

Исследование и моделирование интегрального элемента Холла

Авторы: Юрий Горячкин, Александр Однолько, Михаил Павлюк, Александр Свистунов.

Yury Coryachkin, Aleksandr Odnolko, Mikhail Pavlyuk, Aleksandr Svistunov.

Аннотация. В статье исследуется возможность применения элемента Холла прямоугольной формы, формируемого в рамках КМОП-технологии X-FAB с проектными нормами 0.18 мкм XT018 в составе микросхемы с линейным выходом. С целью оптимизации конструкции и размеров проведено моделирование элемента Холла в TCAD. Показано, что оптимальное соотношение ширины W к длине L элемента Холла лежит в пределах $1.25 < W/L < 1.5$. Предложена простая модель элемента Холла и выведено выражение для напряжения Холла, поясняющее явление насыщения напряжения Холла при отношении $W/L > 1.5$.

Ключевые слова: элемент Холла, КМОП-технология, магнитное поле, напряжение Холла, ток стока, подвижность носителей заряда, геометрический коэффициент, модель элемента Холла.

В современной микроэлектронике в последнее время широкое распространение получили датчики физических величин, такие как датчики температуры, давления, ускорения, угла (наклона), поворота и т.д. Наиболее важными среди них являются датчики магнитных полей.

Основным элементом объектов и устройств, использующих магнитное поле, является преобразователь магнитного поля. Преобразователями магнитного поля могут быть любые магниточувствительные элементы, преобразующие воздействие магнитного поля в выходной электрический сигнал. Наиболее известными преобразователями магнитного поля являются дискретные и интегральные элементы Холла. Как правило, интегральные элементы Холла содержат схемы усиления сигнала.

Для измерения относительно небольших изменений магнитного поля применяются магниточувствительные схемы с линейным выходом, в которых напряжение Холла изменяется

пропорционально индукции магнитного поля. В отсутствие внешнего магнитного поля выходное напряжение линейной магниточувствительной схемы, принимаемое за уровень отсчета, обычно равно половине питающего напряжения. При регистрации положительного направления магнитного поля выходное напряжение выше уровня отсчета, при регистрации отрицательного направления – ниже, хотя оно и остается положительной величиной [1].

Элемент Холла может быть реализован в стандартных процессах производства интегральных схем, таких как биполярные или КМОП-технологии. Элементы Холла, созданные на основе КМОП-технологии, имеют высокую надежность, малые размеры, низкую себестоимость и совместимы с другими КМОП-элементами [2-5]. Обычно КМОП-совместимые элементы Холла формируются в кармане n-типа.

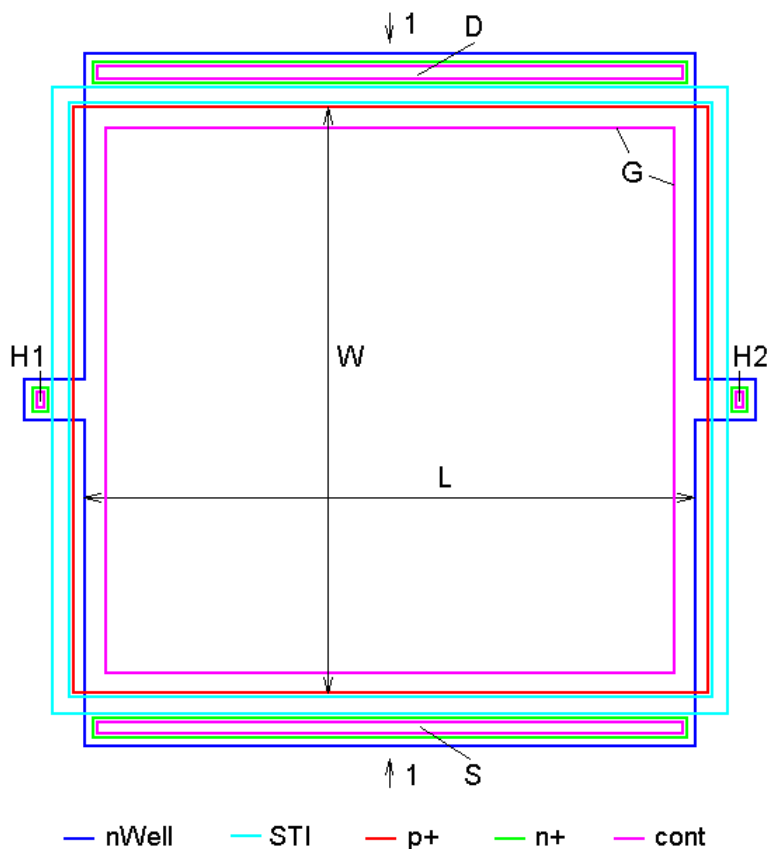
В статье приводятся результаты исследования возможности применения элемента Холла, формируемого в рамках КМОП-технологии X-FAB с проектными нормами 0.18 мкм XT018 – 0.18 μm HV SOI CMOS, в составе микросхемы с линейным выходом. Элемент Холла фактически представляет собой полевой транзистор, или иначе pinch-резистор, зажатый с двух сторон p-n переходами. Такая структура является наиболее устойчивой к накопленной дозе радиации, так как не касается ни с одной стороны окисла и поэтому не подвергается воздействию накопленного заряда в окисле.

Диапазон магнитных полей, воздействующих на элемент Холла, составляет от -640 до 640 Гаусс. Параметры структуры элемента Холла даны в табл. 1.

