

Магниточувствительные транзисторы

Обзор

© И.М. Викулин, Л.Ф. Викулина, В.И. Стафеев

Академия связи Украины,
65021 Одесса, Украина

(Получен 30 мая 2000 г. Принят к печати 1 июня 2000 г.)

Обобщаются физические принципы работы транзисторов, ток через которые управляется внешним магнитным полем. Рассмотрены однопереходные, биполярные и полевые магнитотранзисторы, а также их производные — магнитотиристоры и магнитоуправляемые микросхемы. Отмечены основные направления применения.

Введение

Исторически первым типом транзисторов, ток через которые зависит от внешнего воздействия, являются фоточувствительные транзисторы — фототранзисторы. Аналогичным образом и магниточувствительные транзисторы названы магнитотранзисторами. Если в фототранзисторах выходной ток зависит от падающего на них светового потока, то в магнитотранзисторах выходной ток определяется проходящим через них магнитным потоком. Главной особенностью этих транзисторов, определяющих их широкое применение, является то, что оба типа внешних воздействий бесконтактны, т.е. источники света и магнитного поля электрически изолированы от чувствительных транзисторов. Так же как из светодиода и фототранзистора можно составить оптопару, из источника магнитного потока и магнитотранзистора можно составить магнитопару, причем в качестве источника магнитного потока может быть использован как постоянный магнит, так и электромагнит. Интересной особенностью магнитотранзистора является то, что его выходной ток одновременно чувствителен и к световому потоку. Таким образом создается возможность двойного бесконтактного управления выходным сигналом — магнитным потоком и светом, что значительно расширяет функциональные возможности транзистора.

1. Однопереходные магнитотранзисторы

Однопереходные транзисторы (ОПТ) действуют на основе модуляции сопротивления базы инжектированными из эмиттера носителями заряда, вследствие чего входная вольт-амперная характеристика (ВАХ) имеет вид S-типа (рис. 1).

Чем больше эффективное время жизни инжектированных носителей τ_E в базе, тем глубже их проникновение в базу и тем меньше величина остаточного напряжения V_0 , до которого уменьшается напряжение на эмиттере после переключения из высокоомного состояния нижней части базы в низкоомное. При помещении ОПТ в магнитное поле на инжектированные носители действует сила Лорен-

ца [1,2], отклоняющая их к стенкам базы (или наоборот, в зависимости от направления магнитного поля и размеров ОПТ). Поскольку скорость рекомбинации неравновесных носителей на стенках базы обычно больше, чем в объеме, это приводит к изменению τ_E , а соответственно и V_0 (рис. 1). Зависимость V_0 от магнитной индукции B может быть использована для построения датчика магнитного поля, работающего на постоянном токе. Но магниточувствительность ОПТ в этом режиме не выше, чем чувствительность магнитодиодов с длинной базой, конструкция и схема включения которых значительно проще [3].

Гораздо больший интерес представляет использование в качестве датчика магнитного поля генератора на основе ОПТ, поскольку в практической электронике ОПТ в основном применяется в качестве генераторов, для создания которых к эмиттеру и базе (B_1) ОПТ достаточно подключить емкость. Полное дифференциальное сопротивление входной цепи ОПТ может быть представлено в виде активной части (положительное (R^+) и отрицательное (R^-) сопротивление участка эмиттер–база B_1) и реактивной части (внутренняя индуктивность ОПТ L) [4]. Показано в работе [5], что L и R^- растут

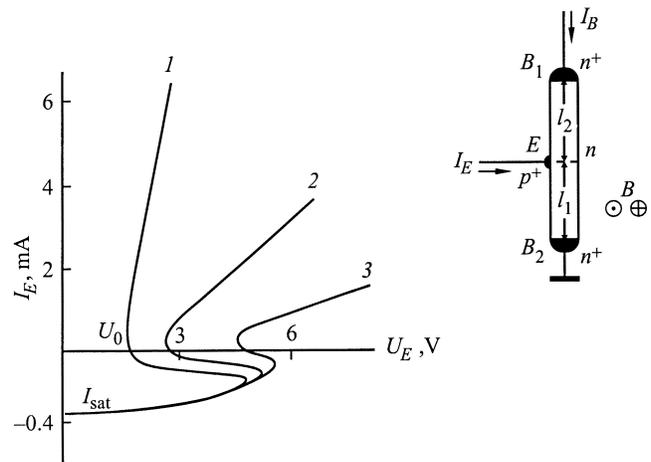


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики германиевых однопереходных транзисторов в зависимости от магнитной индукции. B, Тл: 1 — 0, 2 — 0.3, 3 — 0.6. На вставке — схема прибора.

