

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: shwarts@isp.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
09.12.2004 г. — 08.04.2005 г.

Оппонент д. ф.-м. н. Я. И. ЛЕПИХ
(ОНУ, г. Одесса)

МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕРМОДИОДНЫЕ СЕНСОРЫ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Физически обоснованы и реализованы кремниевые диодные сенсоры температуры с оптимизированными характеристиками. Сенсоры применены в ракетно-космической технике и атомной энергетике.

Развитие ракетно-космической техники, термоядерной, атомной и криоэнергетики, физики и техники низких температур стимулировало разработку приборов, способных функционировать в условиях низких (вблизи гелиевых), высоких (около 200°C) температур, воздействия радиации (до 10 Мрад), магнитных полей (до 10 Тл), термических ударов или вибраций и т. д. Класс электронных приборов, предназначенных для работы в условиях таких внешних факторов и их комбинированного влияния, относят к экстремальной электронике [1]. Особый интерес для создания приборов экстремальной электроники представляют кремниевые структуры [2—4].

Целью наших исследований была разработка высокоточного кремниевого диодного сенсора температуры (ДСТ), способного работать в условиях факторов экстремальной электроники — низких температур, радиации, термоциклов. Исследуемые в работе ДСТ разработаны на базе планарной диффузионной промышленной технологии изготовления кремниевых диодных чипов.

Измерения термометрических характеристик (ТМХ) сенсоров (температурной зависимости падения напряжения U на сенсоре при пропускании через него постоянного прямого тока I) выполнены на автоматизированном метрологическом стенде УГТ-А. Погрешность поддержания рабочего тока на заданном уровне не превышала $\pm 0,1\%$. Максимальное значение основной абсолютной ошибки измерения температуры T составляло $\pm 0,03$ К в диапазоне температур 4,2—373 К и $\pm 0,05$ К — в диапазоне 293—523 К. Точность калибровки сенсоров не хуже ± 10 мК в диапазоне 4,2—373 К и ± 25 мК в диапазоне 373—500 К.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов измерены на автоматизированном стенде в интервале токов 10^{-11} — 10^{-2} А и диапазоне температур 4,2—373 К. Термостатирование образцов осуществлялось в парах жидкого гелия с погрешностью поддержания температуры не хуже $\pm 0,01$ К. Погрешность измерения напряжения не превышала ± 5 мкВ, тока — $\pm 5\%$.

Стабильность ДСТ исследована на оборудовании рабочего эталона единицы температуры ВЕТ-34-18-87 путем измерения напряжения на сенсоре при фиксированном значении прямого тока в реперных точках (тройная точка воды (0,01°C), температура плавления Ga (29,7646°C) и температура затвердевания In

(156,5985°C)) до и после 20 циклов нагрева до верхней границы эффективного температурного диапазона и, затем, охлаждения до нижней границы со скоростью примерно 8°C/мин.

Предельная точность измерения

Для определения оптимального рабочего тока сенсора, который обеспечивает прецизионные измерения в криогенной области температур и отвечает предельным физическим возможностям чувствительного элемента, мы исходили из систематической погрешности измерения температуры ΔT , обусловленной джоулевым разогревом ΔT_J и тепловым ΔT_N^{th} и дробовым ΔT_N^{sh} шумами диода:

$$\Delta T = [(\Delta T_J)^2 + (\Delta T_N^{th})^2 + (\Delta T_N^{sh})^2]^{1/2}, \quad (1)$$

где $\Delta T_J = PR_{th}$;

P — рассеиваемая тепловая мощность,

$P = I \cdot U(T, I)$;

R_{th} — тепловое сопротивление между сенсором и средой, температура которой измеряется,

$R_{th} = l/S \cdot \lambda(T)$;

l — расстояние от металлургической границы p - n -перехода до внешней поверхности чипа;

S — площадь диодной структуры;

$\lambda(T)$ — коэффициент теплопроводности.

