

## Разработка и исследование элемента Холла по технологии 180 нм

Г.В. Прокофьев, А.Д. Попов, А.Е. Тимофеев, М.А. Косолапов, В.В. Архипов

ООО «ИДМ-ПЛЮС», alex\_93\_ti@mail.ru

**Аннотация** — Выполнено численное моделирование элемента Холла по технологии X-FAB ХН018. Результаты моделирования были использованы для предварительной оценки электрических и магнитных характеристик датчика. После изготовления тестовых датчиков Холла проведены экспериментальные исследования, приведено сравнение с результатами моделирования. На основе экспериментальных результатов разработана поведенческая модель датчика на языке Verilog-A для использования в системах проектирования.

**Ключевые слова** — технологический маршрут, элемент Холла, магниточувствительность, датчики положения, поведенческая модель.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных направлений деятельности компании «ИДМ-ПЛЮС» является разработка и производство датчиков положения и датчиков тока, содержащих интегрированные чувствительные элементы [1]. Для определения величины тока в проводнике или углового положения вала с высокой точностью используются интегрированные в микросхему преобразователи магнитного поля на эффекте Холла.

Электрические характеристики элемента Холла в основном зависят от параметров слоёв конкретной КМОП или биполярной технологии. Однако, геометрические параметры топологии активной области датчика могут оказывать существенное влияние на величину магнитной чувствительности и остаточного смещения датчика. Элементы Холла, выполненные на основе КМОП-технологии совместимы со схемой обработки, имеют высокую надежность, малые размеры, низкую себестоимость производства, что обеспечивает их широкое применение в различных устройствах и модулях [2].

В данной работе разработана и исследована конструкция магниточувствительного элемента Холла в виде «pinch»-резистора, на основе технологии XFAB ХН018 HV CMOS. Методами приборно-технологического моделирования исследованы характеристики данного элемента. Показаны результаты экспериментальных исследований тестовых образцов. Приведено описание поведенческой Verilog-A модели разработанного элемента Холла для использования в САПР-системе Cadence. Цель работы

состояла в улучшении характеристик элемента Холла по сравнению с элементом Холла компании X-FAB Semiconductor Foundries, поставляемого в виде IP-блока.

### II. РАЗРАБОТКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ПО ТЕХНОЛОГИИ ХН018

В составе библиотеки X-FAB ХН018 имеется магниточувствительный датчик Холла, размерами  $64 \times 64$  мкм, рис. 1.

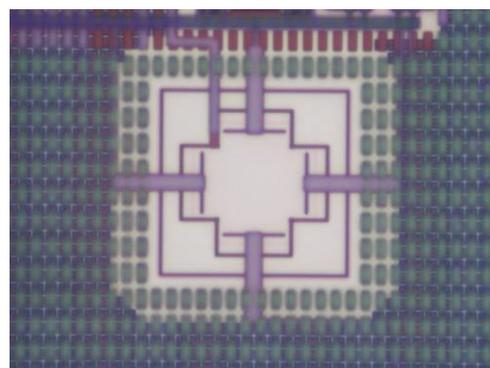


Рис. 1. Фотография чувствительного элемента Холла, разработки X-FAB

Из рис. 1 видно, что датчик имеет крестовую форму, четыре широких контакта к активной области и контакт к подложке. По спецификации данный элемент Холла имеет следующие характеристики: чувствительность  $280 - 360 \text{ В/А} \cdot \text{Тл}$  при токе смещения  $100 \text{ мкА}$  и температуре  $27^\circ\text{C}$ , сопротивление в диапазоне  $9.25 - 11.75 \text{ кОм}$ , остаточное напряжение в пределах  $\pm 10 \text{ мВ}$ , максимальное напряжение питания  $2 \text{ В}$ , температурный диапазон от  $-50^\circ\text{C}$  до  $125^\circ\text{C}$ . Температурные коэффициенты сопротивления:  $4.1 \times 10^{-3} \text{ 1/K}$ ,  $17 \times 10^{-6} \text{ 1/K}^2$ . Данный элемент был изготовлен в составе микросхемы преобразователя углового положения. После тестирования микросхемы были выявлены существенные недостатки чувствительного элемента, а именно: значительное напряжение смещения более  $5 \text{ мВ}$ , максимальное напряжение питания не более  $2 \text{ В}$ . Данные недостатки ограничивали точность определения углового положения на уровне  $\pm 0,5^\circ$  и требовали формирования дополнительного напряжения для питания элемента Холла (так как напряжение питания микросхемы составляет  $3.3 \text{ В}$ ).

