

Рис. 12. Коэффициент увеличения действующего значения напряжения шума K_{dn} от полосы пропускания канала воспроизведения

онные дифференцирующие звенья; 5, 6 — аperiодические звенья; 7 — пороговое звено. Постоянные времени звеньев модели соответствуют значениям, приведенным на рис. 9.

Результаты анализа процесса формирования сигнала по рассмотренной модели приведены на рис. 11.

На рис. 11 видно, что дважды продифференцированный сигнал 2 содержит значительную шумовую составляющую. Она дает сформированный сигнал 3, содержащий "ложные" импульсы из-за многократного переключения порогового элемента.

Кроме того, положение фронтов сформированного сигнала, так же как и в пороговых методах детектирования, сильно зависит от точности перемещения светового луча воспроизведения относительно следа записи.

Появление большого уровня шумовой составляющей в сигнале воспроизведения иллюстрирует график коэффициента увеличения шумовой составляющей сигнала воспроизведения при использовании двух дифференцирующих элементов (рис. 12). По сравнению с аналогичным графиком (см. рис. 9), наблюдается восьмикратное увеличение шумовой составляющей и, следовательно, такое же ухудшение отношения сигнал—шум.

Список литературы

1. Михайлов В. И. Запоминающие устройства на оптических дисках / В. И. Михайлов, Г. И. Князев, П. П. Макарычев. М.: Радио и связь, 1991. 224 с.
2. Слесарев Ю. Н. Термомагнитная запись для оптических дисковых накопителей информации. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000. 142 с.

УДК 681.586.78.049.77:53.072:004.53.08

А. В. Козлов,
М. А. Ревелева, канд. физ.-мат. наук,
 Московский государственный институт
 электронной техники,
Р. Д. Тихонов, канд. техн. наук,
 Научно-производственный комплекс
 "Технологический центр" МИЭТ

ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА НА ОТНОСИТЕЛЬНУЮ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ БИПОЛЯРНОГО ДВУХКОЛЛЕКТОРНОГО МАГНИТОТРАНЗИСТОРА

С помощью пакета программ приборно-технологического моделирования ISE TCAD изучались работы латерального двухколлекторного биполярного магниточувствительного транзистора, сформированного в диффузионном кармане. При низком и высоком уровнях инжекции исследовалась зависимость относительной чувствительности по току от распределения носителей заряда. Установлено, что отрицательная чувствительность появляется в результате перераспределения в магнитном поле потоков электронов и дырок, т. е. за счет концентрационно-рекомбинационного механизма.

Развитие современных средств связи, телекоммуникационной и навигационной аппаратуры, средств медицинской диагностики сегодня было бы невозможно без качественных недорогих полупроводниковых датчиков магнитного поля. В целях разработки и изготовления таких датчиков в полупроводниковой электронике почти 35 лет назад появилось новое научно-техническое направление — магнетоэлектроника. За это время изобретено и исследовано множество конструкций датчиков магнитного поля (ДМП) [1], начиная от простейшего элемента Холла и заканчивая сложными симметричными магниточувствительными структурами. Простой дискретный элемент Холла является хорошо изученным датчиком и давно применяется в автомобильной промышленности, однако низкая чувствительность к магнитному полю затрудняет его применение в сложной аппаратуре телекоммуникационных систем. Использование других ДМП, таких как магниточувствительные диоды и резисторы, МОП-транзисторы, а также некоторые тиристоры и биполярные структуры, не дало ожидаемых результатов, хотя в отличие от датчика Холла их чувствительность значительно выше.

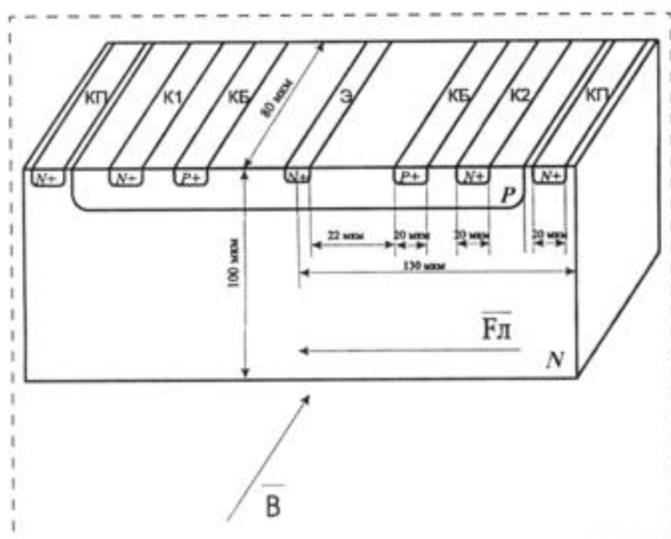


Рис. 1. Структура латерального биполярного двухколлекторного магниточувствительного транзистора:

Э — эмиттер; КБ — контакт к базе; К1 — левый коллектор; К2 — правый коллектор; КП — контакт к подложке; В — индукция магнитного поля; $F_{л}$ — сила Лоренца

В связи с этим особый интерес с точки зрения повышения магниточувствительности представляет конструкция латерального двухколлекторного биполярного магниточувствительного транзистора (ДКБМТ), сформированного в диффузионном кармане (рис. 1). Формирование транзистора осуществляется по технологии, совместимой с КМОП-технологией ИС. Исходным материалом служит кремниевая подложка, легированная фосфором, в которой далее путем диффузии бора создается глубокий карман p -типа. В нем происходит формирование элементов интегральной схемы: $n+$ — эмиттера (Э) и коллекторов (К), а также $p+$ — омических областей распределенного базового контакта (Б). За карманом симметрично относительно эмиттера располагаются $n+$ -омические области распределенного контакта к подложке (П). Выбор пары биполярных совмещенных $n-p-n$ -транзисторов не случаен: подвижность инжектируемых из эмиттера электронов почти в 3 раза выше, чем дырок, а так как дрейфовая скорость пропорциональна подвижности носителей, то сила Лоренца, влияющая на движение носителей тока, будет сильнее их отклонять. А как известно, принцип действия ДКБМТ основан на перераспределении потоков носителей из эмиттера в сторону рабочих коллекторов под действием силы Лоренца, влияющей на заряженные частицы в магнитном поле.

Ранее [2] изучалась работа $n-p-n$ биполярного магнитотранзистора, сформированного в кармане, где переход карман — подложка служил изоляцией $p-n$ -перехода транзистора от остальной схемы. Равная резистивная нагрузка включалась в цепи кол-

лекторов, разность падения напряжений на которой при увеличении потенциала базы являлось параметром чувствительности к магнитному полю по напряжению. Большое расстояние между активными областями эмиттера и коллекторов, а также высокая скорость рекомбинации носителей в объеме и на поверхности полупроводника не позволяет достичь приемлемого коэффициента передачи тока в коллекторы, однако выбор такой конструкции транзистора позволяет добиться приемлемого значения чувствительности к магнитному полю. Объединение омических контактов базы и подложки позволяет $p-n$ -переходу карман — подложка оттягивать часть электронной плотности из кармана в подложку и, таким образом, распределять концентрацию электронов в кармане между рабочими коллекторами в соответствии с магнитным полем и уровнем инжекции из эмиттера. Изучены и проанализированы также конструкции магнитотранзистора, расположенные непосредственно в подложке [3].

С помощью пакета прикладных программ системы сквозного приборно-технологического моделирования приборов ISE TCAD швейцарская фирма ISE AG изучала работу $n-p-n$ латерального биполярного ДКБМТ, сформированного в диффузионном p -кармане, в магнитном поле. Направление магнитного поля с индукцией $B = 1$ Тл выбиралось вдоль эмиттера и перпендикулярно плоскости поперечного сечения, как показано на рис. 1. На коллекторах устанавливалось напряжение питания $U_{к1} = U_{к2} = 1,5$ В, на эмиттере $U_{э} = 0$, а на базу и подложку подавалось плавающее напряжение $U_{бэ} = U_{пэ} = 0,5 \pm 1$ В, что обеспечивало смещение эмиттерного перехода в прямом направлении (рис. 2).