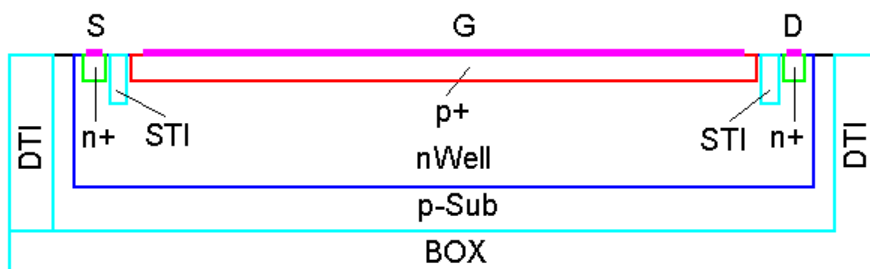
Табл. 1

Наименование слоя	Поверхностное сопротивление R_s , Ом/кв. (для подложки удельное сопротивление ρ , Ом·см)	Глубина залегания x_j , мкм
p-Sub (подложка)	100	
nWell	1080 (под STI)	1.5
p+	135	0.2
n+	62	0.2
STI		0.4

На рис. 1, а показана схематически топология элемента Холла, а на рисунке 1, б показана структура элемента Холла в сечении 1. L и W – соответственно, длина и ширина элемента Холла (фактически длина и ширина канала), S – исток, D – сток, G – затвор, $H1$ и $H2$ – холловские контакты, STI , DTI и BOX – диэлектрические изолирующие слои. На топологии слои DTI и BOX для упрощения не показаны.



а)



б)

Рис. 1. Топология (а) и структура (б) элемента Холла

На одном кристалле были изготовлены несколько вариантов тестовых элементов Холла.

Среди них следующие варианты:

- вариант 1 – сплошные контакты к стоку и истоку по всей ширине структуры (см. рис. 1);
- вариант 2 – сплошной контакт к истоку по всей ширине структуры и 5 контактов к стоку, расположенные на равных расстояниях друг от друга по всей ширине структуры;
- вариант 3 – 2 контакта к истоку по углам истока и 4 контакта к стоку, расположенные на равных расстояниях друг от друга по всей ширине структуры.

Для всех вариантов длина элемента Холла $L = 500$ мкм, ширина элемента Холла $W = 500$ мкм.

Кристалл с тестовыми элементами Холла разварен в 42-х выводной корпус Н14.42-1В. При исследовании тестовых элементов Холла использовалось контактирующее устройство УК42-4С, электронный коммутатор 64×8, источник напряжения KEITLEY–2420, мультиметр KEITLEY–2000, ферритовые и неодимовые магниты. Электрический режим в процессе исследования элементов Холла: исток S – заземлен, затвор G – заземлен, на все стоки D подавалось напряжение 5 V. Измерялось напряжение на выводах Н1 и Н2 (+ вольтметра) без магнитного поля V_{H0} и с магнитным полем V_{HM} и ток от источника напряжения (ток стока I_D). Вычислялась разность $V_{HM} - V_{H0} = V_H$, которая и является реальным значением напряжения Холла, обусловленного воздействием магнитного поля. Для получения максимальной величины напряжения Холла при комнатной температуре использовался элемент Холла в корпусе без крышки и неодимовые магниты. Ниже на рис. 2 и 3 представлены фотографии элементов Холла в корпусе без крышки и с крышкой и используемых ферритовых и неодимовых магнитов и рабочего места для исследования элементов Холла.

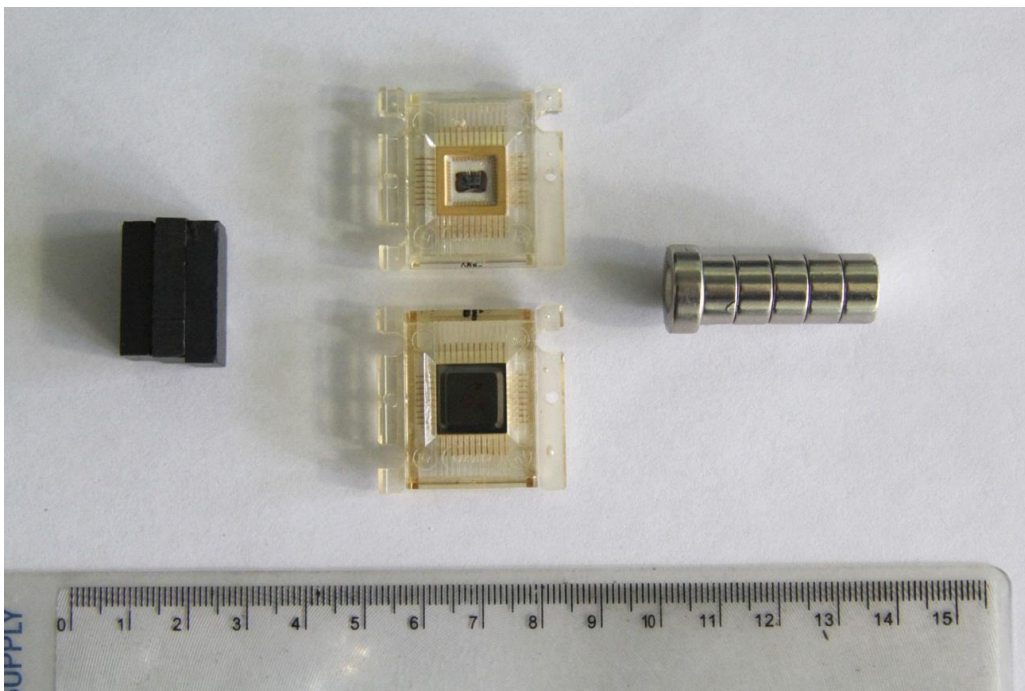


Рис. 2. Фотография элементов Холла в корпусе без крышки и с крышкой и используемых ферритовых и неодимовых магнитов

