

Разрешающая способность измерительной установки	Тип В, равномерное распределение $u_{pc} = a_{pc} / \sqrt{3}$; $a_{pc} = 0,001^\circ\text{C}$	$1/S$ $S = 40 \text{ Ом/с}$	$0,000006^\circ\text{C}$	$0,000006^\circ\text{C}$
Перепад температур по вертикальной оси рабочего объема	Тип В, нормальное распределение $u_{верт} = a_{верт} / \sqrt{3}$	Не учитывается, т. к. эталонный и поверяемый датчики устанавливаются на одну глубину	0	0
Перепад температур по горизонтальной оси рабочего объема	Тип В, равномерное распределение $u_{гор} = a_{гор} / \sqrt{3}$; $a_{гор} = 0,07^\circ\text{C}$	1	$0,04^\circ\text{C}$	$0,04^\circ\text{C}$

Суммарная стандартная неопределенность измерения:

$u_{\text{сумм}}(660) = \sqrt{u_{\text{изм}_t}^2 + u^2(\text{ts})^2 + u^2(\text{пр})^2 + u^2_{pc} + u^2_{\text{изм}_t} + u^2_{\text{пр}} + u^2_{pc} + u_{\text{гор}}^2} = 0,07^\circ\text{C}$, составляющие с индексом «Э» относятся к эталонному средству измерения, с индексом «раб» – к поверяемому.

Расширенная неопределенность измерения:

$u_{\text{расш}}(660) = 2u_{\text{сумм}}(660) = 0,14^\circ\text{C}$.

УДК 531.714

К. ф.-м. н. В.Ф. Митин, В.В. Холевчук, к. т. н. И.Ю. Немиш, Е.В. Митин
Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины
Н.С. Болтовец
Государственный научно-исследовательский институт «Орион»
г. Киев

Термометры сопротивления и многофункциональные сенсоры для одновременного измерения температуры и магнитного поля

Введение

Данная работа является обобщением последних достижений в области создания термометров сопротивления на основе пленок германия (Ge) на арсениде галлия (GaAs). В работе представлены основные модели Ge – GaAs-термометров, которые перекрывают область измеряемых температур от 0,02 до 500 К, приведены конструкции и характеристики термометров в диапазоне температур от 0,02 до 500 К, в сильных магнитных полях (до 14 Т) и при воздействии гамма-излучения (до 7,6 МГр).

В работе также представлен многофункциональный сенсор для одновременного измерения низких температур и сильных магнитных полей, который состоит из термометра сопротивления на основе структуры Ge – GaAs и сенсора магнитного поля (преобразователя Холла) на основе структуры InSb – GaAs, расположенных в общем корпусе.

Создание таких приборов было направлено на решение следующих трех задач, актуальных в криогенной термометрии. Во-первых, измерение температуры в присутствии сильных магнитных полей. Во-вторых, измерение температуры в присутствии высоких уровней

ней ионизирующего излучения. Такие требования предъявляются при использовании термометров в современных установках физики высоких энергий (сверхпроводящих ускорителях элементарных частиц), эксплуатация которых предусматривает наличие высокого уровня радиации, сильного магнитного поля и низкой температуры. Третья задача связана с измерением быстротеменяющихся тепловых процессов с высоким пространственным разрешением, что обуславливает необходимость создания миниатюрных (субмиллиметровых размеров) сенсоров, обладающих малой инерционностью. К таким задачам можно отнести, например, эксперименты по изучению турбулентности в жидком, в частности сверхтекучем, гелии при сверхнизких температурах (0,02–4,2 К), а также задачи, связанные с различными микрокалориметрическими измерениями, в частности при изучении свойств различных материалов при низких температурах.

Конструкции и термометрические характеристики сенсоров

Термометры сопротивления. Термочувствительные пленки получают методом термического испарения Ge в вакууме на подложки из полужолирующего GaAs. Электрические свойства пленок существенно зависят от технологических условий их изготовления и могут варьироваться в широких пределах. Ge – GaAs-технология позволяет создать широкий спектр термометров сопротивления, обладающих различными термометрическими характеристиками. Основные принципы Ge – GaAs-технологии, которые позволяют получать необходимые электрические свойства для создания сенсоров различных физических величин, изложены в [1].

