

УДК 621.3.049.77.002

Физико-технические характеристики двухколлекторного магнитотранзистора

Р. Д. Тихонов

НПК "Технологический центр" МИЭТ, Москва, Россия

Приведены результаты исследования экспериментальных образцов биполярного магнитотранзистора с базой в кармане (БМТБК). Установлена связь разбаланса выходных характеристик и дифференциальной чувствительности с отрицательным сопротивлением входных характеристик БМТБК. С помощью приборно-технологического моделирования определены физические эффекты, характеризующие особенности БМТБК.

Введение

Начальные токи коллекторов I_{C1} , I_{C2} двухколлекторного латерального БМТБК определяют начальный разбаланс напряжения на коллекторах $U_{C1}(0) - U_{C2}(0)$ при измерении дифференциальной абсолютной чувствительности по напряжению S_{DA}^V , т. е. при определении изменения разности напряжения между коллекторами в магнитном поле $U_{C1}(B) - U_{C2}(B)$.

$$S_{DA}^V = \{ [U_{C1}(B) - U_{C2}(B)] - [U_{C1}(0) - U_{C2}(0)] \} / B. \quad (1)$$

Поэтому на образцах БМТБК, приведенных в работах [1—4], в целях исключения разбаланса так же, как и в [5], контролировались токи двух коллекторов в заданном режиме при напряжении 1,5 В и токе базы 3 мА, и по результатам измерения отбирались кристаллы с минимальным разбросом токов коллекторов.

Несмотря на отбор, относительная величина токов коллекторов изменяется в зависимости от режима работы БМТБК. Зависимость от входного тока базы—кармана I_{BW} разности токов двух коллекторов $(I_{C1} - I_{C2})/I_{C1}$, отнесенной к величине тока коллектора, приведенная на рис. 1, показывает, что разбаланс достигает $\pm 8\%$, а при токе $I_{BW} = 2,6$ мА равен нулю. Значит, можно выбрать режим работы БМТБК без разбаланса. С другой стороны, зависимость разбаланса от режима и его двузначность указывают на то, что разбаланс связан не только с начальной асимметрией прибора, но и с механизмом его работы, создающим этот разбаланс.

Определению факторов, приводящих к асимметрии биполярного магнитотранзистора (БМТ), посвящены экспериментальные и аналитические исследования в работах [6—12]. Показано, что факторы отклонения размеров элементов, концентрации примеси в кремнии и в контактах, влияние неоднородности окисла на поверхности кремния

дают разбаланс токов коллекторов не более 2 % от напряжения коллектора. Следовательно, большая величина разбаланса связана, очевидно, с какими-то другими факторами, определяющими работу БМТ.

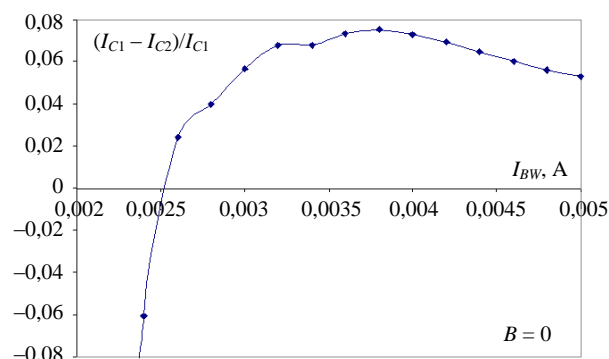


Рис. 1. График зависимости относительного разбаланса токов коллекторов БМТБК от входного тока базы—кармана

Экспериментальная часть

В данной работе исследуется связь разбаланса выходных характеристик с особенностями входных характеристик БМТБК, структура которого приведена на рис. 2. В центре прибора в диффузионной области базового слоя располагается эмиттер, далее от центра имеются два контакта к базе, еще далее размещены измерительные коллекторы, контакты к карману и подложке. Область базы находится в диффузионном кармане, сформированном в подложке. Дополнительное легирование обеспечивает получение омических контактов к базе, к карману и подложке.

