

Моделирование интегральных магнитотранзисторов, формируемых в рамках КМОП-технологии

УДК 621.382:004.94 | ВАК 05.13.18

Ю. Горячкин, к. т. н.¹, А. Однолько²

В современной микроэлектронике широко распространены различные датчики магнитного поля [1]. Их основной элемент – преобразователь магнитного поля. Одни из наиболее известных преобразователей – элементы Холла, которым посвящено много работ, в том числе и авторов данной статьи [2–4]. Однако самыми перспективными считаются магнитотранзисторы – приборы, обладающие высокой чувствительностью к магнитному полю [5, 6]. В статье рассматривается моделирование магнитотранзисторов с целью определения значений их параметров, оптимальных для применения в составе магниточувствительных микросхем.

Наибольшее распространение получили биполярные двухколлекторные магнитотранзисторы *n-p-n*-типа. Они могут быть реализованы в стандартных процессах производства интегральных схем, таких как биполярные или КМОП-технологии. В данной работе исследования проводились применительно к КМОП-технологии ХТ018 с проектными нормами 0,18 мкм компании X-FAB.

Параметры слоев, которые могут быть использованы для создания магнитотранзисторов, – поверхностное сопротивление R_s и глубина залегания x_j – даны в табл. 1.

Рассматривались два варианта магнитотранзисторов – с горизонтальным и вертикальным расположением коллекторов. На рис. 1 показаны схематически топология и структуры магнитотранзистора с горизонтальным расположением коллекторов. L и W – соответственно, длина и ширина магнитотранзистора, l_k – длина коллекторов, $l_{кб}$ – расстояние от края магнитотранзистора со стороны базового контакта до коллектора, Э – эмиттер, Б – база, К1 и К2 – коллекторы, DTI – глубокая щелевая окисная изоляция, BOX – слой скрытого окисла.

На рис. 2 схематически представлена топология магнитотранзистора с вертикальным расположением коллекторов.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ МАГНИТОТРАНЗИСТОРОВ

Моделирование проводилось в автоматизированной системе приборно-технологического проектирования (TCAD) компании Synopsys. Для моделирования были разработаны модели трехмерных структур магнитотранзисторов (см. рис. 1, 2). При этом, для упрощения, вокруг контактов к эмиттеру и коллекторам не создавались слои NIMP и вокруг контакта к базе не создавался слой PIMP, поскольку в TCAD можно задать сопротивление контакта (сколь угодно малое). Также не создавались слои DTI и BOX.

На рис. 3а показана часть трехмерной структуры магнитотранзистора с горизонтальным расположением коллекторов со стороны коллектора К1, на рис. 3б – со стороны базы.

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

- сужение ширины запрещенной зоны кремния по мере повышения концентрации легирующей примеси;
- рассеяние носителей заряда на фононах и на ионах примеси;
- рекомбинация Шокли-Рида-Холла с временами жизни неравновесных носителей заряда, зависящими от концентрации легирующей примеси, а также Оже-рекомбинация;
- перенос носителей заряда в магнитных полях.

Подробное описание этих эффектов приведено в [7].

¹ Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, доцент кафедры электроники и нанoeлектроники, yuvgor@mail.ru.

² АО «ПКК Миландр», руководитель отдела проектирования аналоговых схем, odnolko@milandr.ru.

Таблица 1. Параметры слоев для создания магнитотранзисторов

Наименование слоя	Назначение слоя	R_s , Ом/кв.	x_j , мкм
PSUB+PWELL2	Подложка р-типа с карманом р-типа	3 500	3,5
HVPWELL	Низколегированный глубокий карман р-типа	275	3,5
HVNWELL	Низколегированный глубокий карман п-типа	178	3,5
NWELL2	Карман п-типа	1 190*	1,5
PIMP	Высоколегированный р ⁺ -слой	8,6	0,2
NIMP	Высоколегированный п ⁺ -слой	7,9	0,2
STI	Мелкая щелевая окисная изоляция	–	0,4

* Значение поверхностного сопротивления указано под слоем STI.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОТРАНЗИСТОРОВ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ КОЛЛЕКТОРОВ

При моделировании ток базы задавался резистором 500 Ом, подключенным к источнику напряжения. Напряжение источника изменялось от 0 до 5 В. Эмиттер подключен к общему

проводу. Коллекторы подключены через резисторы 10 кОм к источнику напряжения 5 В. Значение магнитной индукции 1000 Гс. Измерялось напряжение между коллекторами.

