

ТИРИСТОР, ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫЙ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Викулин И. М., Глауберман М. А., Канищева Н. А., Козел В. В.

Проанализирован механизм магниточувствительности симметричной тиристорной структуры на основе математического моделирования распределения концентрации инжектированных носителей заряда в длинной базе составляющих горизонтальных транзисторов при наличии внешнего магнитного поля. Показано, что при минимальной длине эмиттера (технологически допустимой) конкурирующим механизмом магниточувствительности является эффект отклонения инжектированных носителей заряда в базе под действием силы Лоренца и электрического поля Холла, в сочетании с тиристорным эффектом обеспечивающий при смене полярности магнитного поля не только включение, но и выключение составляющих тиристор. Теоретическое и экспериментальное значения верхней границы коэффициента выключения соответственно равны $\beta_{\text{теор}}=1.25$ и $\beta_{\text{элс}}=1.17$.

В настоящее время актуальным является вопрос о различных электронных устройствах, способных заменить обычные контактные переключатели. В связи с этим интересны разработки бесконтактных переключателей тока на базе двухколлекторного магнитотранзистора (ДМТ) [1], осуществляющего коммутацию тока в выходной цепи под воздействием внешнего магнитного поля. Схематичное решение в данном случае можно упростить при использовании планарного магнитотиристора, напряжение включения которого меняется в магнитном поле [2]. Конструктивно магнитотиристор представляет собой ДМТ, в коллекторы которого встроены дополнительные n^+ -области (рис. 1). Из работы [2] следует, что наличие общего протяженного эмиттера и длинной базы проявляется в зависимости работы тиристора T_1 ($p-n_0-p_1-n_3$) от состояния T_2 ($p-n_0-p_2-n_4$), и наоборот. На ВАХ это отражено в виде увеличения напряжения включения T_2 при включении T_1 (при $B=0$) и уменьшения магниточувствительности T_2 при любой полярности внешнего магнитного поля. Недостатком известного магнитотиристора является то, что он не может при изменении полярности магнитного поля переключить ток из одной цепи в другую. Магниточувствительные свойства тиристора объяснялись изменением коэффициентов передачи тока k_{21B1} и k_{21B2} , составляющих горизонтальных $p-n_0-p_1$ - и $p-n_0-p_2$ -транзисторов вследствие эффекта отклонения потока инжектированных носителей заряда, движущихся в тянущем электрическом поле E_0 , силами Лоренца и поля Холла. Уровень инжекции эмиттера считался однородным по всей инжектирующей поверхности. В действительности холловское поле в базовой области создает разные уровни инжекции на краях эмиттера, находящегося при одном и том же потенциале, т. е. возникает эффект модуляции инжекции [3].

В настоящей работе проведена сравнительная оценка вклада эффектов отклонения и модуляции инжекции в относительную чувствительность магнитотиристора, приведенного на рис. 1. Это дает возможность определить соответствующую комбинацию этих эффектов, а также тиристорного эффекта, действующих одновременно и играющих основную роль в переключении составляющих тиристор T_1 и T_2 сменой полярности внешнего магнитного поля.

Как известно [4], коэффициенты передачи тока составляющих $p-n_0-p_1$ - и $p-n_0-p_2$ -транзисторов с длинной базой определяются как отношение дырочного тока, дошедшего до коллекторов (области p_1 и p_2), к полному инжектированному в базу дырочному току

$$h_{1Б1} = \frac{(\partial p / \partial y)_{x, y=0}}{(\partial p / \partial y)_{x, y}}, \quad (1)$$

$$h_{2Б2} = \frac{(\partial p / \partial y)_{x, y=b}}{(\partial p / \partial y)_{x, y}}. \quad (2)$$

Для определения зависимости коэффициентов передачи $h_{2Б1}$ и $h_{1Б2}$ от магнитного поля найдем закон распределения концентрации инжектированных носителей заряда в базе, когда влияние, вносимое слабым магнитным полем в распределение инжектированных носителей заряда, можно рассматривать как малую величину — возмущение ($\mu\beta \ll 1$). Таким образом, задача о распределении концентрации неосновных носителей заряда в магнитном поле сводится к нахождению закона распределения инжектированных носителей заряда при

