

# Перенос носителей заряда в двухколлекторном магнитотранзисторе

© М.А. Глауберман, В.В. Козел, А.В. Нахабин

Учебно-научно-производственный центр при Одесском государственном университете, 270063 Одесса, Украина

(Получена 27 октября 1999 г. Принята к печати 25 ноября 1999 г.)

Представлен численный анализ переноса носителей заряда в латеральных двухколлекторных магнитотранзисторах. Были получены результирующее распределение концентрации инжектированных носителей в базе магнитотранзистора при наличии магнитного поля, а также зависимость чувствительности прибора от размера эмиттера.

Среди полупроводниковых магниточувствительных структур выделяются двухколлекторные магнитотранзисторы (ДМТ), которые обладают при обычных условиях высокой магниточувствительностью ( $\approx 100$  мкА/Тл и более), что значительно расширяет функциональные возможности гальваномагнитных преобразователей.

Данная работа посвящена численному анализу магниточувствительности горизонтальных планарных магнитотранзисторов, а именно исследованию распределения инжектированных неосновных носителей заряда для структуры двухколлекторного магнитотранзистора, макет которого представлен на рис. 1. До настоящего времени эта задача решалась методом функции Грина [1]. Однако такой метод решения неточен ввиду следующих недостатков: двойные суммы бесконечных рядов заменяются конечным рядом, тогда как их сходимость оставляет желать лучшего; использование эмиттера произвольной геометрии усложняет расчеты. Кроме того, в работе [1] механизмы магниточувствительности ДМТ связывались лишь с отклонением траекторий инжектированных носителей под действием сил Лоренца и холловского поля, но совершенно не учитывался эффект пространственной модуляции инжекции эмиттера под действием холловского поля [2], что необходимо сделать, поскольку практически мы имеем дело с протяженным эмиттером. Отсюда понятна необходимость использования численного моделирования для максимального учета комбинации основных физических эффектов, присущих ДМТ, и с учетом соответствующих граничных условий, а также для усовершенствования его структуры.

Как показано в работе [1], уравнение, описывающее распределение инжектированных носителей заряда, при наличии поперечного магнитного поля можно представить в виде

$$B \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) - A \frac{\partial p}{\partial x} + M \frac{\partial p}{\partial y} - p = -\rho(x, y) \delta_{xx'} \delta_{yy'}, \quad (1)$$

$$\rho = \rho_0 \exp \left( \frac{qU_{e0}}{kT} \right), \quad (2)$$

где  $U_{e0}$  — напряжение на эмиттере,  $p$  — концентрация дырок, а под коэффициентами  $B$ ,  $A$ ,  $M$  понимается

$$B = \frac{kT}{q} \mu_p \tau_p, \quad A = \frac{\mu_p J_n}{\mu_n q n_0} \tau_p,$$

$$M = \frac{3\pi}{8} \frac{\mu_p J_n}{\mu_n q n_0} (\mu_n B_z + \mu_p B_z) \tau_p.$$

Здесь  $n_0$  и  $p_0$  — термически равновесные концентрации электронов и дырок,  $J_n$  — плотность электрического тока основных носителей заряда в базе, а  $\mu_n$ ,  $\tau_n$ ,  $\mu_p$ ,  $\tau_p$  — подвижность и время жизни электронов и дырок соответственно. Под  $\rho(x, y)$  понимается мощность эмиттера. Из работы [2] следует, что наличие холловского поля  $E_H$  (возникающего вследствие протекания тока основных носителей между базами  $B^+$  и  $B^-$ ) создает в базе распределение потенциала  $\varphi_H = |E_H \times y|$ , поэтому возникает пространственная модуляция инжекции вдоль эмиттера, а значит величина  $\rho$  оказывается перераспределенной вдоль оси  $y$  по закону

$$\rho = \rho_0 \exp \left[ \frac{q}{kT} (U_{e0} + |E_H \times y|) \right]. \quad (3)$$

Уравнение (1) является линейным дифференциальным уравнением 2-го порядка эллиптического типа с двумя независимыми переменными. Для его численного решения используем метод конечных разностей [3]. Разобьем базу прямоугольной сеткой с шагом  $STX = 3$  мкм и  $STY = 7$  мкм по осям  $0x$  и  $0y$  (рис. 1). Процесс решения уравнения (1) заключается в замене дифференциального уравнения системой разностных уравнений. Концентрация инжектированных в базу носителей определяется в каждом из узлов. На практике задача решалась с введением ускоряющего множителя Либмана и методом чере-