Исследуемые образцы БМТБК, обозначенные 2a16, в16, 32-1, изготовлены на одной пластине и отличаются только указанным на рис. 2 расстоянием L_{BE} между эмиттером и контактом к базе: 2a16 — $L_{BE} = 2$ мкм; в16 — $L_{BE} = 17$ мкм; 32-1 — $L_{BE} = 32$ мкм. Измерения БМТБК проводили по схеме, представленной на рис. 3, а, при напряжении питания $E_{feed} = 9$ В, нагрузочных сопротивле-

ниях в коллекторах $R_{C1} = R_{C2} = 546$ кОм, магнитной индукции $B = 5$ мТл, создаваемой в соленоиде. Ток I_{BW} в объединенные контакты к базе и к карману задавался от другого источника питания.

Увеличение расстояния L_{BE} приводит к увеличению сопротивления пассивной базы латерального транзистора, но при этом также происходит удлинение базы последнего, т. е. увеличение расстояния между эмиттером и коллектором. Соответственно этому изменяются характеристики БМТБК.

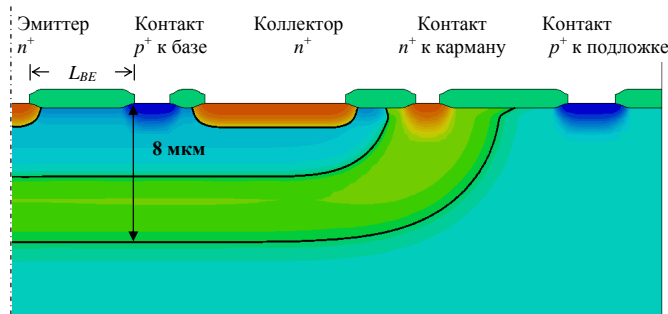


Рис. 2. Структура и распределение примеси в структуре БМТБК

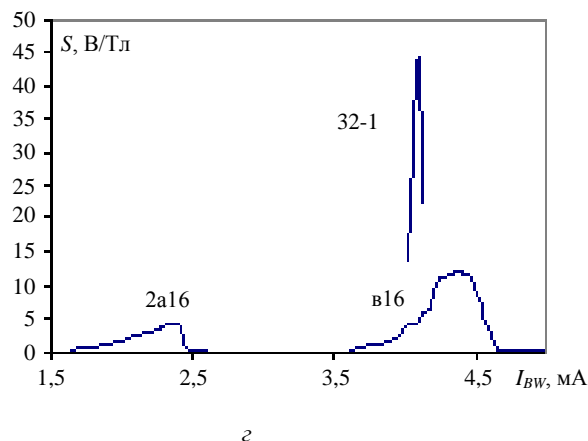
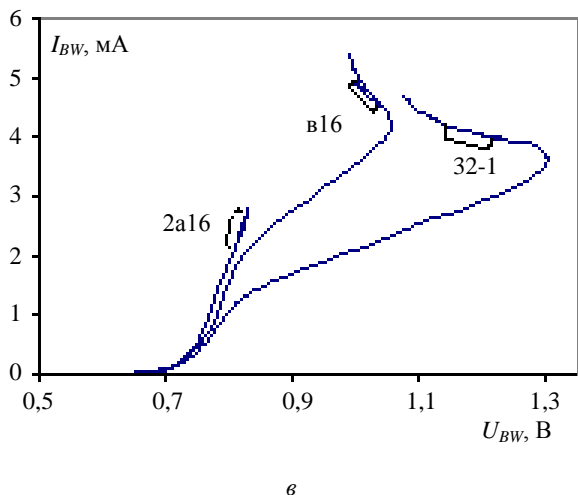
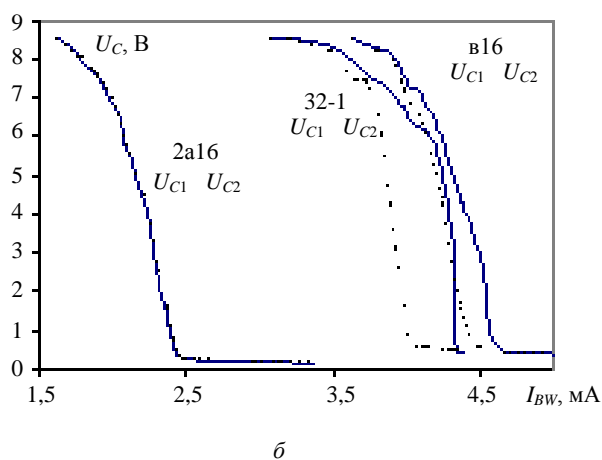
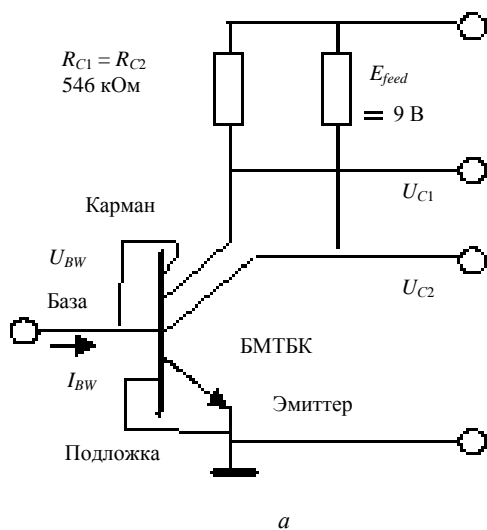