В источнике [3] приведены результаты экспериментальных измерений элементов Холла различных конструкций, из которых следует, что наименьшим напряжением смещения обладает датчик с квадратной активной областью и точечными контактами.

Технология ХН018 предполагает наличие эпитаксиального слоя толщиной 10 мкм и щелевой изоляции STI 0,4 мкм. Для формирования активной области датчика использовался слой n-типа проводимости DNWELL с глубиной залегания  $X_j=2,8$  мкм и поверхностным сопротивлением (под слоем щелевой изоляции)  $R_s=1.5$  кОм/□. Для уменьшения эффективной толщины активной области в конструкцию датчика был введен «pinch» слой PWELL1 с глубиной залегания перехода  $X_j=1$  мкм и  $R_s=2.9$  кОм/□. Контакты к активной области формировались на основе слоя NIMPL. «Pinch» область p-типа закорочена с охранным кольцом и подложкой. Профиль распределения легирующей примеси в активной области рис. 2 получен из одномерного технологического моделирования, а затем использован в трехмерной структуре датчика.

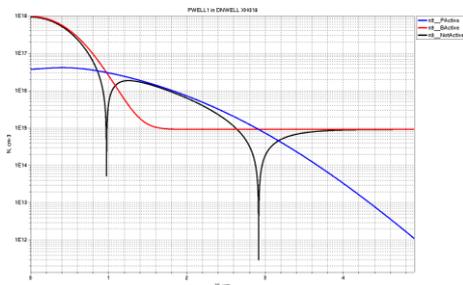


Рис. 2. Распределение легирующей примеси в активной области элемента Холла

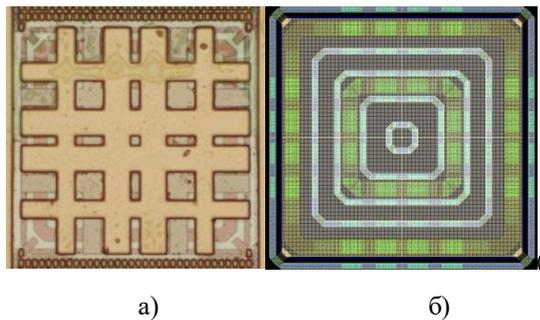


Рис. 3. Датчик Холла, разработанный в ООО «ИДМ-Плюс» (а – фотография, б - топология)

На рис. 3 показана фотография и топология датчика Холла, разработки ООО «ИДМ-Плюс». Геометрические размеры датчика  $120 \times 120$  мкм, площадь контактов к активной области  $11 \text{ мкм}^2$ . Форма датчика квадратная, с расположением контактов по углам квадрата.

### III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТА ХОЛЛА ПО ТЕХНОЛОГИИ ХН018

Для предварительного определения электрических и магнитных характеристик элемента Холла было

проведено приборное моделирование трехмерной структуры датчика в среде TCAD. С целью ускорения процесса моделирования, топология датчика была упрощена, в частности использовалась квадратная форма «Pinch» области и контактов к активному слою. На рис. 4 приведена трехмерная структура датчика, которая использовалась для моделирования.

