

Уменьшение ТКС резисторов в большей степени достигается конструктивно-технологическими способами при разработке и производстве наборов резисторов. Разброс же температуры резисторов зависит как от конструктивно-технологических особенностей набора, так и совершенства методов измерения. Так, этот разброс может быть связан с воздействием джоулева тепла, неравномерностью нагрева в динамическом электрическом режиме и нестационарными условиями работы. Поэтому при измерениях  $\delta K_d$  при воздействии температуры необходимо уделять особое внимание, в первую очередь, разбросу температур резисторов и системе перемешивания воздуха внутри камеры. Аналогичный анализ можно провести для определения изменения  $\delta K_d$  делителей напряжения в процессе эксплуатации из-за наличия и разброса нестабильности сопротивления резисторов.

Примерами реализации наборов резисторов могут служить тонкопленочные делители напряжения, в которых имеются несколько групп делителей, необязательно соответствующих показанным на рис. 1, но параметры которых нормируются именно так, как это сделано для делителя согласно этому рисунку. Например, набор резисторов НР1-53-1-2 (рис. 2, а) имеет восемь групп делителей, подобно приведенным на рис. 1. В наборе резисторов НР1-53-1-1 (рис. 2, б) имеется четыре группы резисторов по три резистора в каждой, и в каждой группе измерения проводятся как на двух делителях напряжения, аналогичных представленным на рис. 1.

Примером реализации наборов резисторов, которые представляют сложные функциональные схемы, являются

резистивные сетки [1] двоичные, например  $R-2R$  типа НР1-53-2-5 (рис. 3, а), и двоично-десятичные, например  $R-2R-2R-4R$ , типа 302НР4 (рис. 3, б).

Дополнительно необходимо отметить, что нормирование  $\delta K_d$  ( $\delta K_o$ ) тонкопленочных делителей напряжения (схем отношения) проводится для любого рабочего значения входного напряжения в пределах допустимого. Это позволяет получать изделия с более высокими характеристиками, чем при их изготовлении из отдельных резисторов того же класса, поскольку контроль и нормирование электрического сопротивления согласно [6] проводится при мощности не выше 0,1 номинальной, т. е. в отсутствие нагрева от джоулева тепла.

#### Л и т е р а т у р а

1. **Крюков М.** Высокостабильные тонкопленочные чип-резисторы фирмы Rhysompr// Компоненты и технологии. 2003. № 4.
2. **Резисторы:** Справочник / Под ред. И. И. Четверткова, В. М. Терехова. М.: Радио и связь, 1991.
3. **ОСТ В 11 0658—88.** Наборы резисторов. Общие технические условия.
4. **ГОСТ 21414—75.** Резисторы. Термины и определения.
5. **ОСТ 11 072.009—81.** Наборы резисторов. Основные параметры.
6. **ГОСТ 21342.20—78.** Резисторы. Методы измерения сопротивления.

Дата принятия 22.08.2012 г.

621.3.049.77.002

## Исследование влияния схемы включения на характеристики трехколлекторного магнитотранзистора

**В. В. АМЕЛИЧЕВ, Р. Д. ТИХОНОВ, А. А. ЧЕРЕМИСИНОВ**

Научно-производственный комплекс «Технологический центр» МИЭТ, Москва, Россия,  
e-mail: CheremisinovAA@gmail.com

Экспериментально исследованы чувствительность и начальный разбаланс напряжения между коллекторами двухколлекторного латерального биполярного магнитотранзистора npn-типа с базой, сформированной в кармане, который служит третьим коллектором. Показано, что магниточувствительность по напряжению достигает 11 В/Тл в схеме с общим смещением базы и кармана, при этом можно получить начальный разбаланс напряжения между коллекторами менее 1 мВ.

**Ключевые слова:** биполярный магнитотранзистор, начальный разбаланс, магниточувствительность.

The sensitivity and the initial offset of voltage between collectors of double-collector lateral bipolar npn-type magnetotransistor with the base formed in pocket serving as the third collector are investigated experimentally. It is shown that the voltage magnetosensitivity is 11 V/T in the circuit with the total drift of the base and pocket and the initial offset of the voltage between collectors could be reduced to less than 1 mV.

