

К. т. н. В. Р. СТЕМПИЦКИЙ, ДАО ДИНЬ ХА

Республика Беларусь, г. Минск, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

E-mail: ha.dao.dinh@bsuir.by, vstem@bsuir.by

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ AlGaN/GaN

*Представлены результаты исследований характеристик датчика Холла предложенной конструкции на основе гетероструктуры AlGaN/GaN с различными геометрическими параметрами активной области, функционирующего в диапазоне температуры от  $-25$  до  $400^\circ\text{C}$ . Исследования выполнены с использованием программных средств приборно-технологического моделирования. Активным слоем датчика является область двумерного электронного газа, которая формируется между барьерным слоем  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$  и нелегированным канальным слоем GaN. Полученные результаты (магнитная чувствительность по току  $66,4 \text{ В}/(\text{А}\cdot\text{Тл})$  при комнатной температуре, температурный коэффициент магнитной чувствительности  $0,0273 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ ) свидетельствуют о перспективности предлагаемого решения для практического использования.*

*Ключевые слова: высокотемпературный датчик Холла, гетероструктуры AlGaN/GaN, компьютерное моделирование.*

В последние годы практика применения микроэлектронных сенсоров в различных устройствах свидетельствует о необходимости расширения диапазона рабочей температуры в сторону ее увеличения. Так, автоэлектроника, авионика, нефте- и газодобыча в глубоких скважинах нуждаются в аппаратуре (в том числе магнитометрической), функционирующей при температуре до  $300-350^\circ\text{C}$ . При этом предельная рабочая температура датчиков, изготовленных на основе объемного кремния, составляет лишь  $150-170^\circ\text{C}$ , поскольку при более высоких значениях концентрация термически генерированных носителей заряда становится сравнимой с концентрацией основных носителей, что существенно ухудшает характеристики прибора. Одним из путей повышения рабочей температуры до  $350^\circ\text{C}$  [1] для кремниевых датчиков Холла (ДХ) является их формирование по технологии «кремний на изоляторе».

В полупроводниках InAs, InSb, GaAs и гетероструктурах на их основе носители заряда обладают очень высокой подвижностью. Датчики Холла на основе этих материалов имеют достаточно высокую магнитную чувствительность в диапазоне температуры  $T$  от гелиевой до комнатной. При более высокой температуре из-за узкой запрещенной зоны материала термическая активация собственных носителей может изменить кинетические свойства этих датчиков, а при  $T > 200^\circ\text{C}$  они становятся непригодными для использования. Увеличить рабочую температуру можно повышением степени легирования актив-

ного слоя, однако это приводит к снижению подвижности носителей и, как следствие, уменьшению чувствительности приборов на основе указанных полупроводников. В настоящее время максимальная температура эксплуатации большинства представленных на рынке датчиков Холла ниже  $200^\circ\text{C}$  [2].

Тонкие сильнолегированные пленки InSb на подложке GaAs являются отличным материалом для изготовления ДХ, работающих при температурах от гелиевой до комнатной. В [3, 4] описаны датчики Холла, изготовленные из таких пленок, которые функционируют как при низких температурах (от гелиевых до  $-23^\circ\text{C}$ ), так и при высоких (от комнатной до  $300^\circ\text{C}$ ).

В [5, 6] показаны возможности формирования высокотемпературных сенсорных устройств с активной областью на широкозонных полупроводниках, таких как SiC, GaN, AlN, InN, и гетероструктурах на их основе (AlGaN/GaN, AlGaN/AlN/GaN, InGaN/InN). Данная группа материалов обладает высокой термической стабильностью электрических параметров при повышенных температурах. К недостаткам следует отнести сравнительно невысокую подвижность носителей заряда, из-за чего магнитная чувствительность датчиков на их основе ниже, чем на основе узкозонных полупроводников.

В [7] показано, что карбид кремния SiC можно также использовать в качестве материала для высокотемпературных ДХ. Однако необходимость точного контроля концентрации легирующих примесей и большая толщина (до не-

скольких микрометров) проводящих слоев карбида кремния существенно ограничивает его чувствительность и стабильность при высоких температурах.