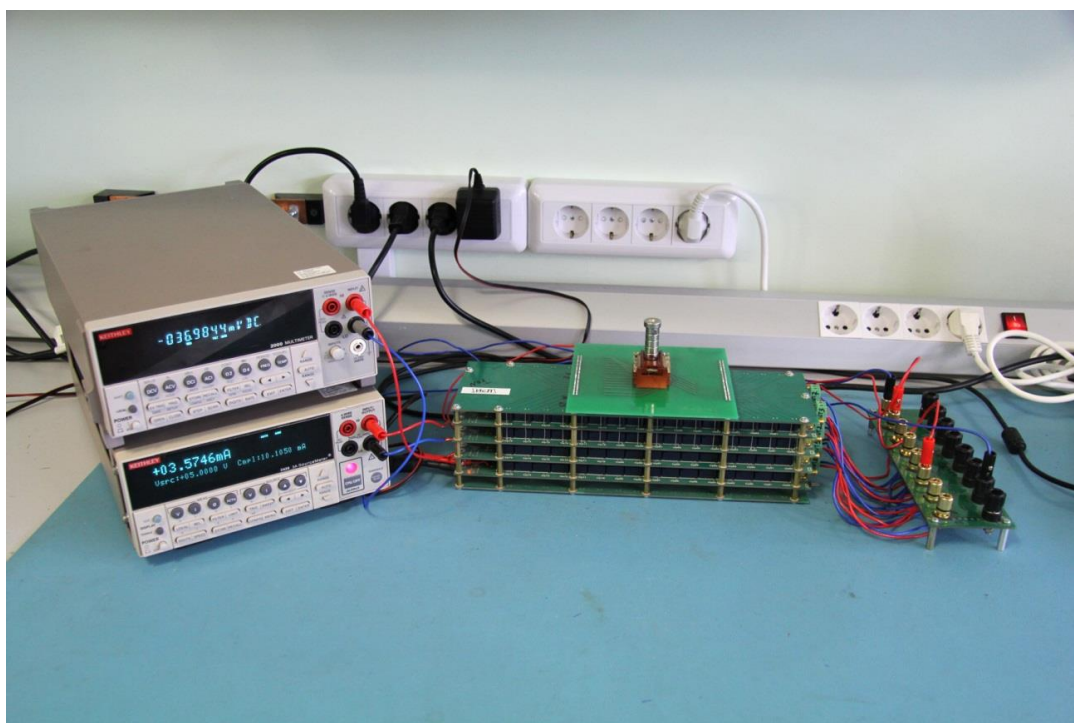


Рис. 3. Фотография рабочего места для исследования элементов Холла

В табл. 2 представлены результаты измерений параметров элементов Холла для вариантов 1, 2 и 3 при воздействии магнитного поля 640 Гаусс и комнатной температуре.

Табл. 2

Вариант	I_D , мА	V_{H0} , мВ	V_{HM} , мВ	V_H , мВ
1	6.9	-8.0	-21.3	-13.3
2	5.4	-9.0	-20.7	-11.7
3	2.4	-5.5	-11.7	-6.2

Как видно из таблицы, максимальное напряжение Холла получается для варианта 1. Поэтому дальнейшие исследования и оптимизация проводились для этого варианта. Для оптимизации геометрии элемента Холла было проведено моделирование в TCAD. При создании модели структуры элемента Холла для упрощения вокруг контактов к стоку, истоку и холловских контактов не создавались n^+ слои, поскольку в TCAD можно задать сопротивление контакта (сколь угодно малое). Также не создавались диэлектрические изолирующие слои STI, DTI и BOX.

Поскольку в документации на технологию XT018 указано поверхностное сопротивление слоя nWell под слоем STI (см. табл. 1), то необходимо было определить поверхностную концентрацию примеси в слое nWell. Критерием являлось условие равенства тока стока значению, указанному в табл. 2 (для варианта 1 $I_D = 6.9$ мА). Моделирование показало, что данное значение тока стока обеспечивается при значении поверхностной концентрации примеси в слое nWell $N_S = 9.2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Параметры моделируемой структуры элемента Холла даны в табл. 3.

Табл. 3

Наименование слоя	Поверхностная концентрация примеси N_S , см^{-3} (для подложки концентрация примеси N , см^{-3})	Глубина залегания x_j , мкм
p-Sub (подложка)	$1.3 \cdot 10^{14}$	
nWell	$9.2 \cdot 10^{17}$	1.5 мкм
p+	$1.3 \cdot 10^{20}$	0.2 мкм

На рис. 4, а показана часть трехмерной структуры элемента Холла со стороны контактов к стоку/истоку, на рис. 4, б со стороны холловских контактов. На рис. 5 показан профиль распределения примеси в моделируемой структуре элемента Холла.