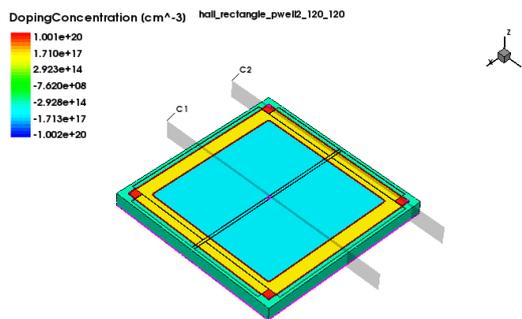


Рис. 4. Трехмерная структура элемента Холла

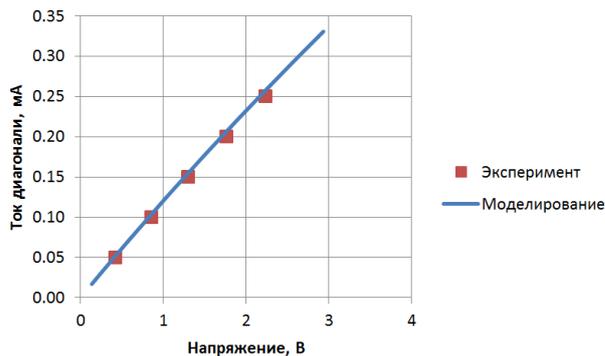


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика элемента Холла

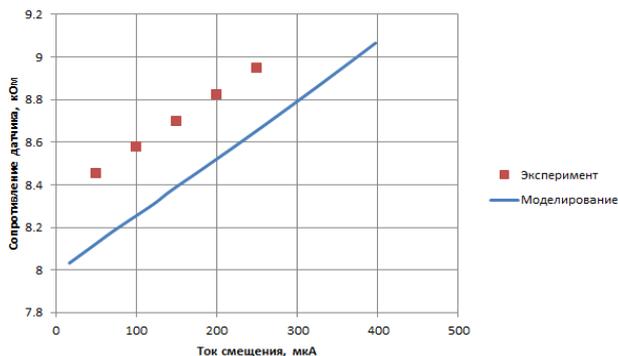


Рис. 6. Зависимость сопротивления датчика от тока смещения

Электрические и магнитные характеристики элемента Холла получены с использованием уравнений непрерывности носителей и Пуассона с добавлением нормальной компоненты вектора магнитной индукции  $B_z$ . Также использовались стандартные зависимости подвижности носителей от концентрации примеси в активной области, модель рекомбинации носителей Шокли-Рида-Холла, сужения запрещенной зоны, встроенный заряд на границе с диэлектриком. Через

противоположные контакты пропускался ток смещения величиной 50 – 250 мкА. Между холловскими контактами измерялось напряжение при магнитной индукции  $B_z=30$  мТл.

На рис. 5-6 приведены результаты TCAD моделирования в сравнении с экспериментом.

Результаты моделирования вольт-амперной характеристики на рис. 5 хорошо согласуются с измерениями, экспериментальные значения сопротивления датчика в диагональном включении на 3-4% превышают расчетные. Однако, расчетное значение относительной токовой магниточувствительности датчика в 1,6 раз превышает экспериментальное. Например, при токе смещения 250 мкА и магнитной индукции  $B_z=30$  мТл, расчетное значение магниточувствительности составило  $445 \text{ В}/(\text{А}\cdot\text{Тл})$ , а экспериментальное  $280 \text{ В}/(\text{А}\cdot\text{Тл})$ . Такое различие может быть обусловлено более низким значением подвижности носителей заряда в кремнии, а также высокой плотностью рекомбинационных центров.

#### IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕСТОВЫХ ОБРАЗЦОВ

Экспериментальные измерения проводились на двух тестовых образцах в бескорпусном исполнении, разваренных на плату. Для проведения измерений характеристик датчика использовались два одноканальных источника-измерителя Keithley 2400, термокамера, катушки Гельмгольца постоянного тока. Результаты измерений приведены на рис. 7 – 12.

Измерение сопротивления датчика Холла проводилось в диагональном включении при токах смещения от 50 до 250 мкА в диапазоне температур от 60 до  $+125^\circ\text{C}$ .

