

А. В. Носовский, Г. С. Полторапавлова,  
Б. С. Трухачев, Н. П. Удалов

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Трудности температурной стабилизации полупроводниковых тензопреобразователей в условиях меняющихся температур — основная причина, сдерживающая применение в промышленных приборах и системах. В настоящее время усилия разработчиков направлены на создание тензомодулей, выполняемых методами планарной технологии.

В работе рассмотрена температурная стабилизация преобразователей без применения полупроводниковых терморезисторов, которые в ряде случаев не могут обеспечить заданных точностных характеристик разрабатываемого устройства.

Из работ [1, 2, 3] и трудов 4 конференций по полупроводниковой тензометрии видно, что температурные характеристики тензорезисторов —  $R(T)$  достаточно хорошо изучены, и в зависимости от рабочего диапазона температур и требований к точности расчетов задаются в следующем виде:

$$\begin{aligned} R(T) &= R(1 + \delta \Delta T); & (a) \\ R(T) &= R(1 + \delta \Delta T + \gamma \Delta T^2), & (б) \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\delta$ ;  $\gamma$  — температурные коэффициенты сопротивления тензорезистора;  
 $\Delta T = T - T_0$ ;  $R$ ,  $T_0$  — соответственно номинальное сопротивление и номинальная температура.

$$R(T) = R \left( \frac{T}{T_0} \right)^a \quad (в)$$

$$R(T) = \frac{R \left( \frac{T}{T_0} \right)^a \cdot R_\infty e^{\frac{B}{T}}}{R \left( \frac{T}{T_0} \right)^a + R_\infty e^{\frac{B}{T}}} \quad (г)$$

Базируясь на знании этих характеристик можно предложить эффективные способы расчета термокомпенсаторов для полупроводниковых преобразователей, выполненных по мостовой схеме рис. 1а.

Аналитический метод выбора параметров компенсатора при этом можно базировать на условии наилучшего приближения температурной характеристики к требуемой характеристике одного из плеч преобразователя, которая обеспечит температурную стабилизацию всего устройства.

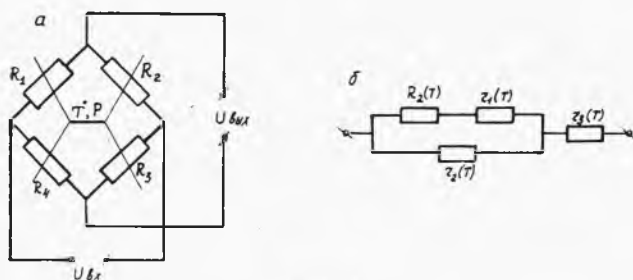


Рис. 1

В рассматриваемой работе температурные характеристики тензорезисторов использовались в виде 1б, поскольку эта зависимость удобна для аналитических расчетов и дает повышенную точность вычислений.

Из известных соотношений для мостовой схемы рис. 1 а [2] следует, что величина разбаланса  $\rho$  определится

$$\rho(T) = \left[ \frac{R_2(T)}{R_1(T) + R_2(T)} - \frac{R_3(T)}{R_3(T) + R_4(T)} \right] = \left[ \frac{R_2(1 + \delta_2 \Delta T + \gamma_2 \Delta T^2)}{R_1(1 + \delta_1 \Delta T + \gamma_1 \Delta T^2) + R_2(1 + \delta_2 \Delta T + \gamma_2 \Delta T^2)} - \frac{R_3(1 + \delta_3 \Delta T + \gamma_3 \Delta T^2)}{R_3(1 + \delta_3 \Delta T + \gamma_3 \Delta T^2) + R_4(1 + \delta_4 \Delta T + \gamma_4 \Delta T^2)} \right] \quad (2)$$

Если в качестве тензорезистора, например, подобрать сопротивление  $z(T)$  с температурной характеристикой

$$z(T) = R'(1 + \delta' \Delta T + \gamma' \Delta T^2),$$

при которой в заданном диапазоне температур  $\rho(T) = 0$ , то обеспечится температурная стабилизация всего устройства. Незвестные параметры температурной характеристики  $z(T)$  —  $R'$ ,  $\gamma'$ ,  $\delta'$ , можно определить из разложения в ряд функции  $\rho(T)$  по степеням  $\Delta T$ , ограничиваясь при этом второй степенью разложения.