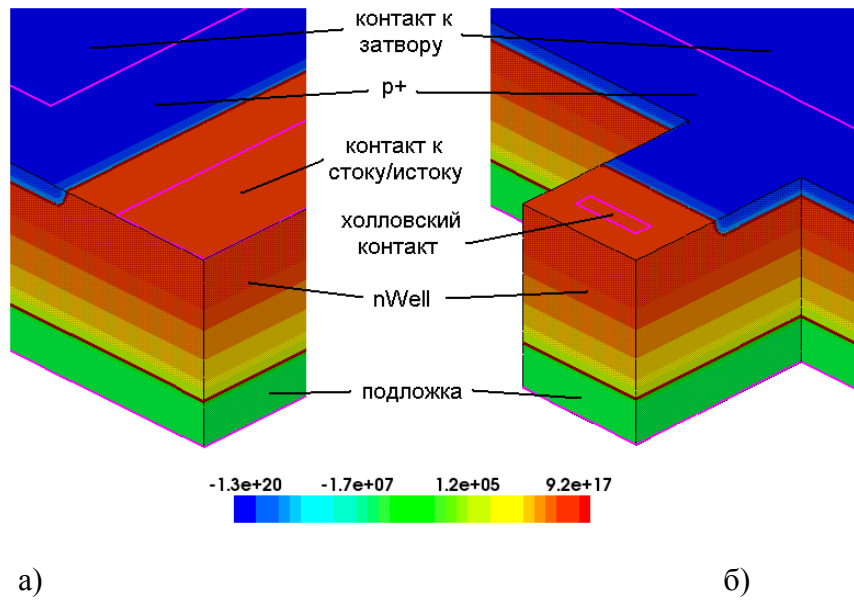


Рис. 4. Часть структуры элемента Холла со стороны контактов к стоку/истоку (а) и со стороны холловских контактов (б)

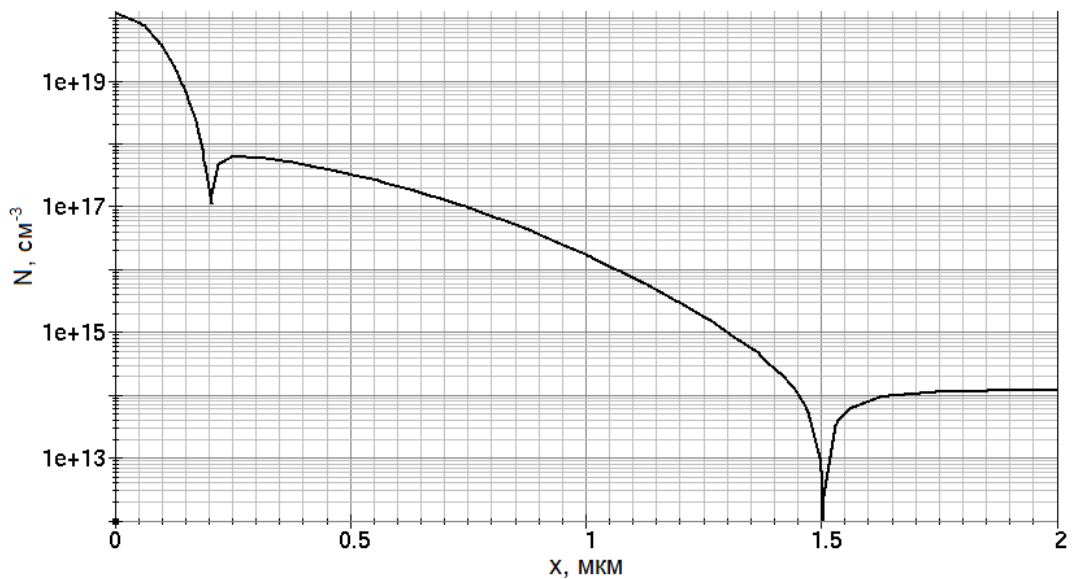


Рис. 5. Профиль распределения примеси в структуре элемента Холла

При моделировании учитывались следующие физические эффекты:

- сужение ширины запрещенной зоны кремния с ростом концентрации легирующей примеси;
- рассеяние носителей заряда на фононах и на заряженных ионах примеси, а также насыщение дрейфовой скорости носителей заряда в высоких полях;
- рекомбинация Шокли-Рида-Холла с временами жизни неравновесных носителей заряда, зависящими от концентрации легирующей примеси, а также Оже-рекомбинация.

Подробное описание этих эффектов приведено в [6].

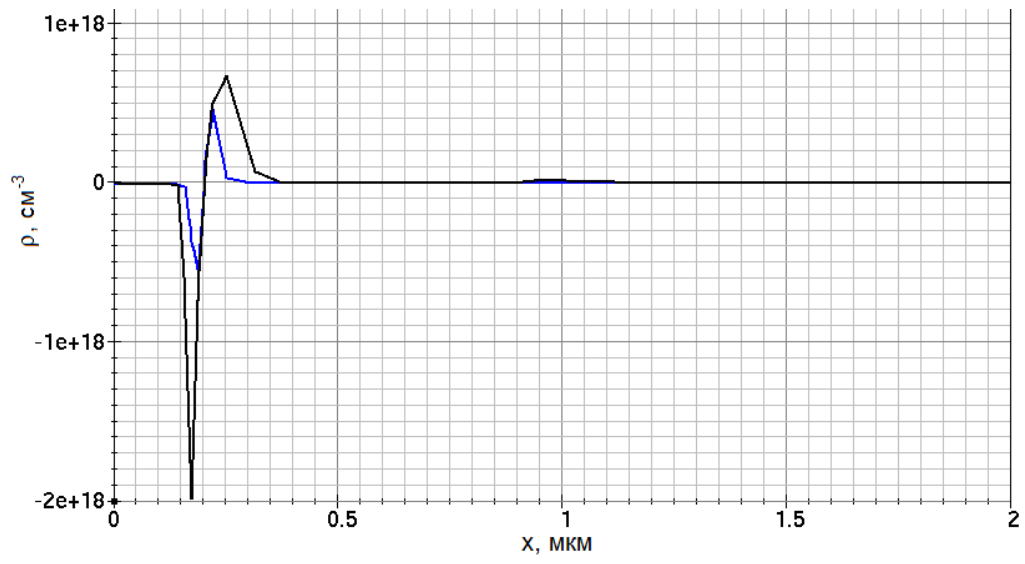
Результаты моделирования напряжения Холла V_H при воздействии магнитного поля с индукцией 640 Гаусс и напряжении между стоком и истоком $V_D = 5$ В представлены в табл. 4 для удобства в сравнении с результатами измерений для варианта 1 при $L = W = 500$ мкм.