**Key words:** bipolar magnetotransistor, initial offset, magnetosensitivity.

Наиболее подробно исследованным вариантом биполярного магнитотранзистора (БМТ) является латеральный магнитотранзистор в кармане и с поверхностным охранным кольцом, который назван в [1] магнитотранзистором с по-

давлением боковой инжекции SSIMT (Suppressed Sidewall Injection MagnetoTransistor) и механизмом чувствительности, определяемым двойным отклонением носителей заряда. Полное описание характеристик SSIMT дано в [2]. Введе-

ние дополнительных  $p^+$ -областей, располагающихся на поверхности кремния под толстым слоем оксида и разделяющих эмиттер и рабочие коллекторы, повышает относительную чувствительность транзистора по току с 0,7 до 99 %, т. е. в 140 раз [3]. Основное назначение высоколегированных  $p^+$ -слоев заключается в ограничении боковой инжекции эмиттера за счет встроенного электрического поля на боковой поверхности перехода эмиттер—база, уменьшающего поток электронов вдоль поверхности и поверхностную рекомбинацию. Подлегирование поверхности кармана перед выращиванием толстого слоя локального оксида в БМТ с самосовмещением электродных областей рассмотрено в [4].

Поверхностную рекомбинацию также можно уменьшить при выращивании на поверхности кремния высококачественного оксида с применением хлора, который обычно используют для подзатворного диэлектрика в КМОП-технологии.

Получены двухколлекторные латеральные БМТ с базой в кармане [5] и экстрагирующим третьим  $pn$ -переходом база—карман (подложка) — трехколлекторные биполярные магнитотранзисторы ЗКБМТБК [6]. На рис. 1 показаны структура ЗКБМТБК, распределение тока инжектированных электронов, полученное по результатам приборно-технологического моделирования при напряжении на коллекторах  $U_{K1} = U_{K2} = 1,5$  В, напряжении смещения  $U_{БЭ} = U_{КарП} = 0,8$  В и потенциале подложки, равном потенциалу эмиттера в магнитном поле с индукцией  $B = 1$  Тл.

Основные размеры магнитотранзисторов: расстояние между эмиттером и коллекторами  $L_{ЭК} = 50$  мкм, длина электродов эмиттера, коллекторов и контактов базы  $W = 280$  мкм, ширина эмиттера  $D_{Э} = 4$  мкм. Контакт базы располагается между эмиттером и коллекторами. Размеры элементов и технологию их формирования с целью уменьшения разбаланса выбирали в соответствии с ранее полученными результатами [7].

Технология изготовления приборов предусматривает формирование жесткой маски и ионное легирование всех электродов сквозь одну маску, что предполагает самосовмещение электродов. Поверхность базовой области образцов ЗКБМТБК покрыта тонким слоем оксида кремния, выращенным с применением хлора, и толстым слоем оксида кремния, осаждаемого на тонкий слой методом разложения тетраэтаксисилана.

В [8] было показано, что в планарной конструкции магнитодиодов целесообразно увеличивать скорость поверхностной рекомбинации носителей заряда на стороне пластины, противоположной расположению контактов. В этом случае при определенной полярности магнитной индукции инжектированные носители отклоняются к поверхности с контактами, что приводит к двум эффектам: сокращению траектории движения носителей между контактами и увеличению их времени жизни. Оба эффекта уменьшают сопротивление диода.

В интегральном сенсоре магнитного поля — магнитодиоде на основе магнитоконцентрационного эффекта — обратносмещенный  $pn$ -переход, экстрагирующий неосновные носители заряда, используется вместо поверхности с высокой скоростью рекомбинации [9]. В ЗКБМТБК экстракция инжектированных из эмиттера электронов  $pn$ -переходом база — карман (подложка) с обратной стороны относительно поверхности кристалла является альтернативой магнитотранзистору SSIMT с поверхностной рекомбинацией на лицевой стороне.

