R_6'} \right) + \right. \\ \left. + \frac{E_k - U_0}{R_k} (R_3 - R_6) - v\tau R_3 \right] \exp(-t_n/\tau) + U_{6n} = 0, \quad (2) \end{aligned}$$

где учтено, что $U_{00} = E_0 \frac{R_0}{R_0 + R'_0} - \frac{U_K - U_0 R_0}{R_K}$, $v = I_m/t_\Phi$, I_m — амплитуда, а t_Φ — длительность фронта импульса запуска.

Основными дестабилизирующими факторами, вызывающими изменение ВПЗ, являются изменение I_m , E_0 и E_K , а также изменение напряжений U_0 и U , вызванное температурным изменением электрических параметров ЛТ. Определяя нестабильность ВПЗ в конечных приращениях, из (2) получим

$$\Delta t_{nI_m} = - \{R_3 [\tau - t_n - \tau \exp(-t_n/\tau)] / (t_\Phi F_v)\} \Delta I_m = W_1 \Delta I_m; \quad (3)$$

$$\Delta t_{nE_0} = - \{R_3/R'_0 + [R_0/(R_0 + R'_0) - R_3/R'_0] \exp(-t_n/\tau)\} \times \\ \times \Delta E_0/F_v = W_2 \Delta E_0; \quad (4)$$

$$\Delta t_{nE_K} = - \{R_3/R_K - [(R_3 - R_0)/R_K] \exp(-t_n/\tau)\} \times \\ \times \Delta E_K/F_v = -W_3 \Delta E_K; \quad (5)$$

$$\Delta t_{nU_0} = - \{R_3/R_K - [(R_3 - R_0)/R_K] \exp(-t_n/\tau)\} \Delta U_0/F_v = W_4 \Delta U_0; \\ \Delta t_{nU_{0n}} = - \Delta U_{0n}/F_v - W_5 \Delta U_{0n}; \quad (7)$$

где

$$F_v = -vR_3 + \left[E_0 \left(\frac{R_0}{R_0 + R'_0} - \frac{R_\tau}{R'_0} \right) + \frac{E_K - U_0}{R_K} (R_3 - R_0) - \right. \\ \left. - v\tau R_3 \right] \left(-\frac{1}{\tau} \right) \exp\left(-\frac{t_n}{\tau}\right). \quad (8)$$

Амплитудную (3) и режимную (4) и (5) нестабильности ВПЗ удобно рассматривать отдельно от температурной нестабильности (6) и (7).

Амплитудная и режимная нестабильность ВПЗ. На рис. 2 представлены зависимости весовых коэффициентов $W_1 \div W_3$ от величины v , рассчитанные для ступени генератора многочастотного сигнала, работающей в типичном режиме [4] с ЛТ типа ГТ 338Б при: $R_0 = 6,8$; $R'_0 = 0,82$; $R_K = 120$; $R_3 = 1,8$ кОм; $E_K - U_0 = 5$; $E_0 = 8$; $U_{0n} = -0,15$ В. Как видно из рисунка, величины $W_1 - W_3$ уменьшаются при возрастании v , причем наиболее резко уменьшается W_1 . Величина W_3 примерно в R_K/R'_0 раз меньше W_2 .

Используя полученные результаты, можно оценить нестабильность фазового спектра сигнала по формуле

$$\Delta \Psi_k = k\Omega \Delta t_n, \quad (9)$$

где k — номер гармоники; Ω — круговая частота повторения импульсов.

Температурная нестабильность ВПЗ. Представляя температурное изменение напряжений U_{0n} и U_0 в виде зависимостей $\Delta U_{0n} = S_6 \Delta T$, $\Delta U_0 = S_0 \Delta T$, где $S_6 = \frac{dU_{0n}}{dT}$ и $S_0 = \frac{dU_0}{dT}$ — крутизны тем-

пературной нестабильности $U_{бп}$ и U_0 соответственно; ΔT — изменение температуры, после суммирования выражений (6) и (7) получим выражение, определяющее зависимость $t_{п}$ от температуры

$$\Delta t_{пТ} = (W_4 S_0 - W_5 S_6) \Delta T = W_6 \Delta T. \quad (10)$$

Для определения $U_{бп}$ и S_6 удобно воспользоваться выражением для так называемой «пусковой характеристики» ЛТ [2], которое оп-