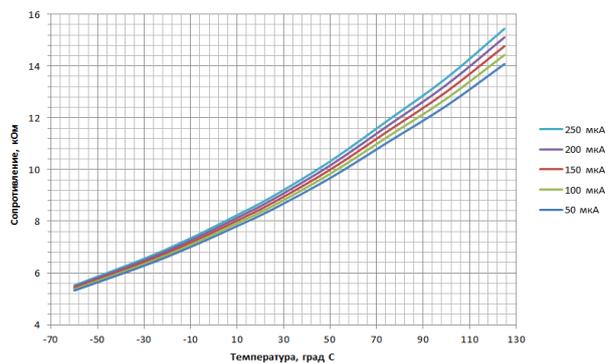


Рис. 7. Экспериментальная зависимость сопротивления датчика Холла от температуры

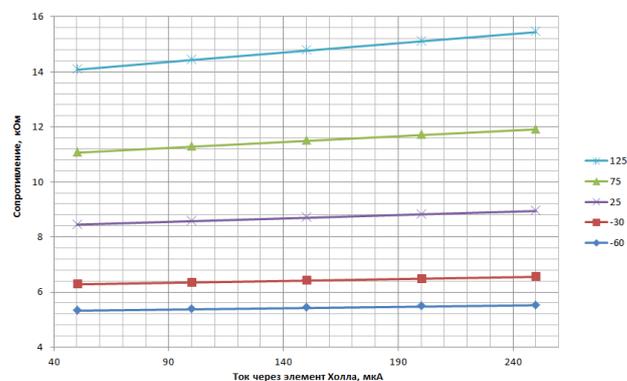


Рис. 8. Экспериментальная зависимость сопротивления датчика Холла от тока смещения

Напряжение, возникающее между холловскими контактами в отсутствии магнитного поля (напряжение смещения) считается паразитным, его необходимо минимизировать.

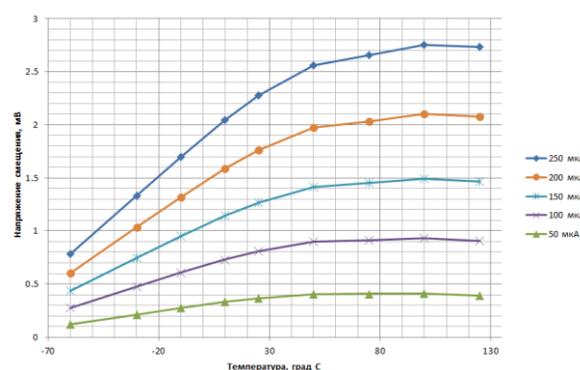


Рис. 9. Экспериментальная зависимость напряжения смещения датчика Холла от температуры

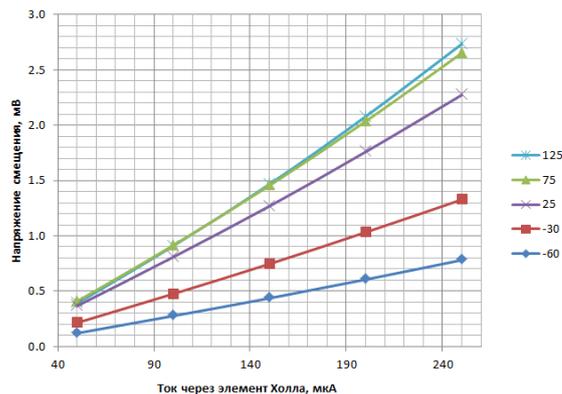
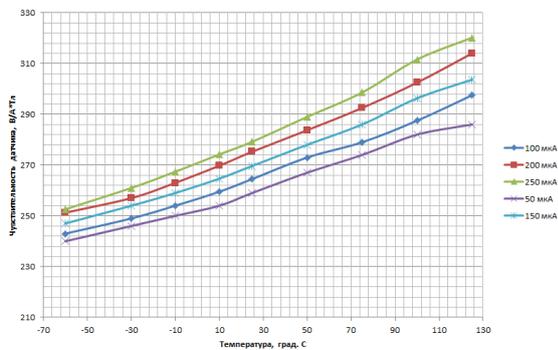
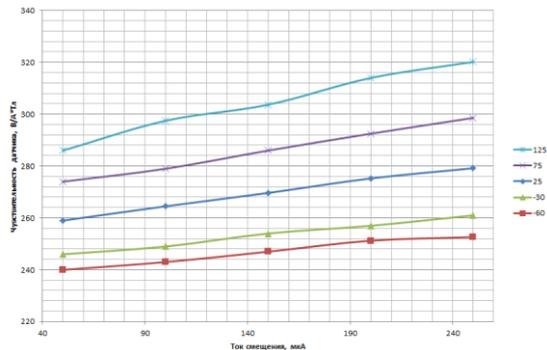


