

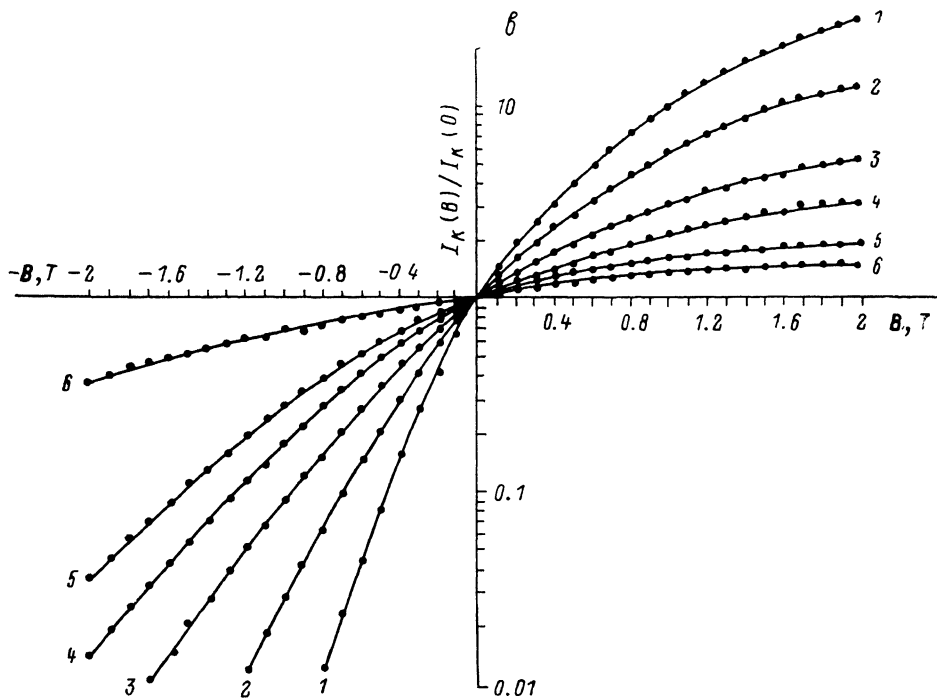
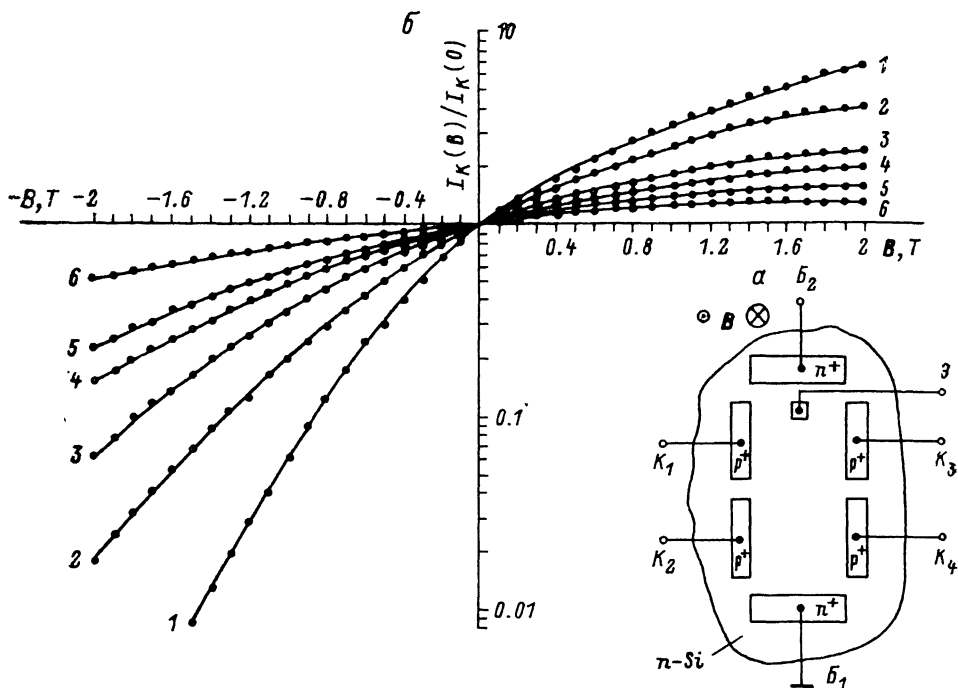
## РОЛЬ ШНУРОВАНИЯ ТОКА В МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПЛАНАРНЫХ МАГНИТОТРАНЗИСТОРОВ

