

Исследование влияния топологии КМОП-совместимого элемента Холла на его магниточувствительность

Ю.А. Чаплыгин, Т.Ю. Крупкина, А.Ю. Красюков, Е.А. Артамонова

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», artamonova@org.miet.ru

Аннотация — Проведено исследование возможности повышения магниточувствительности элемента Холла, формируемого на основе КМОП-совместимого технологического маршрута. Относительная токовая чувствительность элемента Холла была увеличена с 236 до 1500 В/(А*Тл) за счет изменения топологии маски для легирования активной области прибора.

Ключевые слова — датчик Холла, магниточувствительный элемент, КМОП.

I. ВВЕДЕНИЕ

Интегральные элементы Холла широко используются в системах промышленного контроля, интеллектуальных приборах, потребительской электронике и др. Они используются не только для измерения магнитных полей, но и для измерения скорости, положения и других параметров. 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 [1-4].

Однако КМОП-совместимые элементы Холла имеют малую величину магниточувствительности [2-4]. Эта величина ограничена возможностями используемой технологии. Как правило, КМОП-совместимые элементы Холла формируются в кармане N-типа, который имеет высокую степень легирования, что приводит к снижению магниточувствительности [5]. Введение в стандартный КМОП-процесс дополнительной операции для формирования низколегированной области p-типа позволило бы повысить магниточувствительность, но привело бы к существенному увеличению стоимости технологического процесса.

Искусственно снизить концентрации в p-области без изменения стандартного технологического КМОП-процесса можно за счет изменения топологии маски для легирования кармана. В статье приводятся результаты исследования влияния топологии маски для легирования кармана на магниточувствительность элемента Холла, формируемого в рамках стандартной КМОП-технологии с проектными нормами 0.6 мкм.

II. ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ХОЛЛА НА ОСНОВЕ КМОП-ТЕХНОЛОГИИ С ПРОЕКТНЫМИ НОРМАМИ 0.6 МКМ

Горизонтальный элемент Холла имеет типичную крестообразную симметричную топологию, представленную на рис. 1 [6].

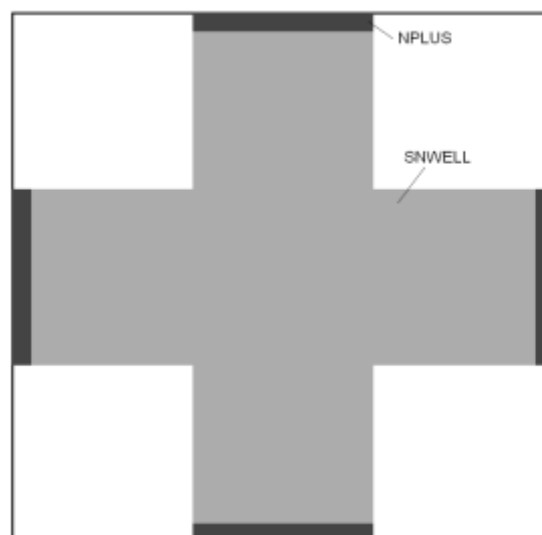


Рис. 1. Топология элемента Холла

Обычно КМОП-совместимые элементы Холла формируются в кармане N-типа [5]. В используемом КМОП технологическом процессе с проектными нормами 0.6 мкм формируется 3 кармана: NWELL, SNWELL и DNWELL, параметры которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры диффузионных областей карманов, формируемых в технологии X-FAB 0.6 мкм

Тип кармана	Тип	Глубина, X _j , мкм	Сопротивление, ρ _s , кОм/кв
NWELL	n	3.5	0.9
SNWELL	n	6	1.8
DNWELL	n	8	0.58

Распределения концентрации активной примеси в диффузионных областях карманов NWELL, SNWELL и DNWELL показаны на рисунке 2.