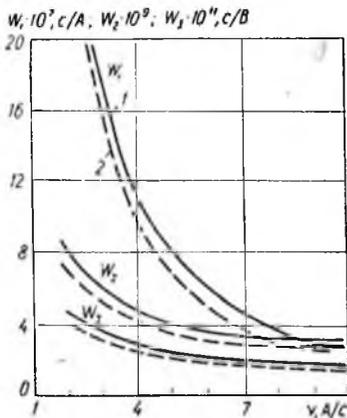


Рис. 2. Зависимости весовых коэффициентов $W_1 \div W_3$:
1 — $C_0 = 10$ пФ; 2 — $C_0 = 5$ пФ

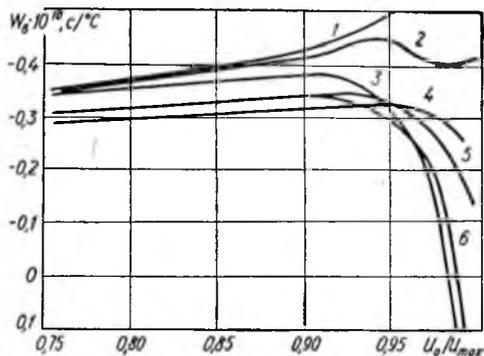


Рис. 3. Зависимость W_6 от U_0/U_{\max} при различных величинах $I_{к0}$ и $I_{з0}$:
1 — $I_{з0} = 1,8$; 2 — $I_{з0} = 2,0$; 3 — $I_{з0} = 3,5$; 4 — $I_{з0} = -0,1$; 5 — $I_{з0} = 0,5$; 6 — $I_{з0} = 1,0$ (для 1, 2, 3 $I_{к0} = 3$ мкА; для 4, 5, 6 $I_{к0} = 1$ мкА)

ределяет зависимость напряжения U_{β} в максимуме S-образной ВАХ ЛТ со стороны коллектора от величины управляющего тока I_y , действующего в цепи базы ЛТ

$$U_{\beta}' = f(U_M, \alpha_0, \Phi_T, r_6, R_6, I_{з0}, I_{к0}, I_y, n), \quad (11)$$

где U_M — напряжение лавинного пробоя транзистора при оборванном эмиттере; α_0 — коэффициент передачи тока эмиттера без учета лавинного умножения; Φ_T — температурный потенциал; r_6 — сопротивление базы ЛТ, $I_{к0}$ и $I_{з0}$ — обратные токи коллекторного и эмиттерного переходов ЛТ; n — показатель степени; в зависимости от типа $p-n$ -перехода величина n изменяется от 2 до 6 [3].

При заданном напряжении $U_{\beta}' = U_0$ с учетом температурных зависимостей электрофизических параметров ЛТ определяется величина тока, при котором происходит переход транзистора в лавинный режим

$$I_{ул}(T) = f_1[U_M(T), \alpha_0(T), \Phi_T(T), I_{з0}(T), I_{к0}(T), r_6, R_6, n, U_0], \quad (12)$$

а затем определяется величина S_6 при малом изменении температуры от T_1 до T_2 как

$$S_6 \approx \frac{I_{yл}(T_2) - I_{yл}(T_1)}{T_2 - T_1} R_3. \quad (13)$$

При этом для определения температурных зависимостей $U_m(T)$, $\alpha_0(T)$, $\varphi_T(T)$, $I_{\infty_0}(T)$, $I_{кo}(T)$ необходимо воспользоваться известными соотношениями, данными в работах [1, 2]. Выразив U_m через напряжение в максимуме ВАХ U_{max} , которое удобно определять при заданном токе $I_y = E_6 / (R_6 + R'_6)$, получим окончательное выражение для $I_{yл}(T)$

$$I_{yл}(T) = \frac{\varphi_T(T)}{R'_6} \left\{ \ln \frac{\alpha_0(T) I_{\infty_0}(T) - I_{кo}(T) + \left[1 - \left(\frac{U_0}{U_{max}} \right)^n \frac{1-P}{\beta_m^n} \right] \times}{\cdot I_{\infty_0}(T) \left[\alpha_0(T) - 1 + \left(\frac{U_0}{U_{max}} \right)^n \frac{1-P}{\beta_m^n} \right]} \right. \\ \left. \frac{\left[\times \frac{\varphi_T(T)}{R_6 + r_6} + \frac{I_{кo}(T)}{\alpha_0(T)} - I_{\infty_0}(T) \right] - 1 - I_{кo}(T) \frac{R_6 + r_6}{\varphi_T(T) \alpha_0(T)}}{1} \right\}, \quad (14)$$