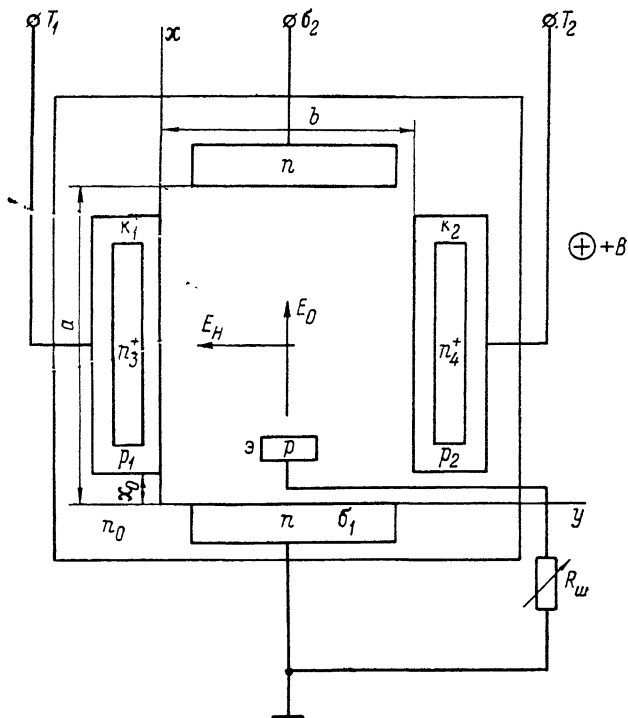


Рис. 1. Структура магнитотиристора.

э — эмиттер, б₁, б₂ — омические контакты к базе, к₁, к₂ — коллекторы ($a=200$, $b=200$, $x_0=90$ мкм).

$B=0$. Затем методом теории возмущений определим поправку, вносимую магнитным полем в распределение концентрации. Вводя обычные допущения [5], движение носителей в длинной базе можно приближенно описать следующей системой дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = G_p - \frac{v}{\tau_p} - \frac{1}{q} \nabla j_p, \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = G_n - \frac{v}{\tau_n} + \frac{1}{q} \nabla j_n, \quad (3a)$$

$$j_p = j_p^0 + \mu_p^* j_p^0 \times B, \quad (4)$$

$$j_n = j_n^0 - \mu_n^* j_n^0 \times B, \quad (5)$$

где $j_p^0 = j_p$ ($B=0$) $= q\mu_p E - kT\mu_p \nabla v$, $j_n^0 = j_n$ ($B=0$) $= qn\mu_n E + kT\mu_n \nabla v$, $p = p_0 + v$, $n = n_0 + v$, p_0 , n_0 — термически равновесные концентрации дырок и электронов; v — концентрация неравновесных дырок, равная концентрации неравновесных электронов (условие квазинейтральности); G_p , G_n — скорости генерации дырок и электронов; $\mu_p^* = (3\pi/8) \mu_p$, $\mu_n^* = (3\pi/8) \mu_n$ — холловские подвижности дырок

и электронов. Из-за наличия в уравнениях (4) и (5) членов, отражающих влияние магнитного поля, проведено двумерное моделирование. Численное решение соответствующей системы уравнений проведено методом функции Грина для случаев, когда магниточувствительность определяется следующим образом: 1) только эффектом модуляции инжекции, что выражается во влиянии на функцию источника инжекции изменения смещения на краях эмиттера, обусловленного холловским полем:

$$V_a(x, y) = V_0 + E_0(x - x_0) + E_H\left(y - \frac{b}{2}\right),$$

где V_0 — смещение на эмиттере при $B=0$, E_0 — тянущее электрическое поле в базе, E_H — электрическое поле Холла, b — расстояние между коллекторами, x, y — текущие координаты; 2) только эффектом отклонения инжектированных носителей заряда в базе (при $V_a = V_0$); 3) влиянием обоих эффектов, перечисленных в пп. 1 и 2. Расчет проводился для низких уровней инжекции, когда E_H максимально (постоянная Холла определяется концентрацией основных носителей заряда). Опуская процедуру решения, приведем расчетные зависимости относительного изменения коэффициентов передачи (на примере