Используя выражения для спектральной плотности флуктуаций напряжения, обусловленных тепловым и дробовым шумами [5], систематические погрешности ΔT_N^{th} и ΔT_N^{sh} можно представить в виде

$$\Delta T_N^{th} = [4k_B T r \Delta \omega]^{1/2} / |\alpha(T, I)|; \quad (2)$$

$$\Delta T_N^{sh} = [2q I \Delta \omega]^{1/2} r / |\alpha(T, I)|, \quad (3)$$

где k_B — постоянная Больцмана;

$r = dU/dI$ — динамическое сопротивление диода;

$\Delta \omega$ — ширина спектральной полосы;

$\alpha(T, I)$ — чувствительность сенсора;

q — заряд электрона.

Результаты расчета ΔT_J и $\Delta T_N = [(\Delta T_N^{th})^2 + (\Delta T_N^{sh})^2]^{1/2}$ для разных значений тока показали, что с увеличением тока вклад саморазогрева в ΔT растет, а шума — снижается, и наоборот, при уменьшении тока роль шумов возрастает, а мощность рассеяния уменьшается. Таким образом, существует характеристический ток $I = I_{\min}(T)$, который минимизирует зависимость $\Delta T = \Delta T(I)$ при данной температуре.

Температурная зависимость $I_{\min}$, найденная из условия $\partial \Delta T(I) / \partial I = 0$, имеет вид

$$I_{\min} \approx [q \Delta \omega / 2 R_{th} \alpha^2]^{1/3} [1 + (2k_B T / q U_T)^{1/2}]^{2/3}. \quad (4)$$

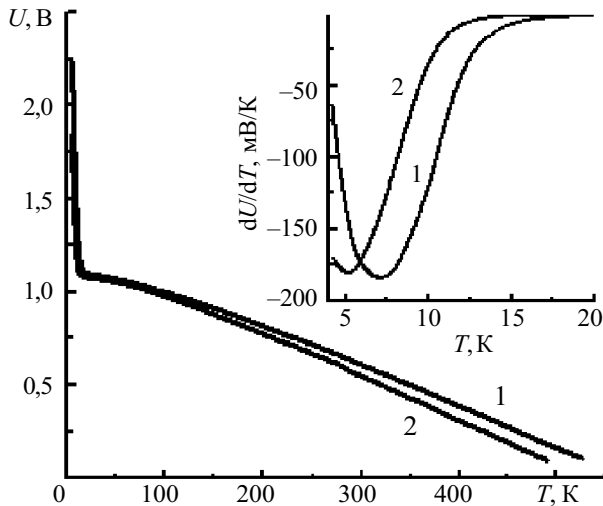


Рис. 1. Термометрические характеристики сенсора при различных значениях рабочего тока I (на вставке — температурные зависимости чувствительности сенсора):
1 — $I=1$ мкА; 2 — $I=0,1$ мкА

Для $\Delta T_j \approx \Delta T_N$ оценки дают величину тока $I_{\min}(T) \approx 0,1$ мкА, которая обеспечивает максимально высокую точность измерения — порядка нескольких десятков мкК. Как показал теплофизический расчет разработанного нами сенсора [6], выполненный с учетом температурных зависимостей удельной теплоемкости, плотности и коэффициента теплопроводности всех его конструктивных элементов, а также изменения с температурой доминирующего механизма токопереноса в чувствительном элементе, использование рабочего тока 1 мкА позволяет существенно снизить погрешность измерения в криогенной области температур.

Из представленных на рис. 1 термометрических характеристик диодного сенсора видно, что тепловая мощность рассеяния при гелиевых температурах не превышает 2,3 мВт для рабочего тока 1 мкА и 0,2 мВт для 0,1 мкА, тогда как в зарубежных аналогах ее значение составляет около 20 мВт, что приводит к погрешности измерения до нескольких сотен мК [7—9].

Для рабочих режимов, которые позволяют снизить влияние саморазогрева и повысить точность измерения температуры, в разработанных ДСТ в области гелиевых температур наблюдается рекордно высокая чувствительность $dU/dT \approx -180$ мВ/К (см. вставку на рис. 1), обусловленная неомической прыжковой проводимостью с переменной длиной прыжка в базе диодной структуры [10, 11].

