

УДК 621.307

ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНИХ ЧАСТОТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З МАГНІТОЧУТЛИВИМ ЕЛЕМЕНТОМ НА ОСНОВІ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ

© Володимир Осадчук, Олександр Осадчук, 2001

Вінницький державний технічний університет, кафедра "Мікроелектроніка, оргтехніка та зв'язок",
Хмельницьке шосе, 95, 21021, Вінниця, Україна

Розглянуто вплив магнітного поля на розподіл інжектованих носіїв заряду у базі біполярного транзистора, який є магніточутливим елементом частотного магнітного перетворювача. На основі системи рівнянь, що описує нелінійну еквівалентну схему пристрою, отримана функція перетворення і рівняння чутливості.

Рассмотрено влияние магнитного поля на распределение инжектированных носителей заряда в базе биполярного транзистора, который является магниточувствительным элементом частотного магнитного преобразователя. На основе системы уравнений, которые описывают нелинейную эквивалентную схему устройства, получена функция преобразования и уравнение чувствительности.

In paper the influence of a magnetic field to allocation of injected carriers of a charge in basis of the bipolar transistor is considered which is magnetic by a sensing device of the frequency magnetic converter. On the basis of combined equations, which feature a nonlinear equivalent circuit of the device, the function of convertation and equation of sensitivity is obtained.

Вступ. Застосування напівпровідникових структур з від'ємним опором в класичних схемах підсилювальних, перемикаючих, генераторних і логічних пристроях добре досліджено [1, 2, 3]. Проте використання цих структур як мікроелектронних перетворювачів тільки починається, хоча існування додаткового каналу зв'язку істотно підвищує функціональні можливості таких елементів, а мікроелектронна технологія дає можливість значно підвищити їх чутливість, діапазон вимірюваних параметрів, швидкодію і надійність. В таких структурах транзистор виступає як магніточутливий елемент і як елемент, який утворює генератор електричних коливань. Слід зауважити, що теоретичні і експериментальні дослідження дискретних напівпровідникових магніточутливих діодів і транзисторів добре вивчені у роботах [4, 5, 6], проте дослідження частотних магнітних перетворювачів на основі напівпровідникових структур з від'ємним опором практично відсутні. Застосування частоти як інформативного параметра в перетворювачах такого класу дає змогу відмовитись від аналого-цифрових перетворювачів в системах контролю і управління, що значно здешевлює цю апаратуру.

Математична модель. Дія магнітного поля на біполярні транзистори проявляється у викривленні

траєкторії інжектованих носіїв заряду, що викликає збільшення ефективної довжини бази і відхилення частини носіїв заряду від колектора [4, 6, 7]. Роль останнього ефекту зростає із зменшенням ширини емітера і колектора, що забезпечує зростання магніточутливості. Найменша площа взаємного перекриття площини емітера і колектора, яка визначається глибиною дифузії домішок, досягається у горизонтальній конструкції магнітотранзистора, тому вона має найбільшу магніточутливість [7]. На рис.1 подана структура такого магнітотранзистора. У магнітному полі B з напрямком, який перпендикулярний до площини рисунка $\oplus B$, носії заряду відхиляються до поверхні бази; їх шлях до колектора зменшується, а при протилежному напрямку $\ominus B$ – зростає, що викликає зміну параметрів магнітотранзистора.

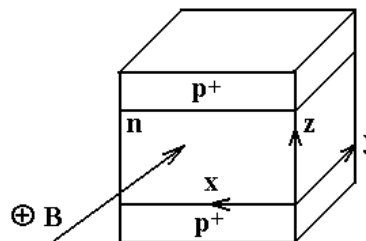


Рис. 1. Структура магніточутливого транзистора

Інтегральним параметром магніточутливих транзисторів є його абсолютна частотна магніточутливість

$$S_A = \frac{dF_0}{dB} = -\frac{F_0}{2C_{екв}(B)} \frac{dC_{екв}(B)}{dB}, \quad (1)$$

де F_0 – частота генерації, $C_{екв}(B)$ – еквівалентна ємність коливального контуру, B – індукція магнітного поля.