Рис. 3. Измерение характеристик БМТБК:

a — электрическая схема измерения дифференциальной абсолютной чувствительности и входных характеристик БМТБК; *б* — зависимость напряжения коллекторов U_{C1} , U_{C2} от тока базы—кармана I_{BW} для образцов БМТБК с разным расстоянием L_{BE} между эмиттером и контактом к базе 2a16, 32-1, v16; *в* — входные вольтамперные характеристики $I_{BW}(U_{BW})$ БМТБК с разным расстоянием от эмиттера до контакта к базе L_{BE} ; *з* — зависимость абсолютной дифференциальной чувствительности по напряжению $S_{DA}^V = [U_{C1}(B) - U_{C2}(B) - U_{C1}(0) + U_{C2}(0)] / B$ от тока базы—кармана I_{BW} при магнитной индукции $B = 5$ мТл для БМТБК с разным расстоянием от эмиттера до контакта к базе L_{BE}

Увеличение L_{BE} приводит к увеличению тока эмиттера и практически равного ему тока базы—кармана I_{BW} , необходимого для появления при выбранной величине нагрузочного сопротивления в коллекторах, достаточного для переключения транзистора из закрытого состояния в режим насыщения тока коллектора, который определяется как порог срабатывания БМТБК.

На рис. 3, б показаны зависимости напряжения коллекторов U_{C1} , U_{C2} от тока базы—кармана I_{BW} для образцов БМТБК с разным расстоянием между эмиттером и контактом к базе. Начало участка переключения напряжения коллектора, которое можно принять за порог срабатывания по току базы—кармана I_{BW} , составляет для 2a16 — 1,7 мА, в16 — 4 мА, 32-1 — 3,6 мА.

Разбаланс напряжений на коллекторах $U_{C1}-U_{C2}$ доходит до 2a16 — 0,35 В; в16 — 2,88 В; 32-1 — 5,73 В, т. е. увеличивается при увеличении L_{BE} .

Интересным фактом является то, что при большом разбалансе в образце 32-1 наблюдается скачкообразное изменение знака разбаланса, т. е. в одних случаях $U_{C1} > U_{C2}$, а в других — $U_{C1} < U_{C2}$. Это соответствует тому, что инжектированный из эмиттера поток электронов самопроизвольно перераспределяется между двумя коллекторами без учета асимметрии геометрии прибора. Видимо, самопроизвольное перераспределение потоков инжектированных носителей заряда проявляется также в постоянном плавании напряжения на коллекторах.