Чувствительные элементы термометров изготавливаются с использованием современных методов групповой микроэлектронной технологии и помещаются в герметичные корпуса различной конструкции. Наиболее распространенным является цилиндрический корпус с размерами $\varnothing 3,0 \text{ мм} \times 5,0 \text{ мм}$ и микрокорпус с размерами $\varnothing 1,2 \text{ мм} \times 1,0 \text{ мм}$ [2].

На основе пленок Ge был разработан целый ряд термометров сопротивления, предназначенных для работы в различных диапазонах температур и обладающих различными характеристиками [3]. В настоящее время производится [4] пять моделей термометров сопротивления, обозначенных как TTR-х и предназначенных для использования в различных диапазонах температур: TTR-D (0,03–300 К), TTR-G (0,3–300 К), TTR-M (1,5–400 К), TTR-2 (70–400 К) и TTR-3 (200–500 К). На рис. 1 представлены термометрические характеристики термометров различных моделей.

Многофункциональные сенсоры. Многофункциональные сенсоры (DFS, Dual Function Sensor) предназначены для одновременного и локального измерения низких температур и сильных магнитных полей. Многофункциональные сенсоры также позволяют повысить точность измерения температуры в присутствии сильных магнит-

ных полей, используя метод коррекции, основанный на знании величины магнитного поля и чувствительности термометра к магнитному полю. В настоящее время разработаны две модели многофункциональных сенсоров для использования в диапазонах температур 1,5–400 К (модель DFS-1) и 0,1–400 К (модель DFS-2).

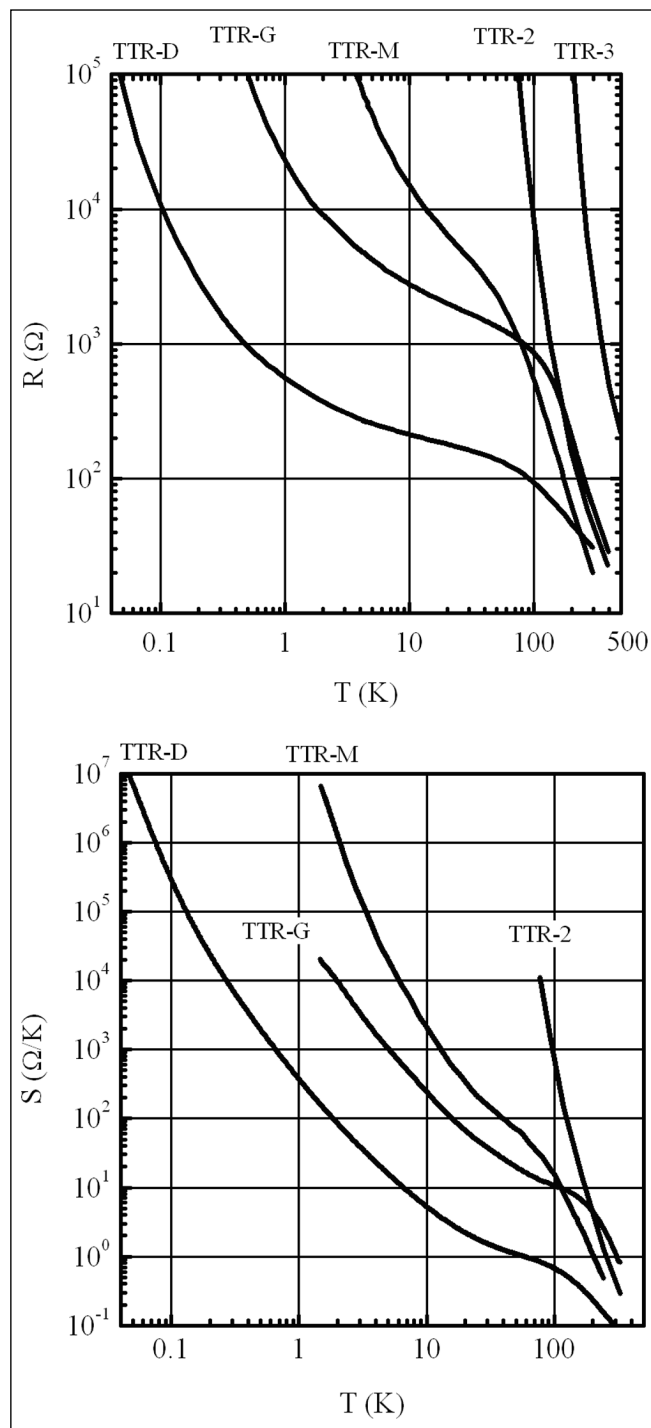


Рис. 1. Температурные зависимости сопротивления (R) и термочувствительности (S) для различных моделей термометров на основе структуры Ge – GaAs

