

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИОДНОЙ ТЕРМОМЕТРИИ

Ю. М. Шварц, А. Н. Иващенко, М.М.Шварц, Д.П. Копко,
В.И. Карташев*, Н.Д. Луценко*,
Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАН Украины
*Укрметртестстандарт

Введение

В последние годы в западных странах, в первую очередь в США, успешно развивается полупроводниковая диодная термометрия [1]. Это обусловлено такими преимуществами термодиодов (ТД) перед термометрами сопротивлениями (ТС): более высокий уровень сигнала, более высокая чувствительность в рабочем диапазоне температур, удобство в использовании, низкая стоимость и малые габариты.

В ИФП им. В.Е. Лашкарева НАН Украины в рамках нового научно-технического направления – создание новых типов конкурентоспособных полупроводниковых приборов экстремальной электроники, разработаны с использованием только отечественных сырьевых ресурсов и технологий микроэлектронные кремниевые ТД. Разработанные нами ТД позволили расширить круг потенциальных возможностей применения таких датчиков в ракетно-космической технике, атомной и тепловой энергетике, медицине и т.д. [2].

В то же время разработку и организацию производства конкурентоспособных ТД в нашей стране, их широкое применение тормозит морально устаревшая, не обеспеченная современными средствами измерительной техники и оборудованием, техническая база метрологического обеспечения (МО) диодной термометрии.

Поэтому целью работы являлась создание МО диодной термометрии, которое соответствует высоким требованиям современной метрологии.

Автоматизированная установка для градуировки диодных датчиков

Градуировка состоит в установлении соответствия между температурой T и падением напряжения U на ТД при пропускании через него прямого постоянного тока I , и осуществляется с помощью автоматизированной установки. В состав разработанной установки, блок-схема которой показана на рис. 1, входят:

- гелиевый криостат А280 и термостат ТМ-2М с блоками выравнивания температуры (БВТ), в которых располагают по два рабочих эталонных ТС (типа ТСПЖН-2 и ТСП, соответственно) и ТД;

- микропроцессорный блок эталонных ТС, включающий источники постоянного высокостабильного тока величиной 0,3; 0,5 и 1 мА, электронные коммутаторы,

позволяющие изменять направление тока, измерители напряжения, блок управления, блок интерфейса RS485;

- три микропроцессорных блока термодиодов, которые включают перестраиваемые источники постоянного тока величиной 1, 10 и 100 мкА, измерители напряжения, блок управления, 4-х проводные электронные коммутаторы и блок интерфейса RS485;

- блок поверки, состоящий из мер электрического сопротивления класса 0,01 с номинальным сопротивлением 1, 10 и 100 кОм, класса 0,05 с номинальным сопротивлением 1 МОм и меры эдс класса 0,001;

- преобразователь интерфейса RS485/RS232 для подключения к компьютеру.

Разработка установки проведена с учетом требований к высокой точности градуировки ТД [3].