Дифференциальная абсолютная чувствительность S_{DA}^V исследуемых образцов, как это видно на рис. 3, г, наблюдается в области переключения БМТБК, и увеличение расстояния между эмиттером и контактом к базе при расположении коллектора на расстоянии 3 мкм за контактом к базе по отношению к эмиттеру приводит к увеличению чувствительности. Причем максимумы чувствительности 4, 12 и 49 В/Тл совпадают с максимумом разбаланса напряжения коллекторов при токах база—карман 2,3; 4,3; 4,1 мА, соответственно, для образцов 2a16, в16, 32-1.

На рис. 3, в показаны входные вольт-амперные характеристики (ВАХ) $I_{BW}(U_{BW})$ этих образцов БМТБК. Входные ВАХ БМТБК имеют при малом токе обычный для диодов эмиттер—база вид экспоненциального роста, что более наглядно видно в логарифмическом масштабе. Начиная с некоторой величины происходит ограничение тока сопротивлением базы, причем при увеличении длины базы L_{BE} ограничение наступает при меньших значениях тока, так как сопротивление базы растет. Дальнейшее увеличение тока эмиттера приводит к уменьшению сопротивления базы инжектированными электронами. Наблюдается участок отрица-

тельного сопротивления, особенно заметный при значениях $L_{BE} = 17$ и 32 мкм.

Ток базы—кармана, при котором происходит переключение коллектора из закрытого состояния в режим насыщения, т. е. рабочая область, в которой БМТБК обнаруживает чувствительность к магнитному полю, отмечена скобкой на рисунке [] и находится на участке отрицательного дифференциального сопротивления входной ВАХ.

Ток базы—кармана в области рабочего режима в 1000 раз больше тока коллектора. На ток база—карман в магнитном поле действует сила Лоренца, и, соответственно, происходит отклонение этого тока в сторону коллекторов. Даже небольшая составляющая тока база—карман, отклоненная к коллектору, является значительной по сравнению с малым током коллекторов, что приводит к большому изменению тока последних и определяет высокую чувствительность [13—17]. Кроме того, инжектированные в базу носители заряда под действием магнитного поля прижимаются к поверхности с одной стороны от эмиттера и удаляются от поверхности с другой стороны. Распределение примеси в диффузионном слое базы имеет максимум на поверхности, поэтому с одной стороны увеличивается рекомбинация, а с другой — уменьшается, что также вносит вклад в повышение дифференциальной чувствительности [3].

Аналогичные приведенным входным характеристикам биполярного магнитотранзистора наблюдались вольт-амперные характеристики магнитодиода [13], изготовленного по КМОП-технологии в диффузионном кармане. Вместо обычно принятой для магнитодиодов высокой скорости рекомбинации на поверхности использована экстракция носителей переходом карман—подложка. Наблюдаются следующие особенности.

Большая часть тока эмиттера уходит через переход карман—подложка, который служит коллектором, а небольшой ток базы изменяется в магнитном поле как в обычных магнитодиодах. При достаточно большом токе (10 мА) наблюдаются срыв характеристик и начало участка отрицательного дифференциального сопротивления. В точке срыва максимальная чувствительность достигает величины 25 В/Тл. Возникновение отрицательного сопротивления объясняется биполярной инъекцией носителей двух знаков в базовую область длинного диода из эмиттера и сильнолегированного контакта к базе, которые заливают область базы и сильно уменьшают ее сопротивление.

В работах [14, 15] диод с длинной базой рассматривается как рпн-диод и при этом учитываются двойная инжекция носителей заряда, нейтрализация заряда инжектированных носителей и образование электронно-дырочной плазмы. В магнитном поле возникает градиент концентрации носителей и различие скорости рекомбинации на

границах. Действие магнитодиода основано на сочетании двойной инжекции и магнитоконцентрационного эффекта. Рекомбинация на поверхности диода оказывает существенное влияние на величину тока и чувствительность. Для усиления эффекта поверхности специально обрабатываются или используются слои кремния на сапфире [16] с высокой скоростью рекомбинации на границе кремний–сапфир.

