

Сравнительный анализ и моделирование интегральных элементов Холла, формируемых в рамках КМОП-технологии

Юрий Горячкин (Yury Goryachkin), доцент, к.т.н., доцент кафедры электроники и наноэлектроники ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н.П. Огарева»

Александр Однолько (Alexander Odnolko) Chief of analog IC design department

Михаил Павлюк (Mikhail Pavlyuk) Генеральный директор (CEO)

Аннотация. В статье приводятся результаты сравнительного анализа технологий X-FAB для получения наиболее оптимальных параметров по току стока и напряжению Холла элемента Холла в составе микросхемы с линейным выходом, формируемого в рамках КМОП-технологии. Проведено моделирование элементов Холла в TCAD и установлено, что наиболее оптимальные параметры по току стока и напряжению Холла элемента Холла позволяет обеспечить технология ХН035. Результаты моделирования зависимости напряжения Холла от ширины W элемента Холла при значении длины $L = 200$ мкм показали, что оптимальное соотношение ширины W к длине L элемента Холла лежит в пределах $1.25 < W/L < 1.5$. Также проведено моделирование зависимости напряжения Холла от размеров холловских контактов и показано, что наиболее оптимальные размеры холловских контактов с точки зрения напряжения Холла и занимаемой площади лежат в пределах от 0 до 10 мкм для $L = 200$ мкм.

Ключевые слова: элемент Холла, КМОП-технология, магнитное поле, напряжение Холла, ток стока, электрическое поле, моделирование.

Введение

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.

Для измерения относительно небольших изменений магнитного поля применяются магниточувствительные схемы с линейным выходом, в которых напряжение Холла изменяется пропорционально индукции магнитного поля. Как правило, эти схемы содержат усилитель сигнала датчика. 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].

Постановка задачи

Основным элементом датчика магнитного поля является преобразователь магнитного поля. Одними из наиболее известных линейных преобразователей магнитного поля являются элементы Холла. Для изготовления элементов Холла наиболее широко используются: кремний (Si), арсенид галлия (GaAs), арсенид индия (InAs) и антимонид индия (InSb). Элементы Холла на основе GaAs, InAs и InSb обладают высокой подвижностью носителей заряда и позволяют получить максимальное напряжение Холла. При воздействии магнитного поля с индукцией 500 Гаусс для элементов Холла на основе GaAs напряжение Холла достигает до 110 мВ при напряжении 6 В. Для элементов Холла на основе InAs напряжение Холла достигает до 130 мВ при напряжении 3 В. Максимальное напряжение Холла достигается для элементов Холла на основе InSb (до 370 мВ при напряжении 1 В) [2]. Однако все эти элементы Холла являются гораздо более дорогими по сравнению с элементами Холла на кремнии. Кроме того, они изготавливаются в дискретном исполнении. Поэтому цель данного исследования заключалась в том, чтобы для элемента Холла, реализованного на кремнии в составе интегральной микросхемы, получить максимальное напряжение Холла.

Кремниевый 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 [3-6]. Обычно КМОП-совместимые элементы Холла формируются в кармане n-типа.

Такой элемент Холла может быть пережат сверху слоем p-типа. Тогда он фактически представляет собой полевой транзистор, или иначе pinch-резистор, зажатый с двух сторон p-n переходами. Такая структура является менее чувствительной к зарядам на границе раздела кремний-окисел, так как не касается ни с одной стороны окисла и поэтому не подвергается воздействию накопленного заряда в окисле.

Обзор технологий X-FAB

На X-FAB существует более десятка КМОП-технологий с проектными нормами от 0.18 мкм до 1 мкм. В результате анализа этих технологий было выяснено, что для создания такого элемента Холла подходят 4 технологии: XT018, XC06, XT06 и XH035. Параметры слоев, которые могут быть использованы для создания элемента Холла – поверхностное сопротивление R_S и глубина залегания x_j даны в табл. 1.

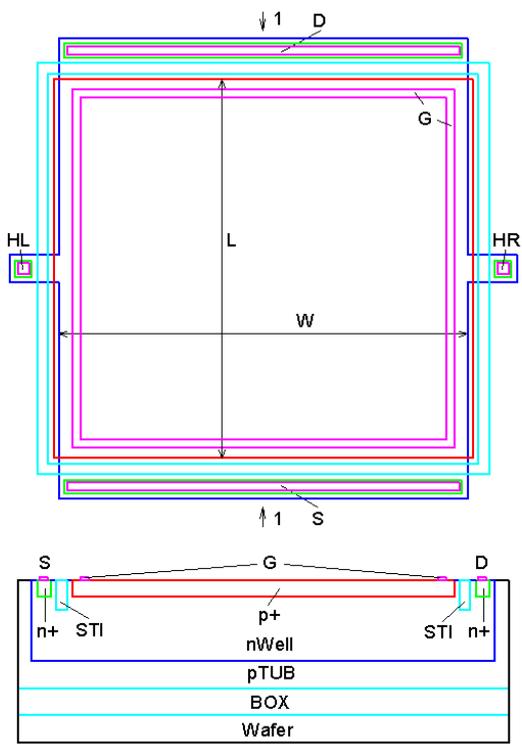
Табл. 1

Технология	Слой	R_S , Ом/кв.	x_j , мкм
XT018	nWell	1080 (под STI)	1.5
	p+	135	0.2
	n+	62	0.2
	STI		0.4
XC06	SnWell	1800	6
	pWell	2000	3
	p+	115	0.4
	n+	57	0.6
XT06	SnWell	1500	5
	pWell	750	3
	p+	115	0.4
	n+	57	0.6
XH035	deep nWell	2800	3.8
	pWell	5800	0.8
	p+	90	0.21
	n+	85	0.17