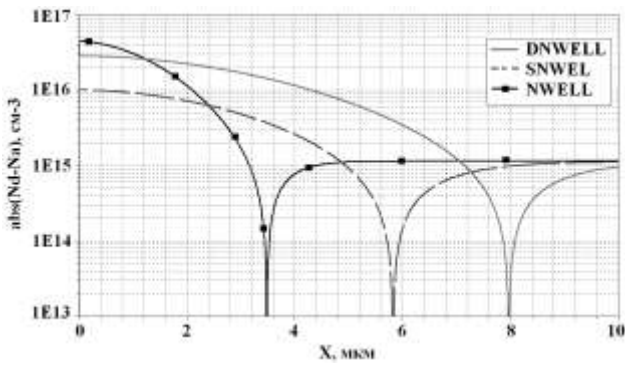


Рис. 2. Распределения активной примеси в диффузионных областях карманов NWELL, SNWELL и DNWELL

Относительная магниточувствительность элемента Холла по току определяется по формуле (1):

$$S_I = \frac{1}{I_D} \frac{dV_H}{dB} = \frac{1}{N_s e} \frac{dV_H}{dB}, \quad (1)$$

где V_H – напряжение Холла, B – величина приложенного магнитного поля, I_D – входной ток, N_s – поверхностная концентрация примеси.

Согласно формуле (1) магниточувствительность возрастает с уменьшением поверхностной концентрации примеси. Поэтому с целью увеличения магниточувствительности для формирования элемента Холла была выбрана самая слаболегированная область n-типа в используемом КМОП-процессе, а именно, диффузионная область SNWELL (рис. 2).

На основе топологии элемента Холла (рис. 1) и диффузионного профиля SNWELL (рис. 2) средствами приборно-технологического моделирования была сформирована 3D-модель прибора (рис. 3) и рассчитаны ее характеристики при величине магнитного поля $B = 5$ мТл.

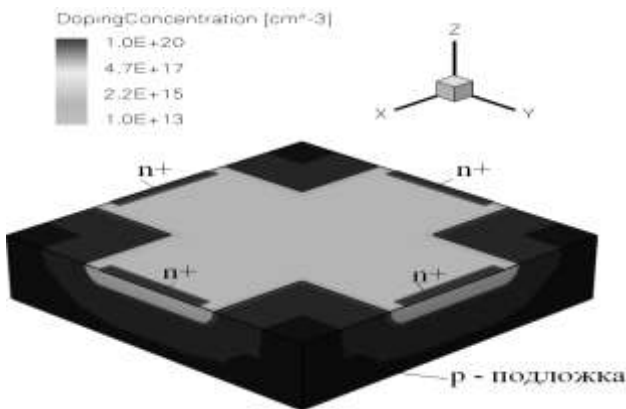


Рис. 3. 3D-модель элемента Холла, построенная в слое SNWELL

Расчет показал (рис. 4), что максимальная магниточувствительность элемента Холла по току S_I не превышает 236 В/(А·Тл). При этом сопротивление $R = 3.615$ кОм. Такая величина магниточувствительности является недостаточной для низковольтных схем, поскольку не позволяет обеспечить необходимое для большинства применений выходное напряжение [5].

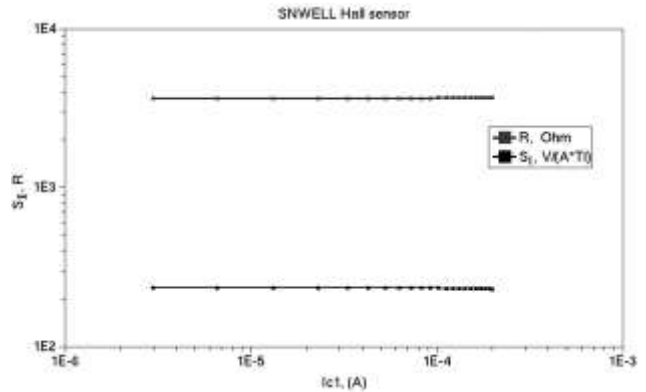


Рис. 4. Зависимость магниточувствительности по току S_I и сопротивления R элемента Холла от тока прибора

III. ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ ЭЛЕМЕНТА ХОЛЛА С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ЕГО МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Для увеличения чувствительности элемента Холла необходимо уменьшить концентрацию примеси в кармане. При фиксированных режимах технологического маршрута наиболее перспективный метод увеличения чувствительности элемента Холла описан в работе [5]. В данном методе предлагается уменьшить концентрацию примеси и глубину залегания кармана за счет изменения топологии маски для легирования кармана.