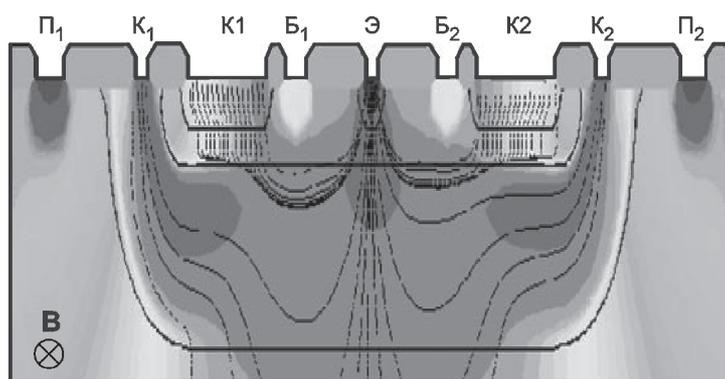


Рис. 1. Структура ЗКБМТБК с распределением потоков электронов и линий тока измерительных коллекторов:

Э — эмиттер;  $K1, K2$  — коллекторы;  $B_1, B_2, K_1, K_2, П_1, П_2$  — контакты кармана базы подложки;  $B$  — вектор магнитного поля

Распределение тока инжектированных электронов в структуре ЗКБМТБК показано на рис. 1. Основная часть электронов уходит через базу в карман и только незначительная часть вдоль слабо легированных областей около  $pn$ -перехода база—карман достигает коллекторов, где происходит их экстракция встроенным электрическим полем коллекторного перехода; в магнитном поле линии тока около перехода изменяются: с одной стороны от эмиттера укорачиваются, а с другой — удлиняются. Соответственно, сила тока одного коллектора увеличивается, а другого уменьшается, что определяет чувствительность. Напряжение на переходе база—карман определяет положение линий тока, поэтому при изменении напряжения и тока смещения кармана относительно базы и разности напряжений на базе и кармане изменяются разбаланс напряжений на коллекто-

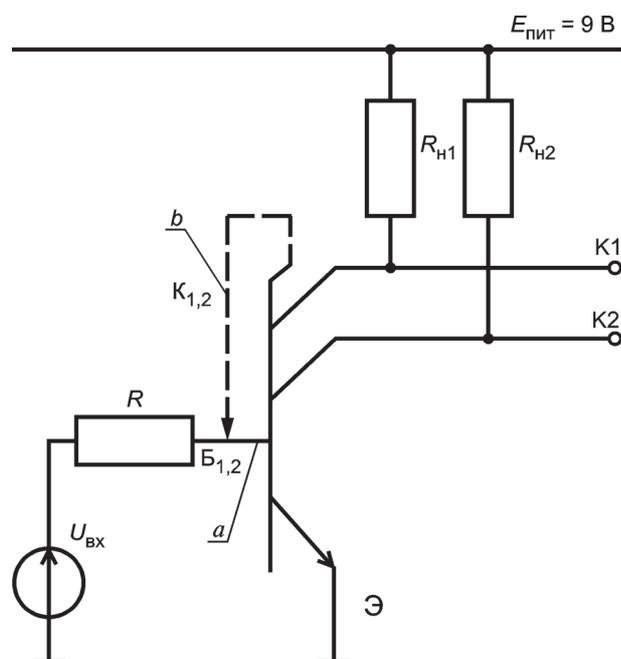


Рис. 2. Схемы включения БМТ при  $R_{K1} = R_{K2} = 267,4$  кОм:  
а — со смещением в цепи базы  $R_B = 27,32$  кОм; б — с общей базой и карманом  $R_B + R_{Кар} = 1,2782$  кОм

рах и чувствительность транзистора. На *pn*-переходе база—карман возникает эффект магнитоконцентрационного смещения [10].

