

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**О.А. Ныркова**

*Кафедра «Электрооборудование и автоматизация», ТГТУ*

*Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым*

**Ключевые слова и фразы:** информативные параметры; статический процесс; теплофизические измерения.

**Аннотация:** Для повышения метрологической эффективности теплофизических исследований предложена методика определения информативных параметров статической характеристики полупроводниковых датчиков температуры, включающая математическое и метрологическое обеспечение.

---

Компьютерная теплофизическая система включает микропроцессорные средства и термозонд, который привносит доминирующую погрешность в процесс контроля. Основной частью термозонда является датчик температуры, реализованный на полупроводниковом приборе (ПП), который служит для преобразования температуры в электрические сигналы (напряжение  $U$  или ток  $I$ , сопротивление  $R$  или проводимость  $Y$ ), связанные между собой.

В настоящее время используются два основных режима функционирования ПП, в основе которых зависимость электрических параметров от температуры принимают линейной или нелинейной. При больших сигналах используют линеаризованный участок вольтамперной характеристики (ВАХ), характеризующийся значительной погрешностью преобразования. Большинство термограмм имеют микровольтовый уровень, что соответствует нелинейному участку ВАХ. Из-за недостаточного понимания физики процесса работы полупроводниковых датчиков ВАХ описывают степенными, экспоненциальными или логарифмическими полиномами, в основе которых лежит математическая статистика, где используемые коэффициенты неинформативны и от эксперимента к эксперименту требуют пересчета. Для устранения методической и инструментальной погрешностей необходимо использовать аналитическую модель полупроводникового датчика.

Целью данной работы является получение методики определения информативных параметров для метрологического обеспечения теплофизических исследований. Для реализации цели необходимо решить следующие задачи:

- создать математическое обеспечение;
- разработать метрологическое обеспечение.

Математическая модель в виде вольтамперной характеристики диода:

---

Работа выполнена под руководством заслуженного изобретателя РФ, д.т.н., профессора Е.И. Глинкина.

$$I = I_d \left( e^{\frac{U}{U_d}} - 1 \right). \quad (1)$$

Для реализации модели (1) необходимо составить систему уравнений на базе двух проведенных экспериментов ( $U_1, I_1, U_2, I_2$  - две пары данных, снятые в экспериментах) на одной пробе материала:

$$\begin{cases} I_1 = I_d \cdot (e^{\frac{U_1}{U_d}} - 1) \\ I_2 = I_d \cdot (e^{\frac{U_2}{U_d}} - 1). \end{cases} \quad (2)$$

Для расширения диапазона значений, которые могут быть использованы в расчете диффузионного сопротивления, проводим эксперимент так, чтобы значения измеряемого тока распределились по линейному закону

$$I_2 = n \cdot I_1,$$

где  $n = 2, 3, \dots$  - номер эксперимента.

После несложных преобразований получим  $U_d$  и  $I_d$ :

$$U_d = \frac{U_i - U_j}{\ln\left(\frac{I_i + I_d}{I_j + I_d}\right)}, \quad (3)$$

$$I_{d_{k+1}} = \frac{I_i}{\left(\frac{I_i + I_{d_k}}{I_j + I_{d_k}}\right)^{\frac{U_i - U_j}{U_d}} - 1}. \quad (4)$$

Для расчета диффузионного тока, приведенного в неявной форме (4), введем критерий оценки адекватности последующего  $I_{d_{k+1}}$  с предыдущим значением  $I_{d_k}$  ( $k = 1, \dots, m$  - число итераций)

$$\frac{I_{d_{k+1}} - I_{d_k}}{I_{d_{k+1}}} \leq \varepsilon_0, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_0 = 0,001$  - допустимая погрешность.

Алгоритм расчета заключается в следующем:

- первоначальное значение  $I_{d_0}$  получаем по формуле (4) при  $I_{d_k} = 0, k = 1$ ;
- последующее значение  $I_{d_{k+1}}$  получим из выражения (4) при использовании  $I_{d_k}$  ( $k = 2, \dots, m$ );
- по итеративному критерию (5) проверяем выполнимость данного соотношения;
- если соотношение (5) выполняется, то расчет  $I_d$  по формуле (4) прекращается и последний результат итерации принимается за действительное значение диффузионного тока;
- если соотношение (5) не выполняется, то осуществляется следующая итерация.