При одном и том же режиме формирования кармана можно получать разные глубины залегания и максимальные концентрации примеси в кармане, если проводить имплантацию не через полностью открытое большое окно, а через массив малых окон. В этом случае средняя эффективная доза примеси, которая попадет в карман D_{eff} , будет равна

$$D_{eff} = \frac{S_w}{S} D, \quad (2)$$

где S – площадь большого окна для имплантации кармана, S_w – общая площадь малых окон, D – доза имплантации кармана.

Таким образом, эффективную дозу примеси, а, следовательно, ее максимальную концентрацию и глубину залегания можно контролировать, меняя отношение площадей S_w и S .

На рис. 5 показаны результаты двумерного моделирования распределения примеси в кармане при имплантации через модифицированную маску SNWELL. При ширине окна маски $W = 2$ мкм и расстоянии между окнами $D = 4$ мкм глубина залегания примеси $X_j = 4.1$ мкм и максимальная концентрация примеси $N_{max} =$

$2.75 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (рис. 6б). При имплантации примеси через маску с открытой частью X [-10,10] мкм карман имеет глубину залегания $X_j = 6$ мкм и максимальную концентрацию $N_{\max} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

При использовании модифицированной маски SNWELL в виде массива окон распределение примеси в горизонтальном направлении становится неоднородным (рис. 6а). Наибольшие значения X_j и N_{\max} достигаются там, где примесь проникает через открытые участки маски в результате имплантации. Под закрытыми участками маски примесь оказывается в результате латеральной диффузии примеси с соседних островков и имеет наименьшие значения X_j и N_{\max} . Высокое сопротивление таких «промежуточных» зон вносит существенный вклад во входное сопротивление элемента Холла. Кроме того, эти зоны сами являются отличными элементарными элементами Холла. Эти факторы способствуют существенному росту магниточувствительности элемента Холла.

С уменьшением ширины окна и увеличением расстояния между окнами уменьшается соотношение Sw/S и, согласно формуле (2), эффективная доза вводимой примеси. Однако, для того, чтобы после имплантации и отжига диффузионные области сомкнулись, образовав единую область n-типа, расстояние между окнами должно быть меньше глубины залегания примеси X_j .

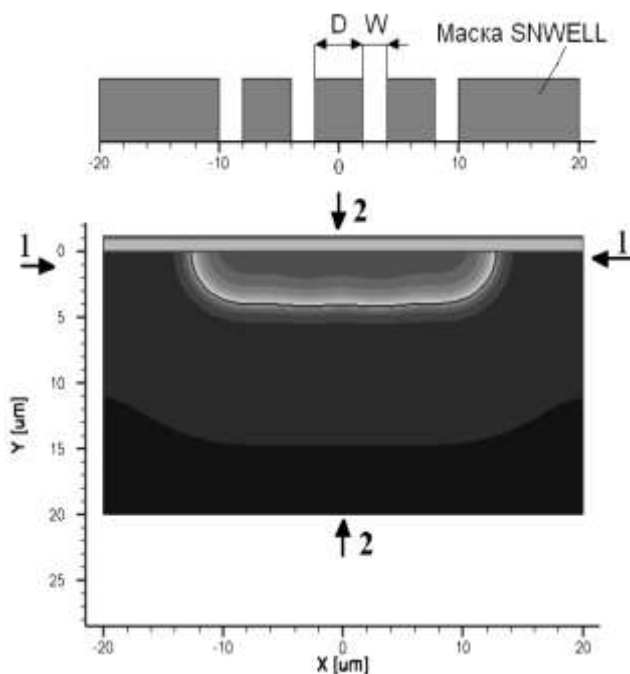


Рис. 5. Расчетное распределение примеси, полученное при легировании слоя SNWELL через модифицированную маску с $W = 2$ мкм и $D = 4$ мкм

