

А. Н. ИВАЩЕНКО, д. ф.-м. н. Ю. М. ШВАРЦ,  
к. ф.-м. н. М. М. ШВАРЦ

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников  
им. В. Е. Лашкарёва  
E-mail: iva@isp.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
03.02—19.07 2005 г.

Оппонент А. Х. ДУНАЕНКО  
(ОАО "Кварц", г. Черновцы)

## ДИОДНЫЙ СЕНСОР ТЕМПЕРАТУРЫ: АНАЛИЗ ПРИБОРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ

*Исследование влияния составляющих погрешности измерения, связанных с используемой вторичной аппаратурой, позволило достичь прецизионной точности кремниевых диодных сенсоров температуры.*

Необходимость создания нового поколения высокоточных и взаимозаменяемых широкодиапазонных датчиков температуры на основе кремниевых диодов обусловлена требованиями современной сенсорной техники, и исследования в этом направлении продолжаются [1—4]. Проведенный теплофизический расчет разработанного нами диодного сенсора температуры (ДСТ) с учетом всех его конструктивных элементов [5], а также эффекта саморазогрева чувствительного элемента датчика и влияния шумов [6], показал, что его предельная точность измерения составляет порядка 0,01 К.

Задачей данной работы является исследование влияния составляющих погрешности измерения температуры, связанных с используемой вторичной аппаратурой, для различных режимов работы сенсора.

### Расчетные соотношения

Функция измерения температуры  $T$  с помощью ДСТ представляется в виде

$$T = f(U(I)), \quad (1)$$

где  $U$  — падение напряжения на термодиоде при пропускании через него прямого рабочего тока  $I$ . Такой метод проведения измерений является косвенным [7], и анализ его погрешностей проводится согласно [8].

Суммарное среднеквадратическое отклонение (СКО) измерения температуры определяем из выражения

$$S(T) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial U}\right)^2 S^2(U) + \left(\frac{\partial f}{\partial I}\right)^2 S^2(I)}, \quad (2)$$

где частные производные функции (1)  $\partial f/\partial U$  и  $\partial f/\partial I$  (обозначим их  $k_U$  и  $k_I$ , соответственно) называют коэффициентами влияния составляющих погрешности измерения температуры [9, с. 20],  $S(U)$  и  $S(I)$  — СКО результата измерения напряжения и установки тока, соответственно.

Обозначим вклад в  $S(T)$  погрешности измерения вольтметра как  $S_U(T)$ , а источника тока —  $S_I(T)$ . Тогда выражение (2) будет иметь вид

$$S(T) = \sqrt{S_U^2(T) + S_I^2(T)}. \quad (3)$$

Для исследования погрешности аппаратуры необходимо провести оценку  $k_U$  и  $k_I$  в рабочем диапазоне температур и определить максимально возможные вклады дисперсии вольтметра и источника тока в результат измерения при использовании ДСТ из выражений