При моделировании ширина магнитотранзисторов W составляла 150 мкм, длина L – 100 мкм, ширина эмиттера и коллекторов – 3 мкм. Варьировались длина коллекторов l_k и расстояние от края магнитотранзистора со стороны базового контакта до коллектора l_{kb} (см. рис. 1).

На рис. 4 показаны результаты моделирования зависимости разности напряжений между коллекторами $\Delta V_k = V_{k2} - V_{k1}$ от тока базы I_b при различных значениях l_k и l_{kb} для структур магнитотранзисторов с горизонтальным расположением коллекторов. Как видно из графиков на рис. 4, по мере роста базового тока разность напряжений между коллекторами практически линейно увеличивается и, достигнув максимального значения, также практически линейно уменьшается с большей скоростью. При одинаковых значениях l_{kb} по мере увеличения значения l_k значение базового тока, при котором ΔV_k достигает максимума, уменьшается.

Также из графиков видно, что при увеличении l_{kb} от 30 до 50 мкм значение максимальной разности напряжений между

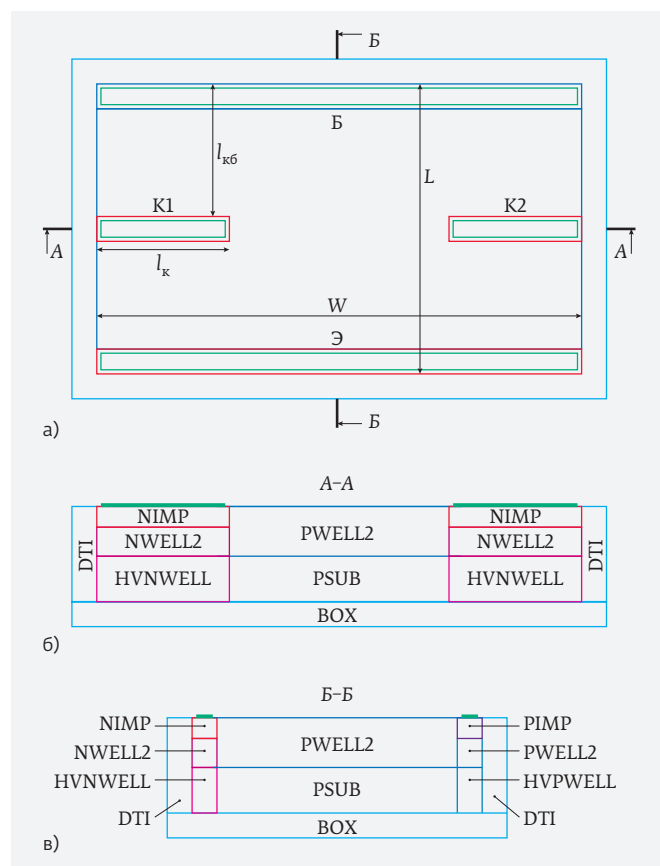


Рис. 1. Топология (а) и структуры в сечениях А-А (б) и Б-Б (в) магнитотранзистора с горизонтальным расположением коллекторов для технологии XT018

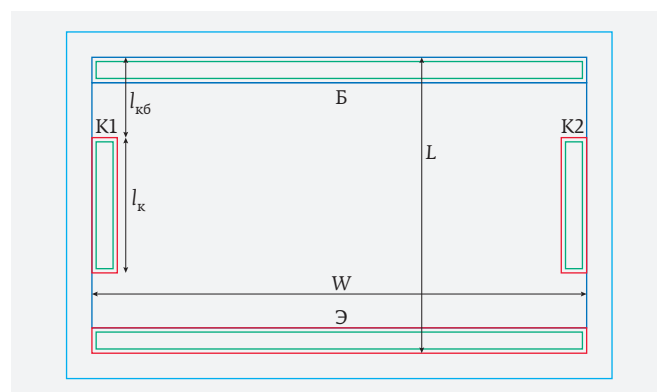


Рис. 2. Топология магнитотранзистора с вертикальным расположением коллекторов для технологии XT018

