

К. ф.-м. н. В. Ф. МИТИН, В. В. ХОЛЕВЧУК, к. т. н. Е. А. СОЛОВЬЕВ,
А. Б. СИДНЕВ, д. ф.-м. н. Е. Ф. ВЕНГЕР

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ
E-mail: mitin@microsensor.com.ua

КРИОГЕННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК Ge–InP

Пленки Ge на InP(100) могут быть использованы для создания криогенных термометров сопротивления. Они обладают хорошей термочувствительностью и относительно малым магнетосопротивлением. Структура пленок является аморфной или поликристаллической с низким уровнем структурного совершенства. Пленки обладают малой подвижностью носителей заряда — порядка $7 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Погрешность при измерении температуры составляет 5% в магнитном поле 11 Тл при температуре 4,2 К и 14% в магнитном поле 14 Тл при температуре 2,2 К.

Ключевые слова: гетероструктура Ge–InP, сенсоры температуры, тонкие пленки, криогенные температуры, магнитное поле, измерение.

Наиболее распространенными в наше время рабочими средствами измерения температуры являются термопары, термометры сопротивления (металлические и полупроводниковые) и диодные сенсоры температуры. Обзор существующих измерительных преобразователей температуры, в частности для измерения низких температур, можно найти, например, в [1—3]. Как известно, магнитное поле сильно влияет на характеристики термопар, металлических резисторов и кремниевых диодов, делая их практически непригодными для измерения температуры в присутствии магнитного поля. Металлические резисторы и диодные сенсоры температуры также уступают полупроводниковым термометрам сопротивления по радиационной стойкости. Полупроводниковые же резистивные сенсоры температуры обладают малым магнетосопротивлением [4—9] и высокой стойкостью к радиации [7, 10—11].

Несмотря на то, что значительное количество научных исследований посвящены разработке криогенных термометров сопротивления, не так много таких термометров изготавливают серийно. В настоящее время для практической криогенной термометрии имеются на рынке и широко используются полупроводниковые термометры сопротивления, изготовленные из пленок оксинитрида циркония (0,1—300 К) [1, 3], композиционного углерода (1—420 К) [12], объемного и пленочного германия (0,03—400 К) [7—9, 13], а также оксида рутения (0,03—30 К) [1, 3].

Для создания криогенных термометров сопротивления могут быть использованы пленки Ge на InP(100), которые обладают хорошей термочувстви-

тельностью и относительно малым магнетосопротивлением. Постоянные решетки Ge и InP сильно отличаются (рассогласование составляет 3,9% [14]), причем у Ge она меньше, чем у InP, поэтому пленки Ge на InP должны находиться в состоянии растяжения. Их коэффициенты термического расширения также различны. Подложка InP разрушается при температуре больше 325°C, а значит проводить осаждение пленок методом испарения Ge в вакууме при температуре подложки выше 325°C нельзя [14], и поэтому структура пленок Ge на InP должна быть аморфной или иметь достаточно сильно несовершенную поликристаллическую структуру.

Целью данной работы было получение тонких (170—190 нм) пленок Ge на подложках из полупроводникового InP методом испарения Ge в вакууме при критической температуре подложки 310°C, пригодных для получения криогенных термометров сопротивления, обладающих высокой температурной чувствительностью и относительно слабой чувствительностью к магнитному полю и способных работать в диапазоне температур 1,5—400 К.

Технология получения и методы исследования

Пленки осаждались методом термического испарения Ge в вакууме ($2 \cdot 10^{-4}$ Па) на подложки из полупроводникового InP(100). Температура подложки T_0 в течение осаждения пленки составляла 310°C, скорость осаждения V была постоянна в процессе напыления, однако для получения различных пленок она варьировалась от 0,03 до 0,06 нм/с. Перед осаждением подложка подвергалась термообработке в вакууме при температуре 310°C в течение 15 мин. Перед осаждением все подложки обраба-

Авторы выражают глубокую благодарность П. М. Литвину и А. В. Кучику за обсуждение работы и полезные советы.