Табл. 4

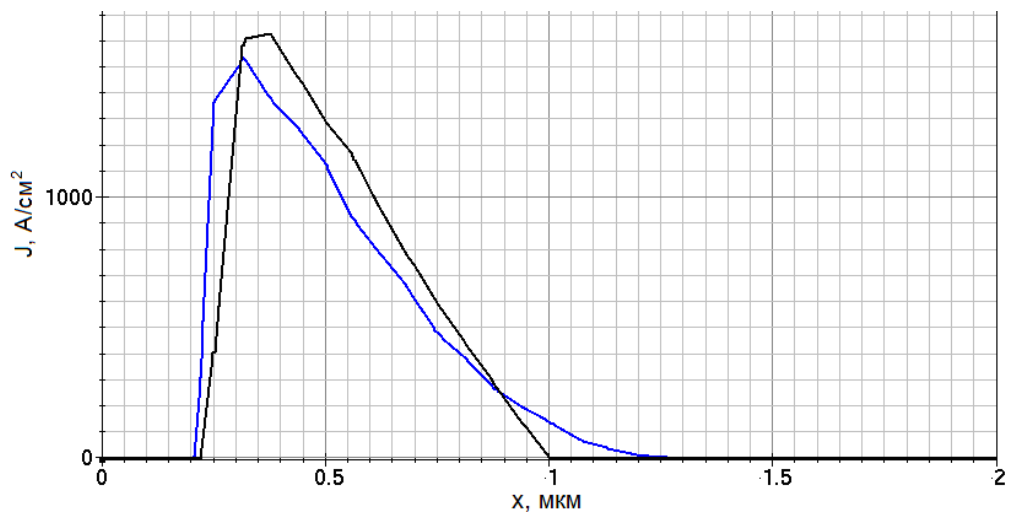
Вариант	Измерения		Моделирование	
	I_D , мА	V_H , мВ	I_D , мА	V_H , мВ
1	6.9	-13.3	7.0	-13.5

Как видно из таблицы, результаты моделирования достаточно хорошо согласуются с результатами экспериментальных измерений.

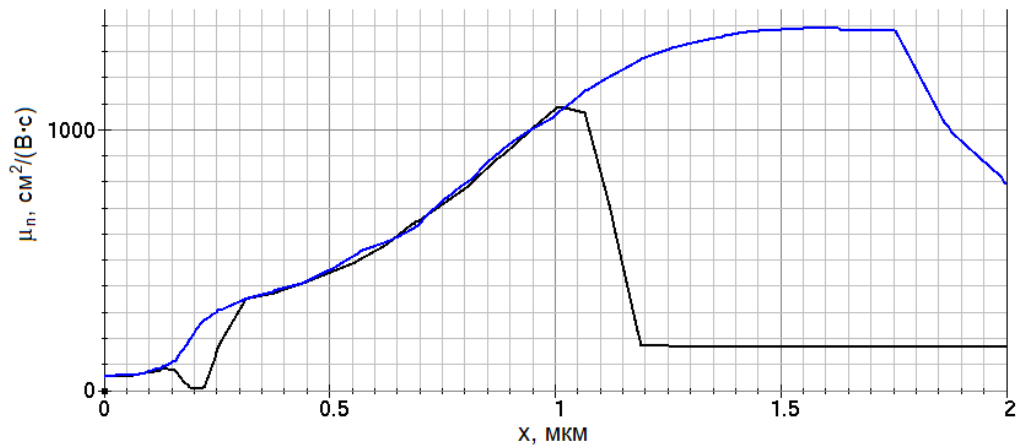
Далее ниже на рис. 6 показаны графики распределения плотности пространственного заряда (а), плотности тока (б) и подвижности электронов (в) по толщине элемента Холла со стороны стока (графики черного цвета) и со стороны истока (графики синего цвета).



a)



б)



в)

Рис. 6. Графики распределения плотности пространственного заряда (а), плотности тока (б) и подвижности электронов (в) по толщине элемента Холла со стороны стока и истока

Как видно из рис. 6, а, ширина ОПЗ в кармане перехода nWell – p+ слой со стороны стока составляет 0.16 мкм, со стороны истока 0.08 мкм. Ширина ОПЗ в кармане перехода nWell – подложка со стороны стока составляет 0.5 мкм, со стороны истока 0.3 мкм. Таким образом, эффективная толщина канала со стороны стока составляет 0.64 мкм, со стороны истока 0.92 мкм.

Из рис. 6, б видно, что максимальная плотность тока достигается со стороны стока под ОПЗ перехода nWell – p+ слой и составляет 1620 A/cm^2 . По направлению к переходу nWell – подложка плотность тока практически линейно уменьшается. Со стороны истока под ОПЗ перехода nWell – p+ слой максимальная плотность тока составляет 1500 A/cm^2 . По направлению к переходу nWell – подложка плотность тока также практически линейно уменьшается, и только около перехода nWell – подложка уменьшается более плавно.