К материалам с широким спектром практических применений в последнее время относят нитриды металлов третьей группы, в частности нитрид галлия. В конструкции ДХ на основе данного материала активной (чувствительной) областью является двумерный электронный газ, который формируется между барьерным слоем AlGaN и нелегированным каналным слоем GaN. Подвижность носителей заряда в нем достигает  $2000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  при комнатной температуре [8]. Таким образом, в канальном слое GaN непосредственно под гетеропереходом формируется чрезвычайно тонкий слой с плотностью электронов  $1\cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и подвижностью до  $1260 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ . Стабильность параметров двумерного электронного газа определяет основное преимущество GaN для создания высокотемпературных ДХ. При температуре выше комнатной температурный коэффициент напряжения Холла для гетероперехода AlGaN/GaN составляет  $0,07\%/^{\circ}\text{C}$  [9], что является лучшим результатом среди известных полупроводниковых материалов.

Целью описанных в работе исследований являлась разработка и оптимизация эксплуатационных характеристик датчика Холла на основе гетероструктуры AlGaN/GaN, предназначенного для использования в системах обработки информации и функционирующего в диапазоне температуры от  $-25$  до  $400^{\circ}\text{C}$ .

#### Конструкция и характеристики датчика Холла

Конструкция ДХ на основе AlGaN/GaN-гетероперехода представлена на **рис. 1**. Структура AlGaN/GaN включает в себя: толстый ( $2,0 \text{ мкм}$ ) нелегированный слой GaN, который играет роль подложки; тонкий ( $25 \text{ нм}$ ) барьерный слой  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$ ; сформированный в активной области холловский крест из полосок длиной  $L = 50 \text{ мкм}$  и шириной  $W = 25 \text{ мкм}$ . Регистрируемый сигнал снимается с холловских электродов.

Зависимость напряжения Холла  $V_X$  от толщины активной области  $d$ , геометрического коэффициента  $G$ , постоянной Холла  $R_X$ , индукции магнитного поля  $B$ , а также силы тока  $I$ , который протекает между токовыми контактами, можно представить в виде

$$V_X = GR_X IB/d.$$

Абсолютная магнитная чувствительность  $S$  датчика Холла выражается как отношение вы-

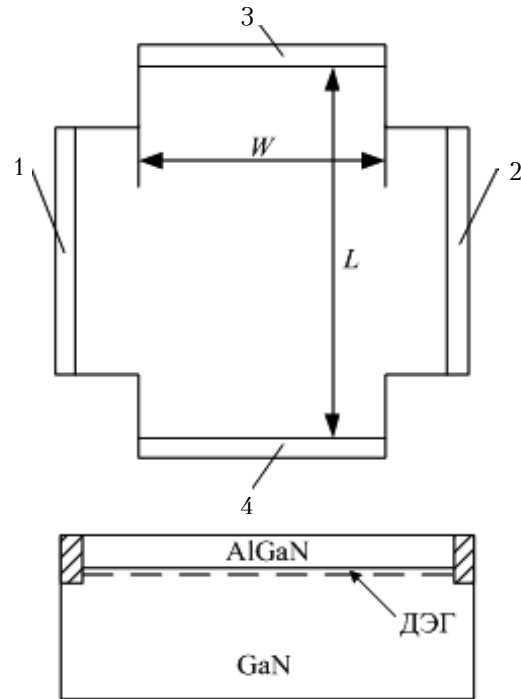


Рис. 1. Конструкция ДХ на основе гетероструктуры AlGaN/GaN с омическими контактами к токовым (1, 2) и к холловским (3, 4) электродам

ходного напряжения Холла  $V_X$  к нормальной составляющей магнитной индукции  $B$ :

$$S = \left| \frac{V_X}{B} \right|; \quad (1)$$

а магнитная чувствительность по току и по напряжению определяется, соответственно, как

$$S_I = \frac{S_A}{I} = \left| \frac{1}{I} \frac{V_X}{B} \right| = G \frac{r_X}{qN_s} \approx \frac{1}{qN_s}; \quad (2)$$

$$S_V = \frac{S_A}{V} = \left| \frac{1}{V} \frac{V_X}{B} \right| = G \frac{W}{L} \mu_X \approx \mu_X, \quad (3)$$

где  $r_X$ ,  $\mu_X$  — фактор Холла и подвижность Холла основных носителей;

$q$  — заряд носителя;

$N_s$  — поверхностная концентрация (плотность) носителей заряда в активном слое;

$V$  — приложенное напряжение.

Выражения (1) — (3) показывают, что низкая плотность носителей заряда и высокая подвижность Холла являются критическими факторами, которые необходимо учитывать при разработке датчика Холла с высокими эксплуатационными характеристиками. Для исследуемого в работе случая еще одним значимым параметром является температура. Температурный коэффициент магнитной чувствительности датчика Холла определяется формулой

$$TC_M = (1/M) (dM / dT),$$

где  $M$  — параметр ДХ, связанный с его чувствительностью (ток или напряжение).