Условия осаждения и параметры пленок Ge (*p*-типа проводимости при 300 K)

Номер образца	T_0 , °C	V , нм/с	d , нм	ρ_{300} , Ом·см	p , 10^{18} см $^{-3}$	μ , см 2 /(В·с)	x	RMS, нм
1	310	0,03	190	0,187	3,4	7,5	0,8	2,25
2		0,061	170	0,324	4,6	6,5	0,7	2,6

тывались в травителе HCl + H₂O = 1:4 в течение 2 мин. Толщина полученных пленок d варьировалась в пределах 170—190 нм. Пленки Ge обладали проводимостью *p*-типа, их удельное сопротивление составляло $\rho = 0,2—0,3$ Ом·см, концентрация дырок $p = (3—5) \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$, холловская подвижность $\mu = 6,5—7,5$ см 2 /(В·с) при комнатной температуре. Условия осаждения и параметры пленок представлены в табл. 1.

Качество гетероструктуры Ge–InP определялась методом высокоразрешающей рентгеновской дифракции с использованием CuK $_{\alpha}$, измерения проводились на дифрактометре Philips MRD. Наноморфология поверхности пленок Ge изучалась с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) NanoScope IIIa в режиме периодического контакта с использованием кремниевое острья с номинальным радиусом 10 нм и углом при вершине 16°.

Электрические параметры пленок Ge определялись по проводимости, эффекту Холла и магнетосопротивлению, которые измерялись при комнатной температуре и индукции магнитного поля 2 Тл. Для определения низкотемпературной зависимости сопротивления были проведены измерения в интервале температур T от 2,0 до 300 К. Измерения магнетосопротивления проводились в сверхпроводящем магните, создававшем индукцию B до 11 Тл при 4,2 К и до 14 Тл при 2,2 К.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Кристаллическая структура и морфология поверхности

Как показали исследования дифракции рентгеновского излучения, полученные пленки Ge на InP обладают низким уровнем структурного совершенства. На рис. 1 представлены кривые качания для Ge–InP при разных скоростях роста (отражение 004). Для удобства проведения анализа пики германиевой пленки аппроксимированы гауссианами. Полуширина максимумов составляет 0,740° и 0,879° для образцов 1 и 2 соответственно. Уровень остаточных механических деформаций в образце 2 в два раза выше, чем в образце 1. Подложечный монокристалл InP частично находится в деформированном состоянии, о чем

свидетельствует выраженная асимметрия пика отражения X -лучей.

АСМ-изображения пленок приведены на рис. 2. Как видно, рельеф обоих образцов идентичен и состоит из массива плотно упакованных зерен с незначительным

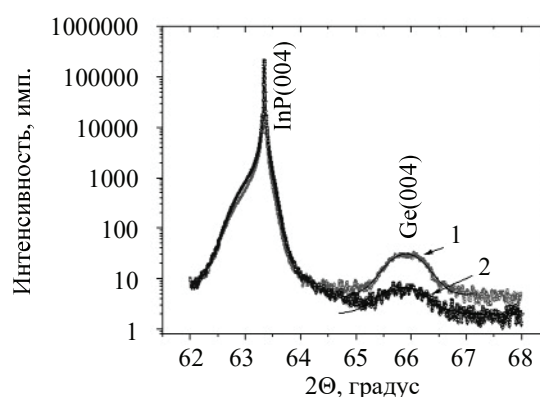


Рис. 1. Кривые дифракционного отражения (004) двух образцов пленок Ge–InP, полученных при разных скоростях роста (см. табл. 1)

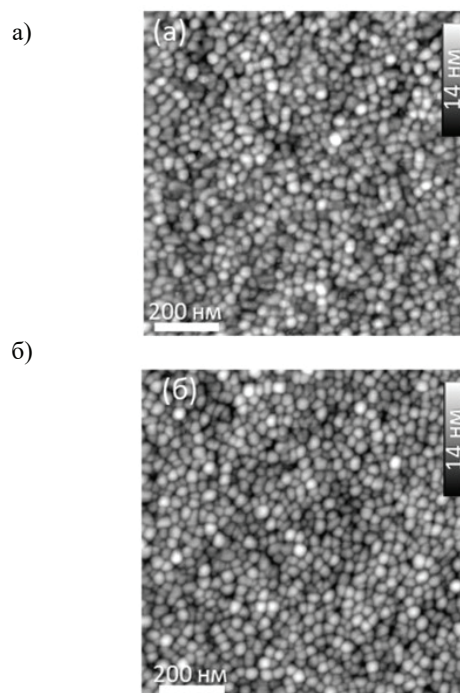


Рис. 2. АСМ-изображения фрагментов поверхности пленок Ge на InP образцов 1 (а) и 2 (б)

