

УДК 621.3.049

В. С. Осадчук, д-р техн. наук, проф.;
О. В. Осадчук, д-р техн. наук, проф.;
Ю. С. Кравченко, канд. фіз.-м. наук, доц.;
О. О. Селецька, асп.

ВОЛЬТ-АМПЕРНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЧАСТОТНОГО ОПТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПЛАЗМОХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ З АКТИВНИМ ІНДУКТИВНИМ ЕЛЕМЕНТОМ

Отримано аналітичний вираз вольт-амперної характеристики, що описує роботу оптичного частотно-перетворювача на основі біполярного та МДН-транзисторів з активним індуктивним елементом, що використовується для контролю плазмохімічних процесів. Проведені експериментальні дослідження, показано, що похибка розрахунку становить 3 %.

Вступ

У технології виробництва напівпровідникових мікроструктур отримати найточніше відтворення рельєфного рисунку на кремнієвих пластинах можливо лише використовуючи плазмохімічні процеси [1, 2], для яких необхідною умовою проведення є безперервний моніторинг їх фізичних та технологічних параметрів [3]. Такий моніторинг є базовим елементом системи управління технологічних процесів і здійснюється за рахунок збору та обробки інформації від спеціальних сенсорів.

В системах оптичного контролю плазмохімічних процесів високої точності можна досягнути, використовуючи оптоелектронні сенсори на основі транзисторних структур з від'ємним опором [4]. Тому у цій роботі досліджуються характеристики оптичного перетворювача на основі автогенераторного пристрою, в якому коливальний контур створено на основі ємнісної складової повного вихідного опору, а роль індуктивної складової виконує біполярний транзистор з RC-колом, що дозволяє виготовити перетворювач за інтегральною технологією.

Постановка задачі досліджень

Самозбудження і стійкість роботи автогенератора зумовлені вибором робочої точки на вольт-амперній характеристиці, тому *метою роботи* є визначення вольт-амперної характеристики перетворювача на основі еквівалентної схеми та складених для неї рівнянь Кірхгофа.

Визначення вольт-амперної характеристики

На рис. 1 показана схема оптичного частотно-перетворювача на основі біполярного транзистора VT1 та МДН-транзистора VT2 з чутливим елементом — фоторезистором. Ємність коливального контуру автогенератора утворюється ємнісною складовою повного опору на електродах колектор-стік біполярного транзистора VT1 та МДН-транзистора VT2. Індуктивність реалізується індуктивною складовою повного опору на електродах емітер-колектор біполярного транзистора VT3. В цій схемі в якості індуктивності використовується біполярний транзистор VT3 з фазозсувним колом R2C3, що дозволяє виготовити її за інтегральною технологією.

Для визначення вольт-амперної характеристики складемо еквівалентну схему по постійному струму (рис. 2).

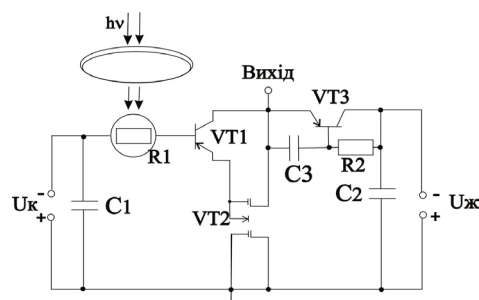


Рис. 1. Схема частотно-оптичного перетворювача на основі біполярного та МДН-транзистора з активною індуктивністю