По известному значению диффузионного тока находят диффузионное напряжение (4). Значения  $I_{d_{кон}}$  и  $U_d$  используют для определения диффузионного сопротивления  $R_d$  и построения ВАХ. Теоретическая ВАХ при этом должна максимально совпадать с экспериментальной. Напряжение на измерительной ячейке в ходе эксперимента будет изменяться по логарифмическому закону.

Погрешность моделируемых ВАХ с экспериментом рассчитывается как средне-квадратичное отклонение (СКО)  $\alpha$ :

$$\alpha = \sqrt{\eta \prod_{i=1}^n \varepsilon_i}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_i = \frac{I_{\text{экс}} - I_i}{I_{\text{экс}}}$  - относительная погрешность  $s$ -ого шага оценки  $i = \overline{0, n}$ .

При этом напряжение на измерительной ячейке в ходе эксперимента будет изменяться по логарифмическому закону

$$U_i = U_d \cdot \ln(i + 1).$$

Применим предложенный способ определения информативных параметров по токам на экспериментальной ВАХ.

Для более точного определения оптимальных режимных параметров осуществляется процесс нормировки значения шкал экспериментальной ВАХ и последующий анализ ведется с применением алгоритма расчета информативных параметров, описанного выше.

В процессе поиска оптимальных режимных параметров предложенного способа построен ряд ВАХ на основе перебора значений тока. Т.е. выбранное значение тока, относительно которого происходит перебор, является постоянным до последнего значения ( $i=1; j=i+1, \dots, p$ ). Аналогично выбирается следующее значение, относительно которого также осуществляется перебор токов ( $i=2; j=i+1, \dots, p$ ). Этот процесс осуществляется до тех пор, пока постоянным значением окажется предпоследнее значение ( $i=n-1; j=p$ , где  $n=p$ ).

На рис. 1 показано оптимальное сближения кривых в режимных условиях  $i=5$ ,  $j=6-8$ , где СКО не более 2%.

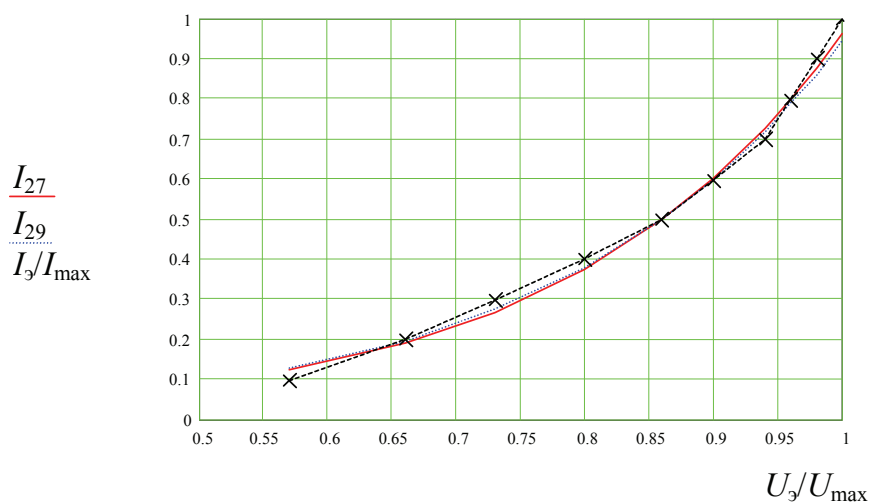
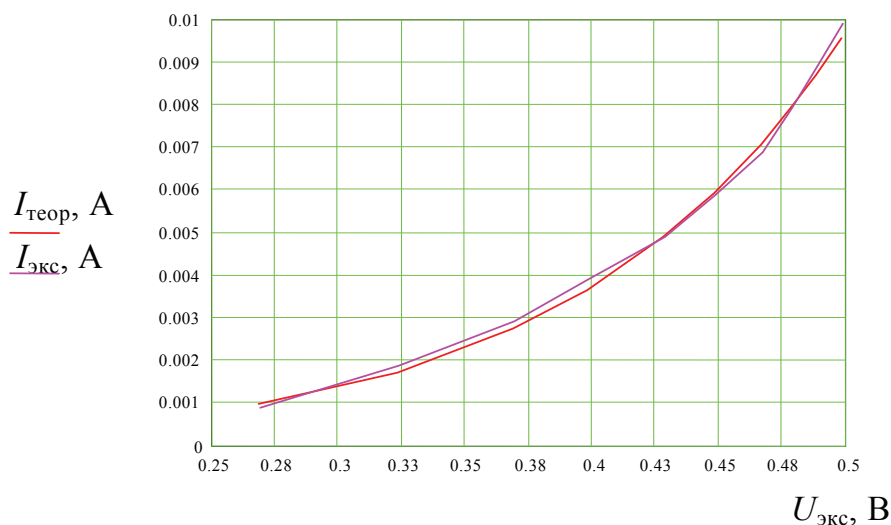


