

ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНИХ ЧАСТОТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З МАГНІТОЧУТЛИВИМ ЕЛЕМЕНТОМ НА ОСНОВІ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ

© Володимир Осадчук, Олександр Осадчук, 2001

Вінницький державний технічний університет, кафедра “Мікроелектроніки, оргтехніки та зв’язку”,
Хмельницьке шосе, 95, 21021, Вінниця, Україна

В статті розглянуто вплив магнітного поля на розподіл інжекттованих 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.

В статье 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 пристроїв добре досліджено [1, 2, 3]. Проте застосування цих структур в якості мікроелектронних перетворювачів тільки починається, хоча існування додаткового каналу зв’язку суттєво 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 в якості магніточутливого елемента, так і в якості елемента, який утворює генератор електричних коливань. Слід зауважити, що теоретичні і експериментальні дослідження дискретних напівпровідникових магніточутливих діодів і транзисторів добре досліджені у роботах [4, 5, 6], проте дослідження частотних магнітних перетворювачів на основі напівпровідникових структур з від’ємним опором практично відсутні. Застосування частоти в якості інформативного параметру в перетворювачах такого класу дозволяє 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 інжекттованих носіїв заряду, що викликає збільшення ефективної довжини бази і відхилення частини носіїв заряду від колек-

тора [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 при цьому їх шлях до колектору зменшується, а при протилежному напрямку $\ominus B$ – зростає, що викликає зміну параметрів магнітотранзистора.

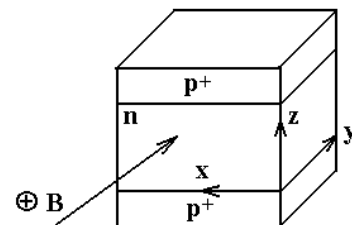


Рис.1. Структура магніточутливого транзистора
Інтегральним параметром магніточутливих транзисторів є його абсолютна частотна магніточутливість

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

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

Відносна чутливість визначається на основі виразу (1)

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

Аналіз формул (1) і (2) показує, що для досягнення максимальної магніточутливості необхідно отримати мінімальне значення $C_{екс}(B)$, 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. У свою чергу, дифузійна ємність пропорційна концентрації інжектованих носіїв заряду у базову область, на яку діє магнітне поле. Коefіцієнтом 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 в незначній мірі залежить від магнітного поля.

Аналіз роботи магніточутливого транзистора проводиться при таких припущеннях:

- 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'язку рівняння біполярного переносу [8, 9]

$$D_p \left[\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + 2d_x \frac{\partial p}{\partial x} + 2d_y \frac{\partial p}{\partial y} \right] - \frac{p - p_0}{\tau_p} =$$

$$= -\rho(x', y') \delta(x - x') \delta(y - y') \delta(z - z')$$

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]

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

$$\begin{aligned} \text{де } q_m = \pi \frac{m}{l_y}, \quad q_k = \pi \frac{k}{l_z}, \quad L = (D_p \tau_p)^{1/2}, \\ \beta_{mk}^2 = l_x^2 [q_m^2 + q_k^2 + d_x^2 + d_y^2 + L^{-2}]. \end{aligned}$$

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 p-n 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 $\rho(x', y')$:

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

Розподіл інжектованих носіїв заряду у базі магнітотранзистора з врахуванням (5) – (8) визначається рівнянням

$$p(x, y, z) = \int_0^{l_x} dx' \int_0^{l_y} dy' \int_0^{l_z} \rho(x', y') p(x, y, z, x', y', z') dz' \quad (9)$$

Подальший аналіз проведемо для наступних розмірів областей магнітотранзистора:

бази $l_x \times l_y \times l_z = 15 \times 1200 \times 800$ мкм ,

емітера $l'_x \times l'_y \times l'_z = 15 \times 1200 \times 800$ мкм , $L = 975$ мкм .

Напруга живлення емітера переходу складає $U_{eb} = 0,1$ В .

$P(12, y, 200) \times 10^{19}, \text{см}^{-3}$

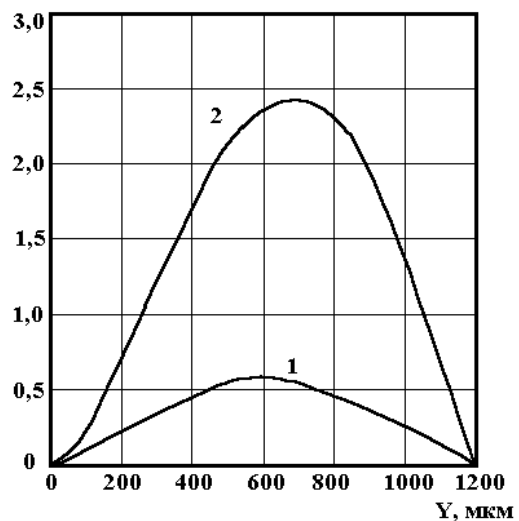


Рис.2. Поперечний розподіл інжектованих носіїв заряду у базі магніточутливого транзистора при різних значеннях параметру анізотропії a : 1 – 0; 2 – 0,06

На рис.2 наведено поперечний розподіл концентрації інжекттованих носіїв заряду у базі магнітотранзистора уздовж лінії з координатами (12, у, 200). З графіка видно, що при відсутності магнітного поля розподіл є симетричним відносно центральної площини ($x, l_x / 2, z$) (крива 1). При дії магнітного поля розподіл (крива 2) стає асиметричним і набуває максимального значення при координаті $y=700$ мкм. Загальна кількість носіїв заряду у базі зростає, що витікає з порівняння площ під кривими 1 і 2.