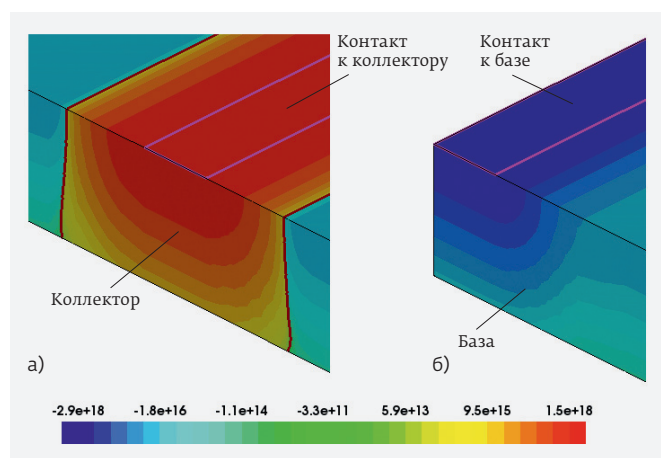


Рис. 3. Часть трехмерной структуры магнитотранзистора с горизонтальным расположением коллекторов со стороны коллектора К1 (а) и со стороны базы (б). Цветовая шкала показывает концентрацию примеси. Синий цвет – области р-типа, красный и желтый – области n-типа

коллекторами уменьшается очень слабо, а при дальнейшем увеличении $l_{кб}$ до 70 мкм – резко снижается. Таким образом, значение $l_{кб}$ не должно превышать 50 мкм, то есть $l_{кб} \leq L/2$.

Затем были промоделированы зависимости ΔV_k от тока базы I_b при различных значениях сопротивления коллекторных резисторов R_k и значениях $l_{кб}=50$ мкм, $l_k=50$ мкм

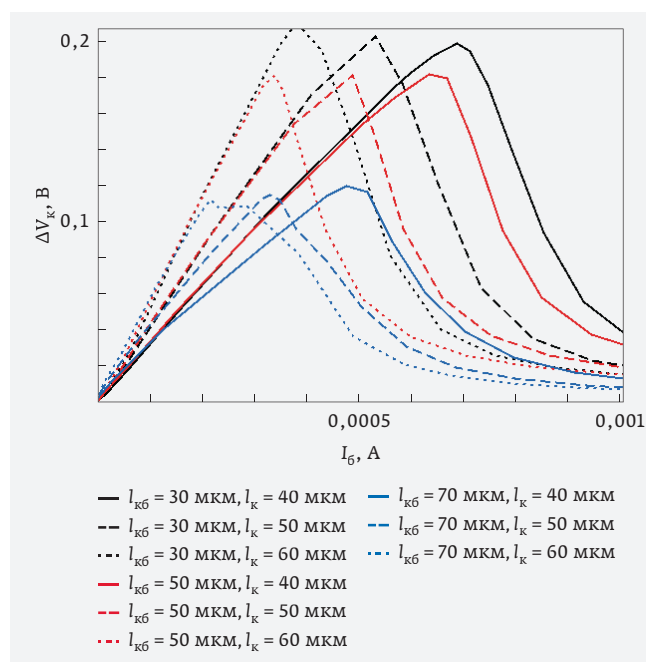


Рис. 4. Зависимости разности напряжений между коллекторами ΔV_k от тока базы I_b при различных значениях l_k и $l_{кб}$ для структур магнитотранзисторов с горизонтальным расположением коллекторов

(рис. 5). Как видно из графиков на рис. 5, при увеличении сопротивления коллекторных резисторов от 5 до 15 кОм максимальное значение ΔV_k снижается от 0,26 до 0,13 В, то есть в два раза. При этом ток базы уменьшается от 1,5 до 0,25 мА, то есть в шесть раз.

Были также получены зависимости токов коллекторов К1 и К2 от тока базы при напряжении на коллекторах 3, 4 и 5 В и значениях $l_{кб}=50$ мкм, $l_k=50$ мкм. Моделирование показало, что зависимости практически одинаковы. На рис. 6 представлены результаты моделирования зависимости токов коллекторов I_k и разности коллекторных токов ΔI_k от тока базы.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОТРАНЗИСТОРОВ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ КОЛЛЕКТОРОВ

Условия моделирования и значения параметров были такие же, как и при моделировании магнитотранзисторов с горизонтальным расположением коллекторов. На рис. 7 показаны результаты моделирования зависимости ΔV_k от тока базы I_b при различных значениях l_k и $l_{кб}$ для структур магнитотранзисторов с вертикальным расположением коллекторов (см. рис. 2). Как видно из графиков на рис. 7, ход зависимостей такой же, как и для магнитотранзисторов с горизонтальным расположением коллекторов (см. рис. 4). И также при одинаковых значениях $l_{кб}$ с увеличением параметра l_k значение базового тока, при котором разность напряжений между коллекторами достигает максимума, уменьшается.