В результате изучения работы магнитотранзистора в таком режиме выявлены два механизма преобразования воздействия магнитного поля на

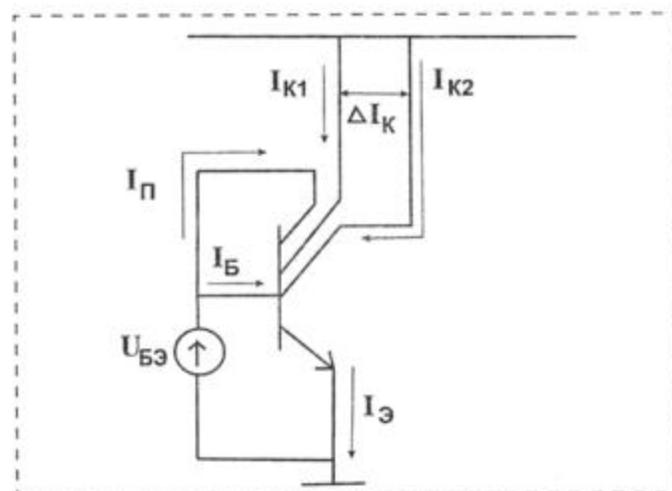


Рис. 2. Схема включения ДКБМТ

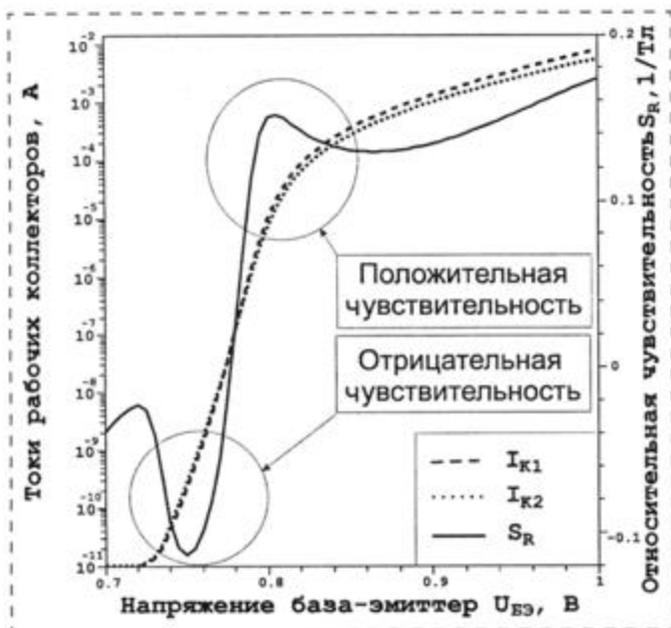


Рис. 3. Зависимость относительной по току магниточувствительности от потенциала базы транзистора, находящегося в магнитном поле $B = 1 \text{ Тл}$

относительную по току чувствительность, в соответствии с чем прибор проявляет как положительную, так и отрицательную чувствительность к воздействию магнитного поля. При моделировании работы транзистора учитывался как эффект Холла, так и модуляция инжекции из эмиттера в результате магнитоконцентрационного эффекта. Как известно, относительная чувствительность магнитотранзистора — это отношение разности токов рабочих коллекторов к их сумме и магнитной индукции:

$$S_R = \frac{dI_K}{dB} \frac{1}{I_{K\Sigma}}, \quad (1)$$

где dI_K/dB — изменение разности коллекторных токов с изменением магнитной индукции поля; $I_{K\Sigma}$ — суммарный ток двух рабочих коллекторов.

Таким образом, согласно (1) повышение чувствительности достигается за счет увеличения разности токов рабочих коллекторов при малой силе токов коллекторов. Уже при подаче небольшого потенциала на базу транзистора (около 0,7 В), т. е. при смещении эмиттерного перехода в прямом направлении, в коллекторах начинают протекать токи, обеспечивающие высокое значение относительной магниточувствительности. Зависимость относительной чувствительности (1) от напряжения на эмиттерном переходе представлено на рис. 3. В соответствии с двумя механизмами преобразования воздействия магнитного поля транзистором его магниточувствительность может иметь как положительные, так и отрицательные значения. Отри-

цательная чувствительность была обнаружена экспериментально [4].

Для понимания возникновения отрицательной чувствительности рассмотрим два режима работы транзистора: при низком уровне инжекции (НУИ) из эмиттера ($U_{бэ} = 0,74 \text{ В}$), что соответствует отрицательной по току чувствительности, и высоком уровне инжекции (ВУИ) ($U_{бэ} = 1 \text{ В}$), что соответствует положительным значениям магниточувствительности по току прибора.