$$S(U) = \frac{S_U(T)}{k_U}; \quad (4)$$

$$S(I) = \frac{S_I(T)}{k_I}. \quad (5)$$

При этом  $k_U$  и  $k_I$  определяются из выражений

$$k_U = \frac{1}{\partial U/\partial T}; \quad (6)$$

$$k_I = \frac{\partial U/\partial I}{\partial U/\partial T}, \quad (7)$$

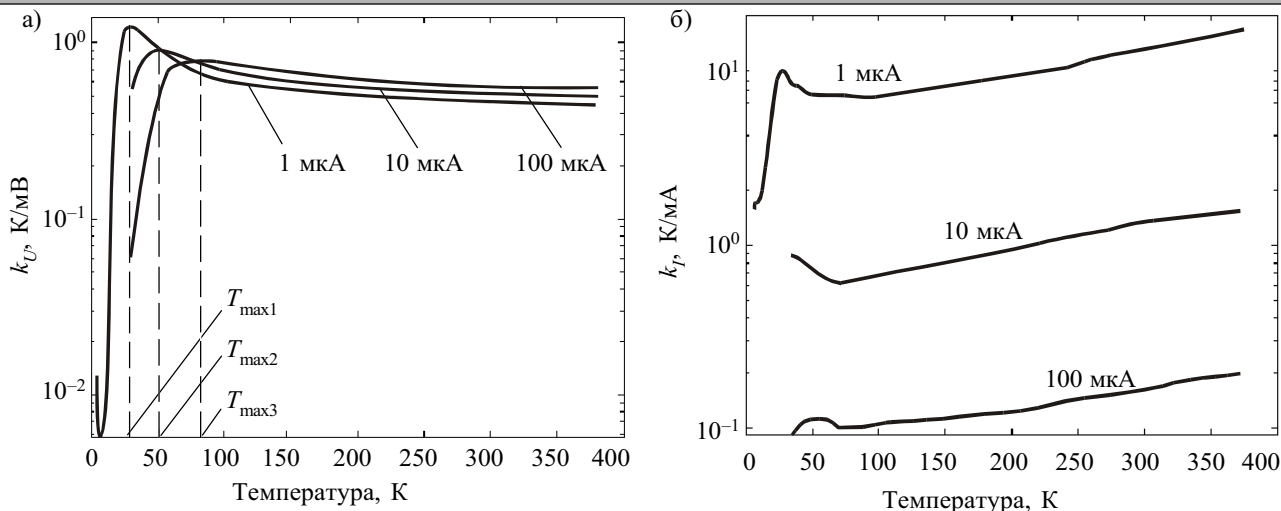
где  $\partial U/\partial T$  (температурная чувствительность) и  $\partial U/\partial I$  (дифференциальное сопротивление сенсора) являются температурно-зависимыми величинами.

### Эксперимент

В работе исследованы разработанные нами кремниевые диодные сенсоры в диапазоне температур 4,2—373 К. Для нахождения дифференциального сопротивления на автоматизированной установке измерены вольт-амперные характеристики в интервале токов  $10^{-11}$ — $10^{-2}$  А. Термостатирование образцов осуществлялось в парах жидкого гелия с погрешностью поддержания температуры  $\pm 0,01$  К. Погрешность измерения напряжения в диапазоне 0,1—2 В не хуже  $\pm 20$  мкВ, тока —  $\pm 5\%$ .

Для определения температурной чувствительности сенсоров измерены их термометрические характеристики на метрологическом стенде УГТ-А для разных значений рабочих токов (1, 10 и 100 мкА). Стенд обеспечивает поддержание рабочего тока на уровне  $\pm 0,05\%$ . Погрешность измерения напряжения не хуже  $\pm 10$  мкВ в диапазоне напряжений 0,1—2 В. Основная абсолютная ошибка измерения температуры не превышала 0,03 К.

Согласно методам, изложенным в [10, 11], проведена аппроксимация и численное дифференцирование полученных экспериментальных данных и рас-



Температурные зависимости коэффициентов  $k_U$  (а) и  $k_I$  (б) при разных рабочих токах сенсора

считаны температурные зависимости чувствительности и дифференциального сопротивления.

С помощью выражений (3) и (4) получены коэффициенты  $k_U$  и  $k_I$  температурные зависимости которых представлены на рисунке.

Как видно из рисунка, для рабочих токов 1, 10 и 100 мкА коэффициент  $k_U$  имеет максимум при температурах  $T_{max1} \approx 30$  К,  $T_{max2} \approx 50$  К и  $T_{max3} \approx 85$  К, соответственно. При  $T < T_{max}$  его значение резко снижается, например, до  $\approx 0,006$  К/мВ для тока 1 мкА. Для  $T > T_{max}$  коэффициент  $k_U$  уменьшается с увеличением температуры. В верхней точке рабочего диапазона при  $T=373$  К величина  $k_U$  составляет 0,44, 0,48 и 0,54 К/мВ для токов 1, 10 и 100 мкА, соответственно.

Для определения требований к вольтметру зададимся максимальным значением  $S_U(T)$ , равным 0,01 К. В табл. 1 приведены максимальные значения коэффициента влияния точности измерения напряжения  $k_{Umax}$  и допустимые значения  $S(U)_{max}$ , вычисленные с помощью (4) для разных значений  $I$ . Расчет проведен исходя из величины падения напряжения на ДСТ порядка 1 В при температуре максимума  $k_U$  (см. рис.).