Из рис. 6, в видно, что в кармане под ОПЗ перехода nWell – p+ слой подвижность электронов составляет $300\text{--}400 \text{ cm}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, возрастает по направлению к переходу nWell – подложка и возле ОПЗ этого перехода становится более $1000 \text{ cm}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Таким образом, получается, что там, где максимальная плотность тока (более 1000 А/см^2), подвижность электронов не превышает $500 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Этим можно объяснить такие относительно невысокие значения напряжения Холла элементов Холла.

Далее было промоделировано влияние геометрических размеров элемента Холла на напряжение Холла. На рис. 7 показаны графики зависимости тока стока (а) и напряжения Холла (б) от ширины элемента Холла при значении длины элемента Холла $L = 200 \text{ мкм}$.

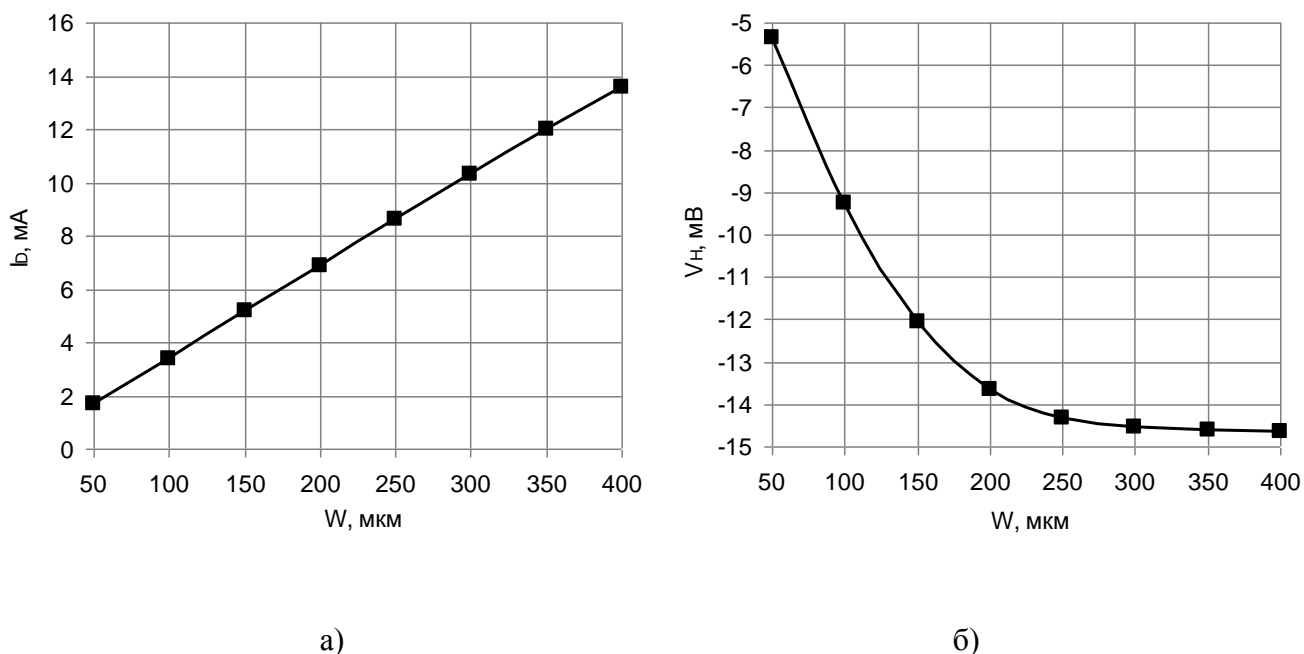


Рис. 7. Графики зависимости тока стока (а) и напряжения Холла (б) от ширины элемента Холла при значении длины элемента Холла $L = 200 \text{ мкм}$

Как видно из графика на рис. 7, а, зависимость тока стока от ширины элемента Холла линейная. Из графика на рис. 7, б видно, что зависимость напряжения Холла от ширины элемента Холла нелинейная и при $W/L > 1.5$ наблюдается насыщение зависимости.

Такой ход зависимости принято объяснять влиянием геометрического коэффициента (geometrical factor), который входит в выражение для напряжения Холла [7]:

$$V_H = G\mu_H VB \frac{W}{L}, \quad (1)$$

где G – геометрический коэффициент ($0 < G \leq 1$),

μ_H – холловская подвижность,

V – приложенное напряжение (в данном случае между стоком и истоком V_D),

B – индукция воздействующего магнитного поля,

L – длина элемента Холла,

W – ширина элемента Холла.

По результатам моделирования построен график зависимости геометрического коэффициента G от отношения L/W . Он показан на рис. 8. Этот график хорошо аппроксимируется полиномом 3-ей степени:

$$G \approx 0.033 \left(\frac{L}{W} \right)^3 - 0.311 \left(\frac{L}{W} \right)^2 + 0.966 \left(\frac{L}{W} \right) - 0.054 \quad (2)$$

с погрешность не более 2 %. На этом же рисунке для сравнения приведен график для геометрического коэффициента G из [8] который был рассчитан методом конформного отображения. Видно, что графики зависимости геометрического коэффициента, полученного по результатам моделирования и полученного методом конформного отображения, различаются не более чем на 5%.