разбросом по размерам. Среднеквадратичная шероховатость RMS поверхности составляет 2,25 нм для образца 1 и 2,60 нм для образца 2 (на базовой площади 5×5 мкм). Зерна поверхности практически одинаковы для обоих образцов. Распределение по размерам имеет нормальный характер, максимум приходится на 13 нм, полуширина распределения находится в пределах 8—18 нм.

Электропроводность и магнетосопротивление

Низкая холловская подвижность μ в пленках подтверждала низкий уровень совершенства структуры. Исследования показали сильную зависимость сопротивления пленок от температуры. Анализ приведенных на **рис. 3** результатов указывает на то, что температурная зависимость сопротивления в температурном диапазоне 2—25 К может быть описана выражением $\rho(T) = \rho_0(T)\exp[(T_x/T)^x]$, где $\rho_0(T) = AT^n$, T_x , A — параметры материала, величина x принимает значения от 0,7 до 0,8 для различных пленок (см. табл. 1). Полученные данные хорошо согласуются с известным фактом, что при низких температурах в неупорядоченных и легированных полупроводниках характер электропроводности является прыжковым.

Предварительные результаты по стабильности параметров экспериментальных образцов термометров показали, что при $T = 273,15$ К (0°C) стабильность лучше $\pm 0,1$ К, при $T = 77,4$ К лучше $\pm 0,02$ К, а при $T = 4,2$ К лучше $\pm 0,01$ К.

На **рис. 4** представлены типичные кривые магнетосопротивления в виде $\Delta\rho/\rho$ (где $\Delta\rho = \rho_B - \rho$ — разность между значениями сопротивления, измеренными в присутствии магнитного поля ρ_B и в его отсутствие ρ), полученные для термометров на основе пленок Ge на InP при 2,2 и 4,2 К. При проведении измерений термометры были расположены таким образом, что вектор магнитной индукции B был парал-

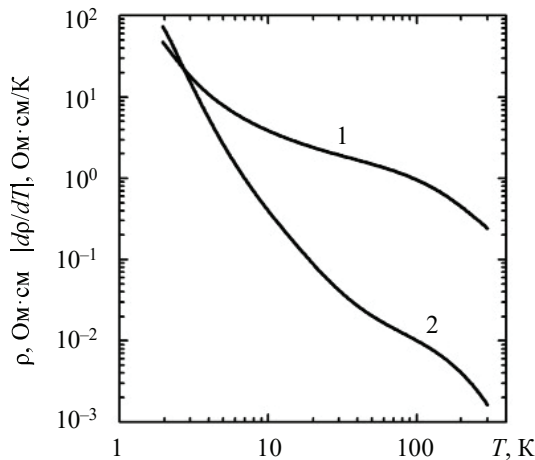


Рис. 3. Типичные температурные зависимости удельного сопротивления ρ (1) и термочувствительности dp/dT (2), полученные для пленки Ge на InP

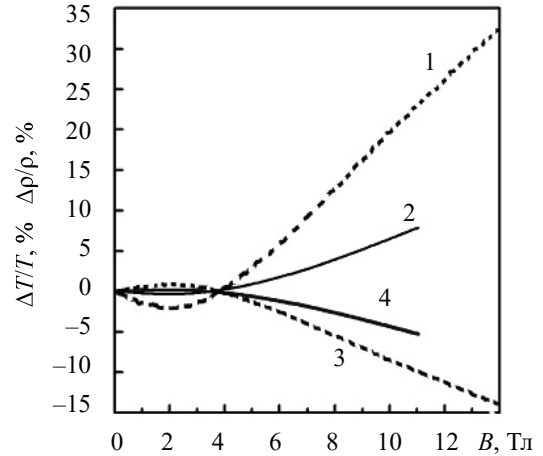


Рис. 4. Типичные зависимости магнетосопротивления $\Delta\rho/\rho$ (1, 2) и точности измерения температуры $\Delta T/T$ (3, 4) от магнитного поля, полученные для пленки Ge на InP при температурах 2,2 К (пунктир) и 4,2 К (сплошные)