В отличие от магнитотранзисторов с горизонтальным расположением коллекторов, при увеличении l_k от 10 до

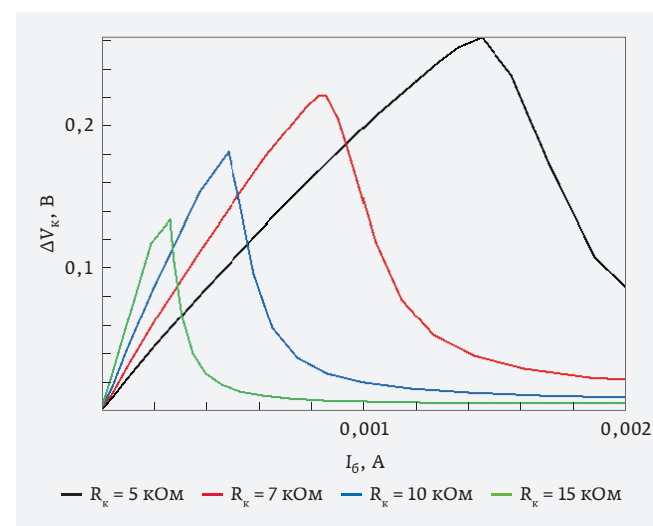


Рис. 5. Зависимости разности напряжений между коллекторами ΔV_k от тока базы I_b при различных значениях сопротивления коллекторных резисторов R_k для структур магнитотранзисторов с горизонтальным расположением коллекторов. $l_{кб}=50$ мкм, $l_k=50$ мкм

70 мкм резко уменьшается максимальная разность напряжений между коллекторами. Таким образом, для получения максимальной ΔV_k длина коллектора l_k должна быть минимальной.

Следует отметить, что для магнитотранзисторов с вертикальным расположением коллекторов значения базовых токов, при которых достигается максимальное значение ΔV_k , в 2–3 раза больше, чем для магнитотранзисторов с горизонтальным расположением коллекторов.

Далее были промоделированы зависимости ΔV_k от тока базы I_b при различных значениях R_k и $l_{кб}=30$ мкм, $l_k=30$ мкм (рис. 8). Как видно из графиков на рис. 8, зависимости аналогичны зависимостям для магнитотранзисторов с горизонтальным расположением коллекторов (см. рис. 5), но значения базовых токов, при которых достигается максимальная ΔV_k , также в 2–3 раза больше.

Кроме того, были получены зависимости токов коллекторов I_{K1} и I_{K2} от тока базы при напряжении на коллекторах 3, 4 и 5 В и значениях $l_{кб}=30$ мкм, $l_k=30$ мкм. Данные зависимости оказались практически одинаковыми. На рис. 9 показаны результаты моделирования зависимости токов коллекторов I_k и разности коллекторных токов ΔI_k от тока базы. Как видно из графиков на рис. 9, зависимости аналогичны зависимостям для магнитотранзисторов с горизонтальным расположением коллекторов (см. рис. 6), но значения базовых токов, при которых достигается аналогичная разность коллекторных токов, также в 2–3 раза больше.

На основании данных моделирования разработаны и будут изготовлены тестовые магнитотранзисторы.

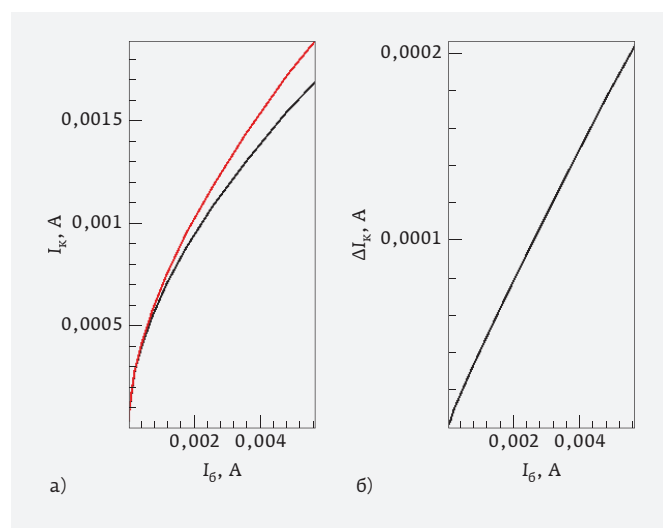


Рис. 6. Зависимости токов коллекторов I_k (а) и разности коллекторных токов ΔI_k (б) от тока базы I_b при значениях $l_{кб}=50$ мкм, $l_k=50$ мкм для структур магнитотранзисторов с горизонтальным расположением коллекторов. Черная кривая соответствует коллектору K1, красная – коллектору K2