Рис. 10. Экспериментальная зависимость напряжения смещения датчика Холла от тока

Относительная токовая чувствительность датчика зависит от температуры и тока смещения. Графики этих зависимостей на рис. 11 и 12.



**Рис. 11. Экспериментальная зависимость чувствительности датчика Холла от температуры**



**Рис. 12. Экспериментальная зависимость чувствительности датчика Холла от тока смещения**

Поскольку активная область датчика выполнена на основе диффузионного кармана в эпитаксиальном слое, характер зависимости сопротивления датчика от температуры близок к диффузионному резистору, сопротивление датчика меняется примерно в 3 раза от 5,5 кОм до 15,5 кОм в диапазоне температур  $-60 + 125^{\circ}\text{C}$ .

Величина напряжения смещения датчика Холла является важным параметром и определяет величину погрешности при измерении величины магнитной индукции. В разработанном датчике Холла напряжение смещения не превышает 3 мВ в диапазоне температур  $-60 + 125^{\circ}\text{C}$  и токе 250 мкА. Зависимость напряжения смещения от тока близка к линейной.

Относительная токовая чувствительность датчика при температуре  $25^{\circ}\text{C}$  лежит в пределах 260 -280 В/(А\*Тл) в зависимости от тока смещения. Зависимость чувствительности от тока близка к линейной.

#### V. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТА ХОЛЛА НА ЯЗЫКЕ VERILOG-A

В состав современных интегральных микросхем датчиков углового положения, тока, линейного перемещения входят интегральные магниточувствительные датчика Холла. Проектирование входного тракта в таких схемах затрудняется по причине отсутствия достоверных моделей магниточувствительных элементов. В данном разделе приведено описание поведенческой модели датчика Холла, полученной из экспериментальных результатов. Эквивалентная схема модели состоит из

четырёх резисторов, включенных в мостовую схему и четырех источников напряжения, которые эмулируют напряжение Холла. В модели на языке Verilog-A реализованы зависимости сопротивления, токовой магниточувствительности, напряжения смещения датчика от температуры и тока смещения. Величина магнитной индукции и напряжения смещения задается путем подключения внешних источников напряжения к входным пинам датчика fld и Voff, соответственно, причем напряжение 1 В соответствует величине магнитной индукции 1 Тл.