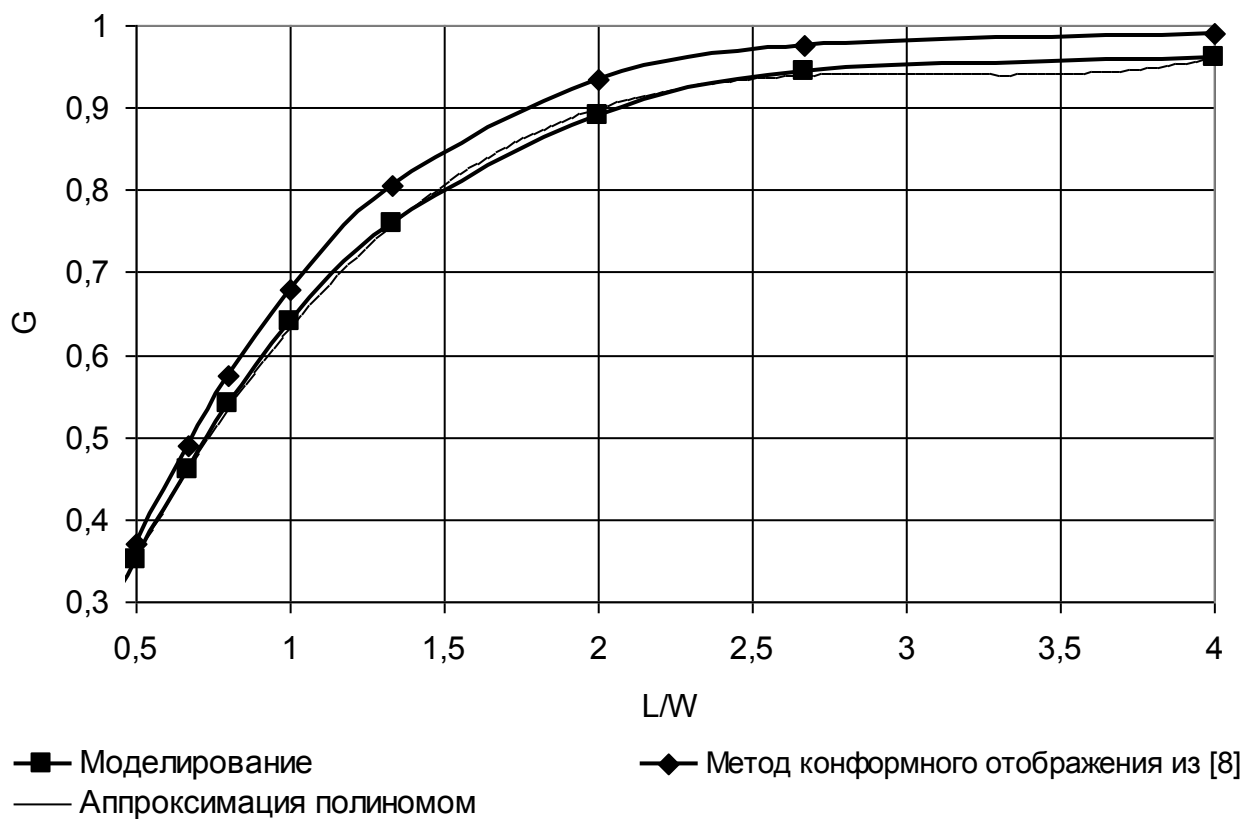


Рис. 8. Графики зависимости геометрического коэффициента G от отношения L/W

Явление насыщения напряжения Холла при $W/L > 1.5$ можно объяснить простой моделью. Напряжение, возникающее в поперечном сечении, приводит к перераспределению вертикального поля в элементе Холла. Чем дальше от центра, тем больше поле Холла и тем больше перераспределение вертикального тока и поля. Элемент Холла можно представить как четырехполюсник, у которого есть входное сопротивление к холловскому контакту при всех заземленных других контактах. Напряжение, возникающее на холловских контактах, приводит к току через эти эквивалентные сопротивления. Модель этого процесса изображена на рис. 9. Поперечный ток обусловлен магнитной индукцией и противоположный дрейфовый ток обусловлен напряжением Холла. Разностный ток – это ток поперечного сечения, который равен дрейфовому току растекания из-за нарушения равенства тока по горизонтали. Предлагаемая простая модель дает хороший результат, близкий к эксперименту и полученный в [8].

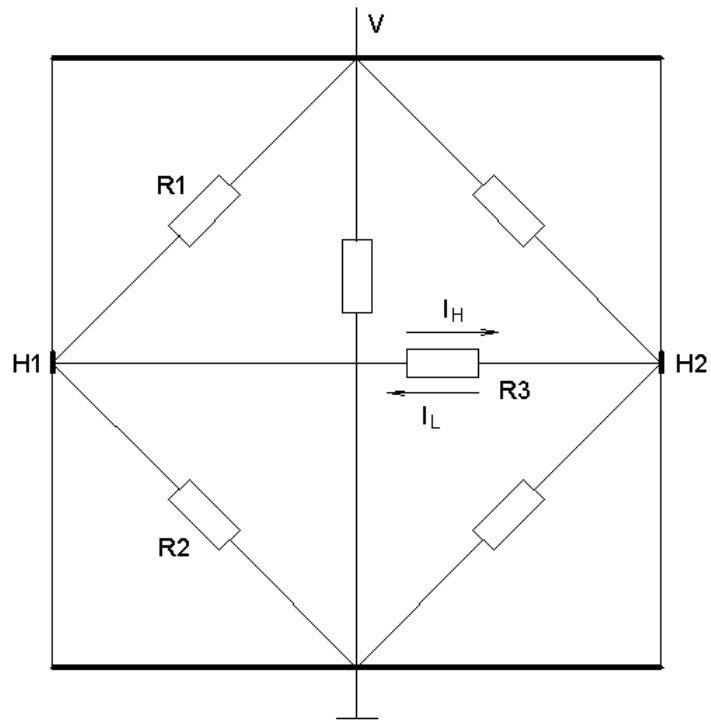


Рис. 9. Модель элемента Холла

Для плотности тока, создаваемой силой Лоренца, можно записать:

$$J_L = n\mu_H F_L, \quad (3)$$

где q – заряд электрона,

n – концентрация носителей заряда (в данном случае электронов),

F_L – сила Лоренца.