где β_m — коэффициент, учитывающий температурную нестабильность U_m ,

$$P = \left\{ \alpha_0(T) I_{\infty_0}(T) \left\{ \exp \left[- \frac{R_6 E_6}{\varphi_T(T) (R + R'_6)} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \frac{I_{кo}(T) (R_6 + R'_6)}{\varphi_T(T) \alpha_0(T)} + 1 \right] - 1 \right\} + I_{кo}(T) \right\} \left\{ \frac{\varphi_T T}{R_6 + r_6} - \frac{I_{кo}(T)}{\alpha_0(T)} + \right. \\ \left. + I_{\infty_0}(T) \left[\exp \left[- \frac{R_6 E_6}{\varphi_T(T) (R_6 + R'_6)} + \frac{I_{кo}(T) (R_6 + r_6)}{\varphi_T(T) \alpha_0(T)} + 1 \right] - 1 \right] \right\}^{-1}.$$

Величина S_0 определялась экспериментально. При линейно-логарифмической аппроксимации эту характеристику можно представить следующими примерными зависимостями: $S_0 = 0,2 - 0,278 U_0/U_{max}$ при $0,75 \leq U_0/U_{max} \leq 0,93$ и $S_0 = -1,363 + 1,4 U_0/U_{max}$ при $0,93 < U_0/U_{max} \leq 1$.

Из электрофизических параметров ЛТ наибольший вклад в изменение W_6 вносит вариация величин $I_{кo}$ и I_{∞_0} . Зависимость W_6 от U_0/U_{max} при различных величинах $I_{кo}$ и I_{∞_0} представлена на рис. 3. Как и в предыдущем случае, расчет производился для ступенчатого сигнала, работающей в типичном режиме [4]. Теоретические результаты хорошо совпадают с экспериментальными.

Учитывая реально существующий значительный разброс электрофизических параметров ЛТ, полученные результаты дают воз-

возможность обоснованно подходить к выбору параметров ЛТ и режима его работы в составе формирователей многочастотных сигналов для обеспечения высокой взаимной стабильности фазовых спектров сигналов нескольких формирователей. Так, для обеспечения минимальной температурной нестабильности фаз гармоник, вносимой ступенью на ЛТ, следует выбирать транзисторы либо с $I_{к0} \approx I_{э0} \leq \leq 1$ мкА, либо с $I_{к0} < I_{э0}$ и задавать режим работы с $U_0/U_{\max} = 0,98 \div 0,99$. Экспериментально установлено, что в этом случае абсолютная нестабильность фазы сотой гармоники (при частоте повторения импульсов 200 кГц) не превышала 2° при изменении температуры даже в больших пределах от 0 до 50° С. Эта рекомендация справедлива также для устройств, содержащих входную ступень, температурная зависимость W_6 которой имеет тот же знак, что и у ступени на ЛТ. В случае же, когда входная ступень вносит температурную нестабильность противоположного знака, например, как это имеет место при использовании ступени на арсенид-галлиевых туннельных диодах [4], целесообразно либо выбирать транзисторы с $I_{э0} < I_{к0}$ и обеспечивать $U_0/U_{\max} = 0,95 \div 0,97$, либо обеспечивать $U_0/U_{\max} = 0,90 \div 0,93$ при любом соотношении токов $I_{к0}$ и $I_{э0}$. Повышение температурной стабильности фазового спектра при таком режиме экспериментально подтверждено в работе [4].

1. *Виноградов Ю. В.* Основы электронной и полупроводниковой техники. М., Воениздат, 1963. 536 с. 2. *Дьяконов В. П.* Лавинные транзисторы и их применение в импульсных устройствах. М., Сов. радио, 1973, 306 с. 3. *Илисовский Ю. В.* Лавинные триоды.— В кн.: Полупроводники в науке и технике / Под ред. А. Ф. Иоффе. Ч. II. М., АН СССР, 1968, с. 104—143. 4. *Шарпан О. Б.* Фазостабильный генератор дискретного множества частот с высокой равномерностью спектров.— Приборы и техника эксперимента, 1975, № 5, с. 120—122.

Поступила в редколлегию 15.09.79

О. В. Scharpan

NICHTSTABILITÄT DER ZEITVERZÖGERUNG EINER LAWINENTRANSISTORRELAXAZIONSTUFE

Im vorliegenden Beitrag werden die Formeln für die Rechnung und die Experimentalresultaten der Nichtstabilität der Zeitverzögerung einer Relaxazionstufe auf den Lawinentransistor behandelt.