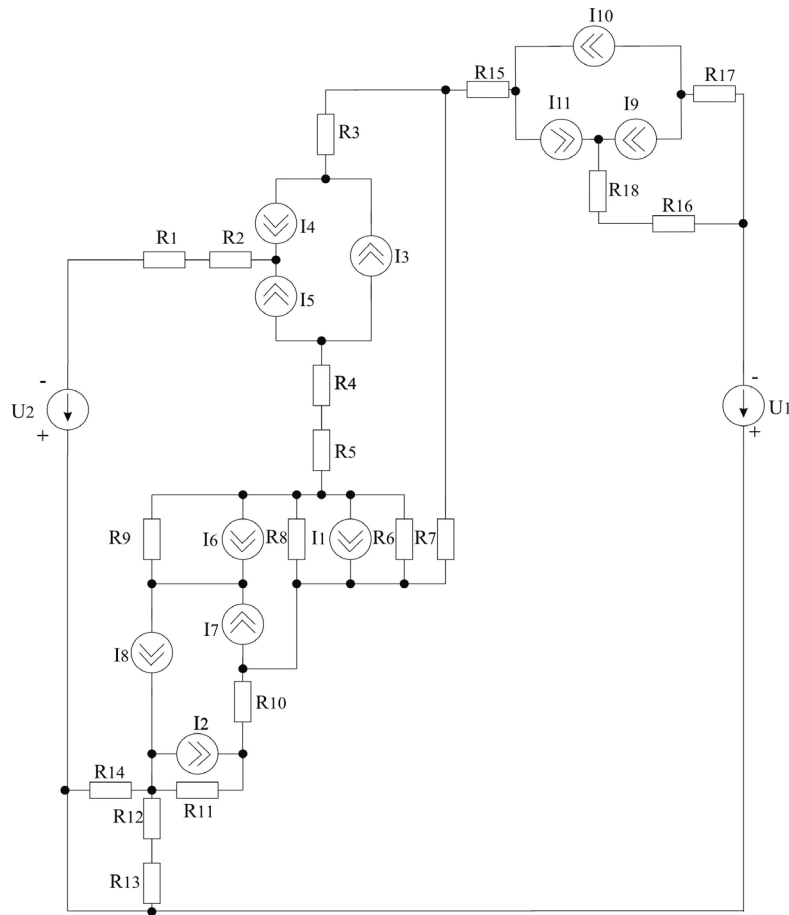


Рис. 2 Еквівалентна схема оптичного перетворювача по постійному струму:

R_1 — опір фоторезистора; R_2 — опір бази транзистора VT1; R_3 — опір колектора транзистора VT1; R_4 — опір емітера транзистора VT1; R_5 — опір стоку транзистора VT2; R_6 — опір стік-затвор двозатворного транзистора VT2; R_7 — опір затвору транзистора VT2; R_8 , R_{10} та R_{11} — опори витоку-стоку двозатворного транзистора VT2; R_9 — опір підкладки; R_{12} — опір стік-другий затвор двозатворного транзистора — VT2; R_{13} — омичний опір другого затвора двозатворного транзистора VT2; R_{14} — опір p-n переходу витоку транзистора VT2; R_{15} — опір емітера транзистора VT3; R_{16} — опір резистора R_2 ; R_{17} — опір колектора транзистора VT3; R_{18} — опір бази транзистора VT3

Струми біполярного транзистора I_3 , I_4 , I_5 , I_{10} , I_{11} , I_{12} визначаються з формул [5]

$$I_3 = (I_{be1} - I_{bc1})/Q_b; \quad I_4 = I_{be1}/BF; \quad I_5 = I_{bc1}/BR;$$

$$I_9 = I_{bc2}/BR; \quad I_{10} = (I_{be2} - I_{bc2})/Q_b; \quad I_{11} = I_{be2}/BF,$$

де BR — максимальний коефіцієнт підсилення струму в інверсному режимі; BF — максимальний коефіцієнт підсилення струму в нормальному режимі; Q_b — заряд в базі; I_{be1} , I_{bc1} — струми база-емітер та база-колектор біполярного транзистора VT1; I_{be2} та I_{bc2} , — струми база-емітер та база-колектор біполярного транзистора VT3, які визначаються з формул [5]

$$I_{be1} = I_{be2} = I_s \left(\exp(U_{be}/(NF \cdot U_T)) - 1 \right);$$

$$I_{bc1} = I_{bc2} = I_s \left(\exp(U_{bc}/(NR \cdot U_T)) - 1 \right),$$

де I_s — струм насичення при температурі 270 °C; $U_T = kT/q$;

U_{be} та U_{bc} — напруги на переходах база-емітер та база-колектор; NF — коефіцієнт неідеальності в нормальному режимі; NR — коефіцієнт неідеальності в інверсному режимі.

