

РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ КОМПАРАТОРА НА ТУННЕЛЬНОМ ДИОДЕ

В. И. Калашников

Х а р ь к о в

В настоящее время для квантования по амплитуде аналоговых величин, представляемых электрическими напряжениями и токами, часто применяют пороговые устройства сравнения [1, 2]. Для реализации порогового устройства применяются как пассивные, так и активные нелинейные элементы. Первые в устройствах сравнения не дают гистерезиса, однако обладают малой крутизной в точке предполагаемого разрыва первого рода, вторые, обладая большой крутизной, вносят существенный гистерезис. Влияние последнего удастся значительно уменьшить соответствующей организацией управления, например, введением стробирования. В качестве активных нелинейных элементов удобно выбрать элементы с *S*- или *V*-образной вольт-амперной характеристикой (тиристоры, туннельные диоды и др.).

Особенности вольт-амперной характеристики туннельного диода позволяют построить схему с порогом по току. Последнее требует представления сравниваемых аналоговых величин в виде тока, что при сравнении напряжений в диапазоне ± 100 в достигается включением на входах больших сопротивлений. Внутреннее сопротивление самого туннельного диода даже в области вершины мало. Стабильность точек переключения зависит от ряда факторов: температуры, старения, шумов и пр. Ниже приводятся расчетные и экспериментальные данные пороговой схемы с туннельным диодом.

Результаты температурных исследований туннельных диодов

Температурная зависимость параметров экстремальных точек вольт-амперной характеристики туннельных диодов экспериментально исследована у 100 диодов типа ЗИ101Д. Средняя величина параметров точек экстремумов для этой партии диодов при 20° С составляла: $i_p = 2,01$ ма, $i_n = 105,2$ мв, $i_m = 0,21$ ма, $u_m = 0,522$ в. Вольт-амперные характеристики и отклонения снимались методом, близким к мостовому [3]. Для задания температуры в диапазоне 0 — 100° С использовался теплоизолированный стержень из меди, в определенных точках которого располагались полости, заполненные трансформаторным маслом. Торцы поддерживались при температуре 0 и 100° С. Малогабаритная головка с испытуемым диодом и элементами стабилизации на отрицательном участке погружалась в полость с маслом и за несколько секунд приобретала необходимую температуру. Получены следующие зависимости.

Ток максимума изменяется с температурой по кривой, близкой к параболе. На рис. 1 приведены наиболее характерные кривые, охватывающие

весь диапазон наблюдавшихся температурных коэффициентов при 20°C . График построен для отношений i_{p0} к i_{p20} и похож на кривые в работе [4], снятые в тех же координатах, но для различных концентраций носителей тока. Температурный коэффициент тока (ТКТ, отношение Δi_p к i_{p20}) для исследованных диодов изменялся от $-0,0005 \text{ 1/град}$ до $+0,0025 \text{ 1/град}$. В среднем для всей партии ТКТ составил $0,000975$, или в размерных величинах при 20°C — $+1,85 \text{ мкА/град}$.

Для большинства диодов максимум тока в температурных кривых находится в диапазоне $60\text{--}80^\circ \text{C}$. Использование зоны вблизи этого максимума позволяет получать $\text{ТКТ} \leq 0,0002$ в диапазоне $\pm 10^\circ \text{C}$ относительно точки максимума.

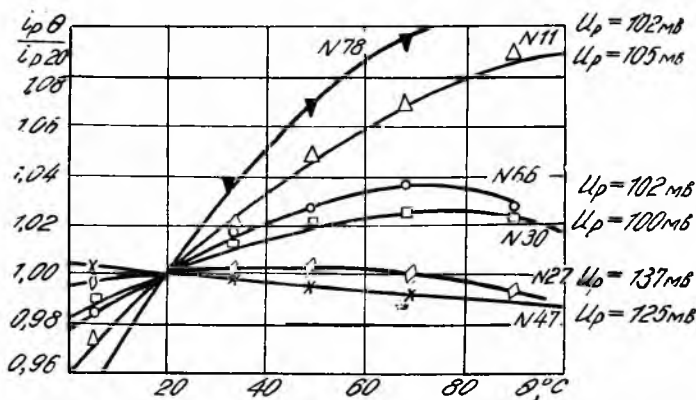


Рис. 1.