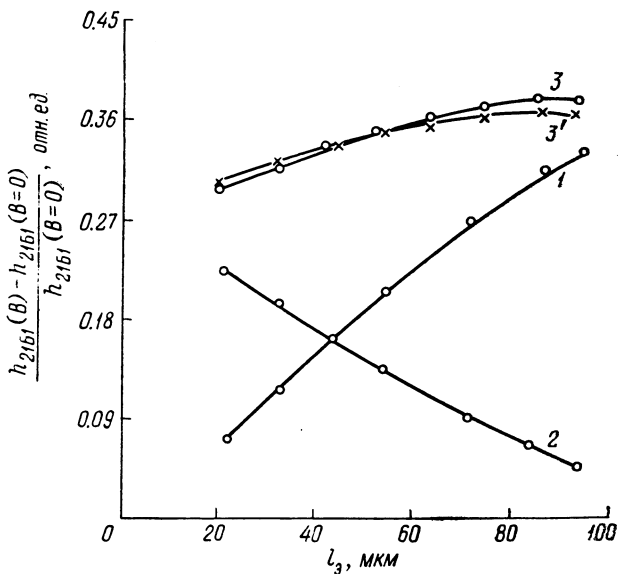


Рис. 2. Расчетные зависимости относительного изменения коэффициента передачи $h_{21Б1}$ в магнитном поле $B=0.1$ Т от длины эмиттера.

Магниточувствительность определена эффектами: 1 — модуляция инжекции, 2 — отклонения, 3, 3' — совместно эффектами отклонения и модуляции инжекции; 3' — экспериментальная зависимость.

$h_{21Б1}$) в магнитном поле $B=0.1$ Т от длины эмиттера для перечисленных выше случаев (рис. 2). Зависимости получены для заданных параметров исходного материала и электрических режимов работы экспериментальных образцов, выполненных на кремнии с $\rho=150$ Ом·см. Как следует из рисунка, эффекты модуляции инжекции и отклонения действуют одновременно (кривые 3, 3'), но при определенных длинах эмиттера один из них может преобладать (кривые 1, 2).

Согласно результатам математического моделирования (рис. 2), разработана структура магнитотиристора, переключаемая сменой полярности магнитного поля: выбирая минимальную длину эмиттера (технологически допустимую), когда эффект модуляции инжекции выражен сравнительно слабо, мы увеличиваем эффективность отклонения узкого пучка инжектированных носителей заряда магнитным полем соответствующей полярности в направлении одного из коллекторов транзистора с длинной базой. На рис. 3 приведены расчетные и экспериментальные зависимости коэффициентов передачи $h_{21Б1}$ и $h_{21Б2}$ от магнитного поля полярности $+B$ для $l_3=5$ мкм. При $B=0$ инжектированные p -эмиттером дырки распределяются поровну между коллекторами k_1 и k_2 , токи тиристоров T_1 и T_2 равны и на небольшую величину меньше тока переключения (T_1 и T_2 работают на участке ВАХ до включения). При включении магнитного поля полярности $+B$ ток тиристора T_1 становится больше тока переключения и он включается (рис. 4). Как следует из рисунка, с увеличением тока основных носителей заряда I_{σ, σ_2} переключение структуры в открытое состояние происходит при меньших значениях магнитного поля вследствие увеличения отклоняющего действия силы Лоренца. Однако рост электрического поля в базе приводит к уменьшению числа носителей заряда, участвующих в перераспределении между коллекторами, вследствие уменьшения времени их дрейфа

через длинную базу. Поэтому при некотором значении I_{σ_2} магнитное поле уже не будет осуществлять управление структурой. При смене полярности магнитного поля на $-B$ вследствие эффекта отклонения растут h_{21B} и ток через тиристор T_2 , а ток через тиристор T_1 уменьшается. Следует отметить, что переход тиристора T_2 в открытое состояние способствует в свою очередь захвату электронами в открытое состояние в сторону k_2 , той части носителей заряда, которая отклоняется вдоль коллектора k_1 и поддерживает T_1 во включенном состоянии. В результате происходит выключение тиристора T_1 .