Відносна чутливість визначається на основі виразу (1)

$$S_{F_0} = \frac{1}{F_0} \frac{dF_0}{dB} = -\frac{1}{2C_{екв}(B)} \frac{dC_{екв}(B)}{dB}. \quad (2)$$

Аналіз формул (1) і (2) показує, що для досягнення максимальної магніточутливості необхідно отримати мінімальне значення $C_{екв}(B)$, а також максимальну зміну її швидкості від магнітної індукції. Еквівалентна ємність коливального контуру генератора визначається дифузійною і бар'єрною ємностями біполярного магніточутливого транзистора, причому основну роль відіграє дифузійна ємність. Своєю чергою, дифузійна ємність пропорційна до концентрації інжектованих носіїв заряду у базову область, на яку діє магнітне поле. Коефіцієнтом впливу магнітного поля на розподіл концентрації інжектованих носіїв заряду є параметр анізотропії, який визначається

$$a = \mu_p BR(B), \quad (3)$$

де μ_p – рухливість дірок, $R(B) \sim 1$ – холл-фактор, який незначною мірою залежить від магнітного поля.

Аналізують роботу магніточутливого транзистора за таких припущень:

а) в базовій області існує низький рівень інжекції, коли концентрація інжектованих носіїв заряду значно менша від концентрації основних;

б) параметр анізотропії $|a| \ll 1$, що відповідає дії слабких магнітних полів на транзистор.

Координати базової області і області емітера лежать у межах

$$\begin{aligned} 0 \leq x \leq l_x, \quad 0 \leq y \leq l_y, \quad 0 \leq z \leq l_z, \\ 0 \leq x' \leq l_x, \quad 0 \leq y' \leq l_y, \quad 0 \leq z' \leq l_z. \end{aligned}$$

Розподіл концентрації інжектованих носіїв заряду в базовій області визначається на основі розв'язання рівняння біполярного переносу [8, 9]

$$D_p \left[\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + 2d_x \frac{\partial p}{\partial x} + 2d_y \frac{\partial p}{\partial y} \right] - \frac{p - p_0}{\tau_p} = -\rho(x', y') \delta(x - x') \delta(y - y') \delta(z - z'), \quad (4)$$

де D_p, τ_p – дифузійна довжина і час життя інжектованих носіїв заряду, p_0 – рівноважна концентрація дірок у базі, $\delta(x - x')$ – дельта-функція Дірака.

Граничні умови рівняння біполярного переносу мають вигляд

$$\begin{aligned} p(x, y, l_z) = p(x, l_y, z) = p(x, 0, z) = \\ = p(l_x, y, z) = p(0, y, z) = p_0 \end{aligned} \quad (5)$$

Величини d_x і d_y зв'язані із значеннями електричного поля E_x у базі магніточутливого транзистора такими співвідношеннями

$$d_x = \frac{qE_x}{2kT}, \quad d_y = adx, \quad (6)$$

де q – заряд електрона, k – стала Больцмана, T – температура.

Рівнянню (4) відповідає функція Гріна [9, 10, 11]

$$\begin{aligned} p(x, y, z, x', y', z') = \frac{4l_x}{D_p l_y l_z} \exp[d_x(x - x') + \\ + d_y(y - y')] \sum_{m,k=1}^{\infty} \frac{\text{sh}[\beta_{mk}(1 - x/l_x)]}{\beta_{mk} \text{sh}(\beta_{mk})} \text{sh}\left[\frac{\beta_{mk} x'}{l_x}\right] * \\ * \sin q_k z \sin q_m y \sin q_m y' \sin q_k z' \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{де } q_m = \pi \frac{m}{l_y}, \quad q_k = \pi \frac{k}{l_z}, \quad L = (D_p \tau_p)^{1/2},$$