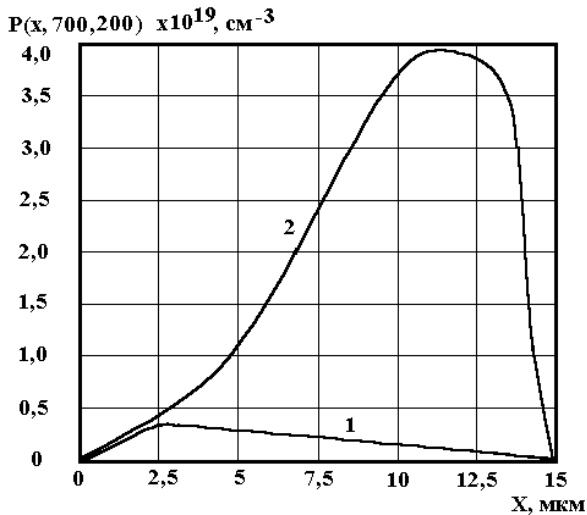


Рис.3.Повздовжній розподіл інжекттованих носіїв заряду у базі магніточутливого транзистора при різних значеннях параметру анізотропії a : 1 – 0; 2 – 0,06

Повздовжній розподіл інжекттованих носіїв заряду уздовж лінії з координатами ($x, 700, 200$) при дії магнітного поля і її відсутності подано на рис.3.

Аналіз розрахунків (рис.2 – рис.3) показує, що оптимальним розташуванням області колектора є відношення $y=700$ мкм, $x=12$ мкм.

Схема частотного магнітного перетворювача подана на рис.4. Біполярний транзистор, який є магніточутливим елементом, включений по схемі із загальним емітером, що забезпечує його кращу чутливість до магнітного поля в порівнянні із включенням по схемі із загальною базою [12].

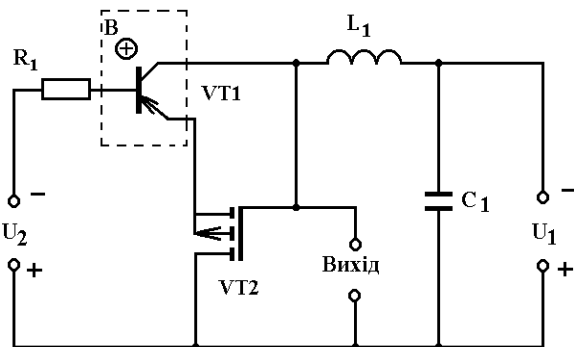


Рис.4. Схема частотного магнітного перетворювача на основі біполярного і польового транзисторів

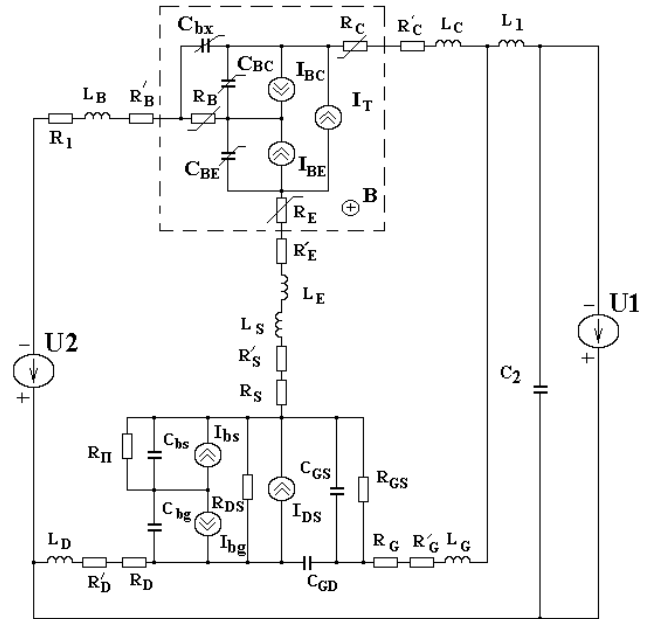


Рис.5.Еквівалентна схема перетворювача на основі біполярного і польового транзисторів