Таблица 1  
Результаты расчета  $k_{Umax}$  и  $S(U)_{max}$  при разных значениях рабочего тока сенсора

I, мкА	$k_{Umax}$ , К/мВ	$S(U)_{max}$	
		Абсолютное значение, мВ	Относительное значение, %
1	1,27	0,008	0,0008
10	0,93	0,011	0,0011
100	0,8	0,013	0,0013

Значения  $k_{Umax}$ , представленные в табл. 1, характерны для узкого диапазона температур  $T_{max} \pm 10$  К. При других температурах рабочего диапазона требования к  $S(U)$  можно значительно снизить. Так, для тока 1 мкА в высокотемпературной области СКО измерения напряжения можно увеличить более чем в два раза без ухудшения точности измерения температуры. В интервале низких температур (4,2—15 К)  $S_U(T)$  не превышает 0,01 К при  $S(U)=0,1$  мВ.

При всех использованных рабочих токах коэффициент  $k_I$  имеет максимальное значение в верхней точке рабочего диапазона температур при  $T=373$  К (см. рис.),

для которой и следует проанализировать влияние СКО установки тока на температурную погрешность ДСТ. Для оценки требований по точности установления тока задаемся максимально допустимым значением  $S_I(T)$ , равным 0,01 К.

Таблица 2  
Результаты расчета  $k_{Imax}$  и  $S(I)_{max}$  при разных значениях рабочего тока сенсора

I, мкА	$k_{Imax}$ , К/мкА	$S(I)_{max}$	
		Абсолютное значение, мкА	Относительное значение, %
1	13	$7,7 \cdot 10^{-4}$	0,077
10	1,4	$7,1 \cdot 10^{-3}$	0,071
100	0,17	$5,9 \cdot 10^{-2}$	0,059

В табл. 2 приведены предельные значения коэффициентов  $k_{Imax}$  и допустимые значения СКО установления тока  $S(I)_{max}$ , рассчитанные с помощью (5). Из результатов, представленных в табл. 2, следует, что значение максимально допустимого относительного значения  $S(I)_{max}$  растет с уменьшением тока.

**Заключение**

На основе результатов исследований электрических и термометрических характеристик разработанных нами кремниевых диодных сенсоров температуры и анализа погрешности, обусловленной влиянием источника тока и измерителя напряжения, определены требования к аппаратуре, позволяющей обеспечить точность измерения на уровне сотых долей К, которые состоят в следующем:

— для измерителя падения напряжения допустимые относительные величины среднеквадратического отклонения результата измерения напряжения  $S(U)_{max}$  составляют 0,0008, 0,011 и 0,013% для значений рабочего тока 1, 10 и 100 мкА, соответственно;

— для источника тока допустимые относительные величины СКО измерения  $S(I)_{max}$  составляют 0,077, 0,071 и 0,059% для значений рабочего тока 1, 10 и 100 мкА, соответственно.

С учетом сформулированных требований создана автоматизированная система для метрологической аттестации диодных сенсоров температуры в диапазоне 4,2—373 К. При разработке системы нами учи-

тивались новые тенденции в создании измерителей температуры, базирующиеся на возможностях современной элементной базы. Измеритель напряжения и источник тока выполнены на базе микросхем фирмы Analog Device AD7714 и AD706, соответственно. Использование микросхем аналого-цифровых преобразователей высокого разрешения (до 24 бит) типа «сигма-дельта АЦП» позволило достичь прецизионной точности диодных сенсоров температуры.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Yeager C. J., Scott C. S. A review of cryogenic thermometry and common temperature sensors // IEEE Sensors Journal.— 2001.— Vol. 1, N 4.— P. 252—360.
2. Scott C. S., Swinehart P. R., Yeager C. J. A new cryogenic diode thermometers // Advanced Advances in Cryogenic Engineering. (American Institute of Physics, NY).— 2002.— Vol. 47B.— P. 1620—1627.
3. Scott C. S., Swinehart P. R. Long-term stability of cryogenic diode // Ibid.— P. 1636—1643.
4. Шварц Ю. М., Шварц М. М., Иващенко А. Н. и др. Новое поколение микроэлектронных кремниевых термодатчиков // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2003.— № 3.— С. 59—61.