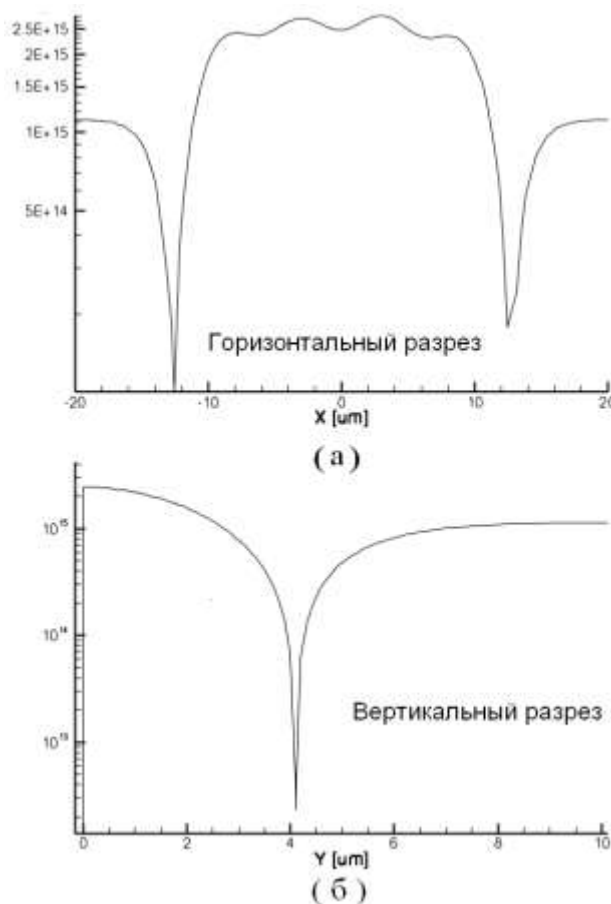


Рис. 6. Расчетное распределение примеси в горизонтальном сечении 1 – (а) и вертикальном сечении 2 – (б) слоя SNWELL на рис. 5

В таблице 2 приведены значения N_{\max} и X_j при вариации ширины окна маски W и расстояния между окнами D (рис. 5).

Таблица 2

Значения N_{\max} и X_j при вариации ширины окна маски W и расстояния между окнами D

D, мкм	W, мкм	$N_{\max}, 10^{15} \text{ см}^{-3}$	$X_j, \text{ мкм}$
2	1	2.54	4.1
	2	4.46	4.9
	3	5.55	5.1
3	1	1.65	3.6
	2	3.47	4.5
	3	4.61	4.8
4	1	1.26	3.25
	2	2.75	4.15
	3	4.2	4.7

На рис. 7 приведена модифицированная топология элемента Холла при $D = 4$ мкм, $W = 2$ мкм. Полосы SNWELL1 – открытые места маски.

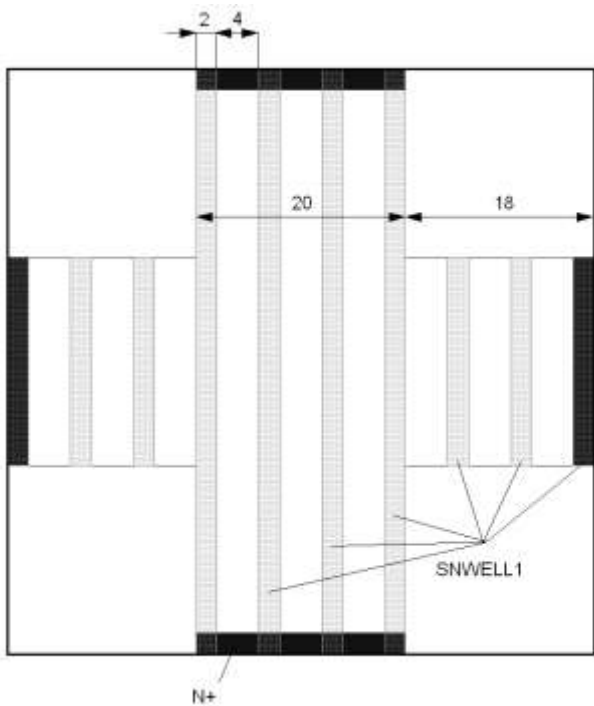


Рис. 7. Модифицированная топология SNWELL1

На рис. 8 показана трехмерная модель элемента Холла, созданная с использованием модифицированной топологии SNWELL1, и одномерное сечение структуры вдоль оси X.