Рис. 1 ВАХ для  $\{i, j\} = \{5, 6 \text{ и } 8\}$

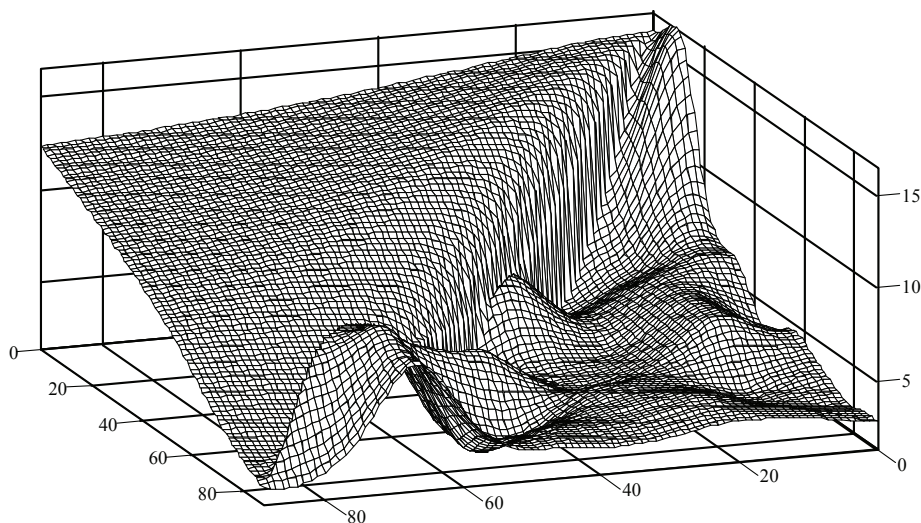
Для достоверности полученный результат необходимо проверить на примере вольтамперной характеристики другого диода (рис. 2).



**Рис. 2 Сопоставление моделируемой ВАХ и экспериментальной при  $\{i, j\} = \{5, 8\}$**

При этом получаем СКО адекватности полученной ВАХ 2%, что соответствует нормам.

На рис. 3 наилучшим образом показана закономерность поведения зависимости СКО от соотношений измеряемых токов.



**Рис. 3 Гистограмма СКО от режимных параметров**

Таким образом, разработана методика определения информативных параметров статической характеристики полупроводниковых датчиков температуры для повышения метрологической эффективности теплофизических исследований.

**Methods of Informative Parameters Determination  
for Metrology Provision of Thermal Physical Research**

**O.A. Nyrkova**

*Department "Electric Equipment and Automation", TSTU*

**Key words and phrases:** informative parameters; static process; thermal physical measurements.

**Abstract:** To increase metrology efficiency of thermal physical research methods of determining informative parameters of static feature of semi-conductor temperature-sensitive element including mathematical and metrological provision are suggested.

---

**Methodik der Bestimmung der informativen Parameter  
für die metrologischen Versorgung der wärmephysikalischen  
Untersuchungen**

**Zusammenfassung:** Für die Erhöhung der metrologischen Effektivität der wärmephysikalischen Untersuchungen ist es die die mathematische und metrologische Versorgung erhaltene Methodik der Bestimmung der informativen Parameter der statischen Charakteristik der halbleitenden Temperatursensoren vorgeschlagen.

---

**Méthode de la définition des paramètres d'information  
pour l'assurance métrologique des études thermophysiques**

**Résumé:** Pour l'augmentation de l'efficacité métrologique des études thermophysiques est proposée la méthode d'information de la caractéristique statistique des éléments thermométriques comprenant l'assurance mathématique et métrologique.

---