

К. ф.-м. н. Ю. М. ШВАРЦ, к. ф.-м. н. М. М. ШВАРЦ,  
А. Н. ИВАЩЕНКО, к. т. н. В. И. БОСЫЙ,  
А. Г. МАКСИМЕНКО, С. В. САПОН

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва,  
ДП "Сатурн-Микро", ДП "КВАЗАР-ИС"  
E-mail: shwartz@isp.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
04.04 2003 г.

Оппонент д. ф.-м. н. А. В. СТРОНСКИЙ  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ КРЕМНИЕВЫХ ТЕРМОДАТЧИКОВ

*Разработанные температурные сенсоры характеризуются высокой точностью измерения, высокой взаимозаменяемостью, низким энергопотреблением, малой массой и др.*

Современный уровень развития промышленности, космической техники, авиации, медицины, научных исследований, бытовой техники, технологии требует опережающего развития контрольно-измерительных систем, основой которых являются датчики. Именно поэтому в рамках ЕЭС в 1989 году был образован Европейский комитет по датчикам (European Sensor Committee — ESC), и в докладе, подготовленном одной из фирм США, последнее десятилетие 20-го века названо десятилетием датчиков [1].

В структуре датчиков, производимых сегодня на Западе, датчики температуры занимают второе место. Основными потребителями датчиков на мировом рынке являются США, Япония и Германия. Исследования, разработка и производство датчиков температуры являются динамичной областью приборостроения, и современный этап характеризуется углублением и расширением поисковых и прикладных исследований в этой области.

Современная электронная промышленность предъявляет повышенные требования к средствам измерения температуры. Среди них — расширение диапазона рабочих температур как в область низких (до 4,2 К), так и высоких температур (до 500 К), повышение точности (до 0,1 К), снижение энергопотребления, миниатюризация датчиков, повышение технологичности и взаимозаменяемости, обеспечение работоспособности в условиях влияния экстремальных внешних воздействий (включая резкие перепады температуры), влияния механических ударов и вибраций, радиации, вакуума, климатических воздействий и др.

Совокупности перечисленных требований удовлетворяют кремниевые датчики температуры, в которых чувствительным элементом является  $p-n$ -переход. Причем кремниевые диодные сенсоры температуры, благодаря высокой технологичности, стабильности, взаимозаменяемости, занимают ведущее место среди термодиодных сенсоров других типов [2]. Разработка конкурентоспособных диодных сенсоров является исключительно наукоемкой областью, син-

тезирующей достижения физики полупроводниковых приборов, теплофизики, технологии, метрологии и т. д.

Первые работы, в которых была показана возможность использования для измерения температуры  $p-n$ -переходов, появились во второй половине 1950-х — начале 1960-х годов. В СССР и за рубежом первые типы термодиодных датчиков, по сути, являлись промышленными германиевыми, кремниевыми и арсенидгаллиевыми диодами общего назначения. Следующим этапом в развитии диодной термометрии явилась разработка и создание в США серийного температурного датчика с воспроизводимыми и стабильными параметрами [3].

В диодной термометрии используется температурная зависимость падения напряжения на  $p-n$ -переходе  $U(T)$  при постоянной величине прямого тока  $I$ . Широко представленная на мировом рынке полупроводниковых датчиков корпорация Lake Shore Cryotronics, Inc. (США) в качестве рабочего тока широкодиапазонных кремниевых диодных датчиков применяет ток 10 мкА [4, 5]. Однако ток такой величины в ряде практических случаев является неприемлемым. Так, например, в криогенной области температур за счет эффекта саморазогрева датчика рабочим током снижается точность измерения температуры.

С другой стороны, для диапазона температур выше 70 К и при работе на длинных сигнальных линиях удобно использовать ток 100 мкА. Кроме того, указанные датчики непригодны для использования их в условиях радиационных нагрузок.

Для разработки конкурентоспособного диодного сенсора температуры на базе отечественных сырьевых ресурсов нами был выбран комплексный технический подход, который объединил результаты фундаментальных, научно-технологических и метрологических исследований [6—12], а также достижения

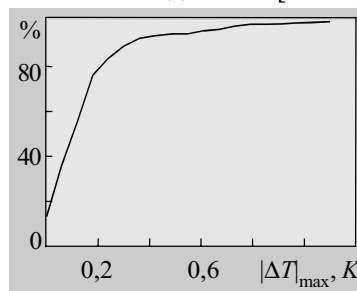


Рис. 1

промышленных технологий изготовления кремниевых  $p-n$ -переходов.