5. Круковский П. Г., Шварц Ю. М., Круковский С. П. Анализ погрешностей измерения кремниевого датчика температуры // Промышленная теплотехника.— 2002.— Т. 24, № 2—3.— С. 154—159.
6. Shwarts Yu. M., Sokolov V. N., Shwarts M. M., Venger E. F. Temperature sensors for extreme electronics / In Temperature: Its measurement and control in science and industry. AIP Conf. Proceedings. Vol. 7, part 2.— Melville, New York (USA).— 2003.— P. 1127—1132.
7. ДСТУ 2681—94. Метрологія. Терміни та визначення.— Київ: Держстандарт України, 1994.
8. МИ 2083—90 ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерения и оценивание их погрешностей.— М.: Изд-во стандартов, 1991.
9. Орнатский П. П., Яремчук Н. А. Суммирование погрешностей средств измерений.— Киев: КПИ, 1983.
10. Иващенко А. Н., Шварц Ю. М. Аппроксимация термометрических характеристик кремниевых диодных сенсоров температуры // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника.— 2003.— Вып. 38.— С. 61—70.
11. Шварц Ю. М., Шварц М. М., Иващенко О. М. та ін. Моделювання низькотемпературного струмопереносу і чутливість в кремнієвих діодних сенсорах температури // УФЖ.— 2004.— Т. 49, № 10.— С. 1001—1006.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

**Эггинс Б. Химические и биологические сенсоры.— М.: Техносфера, 2005.— 336 с.**

Первое учебное пособие в новой области на стыке аналитической химии, электроники, физики и медицины. Особенно подробно описаны электрохимические, оптические, гравиметрические, температурные сенсоры, распознавание ионов и молекул, «лаборатории-на-чипе». Пособие предназначено для студентов и специалистов в областях медицинских и биотехнологий, пищевой промышленности и контроля окружающей среды, микробиологов, специалистов, разрабатывающих и применяющих микроаналитические системы.

**Основы построения систем и сетей передачи информации: Учебное пособие для вузов / В. В. Ломовицкий, А. И. Михайлов, К. В. Шестаков, В. М. Щекотихин.— М.: Горячая линия-Телеком, 2005.— 382 с., ил.**

Систематизированы сведения по вопросам построения современных систем и сетей передачи информации. Приведены основные положения и рассмотрены перспективы развития систем восстановления и управления единой сети электросвязи РФ, особенности построения первичных и вторичных сетей связи, цифровой сети с интеграцией служб. Рассмотрены основные подходы и методы оценки эффективности функционирования телекоммуникационных сетей общего пользования. Книга базируется на уже достаточно известных сведениях и подходах к построению систем и сетей передачи информации, а также содержит оригинальный материал по особенностям построения систем связи с повышенной устойчивостью к внешним воздействиям.

Для студентов, обучающихся по направлению 654400 — «Телекоммуникации»; может быть полезна специалистам, занимающимся эксплуатацией средств связи.

**Гордиенко В. Н., Тверецкий М. С. Многоканальные телекоммуникационные системы. Учебник для вузов.— М.: Горячая линия-Телеком, 2005.— 416 с., ил.**

Излагаются базовые принципы построения цифровых многоканальных телекоммуникационных систем, обсуждаются особенности работы оборудования цифровых систем передачи плезиохронной и синхронной цифровой иерархии, рассматриваются вопросы нормирования качества передачи информации по цифровым каналам и трактам, а также особенности применения цифровых систем передачи на современных телекоммуникационных сетях.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности 201000 — «Многоканальные телекоммуникационные системы»; может быть полезен студентам, обучающимся по специальностям: 071700 — «Физика и техника оптической связи», 200900 — «Сети связи и системы коммутации», 201800 — «Защищенные системы связи».

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