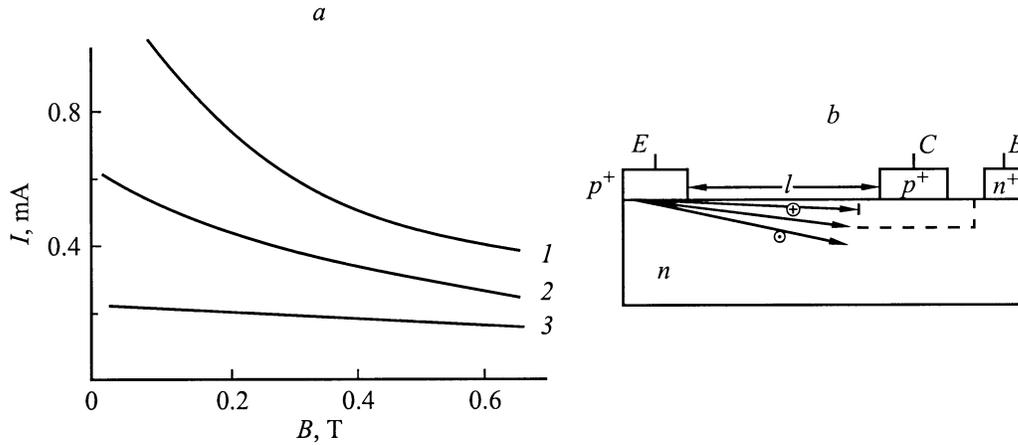


Рис. 2. Зависимость тока от магнитной индукции (*a*) и структура одноколлекторного магнитотранзистора (*b*). Кривые на рис. *a* соответствуют напряжению V , B : 1 — 25, 2 — 20, 3 — 15; направление магнитного поля — $\ominus B$. На рис. *b* линии со стрелками указывают направление движения носителей заряда: верхняя — в магнитном поле B , перпендикулярном плоскости рисунка (\oplus), нижняя — в поле B обратного направления (\ominus), средняя линия — при $B = 0$.

с увеличением τ_E до тех пор, пока глубина затягивания инжектированных носителей не становится равной длине базы l_1 . Так как магнитное поле влияет в основном на τ_E , оно изменяет величины L и R^- , что приводит к изменениям амплитуды и частоты колебаний напряжения на эмиттере ОПТ [5–7]. Величина магниточувствительности, определяемая как отношение переменного напряжения V к магнитной индукции B и току питания I

$$\gamma = V/IB, \quad (1)$$

достигает значения $2 \cdot 10^3$ В/(А · Тл). Поскольку $V \propto R^-$, а $R^- \propto \rho$ (ρ — удельное сопротивление базы), для увеличения магниточувствительности необходимо использовать полупроводник с большим удельным сопротивлением. Для этой цели применялись эксклюзирующие контакты к базе германиевого ОПТ. Эффект эксклюзии в данном случае заключается в том, что электрическое поле в базе ОПТ выносит неосновные равновесные носители (дырки) из базы через контакт B_1 , что позволяет на порядок уменьшить концентрацию равновесных носителей в базе, увеличить ρ и R^- и соответственно увеличить γ до значения 10^4 В/(А · Тл) [8,9].

На основе генератора на ОПТ может быть построен датчик магнитного поля с частотным выходом, т.е. с зависимостью частоты генерации от магнитного поля. Частотный выход датчика позволяет значительно упростить стыковку датчика с ЭВМ и микроминиатюризировать измерительные устройства.

2. Одноколлекторные магнитотранзисторы

Действие магнитного поля на обычные вертикальные биполярные транзисторы (области эмиттера, базы и коллектора расположены друг за другом по направлению

от поверхности в глубь полупроводника) проявляется в искривлении траектории инжектированных из эмиттера носителей заряда, что приводит к увеличению эффективной длины базы и отклонению части носителей от коллектора [10]. Роль последнего эффекта возрастает с уменьшением ширины эмиттера и коллектора, что обеспечивает увеличение магниточувствительности. Наименьшая площадь взаимного перекрытия площадей эмиттера и коллектора, определяемая глубиной диффузии примесей, достигается в латеральной конструкции транзистора, поэтому она и обнаруживает наибольшую магниточувствительность. На рис. 2, *b* показана структура такого магнитотранзистора (МТ); пунктиром показана область объемного заряда коллекторного p - n -перехода. В магнитном поле B с направлением, перпендикулярным плоскости рисунка ($\oplus B$), носители отклоняются к поверхности базы, и их путь к коллектору уменьшается, а при противоположном направлении ($\ominus B$) — увеличивается, что приводит к изменению коэффициента передачи тока h_{21}^B и тока через МТ.

В работе [11] произведен расчет зависимости h_{21}^B от магнитной индукции и получена формула

$$h_{21}^B = \alpha \left\{ 1 \pm \mu B \sqrt{(l+b)/A} \right\}, \quad (2)$$

где $A = kT/qE$, μ — подвижность, b — полуширина эмиттера, E — напряженность электрического поля в базе,

$$\alpha = 1 - \frac{A^2}{2L^2} - \frac{2l+b}{2L^2} A \pm \frac{\mu B}{bL^2} \times \sqrt{A^3} \left\{ \frac{2}{3} \left[\sqrt{(l+b)^3} - \sqrt{l^3} \right] + \left[\sqrt{l+b} - \sqrt{l} \right] A \right\}.$$

Знаки плюс и минус при слагаемых с μB соответствуют противоположным направлениям магнитного поля: $\oplus B$ и $\ominus B$ соответственно.