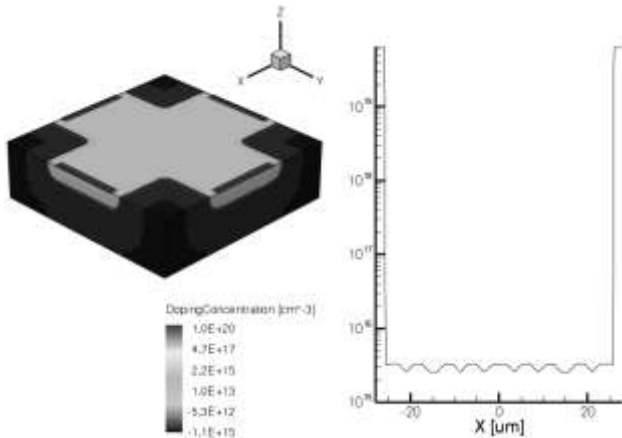


Рис. 8. 3D-модель элемента Холла, созданная с использованием модифицированной топологии слоя SNWELL1

Расчет показал, что использование маски SNWELL1 позволило повысить максимальную чувствительность элемента по току до $SI = 840 \text{ В}/(\text{А}\cdot\text{Тл})$. При этом сопротивление увеличилось до $R = 14 \text{ кОм}$.

С целью дальнейшего увеличения магниточувствительности была сформирована симметричная топология элемента Холла SNWELL2, показанная на рис. 9 и 10.

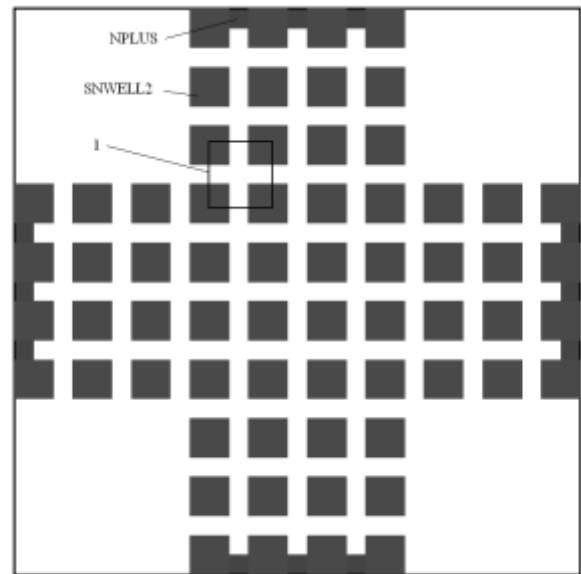


Рис. 9. Топология симметричного элемента Холла SNWELL2 (закрашенные квадраты – открытые места для легирования кармана, 1 – область для 3D-моделирования процессов формирования кармана)