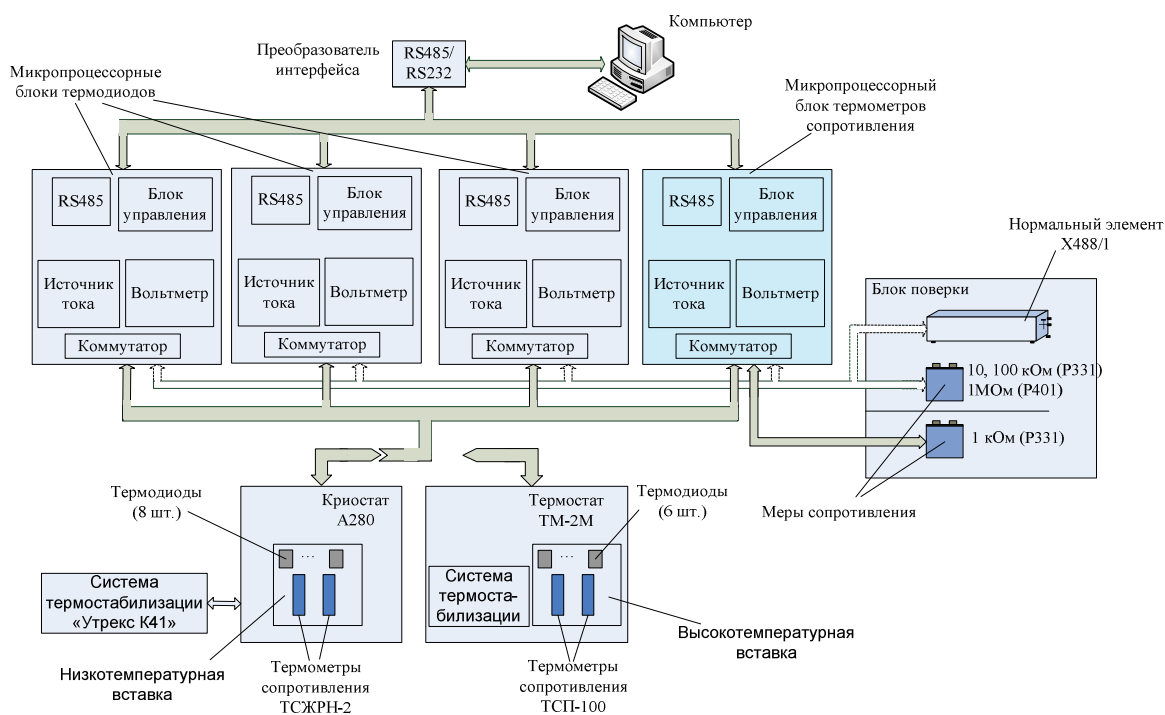


Рис. 1. Блок-схема автоматизированной установки для градуировки термодиодов.

Для градуировки в диапазоне температур 4,2-373 К используется криостатная система с гелиевым проточным криостатом А280 (рис. 2) и электронной системой термостабилизации «Утрекс К41». В диапазоне температур 373-423 К градуировка проводится с использованием сухоблочного термостата типа ТМ-2М (рис. 3).

После задания определенной температуры в блоке управления криостата/термостата производится автоматический контроль температуры, градиента теплового поля и скорости изменения температуры в БВТ. Температура в БВТ определяется с помощью двух

эталонных ТС методом сравнения с мерой электрического сопротивления. Влияние паразитных термоэдс исключается изменением направления рабочего тока ТС (рис. 4).

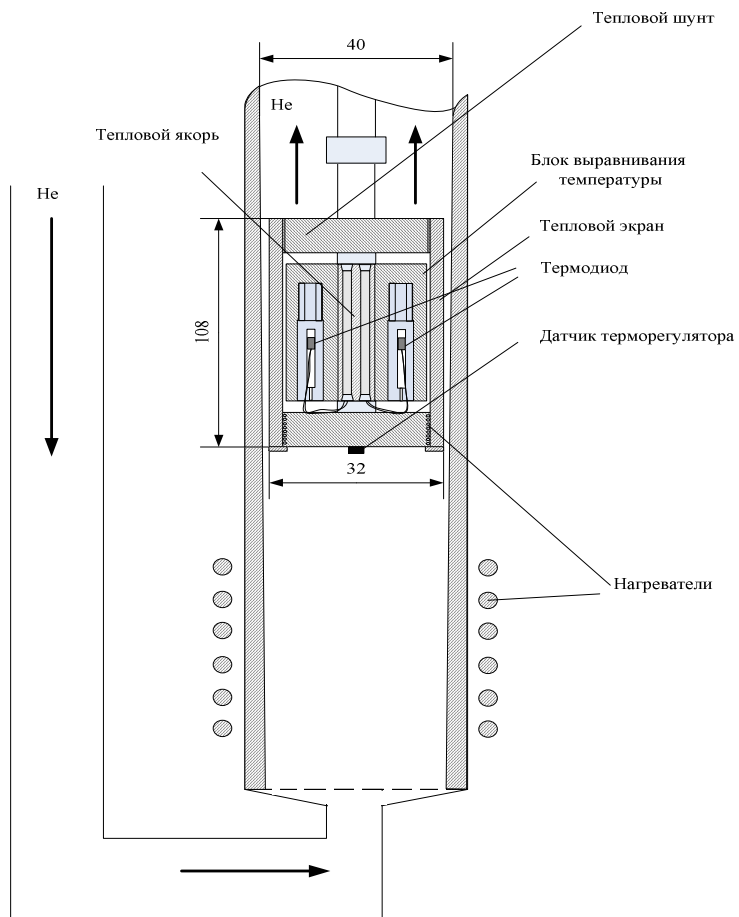


Рис. 2. Упрощенная схема криостата А280.