Таблица 2

Точность измерения температуры при $T = 4,2$ К в зависимости от величины магнитного поля для различных резистивных сенсоров температуры

Сенсоры температуры	$\Delta T/T$, %, в магнитном поле (Тл)				
	2,5	4,0	6,0	8,0	14,0
Ge/InP	0,19	-0,1	-1,2	-2,6	—
SiC/Al ₂ O ₃ , TD#1 [15]	-0,5	-0,6	-2,0	-3,5	-8,8
Ge/GaAs, TTR-M [7]	0,5	0,5	-0,1	-1,3	—
ZrN _x O _y , Cernox™ [4]	0,11	0,2	—	-0,11	-0,85
Ge-bulk [9]	0,2	-0,03	-0,8	-1,9	-13,3
Carbon Ceramic, TVO [16, 17]	-0,5	-1,5	-3,9	-5,2	—
CrN/Si [5, 6]	0,04	0,04	0,05	0,08	—
CGR Carbon-Glass™ [18]	-0,5	—	—	-2,3	-4,9

делен нормали n к плоскости пленки. Это исключало влияние направления вектора B на величину магнетосопротивления, которое может быть анизотропным, что требует дополнительных исследований.

Для исследуемых термометров магнетосопротивление отрицательно в магнитных полях до 3 Тл, пик приходится на примерно 1,8 Тл. С ростом магнитного поля магнетосопротивление проходит через ноль при 3,5 Тл и становится положительным. Точность в измерении температуры зависит не только от магнетосопротивления, но и от чувствительности сенсора. На рис. 4 кроме магнетосопротивления показана также зависимость точности измерения температуры $\Delta T/T$ (где $\Delta T = T_B - T$ — разность между значениями температуры, измеренными в присутствии магнитного поля T_B и в его отсутствие T) от величины магнитного поля: погрешность составляет 5% при измерении в магнитном поле 11 Тл при температуре 4,2 К и 14% в магнитном поле 14 Тл при температуре 2,2 К.

В табл. 2 приведены данные, указывающие на то, что для полученных пленок точность измерения температуры соответствует уровню характеристик широко используемых в настоящее время резистивных криогенных сенсоров, которые могут применяться в диапазоне от 2 К до комнатной температуры [4—7, 9, 15—18].

Выводы

Проведенные исследования показали, что пленки Ge на InP(100) могут быть использованы для создания криогенных термометров сопротивления в диапазоне температуры от 1,5 до 400 К. Структура полученных пленок Ge является поликристаллической с низким уровнем структурного совершенства, а среднеквадратичная шероховатость поверхности составляет 2,25—2,60 нм. Подвижность носителей заряда в пленках небольшая и составляет $7 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Пленки обладают хорошей термочувствительностью и относительно малым магнетосопротивлением и могут быть использованы для измерения криогенных температур в магнитных полях до 14 Тл.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Rubin L.G. Cryogenic thermometry: a review of progress since 1982. *Cryogenics*, 1997, vol. 37, iss. 7, pp. 341–356. [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(97\)00009-X](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(97)00009-X)
2. Childs P.R.N., Greenwood J.R., and Long C.A. Review of temperature measurement. *Review of Scientific Instruments*, 2000, vol. 71, iss. 8, pp. 2959. <https://doi.org/10.1063/1.1305516>
3. Yeager C.J., Courts S.S. A review of cryogenic thermometry and common temperature sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2001, vol. 1, iss. 4, pp. 352–360. <https://doi.org/10.1109/7361.983476>
4. Brant B.L., Liu D.W., Rubin L.G. Low temperature thermometry in high magnetic fields VII. Cernox sensors to 32 T. *Review of Scientific Instruments*, 1999, vol. 70, iss. 1, pp. 104. <https://doi.org/10.1063/1.1149549>