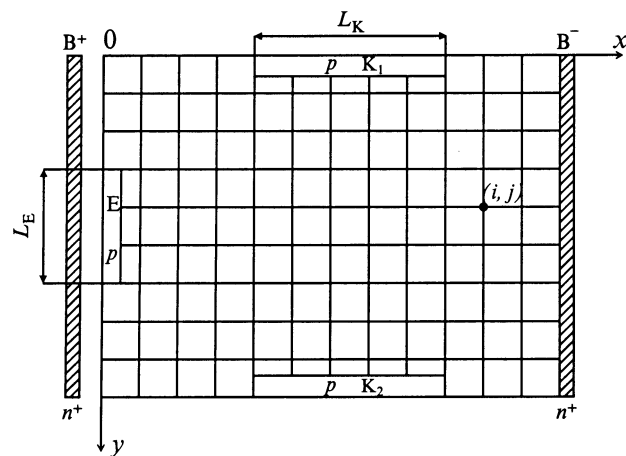
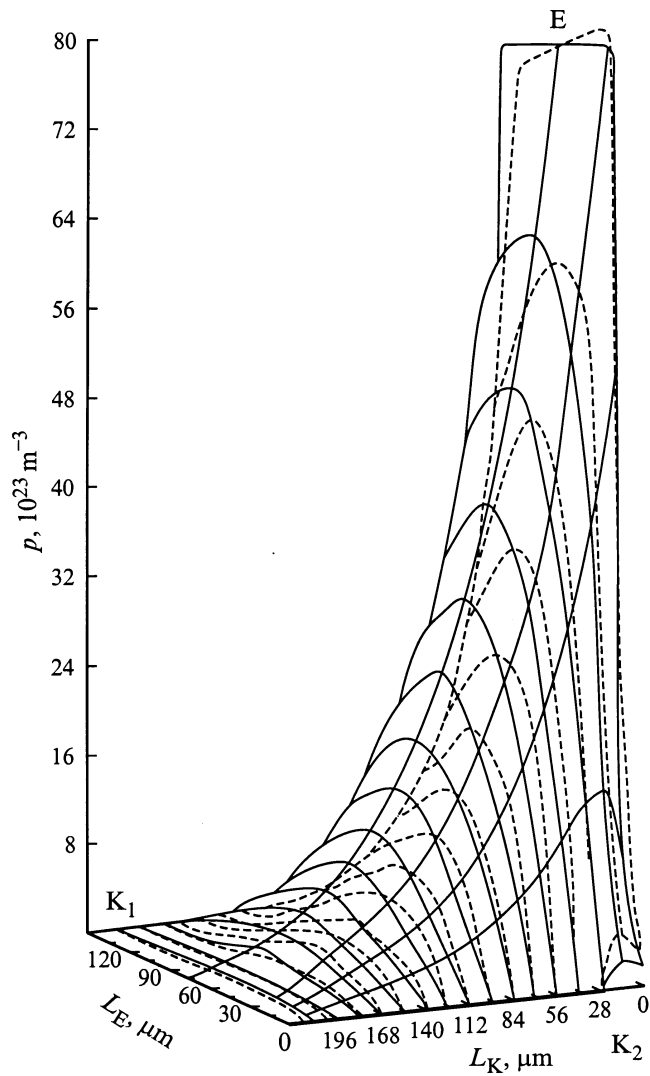


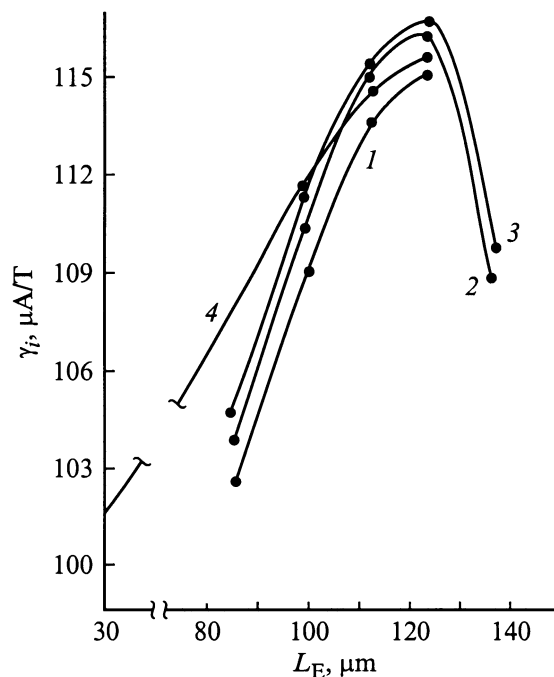
Рис. 1. Структура моделируемого планарного двухколлекторного магнитотранзистора.  $E$  — эмиттер;  $K_1$  и  $K_2$  — коллекторы;  $B^+$  и  $B^-$  — базовые области.