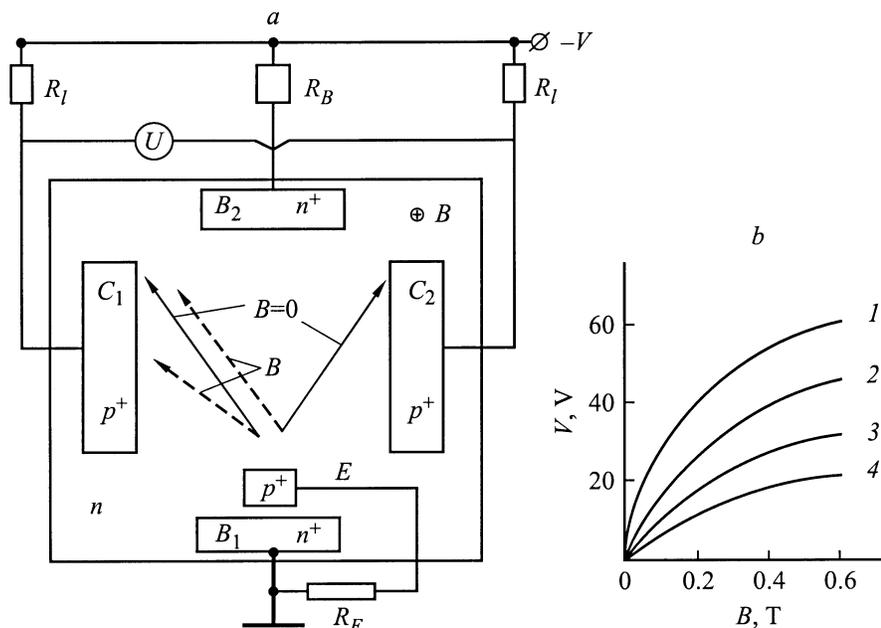


Рис. 3. Схема двухколлекторного магнитотранзистора (а) и зависимость напряжения между коллекторами от магнитной индукции (b) для температуры $T, ^\circ\text{C}$: 1 — (-100), 2 — (-50), 3 — 0, 4 — 60.

Экспериментальная проверка формулы (2) осуществлялась на $n-p-n$ -транзисторах из кремния p -типа с $\rho = 20 \text{ кОм} \cdot \text{см}$. Размеры эмиттера и коллектора $0.6 \times 0.6 \text{ мм}^2$, расстояние между ними $l = 0.8 \text{ мм}$, $L_p = 475 \text{ мкм}$, $E = 600 \text{ В/см}$, $I_E = 1.5 \text{ мА}$. При данных значениях величин членом $A^2/2L^2$ и последним слагаемым в выражении для α можно пренебречь. Совпадение рассчитанной по (2) зависимости с экспериментальными значениями достаточно хорошее для направления магнитного поля $\odot \mathbf{B}$.

Наибольшая магниточувствительность наблюдается при включении МТ как двухполюсника (цепь эмиттер–коллектор) с отключенной базой. В этом случае ток через транзистор определяется как $I = I_{\text{CB}}^r / (1 - h_{21}^B)$. В обычных условиях обратный ток коллекторного $p-n$ -перехода I_{CB}^r мал, коэффициент h_{21}^B при микрорежимах также мал и магниточувствительность невелика. Поэтому для увеличения I_{CB}^r либо в коллектор вводятся шунтирующие его каналы, либо в качестве базы используется полупроводник, близкий к собственному. На рис. 2, а показаны зависимости $I(B)$ при различных напряжениях на МТ при двухполюсном включении. С ростом тока магниточувствительность увеличивается, что можно объяснить увеличением h_{21}^B . При токе 0.6 мА магниточувствительность порядка $2 \cdot 10^4 \text{ В}/(\text{А} \cdot \text{Тл})$.

3. Двухколлекторные магнитотранзисторы

Конструкция двухколлекторного магнитотранзистора (ДМТ) с расположенными с двух сторон базы коллекторами показана на рис. 3. ДМТ, например, $p-n-p$ -типа

работает следующим образом. В отсутствие магнитного поля инжектированные из эмиттера дырки распределяются поровну между коллекторами (сплошные линии на рис. 3, $B = 0$), и их токи равны. В магнитном поле $\oplus \mathbf{B}$ (пунктирные линии) поток носителей отклоняется в сторону коллектора C_1 , его ток увеличивается, а ток коллектора C_2 — уменьшается. Кроме эффекта перераспределения носителей между коллекторами в ДМТ действует также и эффект изменения длины базы. Как видно из рис. 3, он заключается в том, что траектория движения носителей, которые попадают в C_1 , уменьшается, т.е. сокращается эффективная длина базы, что приводит к дополнительному росту тока. В коллекторе C_2 , наоборот, этот эффект приводит к дополнительному уменьшению тока [8,12]. При противоположном направлении магнитного поля $\ominus \mathbf{B}$ ток C_2 растет, а ток C_1 уменьшается.

Очевидно, что при $B = 0$ разность потенциалов между коллекторами V в симметричной схеме отсутствует: $V = 0$, а с ростом магнитной индукции B напряжение V увеличивается. Таким образом, напряжение V является функцией величины магнитного поля, а по его знаку можно определить направление B . Как следует из схемы рис. 3, величину V можно определить как

$$V = R_l(I_{C1} - I_{C2}) = R_l I_E (h_{21}^{B1} - h_{21}^{B2}), \quad (3)$$

где h_{21}^{B1} , h_{21}^{B2} — коэффициенты передачи тока двух половин ДМТ [13,14].

Расчеты показывают, что в слабых магнитных полях ($\mu B \ll 1$)

$$h_{21}^{B1} - h_{21}^{B2} = \chi^2 (BE/4b\tau) [a^4 - (a-b)^4],$$

где $2a$ — расстояние между коллекторами, $2b$ — ширина эмиттера, τ — время жизни неосновных носителей; $\chi = q/kT$.

Следует отметить, что при протекании тока основных носителей между базовыми контактами V_1 и V_2 в магнитном поле в ограниченной базе возникает эдс Холла V_H . Холловское поле отклоняет инжектированные носители в ту же сторону, что и сила Лоренца, что увеличивает магниточувствительность ДМТ.

При протяженном в горизонтальном направлении эмиттере к одной половине эмиттера относительно базы прикладывается напряжение $+V_H/2$, а к другой — $-V_H/2$. Эти напряжения суммируются с напряжением, приложенным к эмиттерному $p-n$ -переходу от источника питания, что приводит к неодинаковой инжекции дырок с двух половин эмиттера, а соответственно и к разности коллекторных токов. Этот эффект может также служить основой для работы ДМТ [15–29].