Заряд в базі визначається з формули [5]

$$Q_b = Q_1 \left(1 + (1 + 4Q_2)^{NK} \right) / 2,$$

де $Q_1 = 1 / (1 - U_{bc} / U_{AF} - U_{be} / U_{AR})$; $Q_2 = I_{be} / I_{KF} + I_{bc} / I_{KR}$; U_{AF} та U_{AR} — напруга Ерлі в нормальному та інверсному режимі; I_{KF} — точка початку спаду залежності BF від струму колектора в нормальному режимі; I_{KR} — точка початку спаду залежності BR від струму емітера в інверсному режимі; NK — коефіцієнт, який визначає множник Q_b .

Об'ємний опір бази описується виразом

$$R_b = \begin{cases} R_{bm} + (R_{bx} - R_{bm}) / Q_b, & \text{якщо } I_{Rb} = \infty; \\ R_{bm} + 3(R_{bx} - R_{bm}) \frac{\operatorname{tg} x - x}{x \operatorname{tg}^2 x}, & \text{якщо } I_{Rb} > 0, \end{cases}$$

де $x = \frac{\sqrt{1 + 14,59025 I_b / I_{Rb}} - 1}{2,4317 \sqrt{I_b / I_{Rb}}}$; R_{bx} — максимальний об'ємний опір бази при нульовому зміщенні; R_{bm} — максимальний опір бази при великих струмах; I_{Rb} — струм бази, при якому опір бази зменшується на 50 % від повного перепаду між R_b та R_{bm} .

Струми стік-витік $I_1 = I_2$ МДН-транзистора в лінійному режимі ($U_{DS} < (U_{gs} - U_T)$) визначаються з формули [6]

$$I_1 = \frac{\mu C_0 W}{L} \left((U_{GS} - U_T) U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right),$$

де W — ширина каналу, L — довжина каналу.

Порогова напруга МДН-транзистора визначається за формулою [6]

$$U_T = \phi_{SiO_2} + 2\phi_B - \frac{Q_s}{C_0} + \frac{1}{C_0} \sqrt{4\epsilon_s q N_A \phi_B},$$

де Q_s — питомий поверхневий заряд, Φ/m^2 ; ϵ_s — відносна електрична проникність напівпровідника; N_A — концентрація домішок; C_0 — питома ємність оксиду.

Потенціал Фермі описується формулою

$$\phi_B = \pm kT/q \ln(N_A/n_i).$$

В режимі насичення при $U_{DS} \geq (U_{GS} - U_T)$ струм стік-витік визначається як [6]

$$I_1 = \frac{\mu C_0 W}{6L} \left((U_{GSat} + 2\phi_B)^2 + U_{GS} U_{DSat} + 2\phi_B \right) - 12\phi_B \left(U_{GS} - \phi_B - \frac{4}{3} K \phi_B^{1/2} \right),$$

де $U_{DSat} = U_{GS} - 2\phi_B + K^2 \left(1 - (1 + 2U_{GS}/K^2)^{1/2} \right)$; $K = (\epsilon_s q N_A / C_0)^{1/2}$.

Опір стік-витік R_{DS} в лінійній області визначається виразом [6]

$$R_{DS} = \frac{L}{W \mu C_0} (U_{GS} - U_T),$$

а в області насичення

$$R_{DS} = \frac{12 \left[L (U_D - U_{DSat})^{1/2} - 2(\epsilon_s / q N_A)^{1/2} (U_D - U_{DSat}) \right]}{W \mu C_0 (2\epsilon_s / q N_A)^{1/2}} \times \frac{1}{(U_{DSat} + 2\phi_B)^2 + U_{GS} (U_{DSat} + 2\phi_B) - 12\phi_B (U_{GS} - \phi_B - 4/3 K \phi_B^{1/2})}.$$