5. Yotsuya T., Kakehi Y., Ishida T. Thin film temperature sensor for cryogenic region with small magnetoresistance. *Cryogenics*, 2011, vol. 51, iss. 9, pp. 546–549. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2011.07.005>

6. Zhenzhen Hui, Qiumin Meng, Renhuai Wei et al. CrN thin films with ultra-low magnetoresistance prepared via solution processing for large-area applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 696, p. 844–849. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.12.048>

7. Mitin V.F., McDonald P.C., Pavese F. et al. Ge-on-GaAs film resistance thermometers for cryogenic applications. *Cryogenics*, 2007, vol. 47, iss. 9–10, pp. 474–482. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2007.04.014>

8. Mitin V.F., Kholevchuk V.V., Kolodych B.P. Ge-on-GaAs film resistance thermometers: Low-temperature conduction and magnetoresistance. *Cryogenics*, 2011, vol. 51, iss. 1, p. 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2010.11.003>

9. Zarubin L.I., Nemish I.Y., Szmyrka-Grzebyk A. Germanium resistance thermometers with low magnetoresistance. *Cryogenics*, 1990, vol. 30, iss. 6, p. 533–537. [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(90\)90055-H](https://doi.org/10.1016/0011-2275(90)90055-H)

10. Courts S.S. High level gamma radiation effects on Cernox TM cryogenic temperature sensors. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 278, 012076. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/278/1/012076>

11. Filippov Yu.P., Golikov V.V., Kulagin E.N., Shabrato V.G. Effects of high intensity cryogenic irradiation and magnetic field on temperature sensors. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1998; vol. 43, pp. 773. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9047-4_96

12. Filippov Y.P., Smirnova T.I. Operation of the TVO temperature sensors in the range from 4.2 K up to 425 K. *Cryogenics*, 2004, vol. 44, iss. 10, pp. 735. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2004.04.002>

13. Courts S.S., Yeager C.J. Long term stability of germanium resistance thermometers. *AIP Conference Proceedings*, 2003, vol. 684, iss. 1, pp. 405. <https://doi.org/10.1063/1.1627159>

14. Madelung O. *Semiconductors: Data Handbook*, Springer, 2004.

15. Mitin V.F., Kholevchuk V.V., Semenov A.V. et al. Nanocrystalline SiC film thermistors for cryogenic applications. *Review of Scientific Instruments*, 2018, vol. 89, 025004. <https://doi.org/10.1063/1.5024505>

16. Filippov Yu.P., Shabrato V.G. Measurement of helium temperatures by TVO-sensors under magnetic fields. *Cryogenics*, 2002, vol. 42, iss. 2, p. 127–131. [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(02\)00016-4](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(02)00016-4)

17. Filippov Yu.P. How to find magneto-resistance of TVO temperature sensors in the range 0.1–10 K. *Cryogenics*, 2010, vol. 50, iss. 4, pp. 243–247. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2010.01.004>

18. Rubin L.G., Brant B.L., Sample H.H. Some practical solutions to measurement problems encountered at low temperatures and high magnetic fields. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1986, vol. 31, p. 1221–1230. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2213-9_136

Дата поступления рукописи
в редакцию 25.09 2020 г.

CRYOGENIC RESISTANCE THERMOMETERS BASED ON Ge–InP FILMS

Despite the large number of scientific articles devoted to the development of cryogenic resistance thermometers, not many of these thermometers are mass-produced. As is known, semiconductor resistive temperature sensors have low magnetoresistance and high resistance to radiation. The purpose of this work was to manufacture thin (170–190 nm) Ge films on semi-insulating InP substrates, which can be used to create cryogenic resistance thermometers with high temperature sensitivity and relatively low sensitivity to magnetic field that can operate in the 1.5–400 K temperature range.

Films of Ge on InP (100) can be used to produce cryogenic resistance thermometers. They have good thermal sensitivity and relatively low magnetoresistance.

The films were produced by thermal evaporation of Ge in vacuum ($2 \cdot 10^{-4}$ Pa) on semi-insulating InP (100) substrates. The temperature of the InP substrate during film deposition was 310°C, the deposition rate was also constant during sputtering, but varied in the range of 0.03 to 0.06 nm/s for different films. Ge films were p-type conductivity with a resistivity of 0.2–0.3 Ω·cm, hole concentration $(3–5) \cdot 10^{18}$ cm⁻³ and Hall mobility 6.5–7.5 cm²/(V·s) at room temperature.