$$\beta_{mk}^2 = l_x^2 [q_m^2 + q_k^2 + d_x^2 + d_y^2 + L^{-2}].$$

Функція Гріна визначає концентрацію нерівноважних носіїв заряду у точці бази з координатами x, y, z , яка породжується джерелом одиничної інтенсивності в емітері у точці з координатами x', y', z' [9, 10]. Носії заряду інжектуються у базову область р-п-переходом емітер-база ($0 \leq x' \leq l_x, 0 \leq y' \leq l_y, 0 \leq z' \leq l_z$), який зміщений у прямому напрямку з координатами $0 \leq x' \leq l_x$, з густиною джерел $\rho(x', y')$:

$$\rho(x', y') = \frac{P_0}{\tau_p} [\exp(U_{eb}(x', y')/kT) - 1], \quad (8)$$

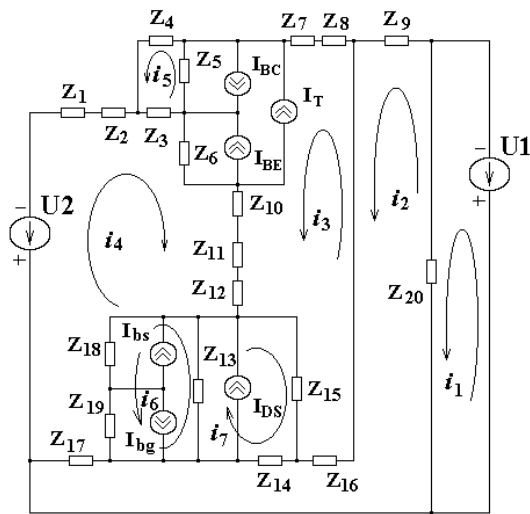


Рис. 6. Перетворена еквівалентна схема

Схема частотного магнітного перетворювача подана на рис. 4. Біполярний транзистор, який є магнітоточувливим елементом, увімкнений по схемі із загальним емітером, що забезпечує його кращу чутливість до магнітного поля порівняно із увімкненням по схемі із загальною базою [12].

Перейдемо до визначення функції перетворення і рівняння чутливості частотного магнітного перетворювача (рис.4), які визначаються на основі системи рівнянь Кірхгофа, що описує нелінійну еквівалентну схему (рис.5). Для зручності розрахунків перетворимо її на компактнішу (рис. 6). Згідно з напрямками контурних струмів система рівнянь Кірхгофа має вигляд

$$\left. \begin{aligned}
 U_1 &= Z_{20}i_1 - Z_{20}i_2, \\
 0 &= (Z_9 + Z_{16} + Z_{14} + Z_{17} + Z_{20})i_2 - Z_{16}i_3 + \\
 &+ Z_{14}(i_7 + I_D) + Z_{17}i_4 - Z_{20}i_1, \\
 0 &= (Z_8 + Z_7 + Z_5 + Z_6 + Z_{10} + Z_{11} + Z_{12} + \\
 &+ Z_{15} + Z_{16})i_3 + Z_5(-i_5 - I_{bc} + I_{be} + I_T) + \\
 &+ Z_6(i_4 + I_{be} - I_{bc} + I_T) + (Z_{10} + Z_{11} + Z_{12})i_4 + \\
 &+ Z_{15}(i_7 + I_D) - Z_{16}i_2, \\
 U_2 &= (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_6 + Z_{10} + Z_{11} + Z_{12} + \\
 &+ Z_{18} + Z_{19} + Z_{17})i_4 + Z_3i_5 + Z_6(i_3 + I_{be} - \\
 &- I_{bc} + I_T) + (Z_{10} + Z_{11} + Z_{12})i_3 + Z_{18}(i_6 + \\
 &+ I_{bs} - I_{bg}) + Z_{19}(i_6 - I_{bg} + I_{bs}) + Z_{17}i_2, \\
 0 &= (Z_3 + Z_4 + Z_5)i_5 + Z_3i_4 + Z_5(-i_3 + I_{bc} - \\
 &- I_{be} - I_T), \\
 0 &= (Z_{18} + Z_{19} + Z_{13})i_6 + Z_{18}(i_4 + I_{bs} - I_{bg}) + \\
 &+ Z_{19}(i_4 - I_{bg} + I_{bs}) + Z_{13}(i_7 + I_{bg} - I_{bs} - I_D), \\
 0 &= (Z_{13} + Z_{15} + Z_{14})i_7 + Z_{13}(i_6 + I_{bg} - I_{bs} - I_D) + \\
 &+ Z_{15}i_3 + Z_{15}I_D + Z_{14}(i_2 + I_D),
 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