Параметры изготовленных магнитотранзисторов ЗКБМТБК измеряли в разных схемах включения, показанных на рис. 2 (*a* и *b*). Чувствительность измеряли в постоянном магнитном поле соленоида с магнитной индукцией  $B = 5$  мТл. Дифференциальную абсолютную чувствительность по напряжению определяли по формуле

$$S_{\text{диф}} = [U_{K2}(B) - U_{K2}(0) - U_{K1}(B) + U_{K1}(0)]/B.$$

При напряжении питания  $E_{\text{пит}} = 9$  В измеряли разность напряжений на коллекторах сначала без магнитного поля  $U_{K2}(0) - U_{K1}(0)$ , т. е. начальный разбаланс, а потом в магнитном поле  $U_{K2}(B) - U_{K1}(B)$  при выбранных напряжении и токе смещения в базе  $I_B$  и кармане  $I_{\text{Кар}}$ . В табл. 1 приведены результаты измерений в разных схемах включения магнитотранзистора ЗКБМТБК, усредненные по 18 образцам.

Таблица 1

Параметры ЗКБМТБК в схемах, обозначенных *a* и *b* на рис. 2

Схема включения БМТ	$U_{K2}$ , В	$U_{K2} - U_{K1}$ , мВ	$S_{\text{диф}}$ , В/Тл
<i>a</i>	0,976	-0,84	0,134
<i>b</i>	1,45	-50,5	10,9

Было установлено, что при подаче напряжения смещения на базу  $U_B$  (рис. 2, схема *a*) средние значения разбаланса  $-0,84$  мВ, чувствительности  $0,134$  В/Тл при напряжении на коллекторах вблизи 1 В (см. табл.1). При подключении напряжения смещения на базу и подложку (карман)  $U_{\text{БП}}$  (рис. 2, схема *b*) средние значения разбаланса  $-50,5$  мВ, чувствительности  $10,9$  В/Тл при напряжении на коллекторах вблизи 1,45 В. В схеме с общим потенциалом на базе и кармане (подложке) чувствительность увеличивается в 81 раз, а разбаланс в 60 раз.

Чувствительность разных образцов тесно связана с током смещения базы или базы вместе с карманом, что свидетельствует о хорошей воспроизводимости. Чувствитель-

ность по напряжению в схеме *b* рис. 2 достигает  $11$  В/Тл (рис. 3).

При изменении тока базы разбаланс изменяется как по модулю, так и по знаку. Начальный разбаланс напряжений коллекторов имеет отрицательный знак и незначительно отличается для разных образцов при задании тока базы и оказывается меньше, чем для общего тока базы с карманом. Начальный разбаланс напряжений коллекторов сильно отличается для разных образцов в зависимости от тока базы, соединенной с карманом. Например, для образца № 6 разбаланс большой и положительный, для образца № 1 большой и отрицательный, для образца № 11 небольшой и его знак изменяется с положительного на отрицательный. При разных вариантах задания тока базы разбаланс отличается, т. е. не является характерным для данной структуры, а зависит от режима. Поскольку в рабочем диапазоне при равных сопротивлениях нагрузки коллекторов их токи одинаковые, а разбаланс разный и изменяется в противоположных направлениях в зависимости от токов базы и эмиттера, причиной разбаланса является увеличение тока эмиттера с ростом тока базы, соединенной с карманом (подложкой), с  $80$  мкА до  $8$  мА.

Для объяснения наблюдаемых особенностей можно предположить, что неоднородность в области объемного заряда одного из коллекторов приводит к положительному или отрицательному разбалансу, а на двух коллекторах сразу — к их взаимной компенсации. В [2] отмечено, что неточное совмещение металлического контакта с  $n^+$  диффузионной областью эмиттера экспериментально идентифицировано как доминирующая причина разбаланса. Ее влияние можно уменьшить при большой длине диффузионной области эмиттера с хорошими металлическими контактами, удаленными от коллекторов и базовых контактов.

Разбаланс сильно зависит от токов смещения при раздельном их задании для базы и подложки (кармана). Отношение чувствительности к начальному разбалансу показывает, что полезный сигнал достигает максимума при малом токе смещения, что позволяет использовать ЗКБМТБК в магнитных полях порядка  $1-10$  мТл.