В ходе отработки конструкции и технологии для опытной партии из 350 термодатчиков было исследовано распределение падения прямого

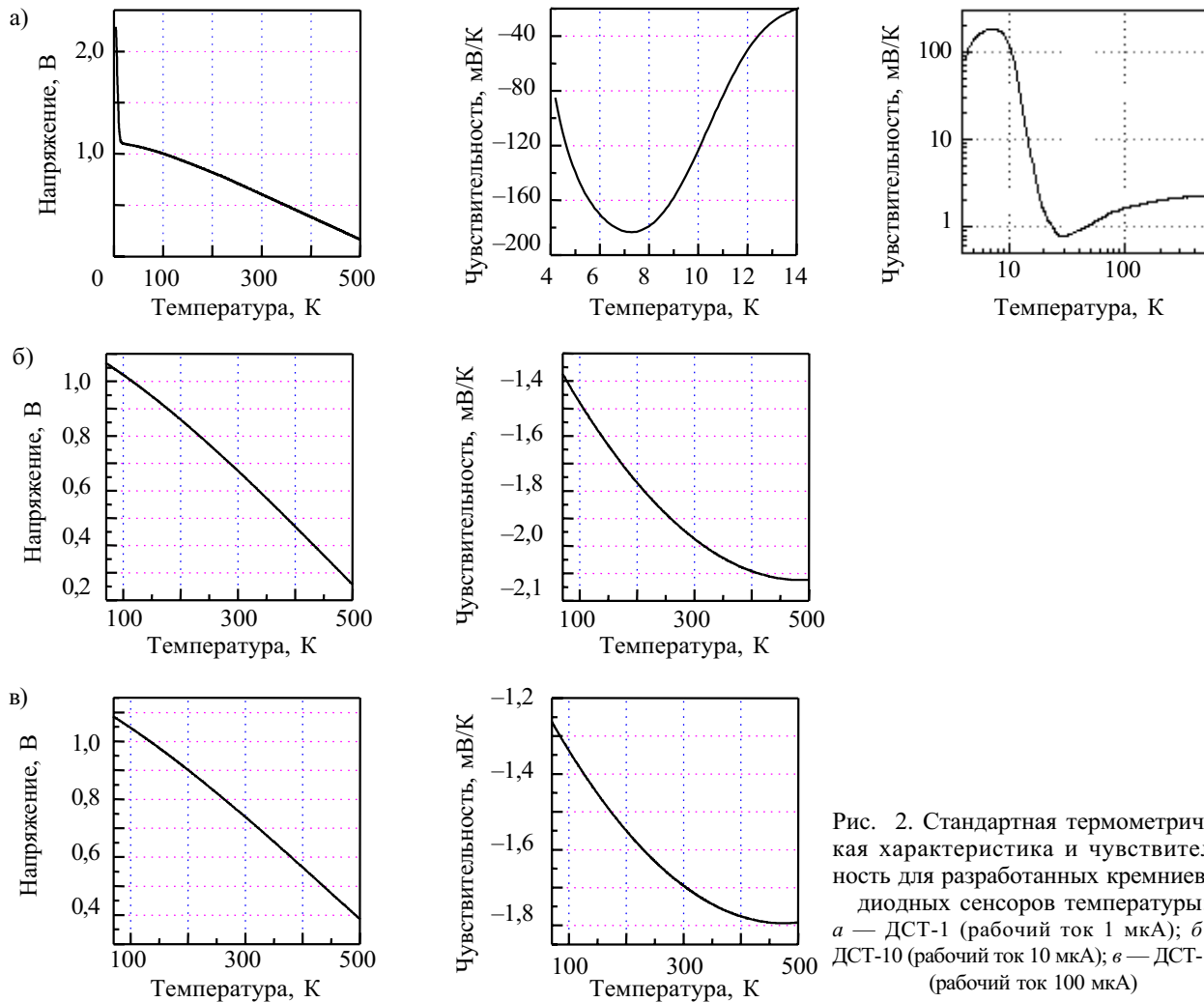


Рис. 2. Стандартная термометрическая характеристика и чувствительность для разработанных кремниевых диодных сенсоров температуры: а — ДСТ-1 (рабочий ток 1 мкА); б — ДСТ-10 (рабочий ток 10 мкА); в — ДСТ-100 (рабочий ток 100 мкА)

напряжения при температуре 20°C до и после 10 термоциклов.