Многофункциональный сенсор состоит из термометра сопротивления на основе структуры Ge – GaAs и сенсора магнитного поля (преобразователя Холла) на основе структуры InSb – GaAs, расположенных в общем корпусе с размерами (3,5 × 2,2 × 10,1) мм (рис. 2). Многофункциональный сенсор имеет восемь электрических выводов: четыре для термометра и четыре для сенсора магнитного поля. На рис. 3 представлены термометрические характеристики многофункциональных сенсоров. Магнитометрические характеристики DFS представлены на рис. 4.

Влияние магнитного поля на термометры сопротивления

Поведение Ge – GaAs-термометров в магнитном поле существенно отличается для различных моделей и зависит от природы механизмов электропроводности, ответственных за термочувствительность, которые, в свою очередь, зависят от уровня легирования, степени компенсации и структуры пленок Ge.

Ошибка измерения температуры, связанная с влиянием магнитного поля, может быть выражена как отношение $\Delta T/T$, где $\Delta T = T(B) - T_0$, T_0 – температура, измеренная в отсутствие магнитного поля, $T(B)$ – температура, индицируемая термометром в магнитном поле. В табл. приведена ошибка измерения ($\Delta T/T$, %) в зависимости от температуры и магнитного поля для различных моделей термометров.

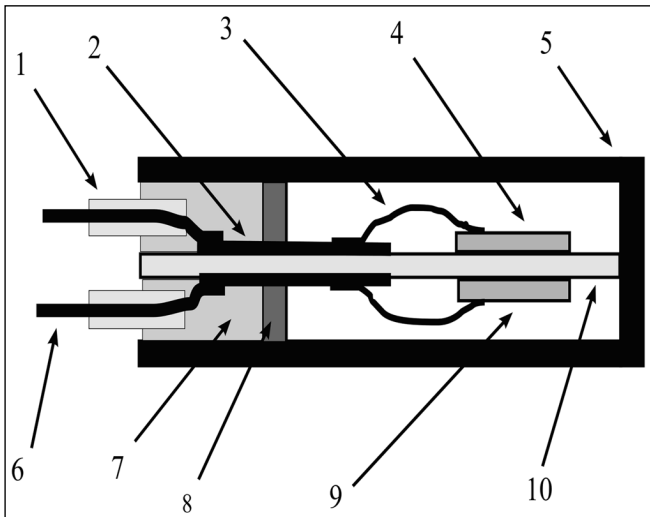


Рис. 2. Конструкция многофункционального сенсора типа DFS: 1 – защитная полимерная трубка, используемая также для маркировки выводов; 2 – токовые электроды; 3 – золотые электрические выводы с чувствительных элементов; 4, 9 – чувствительные элементы (термометр сопротивления и преобразователь Холла); 5 – медный позолоченный корпус; 6 – выводы; 7 – эпоксидный герметик; 8 – защитная стенка; 10 – диэлектрическая плата

Для Ge – GaAs-термометров модели TTR-G наблюдается положительное магнитосопротивление при $T > 1$ К. Для модели TTR-M при $T < 5$ К наблюдается отрицательное магнитосопротивление с максимумом в магнитном поле индукцией 2–3 Т. При увеличении магнитного поля отрицательное магнитосопротивление уменьшается, стремясь к нулю в магнитном поле 5–6 Т, и при больших полях становится положительным.