**Результаты моделирования**

Моделирование электрических и магнитных характеристик ДХ на основе GaN выполнялось с использованием соответствующих модулей программного комплекса компании Silvaco [12]. Исследования проводились для структур, длина  $L$  которых составляла 50 мкм, а ширина  $W$  варьировалась от 10 до 40 мкм.

Как видно из представленных на рис. 2, а результатов моделирования, чувствительность по току  $S_I$  изменяется от минимального значения, равного 36,5 В/(А·Тл) при  $L/W = 1,25$ , до значения насыщения 70 В/(А·Тл) при  $L/W = 3$ . Вместе с тем, при  $L/W = 2,5$  величина  $S_I$  всего на 2,5% меньше указанного значения насыщения и составляет 68,5 В/(А·Тл), т. е. очевидно, что увеличение отношения  $L/W$  выше 2,5 не имеет смысла. Следует отметить, что на практике обычно используют соотношение  $L/W = 2-3$ .

На рис. 3 представлены результаты моделирования зависимости напряжения Холла от величины магнитного поля, откуда видно, что магнитная чувствительность исследуемой структу-

ры остается постоянной при различных значениях входного тока  $I$ . Для повышения напряжения Холла значение  $I$  следует увеличить (поскольку  $V_X$  пропорционально  $I$ ). Так, при повышении  $I$  от 0,2 до 0,6 мА напряжение Холла  $V_X$  увеличивается в 3 раза, а при его повышении до 1,0 мА значение  $V_X$  увеличивается до 5 раз.

На рис. 2, б представлена зависимость магнитной чувствительности датчика Холла по току от температуры при значении магнитного поля 0,1 Тл и входного тока 1,0 мА. Ее величина изменяется в диапазоне от 66,4 до 71,9 В/(А·Тл) при увеличении температуры от комнатной до 375°C.

С использованием линейной множественной регрессии рассчитано значение температурного коэффициента магнитной чувствительности по току. Оно составило 0,0273%/°C, что свидетельствует о высокой эффективности предлагаемой конструкции по сравнению с традиционными решениями датчиков Холла в диапазоне низких температур.

Поскольку величины  $G$  и  $r_X$  в уравнении (2) не зависят от температуры, небольшая темпера-

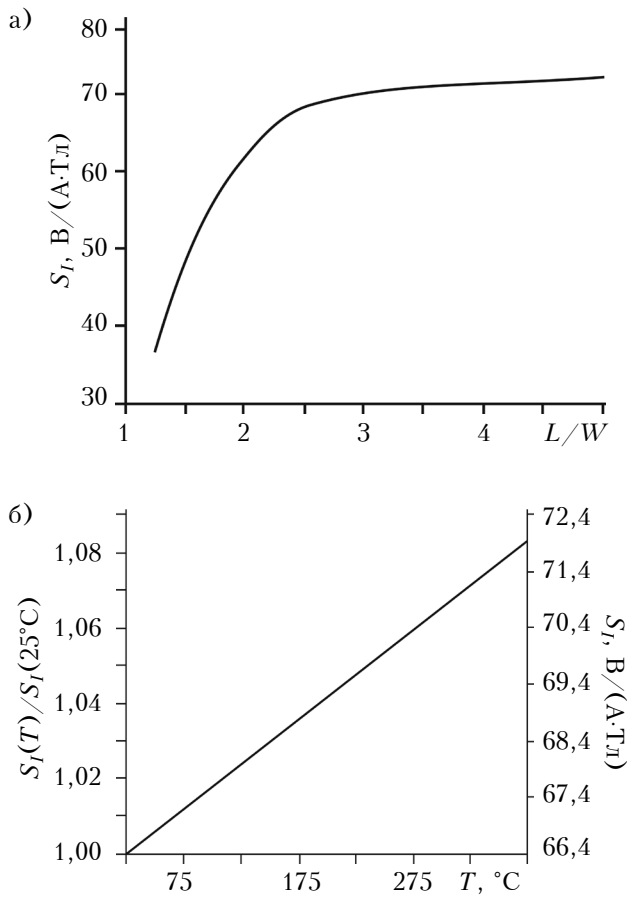


Рис. 2. Зависимость чувствительности по току  $S_I$  от отношения  $L/W$  (а) и от температуры  $T$  (б) датчика Холла при  $I = 1,0$  мА и  $B = 0,1$  Тл (шкалы на б: слева — относительные значения, справа — абсолютные)