Условия температурной стабилизации можно записать в следующем виде:

$$\rho(T) \Big|_{T=T_0} = 0; \quad \frac{\partial \rho(T)}{\partial T} \Big|_{T=T_0} = 0; \quad \frac{\partial^2 \rho(T)}{\partial T^2} \Big|_{T=T_0} = 0;$$

откуда для параметров температурной характеристики  $z(T)$  получаются следующие соотношения:

$$R' = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_4}; \quad \delta' = \delta_1 + \delta_3 - \delta_4; \quad \gamma' = \gamma_1 + \gamma_3 - \gamma_4 + (\delta_1 - \delta_4)(\delta_3 - \delta_4); \quad (3)$$

Если для температурных коэффициентов сопротивления тензорезистора  $R_2(T)$  выполняются неравенства

$$|\delta_2| > |\delta'|; \quad |\gamma_2| > |\gamma'|, \quad (4)$$

то тензорезистор  $R_2(T)$  можно использовать в качестве основы термокомпенсирующего двухполюсника (рис. 1 б). Температурная характеристика такого двухполюсника  $\Phi(T)$  на основе тензорезистора  $R_2(T)$  и линейных резисторов  $r_1(T)$ ,  $r_2(T)$ ,  $r_3(T)$  с температурными характеристиками  $r(T) = r(1 + \alpha \Delta T)$  запишется в следующем виде:

$$\Phi(T) = \frac{[R_2(1 + \delta_2 \Delta T + \gamma_2 \Delta T^2) + r_1(1 + \alpha_1 \Delta T)] r_2(1 + \alpha_2 \Delta T)}{R_2(1 + \delta_2 \Delta T + \gamma_2 \Delta T^2) + r_1(1 + \alpha_1 \Delta T) + r_2(1 + \alpha_2 \Delta T)} + r_3(1 + \alpha_3 \Delta T).$$

Для наилучшего приближения температурной характеристики компенсатора  $\Phi(T)$  к требуемой характеристике  $z(T)$  необходимо равенство соответствующих членов разложения рядов этих функций. Ограничиваясь 2-й степенью разложения функции  $\Phi(T)$  в ряд и приравнявая соответствующие члены разложения функции  $\Phi(T)$  и  $z(T)$ , получаем следующие соотношения для номиналов линейных резисторов  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ , где для простоты выкладок было принято  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha$ ;

$$r_1 = R_2 \left[ \frac{\sqrt{\frac{R'(\delta' - \alpha)}{R_2(\delta_2 - \alpha)} - 1}}{\frac{\gamma'}{(\delta' - \alpha)(\delta_2 - \alpha)} - \frac{\gamma_2}{(\delta_2 - \alpha)^2}} - 1 \right]; \quad (5)$$

$$r_2 = \frac{R_2 + r_1}{\sqrt{\frac{R'(\delta_2 - \alpha)}{R'(\delta' - \alpha)} - 1}};$$

$$r_3 = R' - (R_2 + r_1) \sqrt{\frac{R'(\delta' - \alpha)}{R'(\delta_2 - \alpha)}}.$$

Из условий физической реализуемости компенсатора ( $r_1 \geq 0$ ,  $r_2 \geq 0$ ,  $r_3 \geq 0$ ) из соотношений (5) вытекают требования на граничные значения номинала сопротивления тензорезистора  $R_2$ :

$$R_2 \geq \frac{R'(\delta' - \alpha)}{\delta_2 - \alpha} \left[ \frac{\gamma'}{(\delta' - \alpha)(\delta_2 - \alpha)} - \frac{\gamma_2}{(\delta_2 - \alpha)^2} + 1 \right]^2; \quad (6)$$

$$R_2 \leq \left\{ \sqrt{\frac{R'(\delta' - \alpha)}{\delta_2 - \alpha}} - R' \left[ \frac{\gamma'}{(\delta' - \alpha)(\delta_2 - \alpha)^2} - \frac{\gamma_2}{(\delta_2 - \alpha)^2} \right] \right\} \sqrt{\frac{R'(\delta' - \alpha)}{\delta_2 - \alpha}}.$$

Условия (4) и (6) определяют структурное включение тензорезисторов  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ , при котором возможно реализовать термокомпенсатор на базе одного из тензорезисторов, используя для этого всего лишь одно плечо мостового преобразователя.