Линейная зависимость $V \propto I_E B E$ (3) хорошо подтверждается для слабых магнитных полей и низких уровней инжекции. В больших магнитных полях действие эффекта перераспределения носителей между коллекторами ослабевает (все носители идут в один коллектор), и магниточувствительность уменьшается. С ростом уровня инжекции увеличение концентрации инжектированных носителей вблизи эмиттера приводит к уменьшению сопротивления этой области и уменьшению E , поэтому зависимость $V = f(I_E)$ становится слабее. На рис. 3, б приведены типичные зависимости $V(B)$ для кремниевого ДМТ при разных температурах. Транзисторы изготавливались из кремния с $\rho = 200 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $a = 75 \text{ мкм}$, $b = 30 \text{ мкм}$, длина коллекторов 200 мкм . Совместное действие указанных выше трех физических эффектов в базе ДМТ обеспечивает достижение магниточувствительности $5 \cdot 10^5 \text{ В}/(\text{А} \cdot \text{Тл})$, что в 5–10 раз выше чувствительности одноколлекторного МТ. Следовательно, ДМТ не является простой суммой двух одноколлекторных МТ, и его следует рассматривать как самостоятельный прибор. Кроме того, экспериментальные образцы ДМТ изготавливались также из германия и антимонида индия.

Существенное влияние на чувствительность ДМТ оказывает диффузионное размытие потока инжектированных носителей в стороны коллекторов. Это приводит к тому, что часть инжектированных носителей изменяет свою траекторию в магнитном поле лишь в пределах одного коллектора и не принимает участия в перераспределении носителей между коллекторами, поэтому чувствительность уменьшается. Уменьшение диффузионного расширения потока носителей может быть достигнуто путем создания в базе между коллекторами сильно легированной области, градиента ширины запрещенной зоны от центра базы к коллекторам, а также использования базового контакта V_1 и коллекторов различной формы. Такие меры позволяют на порядок увеличить магниточувствительность ДМТ.

Датчиком с использованием планарной конструкции ДМТ (рис. 3, а) можно измерять только одну составляющую магнитного поля. Для измерения двух и трех составляющих вектора магнитной индукции разработаны конструкции магнитотранзисторов с тремя коллекторами, разнесенными по трем сторонам базы кубической

формы. На основе таких магнитотранзисторов созданы опытные образцы электронных компасов, которые не имеют механически перемещающихся элементов. С их помощью можно создавать системы, которые автоматически управляют курсом движения любого устройства в магнитном поле земли. Высокая чувствительность ДМТ позволяет им реагировать на перемещение расположенного над ними постоянного магнита. Этот эффект использован для построения датчиков давления и перемещения. Матрица с круговым расположением ДМТ используется в датчиках угла поворота.

4. Магнотиристоры

Любой тиристор можно представить в виде эквивалентной схемы из двух транзисторов. Следовательно, рассмотрение магниточувствительных свойств тиристоров сводится к рассмотрению магниточувствительных свойств составляющих транзисторов. Применяя обычную методику [30,31], нетрудно показать, что напряжение переключения тиристора, управляемого по p -базе, можно определить по формуле.

$$V_{sw} = V_{CB}^{thr} \left[1 - h_{21}^{B1} \left(1 + \frac{I_c}{I_{av}} \right) - h_{21}^{B2} \right]^{1/C}, \quad (4)$$

где V_{CB}^{thr} — напряжение лавинного пробоя коллекторного $p-n$ -перехода, I_c — ток управляющего электрода, I_{sw} — ток в точке переключения, h_{21}^{B1} — коэффициент передачи тока $n-p-n$ -транзистора, h_{21}^{B2} — $p-n-p$ -транзистора, C — постоянная (для различных материалов равна 2–6). При управлении по n -базе коэффициенты передачи тока в (4) меняются местами.

Используя в качестве одного из составляющих транзисторов магнитотранзистор, получим конструкцию магнотиристора, напряжение переключения которого V_{sw} (4) управляется магнитным полем в соответствии с зависимостью $h_{21}^B(B)$ (2). На вставке к рис. 4 показана структура такого тиристора, причем в качестве управляющего электрода может быть взят или контакт к базе n -типа $c1$, или контакт к базе p -типа $c2$ [32,33]. В качестве магнитотранзистора здесь используется $p-n-p$ составляющий транзистор, эмиттер которого является анодом (А). Процессы в нем не отличаются от процесса изменения h_{21}^B магнитотранзистора в магнитном поле. При направлении магнитного поля $\oplus \mathbf{B}$ инжектированные из анода носители отклоняются от коллектора, что приводит к уменьшению h_{21}^B и росту V_{sw} . В противоположном магнитном поле, наоборот, носители отклоняются в сторону коллектора и V_{sw} уменьшается. Током через управляющий электрод устанавливается необходимая величина V_{0sw} в отсутствие магнитного поля. При использовании в качестве управляющего электрода $c1$ магниточувствительность выше, чем при использовании $c2$, так как в первом случае совместно с изменением эффективной длины базы происходит перераспределение инжектированных анодом носителей между p -коллектором