Перетворимо схему (рис. 2) у зручнішу для проведення розрахунків

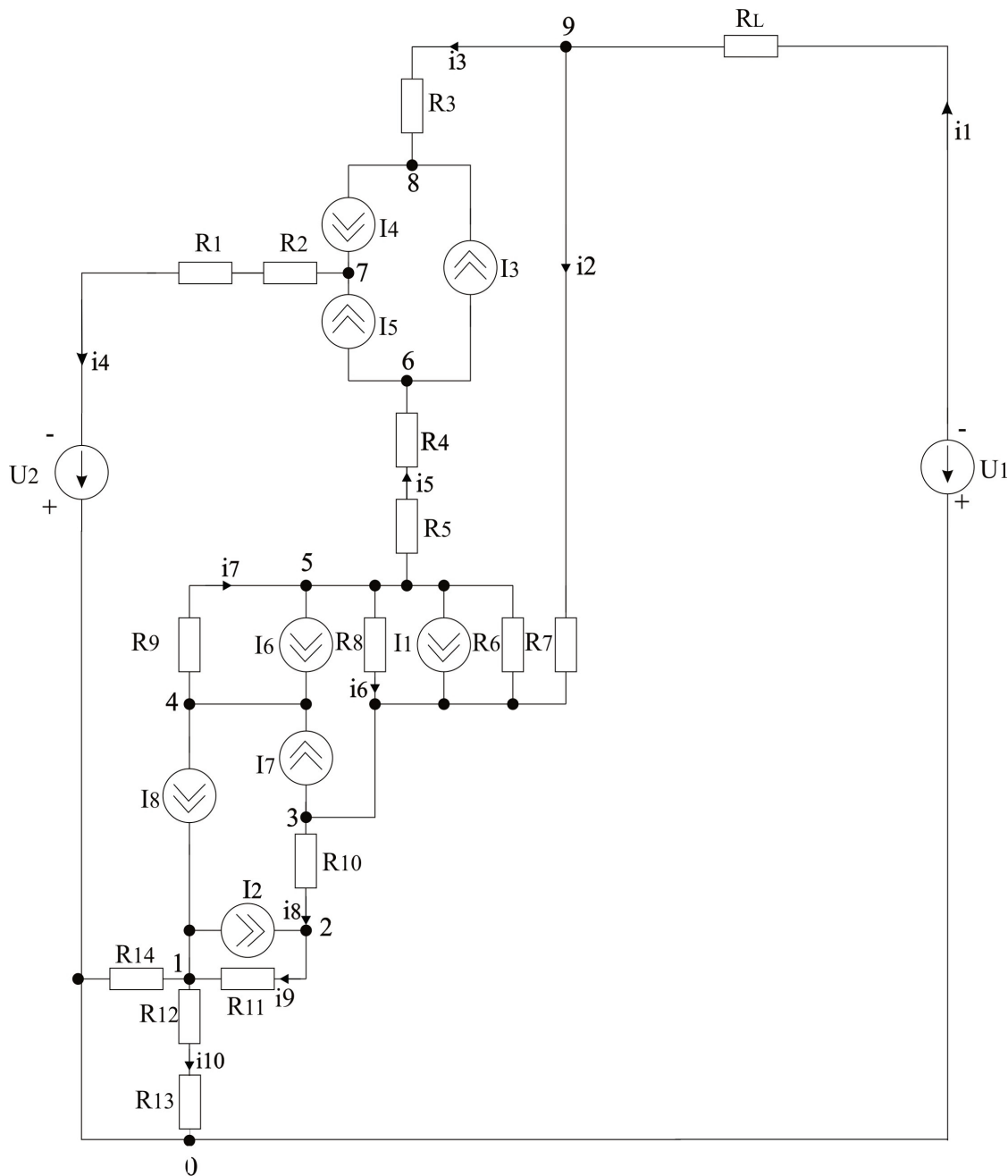


Рис. 3. Перетворена еквівалентна схема оптичного перетворювача по постійному струму

В схемі на рис. 3 R_L — опір активного індуктивного елемента, який визначається з формули

$$R_L = \frac{U_1}{-U_1 \left(\frac{c}{b^2 - ac} \right) - \frac{I_{bc2}}{BR} + \frac{I_{be2} - I_{bc2}}{Q_b} + \frac{I_{be2}}{BF}}$$

де $a = R_{15} + R_{16} + R_{18}$; $b = R_{18} + R_{16}$; $c = R_{16} + R_{17} + R_{18}$.