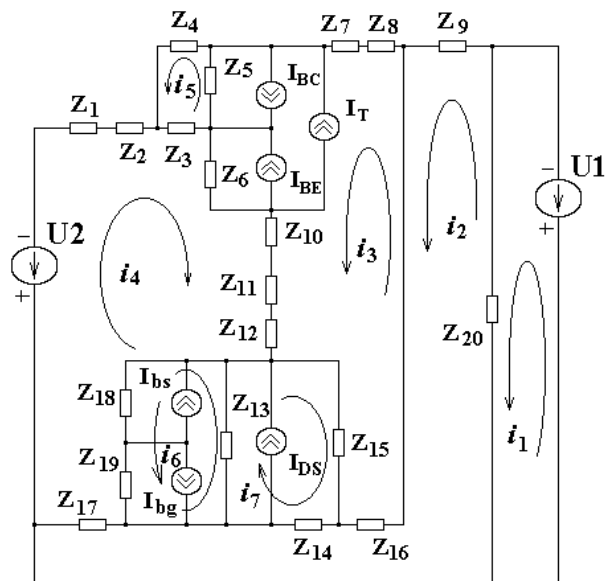


Рис.6. Перетворена еквівалентна схема

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 більш компактну (рис.6). Згідно напрямкам 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'язок системи рівнянь (10) виконано методом Гауса на персональному комп'ютері за допомогою програми "Matlab5.2". Значення параметрів елементів еквівалентної схеми (рис.5) отримані з робіт [13-14]. Розрахункові і експериментальні залежності частоти генерації від магнітної індукції подані на рис.7. Функція перетворення описується рівнянням

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

Магніточутливість перетворювача визначається на основі (11)

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

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

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

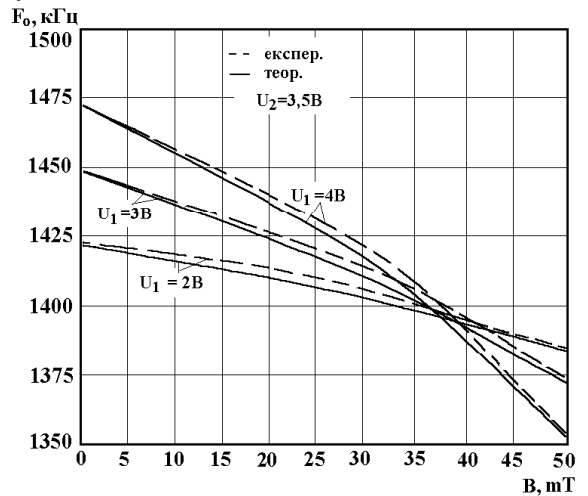


Рис.7. Розрахункові і експериментальні залежності частоти генерації від магнітної індукції

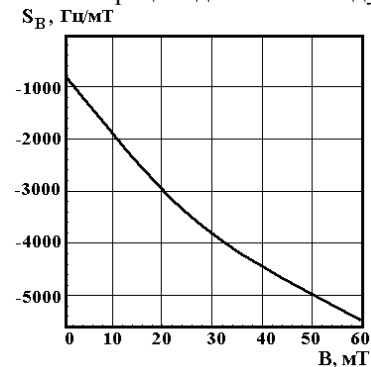


Рис.8. Розрахункова залежність чутливості від магнітної індукції

Висновки

1. Розроблена математична модель частотного магнітного перетворювача на основі польового і біполярного транзисторів, який є магніточутливим елементом. Показано, що на основі нелінійної еквівалентної схеми пристрою отримана система рівнянь, яка дозволяє розрахувати функцію перетворення і рівняння чутливості.
 2. Врахування впливу магнітного поля на розподіл інжектованих носіїв заряду у базі магніточутливого біполярного транзистора дозволяє оптимізувати його геометричні розміри. Чутливість частотного перетворювача складає 1-5 кГц/мТ. Розбіжність між теоретичними та експериментальними результатами складає $\pm 5\%$.

Література

- [1] Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем. –Вінниця: «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 1999. –275с.
- [2] Филинюк Н.А. Активные СВЧ фильтры на транзисторах. –М.: Радио и связь, 1987. –112с.
- [3] Горяинов С.А., Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Филинюк Н.А. Негатроника. –Новосибирск, Наука, 1995. –320с.
- [4] Викулин И.М., Стафеев В.И. Полупроводниковые датчики. –М.: Сов. радио, 1975. –104 с.
- [5] Виглеб Т. Датчики. –М.: Мир, 1989. –196с.
- [6] Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. –М.: Радио и связь, 1990. –264 с.
- [7] Викулин И.М., Викулина Л.Ф., Стафеев В.И. Магниточувствительные транзисторы //Физика и техника полупроводников, 2001, том.35, вып.1. – с.3-10.
- [8] Киреев П.С. Физика полупроводников. –М.: Высшая школа, 1975. –583 с.
- [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.: ГИТТЛ, 1949. –432 с.
- [11] Арфкен Г. Математические методы в физике. – М.: Атомиздат, 1970. –712 с.
- [12] Осадчук В.С., Осадчук Е.В., Осадчук А.В. Полупроводниковый датчик магнитного поля. Патент Российской Федерации, №2092933, кл. H01L 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.: Радио и связь, 1992. –72 с.
- [14] Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств. Справочник. –М.: Радио и связь, 1991. –528 с.