Исследование чувствительности при переменных значениях токов базы и кармана проведено в схеме с включением отдельного источника для смещения базы. Как показано в табл. 2, для заданного тока базы необходимо выбирать соответствующий ток кармана, чтобы получить высокую чувствительность. Чувствительность максимальна при напряжении на кармане, близком к напряжению смещения базы, т. е. в ней нет смещения перехода база—подложка (карман). Схема с общим потенциалом на базе и кармане (подложке) является безусловно наилучшей.

Для каждого тока смещения базы существует ток смещения кармана, обеспечивающий максимальную чувствительность, при этом разбаланс также максимальный. При максимальной чувствительности ток кармана в 10 раз больше тока базы. Отношение чувствительности к разбалансу оказывается наибольшим при малых токах базы и кармана. Выбором схемы включения магнитотранзистора можно получить максимальное значение чувствительности или оптимизировать отношение чувствительности к разбалансу.

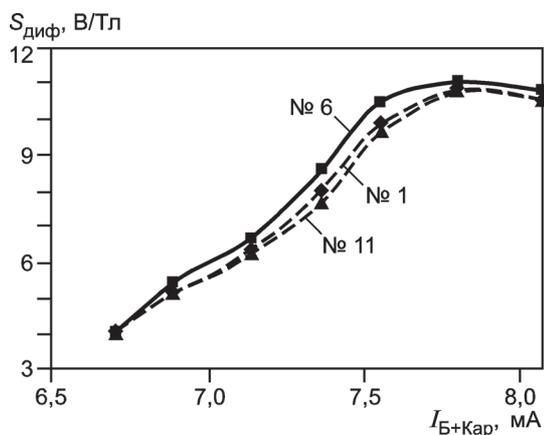


Рис. 3. Зависимости дифференциальной абсолютной чувствительности по напряжению образцов ЗКБМТБК № 1, 6, 11 от тока смещения базы и подложки (кармана) ( $I_{\text{Б+Кар}}$ ) при подключении напряжения смещения на базу и подложку (карман)  $U_{\text{БП}}$

Таблица 2

Характеристики ЗКБМТБК в схеме с отдельным заданием токов смещения базы и кармана

$U_{вх1}, В$	$U_{вх2}, В$	$I_B, мА$	$I_{кар}, мА$	$U_{к1, к2}, В$	$U_{к2(0)} - U_{к1(0)}, В$	$U_{к2(B)} - U_{к1(B)}, мВ$	$S, В/Тл$
0	1,6	0,66	0	0,058	-0,27	-0,28	0,00203
4,4	1,6	0,632	6,7	2,575	-69,37	-94,4	5,08109
4,1	1,6	0,625	6,28	1,609	-93,82	-122,67	5,85655
3,9	1,6	0,622	6,1	0,707	-100	-128	5,684
5,1	1,6	0,635	7,81	4,489	-16,01	-24,17	1,65648
9,0	2,7	1,344	13,96	2,904	-223	-265	8,526
9,6	2,7	1,348	14,73	3,373	-129	-160	6,293
8,7	2,7	1,34	13,57	1,144	-267	-315	9,744
8,4	2,7	1,337	13,13	0,363	-100	-116	3,248
13,5	3,7	2,2	21,1	1,879	-42	-47	1,015
13,6	3,7	2,2	21,3	2,54	-145	-163	3,654
13,8	3,7	2,2	21,5	2,736	-511	-562	10,353

Работа выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования «Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники» на базе Научно-производственного комплекса «Технологический комплекс» в рамках Федеральной целевой программы «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники на 2008 — 2015 годы».

Литература

1. Ristic L. J. e. a. Suppressed sidewall injection magnetotransistor with focused emitter injection and carrier double deflection // IEEE Electron Devices Lett. 1987. V.EDL-8. N 9. P. 395—397.

2. Metz M. Offset in CMOS Magnetotransistors, Analysis and Reduction: Diss. Zurich, 1999.

3. Uk-Song, Seung-Ki Lee, Min-Koo Han. Highly sensitive magnetotransistor with combined phenomena of Hall effect and emitter injection modulation operated in the saturation mode // Sensors and Actuators. 1996. V. A54. P. 641—645.