Напряжение тока максимума в выбранном диапазоне температур для всех диодов изменялось почти линейно и с незначительным наклоном. На рис. 2 показан ряд характерных зависимостей напряжений пика с большими температурными коэффициентами напряжения (ТКН). Для всей партии ТКН в среднем составил около $-0,00008 \text{ 1/град}$ (-8 мкВ/град).

Интересны результаты измерения ТКТ и ТКН минимума вольт-амперной характеристики. Абсолютные изменения тока в минимуме оказались в среднем на порядок меньшими, чем в максимуме, хотя изменения, отнесенные к току минимума, были аналогичны относительным изменениям тока максимума. Абсолютные изменения напряжения минимума на порядок больше, чем в максимуме, однако отнесенные к напряжению минимума — такие же.

Влияние температуры на стабильность пороговой схемы

Пороговое переключение по току в туннельном диоде получается при питании последнего от генератора тока. Нагрузочная линия при этом располагается параллельно оси напряжения, а функция выхода для точки (u_p, i_p) определяется как

$$f(i) < u_p, \quad i \leq i_p \left(1 \pm \frac{1}{2} \delta i_p\right);$$

$$f(i) > u_m, \quad i \geq i_p \left(1 \pm \frac{1}{2} \delta i_p\right);$$

$$i = \sum_{j=1}^n i_{\text{вх}j} + i_{\text{см}};$$

где u_p, u_m — соответственно напряжения максимума и минимума, определяющие собой уровни выходного сигнала;

i — питающий ток, который включает в себя как ток входных сравниваемых сигналов $i_{вх/}$, так и ток постоянного смещения $i_{см}$, служащий для задания и подстройки порогового уровня;

δi_p — суммарное относительное изменение величины пикового тока, связанное с нестабильностью параметров диода и обслуживающих цепей.

Величина δi_p определяет разрешающую способность устройства сравнения, построенного на основе порогового элемента. Отношение максималь-

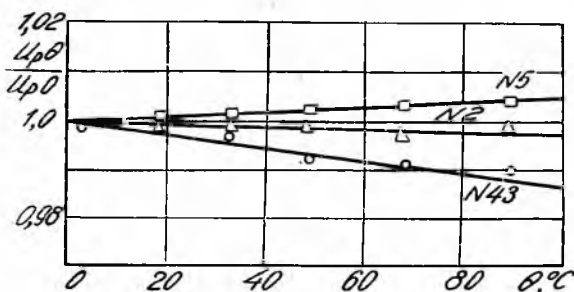


Рис. 2.

ной амплитуды сравниваемых значений к ширине зоны разбросов порогового уровня дает динамический диапазон изменения амплитуд

$$k_d = \frac{i_{вх/ \text{ макс}}}{i_p \delta i_p},$$

который для устройств с высокой разрешающей способностью должен быть выше 1000. Величину $i_{вх/ \text{ макс}}$ определяют предельно допустимые значения напряжений и токов на туннельном диоде, поэтому $i_{вх/ \text{ макс}} \leq i_p$.

Основную долю в δi_p составляют температурные изменения тока максимума диода и изменения параметров внешней для диода схемы. Введение термокомпенсирующих элементов в цепь питания устраняет температурную зависимость порогового уровня только при медленных изменениях внешней температуры. Эксперименты же показывают, что переключение туннельного диода из одного состояния в другое меняет температурный режим p - n перехода независимо от введенной термокомпенсации.