Работа прибора в первом режиме более выгодна по следующим причинам: во-первых, магнитотранзистор потребляет меньшую мощность, так как увеличение потребляемой мощности пропорционально возрастанию тока эмиттера, который в свою очередь растет с увеличением потенциала базы, и, во-вторых, что является следствием первой причины, при малой потребляемой мощности нагрев транзистора гораздо меньше:

$$P_{\text{потр}} = U_{\text{и.п}} I_3, \quad (2)$$

где $U_{\text{и.п}}$ — напряжение источника питания; I_3 — ток эмиттера.

При данном уровне инжекции, несмотря на полную симметрию прибора, распределения носителей заряда в левой и в правой частях транзистора в магнитном поле различаются. Это схематически показано на рис. 4, а и б. Часть носителей заряда, инжектируемых из эмиттера, отклоняются от заданной траектории движения под действием силы Лоренца

$$F_L = q[v \times B], \quad (3)$$

где q — заряд электрона; v — скорость движения электрона; B — магнитная индукция.

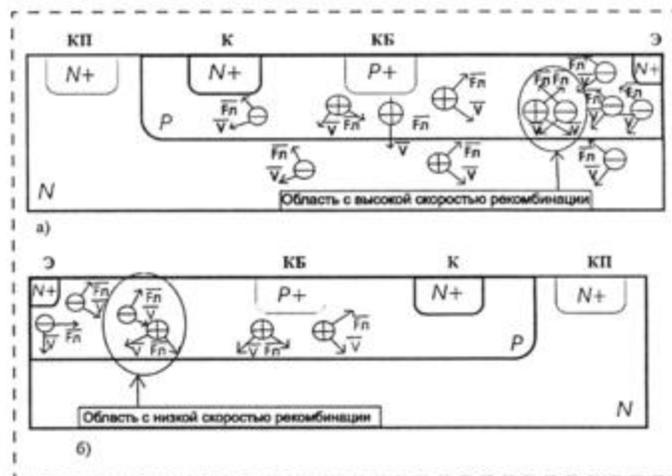


Рис. 4. Магнитотранзистор при низком уровне инжекции из эмиттера:

а — левая часть транзистора; б — правая часть (Э — эмиттер, КБ — контакт к базе, К — правый коллектор, КП — контакт к подложке)

Направление вектора скорости электронов противоположно с направлением вектора тока эмиттера, согласно чему сила Лоренца, действующая на отрицательно заряженные частицы, прижимает потоки электронов в левой части к поверхности полупроводника (рис. 4, а), а в правой — к границе перехода карман — подложка (рис. 4, б). Уменьшенные траектории движения неосновных носителей заметно снижает сопротивление активной базы левой части транзистора, а сопротивление правой части базы при этом, наоборот, возрастает. Однако действие силы Лоренца распространяется также и на положительно заряженные дырки из контакта базы. Она отклоняет их в ту же сторону, что и электроны. Но поскольку движение дырок из базового контакта направлено сверху вниз, то согласно (3) отклоняются они в сторону эмиттера в левой части и в сторону правого коллектора в правой части. Таким образом, движение основных (дырок) и неосновных (электронов) носителей заряда в левой части кармана, служащей базой, навстречу друг другу, определяет области повышенной рекомбинации, что уменьшает концентрацию неосновных носителей.

Транзистор, выбранный для моделирования, имеет следующие размеры: длина — 260 мкм, ширина — 80 мкм и толщина — 100 мкм. Длина диффузионного кармана составляет 160 мкм (по 80 мкм в левую и в правую стороны), а глубина около 5 мкм. В правой части сила Лоренца отклоняет влево электроны, инжектируемые донной частью эмиттера, "боковые" же электроны отклоняются в основном вниз согласно формуле (3). Соответственно, в отличие от левой части, движение носителей здесь происходит в разные стороны (электроны — вниз и влево, дырки — вверх и вправо), что определяет более высокую силу тока второго коллектора. Такая асимметрия распределения носителей заряда влияет на токи рабочих коллекторов, что в свою очередь определяет чувствительность транзистора. Так как ток второго коллектора при заданном уровне инжекции выше первого, а токи рабочих коллекторов сравнительно небольшие, отрицательная относительная магниточувствительность по току принимает высокие значения. Под действием силы Лоренца носители обоих типов рекомбинируют в объеме и на поверхности транзистора, что уменьшает концентрацию электронов в кармане и в подложке прибора. В силу различия концентраций носителей заряда в левой и в правой частях транзистора скорость рекомбинации также различна. Таким образом, скорости рекомбинации носителей асимметричны. На рис. 5 (см. третью сторону обложки) показана разность распределений скоростей рекомбинации носителей по механизму Шокли—Рида—Холла в магнитном поле и без поля, где иллюстрируется описанная выше рекомбинация.