СРАВНЕНИЕ МАГНИТОТРАНЗИСТОРОВ С ЭЛЕМЕНТАМИ ХОЛЛА

Как отмечалось выше, авторами были разработаны, промоделированы и исследованы элементы Холла [2–4]. Результаты моделирования были подтверждены последующими измерениями тестовых элементов Холла, изготовленных компанией X-FAB по технологиям XT018, XC06, XT06 и XH035.

В табл. 2 представлены сравнительные данные по чувствительности для элементов Холла и магнитотранзисторов при напряжении 5 В. Видно, что чувствительность магнитотранзисторов в 4–10 раз выше, чем элементов Холла. Также для элементов Холла характерна зависимость чувствительности от напряжения, то есть от протекающего тока. Для магнитотранзисторов, как показали результаты моделирования, такая зависимость отсутствует.

Таким образом, по результатам моделирования магнитотранзисторов можно сделать следующие выводы:

- для магнитотранзисторов с горизонтальным расположением коллекторов в целях получения максимальной разности напряжений между коллекторами максимальное расстояние от края магнитотранзистора со стороны базового контакта до коллектора не должно превышать половины длины магнитотранзистора, то есть $l_{кб} \leq L/2$;
- для магнитотранзисторов с вертикальным расположением коллекторов в целях получения максимальной

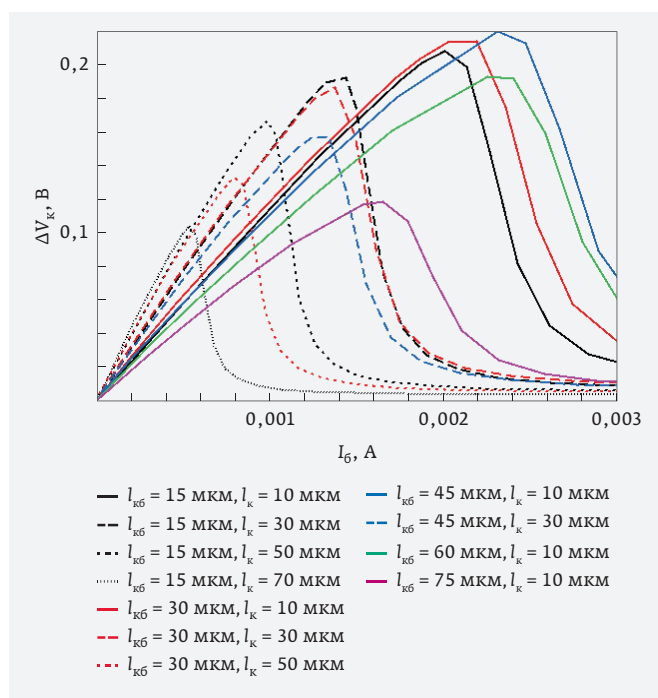


Рис. 7. Зависимости разности напряжений между коллекторами ΔV_k от тока базы I_b при различных значениях l_k и $l_{кб}$ для структур магнитотранзисторов с вертикальным расположением коллекторов