Радиационная стойкость

Применяемые системы температурного контроля на основе стойких к влиянию облучения термопар и термометров сопротивления выходят из строя в радиационных полях даже невысокой интенсивности, поскольку из-за низкой чувствительности таких датчиков электронные усилители располагают в непосредственной близости от места их крепления для сохранения точности измерений. Применение же высокочувствительных диодных сенсоров позволяет располагать вторичную аппаратуру на расстоянии до 300 м без потери точности показаний [1]. Поэтому при раз-

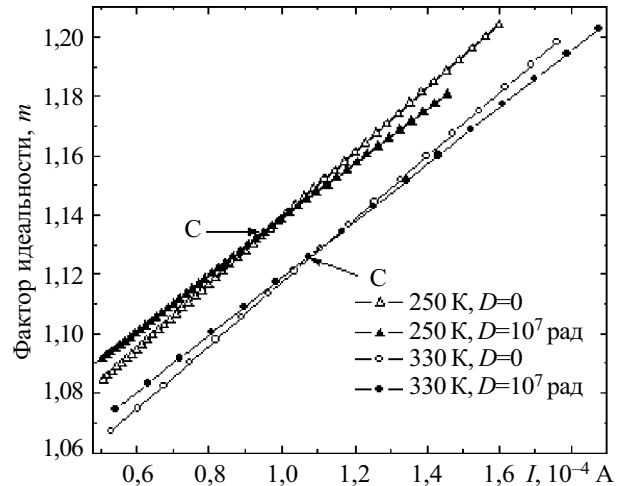


Рис. 2. Зависимости фактора идеальности m от тока I при температурах 250 и 330 К до и после гамма-облучения дозой $D=10^7$ рад

работке высокочувствительных диодных температурных сенсоров параллельно решалась задача достижения необходимой стойкости к радиационным воздействиям.

Исследовалось влияние облучения на инжекционные явления в $n-p$ -структурах Si. Структуры облучали γ -квантами Co^{60} в установке МРХ- γ -25 М с мощностью дозы 200 рад/с при температуре 320 К.

Анализ полученных из экспериментально измеренных ВАХ токовых зависимостей дифференциального фактора идеальности $m(I)$

$$m = (q/k_B T) (dU/d \ln I) \quad (5)$$

показал, что на ВАХ существует область токов, в которой зависимость $m(I)$ носит линейный характер. Причем наклон $m(I)$ больше для необлученных образцов по сравнению с облученными (рис. 2). Точка пересечения C , в окрестности которой фактор идеальности и дифференциальное сопротивление мало подвержены влиянию радиации, соответствует току $I \approx 10^{-4}$ А.

Близость фактора идеальности $m(I)$ к единице указывает на то, что доминирующим в смещенной в пропускном направлении диодной структуре является диффузионный механизм токопереноса с $m=1$. Для объяснения наблюдаемого отклонения от идеальности ВАХ в рассматриваемом диапазоне температур было учтено влияние рекомбинационного тока и тока псевдовысокого уровня инжекции, когда концентрация инжектированных носителей много меньше равновесной концентрации дырок, но значительно превышает равновесную концентрацию электронов в базе. В этом случае необходимо учесть перераспределение приложенного напряжения между падением напряжения на области пространственного заряда и на базе диода, а также модификацию распределения концентрации неосновных носителей в базе по сравнению с распределением носителей при идеальном диффузионном механизме токопереноса.

Чтобы получить явное выражение для ВАХ, было найдено пространственное распределение концентрации неосновных носителей $n(x)$ в базе при диффузи-

онно-дрейфовом токопереносе [12]. Выражение для полного тока через диод имеет вид

$$I = I_{DS} \left[1 - \frac{2}{3} \beta(U) \right] \exp(qU/k_B T) + I_{RS} \left[1 - \frac{1}{3} \beta(U) \right] \exp(qU/2k_B T), \quad (6)$$

где I_{DS} и I_{RS} — диффузионный и рекомбинационный токи насыщения, соответственно;
 $\beta(U)$ — параметр, $\beta(U) = n_i^2 \exp(qU/k_B T) / p_{p0}^2 \ll 1$;
 p_{p0} и n_i — равновесная и собственная концентрация носителей, соответственно.