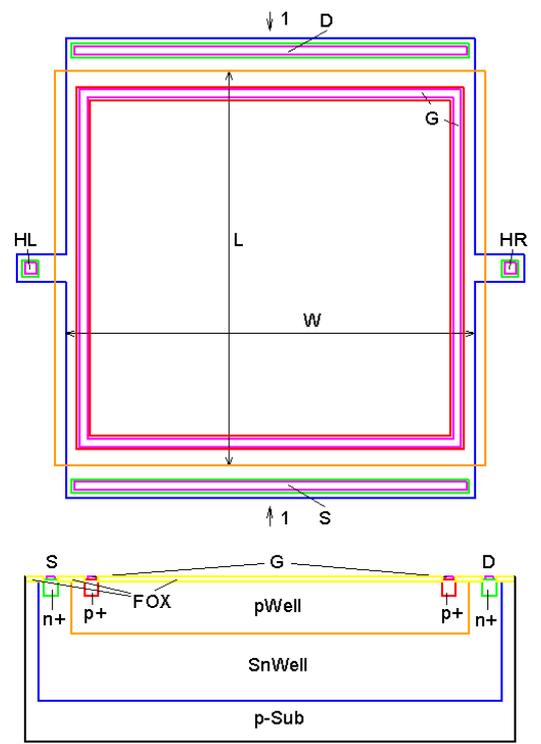
Кроме того, есть технология XII0, в которой есть готовый элемент Холла. Его структура представляет собой активный слой n-типа с поверхностным сопротивлением $R_S = 4500 \text{ Ом/кв}$ и толщиной 0.25 мкм , расположенный на слое скрытого окисла (BOX) толщиной 1 мкм . Сопротивление активного слоя составляет 6.9 кОм . Ток через элемент Холла $I = 300 \text{ мкА}$, при этом чувствительность $S = 205 \text{ В/А}\cdot\text{Т}$. Однако диапазон магнитных полей составляет всего от -200 до 200 Гаусс . Таким образом, напряжение Холла при значении индукции магнитного поля $B = 200 \text{ Гаусс}$ составит всего $V_H = S \cdot I \cdot B = 1.2 \text{ мВ}$. Кроме того, расчет показывает, что рабочее напряжение элемента Холла составляет всего 2 В и ограничено линейным участком ВАХ. Большее напряжение приведет к перекрытию канала.

Таким образом, для получения максимального напряжения Холла должна быть низкая концентрация примеси в активном слое для достижения максимальной подвижности и большая толщина активного слоя для предотвращения перекрытия канала. Поэтому далее был проведен выбор технологии изготовления кристалла, содержащего указанный элемент Холла, позволяющей получить максимальное напряжение Холла. Для этого было проведено исследование путем моделирования в TCAD.

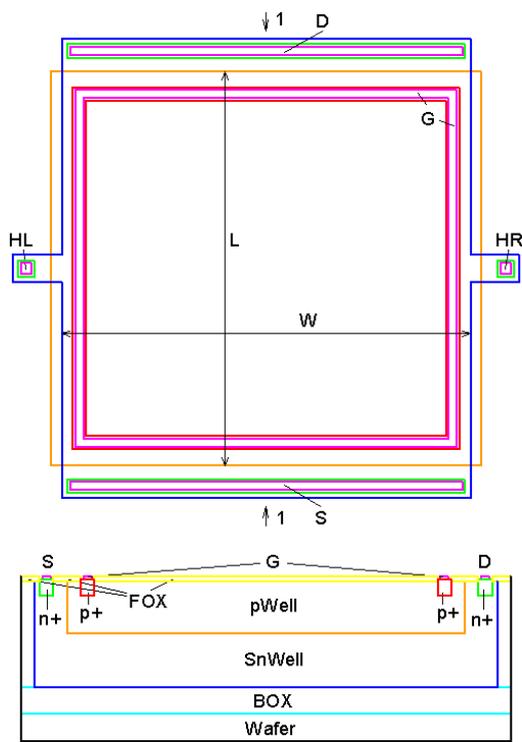
На рис. 1 показаны схематически топологии и структуры элементов Холла в сечении 1 для технологий XT018, XC06, XT06 и XH035. L и W – соответственно, длина и ширина элемента Холла (фактически длина и ширина канала), S – исток, D – сток, G – затвор, HL и HR – холловские контакты, STI и BOX – диэлектрические изолирующие слои, FOX – полевой окисел.



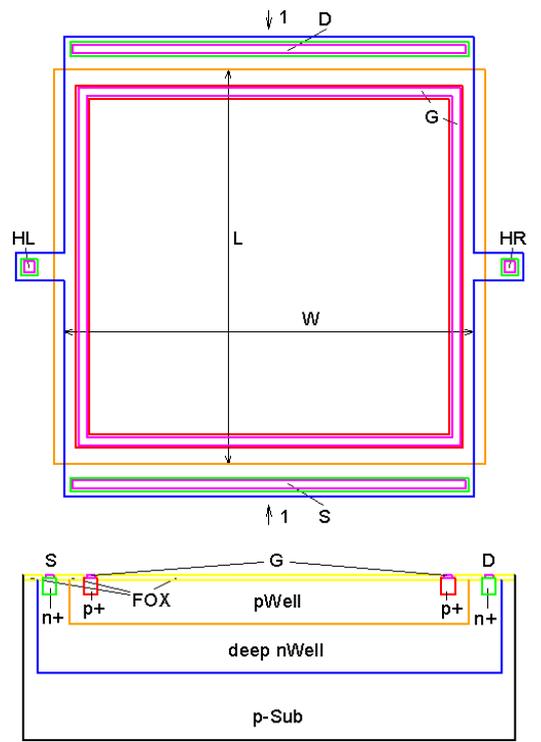
a)



б)



в)



г)

Рис. 1. Топологии и структуры элементов Холла для технологий XT018 (а), XC06 (б), XT06 (в) и XH035 (г)

Разработка моделей элементов Холла

Для моделирования в TCAD были созданы модели трехмерных структур элементов Холла, формируемым по указанным выше технологиям X-FAB. При создании моделей структур элементов Холла для упрощения вокруг контактов к стоку, истоку и холловских контактов не создавались n^+ слои и вокруг контактов к затвору не создавались p^+ слои, поскольку в TCAD можно задать сопротивление контакта (сколь угодно малое). Также не создавались слои STI, BOX и FOX.