В [17] магнитодиод рассматривается как диод с длинной слаболегированной базой (диод В. И. Стафеева), сопротивление которой уменьшается за счет одного типа носителей заряда, инжектированных из p - n -перехода. При воздействии магнитного поля сопротивление базы возрастает в результате изменения подвижности, а диффузионной длины и эффективной толщины базы — в результате отклонения траекторий носителей под действием силы Лоренца. Ток через диод изменяется в магнитном поле при заданном напряжении — это называется "магнитодиодным эффектом".

Изменение сопротивления не зависит от направления магнитного поля. При уменьшении сопротивления базы инжектированными носителями уменьшается падение напряжения на базе и увеличивается падение напряжения на p - n -переходе, что приводит к усилению инжекции и дальнейшему уменьшению сопротивления базы. Возникает положительная обратная связь между инжекцией и

модуляцией сопротивления базы, которая приводит к образованию характеристики S -диода с отрицательным сопротивлением.

В работе [17] магнитодиодный эффект — изменение в магнитном поле неравновесной проводимости полупроводниковых структур с большим по сравнению с длиной диффузионного смещения расстоянием от инжектирующего контакта до неактивного — достигался при длине базы d порядка 1 мм и длине диффузионного смещения L_{eff} порядка $(7-9) \cdot 10^{-3}$ см, т. е. при отношении $d/L > 10$.

Магнитодиоды изготавливали на кремнии p -типа проводимости с удельным сопротивлением 20 кОм·см, с концентрацией примеси 10^{12} см $^{-3}$, с временем жизни неосновных носителей заряда $\tau_e = 20-30$ мкс, подвижностью электронов $\mu_e = 1200$ см 2 /(В·с), подвижностью дырок $\mu_h = 400$ см 2 /(В·с), при скорости поверхностной рекомбинации до $2 \cdot 10^3$ см/с.

База БМТБК формируется в результате диффузии легирующей примеси. Распределение примеси и носителей заряда электронов и дырок в сечении базы получено в результате расчета с помощью программ приборно-технологического моделирования ISE TCAD и представлено на рис. 4, а. Концентрация акцепторов в базе около поверхности имеет максимальное значение $N_a = 4 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$, а на переходе база–карман менее 10^{15} см $^{-3}$.