Оценка зависимости $m(I)$ из (6) дает:

$$m(I) = 1 + \frac{I}{I_1} + \sqrt{\frac{I_2}{I}}, \quad (7)$$

где $I_{1,2}$ — характеристические токи, $I_1 = 3p_{p0}^2 I_{DS} / 2n_i^2$, $I_2 = I_{RS}^2 / 4I_{DS}$.

Сумма в правой части (7) разделяет идеальный диффузионный ток, ток псевдовысокой инжекции (второе слагаемое) и рекомбинационный ток (третье слагаемое). Из сравнения двух последних слагаемых видно, что с увеличением тока асимптотическое поведение $m(I)$ дается линейной зависимостью $m(I) \approx 1 + (I/I_1)$ с характеристическим наклоном $\sim 1/I_1$.

Расчет $m(I)$ с использованием электрофизических и технологических параметров диодной структуры показал, что вследствие увеличения вклада рекомбинационной составляющей характеристический наклон после облучения несколько ниже, чем до облучения. Следовательно, должна существовать точка пересечения C

кривых $m(I)$ до и после облучения, что и наблюдается экспериментально. Рассчитанные значения точки C , показанной на рис. 2, равны: $I_C = 1,1 \cdot 10^{-4}$ А, $m_C = 1,13$, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Измерения термометрических характеристик для рабочего тока 100 мкА показали, что температурный сдвиг, вызванный гамма-облучением Co^{60} дозой до 10^6 рад, не превышает максимального значения основной абсолютной ошибки измерения температуры (рис. 3).

Как следует из данных метрологических исследований стабильности сенсоров для рабочего тока 100 мкА, температурные отклонения в реперных точках после облучения дозой 10^6 рад не превышают ± 5 мК (рис. 4). С увеличением дозы облучения до 10^7 рад величина ΔT не превышает 0,5 К (рис. 3).

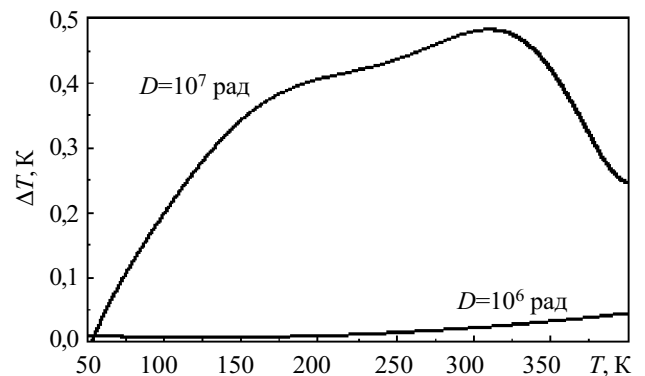


Рис. 3. Температурная погрешность, вызванная гамма-облучением Co^{60} дозой 10^6 и 10^7 рад