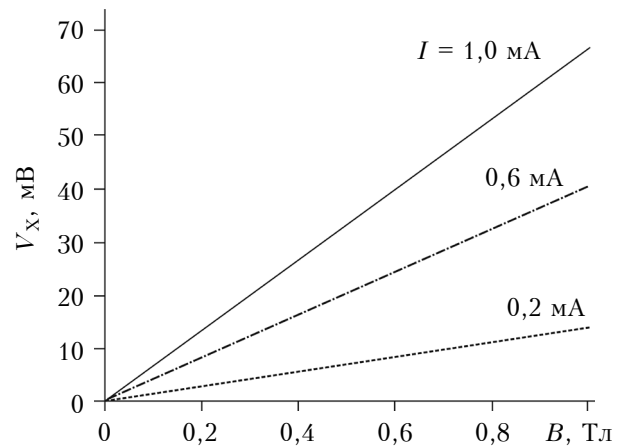


Рис. 3. Зависимости напряжения Холла  $V_X$  от магнитного поля  $B$  при различных значениях входного тока

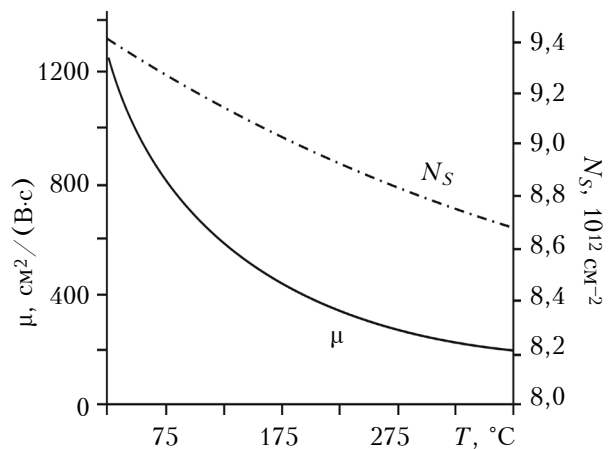


Рис. 4. Зависимость подвижности  $\mu$  и концентрации  $N_S$  электронов от температуры  $T$

Конструктивные параметры и полученные при комнатной температуре электрические характеристики различных датчиков Холла

Структура	$W \times L$ , мкм	$N_S$ , см <sup>-2</sup>	$TC_I$ , %/°C	$S_I$ , В/(А·Тл)	Источник
AlGaIn/GaN	50×50	$1,04 \cdot 10^{13}$	+0,05	77,0	[3]
	300×300	$1,15 \cdot 10^{13}$	+0,01	54,5	[2]
AlGaAs/GaAs	50×50	$1,83 \cdot 10^{12}$	-1,38	2540,0	[3]
	70×210	$2,0 \cdot 10^{12}$	-0,08	200,0	Tech. GmbH & Co. KG
КНИ	500×500	$6,5 \cdot 10^{14}$	-0,27	55,0	[10]
InAs/GaSb	1000×1000	$5,9 \cdot 10^{15}$	—	357,0	[11]
AlGaIn/GaN	25×50	$9,4 \cdot 10^{12}$	+0,02	66,4	Данная работа

турная зависимость магнитной чувствительности достигается в основном за счет уникальных транспортных свойств AlGaIn/GaN-гетероперехода. С целью объяснения физической природы зависимости чувствительности датчика Холла от температуры выполнено моделирование температурных зависимостей концентрации и подвижности носителей заряда.

Из рис. 4 видно, что при повышении температуры AlGaIn/GaN-гетероперехода от 27 до 375°С подвижность и концентрация носителей уменьшаются монотонно. При комнатной температуре подвижность носителей близка к 1260 см<sup>2</sup>/(В·с) с концентрацией  $9,4 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>. Слабая температурная зависимость магнитной чувствительности по току объясняется высокой стабильностью концентрации двумерного электронного газа на границе гетероструктуры AlGaIn/GaN. Указанное изменение рабочей температуры приводит к уменьшению плотности носителей заряда примерно на 8%, что объясняет незначительное увеличение магнитной чувствительности по току  $S_I$ .

В таблице представлены электрические характеристики различных конструкций датчиков Холла, представленные в некоторых литературных источниках, в сравнении с результатами компьютерного моделирования, проведенного в данной работе. Здесь видно, что датчик Холла предлагаемой конструкции, обладая наименьшими геометрическими размерами, обеспечивает наилучшую магнитную чувствительность и температурный коэффициент магнитной чувствительности.