Для сверхнизкотемпературных Ge – GaAs-термометров модели TTR-D наблюдается отрицательное магнитосопротивление при температурах ниже 0,3 К, ко-

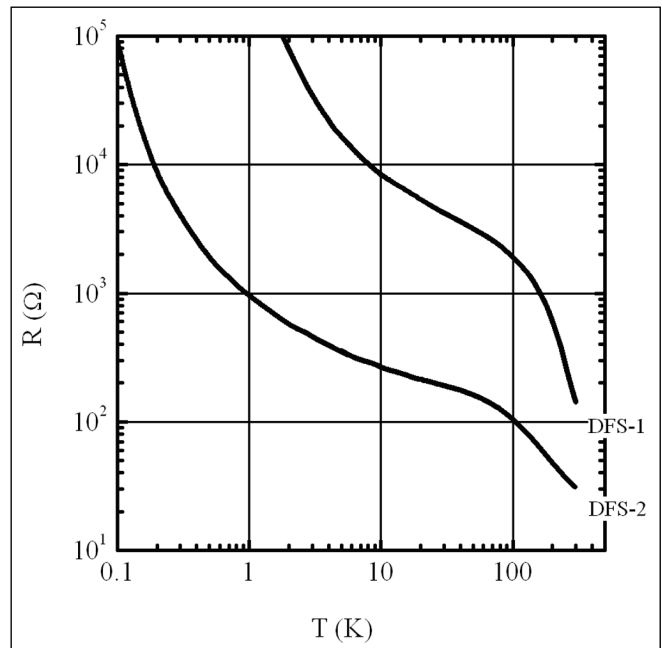


Рис. 3. Температурные зависимости сопротивления (R) для термометров DFS-1 и DFS-2

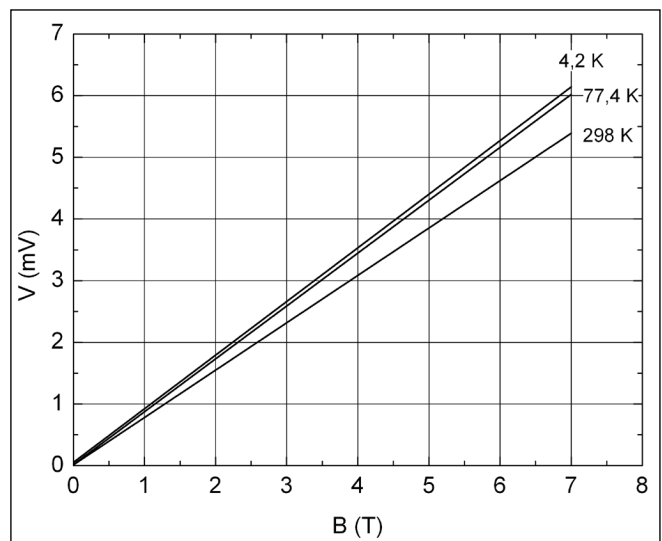


Рис. 4. Зависимость напряжения Холла для DFS Холл-сенсора при токе 0,5 мА и температурах 4,2 К; 77,4 К и 298 К

Ошибка измерения температуры ($\Delta T/T$, %), индуцируемая магнитным полем для различных моделей термометров

Модель	Температура (К)	Индукция магнитного поля (Т)				
		2,5	4	6	8	14
TTR-G	0,5	0,43	- 1,74	- 3,65	- 6,2	-
	1,0	0,0	- 0,3	- 0,8	-	-
	2,1	- 0,82	- 2,8	- 6,8	- 11,1	- 24,1
	4,2	- 0,4	- 1,0	- 2,7	- 4,7	- 12,5
	77,4	- 0,13	- 0,21	- 0,3	- 0,45	- 2,0
TTR-D	0,1	63,9	66,7	69,5	-	-
	0,3	0,5	- 0,55	- 1,0	-	-
	4,2	- 5,0	- 8,1	- 12,0	-	-
TTR-M	4,2	0,5	0,37	- 0,44	- 2,0	-

торое возрастает с уменьшением температуры. В интервале температур 0,5–4,2 К наблюдается небольшое положительное магнитосопротивление. В интервале 0,3–0,5 К магнитосопротивление практически равно нулю во всем диапазоне магнитных полей до 6 Т.

Влияние гамма-радиации на термометры сопротивления

Ge – GaAs-термометры модели TTR-G облучались гамма-квантами. В качестве источника излучения использовался ⁶⁰Co (E = 1,25 МэВ), который обеспечивал скорость набора дозы 2,52 кГр/ч до интегральной дозы 7,6 МГр. Температура в зоне облучения была приблизительно 300–315 К.