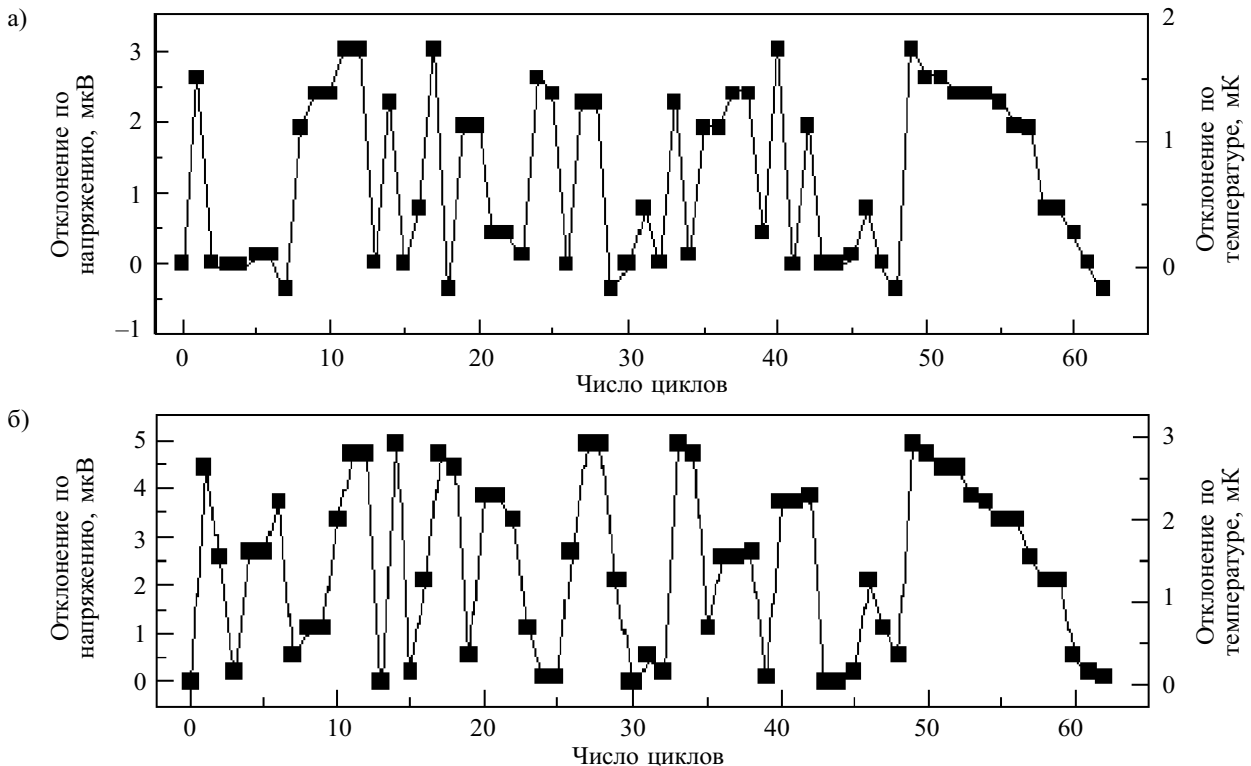


Рис. 4. Стабильность случайной выборки диодных сенсоров температуры после термоциклирования от температуры тройной точки воды к точке затвердевания индия (измерения выполнены при температуре тройной точки воды):
 а — до облучения; б — после облучения гамма-квантами Co^{60} дозой 10^6 рад

Таким образом, радиационная стойкость разработанных диодных сенсоров температуры существенно превосходит зарубежные аналоги, погрешность измерения которых, вызванная влиянием гамма-облучения, превышает 3 К уже для дозы 10^6 рад [9].

Заключение

На основе результатов комплексных физико-технологических и метрологических исследований нами разработаны диодные сенсоры температуры для применения в условиях влияния факторов экстремальной электроники. По сравнению с аналогичными типами сенсоров удалось понизить мощность теплового рассеяния на один-два порядка и, таким образом, существенно повысить точность измерения в области криогенных температур, достичь рекордно высокой чувствительности (порядка 180 мВ/К) в области гелиевых температур, повысить радиационную стойкость к гамма-облучению.

Разработанные сенсоры применены в условиях воздействия климатических факторов и облучения гамма-квантами Co^{60} для температурного мониторинга объекта "Укрытие" (IV блок ЧАЭС) на расстоянии точки измерения от системы регистрации примерно 300 м. При заправке ракет-носителей "Зенит-3SL" (в рамках проекта "Морской старт") впервые в практике ракетно-космической техники в условиях влияния внешних факторов микроэлектронные датчики нового типа обеспечивают контроль температурных режимов заправки переохлажденного жидкого кислорода в баки ракеты с точностью измерения $\pm 0,05$ К.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Шварц Ю. М. Фізичні основи напівпровідникових приладів екстремальної електроніки. — Дис. ... докт. фіз.-мат. наук. — К., ІФП НАНУ, 2004.

2. NASA/JPL Conference on Electronics for Extreme Environments: Pasadena (The USA), 1999: <http://extelect.jpl.nasa.gov/conference>.

3. Transducers'01. Eurosensors XV: Digest of technical papers of the 11th International Conf. on Solid-State Sensors and Actuators. Vol. 1, 2. — Munich (Germany): Springer. — 2001.