На рис. 2, а показана часть трехмерной структуры элемента Холла со стороны контактов к стоку/истоку, на рис. 2, б со стороны холловских контактов для технологии ХТ018. Для технологий ХС06, ХТ06 и ХН035 отличия только в концентрациях и глубинах залегания слоев. На рис. 3 показаны профили распределения примеси в моделируемых структурах элементов Холла для технологий ХТ018, ХС06, ХТ06 и ХН035.

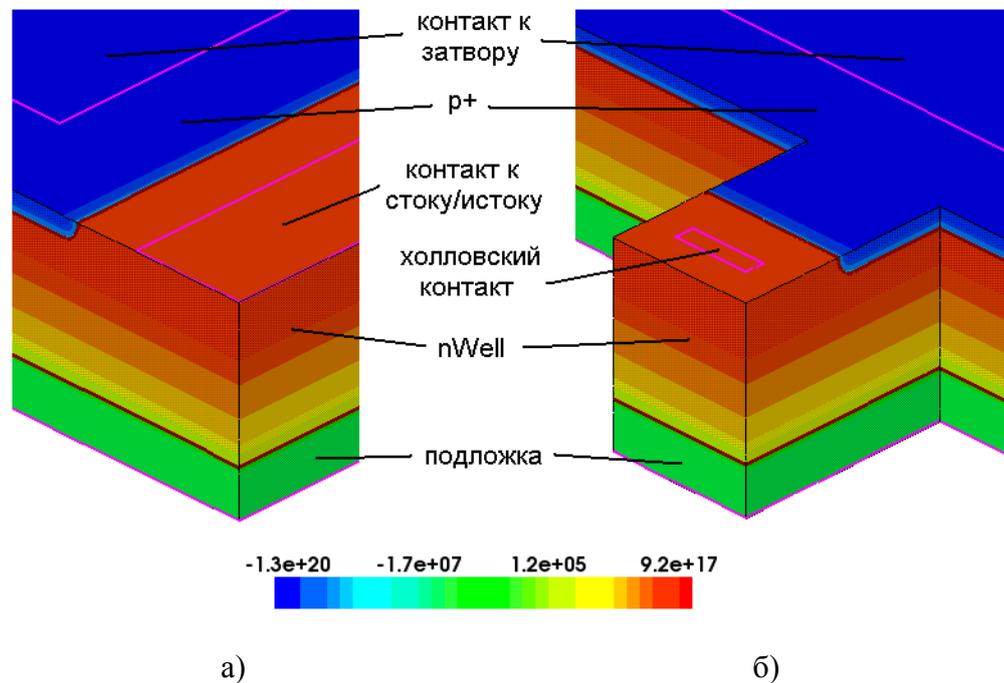


Рис. 2. Часть структуры элемента Холла со стороны контактов к стоку/истоку (а) и со стороны холловских контактов (б)