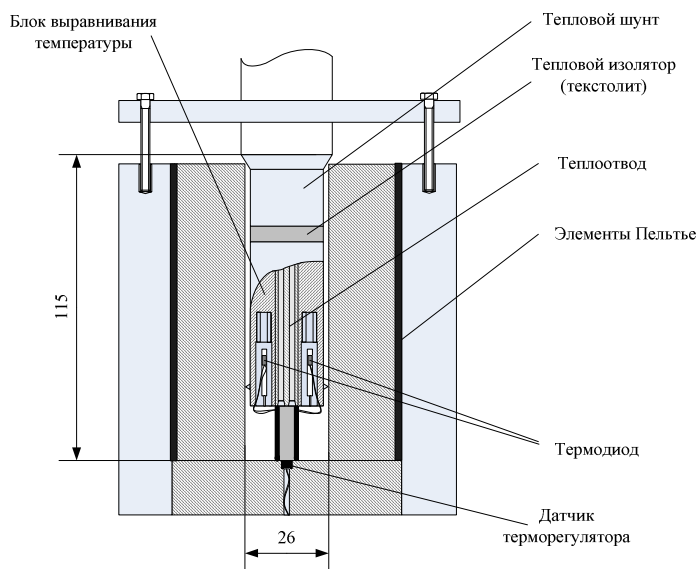


Рис. 3. Упрощенная схема термостата ТМ-2М.

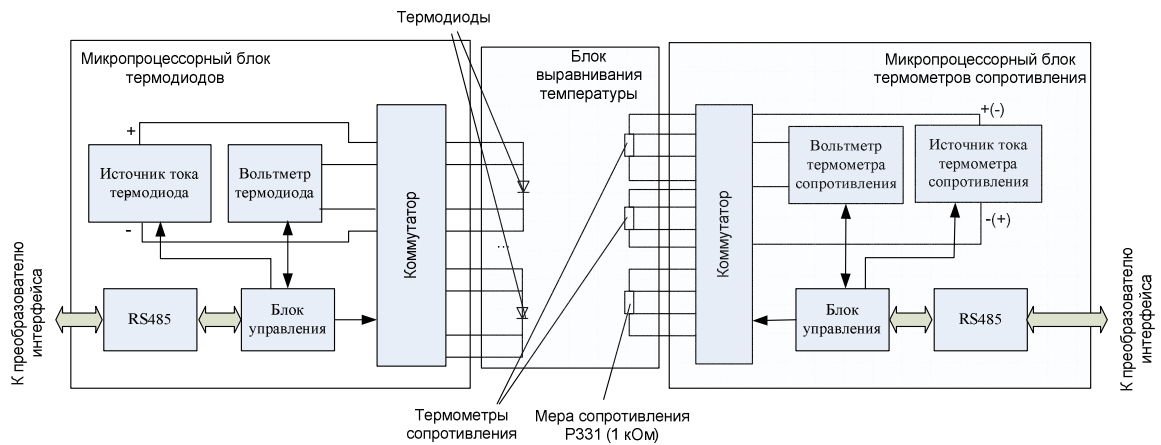


Рис.4. Четырехпроводная схема измерения для термодиодов и рабочих эталонов сопротивления.

Во время измерений через ТС и меру электрического сопротивления пропускается один и тот же ток в прямом и обратном направлении. Сопротивление рабочего эталонного термометра R_{TC} рассчитывается из выражения:

$$R_{TC} = \frac{U_{TC}^+ + U_{TC}^-}{U_{MC}^+ + U_{MC}^-} \cdot R_0, \quad (1)$$

где U_{TC}^+ , U_{TC}^- - падение напряжения на ТС при прямом и обратном направлениях тока, соответственно, U_{MC}^+ , U_{MC}^- - падение напряжения на мере сопротивления при прямом и обратном направлениях тока, соответственно, R_0 - номинальное значение меры электрического сопротивления.

По полученному значению R_{TC} и градуировочной характеристике определяется температура как среднее арифметическое показаний двух ТС: $T = (T_1 + T_2)/2$, где T_1 и T_2 - показания первого и второго ТС, соответственно.

Используя два ТС, находим градиент теплового поля Δ_T и скорость изменения температуры V_T :

$$\Delta_T = T_1(t_1) - T_2(t_1); \quad (2)$$

$$V_T = \frac{T_1(t_1) - T_1(t_2) + T_2(t_1) - T_2(t_2)}{2 \cdot (t_2 - t_1)}, \quad (3)$$

где t_1 , t_2 - время первого и второго измерений температуры; $T_1(t_1)$, $T_1(t_2)$ - температура первого ТС в момент времени t_1 и t_2 , соответственно; $T_2(t_1)$, $T_2(t_2)$ - температура второго ТС в момент времени t_1 и t_2 , соответственно.