Подставляя $F_L = q\mu EB$ в (3), получаем:

$$J_L = qn\mu^2 EB = qn\mu_H^2 \frac{V}{L} B. \quad (4)$$

Тогда ток, создаваемый силой Лоренца, будет равен:

$$I_L = J_L dw_{eff} = qn\mu_H^2 dw_{eff} \frac{V}{L} B, \quad (5)$$

где d – толщина элемента Холла (в данном случае толщина слоя nWell под p+ слоем),

w_{eff} – эффективная ширина, зависящая от длины и ширины элемента Холла.

Аналогично, для плотности тока, создаваемого напряжением Холла, можно записать:

$$J_H = qn\mu_H E = qn\mu_H \frac{V_H}{W}. \quad (6)$$

Тогда ток, создаваемый напряжением Холла, будет равен:

$$I_H = J_H dw_{eff} = qn\mu_H dw_{eff} \frac{V_H}{W}. \quad (7)$$

Тогда можно записать:

$$\frac{V_H}{R} = I_L - I_H = qn\mu_H dw_{eff} \left(\mu \frac{V}{L} B - \frac{V_H}{W} \right), \quad (8)$$

где $R = R1 \parallel R2 \parallel R3$.

Проведя ряд простых преобразований, получаем:

$$V_H = \frac{\mu \frac{V}{L} B}{\left(\frac{1}{Rqn\mu_H dw_{eff}} + \frac{1}{W} \right)} \quad (9)$$

Умножив числитель и знаменатель на W , окончательно получаем:

$$V_H = \frac{\mu V B \frac{W}{L}}{\frac{W}{R q n \mu_H d w_{eff}} + 1}. \quad (10)$$

Величина в знаменателе $W/(R q n \mu_H d w_{eff})$ безразмерная. Сопротивление R составляет порядка 1700-2000 Ом и поэтому величина $W/(R q n \mu_H d w_{eff})$ сравнима с единицей. Отсюда видно, что при $W/L < 1$ величина $W/(R q n \mu_H d w_{eff}) < 1$ и напряжение Холла в основном определяется числителем в выражении (10) и при увеличении W возрастает. Когда W/L становится больше 1, то величина $W/(R q n \mu_H d w_{eff})$ также становится больше 1 и напряжение Холла перестает возрастать, т.е. наступает насыщение, как было видно из графика на рис. 7, б.

Еще один эффект наблюдался как при измерениях, так и при моделировании – последовательное соединение элементов Холла по холловским контактам не приводит к адаптивному суммированию напряжений Холла. Причем элементы Холла достаточно узкие, их ширина достаточно узкая для насыщения напряжения Холла. Имеется простое объяснение этому факту.

На краях элемента Холла и в объеме искажение поля имеет разный характер. В объеме вертикальное поле поворачивается и имеет некоторый угол к вертикали. На краях поле становится вертикальным, но искажённым, обусловленным изменениями токов. Соединяя последовательно элементы Холла, минусовой холловский контакт к плюсовому последующему, нарушаются поля и токи на границе разных элементов Холла, что и приводит к данному эффекту.

Таким образом, по результатам исследования и моделирования элементов Холла можно сделать следующие выводы:

1. Из всех изготовленных вариантов тестовых элементов Холла максимальное напряжение Холла обеспечивает вариант 1, имеющий сплошные контакты к стоку и истоку по всей ширине структуры;

2. Результаты моделирования элемента Холла в TCAD с целью оптимизации конструкции и размеров показали, что оптимальное соотношение ширины W к длине L элемента Холла лежит в пределах $1.25 < W/L < 1.5$.

3. Предложенная простая модель элемента Холла и выведенное выражение для напряжения Холла поясняет явление насыщения напряжения Холла при отношении $W/L > 1.5$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки России (Соглашение № 14.576.21.0026 от 30.06.2014г., Уникальный идентификатор ПНИ RFMEFI57614X0026).

Литература

1. Агеев О.А., Мамиконова В.М., Петров В.В., Котов В.Н., Негоденко О.Н. Микроэлектронные преобразователи неэлектрических величин. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 153 с.
2. Bellekom S. CMOS versus bipolar Hall plates regarding offset correction. // Sens. Actuat. A. – 1999. – № 76. P. 178–182.
3. Blanchard H., De M.F., Hu B.J., Popovic R.S. Highly sensitive Hall sensor in CMOS technology. // Sens. Actuat. A. – 2000. – № 82. P. 144–148.
4. Popovic R.S., Randjelovic Z., Manic D. Integrated Hall-effect magnetic sensors. // Sens. Actuat. A. – 2001. – № 91. P. 46–50.
5. Randjelovic Z.B., Kayal M., Popovic R., Blanchard H. High sensitive Hall magnetic sensor Microsystem in CMOS technology. // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2002. – № 37. P. 151–158.
6. Горячкин Ю. В., Нестеров С. А., Сурин Б. П. Физико-топологическое моделирование в САПР TCAD. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2006. – 124 с.
7. Paun M., Kayal M. Hall Effect Sensors Performance Investigation Using Three-Dimensional Simulations. // International journal of microelectronics and computer science. – 2011. – Vol. 2. № 4. P. 140–145.
8. Popovic R. S. Hall Effect Devices. – Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2004.