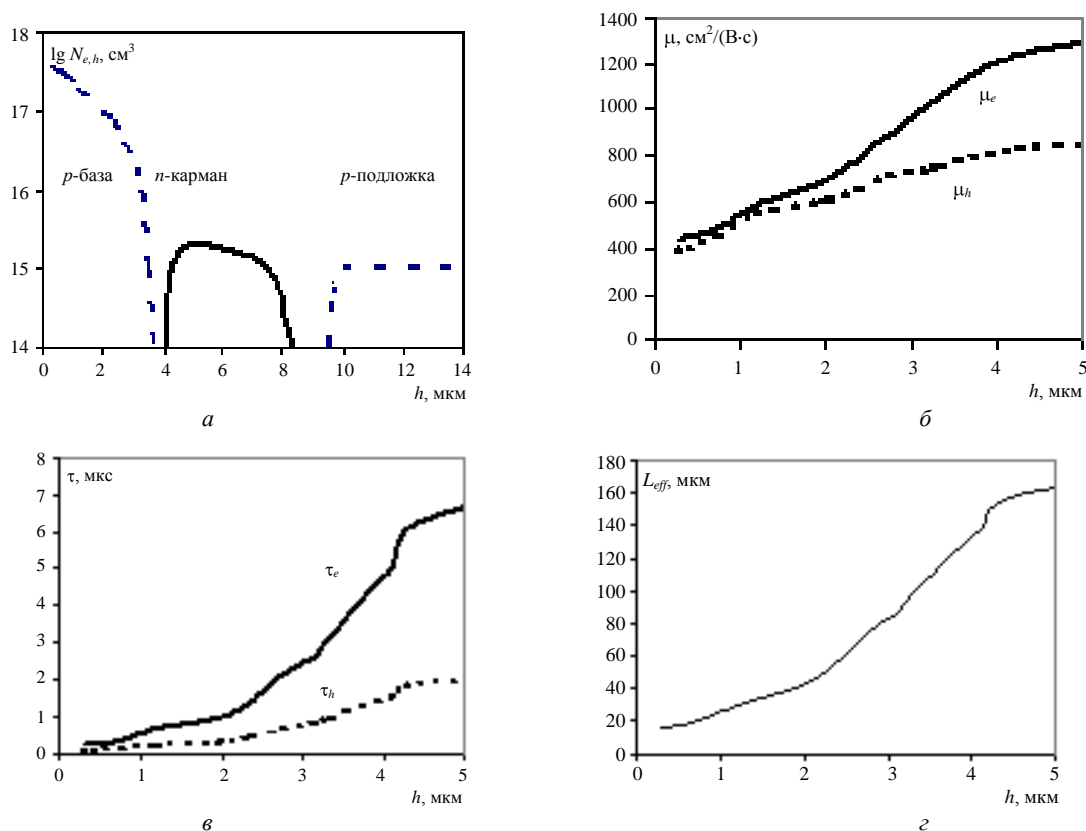


Рис. 4. Приборно-технологическое моделирование структуры БМТБК на расстоянии h (мкм) от поверхности кристалла: а — распределение концентрации электронов $\lg N_e$ и дырок $\lg N_h$; б — распределение подвижности электронов μ_e и дырок μ_h ; в — распределение времени жизни электронов τ_e и дырок τ_h ; г — распределение эффективной длины диффузии электронов L_{eff}

Рассчитанные значения подвижности электронов μ_e и дырок μ_h и их времени жизни τ_e, τ_h даны, соответственно, на рис. 4, б, в. На поверхности подвижность и время жизни имеют минимальные значения, а по мере приближения их к переходу они увеличиваются. На основании этих данных рассчитана эффективная длина диффузионного смещения по формуле

$$L_{\text{eff}} = [2b/(b + 1) (kT/q)\mu_n\tau_n]^{1/2}, \quad (2)$$

где $b = \mu_n/\mu_p$; μ_n — подвижность электронов; μ_p — подвижность дырок; τ_n — время жизни электронов; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; q — заряд электрона.

Полученное распределение диффузионной длины смещения в базе приведено на рис. 4, г. Эффективная длина изменяется от 16 мкм около поверхности до 160 мкм — на переходе база—карман. При длине базы от 2 до 32 мкм инжектированные электроны могут проходить до коллекторов не по кратчайшему пути вдоль поверхности, а вдоль перехода база—карман.

Как показали более ранние расчеты [18], порог срабатывания соответствует началу режима высокого уровня инжекции, когда концентрация инжектированных электронов превышает концентрацию дырок в базе около эмиттера. При этом образуется электронно-дырочная плазма. Неустойчивость плазмы может определять плавание коллекторных токов и перераспределение их разбаланса, хотя это требует более подробных исследований.

Анализ результатов

Из проведенного анализа литературы и полученных экспериментальных результатов следует, что в работе БМТБК важную роль играют процессы модуляции сопротивления базы инжектированными из эмиттера носителями заряда. Эта модуляция сама по себе может приводить к несимметрии прибора, а при воздействии магнитного поля — к возникновению высокой чувствительности из-за положительной обратной связи между модуляцией сопротивления базы длинного диода в результате магнитоцентрационного эффекта и инжекции из p - n -перехода эмиттера.

Сопротивление нагрузки в коллекторах БМТБК выбрано по результатам измерения транзистора 2a16. Из рис. 5 видно, что сопротивление 546 кОм дает максимальное значение чувствительности. Как показано выше, чувствительность определяется изменением под воздействием магнитного поля распределения инжектированных носителей заря-

да — электронов в базе и количеством электронов, доходящих при этом до коллекторов. Уменьшение нагрузки увеличивает рабочий ток коллекторов, и вклад в этот ток отклоняющихся в магнитном поле электронных потоков, инжектированных из эмиттера, уменьшается, что приводит к уменьшению чувствительности.