де

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= R_1, & Z_2 &= R'_B + j\omega L_B, \\
 Z_3 &= R_B, & Z_4 &= -j/(\omega C_{bx}), & Z_5 &= -j/(\omega C_{BC}), \\
 Z_6 &= -j/(\omega C_{BE}), & Z_7 &= R_C, & Z_8 &= R'_C + j\omega L_C, \\
 Z_9 &= j\omega L_1, & Z_{10} &= R_E, \\
 Z_{11} &= R'_E + j\omega L_E, & Z_{12} &= R_S + R'_S + j\omega L_S, \\
 Z_{13} &= R_{DS}, & Z_{14} &= -j/(\omega C_{GD}), \\
 Z_{16} &= R_G, & Z_{17} &= R_D, \\
 Z_{15} &= \frac{R_{GS}}{1 + \omega^2 R_{GS}^2 C_{GS}^2} - j \frac{\omega R_{GS}^2 C_{GS}}{1 + \omega^2 R_{GS}^2 C_{GS}^2}, \\
 Z_{18} &= \frac{R_{BS}}{1 + \omega^2 R_{BS}^2 C_{BS}^2} - j \frac{\omega R_{BS}^2 C_{BS}}{1 + \omega^2 R_{BS}^2 C_{BS}^2}, \\
 Z_{20} &= -j/(\omega C_1), & Z_{19} &= -j/(\omega C_{bg}).
 \end{aligned}$$

Розв'язано систему рівнянь (10) методом Гаусса на персональному комп'ютері за допомогою програми "Matlab 5.2". Значення параметрів елементів еквівалентної схеми (рис.5) отримані з робіт [13-14]. Розрахункові і експериментальні залежності частоти генерації від магнітної індукції подано на рис.7. Функція перетворення описується рівнянням

$$F_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_{be}(B)C_1 + C_{bc}(B)C_1 + C_{be}(B)C_{bc}(B)}{LC_{bc}(B)C_{be}(B)C_1}}{\pi}}. \quad (11)$$

Магнітоточливість перетворювача визначається на основі (11)

$$\begin{aligned}
 S_B &= \frac{1}{4} \left[\frac{\left(\frac{\partial C_{be}(B)}{\partial B}\right)C_1 + \left(\frac{\partial C_{bc}(B)}{\partial B}\right)C_1}{LC_{bc}(B)C_{be}(B)C_1} + \right. \\
 &+ \frac{\left(\frac{\partial C_{be}(B)}{\partial B}\right)C_{bc}(B) + \left(\frac{\partial C_{bc}(B)}{\partial B}\right)C_{be}(B)}{LC_{bc}(B)C_{be}(B)C} - \\
 &\left. \frac{A_1 \left(\frac{\partial C_{bc}(B)}{\partial B}\right)}{LC_{bc}^2(B)C_{be}(B)C_1} \right] \Bigg/ \left(\pi \sqrt{\frac{A_1}{LC_{bc}(B)C_{be}(B)C_1}} \right) \quad (12)
 \end{aligned}$$

де $A_1 = C_{be}(B)C_1 + C_{bc}(B)C_1 + C_{be}(B)C_{bc}(B)$.