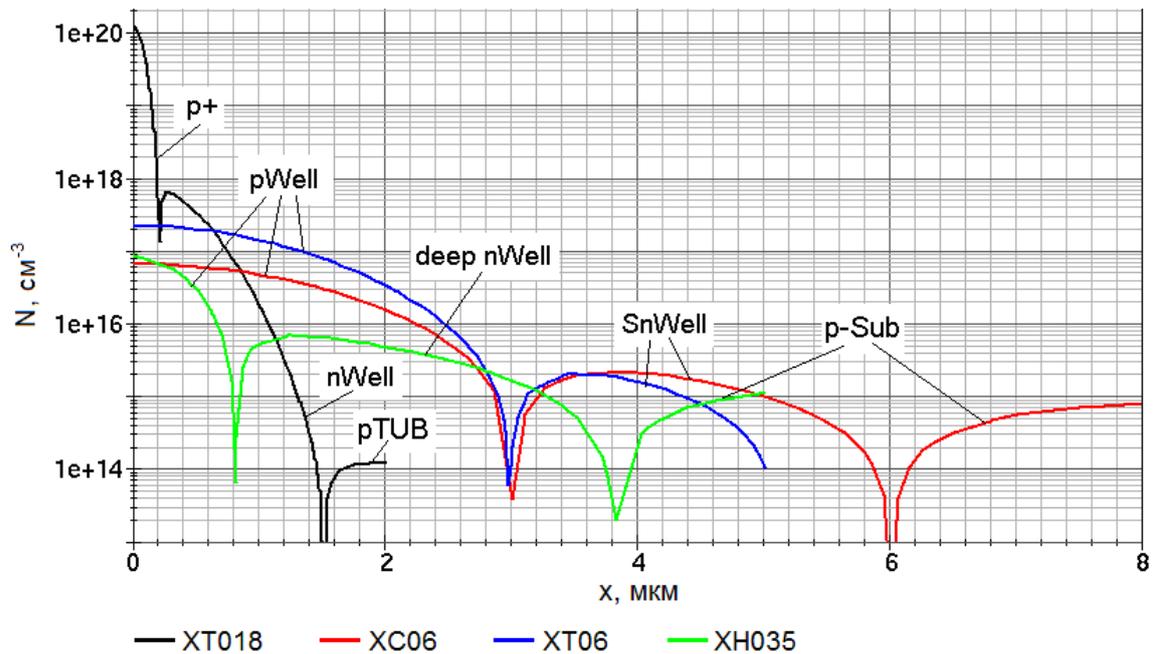


Рис. 3. Профили распределения примеси в структуре элементов Холла

Параметры моделируемых структур элементов Холла – поверхностная концентрация примеси в активном слое n-типа под слоем p-типа N_{Sa} , подвижность носителей заряда μ при данном значении поверхностной концентрации и толщина активного слоя h даны в табл. 2.

Табл. 2

Технология	$N_{Sa}, \text{см}^{-3}$	$\mu, \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$h, \text{мкм}$
XT018	$6 \cdot 10^{17}$	330	1.3
XC06	$2 \cdot 10^{15}$	1330	3
XT06	$2 \cdot 10^{15}$	1330	2
XH035	$7 \cdot 10^{15}$	1270	3

При моделировании элементов Холла использовалась дрейфово-диффузионная модель и учитывались следующие физические эффекты:

- сужение ширины запрещенной зоны кремния с ростом концентрации легирующей примеси;
- рассеяние носителей заряда на фонах и на заряженных ионах примеси, а также насыщение дрейфовой скорости носителей заряда в высоких полях;

- рекомбинация Шокли-Холл-Рида с временами жизни неравновесных носителей заряда, зависящими от концентрации легирующей примеси, а также Оже-рекомбинация;
- модель гальванического переноса носителей в магнитных полях.

Подробное описание этих эффектов приведено в [7].

Моделирование элементов Холла

При моделировании варьировалась ширина элементов Холла W от 100 до 300 мкм с шагом 50 мкм. Длина элементов Холла L выбрана равной 200 мкм. Результаты моделирования зависимости тока стока I_D и напряжения Холла V_H от ширины элемента Холла при значении длины элемента Холла $L = 200$ мкм при воздействии магнитного поля с индукцией 640 Гаусс и напряжении между стоком и истоком $V_D = 5$ В показаны на рис. 4 и 5.

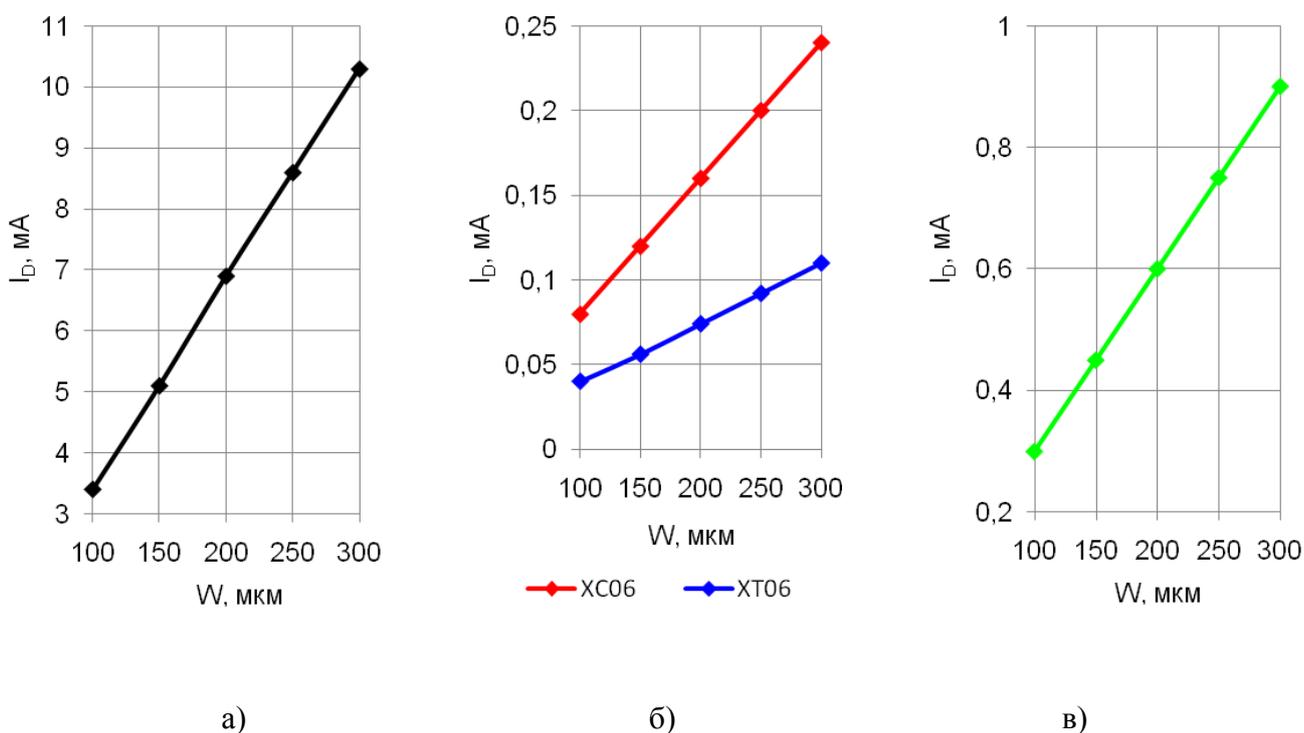


Рис. 4. Графики зависимости тока стока от ширины элемента Холла при значении длины элемента Холла $L = 200$ мкм для технологий XT018 (а), XC06 и XT06 (б) и XH035 (в)