Изложенная методика выбора параметров термокомпенсатора достаточно проста вследствие использования упрощенной температурной характеристики тензорезисторов, а также неучета высших членов разложения функций  $\rho(T)$  и  $\Phi(T)$ . Указанные

обстоятельства приводят к уходу нуля преобразователя при значительном увеличении диапазона рабочих температур  $T_1 \div T_2$ . Кроме того, необходимо подчеркнуть достаточно большой объем вычислений в процессе поиска физически реализуемого варианта включения тензорезисторов  $R_1, R_2, R_3, R_4$  в схему преобразователя, при котором выполняются условия (4) и (6).

В этом плане представляется достаточно эффективным использование ЭВМ для решения задачи термокомпенсации.

Температурная характеристика тензорезисторов может быть задана одной или несколькими зависимостями вида (1), по возможности достаточно точно описывающими реальную характеристику каждого экземпляра тензорезистора.

Точное задание температурных характеристик позволит поставить оптимальную задачу термокомпенсации. Сформулируем критерий качества термостабилизации преобразователя, который предопределяет выбор оптимальных значений параметров термокомпенсатора  $r_1, r_2, r_3$  (рис. 1 б). При этом предполагается, что первая часть задачи термокомпенсации решена, т. е. найдено структурное включение тензорезисторов и определен базовый тензорезистор (для конкретности положим  $R_2$ ) для термокомпенсатора. Тогда температурная характеристика термокомпенсатора на основании рис. 1 б запишется в следующем виде:

$$Z(T) = \frac{[R_2(T) + r_1(T)] r_2(T)}{R_2(T) + r_1(T) + r_2(T)} + r_3(T). \quad (7)$$

Температурный разбаланс мостовой схемы при некоторой температуре  $\tau$  обозначим через  $\rho(\tau)$ . Как видно из рис. 2,  $\rho(\tau) \Delta\tau$  — элемент площади под кривой температурной нестабильности преобразователя.

Следовательно, мерой температурной нестабильности моста на интервале температур  $T_1 \div T_2$  можно считать определенный интеграл

$$I = \int_{T_1}^{T_2} |\rho(\tau)| d\tau = \int_{T_1}^{T_2} \left| \frac{Z(\tau)}{R_1(\tau) + Z(\tau)} - \frac{R_3(\tau)}{R_2(\tau) + R_4(\tau)} \right| d\tau \quad (8)$$

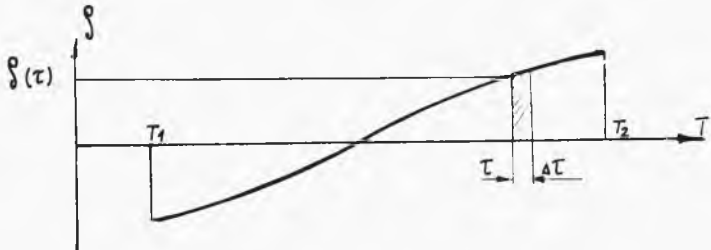


Рис. 2

характеризующий качество температурной стабилизации преобразователя. Цель задачи сводится к определению параметров компенсатора  $r_1, r_2, r_3$ , которые доставят минимум интегральному критерию (8).

По условию физической реализации компенсатора все номиналы линейных резисторов должны быть положительными, т. е.

$$r_1 \geq 0; \quad r_2 \geq 0; \quad r_3 \geq 0. \quad (9)$$

Для учета ограничений (9) на оптимизируемые параметры воспользуемся штрафными функциями, которые в простейшем случае представляются в следующем виде:

$$\zeta_1 = e^{-r_1}; \quad \rho_2 = e^{-r_2}; \quad \zeta_3 = e^{-r_3}. \quad (10)$$

Линейная связка интегрального критерия (8) и всех функций штрафа определит обобщенный критерий качества термостабилизации

$$V = I + \sum_k \zeta_k = \int_{T_1}^{T_2} |p(\tau)| d\tau + \sum_k \zeta_k, \quad (11)$$

который учитывает как основной интегральный критерий (8), так и все ограничения на оптимизируемые параметры (9).