Как следует из распределения, максимальная скорость рекомбинации наблюдается в эмиттере, а также слева от него, где в магнитном поле происходит перемешивание электронов и дырок. Из правой же части вблизи эмиттера электроны, наоборот, уходят под действием силы Лоренца, что определяет там низкую скорость рекомбинации носителей заряда.

Дальнейшее увеличение потенциала распределенного контакта базы вызывает более интенсивную инжекцию электронов из эмиттера, характеризующуюся высокой скоростью и большим их током, а также током дырок из базового контакта. Высокие концентрации электронов и дырок, поступающих из эмиттера и контактов базы, приводят к появлению электронно-дырочной плазмы в кармане транзистора и в подложке, характеризующейся высокой скоростью рекомбинации носителей заряда (рис. 6, см. третью сторону обложки). Это вызывает уменьшение носителей заряда обоих типов, и дальнейший приток электронов из эмиттера компенсируется по условию электронейтральности вновь поступающими дырками из контакта базы. Таким образом, при высоком уровне инжекции в любой момент времени концентрация носителей, как электронов (рис. 7, а, см. третью сторону обложки), так и дырок (рис. 7, б), приблизительно одинакова. Высокие концентрация и скорость вновь инжектируемых электронов приводят к увеличению силы Лоренца (3), отклоняющей их к одной из граней полупроводника, в результате чего ток носителей в кармане прибора возрастает:

$$I = jS = qnvad, \quad (4)$$

где j — плотность тока носителей заряда; S — площадь полупроводника, через которую протекают носители; n — концентрация электронов; a — толщина транзистора в направлении Z ; d — толщина транзистора в направлении Y .

Как известно, скорость рекомбинации — число электронно-дырочных состояний, которые рекомбинируют в единице объема в единицу времени. Согласно [5], скорость рекомбинации Шокли—Рида—Холла прямо пропорциональна произведению концентрации основных и неосновных носителей:

$$U = \frac{\sigma_p \sigma_n v_{th} (pn - n_i^2) N_t}{\sigma_n \left[n + n_i \exp\left(\frac{E_f - E_i}{kT}\right) \right] + \sigma_p \left[p + n_i \exp\left(-\frac{E_f - E_i}{kT}\right) \right]}, \quad (5)$$

где σ_p , σ_n — сечения захвата электрона и дырки; v_{th} — тепловая скорость носителей, равная $(3kT/m^*)^{1/2}$; m^* — эффективная масса; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; N_t — концен-

трация ловушек; n_i — собственная концентрация носителей; p — концентрация дырок; E_i — собственный уровень Ферми; E_l — уровень ловушек. Таким образом, скорость рекомбинации при высоком уровне инжекции намного выше, чем при низком.