На рис. 1 показана зависимость процентного выхода диодных сенсоров температуры от максимального значения допустимой погрешности измерения температуры —  $|\Delta T|_{\max}$  (рабочий ток датчика равен 100 мкА).

Как видно из рис. 1, более 80% датчиков из партии являются взаимозаменяемыми с погрешностью не более  $\pm 0,2$  К. Полученный результат свидетельствует о высоком уровне однородности характеристик и технологичности разработанных датчиков.

Основные рабочие характеристики разработанных нами кремниевых диодных сенсоров температуры разных типов представлены на рис. 2. Термодатчики имеют следующие преимущества по сравнению с аналогичными сенсорами температуры.

Датчики ДСТ-1 предназначены для проведения прецизионных измерений в широком диапазоне температур, включая область температур вблизи жидкого гелия. Датчики такого типа в области криогенных температур характеризуются минимизированным влиянием саморазогрева на точность измерения и повышенной чувствительностью (до 180 мВ/К). Дат-

чики ДСТ-10 и ДСТ-100 легко совмещаются с электронным оборудованием при работе на длинных сигнальных линиях при сохранении точности измерения температуры.

Разработанные сенсоры в составе многоканальной системы измерений температуры с линией связи длиной 300 м обеспечили надежный температурный мониторинг объекта «Укрытие» (Чернобыльская АЭС) в условиях влияния радиации, а также были успешно применены для точного контроля криогенных температурных режимов ракеты «Зенит-3SL» в рамках международной программы «Морской старт».

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Стучебников В. М. Микроэлектронные датчики за рубежом // Приборы и средства автоматизации.— 1993.— № 1.— С. 18—21.
2. Rubin L. G. Cryogenic thermometry: a review of progress since 1982 // Cryogenics.— 1997.— Vol. 37.— P. 341—356.
3. Пат. 4643589 США. Thermometry employing gallium aluminium arsenide diode sensor / J. K. Krause, B. C. Dodrill.— 1987.
4. Dodrill B. C., Krause J. K., Swenhardt P. R., Wang V. Performance characteristics of silicon diode cryogenic temperature sensors // Applications of Cryogenic Technology.— 1991.— Vol. 10.— P. 86—107.

5. Temperature measurement and control / Product Catalog and Reference Guide. Part 1.— Westerville, Ohio (USA): Published by Lake Shore Cryotronics, Inc.— 1999.

6. Shwarts Yu. M., Borblik V. L., Kulish N. R. et al. Silicon diode temperature sensor without a kink of the response curve in cryogenic temperature region // Sensors and Actuators.— 1999.— Vol. A76 (1—3).— P. 107—111.

7. Shwarts Yu. M., Sokolov V. N., Shwarts M. M. et al. Silicon diode temperature sensor for cryogenic application / The MTEC Conf. on Sensors and Transducers NEC.— Birmingham (UK).— 2000.— P. 1—10.

8. Shwarts Yu. M., Kondrachuk A. V., Shwarts M. M., Spinar L. I. Non-ohmic Mott conductivity and thermometric characteristics of heavily doped silicon structures // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics.— 2000.— Vol. 3, N 3.— P. 400—405.

9. Shwarts Yu. M., Borblik V. L., Kulish N. R. et al. Limiting characteristics of diode temperature sensor // Sensors and Actuators.— 2000.— Vol. A86.— P. 197—205.

10. Shwarts Yu. M., Kondrachuk A. V., Shwarts M. M., Spinar L. I. Model of the low-temperature current transfer in the diode temperature sensors / 4th European Workshop on Low Temperature Electronics.— 2000.— Noordwijk (The Netherlands).— P. 65—69.

11. Shwarts Yu. M., Sokolov V. N., Shwarts M. M., Venger E. F. Temperature sensors with high irradiation resistance for atomic application (technology, design, experiment, theory, application) / 11th International Conf. on Solid-State Sensors and Actuators.— 2001.— Munich (Germany).— P. 1500—1503.

12. Shwarts Yu. M., Sokolov V. N., Shwarts M. M., Venger E. F. Radiation resistant silicon diode temperature sensors // Sensors and Actuators.— 2002.— Vol. A88.— P. 271—279.