После стабилизации температуры ($\Delta_T \leq 0.02$ К и $V_T \leq 0.01$ К/мин) производится поочередное измерение падения напряжения на градуируемых датчиках при выбранном рабочем токе и последующая обработка данных.

Технические характеристики разработанной ИИС представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики автоматизированной установки для градуировки термодиодов

Диапазон температур, К	4,2...423
Рабочие токи термодиодов, мкА	1, 10, 100
Диапазон измерения напряжения, В	0...2,5
Абсолютная погрешность измерения температуры: в диапазоне 4,2...373 К в диапазоне 373...423 К	$\pm 0,02$ $\pm 0,04$
Относительная погрешность измерения напряжения, %	0,0025
Относительная погрешность рабочего тока термодиодов, %	0,05
Суммарная погрешность градуировки термодиодов, К	$\pm 0,05$
Количество одновременно градуируемых термодиодов, шт.: в диапазоне 4,2...373 К в диапазоне 373...423 К	8 6
Стабильность поддержания температуры, К/мин	$\pm 0,001$
Потребляемая мощность, кВт, не более	2,5

Методы и средства испытаний стабильности диодных датчиков

Испытания ТД на стабильность проводятся в реперных высокотемпературных точках, при температуре кипения жидкого азота и жидкого гелия. Метод исследования стабильности включает измерение падения напряжения на ТД при пропускании через него постоянного прямого тока, определение температуры по калибровочной кривой, и сравнение показаний с температурой, регистрируемой с помощью рабочего эталона.

Реперные высокотемпературные точки. Испытания стабильности ТД в диапазоне температур от нуля до 231,928°C проводятся на установке вторичного эталона единицы температуры ВЕТУ-06-05-01-98. Оборудование изготовлено в НПО ВНИИМ им. Д.И.Менделеева (г. Санкт-Петербург, Россия), аттестовано в Национальном научном центре «Метрология», г. Харьков. Для воспроизведения температуры реперных точек используются ампулы с веществами со степенью очистки 99.999 %:

- ампула тройной точки воды (температура 0,01°C), погрешность воспроизведения температуры $\pm 1,2 \cdot 10^{-4}$ °C;

- ампула с галлием (температура плавления 29,7646 °C), погрешность воспроизведения температуры $\pm 1,9 \cdot 10^{-4}$ °C;

- ампула с индием (температура затвердевания 156,985 °C), погрешность воспроизведения температуры $\pm 3,8 \cdot 10^{-4}$ °C;

- ампула с оловом (температура затвердевания 231,928 °C), погрешность воспроизведения температуры $\pm 4,6 \cdot 10^{-4}$ °C ;

- платиновый преобразователь сопротивления с абсолютной погрешностью $\pm 0,005$ К.

Стабильность термодиодов при температуре кипения жидкого азота.

Метрологические исследования показали, что неоднородность теплового поля в БВТ при погружении в жидкий азот не превышает $\pm 0,02$ К. Режим теплового равновесия БВТ во времени контролируется с использованием расчетного параметра:

$$V_{Tc} = \frac{T(t_1) - T(t_2)}{(t_2 - t_1)}, \quad (4)$$

где $T(t_1)$ и $T(t_2)$ – температура, измеренная рабочим эталонным ТС в моменты времени t_1 и t_2 , соответственно.

При выполнении условия $V_T \leq 0.01$ К/мин с помощью ТС определяют температуру среды измерения, затем через диоды пропускают прямой рабочий ток (1, 10 или 100 мкА) и измеряют падение напряжения. Для минимизации погрешности выполняется не менее 5 измерений, каждое из которых проводится многократно (объем выборки 30) с последующим усреднением.

Стабильность ТД при температуре жидкого азота в температурном эквиваленте определяется из выражения:

$$\Delta T_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{U_{Di} - U_{D1}}{S_D} \right), \quad (5)$$

где U_{D1} и U_{Di} - падение напряжения на ТД при первом и i -ом измерениях, соответственно, S_D - температурная чувствительность ТД при температуре жидкого азота, n – число измерений.

Стабильность термодиодов при температуре кипения жидкого гелия. Контроль температуры осуществляется германиевым термосопротивлением типа ТПК, производства СКТБ с ОП ИФП им. В.Е. Лашкарева НАН Украины, точность $\pm 0,01$ К. После погружения вставки с датчиками в гелиевый дьюар и установления теплового равновесия выполняется измерение падения напряжения на диодах и обработка данных, аналогично описанной выше методике.