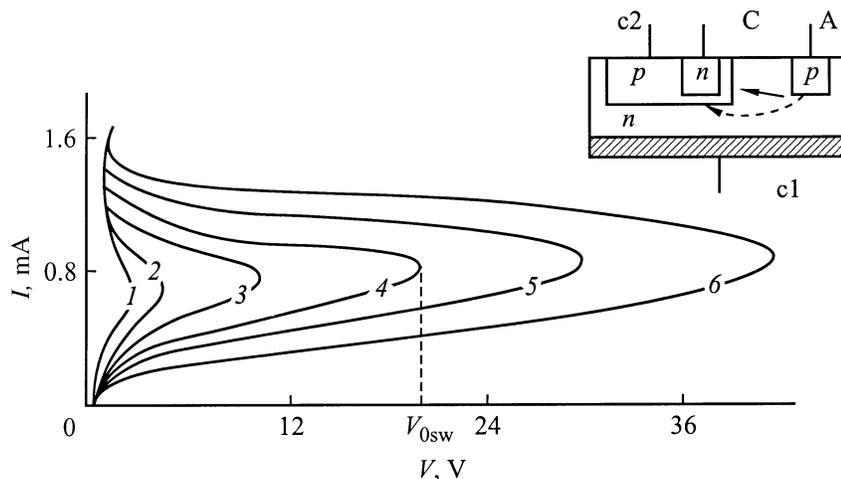


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики тиристора при напряженности магнитного поля B , Тл: 1 — (-1), 2 — (-0.8), 3 — (-0.4), 4 — 0, 5 — 0.4, 6 — 0.8.

и $c1$. Магниточувствительность γ по изменению V_{sw} в магнитном поле достигает 10^4 В/(А · Тл).

Увеличить чувствительность магнитотиристора к магнитному полю полярности $\oplus B$ можно путем использования магнитодиодного эффекта. Цепь анод–(управляющий электрод) представляет собой диод с длинной базой, включенный в прямом направлении. Поперечное магнитное поле увеличивает его сопротивление, что при питании диода от источника с постоянным напряжением V_A приводит к уменьшению его тока, который является управляющим током I_c . Уменьшение же I_c приводит к дополнительному увеличению напряжения переключения в магнитном поле $\oplus B$. При обратной полярности магнитного поля магнитодиодный эффект, также приводящий к уменьшению I_c , наоборот, ослабляет действие первичных эффектов (увеличение коэффициента передачи тока), поэтому магнитоувствительность меньше. На рис. 4 показаны ВАХ магнитотиристора из n -кремния с $\rho = 200$ Ом · см, расстояние между p -областями 100 мкм, толщина пластины 200 мкм. Управляющий электрод подключается к источнику с постоянным напряжением $V_A = 0.67$ В. Магнитоувствительность к магнитному полю $\oplus B$ при изменении напряжения переключения составляет $3 \cdot 10^4$ В/(А · Тл), что в 3–4 раза выше чувствительности магнитотиристора при питании цепи управления от генератора тока.

По аналогии с двухколлекторным магнитотранзистором можно назвать двухколлекторный магнитотиристор. Конструктивно он отличается от ДМТ (рис. 3) только тем, что в середине коллекторных p -областей размещены два дополнительных n -эмиттера. В такой структуре имеется внутренняя связь между двумя тиристорами. Она проявляется в том, что отклонение магнитным полем инжектированных носителей от одного коллектора к другому, например от C_2 и C_1 , приводит не только к уменьшению напряжения включения первого тиристора, но и к одновременному увеличению напряжения включения второго тиристора. При использовании магнито-

тиристора для переключения тока магнитным полем из одной цепи в другую это повышает помехоустойчивость схемы.

5. Полевые магнитотранзисторы

Сопротивление канала полевого транзистора увеличивается в магнитном поле, как и сопротивление любого полупроводника. Поэтому полевой транзистор можно использовать в качестве магниторезистора [34]. Однако большее распространение получило использование полевого транзистора в качестве датчика Холла. Так как эдс датчика Холла

$$V_H = IBR_H/d, \quad (5)$$

для увеличения его чувствительности необходимо уменьшить толщину датчика d . Однако на этом пути существуют ограничения, обусловленные как технологическими проблемами получения тонких образцов, так и тем, что при малых толщинах растет рассеивание носителей заряда на поверхности, что приводит к снижению их подвижности. Эти трудности могут быть уменьшены при использовании полевого эффекта для уменьшения толщины полупроводника. При помещении любого полевого транзистора в поперечное магнитное поле в его канале возникает холловское электрическое поле, как и в любом полупроводнике с двумя омическими контактами на концах. Простейший полевой магнитотранзистор (ПМТ) отличается от обычного лишь тем, что в его канале имеются дополнительные боковые омические контакты для съема эдс Холла. На рис. 5, a, b показана структура МДП магнитотранзистора с каналом n -типа. При работе в режиме обеднения канала толщина канала d минимальна вблизи стока (D). В соответствии с (5) напряжение Холла максимально в том месте, где d минимально. Следовательно, холловские контакты имеют смысл располагать вблизи стока. Увеличивая отрицательное напряжение на затворе, можно уменьшить d

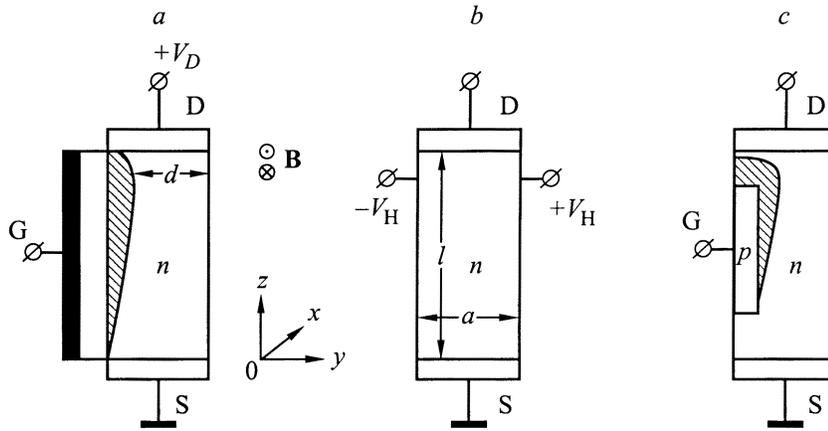


Рис. 5. Структура МДП магнитотранзистора (а), его сечение по плоскости xOy (b) и структура полевого магнитотранзистора с p - n -переходом (с).