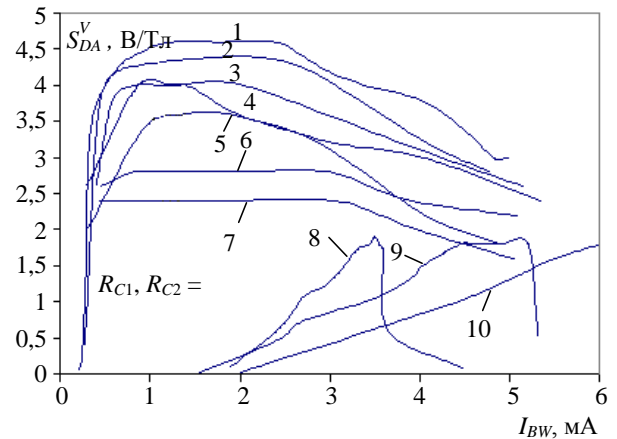


Рис. 5. Зависимость чувствительности по напряжению S_{DA}^V от тока база—карман I_{BW} при сопротивлении нагрузки коллекторов R_C от 4,5 кОм до 2,4 МОм для образца БМТБК 2a16:
1 — 546 кОм; 2 — 1,2 МОм; 3 — 270 кОм; 4 — 2,4 МОм; 5 — 124 кОм; 6 — 62 кОм; 7 — 27 кОм; 8 — 18 кОм; 9 — 9 кОм; 10 — 4,5 кОм

При больших сопротивлениях нагрузки коллектора чувствительность меньше, поскольку при этом мала величина тока базы—кармана, необходимая для получения рабочего режима на коллекторах. В магнитном поле происходит отклонение меньшего числа инжектированных электронов.

Величина рабочих токов коллекторов одинаковая для разных образцов при одинаковой нагрузке, а чувствительность существенно отличается, как показано на рис. 6. Величина тока коллектора не является определяющей для чувствительности. Зависимость чувствительности БМТБК от тока коллектора показывает, что для образцов с разным расстоянием между эмиттером и базовым контактом максимальная чувствительность на образце в16 при одинаковом токе коллектора 7 мкА превышает чувствительность на образце 2a16 в четыре раза, а на образце 2a16 при токе коллектора 15 мкА — в 10 раз меньше чувствительности образца 32-1. Соотношение чувствительности БМТБК коррелирует с расстояниями база—эмиттер 2, 17, 32 мкм, поэтому чувствительность увеличивается пропорционально длине базы.

Абсолютная токовая чувствительность по току при малом сопротивлении нагрузки выше, но удаленный на большее расстояние от эмиттера БМТБК работает при том же токе база—карман с

меньшими токами коллекторов, что дает возможность использовать большое значение нагрузочного сопротивления и получать более высокое значение абсолютной чувствительности по напряжению за счет большого сопротивления нагрузки и более сильного относительного изменения малого тока коллектора.

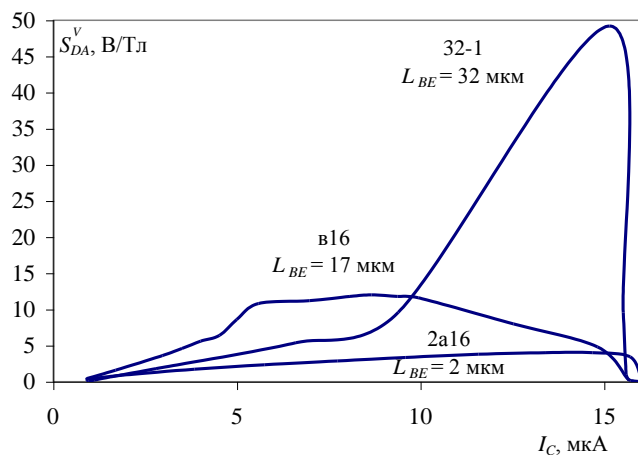


Рис. 6. Зависимость дифференциальной абсолютной чувствительности по напряжению S_{DA}^V от тока коллектора I_C для образцов БМТБК с разной длиной базы

Заключение

Увеличение расстояния между коллектором и эмиттером повышает дифференциальную чувствительность БМТБК. Разбаланс токов коллекторов в большой степени определяется модуляцией сопротивления базы инжектированными носителями заряда. Чувствительность БМТБК тоже связана с модуляцией сопротивления базы инжектированными носителями заряда благодаря эффекту отклонения под действием силы Лоренца инжектированных носителей в базе с переменной концентрацией примеси.