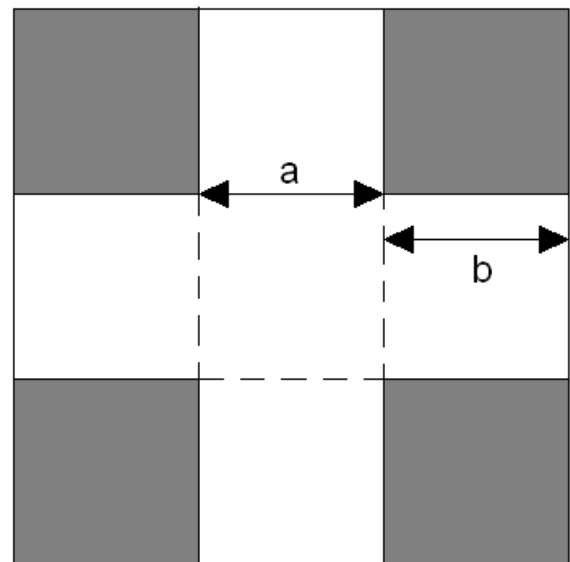


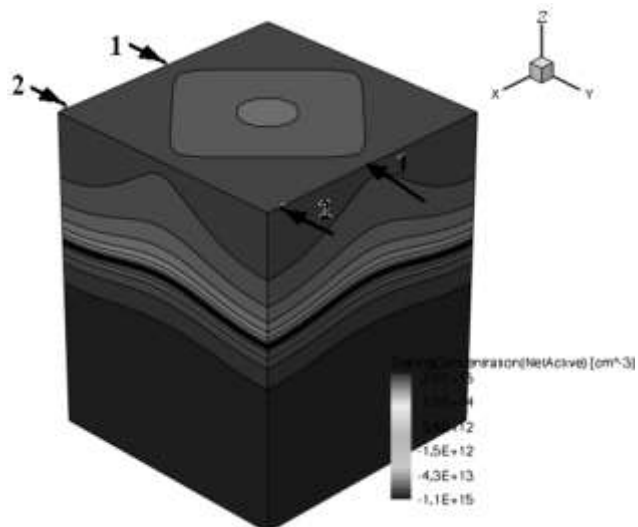
Рис. 10. Увеличенная область 1 на рис. 8

На рис. 11 и 12 показаны результаты моделирования распределения примеси в кармане для характерной области 1, приведенной на рис. 10. Диапазон максимальных концентраций в кармане приведен в таблице 3. В центре между областями имплантации концентрация примеси в кармане минимальна и близка к концентрации примеси в подложке.

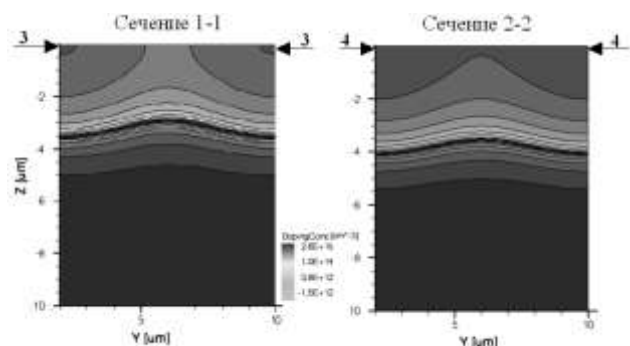
Таблица 3

Параметры кармана при имплантации через маску SNWELL2

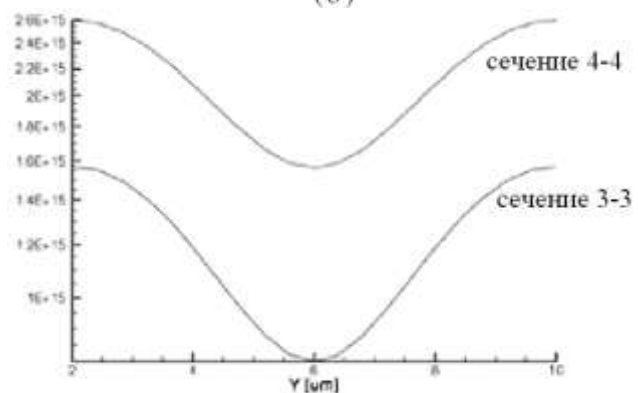
a	b	N_{max}, cm^{-3}
4	2	$10^{15} - 2.6 \cdot 10^{15}$
2	2	$3.55 \cdot 10^{15} - 3.86 \cdot 10^{15}$



(а)