до очень малых значений и таким образом увеличить V_H . Одновременно с уменьшением d канал удаляется от поверхности, что уменьшает ее влияние на рассеяние носителей. Аналогичным образом действует и ПМТ с p - n -переходом в качестве затвора (рис. 5, с). Методика расчета V_H ПМТ показана в работе [2]. При этом используется формула (5), в которой d является функцией V_G , V_D и координаты z . Для режима насыщения ПМТ с p - n -переходом (при затворе, замкнутом с истоком, $V_G = 0$) расчет дает выражение

$$V_H = a\mu_n B \frac{V_{0G} k \sin \beta (1 - 2 \cos \beta)}{e \sqrt{l - (1 - \frac{27kz}{2l})^2}}, \quad (6)$$

где

$$\beta = \frac{1}{3} \arccos(1 - 27k \frac{z}{2l}) + \frac{\pi}{3}, \quad k = \frac{4}{9} \frac{V_D}{V_{0G}} \left(1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{V_D}{V_{0G}}}\right).$$

Расчеты показывают, что величина эдс Холла в МДП транзисторе и в полевом транзисторе с p - n -переходом практически одинаковы при равных размерах и электрофизических параметрах канала. Экспериментальная чувствительность кремниевых магнитотранзисторов с каналом p -типа при $I_D = 0.1$ мА порядка $400 \text{ В}/(\text{А} \cdot \text{Тл})$, что в $5 \div 10$ раз выше чувствительности датчика Холла из аналогичного материала.

По аналогии с ДМТ разработан датчик магнитного поля на основе двух полевых транзисторов, где роль датчика Холла выполняет полупроводниковая область затвора, которая является общей для двух каналов. Сопротивления каналов вместе с нагрузочными резисторами образуют мост, в диагональ которого включен вольтметр. В отсутствие магнитного поля мост сбалансирован и напряжение на вольтметре $V = 0$. В магнитном поле, при протекании через контакты затвора тока, в нем, как и в любом полупроводнике, возникает эдс Холла. Одна половина эдс ($-V_H/2$) приложена к левому каналу и является запирающей, а вторая ($+V_H/2$) — к правому

каналу и является отпирающей. Вследствие этого сопротивление левого канала растет, а правого уменьшается, что приводит к разбалансу моста, и величина V растет с увеличением магнитного поля.

В отличие от одноканального в двухканальном ПМТ транзисторы действуют и как усилительные элементы, вследствие чего магниточувствительность повышается на 1–2 порядка и достигает чувствительности двухколлекторного магнитотранзистора. Несмотря на сложную технологию (по сравнению с ДМТ), двухканальный ПМТ перспективен для измерения слабых магнитных полей, поскольку имеет низкий уровень собственных шумов, как и все полевые транзисторы, по сравнению с биполярными.

6. Магнитоуправляемые микросхемы

Магниточувствительные элементы в основном используются в устройствах двух типов: в измерительных устройствах, где выходной сигнал является функцией магнитной индукции, и в переключающих устройствах, где выходной сигнал изменяется от "0" до "1" при достижении пороговой величины индукции магнитного поля B_{thr} . Устройства обоих типов изготавливаются в настоящее время в виде интегральной микросхемы [35–42] по стандартной технологии кремниевых микросхем. Поскольку микросхема должна работать в обычном интервале температур $-45 \div 30^\circ \text{C}$, одной из важнейших задач является обеспечение ее стабильности при изменении температуры, т.е. независимости величины выходного сигнала от температуры. Один из способов решения этой задачи рассмотрен на примере микросхемы, входная часть которой приведена на рис. 6.

Схема содержит ДМТ, дифференциальный усилитель на двух транзисторах АТ и токозадающий транзистор СТ. Как отмечено выше (рис 3), выходное напряжение ДМТ с ростом температуры уменьшается, что при использовании простого усилителя приводит и к уменьшению его выходного сигнала. Для компенсации этого в схему

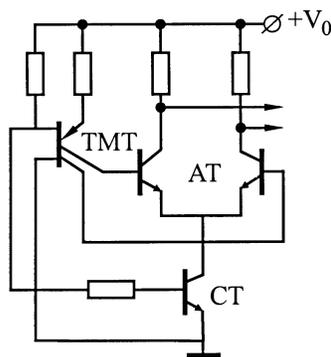


Рис. 6. Схема входной части микросхемы с двухколлекторным магнитотранзистором на рисунке: ТМТ (two-collector magnetotransistor) — двухколлекторный магнитотранзистор (в тексте ДМТ), АТ — дифференциальный усилитель на двух транзисторах, СТ — токозадающий транзистор.

введен транзистор СТ, входное напряжение которого снимается с межбазовой цепи ДМТ. Межбазовая цепь ДМТ (рис. 3) по существу является резистором и, как всякое полупроводниковое сопротивление, может выполнять роль терморезистора. С ростом температуры сопротивление кремниевого резистора увеличивается (вследствие уменьшения подвижности носителей), что приводит к увеличению падения напряжения на нем, которое в свою очередь подается на вход СТ. Это увеличивает ток питания токозадающего транзистора СТ и транзисторов дифференциального усилителя АТ с ростом температуры. Увеличение тока питания через любой биполярный транзистор (при малых токах) приводит к росту его коэффициента усиления [31]. Соответственно растет коэффициент усиления дифференциального усилителя, что компенсирует уменьшение его входного сигнала V_{in} , и выходной сигнал усилителя не зависит от температуры, а определяется только величиной B . Таким образом удается практически полностью компенсировать температурную нестабильность выходного сигнала [35,40].