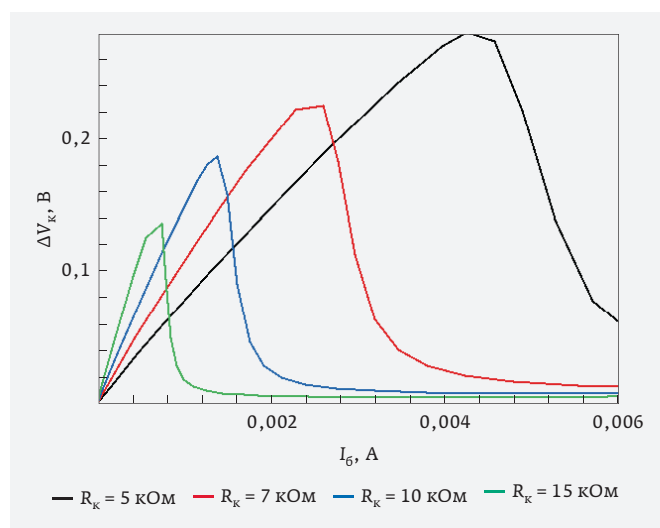
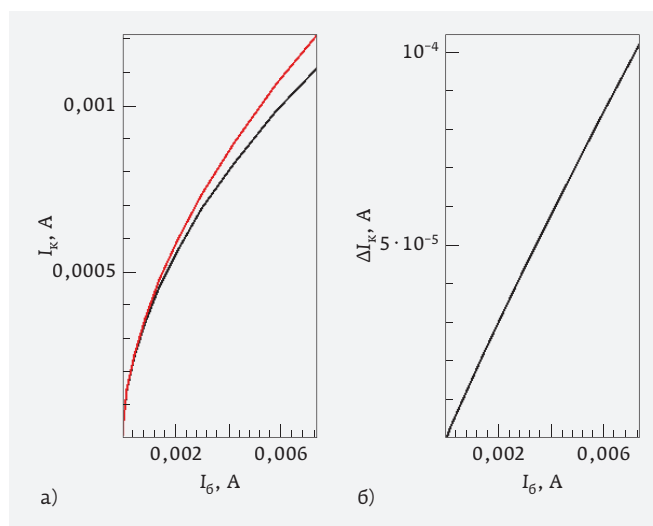
Таблица 2. Чувствительность элементов Холла и магнитотранзисторов

Вид структуры	Технология	Чувствительность, мВ/мТл
Элемент Холла	ХТ018	0,22
	ХС06	0,38
	ХТ06	0,37
	ХН035	0,47
Магнитотранзистор	ХТ018	>2

разности напряжений между коллекторами длина коллектора l_k должна быть минимальной;

- сравнение магнитотранзисторов с горизонтальным и вертикальным расположением коллекторов показывает, что при примерно одинаковой максимальной разности напряжений между коллекторами значения базовых токов, при которых достигается максимальная ΔV_k , для магнитотранзисторов с вертикальным расположением коллекторов в 2–3 раза больше, чем для магнитотранзисторов с горизонтальным расположением коллекторов;
- для магнитотранзисторов можно получить чувствительность в 4–10 раз выше, чем для элементов Холла.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации

**Рис. 8.** Зависимости разности напряжений между коллекторами ΔV_k от тока базы I_b при различных значениях сопротивления коллекторных резисторов R_k для структур магнитотранзисторов с вертикальным расположением коллекторов. $l_{кб} = 30$ мкм, $l_k = 30$ мкм**Рис. 9.** Зависимости токов коллекторов I_k (а) и разности коллекторных токов ΔI_k (б) от тока базы I_b при значениях $l_{кб} = 30$ мкм, $l_k = 30$ мкм для структур магнитотранзисторов с вертикальным расположением коллекторов. Черная кривая соответствует коллектору K1, красная – коллектору K2

(Соглашение № 14.576.21.0026 от 30 июня 2014 года, уникальный идентификатор ПНИ RFMEFI57614X0026).

ЛИТЕРАТУРА

- 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.
- Goryachkin Yu., Odnolko A., Pavlyuk M., Svistunov A. Hall integrated plate research and simulation // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. V. 11. № 7. P. 4288–4294.
- Goryachkin Yu., Odnolko A., Pavlyuk M. Comparative analysis and simulation of integrated Hall elements formed in CMOS-technology // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. V. 11. № 19. P. 11574–11580.
- Goryachkin Yu., Odnolko A., Pavlyuk M., Svistunov A., Demidov D. CMOS integrated Hall elements parameters simulation and real structures behaviors measuring // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. V. 12. № 19. P. 5597–5606.
- Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника. Т. 1. – М.: ДМК Пресс, 2001. 544 с.
- Егизарян Г.А., Стафеев В.И. Магнитодиоды, магнитотранзисторы и их применение. – М.: Радио и связь, 1987. 88 с.
- Горячкин Ю.В., Нестеров С.А., Сурин Б.П. Физико-топологическое моделирование в САПР TCAD. – Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2006. 124 с.