Для цієї схеми по першому закону Кірхгофа, прийнявши вузол 0 в якості базису, складено систему рівнянь

$$\begin{cases} I_2 - I_8 = -\phi_1 (Y_9 + Y_{10}) + \phi_2 Y_9; \\ -I_2 = \phi_1 Y_9 - \phi_2 (Y_9 + Y_8) + \phi_3 Y_8; \\ I_7 - I_1 = \phi_2 Y_8 - \phi_3 (Y_8 + Y_6 + Y_2) + \phi_5 Y_6 + \phi_9 Y_2; \\ I_8 - I_6 - I_7 = -\phi_4 Y_7 + \phi_5 Y_7; \\ I_6 + I_1 = \phi_3 Y_6 + \phi_4 Y_7 - \phi_5 (Y_5 + Y_6 + Y_7) + \phi_6 Y_5; \\ I_5 + I_3 = \phi_5 Y_5 - \phi_6 Y_5; \\ -(I_4 + I_5) + U_2 Y_4 = -\phi_7 Y_4; \\ I_4 - I_3 = -\phi_8 Y_3 + \phi_9 Y_3; \\ 0 = \phi_3 Y_2 + \phi_8 Y_3 - \phi_9 (Y_3 + Y_2 + Y_1) - U_1 Y_1. \end{cases} \quad (1)$$

Провідності гілок еквівалентної схеми визначаються як:

$$\begin{aligned} Y_1 &= 1/R_L; \\ Y_2 &= 1/R_7; \\ Y_3 &= 1/R_3; \\ Y_4 &= 1/(R_1 + R_2); \\ Y_5 &= 1/(R_4 + R_5); \\ Y_6 &= (R_6 + R_8)/(R_6 * R_8); \\ Y_7 &= R_9; \\ Y_8 &= 1/R_{10}; \\ Y_9 &= 1/R_{11}; \\ Y_{10} &= R_{14} * (R_{12} + R_{13})/(R_{12} + R_{13} + R_{14}). \end{aligned}$$

Для спрощення системи рівнянь (1) введемо позначення

$$\begin{aligned} A1 &= I_2 - I_8; \quad A2 = -I_2; \quad A3 = I_7 - I_1; \quad A4 = I_8 - I_6 - I_7; \quad A5 = I_6 + I_1; \\ A6 &= I_5 + I_3; \quad A7 = -(I_5 + I_4); \quad A8 = I_4 - I_3. \end{aligned}$$

Струм, який протікає у вихідному колі еквівалентної схеми, визначається як

$$i_{\text{вих}} = i_1 = (-U_1 - \phi_9) Y_1.$$

Підставивши в останнє рівняння значення ϕ_9 , отримане з системи рівнянь (1), отримаємо аналітичний вираз для вольт-амперної характеристики оптичного перетворювача:

$$\begin{aligned} i_{\text{вих}} &= -U_1 Y_1 + U_1 Y_1 \left(\frac{Y_1}{Y_8 + Y_6 + Y_2} - \frac{Y_1 Y_8^2}{B_1} - Y_1 Y_6 \right) / B_2 + \frac{Y_1 A_3}{B_2} + \frac{Y_1 A_2 Y_8}{B_1 B_2} + \\ &+ \frac{Y_1 Y_9 Y_8}{(Y_9 + Y_{10}) B_1 B_2} - \frac{Y_1 A_8 Y_8^2}{Y_2 B_1 B_2} + \frac{Y_1 A_8 (Y_8 + Y_6 + Y_2)}{Y_2 B_2} + \frac{Y_1 A_5}{B_2} - \frac{Y_1 A_8 Y_6}{Y_2 B_2} + \frac{Y_1 A_4}{B_2} + \frac{Y_1 A_6}{B_2}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{де } B_1 = Y_8 + Y_9 - \frac{Y_9^2}{Y_9 + Y_{10}}; \quad B_2 = (Y_3 + Y_2 + Y_1 - 1) \left(Y_8 + Y_2 - Y_8^2 / B_1 \right) - Y_2.$$