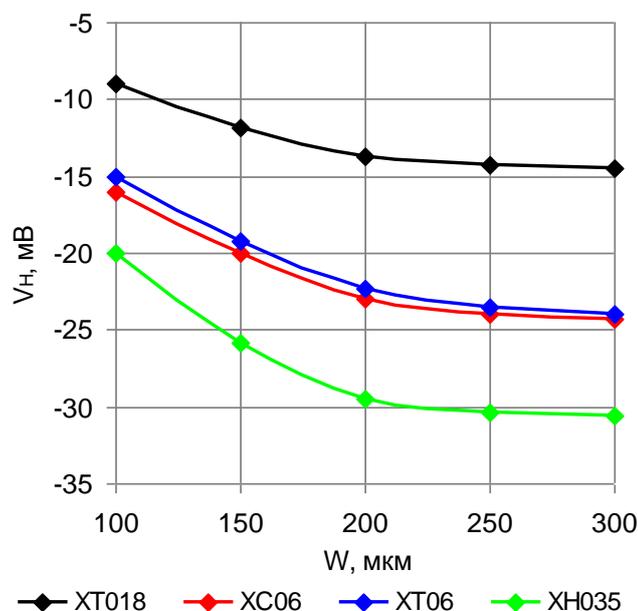


Рис. 5. Графики зависимости напряжения Холла (б) от ширины элемента Холла при значении длины элемента Холла $L = 200$ мкм

Как видно из графиков на рис. 4, зависимость тока стока от ширины элемента Холла для всех четырех анализируемых технологий линейная, однако сами абсолютные значения токов сильно различаются. При одинаковых значениях ширины элемента Холла максимальный ток стока получается для технологии ХТ018 и превышает ток для технологии ХН035 в 11 раз, для технологии ХС06 в 43 раза и для технологии ХТ06 в 94 раза.

Из графиков на рис. 5 видно, что зависимость напряжения Холла от ширины элемента Холла для всех четырех технологий нелинейная и при $W/L > 1.25$ наблюдается насыщение зависимости. Причем для технологии ХН035 напряжение Холла более чем в 2 раза превышает напряжение Холла для технологии ХТ018 и почти на треть для технологий ХС06 и ХТ06 при одинаковых значениях ширины элемента Холла.

Такая зависимость напряжения Холла от ширины характерна для элементов Холла прямоугольной конфигурации и объясняется искривлением полей из за большого W/L и учитывается введением в известную формулу геометрического коэффициента (geometrical factor), который входит в выражение для напряжения Холла [8]:

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

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.

Результаты моделирования ВАХ элементов Холла представлены на рис. 6. Для технологии ХТ018 линейный участок ВАХ составляет порядка 9 В и далее практически сразу начинается пробой. Для технологий ХС06 и ХТ06 линейный участок ВАХ составляет порядка 3 В и далее начинается перекрытие канала в активном слое. Для технологии ХН035 линейный участок ВАХ гораздо больше – порядка 8 В и далее также начинается перекрытие канала в активном слое. Это означает, что напряжение Холла перестанет возрастать для технологий ХС06 и ХТ06 при напряжении на стоке более 4 В, а для технологии ХН035 при напряжении на стоке более 10 В.

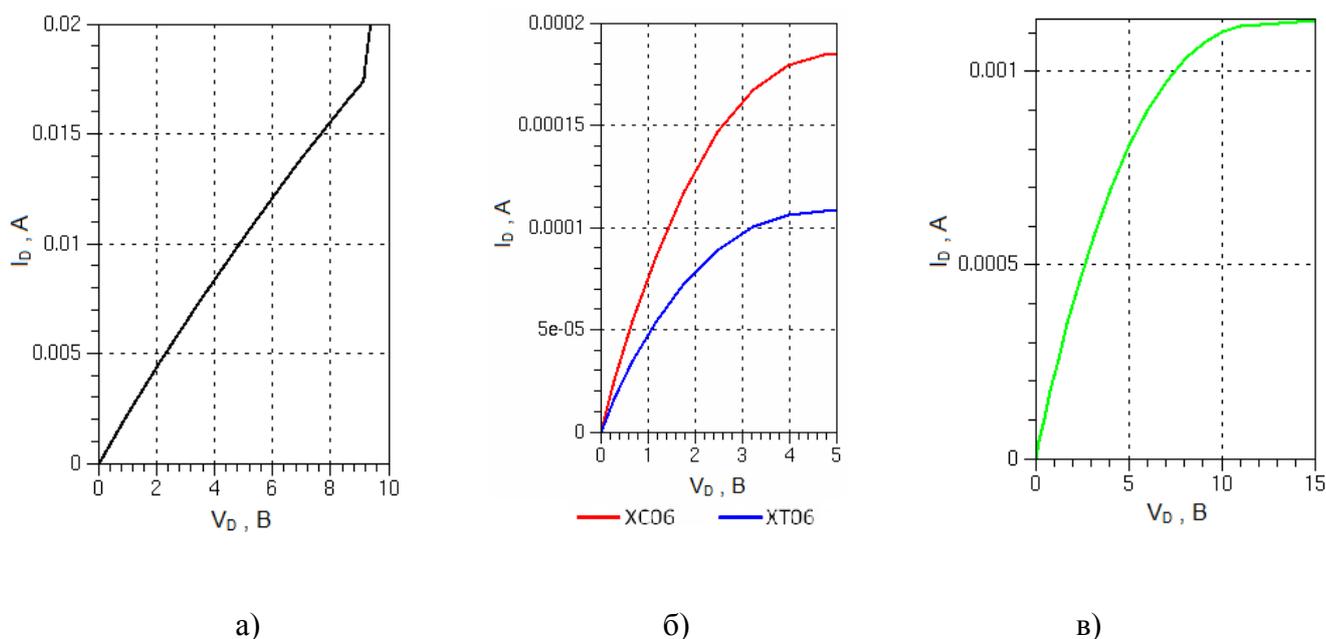


Рис. 6. ВАХ элемента Холла при значении ширины $W = 300$ мкм и длины $L = 200$ мкм для технологий ХТ018 (а), ХС06 и ХТ06 (б) и ХН035 (в)