Прикладное программное обеспечение для расчета характеристик датчиков

Для определения характеристик ТД нами разработан пакет прикладных программ «АДТ-1» [4], позволяющий проводить фильтрацию и аппроксимацию полученных данных с заданной точностью и представлять результаты градуировки в виде интерполяционной таблицы с требуемым шагом.

Представление зависимости $U(T)$ в виде функции удобной для использования на практике производится в виде полиномов Чебышева:

$$T = \sum_{i=0}^N a_i \cdot \cos(i \cdot \arccos(x)), \quad (6)$$

где U_H , U_B - наименьшее и наибольшее значение напряжения; T - температура, К; N -

максимальная степень полинома; $x = \frac{(U-U_H)-(U_B-U)}{U_B-U_H}$ - нормированное значение

напряжения; a_i - коэффициенты полинома.

Результаты измерений и расчета зависимости $U(T)$, а также температурные зависимости чувствительности dU/dT разработанных термодиодов представлены на рис. 5. Разработанный метод аппроксимации описывает все характерные особенности, которые наблюдаются экспериментально.

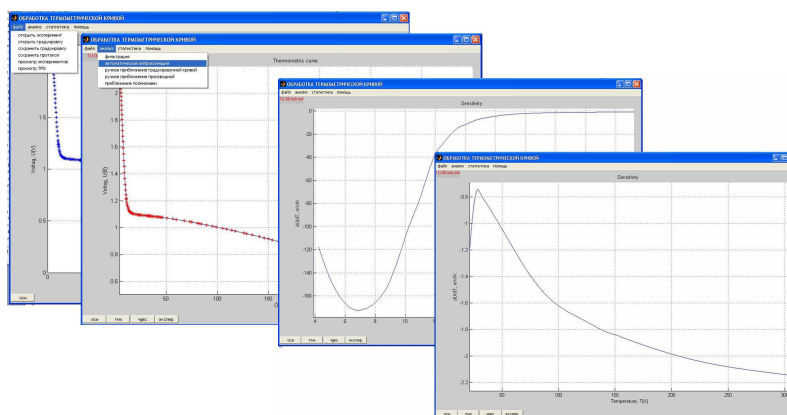


Рис. 5. Измеренные и расчетные зависимости $U(T)$ и dU/dT термодиодов, разработанных в ИФП им. В.Е. Лашкарева НАН Украины. Рабочий ток 1 мкА.

Выводы

Таким образом, с учетом современных требований разработано метрологическое обеспечение диодной термометрии, которое включает эталонные средства измерения температуры, автоматизированную установку и оборудование для градуировки ТД в диапазоне 4,2...423 К, методы и средства испытаний стабильности датчиков, прикладное

программное обеспечение для расчета и анализа их параметров и характеристик, и обеспечивает точность градуировки ТД $\pm 0,05$ К.

Список литературы:

1. Lake Shore Cryotronics, Inc. (USA), <http://www.lakeshore.com>.
2. Шварц Ю.М., Шварц М.М. Микроэлектронные термодиодные сенсоры и их применение в экстремальной электронике // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.- 2005.- №3.- С.30-33.
3. Иващенко А.Н., Шварц Ю.М., Шварц М.М. Диодный сенсор температуры: анализ приборной погрешности измерения // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.- 2005.- №8.- С. 27-29.
4. Иващенко А.Н., Шварц Ю.М. Аппроксимация термометрических характеристик кремниевых диодных сенсоров температуры // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. - 2003. - Вып. 38. - С. 61-70.

Юрий Михайлович Шварц,

доктор физ.-мат. наук, зав. лабораторией полупроводниковых датчиков физических величин, ИФП им. В. Е. Лашкарева НАН Украины, г. Киев, Украина, тел. (044)525 7463, shwarts@isp.kiev.ua,

Алексей Николаевич Иващенко,

научный сотрудник, ИФП им. В. Е. Лашкарева НАН Украины, г. Киев, Украина,

Марина Михайловна Шварц,

кандидат физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, ИФП им. В. Е. Лашкарева НАН Украины, г. Киев, Украина,

Дмитрий Петрович Копко,

ведущий инженер, ИФП им. В. Е. Лашкарева НАН Украины, г. Киев, Украина,

Владимир Ильич Карташев,

зам. директора, Укрметрестандарт, г. Киев, Украина,

Николай Дмитриевич Луценко,

начальник сектора, Укрметрестандарт, г. Киев, Украина.