**Рис. 2.** Распределение концентрации инжектированных носителей в базе двухколлекторного магнитотранзистора при отсутствии магнитного поля (сплошные линии) и в магнитном поле 0.6 Тл (штриховые).  $I_K = 224$  мкм,  $I_E = 87$  мкм.

дующихся направлений [3]. Граничные условия выбраны в предположении, что на эмиттере соблюдается условие (3) и поток носителей через поверхности и границы исследуемой структуры отсутствует. Между базами  $V^+$  и  $V^-$  протекает однородный ток основных носителей, плотность которого  $J_n = 6 \cdot 10^3$  А/м<sup>2</sup>. Размер базы  $150 \times 350$  мкм. Размеры эмиттера и коллекторов варьировались в указанных выше пределах. Самосогласованный разностно-итерационный процесс прекращался при максимальной невязке двух соседних итераций одного узла менее 0.01%. Результат численного решения показан на рис. 2. Как видно, при включении магнитного поля наблюдается смещение максимума концентрации в сторону одного из коллекторов, а также более резкое падение концентрации вдоль базы. Это объясняется тем, что в отсутствие магнитного поля инжектированные носители заряда проходили в базе бóльший путь до того, как они

попадали в коллектор. В магнитном поле диффузионная длина этих носителей уменьшается, т.е. большинство инжектированных носителей отклоняется и попадает в коллектор в области базы, ближайшей к эмиттеру, и дальнейшего участия в перераспределении не принимает, а значит нет необходимости создавать слишком протяженные коллекторы. Что касается выбора оптимального размера коллекторов, то данный вопрос достаточно освещен в работе [4]. Мы же здесь приведем полученные на основании результатов численного моделирования зависимости магниточувствительности  $\gamma_i$  от длины эмиттера (рис. 3) при заданных расстояниях между коллекторами и базами. Пространственная модуляция инжекции вдоль эмиттера влияет на магниточувствительность, причем, с одной стороны, увеличение протяженности эмиттера увеличивает величину разностного сигнала, снимаемого с коллекторов, а с другой стороны, по мере приближения краев эмиттера к коллекторам уменьшается вклад от перераспределения носителей в объеме базы под действием магнитного поля. Действие указанных факторов, а также рекомбинация носителей в базе ДМТ и определяет оптимальные размеры эмиттера. Как видно на рис. 3, характер поведения магниточувствительности не изменяется и оптимальная магниточувствительность соответствует структуре с длиной эмиттера, равной примерно 4/5 расстояния между коллекторами, а влияние протяженности коллекторов незначительно. Здесь же (рис. 3) приведена экспериментальная зависимость  $\gamma_i$  от длины эмиттера, которая совпадает с расчетной при токе эмиттера  $I_E = 0.6$  мА, токе базы  $I_{BB} = 3$  мА и магнитном



**Рис. 3.** Зависимости токовой магниточувствительности двухколлекторного магнитотранзистора  $\gamma_i$  от длины эмиттера  $L_E$  при длинах коллекторов  $L_K$ , мкм: 1 — 147, 2 — 182, 3 — 224, 4 — 180. Кривые 1–3 — расчет, 4 — эксперимент.

поле 0.3 Тл. Итак, рассмотренный метод моделирования является эффективным средством для выбора наиболее оптимальной топологии (например, по магниточувствительности) двухколлекторных магнитотранзисторов.

## Список литературы

- [1] И.М. Викулин, М.А. Глауберман, Н.А. Канищева. ФТП, **11**, 645 (1977).
- [2] A.W. Vinal, N.A. Masnari. IEDM Tech. Dig., **12**, 308 (1982).
- [3] Д. Мак-Кракен, У. Дорн. *Численные методы и программирование на Фортране* (М., Мир, 1977).
- [4] И.М. Викулин, М.А. Глауберман, Н.А. Канищева, Г.А. Егизарян, Ю.С. Манвелян. ФТП, **15**, 399 (1981).

*Редактор Т.А. Полянская*

## Charge carrier transfer in a two-collector magnetotransistor

M.A. Glauberman, V.V. Kozel, A.V. Nakhabin

Odessa State University,  
270063 Odessa, the Ukraine