Была проведена теоретическая оценка температурных флуктуаций, вызванных переключениями. Для этого рассматривалась однородная тепловая модель p - n перехода в виде составной конструкции: цилиндрического столбика с мезоструктурным p - n переходом около середины и кристаллического основания — ограниченного полусферического пространства. Для случая ступенчатого изменения мощности путем решения соответственно двух уравнений теплопроводности была получена зависимость приращения температуры p - n перехода во времени

$$\Delta \vartheta = 3 \frac{P_0 \sigma_0}{\lambda} \left\{ \frac{1}{V \pi} \sqrt{\frac{t}{\tau_r}} \left(1 - e^{-\frac{\tau_r}{t}} \right) + \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{\tau_r}{t}} \right\} 10^4,$$

где P_0 — удельная мощность, выделяемая на переходе, вт/см^2 ;

λ — коэффициент теплопроводности арсенида галлия, равный $0,3 \text{ вт/см} \cdot \text{град}$;

t — время, мксек;

$\tau_r = 0,01 \frac{r_0^2}{a^2}$ — постоянная тепловой релаксации (мксек) при радиусе p - n перехода r_0 (мк) и $a^2 = \frac{\lambda}{c\tau}$ — коэффициенте температуропроводности ($\text{см}^2/\text{сек}$).

Ееличина площади p - n перехода была получена из концентрационных зависимостей основных параметров туннельного диода на основе арсенида галлия [4, 5] путем исключения концентраций из уравнений для параметров

$$S_0 = 0,272\pi C_p \left(15 - \lg \frac{i_p}{C_p}\right) \sqrt{\frac{\varphi_k - u_p}{\epsilon_r}} 10^{-6} \text{ см}^2,$$

где C_p — емкость p - n перехода туннельного диода, пф;

φ_k — контактная разность потенциалов, в;

ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость.

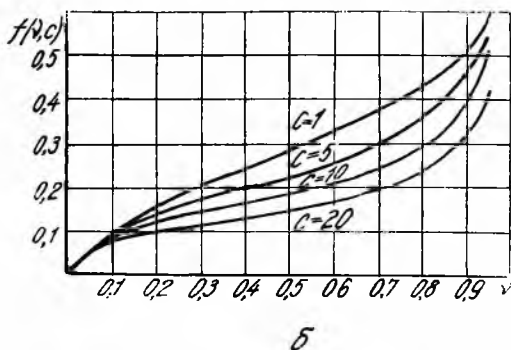
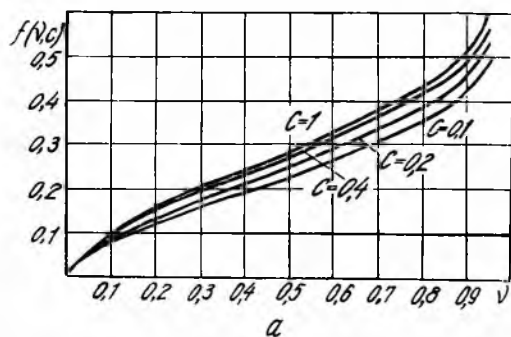


Рис. 3.

По площади легко находим радиус для полусферического или плоского p - n перехода. В испытанной партии радиус в среднем составил 12 мк, что хорошо согласуется с данными работы [4].

При мощности переключения $P_0 = i_p(u_{pp} - u_p) \frac{1}{S_0}$, где u_{pp} — напряжение на диффузионной ветви при токе i_p , изменение температуры p - n перехода, рассчитанное по приведенной выше формуле, составило 3°C . В экспериментах получались близкие по величине превышения.

Уменьшение этой флуктуации возможно двумя путями: организацией стробирования с определенными временными характеристиками и уменьшением переключаемой мощности. На рис. 3 приведены семейства кривых, связывающих относительную величину перегрева p - n перехода с относительными значениями периода $\left(c = \frac{T}{\tau_r}\right)$ и коэффици-

ента заполнения $\left(v = \frac{\tau_u}{T}\right)$ стробирующего импульса. Семейства построены в предположении, что переключение туннельного диода из одного состояния в другое происходит мгновенно, и позволяют выбрать временные параметры стробирования (τ_u , T) по известному τ_r . Второй путь связан с особенностью вольт-амперной характеристики туннельного диода, имеющей еще 2 точки с мощностями, равными мощности, рассеиваемой p - n переходом в точке макси-

мума тока. Одна точка располагается на обратной ветви характеристики и служит исходной рабочей точкой, в которой туннельный диод удерживается в отсутствие стробирующего импульса. Вторая точка находится за областью минимума на диффузионной ветви и может непосредственно фиксироваться в нужном месте входной цепью последующего усилителя.