### Заключение

Таким образом, исследования электрических и магнитных характеристик датчика Холла предлагаемой конструкции на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN показали его работоспособность при высоких температурах. Магнитная чувствительность датчика стабильна в диапазоне температур от 27 до 375°С и изменяется от 66,4 до 71,9 В/(А·Тл), а температурный коэффициент магнитной чувствительности составляет 0,0273%/°С.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Леонов А. В., Малых А. А., Мордкович В. Н., Павлюк М. И. Тонкопленочный кремниевый магниточувствительный полевой транзистор холловского типа с расширенным до 350°С диапазоном рабочих температур // Письма в Журнал технической физики. — 2016. — Т. 42, вып. 2. — С. 30–36.
2. Lu H., Sandvik P., Vertiatchikh A., Tucker J., Elasser A. High temperature Hall effect sensors based on AlGaIn/GaN heterojunctions // Journal of Applied Physics. — 2006. — Vol. 99. — P. 1–4. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2201339>
3. Oszwaldowski M., Berus T. Hall sensors made of n-InSb/GaAs epitaxial layers for low temperature applications // Thin Solid Films. — 2006. Vol. 515. — P. 26920–2695. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2006.07.023>
4. Oszwaldowski M., Berus T. Temperature coefficients of Hall sensors made of InSb/GaAs epitaxial layers // Sensors and Actuators A: Physical. — 2007. — Vol. 133. — P. 23–26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2006.03.037>
5. Koide S., Takahashi H., Abderrahmane A. Shibasaki I., Sandhu A. High Temperature Hall sensors using AlGaIn/GaN HEMT structures // Journal of Physics: Conference Series 352. — 2012. — P. 1–4. — <https://doi.org/10.1088/1742-6596/352/1/012009>
6. Patrick M., Thomas P., Richard G. High temperature electronics. — New York: CRC Press, Inc. — 1997.
7. Robert J., Contreras S., Camassel J., Pernot J. 4H-SiC: A material for high temperature Hall sensor // Sensors and Actuators A: Physical. — 2002. — Vol. 97–98. — P. 27–32. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247\(01\)00812-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247(01)00812-3)
8. Consejo Ch., Contreras S., Konczewicz L., Lorenzini P., Cordier Y., Skierbiszewski C., Robert J. High temperature electrical investigation of (Al,Ga)N/GaN heterostructures Hall sensor applications // Phys. Stat. Sol. — 2005. — Vol. 2. — P. 1438–1443. <http://dx.doi.org/10.1002/pssc.200460482>
9. Bouguen L., Contreras S., Jouault B., Konczewicz L., Camassel J., Cordier Y., Azize M., Chenot S., Baron N. Investigation of AlGaIn/AlN/GaN heterostructures for magnetic sensor application from liquid helium temperature to 300°С // Applied Physics Letters. — 2008. — Vol. 92. — P.043504-1–043504-3. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2838301>
10. Paun M., Udrea F. Investigation into the capabilities of Hall cells integrated in a non-fully depleted SOI CMOS technological process // Sensors and Actuators A: Physical. — 2016. Vol. 242. — P. 43–49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2016.02.014>
11. Jakub J., El-Ahmar S., Oszwaldowski M. Hall Sensors for Extreme Temperatures // Sensors. — 2011. — Vol. 11. — P. 876–885. — <http://dx.doi.org/10.3390/s110100876>
12. <http://www.silvaco.com/>

Дата поступления рукописи  
в редакцию 20.02 2017 г.

В. Р. СТЕМПИЦЬКИЙ, ДАО ДИНЬ ХА

Республика Беларусь, м. Минск, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
E-mail: ha.dao.dinh@bsuir.by, vstem@bsuir.by

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ І МАГНІТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ДАТЧИКІВ ХОЛЛА НА ОСНОВІ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaN/GaN

Представлено результати досліджень характеристик датчика Холла запропонованої конструкції на основі гетероструктури AlGaN / GaN з різними геометричними параметрами активної області, який функціонує в діапазоні температури від  $-25$  до  $400^\circ\text{C}$ . Дослідження виконано з використанням програмних засобів приборно-технологічного моделювання. Активним шаром датчика є область двовимірного електронного газу, яка формується між бар'єрним шаром  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$  і нелегованим каналним шаром GaN. Отримані результати (магнітна чутливість по струму  $66,4 \text{ В}/(\text{А}\cdot\text{Тл})$  при кімнатній температурі, температурний коефіцієнт магнітної чутливості  $0,0273\%/^\circ\text{C}$ ) свідчать про перспективність запропонованого рішення для практичного використання.