4. Transducers'03: Digest of the 12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. — Boston (USA): Springer. — 2003.

5. Buckingham M. J. Noise in electronic devices and systems. — New York: Ellis Horwood Ltd., 1983.

6. Круковский П. Г., Шварц Ю. М., Круковский С. П. Расчетный анализ погрешностей измерения кремниевого датчика температуры // Промышленная теплотехника. — 2002. — Т. 24, № 2–3. — С. 154–159.

7. Rubin L. G. Cryogenic thermometry: a review of progress since 1982 // Cryogenics. — 1997. — Vol. 37, N 7. — P. 341–356.

8. Dordill B. C., Krause J. K., Swinehart P. R., Wang V. Performance characteristics of silicon diode cryogenic temperature sensor // Applications of Cryogenic Technology. — 1991. — Vol. 10, N 1. — P. 85–107.

9. Temperature Measurement and Control // Product Catalog and Reference Guide. Part 1 of 2. — Westerville, Ohio (USA): Published by Lake Shore Cryotronics, Inc. — 1999.

10. Shwarts Yu. M., Kondrachuk A. V., Shwarts M. M., Shpinar 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.

11. Shwarts Yu. M., Shwarts M. M., Ivashenko A. M. et al. Simulation of low-temperature current flow and sensitivity in Si diode temperature sensors // Ukraine J. Physics. — 2004. — Vol. 49, N 10. — P. 1000–1005.

12. Shwarts Yu. M., Sokolov V. N., Shwarts M. M., Venger E. F. Radiation resistant silicon diode temperature sensors // Sensors and Actuators A. — 2002. — N 97–98. — P. 271–279.

КОНФЕРЕНЦИЯ «СИЭТ-2005»

www.tkea.wallst.ru/konfer.html

23—27 мая 2005 г. в Одессе прошла ставшая уже традиционной шестая международная научно-практическая конференция "Современные информационные и электронные технологии" («СИЭТ-2005»). Как и в предыдущие годы, конференция была организована и проведена Одесским национальным политехническим университетом и редакцией журнала «Технология и конструирование в электронной аппаратуре». В работе конференции приняли участие представители Министерства промышленной политики Украины, руководители и главные специалисты ряда академических и отраслевых институтов, предприятий и вузов стран СНГ.

В Программу конференции вошли 384 доклада, подготовленных учеными, специалистами, аспирантами из Азербайджана, Белоруссии, Грузии, Иордании, Молдовы, России, Туркмени, Узбекистана и Украины. Среди соавторов докладов

были представители Австралии, Германии и США.

Конференция проходила на пленарных и секционных заседаниях. Работали секции:

Обработка сигналов. Схемотехника. Системотехника;

Информационные технологии. Компьютерные системы и сети;

Проектирование, конструирование, производство и контроль электронных средств;

Функциональная электроника. Микро- и нанотехнологии;

Экологический мониторинг.

Наиболее интересными для журнала «ТКЭА» были последние три секции. Представленные доклады охватили достаточно широкий спектр проблем, которые решаются прикладной наукой на современном этапе. Вместе с тем организаторам конференции в основном удалось составить календарь таким образом, чтобы заседания в рамках секций носили характер тематических подсекций, что способствовало деловой атмосфере обсуждения сообщений.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

По сравнению с конференцией «СИЭТ-2004» увеличилось количество представленных докладов. Выросла доля докладов отраслевых НИИ и КБ, что позволяет надеяться на возрастание интереса промышленности к конференции.

К сожалению, не все докладчики смогли прибыть для выступлений. А знакомство с рефератами докладов в Трудах конференции (и даже с представленными полными текстами докладов) не может заменить живого общения.

Однако в целом конференция удалась, чему, конечно, способствовала и прекрасная погода на протяжении всего времени ее проведения.

Очередная, VII конференция «СИЭТ» пройдет в 2006 году в последней декаде мая. К этому времени, надеемся, в журнале «ТКЭА» уже будут опубликованы материалы «СИЭТ-2005», заслуживающие внимания читателей.

Г. т. н. Панов Л. И.