Обобщенный критерий качества (11) минимизируется по параметрам  $r_1, r_2, r_3$  произвольным машинным методом. В частности, можно воспользоваться наиболее простым градиентным методом минимизации функционалов [4, 5].

Рекуррентные соотношения в этом случае для оптимизируемых параметров записываются в следующем виде:

$$r_i [n] = r_i [n - 1] - \frac{\frac{\partial V}{\partial r_i}}{\sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial V}{\partial r_i}\right)^2}} ml,$$

где  $i$  — количество оптимизируемых параметров,  $l$  — шаг итерации;  $m$  — константа, соответствующая условию  $V_{m-1} > V_m < V_{m+1}$ .

Рассмотренные способы расчета параметров термокомпенсаторов позволяют значительно снизить затраты времени разработчика на подбор элементов схемы термостабилизации.

Решение задачи температурной стабилизации тензопреобразователя градиентным методом минимизации функционалов на ЭВМ позволяет снизить трудоемкость определения элементов схемы и определить физически реализуемую структуру термокомпенсатора с оптимальными параметрами. При этом температурные характеристики тензорезисторов задаются на основе экспериментальных данных, что позволяет получить в итоге минимальное расхождение между расчетными и экспериментальными результатами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Трухачев Б. С., Удалов Н. П. Полупроводниковые тензорпреобразователи. М., «Энергия», 1968.
2. Ильинская Л. С. «Полупроводниковые тензодатчики». М., «Энергия», 1966.
3. Трухачев Б. С., Удалов Н. П., Смыслов И. И. Монокристаллический терморезистор из дендрита германия. Научные труды ГИРЕД-МЕТА, т. XXVII. Изд-во «Металлургия», 1969.
4. Поляк Б. Г. Градиентные методы минимизации функционалов. Журнал вычислительной математики и математической физики. 1963. т. 3, № 4.
5. Келли Г. Дж. Методы оптимизации с приложением к механике космического полета. «Наука», 1965.

Л. Е. Починок, М. А. Федоров, В. Д. Фалкин

### КОМПЕНСАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ТОКОВИХРЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Одной из наиболее трудно устранимых погрешностей накладного токовихревого преобразователя (НТВП) является температурная погрешность, то есть погрешность изменения параметров преобразователя в зависимости от температуры окружающей среды.

Как показано в работе [1] полное сопротивление ТВП может быть представлено выражением

$$Z = R_0 + j\omega(L_0 - M) + \frac{\rho_n}{\mu_0} \cdot \left[ -\frac{\partial M}{\partial H} \right], \quad (1)$$

где  $R_0$ —активное сопротивление катушки преобразователя;  $L_0$ —индуктивность катушки преобразователя при отсутствии измеряемого объекта;  $M$ —взаимная индуктивность между катушкой преобразователя и ее зеркальным изображением;  $\mu_0$ —магнитная проницаемость пустоты;  $\rho$ —волновое сопротивление на поверхности контролируемой неферромагнитной пластины;  $H$ —расстояние между катушкой преобразователя и контролируемой пластиной.

$$\frac{\partial M}{\partial H} = -\frac{\mu_0 \frac{H}{a}}{\sqrt{4 + \left(\frac{H}{a}\right)^2}} \left[ -K_k + \frac{2 + \left(\frac{H}{a}\right)^2}{\left(\frac{H}{a}\right)^2} \cdot E_{(k)} \right];$$

$K_k$  и  $E_k$ —эллиптические интегралы первого и второго рода;  $a$ —средний радиус катушки преобразователя. Сопротивление  $\rho_n$  определяется формулой

$$\rho_n = \operatorname{Re}(\rho_n) + j \operatorname{Im}(\rho_n) \quad (2)$$