Текст модели приведен ниже.

```
// VerilogA for hall_rectangle_pwell2_120_120
// - fld: magnetic field (1T = 1V, V offset=0.00126)
`include "constants.vams"
`include "disciplines.vams"
module hall_rectangle_pwell2_120_120(t, l, b, r, sub, fld,
Voff);
  inout t, l, b, r, sub, fld, Voff;
  electrical t, l, b, r, sub, fld, Voff;
  electrical ti, ti2, ri, ri2, bi, bi2, li, li2, x;
  real UCS2, UCS1, UCS3, UCR1, UCR2, Upn, RTC1, RTC2,
STC1, STC2, Uoff, Uref, Inom, Rs, Rs_T, S, Si_T, Si_I, Tn,
Rs_I;
  real ICS2, ICS1,
ICR1, ICR2, TCUo2, TCUo1, ICUo1, ICUo2, UoI, UoT;
  real rin, rout;
  real lt, lb, lr, ll;
  analog begin
    RTC1=0.00561;
    RTC2=0.00001;
    ICR1=284.7648;
    ICR2=0;
    STC1=0.0012;
    STC2=0;
    ICS1=378.8889;
    ICS2=0;
    TCUo1=0.005046;
    TCUo2=-0.000033;
    ICUo1=7569.017;
    ICUo2=0;
    Rs=8696.7;
    Tn=298;
    Inom=0.00015;
    S=270;
    Rs_T=Rs*(1+RTC1*($temperature-
Tn)+RTC2*(($temperature-Tn)*($temperature-Tn)));
    Rs_I=Rs_T*(1+ICR1*(abs(l(ti, ti2))+abs(l(ri, ri2))-
Inom)+ICR2*(abs(l(ti, ti2))+abs(l(ri, ri2))-Inom)*(abs(l(ti,
ti2))+abs(l(ri, ri2))-Inom));
    Si_T=S*(1+STC1*($temperature-
Tn)+STC2*($temperature-Tn)*($temperature-Tn));
    Si_I=Si_T*(1+ICS1*(abs(l(ti, ti2))+abs(l(ri, ri2))-
Inom)+ICS2*(abs(l(ti, ti2))+abs(l(ri, ri2))-Inom)*(abs(l(ti,
ti2))+abs(l(ri, ri2))-Inom));
```

```

rout =Rs_I;
UoT=Uoff*(1+TCUo1*($temperature-
Tn)+TCUo2*(($temperature-Tn)*($temperature-Tn)));
Uol=UoT*(1+ICUo1*(abs(I(ti, ti2))+abs(I(ri, ri2))-
Inom)+ICUo2*(abs(I(ti, ti2))+abs(I(ri, ri2))-Inom)*(abs(I(ti,
ti2))+abs(I(ri, ri2))-Inom));
V(ti, li) <+ I(ti, li) * (rout);
V(li, bi) <+ I(li, bi) * (rout);
V(bi, ri) <+ I(bi, ri) * (rout);
V(ri, ti) <+ I(ri, ti) * (rout);
V(ti, ti2) <+ 0.0 ;
V(ri, ri2) <+ 0.0 ;
V(bi, bi2) <+ 0.0 ;
V(li, li2) <+ 0.0 ;
It = I(ti, ti2) ;
Ib = I(bi, bi2) ;
Ir = I(ri, ri2) ;
Il = I(li, li2) ;
V(r, ri2) <+ 0.5*Si_I*Ib*V(fld)+0.5*Uol;
V(t, ti2) <+ 0.5*Si_I*Ir*V(fld)+0.5*Uol;
V(l, li2) <+ 0.5*Si_I*It*V(fld)-0.5*Uol;
V(b, bi2) <+ 0.5*Si_I*Il*V(fld)-0.5*Uol;
end
endmodule

```

Сравнение результатов Verilog-A моделирования и экспериментальных данных при токе смещения датчика 150 мкА приведены на рис. 13-15.