Ключові слова: високотемпературний датчик Холла, гетероструктури AlGaN/GaN, комп'ютерне моделювання.

DOI: 10.15222/ТКЕА2017.1-2.28  
UDC 621.382

V. R. STEMPITSKY, DAO DINH HA

Republic of Belarus,  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics  
E-mail: ha.dao.dinh@bsuir.by, vstem@bsuir.by

## INVESTIGATION OF ELECTRIC AND MAGNETIC CHARACTERISTICS OF HIGH-TEMPERATURE HALL SENSOR BASED ON AlGaN/GaN HETEROSTRUCTURE

The paper presents research results on the characteristics of Hall sensor based on the AlGaN/GaN heterostructure with various geometric parameters of the active region operating in the temperature range from  $-25$  to  $400^\circ\text{C}$ . The research was performed using device-technological simulation. The active layer of the proposed structure is a two-dimensional electron gas region, which is formed between the barrier layer  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$  and the undoped GaN channel layer. The results (room temperature current-related magnetic sensitivity  $66.4 \text{ V}/(\text{A}\cdot\text{T})$  and very low temperature cross sensitivity of  $0,0273\%/^\circ\text{C}$ ) indicate the prospects of the proposed solutions for the practical use.

Key words: high-temperature Hall sensor, AlGaN/GaN heterostructures, computer simulation.

### REFERENCES

- Leonov A. V., Malykh A. A., Mordkovich V. N., Pavlyuk M. I. [Thin-film silicon magnetosensitive field-effect transistor Hall type with an extended operating temperature range up to  $350^\circ\text{C}$ ]. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2016, vol. 42, no. 2, pp. 30-36. (Rus)
- Lu H., Sandvik P., Vertiatchikh A., Tucker J., Elasser A. High temperature Hall effect sensors based on AlGaN/GaN heterojunctions. *Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 99, pp. 1-4. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2201339>
- Oszwaldowski M., Berus T. Hall sensors made of n-InSb/GaAs epitaxial layers for low temperature applications. *Thin Solid Films*, 2006, vol. 515, pp. 2692-2695. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2006.07.023>
- Oszwaldowski M., Berus T. Temperature coefficients of Hall sensors made of InSb/GaAs epitaxial layers. *Sensors and Actuators*, 2007, vol. 133, pp. 23-26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2006.03.037>
- Koide S., Takahashi H., Abderrahmane A. Shibusaki I., Sandhu A. High Temperature Hall sensors using AlGaN/GaN HEMT Structures. *Journal of Physics: Conference Series* 352, 2011, vol. 11, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/352/1/012009>
- Patrick M., Thomas P., Richard G. *High temperature electronics*. New York, CRC Press, Inc, 1997, 352 p.
- Robert. J., Contreras S., Camassel J., Pernot J. 4H-SiC: A material for high temperature Hall sensor. *Sensors and Actuators*, 2002, vol. 97-98, P. 27-32. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247\(01\)00812-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247(01)00812-3)
- Consejo. Ch., Contreras S., Konczewicz L., Lorenzini P., Cordier Y., Skierbiszewski C., Robert J. High temperature electrical investigation of (Al,Ga)N/GaN heterostructures Hall sensor applications. *Phys. Stat. Sol.*, 2005, vol. 2, pp. 1438-1443. <http://dx.doi.org/10.1002/pssc.200460482>
- Bouguen. L., Contreras S., Jouault B., Konczewicz L., Camassel J., Cordier Y., Azize M., Chenot S., Baron N. Investigation of AlGaN/AlN/GaN heterostructures for magnetic sensor application from liquid helium temperature to  $300^\circ\text{C}$ . *Applied Physics Letters*, 2008, vol. 92, pp. 043504-1-043504-3. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2838301>
- Paun M., Udrea F. Investigation into the capabilities of Hall cells integrated in a non-fully depleted SOI CMOS technological process. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, vol. 242, pp. 43-49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2016.02.014>
- Jakub J., El-Ahmar S., Oszwaldowski M. Hall Sensors for Extreme Temperatures. *Sensors*, 2011, vol. 11, pp. 876-885. <http://dx.doi.org/10.3390/s110100876>
- <http://www.silvaco.com/>