Литература

1. Тихонов Р. Д. Исследование биполярного магнитотранзистора с базой в кармане// Датчики и системы. 2004. № 12. С. 42—46.

2. Козлов А. В., Тихонов Р. Д. Биполярный магнитотранзистор с базой в кармане// Измерительная техника. 2004. № 9. С. 53—56.

3. Тихонов Р. Д. Исследование механизмов чувствительности биполярного магнитотранзистора с базой в кармане// Микроэлектроника. 2005. Т. 34. № 3. С. 111—124.

4. Tikhonov R. D. Sensor on Bipolar Magnetotransistor with Base in Well// Solid State Electronics. 2005. V. 49/8. P. 1302—1308.

5. Ristic Lj., Smy T., Baltas H. P. A magnetotransistor structure with offset elimination// Sensors and Materials. 1988. № 2. P. 83—88.

6. Metz M. Offset in CMOS Magnetotransistors, Analysis and Reduction. Diss.// Zurich, 1999.

7. Metz M., Baltas H. P. Offset Analysis in CMOS Magnetotransistors by Numerical Simulation// <http://www.risti.org/publ/MSM99/M4304.pdf>.

8. Козлов А. В., Королев М. А., Смирнов С. Ю., Чаплыгин Ю. А., Тихонов Р. Д. Исследование механизмов преобразования и относительной магниточувствительности трехколлекторного биполярного магниточувствительного транзистора// Микроэлектроника. 2003. Т. 32. № 3. С. 219—225.

9. Тихонов Р. Д. Концентрационно-рекомбинационный механизм чувствительности биполярных магнитотранзисторов// Там же. 2004. Т. 33. № 6. С. 464—467.

10. Козлов А. В., Ревелева М. А., Тихонов Р. Д. Исследование рекомбинации в объеме биполярного магниточувствительного транзистора// Датчики и системы, 2003. № 11. С. 24—27.

11. Козлов А. В., Тихонов Р. Д. Концентрационно-рекомбинационная чувствительность магнитотранзистора// Там же. 2004. № 8. С. 40—42.

12. Тихонов Р. Д. Повышение чувствительности биполярного магнитотранзистора// Измерительная техника, 2005. № 2. С. 55—60.

13. 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.

14. Pfeleiderer H. Magnetodiode model// Solid-State Electron. 1972. V. 15. P. 335—353.

15. Cristoloveanu S. Magnetic field and surface influences on double-injection phenomena in semiconductors// Physica Status Solidi 1981 (a). V. 64. P. 683—695; V. 65. P. 281—292.

16. Mohaghegh A., Cristoloveanu S., Pontcharra J. De. Double-injection phenomena under magnetic field in SOS films. A new generation of magnetosensitive microdevices// IEEE Trans. Electron Devices. 1981. V. ED-28. P. 237—242.

17. Егуазарян Г. А., Стафеев В. И. Магнитодиоды, магнитотранзисторы и их применение. — М.: Радио и связь, 1987. — 88 с.

18. Tikhonov R. D. Investigation of bipolar magnetotransistor// Proceedings of SPIE. V. 6260, Micro- and Nanoelectronics 2005. May 2006. P. 443—454.

Статья поступила в редакцию 14 марта 2008 г.

Physicotechnical characteristics of the dual-collector magnetotransistor

R. D. Tikhonov

SMC “Technological Centre” MSIEE, Moscow, Russia

Results of research of experimental samples bipolar magnetotransistor with base in well (BMTBW) are carried out. Communication offset characteristics and differential sensitivity with negative resistance of input characteristics BMTBW is established. By means of device-technological modelling the physical effects defining features of characteristics BMTBW are certain.