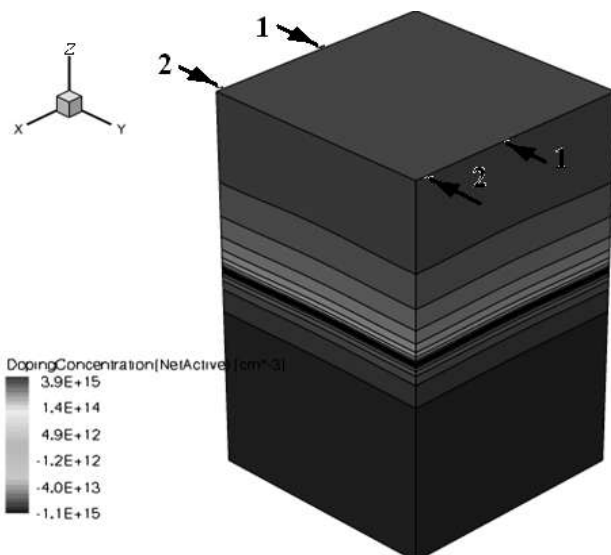


(б)

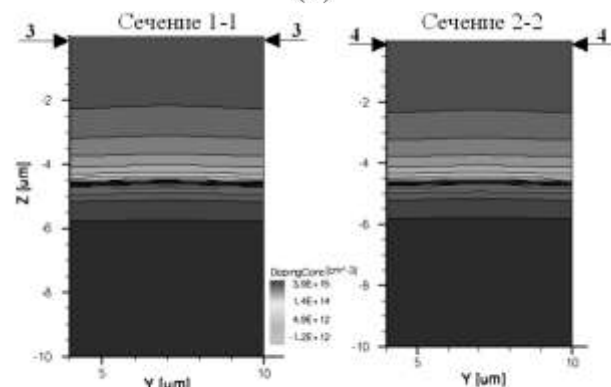


(в)

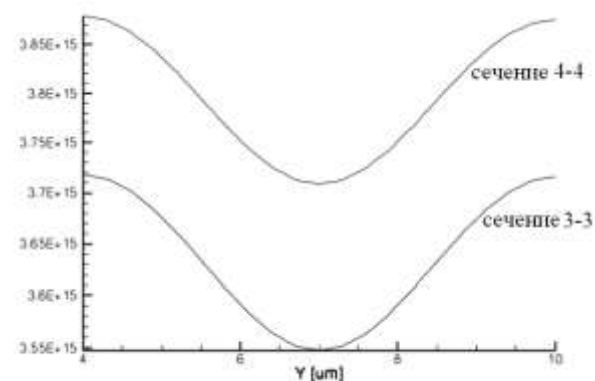
Рис. 11. Результирующее 3D-распределение примеси – (а), 2D-сечения 1-1 и 2-2 – (б) и 1D-сечения 3-3 и 4-4 – (в) при $a = 4 \text{ мкм}$, $b = 2 \text{ мкм}$



(а)



(б)



(в)

Рис. 12. Результирующее 3D-распределение примеси – (а), 2D-сечения 1-1 и 2-2 – (б) и 1D-сечения 3-3 и 4-4 – (в) при $a = 2 \text{ мкм}$, $b = 2 \text{ мкм}$

На рис. 13 и 14 показано влияние концентрации примеси в кармане на чувствительность и сопротивление элемента Холла при использовании традиционной и модифицированных топологий для формирования его активной области:

SNWELL – расчет для традиционной топологии (рис.1) с $X_j = 6$ мкм;

SNWELL – расчет для традиционной топологии (рис.1) с $X_j = 4$ мкм (уменьшена концентрация примеси в кармане, что является отклонением от стандартного технологического маршрута);

SNWELL1 – прогноз для модифицированной топологии, представленной на рис. 7;

SNWELL2 – прогноз для модифицированной топологии, представленной на рис. 9, при $a = b = 2$ мкм;

SNWELL3 – прогноз для модифицированной топологии, представленной на рис. 9, при $a=4$ мкм, $b=2$ мкм.