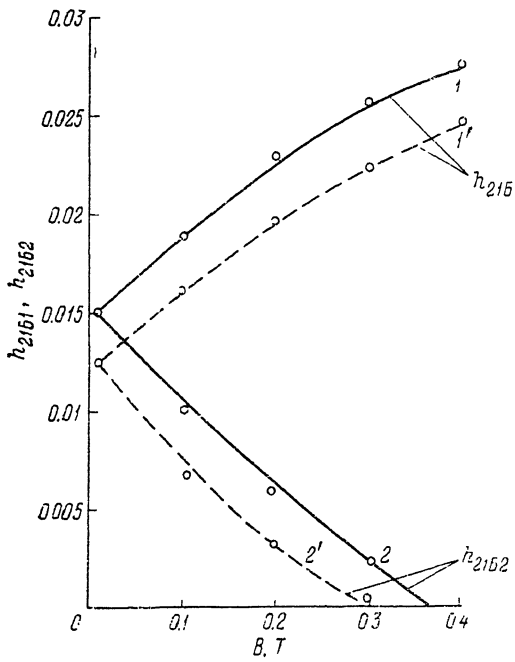


Рис. 3. Расчетные (1, 2) и экспериментальные (1', 2') зависимости h_{21B1} и h_{21B2} от магнитного поля.

Зависимость $I_{T_2}(B)$ аналогична приведенной на рис. 4 зависимости $I_{T_1}(B)$. Как известно, коэффициент усиления выключения β определяется выражением [4] для тиристора T_1

$$\beta_{T_1} = \frac{I_{T_1}^{оп}}{I_{\sigma_1, \sigma_2}} < \frac{h_{21B}}{h_{21B} + h_{21B1} - 1}$$

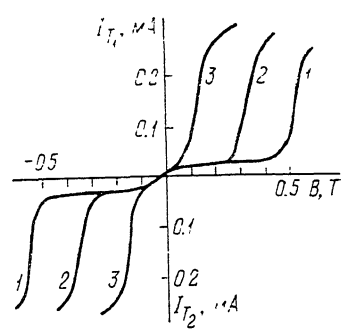


Рис. 4. Зависимость тока через тиристоры T_1 и T_2 от величины и направления магнитного поля.

I_{σ_1, σ_2} , мА: 1 — 0.1, 2 — 0.2, 3 — 0.3.

где h_{21B} — коэффициент передачи $n_3-p_1-n_0$ -транзистора, $I_{T_1}^{оп}$ — ток обратного переключения, I_{σ_1, σ_2} — ток длинной базы. Коэффициент усиления выключения, рассчитанный из экспериментальной зависимости 3 (рис. 4), $\beta_{T_1} = 0.95$ для $B = 0.1$ Т. Теоретическое и экспериментальное значения верхней границы коэффициента усиления выключения, согласно рис. 3, соответственно равны $\beta_{теор} = 1.25$ и $\beta_{эк} = 1.17$; β_{T_2} совпадает по величине с β_{T_1} .

Экспериментальным подтверждением правильности выбора физического механизма, положенного в основу работы магнитоуправляемого тиристора, явилось исследование выключения магнитным полем аналогичной структуры, но с протяженным эмиттером $l_e = 100$ мкм. Эффект выключения для данных образцов не наблюдался, поскольку преобладающий эффект модуляции инжекции обуславливает разные уровни инжекции на краях эмиттера, в то время как уровень инжекции средней части эмиттера практически остается неизменным при действии магнитного поля.

Список литературы

- [1] Балтес Г. П., Попович Р. С. // ТИИЭР. 1986. Т. 74. В. 8. С. 60—90.
- [2] Викулин И. М., Глауберман М. А., Козел В. В., Канищева Н. А. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 3. С. 547—556.
- [3] Vinal A. W., Masnari N. A. // IEEE Electron. Dev. Lett. 1982. V. EDL-3. P. 203—205.
- [4] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1. М., 1984. 455 с.
- [5] Викулин И. М., Глауберман М. А., Канищева Н. А. // ФТП. 1977. Т. 11. В. 4. С. 645—650.