Руменин Ч. С.

Показано, что шнурование тока в планарных магнитотранзисторах с ускоряющим полем в базе приводит к экспоненциальной зависимости коллекторного тока от магнитного поля. Этот эффект обусловлен магнитным управлением в базовой области положением шнура вместе с профилем концентрации инжектированных носителей вне его.

1. В последние годы кремниевые биполярные магнитотранзисторы являются одними из интенсивно исследованных датчиков магнитного поля. Они характеризуются высокой чувствительностью, большой пространственной разрешающей способностью, легко реализуются и интегрируются с другой электроникой при использовании стандартной планарной технологии. Двухколлекторные планарные магнитотранзисторы (ДПМ) представляют собой биполярные структуры, в которых через дополнительный второй омический контакт  $B_2$  создается электрическое поле, ускоряющее неосновные носители. Эмиттер с небольшой площадью расположен вблизи контакта  $B_2$  и симметричен двум коллекторам  $K_1$  и  $K_2$ . Согласно существующим представлениям, при направлении вектора магнитной индукции  $\mathbf{B}$ , нормальном к плоскости ДПМ, их магниточувствительность обусловлена отклонением инжектированных носителей силой Лоренца и связанным с этим дисбалансом коллекторных токов. Если базовая область ДПМ ограничена, эффект перераспределения носителей усиливается ЭДС Холла межбазового тока  $I_{B_1 B_2} \equiv I_B$ . В рамках этой модели предполагается также линейная зависимость коллекторных токов  $I_{K_1}(\mathbf{B})$  и  $I_{K_2}(\mathbf{B})$  от магнитной индукции [1-6]. С другой стороны, эти биполярные преобразователи можно рассматривать и как однопереходные транзисторы (цепь  $B_1 - \mathcal{E} - B_2$ ). Хорошо известно, что в таких приборах вольтамперная характеристика  $I_{\mathcal{E}}(U_{\mathcal{E} B_1})$  при токе  $I_B > 0$   $S$ -образная и содержит участок отрицательного сопротивления, причем ток по сечению распределен неравномерно [2]. В настоящей работе показано, что это шнурование тока в ДПМ приводит к новому для данного класса датчиков магниточувствительному эффекту, при котором зависимость коллекторного тока от магнитного поля экспоненциальна.

2. Идея эффекта «шнуровой магниточувствительности» основывается на существовании токового шнура с большой плотностью инжектированных носителей в участке отрицательного сопротивления на кривой  $I_{\mathcal{E}}(U_{\mathcal{E} B_1})$  при токе  $I_B > 0$ . Качественный анализ этого физического механизма чувствительности проведен для  $p-n-p$ -ДПМ (полученные выводы аналогичны для  $n-p-n$ -приборов). Токовый шнур дырок распространяется от эмиттера  $\mathcal{E}$  к основному базовому контакту  $B_1$  в центральном конусном углу  $\varphi$ , зависящем от рабочей точки магнитотранзистора, определенной входными токами  $I_{\mathcal{E}} > 0$  и  $I_B > 0$ . При низких уровнях инжекции и высоких значениях межбазового тока  $I_B$  угол  $\varphi$  мал, а с увеличением тока  $I_{\mathcal{E}}$  или уменьшением  $I_B$  он возрастает. Вне токового шнура плотность неосновных носителей при однородной базовой области падает по экспоненциальному закону  $\Delta p_i(x) = p_i(x_i) \exp[(x_i - x)/L_{\varphi\phi}]$ , где  $x$  — расстояние от центральной оси шнура, симметричной коллекторам  $K_1$  и  $K_2$  при поле  $\mathbf{B} = 0$ ,  $x_i$  — радиус данного  $i$ -сечения, нормального к распространению шнура,  $p_i$  — концентрация неосновных носителей на грани шнура