В обычных интегральных схемах элементы схемы отделены друг от друга разделительными областями, а соединения между ними осуществляются токопроводящими дорожками на поверхности кристалла. Эти области и дорожки значительно увеличивают размеры микросхемы и усложняют технологию. В связи с этим в последние годы развивается направление функциональной электроники, в устройствах которой соседние элементы имеют объемную связь. Одним из примеров таких микросхем являются интегральные схемы, соседние транзисторы в которых имеют общие области, т.е., например, коллекторная область одного транзистора является базой другого, и сигнал между ними передается путем непосредственного переноса инжектированных носителей из одного транзистора в другой. Такая объемная связь использована в конструкциях ряда магнитоприборов. Как видно из рис. 6, области коллекторов ДМТ и области баз СТ в микросхеме имеют один тип проводимости. Это послужило основой создания конструкции магнитоприбора,

где область коллектора ДМТ является одновременно базой соответствующего СТ.

Для увеличения магниточувствительности возможно соединение нескольких магниточувствительных элементов в одной микросхеме. Примером такого соединения является мост из четырех одноколлекторных магнитотранзисторов, причем в одной паре противоположно расположенных МТ ток растет в магнитном поле, а в другой паре уменьшается. В такой микросхеме также могут использоваться общие области в двух соседних МТ (эмиттер двух МТ может быть общим, эмиттер одного МТ может быть коллектором другого МТ и т.п.). Аналогичный мост может быть составлен из двух двухколлекторных магнитотранзисторов с противоположным типом проводимости.

Если с датчика необходимо получить переменный выходной сигнал, являющийся функцией величины постоянного магнитного поля, применяется ДМТ, межбазовая область которого и эмиттер выполняют одновременно функции однопереходного транзистора (ОПТ) и включаются по схеме генератора на ОПТ. Эмиттер производит переменную инжекцию носителей в базу, которые перераспределяются между коллекторами так же, как и в обычном ДМТ, работающем на постоянном токе (рис. 3). Переменная инжекция обуславливает и появление между коллекторами выходного переменного напряжения, пропорционального величине B . Структура магнитоприбора в этом случае объединяет в себе ДМТ и ОПТ, имеющие общую базу и эмиттер [38,43]. Рассмотренное направление создания магнитоуправляемых микросхем является наиболее перспективным, так как в этом случае сокращаются общие размеры полупроводниковой пластины, уменьшается количество соединений между элементами схемы, упрощается технология создания микросхем и уменьшается их стоимость.

К полупроводниковым микросхемам можно отнести и оптроны — приборы, состоящие из входного светодиода и выходного фотоприемника, между которыми существует оптическая связь и обеспечена электрическая изоляция [39]. При изменении входного тока изменяется световой поток, который падает на фотоприемник. Это приводит к изменению выходного сигнала. Если в роли фотоприемника использовать элемент, чувствительный к магнитному полю, то можно получить оптрон, выходной сигнал которого может одновременно управляться как светом, так и внешним магнитным полем. Экспериментальная проверка этого положения проводилась на оптронах двух типов: во-первых, в качестве фотоприемника применялись фототранзисторы, а во-вторых, — фототиристоры. Оптроны изготавливались на базе промышленных оптронов типа АОУ102, АОУ103 [41]. Показано, что магнитное поле с индукцией 0.4 Тл приводит к такому же изменению участка с отрицательным сопротивлением на ВАХ фототиристора, как и излучение светодиода при токе 8 мА (максимальный ток 20 мА). Двойное бесконтактное управление выходным параметром оптрона позволяет значительно расширить его функциональные возможности.

Заключение

Следует подчеркнуть, что, несмотря на большое количество созданных магнитоприборов, разработанные магниточувствительные элементы не дублируют друг друга, а каждый имеет свои определенные преимущества, реализуемые в конкретных схемах применения. Так, однопереходный транзистор позволяет с минимальным количеством элементов схемы реализовать датчик магнитного поля с переменным сигналом на выходе; биполярный транзистор имеет наименьшие размеры и количество выводов; двухколлекторный магнитотранзистор имеет наибольшую магнитоувствительность; магнито-тиристор предпочтителен в качестве магнитоуправляемого переключателя мощных токов; полевой магнито-транзистор имеет меньший уровень собственных шумов и применяется для измерения слабых магнитных сигналов.

Магнитоприборы находят широкое применение в современной измерительной технике и автоматике. На их основе созданы электронные компасы, устройства считывания магнитных записей, датчики разных величин (давления, перемещения, скорости оборотов и т.д.), бесконтактные переключатели, бесколлекторные электродвигатели постоянного тока, системы электронного зажигания автомобилей и много других устройств. Это обеспечивает их дальнейшее развитие и совершенствование.