К. т. н. В. А. МОСКАЛЮК, к. т. н. В. И. ТИМОФЕЕВ, А. В. ИВАЦУК

Дата поступления в редакцию  
04.04 2003 г.

Украина, г. Киев, Научно-производственное предприятие "Сатурн"  
E-mail: ivaschuk@i.com.ua

Оппонент д. ф.-м. н. В. Е. ЧАЙКА  
(НТУУ "КПИ", г. Киев)

## РАСЧЕТ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ GaAs В СИЛЬНЫХ ПОЛЯХ

*Предложен способ аналитического расчета времен релаксации концентрации, импульса и энергии для GaAs для моделирования динамических процессов.*

Анализ динамических свойств электронов в сильных электрических полях удобно проводить на основе так называемых релаксационных уравнений сохранения числа частиц  $n_p$ , их импульса  $P=mV$  и энергии  $E$  для  $i$ -долины:

$$dn_i/dt = -n_i/\tau_{nij} + n_j/\tau_{nji}; \quad (1, a)$$

$$d(n_i p_i)/dt - en_i \mathbf{E} = -n_i p_i / \tau_{pi}; \quad (1, б)$$

$$d(n_i E_i)/dt - en_i v_i \mathbf{E} = -n_i (E_i - E_0) / \tau_{Ei}. \quad (1, в)$$

Вместо последнего уравнения для полной энергии  $E$  удобнее пользоваться уравнением только для тепловой энергии хаотического движения:

$$d(n_i E_{Ti})/dt = -n_i [(E_{Ti} - E_0) / \tau_{Ei} + E_{di} / \tau_{Ei} - 2E_{di} / \tau_{pi}], \quad (1, г)$$

которое определяет электронную температуру. Входящие сюда времена релаксации концентрации  $\tau_n$ , импульса  $\tau_p$  и энергии  $\tau_E$  определяют скорости протекания переходных процессов в электронном коллективе и обычно находятся из результатов моделирования методом Монте-Карло (что весьма трудоемко), либо из различного рода эмпирических соотношений, что неточно.

В данной работе предлагается простой способ аналитического их определения. Так как они по своей сути являются характеристиками, усредненными по всей совокупности параметров носителей, то *среднее время релаксации импульса* находится усреднением известных [1] скоростей рассеяния  $\lambda$  для различных механизмов по функции распределения электронов. Функцию распределения  $N(E)=g(E)f(E)$  выбираем максвелловской ( $f(E)=\exp[(E_\phi - E)/(k_B T_e)]$ ),

в которой для учета неравновесности вместо температуры решетки  $T$  используется электронная температура  $T_e$ . На основе соотношения  $N(k)dV_k=N(E)dE$  при квадратичном законе дисперсии производится переход от интегрирования по пространству импульсов к интегрированию по энергии. Опуская формальные процедуры интегрирования, приведем лишь окончательные результаты.

*Примесное рассеяние* является практически упругим и эффективно хаотизирует движение, внося существенный вклад в релаксацию импульса. Для времени релаксации импульса можно использовать модель Брукса—Херринга, учитывающую экранирование примесного центра носителями:

$$\frac{1}{\tau_{пр}} = \sqrt{\frac{8\pi}{m^*}} \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \right)^2 \left[ \ln(1+\eta) - \frac{\eta}{1+\eta} \right] N_{пр} (k_B T_e)^{-3/2}, \quad (2)$$

где  $\eta=(2kr_3)^2=12\epsilon\epsilon_0 m^* (k_B T_e)^2 / \hbar^2 e^2 N_{пр}$ .

Для *акустического рассеяния* характерна линейная зависимость скорости рассеяния от температуры кристаллической решетки  $T$ , что связано с уменьшением длины свободного пробега при увеличении количества фононов, и от скорости носителей, пропорциональной  $E^{1/2}$ . При усреднении по максвелловской функции распределения время релаксации импульса будет совпадать со скоростью акустического рассеяния при замене  $E = 3k_B T_e / 2$ :

$$\frac{1}{\tau_{рак}} = \frac{\sqrt{3} m^{*3/2} D_a^2}{\pi \hbar^4 \rho v_{3B}^2} k_B T \sqrt{k_B T_e}. \quad (3)$$

*Оптическое рассеяние* является неупругим, при каждом взаимодействии такого рода энергия электрона изменяется на величину  $\pm \hbar \omega_0$ . Так как эта величина оптического фонона может быть соизмерима с энергией носителей, то скорости рассеяния с погло-