Восемь термометров подвергались облучению. Было осуществлено девять экспозиций на протяже-

нии пяти месяцев. После каждой экспозиции гамма-квантами проводились измерения сопротивления термометров в жидком гелии и азоте с использованием транспортных дьюаров. Один сенсор не подвергался облучению, но охлаждался и измерялся вместе с остальными для контроля. Полная погрешность измерений составляла ~ ±10 мК в жидком гелии и ~ ±25 мК в жидком азоте. Результаты исследований представлены на рис. 5, 6, где показаны ошибки измерения температуры ΔT в зависимости от дозы гамма-излучения при 4,22 К и 77,4 К.

Как видно, при 4,22 К практически все сенсоры имели флуктуации сопротивления, эквивалентные $\Delta T = \pm 10$ мК до доз 1,5 МГр. При более высоких дозах сопротивление возрастало, и ΔT составляло от - 42 до - 93 мК для различных термометров при дозе 7,6 МГр.

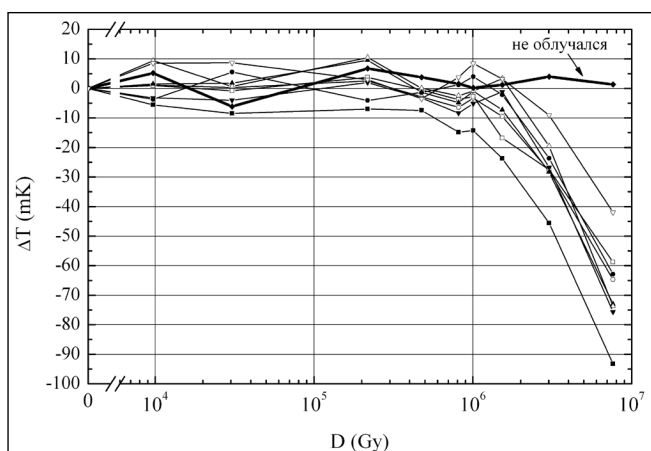


Рис. 5. Ошибка измерения температуры (ΔT), связанная с воздействием гамма-радиации, в зависимости от дозы облучения (D) при температуре 4,2 К

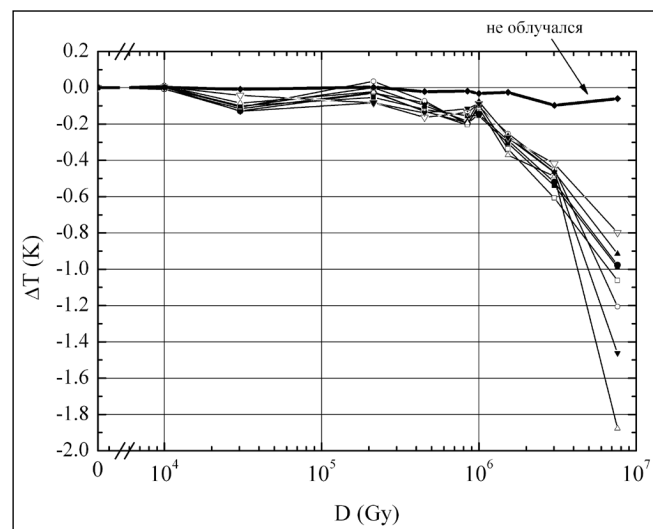


Рис. 6. Ошибка измерения температуры (ΔT), связанная с воздействием гамма-радиации, в зависимости от дозы облучения (D) при температуре 77,4 К

При 77,4 К, $\Delta T < -0,2$ К до дозы ~ 1 МГр и затем увеличивалось до $(-0,8) - (-1,9)$ К для различных термометров при дозе 7,6 МГр.

Выводы

Разработаны и исследованы термометры сопротивления на основе структуры Ge – GaAs, перекрывающие диапазон температур от 0,03 К до 400 К. Исследовано поведение термометров в магнитных полях и под воздействием гамма-излучения. Термометры обладают малыми ошибками измерения температуры в магнитном поле и высокой радиационной стойкостью (в условиях гамма-радиации) вплоть до дозы 1 МГр.