Проведенный расчет чувствительности элементов Холла при воздействии магнитного поля с индукцией 640 Гаусс и напряжении между стоком и истоком $V_D = 5$ В при $L = 200$ мкм и $W = 300$ мкм показывает, что для технологии ХТ018 чувствительность $S = 22$ В/А·Т, для технологии ХС06 $S = 2080$ В/А·Т, для технологии ХТ06 $S = 3270$ В/А·Т и для технологии ХН035 $S = 605$ В/А·Т. Как видно из расчетов, максимальную чувствительность будет иметь элемент Холла, изготовленный по технологии ХТ06. Однако по совокупности параметров можно сделать вывод, что наиболее оптимальные параметры элемента Холла позволит обеспечить технология ХН035. Элементы Холла, изготовленные по этой технологии, будут иметь максимальное напряжение Холла (31 мВ при значении индукции магнитного поля 640 Гаусс), небольшой ток (менее 1 мА), диапазон рабочих напряжений до 8 В. Поэтому дальнейшее моделирование проводилось для этого элемента Холла.

Минимальное значение индукции магнитного поля, воздействующего на элемент Холла, зависит от коэффициента усиления усилителя и ограничено шумами. Шумы при температуре 100 °С и коэффициенте усиления усилителя 300, изготовленного по биполярной технологии, порядка 15 мВ, изготовленного по КМОП технологии порядка 100 мВ. Эти данные получены моделированием в САПР Cadence при напряжении между стоком и истоком $V_D = 5$ В. Расчет показывает, что минимальное значение индукции магнитного поля для биполярной технологии составляет 0.9 Гаусс, для КМОП технологии 6 Гаусс.

Далее было рассмотрено, как изменяется напряжение Холла по объему элемента Холла. Для этого были созданы и промоделированы структуры элементов Холла разной ширины, в которые были добавлены контакты внутри элемента Холла, расположенные между левым и правым холловскими контактами HL и HR на равных расстояниях друг от друга, как показано на рис. 7.