Список литературы

- [1] В.И. Стафеев, Э.И. Каракушан. *Магнитодиоды* (М., Наука, 1975).
- [2] И.М. Викулин, Л.Ф. Викулина, В.И. Стафеев. *Гальваномагнитные приборы* (М., Радио и связь, 1983).
- [3] Г.А. Егизарян, В.И. Стафеев. *Магнитодиоды, магнитотранзисторы и их применение* (М., Радио и связь, 1987).
- [4] С.А. Гаряинов, Ю.С. Тиходеев. *Физические модели полупроводниковых приборов с отрицательным сопротивлением* (М., Радио и связь, 1997).
- [5] И.М. Викулин, Л.Ф. Викулина, М.А. Глауберман, Ю.А. Запорожченко. РЭ, **24**, 1709 (1972).
- [6] И.М. Викулин, Л.Ф. Викулина, М.А. Глауберман, Ю.А. Запорожченко. РЭ, **31**, 2552 (1979).
- [7] И.М. Викулин, Л.Ф. Викулина, М.А. Глауберман, Ю.А. Запорожченко. РЭ, **25**, 2384 (1973).
- [8] И.М. Викулин, Л.Ф. Викулина, М.А. Глауберман, Ю.А. Запорожченко. РЭ, **26**, 2123 (1974).
- [9] И.М. Викулин, Л.Ф. Викулина, М.А. Глауберман, Ю.А. Запорожченко. ФТП, **7**, 2363 (1973).
- [10] И.М. Викулин, М.А. Глауберман, Л.Ф. Викулина, Н.А. Канищева. ФТП, **9**, 1534 (1975).
- [11] Л.Ф. Викулина, Э. Кладиева. РЭ, **30**, 1668 (1985).
- [12] И.М. Викулина, М.А. Глауберман, Л.Ф. Викулина, Ю.А. Запорожченко. ФТП, **8**, 580 (1974).
- [13] Л.Ф. Викулина, В.В. Козел. РЭ, **30**, 824 (1985).
- [14] И.М. Викулин, Л.Ф. Викулина, М.А. Глауберман. ПТЭ, № 5, 181 (1974).
- [15] Д.М. Козлов, Г.И. Рекалова, И.М. Митникова и др. ФТП, **11**, 568 (1977).

- [16] И.М. Митникова, Д.М. Козлов, Г.И. Рекалова. ФТП, **12**, 26 (1978).
- [17] H.P. Baltés, R.S. Popovic. Proc. IEEE, **74**, 1107 (1986).
- [18] V. Zieren, B.P. Duynham. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-19**, 83 (1982).
- [19] R.S. Popovic, H.P. Baltés. Sens. Actuators, **4**, 155 (1983).
- [20] V. Zieren, S. Middelboek. Sens. Actuators, **2**, 251 (1982).
- [21] G.I. Rekalova, D.M. Kozlov, T.V. Persiyarov. IEEE Trans. Magn., **MAG-17**, 3373 (1981).
- [22] Ch.S. Roumenin. Sens. Actuators, **6**, 19 (1984).
- [23] V. Zieren, S. Kordic, S. Middelhoek. IEEE Electron. Dev. Lett., **EDL-3**, 394 (1982).
- [24] A.W. Vinal, N.A. Masnari. IEEE Electron. Dev. Lett., **EDL-3**, 396 (1982).
- [25] И.М. Викулин, Н.А. Канищева, М.А. Глауберман. ФТП, **11**, 587 (1977).
- [26] И.М. Викулин, М.А. Глауберман, Н.А. Канищева. ФТП, **10**, 785 (1976).
- [27] И.М. Викулин, М.А. Глауберман, Н.А. Канищева. ФТП, **11**, 1609 (1977).
- [28] И.М. Викулин, М.А. Глауберман, Н.А. Канищева. ФТП, **15**, 399 (1981).
- [29] И.М. Викулин, М.А. Глауберман, Н.А. Канищева и др. ФТП, **15**, 479 (1981).
- [30] В.А. Кузьмин *Тиристоры малой и средней мощности* (М., Сов. радио, 1971).
- [31] И.М. Викулин, В.И. Стафеев. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Радио и связь, 1990).
- [32] И.М. Викулин, Ю.А. Запорожченко, В.В. Гаршенин, Ю.Ф. Купцов. ФТП, **9**, 2360 (1975).
- [33] И.М. Викулин, М.А. Глауберман, Н.А. Канищева. ФТП, **12**, 1609 (1978).
- [34] В.В. Алексеев, И.М. Викулин. ПТЭ, № 2, 165 (1984).
- [35] А.Н. Марченко. *Магнитоуправляемые интегральные схемы* (1986) сер. 2, вып. 3, с. 72.
- [36] М. Опенгеймер. *Электроника*, № 16, 20 (1971).
- [37] О.К. Хомерики. *Полупроводниковые преобразователи магнитного поля* (М., Энергия, 1986).
- [38] И.М. Викулин, Л.Ф. Викулина, М.А. Глауберман, Н.А. Канищева. ПТЭ, № 3, 250 (1981).
- [39] Ю.Р. Носов. *Оптоэлектроника* (М., Радио и связь, 1989).
- [40] Л.Ф. Викулина. Техн. и констр. в электрон. аппаратуре, № 3, 52 (1998).
- [41] Л.Ф. Викулина. ПТЭ, № 6, 100 (1999).
- [42] Л.Ф. Викулина. ПТЭ, № 2, 145 (2000).
- [43] Л.Ф. Викулина, М.А. Глауберман. *Физика сенсоров температуры и магнитного поля* (Одесса, Маяк, 2000).

Редактор Т.А. Полянская

Magnetosensitive transistors (a review)

I.M. Vikulin, L.F. Vikulina, V.I. Stafeev

Academy of Communication of Ukraine,
65021 Odessa, the Ukraine

Abstract In this paper we have extended physical principles of operation of transistors which makes it possible to govern the current by external magnetic field. Considered are unijunction, bipolar and field magnetotransistors, as well as their derivatives—magnetotransistors and magnetocontrollable integrated circuits. The basic directions of applications are marked.