Разработаны и исследованы многофункциональные сенсоры для одновременного и локального измерения низких температур (0,1–400 К и 1,5–400 К) и сильных магнитных полей. Многофункциональные сенсоры предназначены для решения проблемы точного изме-

рения температуры в магнитном поле с использованием метода коррекции, основанного на знании величины магнитного поля и чувствительности термометра к магнитному полю.

Литература

1. Mitin V.F., Tkhorik Yu.A., Venger E.F. All-purpose technology of physical sensors on the base of Ge/GaAs heterostructures // *Microelectronics Journal*. 1997. №28. Pp. 617–625.
2. Boltovets N.S., Dugaev V.K., Kholechuk V.V., McDonald P.C., Mitin V.F., Nemish I.Yu., Pavese F., Peroni I., Sorokin P.V., Soloviev E.A., Venger E.F. New generation of resistance thermometers based on Ge film on GaAs substrates // *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry*. 2003. №7. Pp. 399–404.
3. Boltovets N.S., Kholevchuk V.V., Konakova R.V., Mitin V.F., Venger E.F. Ge-film resistance and Si-based diode temperature microsensors for cryogenic applications // *Sensors and Actuators*. 2001. №92. Pp. 191–196.
4. Научно-производственное предприятие ООО «Микро-Сенсор», <http://www.microsensor.com.ua>

УДК 531.781

Ф.И. Погорелов
НПО «Резерв»
г. Жуковский

Метод оперативного планирования сроков поверки автоматизированной системы контроля и управления параметрами защитной среды

Оперативное планирование сроков поверки автоматизированной системы контроля и управления (АСКУ) параметрами защитной среды (температура и относительная влажность воздуха) на основе анализа текущего технического состояния позволяет осуществлять мероприятия по метрологическому обеспечению объектов вооружения и военной техники при длительном хранении на качественно новом уровне. В основе методов эксплуатации АСКУ [1, 2] предложено использовать априорную информацию, заложенную в фундаментальных физических закономерностях о распределении характеристик пространственно-временных, энергетических и других зависимостей измеряемых величин, в частности информацию о соотношении составляющих погрешностей измерений.

Экспериментально доказано, что аддитивная составляющая систематической погрешности измерений электрической емкости – 90% от суммарной, напряжения – 60–90%. В ряде работ показано, что использование пространственно-временной зависимости температуры [2, 3] позволяет снизить систематическую погрешность измерений в 2–3 раза. При заданных требованиях к погрешности измерений появляется возможность использовать получаемый «запас по точности» для повышения качества измерений, и в частности для оперативного планирования сроков поверки АСКУ.

Применение метода оперативного планирования сроков поверки АСКУ условно может быть разбито на три этапа.

1-й этап. Подготовка исходных данных. Пусть по результатам очередной поверки получены данные о систематической погрешности системы АСКУ (Δ_0) и ее аддитивной составляющей ($\Delta_{ад}$). Тогда, следуя принятым в [1] допущениям, текущая систематическая погрешность равна:

$$\Delta(t) = \Delta_m(t) + \Delta_{ад}(t) = \Delta_{m_0} + \Delta_{ад_0} + t \times (K_m + K_{ад}), \quad (1)$$

где $\Delta_{m_0} = \Delta_0 - \Delta_{ад_0}$ – мультипликативная составляющая систематической погрешности; $\Delta_m(t) = \Delta_{m_0} + t \times K_m$; $\Delta_{ад}(t) = \Delta_{ад_0} + t \times K_{ад}$; K_m , $K_{ад}$ – коэффициенты регрессии, учитывающие влияние деградационных процессов во времени.

2-й этап. Определение номинального (назначенного) межповерочного интервала. В общем случае межповерочный интервал устанавливается в нормативных документах на систему АСКУ. При этом исходят из того, что срок очередной поверки T_c назначается, когда $\Delta(t)$ становится соизмеримой с допустимым значением $\Delta_{доп}$:

$$T_c = \frac{\Delta_{доп} - \Delta_0}{K_{\Sigma}}, \quad (2)$$

где $K_{\Sigma} = K_m + K_{ад} = \text{const}$, $\Delta_0 = \Delta_{m_0} + \Delta_{ад_0} = \text{const}$.