4. Амеличев В. В. и др. Моделирование биполярного двухколлекторного магнитотранзистора и определение режима термокомпенсации изменения чувствительности // Датчики и системы. 1999. № 6. С. 38—42.

5. Tikhonov R. D. Sensor on bipolar magnetotransistor with base in well // Solid State Electronics. 2005. V. 49/8. P. 1302—1308.

6. Козлов А. В. и др. Исследование механизмов преобразования и относительной магниточувствительности трехколлекторного биполярного магниточувствительного транзистора // Микроэлектроника. 2003. Т. 32. № 3. С. 219—225.

7. Тихонов Р. Д., Козлов А. В., Поломошнов С. А. Разбаланс потенциалов двухколлекторного латерального биполярного магнитотранзистора // Измерительная техника. 2008. № 8. С. 57—61. Tikhonov R. D., Kozlov A. V., Polomoshnov S. A. Imbalance of the potentials of a dual-collector lateral bipolar magnetotransistor // Measurement Techniques. 2008. V. 51. N 8. P. 896—902.

8. Викулин И. М., Викулина И. Ф., Стафеев В. И. Гальваномагнитные приборы. М.: Радио и связь, 1983.

9. Popovic R. S., Baltas H. P., Rudolf F. An integrated silicon magnetic field sensor using the magnetodiode principle // IEEE Trans. Electron Devices. 1984. V.ED-31. P. 286—291.

10. Тихонов Р. Д. Магнитоконцентрационный эффект на *pn*-переходе база—подложка биполярного магнитотранзистора // Измерительная техника. 2009. № 12. С. 41—45; Tikhonov R. D. The magnetoconcentration effect in the base-substrate *pn*-junction of a bipolar magnetotransistor // Measurement Techniques. 2009. V. 52. N 12. P. 1344—1350.

Дата принятия 01.10.2012 г.

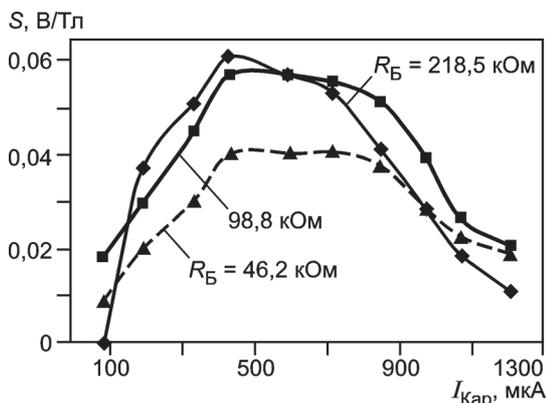


Рис. 4. Зависимости начального разбаланса напряжения на коллекторах от токов базы и кармана ЗКБМТБК в схеме с подачей смещения на карман, а на базу — через сопротивления  $R_B$  к коллекторам

С целью определения возможности снижения разбаланса напряжения коллекторов исследовали схему с подачей смещения на карман и подключением базы через резисторы сопротивлениями 219; 100; 46 кОм на коллекторы. При этом БМТ имеет низкую чувствительность по напряжению 0,05 В/Тл, т. е. она равна средней чувствительности в схеме без подключения кармана. Разбаланс при уменьшении сопротивления базы снижается с 4 до 0,1 мВ (рис. 4).

Таким образом, исследования показывают, что магнитотранзистор ЗКБМТБК с малой скоростью поверхностной рекомбинации на границе раздела кремний—диоксид кремния и с использованием вместо поверхностной рекомбинации экстракции инжектированных электронов удаленным от поверхности *pn*-переходом база — карман (подложка) позволяет получить высокую чувствительность в схеме с общим смещением базы и кармана и пониженный разбаланс напряжения коллекторов в схеме смещения базы от коллектора. Воспроизводимость и стабильность чувствительности магнитотранзистора ЗКБМТБК повышается по сравнению с транзисторами SSIMT.