Однако при данном уровне инжекции механизмы рекомбинации носителей не могут повлиять на распределение носителей заряда в транзисторе в целом из-за инжекции дополнительных носителей из эмиттера и базового контакта. Распределение носителей в результате действия силы Лоренца в магнитном поле по верхней и нижней граням полупроводника в левой и в правой частях транзистора приводит к появлению значительного холловского поля E_x , причем в левой части прибора вектор поля направлен снизу вверх, а в правой — сверху вниз (рис. 8). Объяснением этому может служить комплиментарная пара датчиков Холла, соединенных вместе контактами, из которых вытекает ток (эта пара является эквивалентом транзистора). При этом верхней гранью в данном случае служит поверхность полупроводника, а нижней — граница p - n -перехода карман — подложка. Наряду с холловским полем, в связи с интенсивной инжекцией дырок из базового контакта в глубь кармана, а также высокой концентрацией акцепторной примеси на поверхности в транзисторе сверху вниз как в левой, так и в правой частях возникают "тянущие поля" E_T , способствующие изменению траектории движения неосновных носителей заряда в базе. "Тянущее поле" является результатом градиента концентрации дырок в кармане при легировании бором. Таким образом, этим полем можно управлять за счет дополнительного легирования кармана. Взаимодействие этих двух полей в кармане транзистора уменьшает влияние их на электроны в левой части и усиливает влияние в правой части прибора, прижимая электроны вглубь, что приводит к увеличению потока электронов и скорости рекомбинации в левой части кармана. Интенсивная инжекция электронов в правой части прибора приводит к отклонению части электронов в подложку, где в дальнейшем происходит их рекомбинация с дырками. Так как и холловское поле, и "тянущее поле" являются функциями концентрации носителей заряда, то с увеличением уровня инжекции взаимодействие полей

усиливает влияние на движение частиц в объеме полупроводника. В связи с тем, что более интенсивная инжекция электронов, отклоняемых в левую часть транзистора, вызывает экспоненциальное увеличение тока рабочих коллекторов, относительная магниточувствительность по току в общем случае падает и при $U_{бэ} = 1$ В не превышает значения $S_R = 0,15$ Тл $^{-1}$.

Проведенное исследование дает возможность полагать, что относительная чувствительность по току двухколлекторного транзистора, сформированного в диффузионном кармане, определяется, помимо геометрической реализации транзистора, уровнем инжекции из эмиттера, что является, в свою очередь, функцией напряжения смещения на p - n -переходе база — эмиттер. Установлено, что при низком уровне инжекции работа транзистора в магнитном поле в основном определяется механизмами объемной и поверхностной рекомбинации, где высокая скорость рекомбинации носителей в приборе дает ощутимый вклад в уменьшение рабочего тока коллектора этой части. При высоком уровне инжекции механизмы рекомбинации также присутствуют, однако уже не являются определяющими, в отличие от действия силы Лоренца на большой ток электронов, создаваемый высокой концентрацией инжектируемых носителей. Воспроизводимость ВАХ прибора определяет режим его функционирования в отрицательном диапазоне значений чувствительности при низком уровне инжекции электронов из эмиттера. Снижение рабочих токов в заданном режиме работы транзистора обеспечивает также уменьшение потребляемой и рассеиваемой мощности прибора.

Дальнейшее изучение работы биполярного транзистора позволит оптимизировать структуру по основному параметру магниточувствительности по току.

Список литературы

1. Балтес Г. П., Попович Р. С. Интегральные полупроводниковые датчики магнитного поля // ТИИЭР. 1986. Т. 74. № 8. С. 60—90.
2. Амеличев В. В., Галушков А. И., Миргородский Ю. Н., Тихомиров П. А., Чаплыгин Ю. А., Шорин М. В., Шубин С. В. Моделирование биполярного двухколлекторного магнитотранзистора и определение режима термокомпенсации изменения чувствительности // Датчики и системы. 1999. № 6. С. 34—42.
3. Глауберман М. А., Егоров В. В., Канищева Н. А., Козел В. В. Особенности двумерного моделирования дрейфовых инжекционных магниточувствительных структур // Журнал технической физики. 1997. Т. 67 № 7. С. 39—41.
4. Королев М. А., Чаплыгин Ю. А., Амеличев В. В., Тихонов Р. Д., Шорин М. В. Исследование возможности повышения чувствительности биполярных латеральных магниточувствительных транзисторов // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2002. № 1. С. 40—43.
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1. М.: Мир, 1984. С. 43.

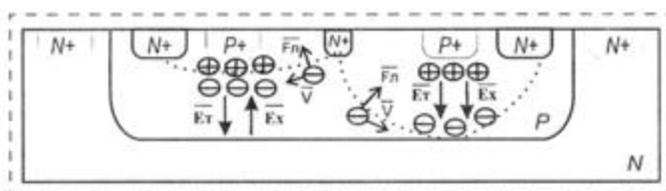


Рис. 8. Работа транзистора при высоком уровне инжекции из эмиттера