Планарный магнитотранзистор с ускоряющим полем в базовой области и секционированными коллекторами (а) и зависимости коллекторного тока от магнитного поля для коллектора  $K_1$  (б, е).

Эмиттерный ток  $I_E$ , мА: 1 — 0.5, 2 — 1, 3 — 2, 4 — 3, 5 — 4, 6 — 2 (коллектор  $K_2$ ). Межбазовый ток  $I_B$ , мА  $\delta$  — 10,  $\epsilon$  — 20,  $T = 20^\circ C$ .

для  $i$ -сечения, а  $L_{3\text{дф}}$  — параметр, связанный с диффузией носителей вне шнура при  $x \geq x_i$ . Перпендикулярное поверхности ДПМ магнитное поле  $\mathbf{B}$  через силы Лоренца (и поле Холла, если база ограничена) управляет в области между коллекторами  $K_1$  и  $K_2$  одновременно положением токового шнура и профилем концентрации дырок вне его. Следовательно, при достаточно малых углах  $\varphi$  зависимость коллекторного тока  $I_K(B)$  от индукции  $\mathbf{B}$  будет аппроксимироваться экспоненциальным законом  $I_K(B) \sim \exp(B)$ . Этот эффект в ДПМ будет выражен сильнее в частях коллекторов, расположенных вблизи эмиттера  $\mathcal{E}$ . В области до основного контакта  $B_1$  шнур расширяется, экспоненциальный профиль распределения дырок размывается и зависимость  $I_K(B)$  имеет тенденцию к линейности. При высоких уровнях инжекции угол  $\varphi$  большой, шнур размыт и характеристика  $I_K(B)$  линейна. В этом аспекте выводы предложенной модели шнуровой магниточувствительности согласуются с существующей теорией ДПМ. Особенностью этого механизма является и то, что для данного коллектора  $K_1$  или  $K_2$  при малых углах  $\varphi$  через полярность и величину магнитной индукции  $\mathbf{B}$  можно осуществить переход от экспоненциального режима к линейному режиму работы ДПМ.