Применение в компараторе перечисленных мероприятий позволяет уменьшить температурную флюктуацию до значений $\leq 0,2^\circ \text{C}$.

Быстродействие

Для выбора длительности стробирования важно знать динамические свойства порогового элемента при малых превышениях порогового тока, т. е. при превышениях, сравнимых с δi_p .

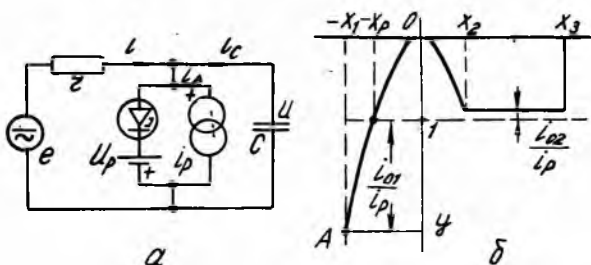


Рис. 4.

Времена переключения находились путем решения дифференциальных уравнений с аналитическим заданием формы вершины для эквивалентной схемы, приведенной на рис. 4, а. Экспериментально была получена формула для вольт-амперной характеристики в непосредственной близости к вершине

$$i_d = au^2(1 - bu),$$

где $-1,7 < a < -1,6$ мка/мв²,

$0,015 < b < 0,025$ 1/мв,

i_d — ток диода, мка,

u — напряжение на диоде, мв.

Если принять во внимание, что основное время в переходном процессе затрачивается на прохождение области вершины при $-5 \leq u \leq +5$ мв, то слагаемым в скобках (bu) можно пренебречь и использовать в уравнениях $i_d = au^2$. В результате уравнение переходного процесса для интервала $[x_1, x_2]$ (рис. 4, б) имеет вид

$$\frac{dx}{d\tau} = v - x - \alpha x^2,$$

где $x = \frac{u}{u_p}$ — относительное напряжение;

$v = \frac{e}{u_p}$ — относительное входное напряжение, создающее превышение тока в виде постоянной величины;

$u_p' = \sqrt{\frac{i_p}{a}}$ — расчетное значение пикового напряжения для нормального расположения координатных линий, вызванное тем, что принятая аппроксимация для i_d действительна с достаточной точностью лишь в области вершины;

$\alpha = r \sqrt{a i_p}$ — постоянный коэффициент, где r имеет размерность *ком*, если у a размерность *мка/мб²*;

$\tau = \frac{t}{rC}$ — относительное время;

$x_1 = \sqrt{1 + \frac{i_{01}}{i_p}}$ — начало интервала интегрирования (положение исходной рабочей точки);

$x_2 = \sqrt{1 - \frac{i_{02}}{i_p}}$ — граница нелинейного участка.

Разделяя переменные и интегрируя, получаем время переключения на нелинейном участке:

$$\tau_{n1} = \frac{2}{\sqrt{4\alpha y - 1}} \left\{ \operatorname{arctg} \frac{2\alpha x_2 - 1}{\sqrt{4\alpha y - 1}} - \operatorname{arctg} \frac{2\alpha x_1 - 1}{\sqrt{4\alpha y - 1}} \right\}.$$

Преобразуя подкоренное выражение $4\alpha y - 1 = 4\alpha^2 y - 1$, где $y = \frac{e}{r i_p}$, и пренебрегая единицами под корнем и в числителе после подстановки соответствующих коэффициентов, получим суммарное время подъема на вершину и скатывания к основанию

$$t_{n1} = \frac{B}{\sqrt{y}} \left\{ \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{1 - \frac{i_{02}}{i_p}}}{\sqrt{y}} + \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{1 + \frac{i_{01}}{i_p}}}{\sqrt{y}} \right\},$$

где $B = \frac{C}{\sqrt{a i_p}}$.

Если $C = 100$ *пф*, $i_p = 2000$ *мка*, $y = 0,001$, $\frac{i_{01}}{i_p} = 3$, $\frac{i_{02}}{i_p} = 0$, то $B = 1,74$, а время прохождения интервала $[x_1, x_2]$ равно 170 *нсек*.