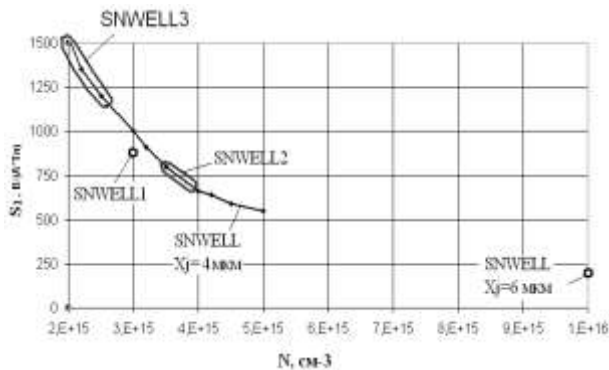


Рис. 13. Зависимость чувствительности элемента Холла по току от максимальной результирующей концентрации примеси в кармане

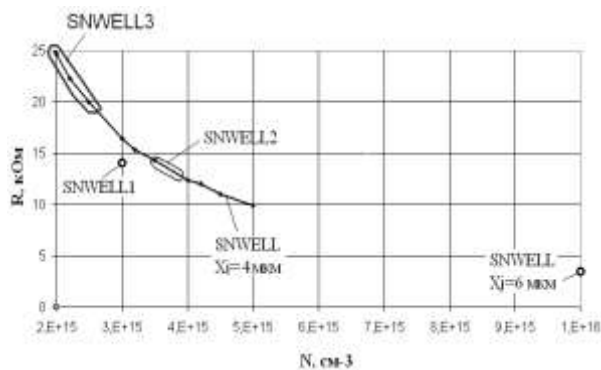


Рис. 14. Зависимость сопротивления элемента Холла от максимальной результирующей концентрации примеси в кармане

Таким образом, оценочные расчеты показали, что при использовании симметричной топологии, состоящей их массива малых окон (рис. 9), возможно увеличение относительной магниточувствительности элемента Холла по току с 236 до 1100-1500 В/(А·Тл) при увеличении сопротивления элемента Холла с 3.6 до 25 кОм.

Как видно из рис.13, теоретически возможно дальнейшее увеличение чувствительности элемента Холла при уменьшении концентрации примеси до $2 \cdot 10^{15}$ см-

3 и ниже. Однако такие значения становятся сопоставимыми с концентрацией примеси в подложке (10^{15} см-3). Как видно из распределения примеси рис.11, в центре одной из ячеек элемента Холла результирующая концентрация активной примеси для топологии SNWELL2 уже меньше, чем концентрация примеси в подложке. Таким образом, при дальнейшем увеличении расстояния между областями ячеек топологии (параметр “a” на рис. 10) сплошной карман сформирован не будет, и чувствительность элемента Холла будет снижаться.

Дополнительным фактором, ограничивающим чувствительность элемента Холла при низких значениях концентрации примеси в кармане, является обеднение кармана. По сути, рассматриваемый элемент Холла представляет собой обратносмещённый p-n-переход. Как было указано в предыдущем разделе, центральные части ячеек, составляющих элемент Холла (рис. 11), будут иметь низкие значения концентрации примеси. В этих местах область пространственного заряда (ОПЗ) p-n перехода может приводить к полному обеднению области кармана, что также приведёт к сжиганию чувствительности элемента Холла.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведены результаты исследования зависимости магниточувствительности элемента Холла, сформированного по КМОП-технологии с проектными нормами 0.6 мкм, от его топологии.

Исследование позволяет сделать вывод, что оптимизация традиционной крестообразной топологии элемента Холла способствует увеличению его относительной магниточувствительности по току с 236 до 1500 В/(А·Тл) без внесения изменений в стандартный технологический КМОП-процесс.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bellekom S. CMOS versus bipolar Hall plates regarding offset correction // Sens. Actuat. A. 1999. № 76. P. 178 – 182.
- [2] Popovic R.S., Randjelovic Z., Manic D. Integrated Hall-effect magnetic sensors // Sens. Actuat. A. 2001. № 91. P. 46 – 50.
- [3] 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.
- [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] Randjelovic Z.B., Popovic R.S., Petr J., Reidl F. Low Power High Sensitive CMOS Magnetic Field Hall Sensor // The 13 European Conference on Solid-State Transducers. 1999. № 9. P. 601 – 604.
- [6] Hadi Heidari, Umberto Gatti, Edoardo Bonizzoni, and Franco Maloberti. Low-Noise Low-Offset Current-Mode Hall Sensors // Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME). 2013. № 9. P. 325 – 328.