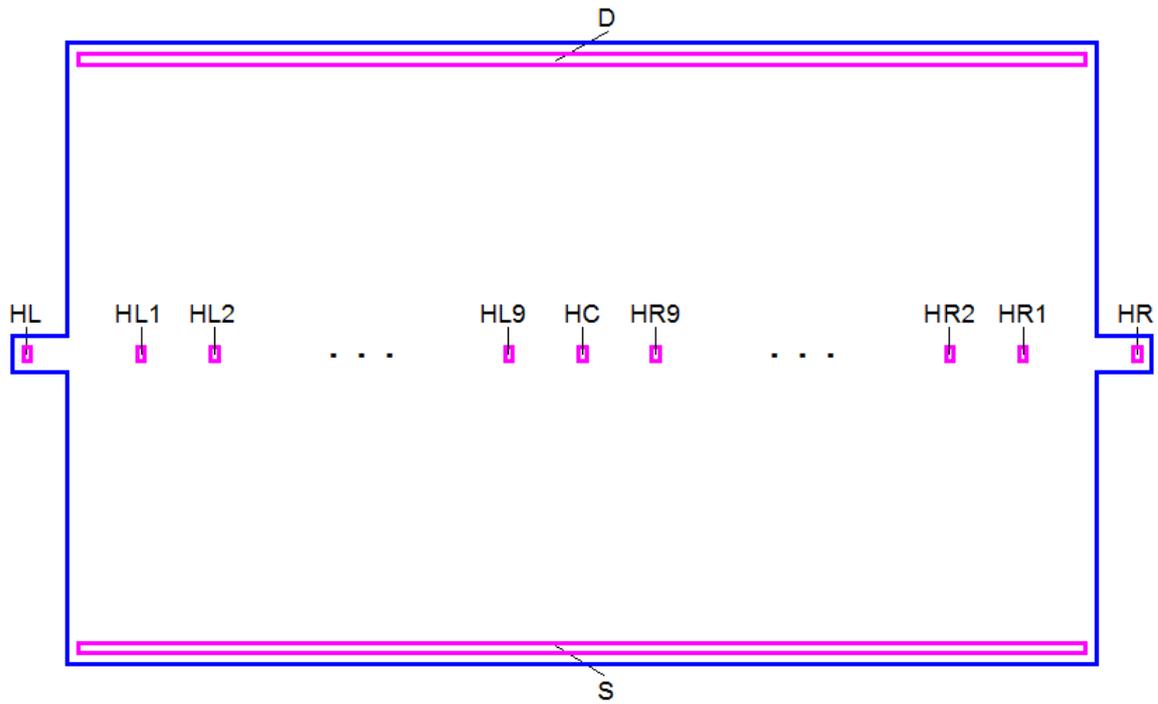


Рис. 7. Топология элемента Холла с контактами внутри элемента Холла

При этом слой pWell не создавался, иначе количество элементов расчетной сетки становилось чрезмерно большим. Длина элемента Холла $L = 200$ мкм. HL и HR – холловские контакты, HC – контакт в центре элемента Холла, контакты HL1, HL2, ..., HL9 и HR1, HR2, ..., HR9 расположены на равных расстояниях относительно центрального контакта HC. На этих парах контактов (левом HL n и соответствующем ему правом HR n , где $n = 1, 2, \dots, 9$) измерялось напряжение Холла. В результате построены графики зависимости напряжения Холла V_H на этих парах контактов от расстояния ΔW , отсчитываемого от левого HL (или правого HR) холловского контакта по направлению к центру структуры при разных значениях ширины элемента Холла W . Эти графики представлены на рис. 8. Первые десять маркеров на этих графиках, начиная со значения $\Delta W = 0$ мкм, соответствуют значениям напряжения Холла V_H , измеренным на этих парах контактов (HL n и HR n), начиная с холловских контактов HL и HR. Последний, одиннадцатый маркер соответствует напряжению на центральном контакте HC, на котором напряжение Холла $V_H = 0$ В.

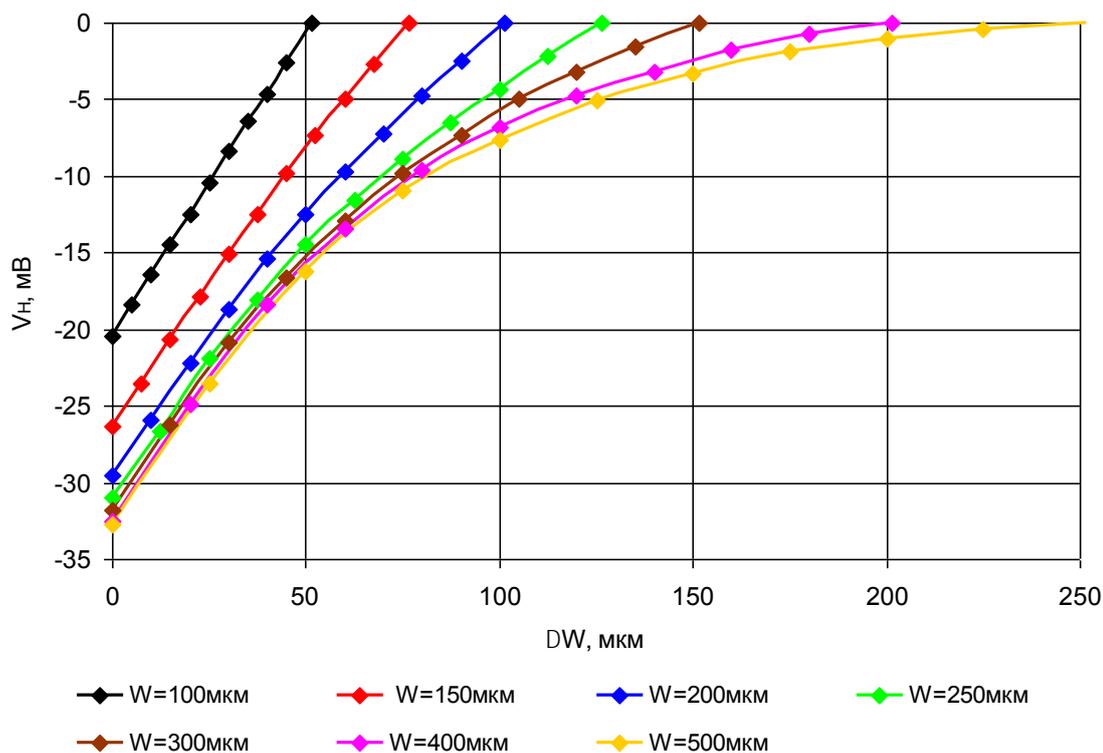


Рис. 8. Графики зависимости напряжения Холла на соответствующих парах контактов (HLn и HRn) от расстояния, отсчитываемого от левого HL (или правого HR) холловского контакта по направлению к центру структуры при разных значениях ширины элемента Холла

Как видно из этих графиков, при $W = 100$ мкм зависимость практически линейная, т.е. поперечное электрическое поле равномерно распределено по всему элементу Холла. При $W = 150$ мкм линейность уже нарушается и наблюдается небольшое насыщение зависимости ближе к центру элемента Холла. И далее с ростом W насыщение зависимости наблюдается на все большем расстоянии от центра элемента Холла. Начиная со значения $W = 250 \div 300$ мкм, линейность зависимости сохраняется только на расстоянии 50 мкм от краев элемента Холла, а далее по направлению к центру зависимость становится все более нелинейной. При этом напряжение Холла на холловских контактах HL и HR практически перестает увеличиваться. Соответственно, поперечная составляющая электрического поля равномерно распределена только на расстоянии 50 мкм от краев элемента Холла, а далее по направлению к центру уменьшается.

Далее было исследована зависимость напряжения Холла от длины холловских контактов b и длины участка под холловские контакты a элемента Холла. Эти расстояния отмечены на рис. 9. При этом длина элемента Холла $L = 200$ мкм и ширина $W = 300$ мкм.