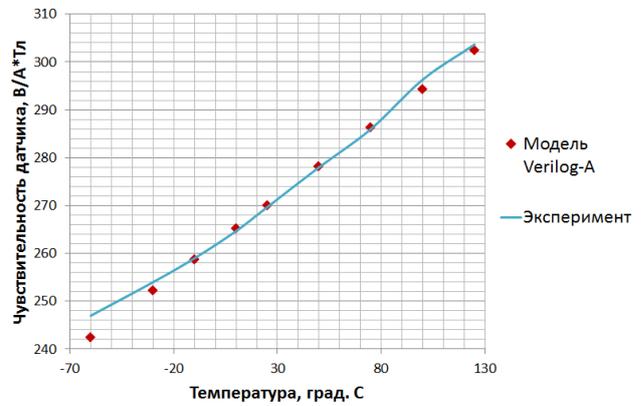


Рис. 15. Чувствительность датчика Холла от температуры

## VI. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенное моделирование иллюстрирует возможности разработки собственного датчика Холла по технологическому маршруту X-FAB XH018. Показано, что использование слоя PWELL1 с глубиной залегания перехода  $X_j=1$  мкм в качестве активного позволяет достичь достаточно высокой относительной магниточувствительности 280 В/(А\*Тл) и величины остаточного напряжения не превышающей 3 мВ при диагональном сопротивлении датчика 8,95 кОм. Сравнение с аналогами приведено в таблице 1.

Таблица 1

### Характеристики элементов Холла

Параметр	Датчик Холла «ИДМ-ПЛУС»	Датчик Холла X-FAB (модель)	Датчик Холла [4]
Технология	XH 0.18 HV CMOS	XH 0.18 CMOS	0.8 HV CMOS
Сопротивление, кОм	8,95	9.25 – 11.75	-
Чувствительность, В/(А*Тл)	280	280 – 360	250
Напряжение смещения, мВ	2,3	±10	2
Напряжение питания, В	3,3	2	5

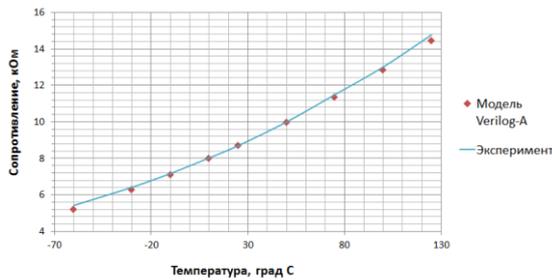


Рис. 13. Сопротивления датчика Холла от температуры

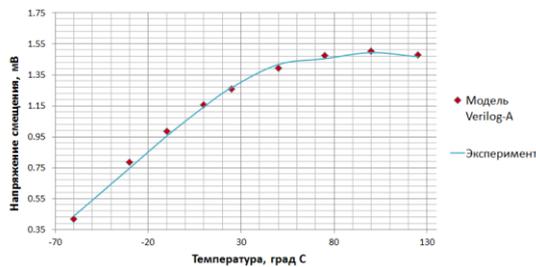


Рис. 14. Напряжение смещения датчика Холла от температуры

Разработанный элемент Холла может быть использован в качестве замены IP-блока от X-FAB со следующими преимуществами: более низкое напряжение смещения, более широкий диапазон тока смещения, предсказуемый дрейф характеристик в температурном диапазоне, напряжение питания 3.3 В, наличие расширенной Verilog-A модели.

Следует отметить, что данная конструкция элемента Холла может быть улучшена и оптимизирована, с целью получения большей чувствительности. При проектировании датчиков такого типа необходимо учитывать рекомбинационные потери как на поверхности, так и в объеме, поскольку имеется сильное отличие результатов моделирования от экспериментальных данных по параметру относительной магниточувствительности.

## VII. ВЫВОДЫ

Представлены результаты моделирования интегрального элемента Холла разработки «ИДМ-ПЛЮС», приведены экспериментальные результаты исследования тестовых образцов и расширенная Verilog-A модель датчика. Показано, что разработанный датчик превосходит по параметрам

элемент Холла поставляемый фабрикой-изготовителем и может быть применен для разработки интегральных схем датчиков положения и тока.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] <http://idm-plus.ru/about> (access date: 26.03.2020).
- [2] Popovic R.S., Randjelovic Z., Manic D. Integrated Hall-effect magnetic sensors // Sens. Actuat. A. 2001. No 91. P. 46–50., Blanchard H., De M.F., Hu B.J., Popovic R.S. Highly sensitive Hall sensor in CMOS technology // Sens. Actuat. A. 2000. No 82. P. 144–148.
- [3] Goryachkin Y., Odnolko A., Pavlyuk M. Cmos integrated hall elements parameters simulation and real structures behaviors easuring // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12. No 19. P. 5597-5606.
- [4] Haiyun Huang, Dejun Wang, Yue Xu, A monolithic CMOS magnetic hall sensor with high sensitivity and linearity characteristics // Sensors. 2015. No 15. P. 27359-27373.