3. Качественная модель влияния шнурования тока на магниточувствительность ДПМ экспериментально проверена на серии кремниевых  $p^+ - n - p^+$  структур, реализованных методом стандартной планарной технологии и схематически показанных на рисунке, а. С целью исследования магниточувствительности в разных частях обоих протяженных коллекторов коллекторы секционировались соответственно  $K_1 - K_2$  и  $K_3 - K_4$ . В качестве базового материала для образцов использован кремний  $n$ -типа проводимости с объемным сопротивлением  $\rho \sim 7.5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  ( $n_0 \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ). Глубина залегания сильно легированных  $p^+$ - и  $n^+$ -областей составляет 1.5 мкм, а концентрация соответственно бора и фосфора  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Приборные данные следующие: размеры эмиттера  $\mathcal{E} - 15 \times 15 \text{ мкм}$ , коллекторов  $K_1, K_2, K_3$  и  $K_4 - 30 \times 100 \text{ мкм}$ , контактов  $B_1$  и  $B_2 - 50 \times 150 \text{ мкм}$ , расстояние между контактами  $B_1$  и  $B_2 - 250 \text{ мкм}$ . В экспериментах использована схема включения с общей базой  $B_1$ . Эмиттер  $\mathcal{E}$  и второй базовый контакт  $B_2$  функционируют в режиме генераторов тока ( $I_{\mathcal{E}} = \text{const}$ ,  $I_{B_2} = \text{const}$ ). При этом обе полярности эмиттера  $\mathcal{E}$  и контакта  $B_2$  совпадают. Исследованы зависимости отдельных коллекторных токов  $I_{K_1}$ ,  $I_{K_2}$ ,  $I_{K_3}$  и  $I_{K_4}$  от направления и индукции магнитного поля  $B \leq 2 \text{ Т}$ . На рисунке, б приведены некоторые типичные зависимости  $I_K(B)/I_K(0)$ , например, для коллекторов  $K_1$  и  $K_2$ . Так как ВАХ  $I_{\mathcal{E}}(U_{\mathcal{E}B_1})$  однопереходного транзистора  $B_1 - \mathcal{E} - B_2$  при  $I_{B_2} > 0$  состоит из участков с положительным и отрицательным дифференциальными сопротивлениями, все токи эмиттера  $I_{\mathcal{E}}$  на рисунке соответствуют участку отрицательного сопротивления. Аналогичные характеристики получаются и для коллекторов  $K_3$  и  $K_4$  при учете полярности магнитного поля  $\mathbf{B}$ . Установлено, что для коллекторов  $K_1$  и  $K_3$ , расположенных вблизи эмиттера, при низких уровнях инжекции с помощью полярности и величины индукции поля  $\mathbf{B}$  можно осуществить на характеристике  $I_K(B)$  переход от экспоненциального закона к линейному. Для коллекторов  $K_2$  и  $K_4$  при тех же входных токах  $I_{\mathcal{E}}$  и  $I_{B_2}$  экспоненциальное поведение выражено намного слабее и наблюдается тенденция к линейности. При больших уровнях инжекции экспериментальные данные для выходных характеристик прибора согласуются с выводами существующей теории ДПМ.

4. В исследованных структурах магнитное управление положением шнура вместе с профилем концентрации дырок связано только с лоренцовым отклонением, так как базовая область специально не ограничена и поле Холла тока  $I_B$  отсутствует. На основе полученных результатов можно прийти к выводу о существенной роли влияния шнурования тока инжектированных носителей на магниточувствительность планарных магнитотранзисторов с отрицательным сопротивлением  $I_{\mathcal{E}}(U_{\mathcal{E}B_1})$ . Этот физический механизм приводит к нестандартно высоким значениям изменения коллекторных токов в магнитном поле для данного класса преобразователей. Например, при токе  $I_{\mathcal{E}} = 0.5 \text{ мА}$  и индукции  $B = +1 \text{ Т}$  (см. рисунок, б) отношение  $I_{K_1}(+1 \text{ Т})/I_{K_1}(0)$  составляет  $\sim 10$ . Кроме принципиального характера, исследованный гальваномантический эффект расширяет потенциальные возможности оптимизации магнитотранзисторных датчиков.

Л и т е р а т у р а

- [1] Викулин И. М., Канищева Н. А., Глауберман М. А. — ФТП, 1976, т. 10, в. 4, с. 785—787.
- [2] Викулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов. М., 1980. 296 с.
- [3] Викулин И. М., Глауберман М. А., Канищева Н. А., Егиазарян Г. А., Манвелян Ю. С. — ФТП, 1981, т. 15, в. 2, с. 399—403.
- [4] Викулин И. М., Викулина Л. Ф., Стафеев В. И. Гальваноманнитные приборы. М., 1983. 102 с.
- [5] Рекалова Г. И., Козлов Д. М., Шахов А. А., Таирова Д. А. — ФТП, 1985, т. 19, в. 9, с. 1706—1709.
- [6] Baltes H. P., Popović R. S. — Proc. IEEE, 1986, v. 74, N 8, p. 1107—1132.

Лаборатория геотехники  
Болгарской Академии наук  
НРБ, София

Получена 23.12.1987  
Принята к печати 1.04.1988