The quality of the Ge–InP heterostructure was determined by high-resolution X-ray diffraction on a Philips MRD diffractometer. The nanomorphology of the surface of Ge films was studied using the NanoScope IIIa atomic force microscope. The crystal structure of the films is amorphous or polycrystalline with a low level of structural perfection. The effective value of the surface roughness is from 2.25 to 2.60 nm.

The obtained resistance values at different temperature in the range of 2–25 K were described by exponential dependence. Corrections in temperature measurement are 5% in a magnetic field of 11 T at a temperature of 4.2 K and 14% in a magnetic field of 14 T at a temperature of 2.2 K.

The research results indicate that the obtained films can be used to measure cryogenic temperatures in magnetic fields of up to 14 T.

Keywords: Ge–InP heterostructure; temperature sensors; thin films, cryogenic temperatures, magnetic field, measurements.

REFERENCES

- Rubin L.G. Cryogenic thermometry: a review of progress since 1982. *Cryogenics*, 1997, vol. 37, iss. 7, pp. 341–356. [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(97\)00009-X](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(97)00009-X)
- Childs P.R.N., Greenwood J.R., and Long C.A. Review of temperature measurement. *Review of Scientific Instruments*, 2000, vol. 71, iss. 8, pp. 2959. <https://doi.org/10.1063/1.1305516>
- Yeager C.J., Courts S.S. A review of cryogenic thermometry and common temperature sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2001, vol. 1, iss. 4, pp. 352–360. <https://doi.org/10.1109/7361.983476>
- Brant B.L., Liu D.W., Rubin L.G. Low temperature thermometry in high magnetic fields VII. Cernox sensors to 32 T. *Review of Scientific Instruments*, 1999, vol. 70, iss. 1, pp. 104. <https://doi.org/10.1063/1.1149549>
- Yotsuya T., Kakehi Y., Ishida T. Thin film temperature sensor for cryogenic region with small magnetoresistance. *Cryogenics*, 2011, vol. 51, iss. 9, pp. 546–549. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2011.07.005>
- Zhenzhen Hui, Qiumin Meng, Renhuai Wei et al. CrN thin films with ultra-low magnetoresistance prepared via solution processing for large-area applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 696, p. 844–849. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.12.048>
- Mitin V.F., McDonald P.C., Pavese F. et al. Ge-on-GaAs film resistance thermometers for cryogenic applications. *Cryogenics*, 2007, vol. 47, iss. 9–10, pp. 474–482. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2007.04.014>
- Mitin V.F., Kholevchuk V.V., Kolodych B.P. Ge-on-GaAs film resistance thermometers: Low-temperature conduction and magnetoresistance. *Cryogenics*, 2011, vol. 51, iss. 1, p. 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2010.11.003>
- Zarubin L.I., Nemish I.Y., Szmyrka-Grzebyk A. Germanium resistance thermometers with low magnetoresistance. *Cryogenics*, 1990, vol. 30, iss. 6, p. 533–537. [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(90\)90055-H](https://doi.org/10.1016/0011-2275(90)90055-H)
- Courts S.S. High level gamma radiation effects on Cernox TM cryogenic temperature sensors. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 278, 012076. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/278/1/012076>
- Filippov Yu.P., Golikov V.V., Kulagin E.N., Shabratov V.G. Effects of high intensity cryogenic irradiation and magnetic field on temperature sensors. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1998; vol. 43, pp. 773. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9047-4_96
- Filippov Y.P., Smirnova T.I. Operation of the TVO temperature sensors in the range from 4.2 K up to 425 K. *Cryogenics*, 2004, vol. 44, iss. 10, pp. 735. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2004.04.002>
- Courts S.S., Yeager C.J. Long term stability of germanium resistance thermometers. *AIP Conference Proceedings*, 2003, vol. 684, iss. 1, p. 405. <https://doi.org/10.1063/1.1627159>
- Madelung O. *Semiconductors: Data Handbook*, Springer, 2004.
- Mitin V.F., Kholevchuk V.V., Semenov A.V. et al. Nanocrystalline SiC film thermistors for cryogenic applications. *Review of Scientific Instruments*, 2018, vol. 89, 025004. <https://doi.org/10.1063/1.5024505>
- Filippov Yu.P., Shabratov V.G. Measurement of helium temperatures by TVO-sensors under magnetic fields. *Cryogenics*, 2002, vol. 42, iss. 2, p. 127–131. [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(02\)00016-4](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(02)00016-4)
- Filippov Yu.P. How to find magneto-resistance of TVO temperature sensors in the range 0.1–10 K. *Cryogenics*, 2010, vol. 50, iss. 4, pp. 243–247. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2010.01.004>
- Rubin L.G., Brant B.L., Sample H.H. Some practical solutions to measurement problems encountered at low temperatures and high magnetic fields. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1986, vol. 31, p. 1221–1230. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2213-9_136