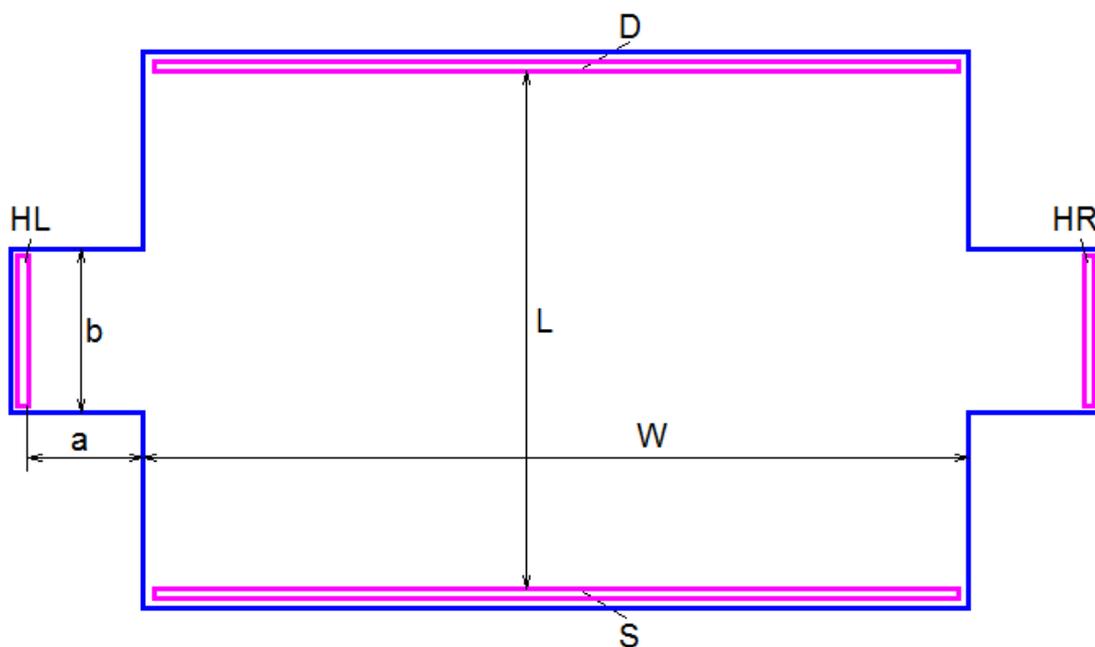


Рис. 9. Структура элемента Холла для исследования зависимости напряжения Холла от длины холловских контактов и длины участка под холловские контакты элемента Холла

На рис. 10 показаны графики зависимости напряжения Холла от отношения a/b при различных значениях длины холловских контактов. Из графиков видно, что с увеличением длины холловских контактов увеличивается и значение длины участка под холловские контакты, при котором достигается максимальное напряжение Холла. Причем максимальное значение напряжения Холла не зависит от длины холловских контактов и составляет 31 мВ.

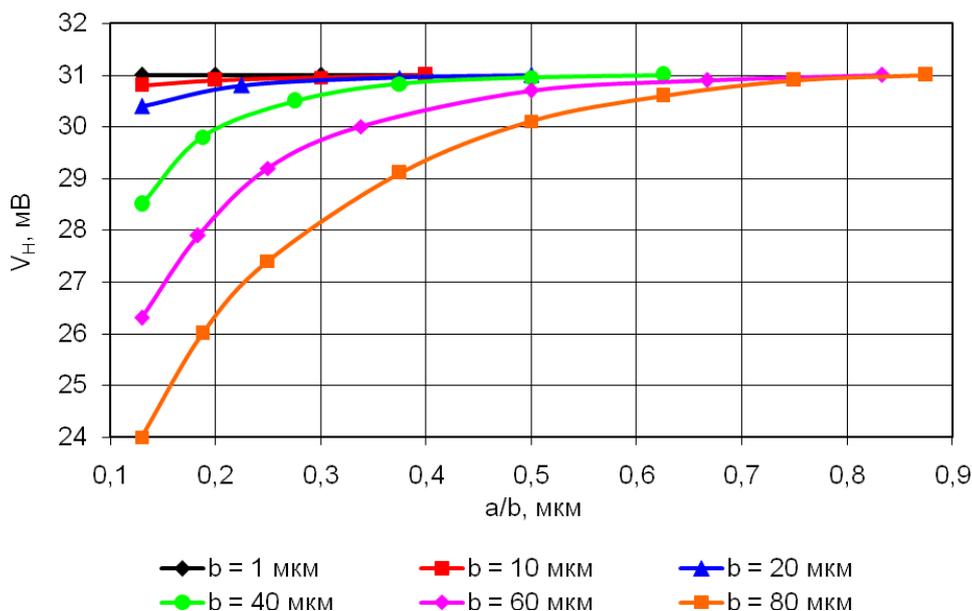


Рис. 10. Графики зависимости напряжения Холла от отношения a/b при различных значениях длины холловских контактов

По данным моделирования разработаны и будут изготовлены тестовые элементы Холла. Результаты исследования будут опубликованы в последующей статье.

Заключение

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

1. Сравнительный анализ технологий X-FAB показывает, что наиболее оптимальные параметры по току стока и напряжению Холла элемента Холла позволяет обеспечить технология ХН035.
2. Результаты моделирования элементов Холла в TCAD показали, что оптимальное соотношение ширины W к длине L элемента Холла лежит в пределах $1.25 < W/L < 1.5$.
3. Также результаты моделирования показали, что наиболее оптимальные размеры холловских контактов с точки зрения напряжения Холла и занимаемой площади лежат в пределах от 0 до 10 мкм для $L = 200$ мкм.

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. Hall Elements, <http://www.akm.com/akm/en/product/detail/0004>.
3. Bellekom S. CMOS versus bipolar Hall plates regarding offset correction. // Sens. Actuat. A. – 1999. – № 76. P. 178–182.
4. 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.
5. Popovic R.S., Randjelovic Z., Manic D. Integrated Hall-effect magnetic sensors. // Sens. Actuat. A. – 2001. – № 91. P. 46–50.
6. 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.
7. Горячкин Ю. В., Нестеров С. А., Сурин Б. П. Физико-топологическое моделирование в САПР TCAD. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2006. – 124 с.
8. Popovic R. S. Hall Effect Devices. – Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2004. – 426 p.