Експериментальні дослідження

Під час проведення експерименту використовувались схема перетворювача на основі біполярних транзисторів КТ 363 та МДН-транзистора КП 327 з конденсаторами С1 та С2, ємність яких 470 нФ. Експериментальна та розрахована з виразу (14) вольт-амперна характеристика перетворювача показана на рис. 3.

Висновки

Отримано аналітичний вираз для вольт-амперної характеристики на основі системи рівнянь Кірхгофа, складених для еквівалентної схеми оптичного частотного перетворювача на основі біполярного та МДН-транзисторів з активним індуктивним елементом. Розбіжність теоретичних та експериментальних результатів становить 3 %.

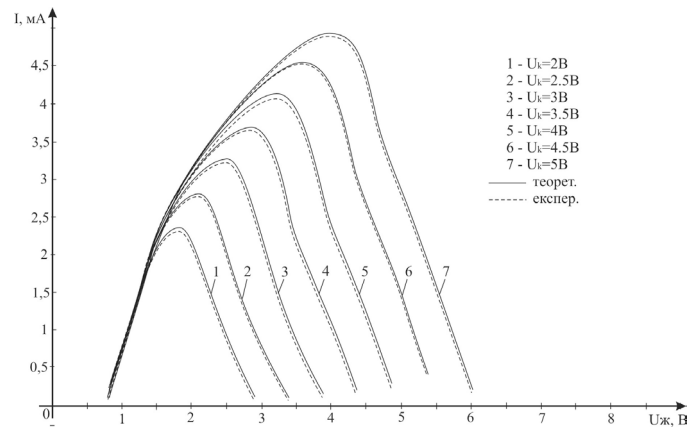


Рис. 3 Теоретичні вольт-амперні характеристики частотного оптичного перетворювача на основі транзисторів КТ 363 та КП 327

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Таруи Ясуо. Основы технологии СБИС ; пер.с япон. / Ясуо Таруи; под. ред. В. Г. Ржанова — М. : Радио и связь, 1985. — 480 с.
2. Контроль процессов травления материалов в низкотемпературной газоразрядной плазме / В. С. Данилин, В. Ю. Киреев, В. А. Каплин, Э. М. Врублевский // Приборы и техника эксперимента. — 1980. — № 1. — С. 13—28.
3. Кравченко Ю. С. Шляхи підвищення ефективності контролю і управління плазмохімічними процесами / Юрій Степанович Кравченко, Володимир Степанович Осадчук, Сергій Юрійович Кравченко // Вісник Вінницького політехнічного університету. — 2007. — № 6. — С. 119—125
4. Александр Владимирович Осадчук. Фоточувствительные преобразователи на основе структур с отрицательным сопротивлением: монография / А. В. Осадчук. — Винница : Континет, 1998. — 130 с.
5. Разевиг Всеволод Данилович. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Выпуск 2. Модели компонент аналоговых устройств / В. Д. Разевиг. — М. : Радио и связь, 1992. — 72 с.
6. Ферри Дэвид. Электроника ультрабольших интегральных схем / Ферри Д., Эйкерс Л., Гринич Э. — М. : Мир, 1991. — 327 с.

Рекомендована кафедрою електроніки

Надійшла до редакції 15.04.09
Рекомендована до друку 7.05.09

Осадчук Володимир Степанович — завідувач кафедри, **Юрій Степанович Кравченко** — доцент, **Олена Олександрівна Селецька** — аспірант.

Кафедра електроніки;

Осадчук Олександр Володимирович — завідувач кафедри радіотехніки.

Вінницький національний технічний університет