DOI: 10.15222/ТКЕА2020.5-6.10
УДК 621.315.596

В. Ф. МИТИН, В. В. ХОЛЕВЧУК, С. О. СОЛОВЬЙОВ,
О. Б. СІДНІВ, Є. Ф. ВЕНГЕР

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників
ім. В. Є. Лашкарьова НАН України
E-mail: mitin@microsensor.com.ua

КРИОГЕННІ ТЕРМОМЕТРИ ОПОРУ НА ОСНОВІ ПЛІВОК Ge–InP

Попри значну кількість наукових статей, присвячених розробці криогенних термометрів опору, не так багато цих термометрів виготовляються серійно. Як відомо, напівпровідникові резистивні сенсори температури мають малий магнетоопір і високу стійкість до радіації. Метою даної роботи було отримання тонких (170–190 нм) плівок Ge на підкладках з напівізолюючого InP, які можуть бути використані для створення криогенних термометрів опору з високою температурною чутливістю і відносно слабкою чутливістю до магнітного поля, придатних для вимірювань в діапазоні температур 1,5–400 К.

Плівки осаджувалися методом термічного випаровування Ge у вакуумі ($2 \cdot 10^{-4}$ Па) на підкладки з напівізолюючого InP (100). Температура підкладки InP протягом осадження плівки становила 310°C, швидкість осадження також була постійна протягом наплення, проте варіювалася в межах 0,03 — 0,06 нм/с для отримання різних плівок. Плівки Ge мали р-тип провідності, їхній питомий опір складав 0,2–0,3 Ом·см, концентрація дірок $(3–5) \cdot 10^{18}$ см⁻³, холлівська рухливість 6,5–7,5 см²/(В·с) за кімнатної температури.

Якість гетероструктури Ge–InP визначалася методом високороздільної рентгенівської дифракції на дифрактометрі Philips MRD. Наноморфологія поверхні плівок Ge вивчалася за допомогою атомно-силового мікроскопа NanoScope IIIa. Структура плівок — аморфна або полікристалічна з низьких рівнем структурної досконалості. Ефективне значення шорсткості поверхні — від 2,25 до 2,60 нм.

Отримані дані величини опору за різних значень температури у діапазоні 2–25 К було описано експоненціальною залежністю. Похибка вимірювань температури складає 5% у магнітному полі 11 Тл за температури 4,2 К та 14% у магнітному полі 14 Тл за температури 2,2 К.

Результати досліджень вказують на те, що отримані плівки можуть бути використані для вимірювання криогенних температур в магнітних полях до 14 Тл.

Ключові слова: гетероструктура Ge–InP, сенсори температури, тонкі плівки, криогенні температури, магнітне поле, вимірювання.

Описание статьи для цитирования:

Митин В. Ф., Холевчук В. В., Соловьев Е. А., Сиднев А. Б., Венгер Е. Ф. Криогенные термометры сопротивления на основе пленок Ge–InP. Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2020, № 5–6, с. 10–15. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2020.5-6.10>

Cite the article as:

Mitin V. F., Kholevchuk V. V., Soloviev E. A., Sidnev A. B., Venger E. F. Cryogenic resistance thermometers based on Ge–InP films. Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature, 2020, no. 5–6, pp. 10–15. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2020.5-6.10>