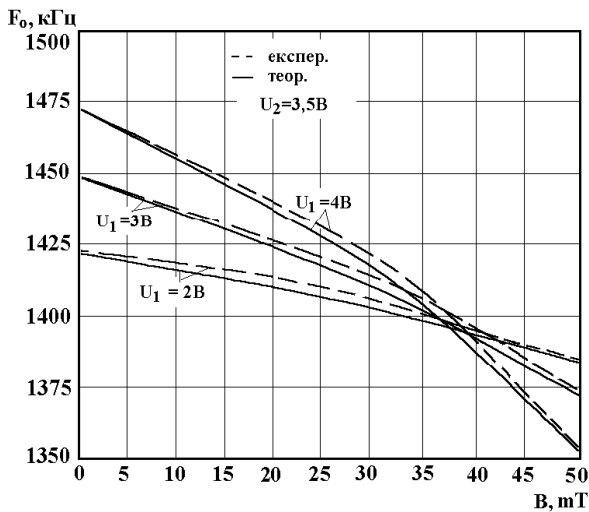


Рис. 7. Розрахункові і експериментальні залежності частоти генерації від магнітної індукції

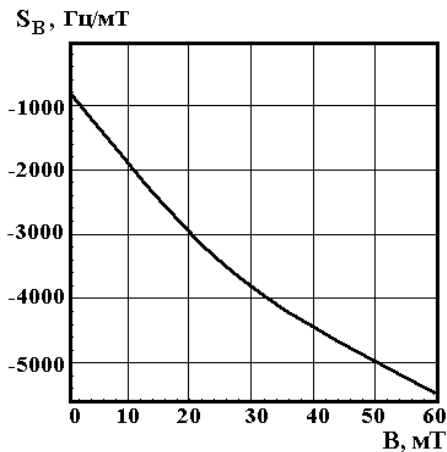


Рис. 8. Розрахункова залежність чутливості від магнітної індукції

Аналіз графіка (рис. 7) показує, що найбільшу чутливість можна отримати з напругою живлення 4В. На рис.8 наведена розрахована згідно з (12) чутливість магнітного перетворювача на основі біполярного та польового транзистора. Як видно із графіка, магнітоточувливість становить 4,5 кГц/мТ.

Висновки.

1. Розроблена математична модель частотного магнітного перетворювача на основі польового і біполярного транзисторів, який є магнітоточувливим елементом. Показано, що на основі нелінійної еквівалентної схеми пристрою отримана система рівнянь, яка дає змогу розрахувати функцію перетворення і рівняння чутливості.

2. Врахування впливу магнітного поля на розподіл інжекттованих носіїв заряду у базі магнітоточувливого біполярного транзистора дозволяє оптимізувати його геометричні розміри. Чутливість частотного перетворювача складає 1-5 кГц/мТ. Розбіжність між теоретичними та експериментальними результатами становить $\pm 5\%$.

1. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем. 1999. 2. Филинюк Н.А. Активные СВЧ фильтры на транзисторах. – М., 1987. 3. Гаряинов С.А., Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Филинюк Н.А. Негатроника. – Новосибирск, 1995. 4. Викулин И.М., Стафеев В.И. Полупроводниковые датчики. – М., 1975. 5. Виглеб Т. Датчики. – М., 1989. 6. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. – М., 1990. 7. Викулин И.М., Викулина Л.Ф., Стафеев В.И. Магниточувствительные транзисторы // Физика и техника полупроводников, 2001. Т.35. Вып.1. – С.3-10. 8. Киреев П.С. Физика полупроводников. – М., 1975. 9. Бабичев Г.Г., Козловский С.И., Романов В.А. Вертикальный двухколлекторный тензотранзистор с ускоряющими электрическими полями в базе и эмиттере // Физика и техника полупроводников. Т.33. №3. 1999. С.370-379. 10. Иваненко Д.Д., Соколов А.А. Классическая теория поля. – М. – Л. 1949. 11. Арфкен Г. Математические методы в физике. – М., 1970. 12. Осадчук В.С., Осадчук Е.В., Осадчук А.В. Полупроводниковый датчик магнитного поля. Патент Российской Федерации, №2092933, кл. Н01L 29/82. Бюл.28, 1997. 13. Разевиг В.Д. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Вып.2. Модели компонент аналоговых устройств. – М., 1992. 14. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств. Справочник. – М., 1991.