# Design and Investigation of the Hall Element on 180 nm Technology

G.V. Prokofiev, A.D. Popov, A.E. Timofeev, M.A. Kosolapov, V.V. Arkhipov

LLC “IDM-PLUS”, alex\_93\_ti@mail.ru

**Abstract** — One of the main activities of LLC "IDM-PLUS" is a development and production of position sensors and current sensors containing integrated sensitive elements [1]. Hall elements made on the basis of CMOS technology are compatible with processing scheme, have high reliability, small size, low cost of production, which ensures their wide application in various devices and modules [2]. In this work, we developed and researched design of the magnetically sensitive Hall element with “pinch” area based on XFAB XH018 HV CMOS technology.

XH018 technology assumes the presence of epitaxial layer with a thickness of 10  $\mu\text{m}$  and a slot trench insulation (STI) of 0.4  $\mu\text{m}$ . To form the active region of the sensor, we used a DNWELL n-type conductivity layer with a depth of  $X_j = 2.8 \mu\text{m}$  and surface resistance (under the gap insulation layer)  $R_s = 1.5 \text{ k}\Omega/\square$ . To reduce the effective thickness of the active region, a “pinch” PWELL1 layer was introduced into the sensor design with a transition depth of  $X_j = 1 \mu\text{m}$  and  $R_s = 2.9 \text{ k}\Omega/\square$ . To preliminarily determine electrical and magnetic characteristics of the Hall element, device modeling of three-dimensional structure of the sensor by TCAD was performed.

The experimental measurements were carried out on two test samples in a package without shells boiled on a board. Since an active region of the sensor is based on a diffusion pocket in the epitaxial layer, a temperature dependence of the sensor resistance is close to the diffusion resistor, the sensor resistance changes approximately 3 times from 5.5  $\text{k}\Omega$  to 15.5  $\text{k}\Omega$  in the temperature range  $-60 + 125 \text{ }^\circ\text{C}$ . The magnitude of the bias voltage of the Hall sensor is an important parameter and determines the magnitude of the error in measuring the

magnitude of the magnetic induction. In the developed Hall sensor, the bias voltage does not exceed 3 mV in the temperature range  $-60 + 125 \text{ }^\circ\text{C}$  and a current of 250  $\mu\text{A}$ . The dependence of bias voltage on the current is close to linear. The relative current sensitivity of the sensor at a temperature of 25  $^\circ\text{C}$  lies in range 260–280  $\text{V}/(\text{A}\cdot\text{T})$  depending on the bias current. The dependence of sensitivity on current is close to linear.

This paper describes the behavioral model of the Hall sensor obtained from experimental results. The equivalent circuit of the model consists of four resistors included in the bridge circuit and four voltage sources that emulate the Hall voltage.

**Keywords** — Hall element, magnetosensitivity, position sensors, Verilog-A model, TCAD.

## REFERENCES

- [1] <http://idm-plus.ru/about> (access date: 26.03.2020).
- [2] Popovic R.S., Randjelovic Z., Manic D. Integrated Hall-effect magnetic sensors // Sens. Actuat. A. 2001. No 91. P. 46–50., Blanchard H., De M.F., Hu B.J., Popovic R.S. Highly sensitive Hall sensor in CMOS technology // Sens. Actuat. A. 2000. No 82. P. 144–148.
- [3] Goryachkin Y., Odnolko A., Pavlyuk M. Cmos integrated hall elements parameters simulation and real structures behaviors easuring // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12. No 19. P. 5597-5606.
- [4] Haiyun Huang, Dejun Wang, Yue Xu, A monolithic CMOS magnetic hall sensor with high sensitivity and linearity characteristics // Sensors. 2015. No.15. P. 27359-27373.