При прохождении горизонтального участка от x_2 до x_3 время находится по формуле, полученной из решения линейного уравнения первого порядка

$$\tau_{n2} = \ln \frac{\alpha - x_2}{\alpha - x_3},$$

где $x_3 = \frac{u_{огр}}{u_p}$, $u_{огр}$ — максимальное напряжение на туннельном диоде после переключения, фиксируемое на требуемом уровне для уменьшения переключаемой мощности.

Если $r = 10$ *ком*, $C = 100$ *пф*, $i_p = 2000$ *мка*, $x_2 = 1$, $x_3 = 10$, то $t_{n2} = 20$ *нсек*.

Кроме времени срабатывания собственно туннельного диода в общее время срабатывания компаратора необходимо будет включить время, затрачиваемое на вывод туннельного диода из исходного положения при стробировании, и срабатывание последующего усилителя. Эти вопросы будут рассмотрены в следующей работе.

Влияние прочих факторов

На стабильность пикового тока туннельного диода оказывают влияние старение и внутренние шумы. Старение диодов во времени проявляется в том, что i_p и ряд других параметров подвергаются необратимому изменению, деградации. Аномальная деградация замечена у туннельных диодов из арсенида галлия при работе на диффузионной ветви с токами $\geq i_p$ [4]. При нормальной работе, особенно без захода на диффузионную ветвь, деградация не наблюдается, что позволяет при некоторых мерах предосторожности (ограничение напряжения) не принимать ее во внимание. В ра-

боте [4] приведено экспериментальное исследование условий старения, на основании которых можно заключить, что для построения компараторов, принципиально требующих периодической эксплуатационной подстройки, старение не является фактором, уменьшающим разрешающую способность или быстродействие.

О собственных шумовых свойствах туннельных диодов имеется ряд сведений в работе [6], которые позволяют пока не включать шумовые составляющие в δi_p , из-за их малости по сравнению с температурным дрейфом. Шумы же и дрейф внешних элементов схемы сравнимы с температурным дрейфом самого диода, причем основную долю внешних шумов вносят электростатические, электромагнитные и гальванические связи с токонесущими проводами работающей аппаратуры. Поэтому реализация высокой чувствительности полностью определяется эффективностью экранирования и развязок.

ВЫВОДЫ

1. Экстремальные точки вольт-амперной характеристики туннельного диода обладают большими температурными коэффициентами, если речь идет о применении их в компараторе.

2. Температурная зависимость для тока имеет вид параболы, что ограничивает возможность линейной температурной компенсации небольшим температурным диапазоном — 10 — 20° С.

3. Положение максимума температурной зависимости для большинства туннельных диодов в области 60—80° С позволяет, применив термостатирование при 70° С, существенно уменьшить температурный коэффициент тока (до 0,0002 1/град).

4. Переключение туннельного диода вызывает большую температурную флуктуацию пикового тока, уменьшить которую можно, введя стробирование с малым коэффициентом заполнения и выбрав рабочие точки с одинаковыми мощностями рассеяния.

5. Быстродействие туннельно-диодного компаратора в основном зависит от времени прохождения рабочей точкой вершины.

6. Старение и собственные шумы туннельного диода не ограничивают разрешающей способности и быстродействия пороговой схемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Кондалев. Преобразователи формы информации. Изд-во «Наукова думка», Киев, 1965.
2. А. П. Стахов. Исследование регенеративного компаратора с трансформаторной обратной связью. Сб. «Приборы и устройства средств автоматики и телемеханики», вып. 2. Изд-во ХГУ, Харьков, 1965.
3. Ю. И. Воронцов и др. Измерение параметров туннельных диодов. Сб. «Полупроводниковые приборы и их применение», вып. 7 (под ред. Я. А. Федотова). Изд-во «Советское радио», 1961.
4. Н. А. Белова, В. Л. Бонч-Бруевич и др. Туннельные диоды. Изд-во «Наука», 1966.
5. В. И. Фистуль, Н. З. Шварц. Туннельные диоды. «Успехи физических наук», вып. 1, т. 77, 1962.
6. Р. А. Валитов и др. Радиотехнические схемы на транзисторах и туннельных диодах. Изд-во «Связь», 1966.