

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

СЕЛЕЦЬКА ОЛЕНА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 621.382.8

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ОПТИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ
ПЛАЗМОХІМІЧНОГО ТРАВЛЕННЯ**

Спеціальність 05.11.08 – Радіовимірювальні прилади

Автореферат

**дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Вінниця – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Осадчук Володимир Степанович,
Вінницький національний технічний університет,
професор кафедри електроніки

Офіційні опоненти: д.т.н., професор
Манойлов В'ячеслав Пилипович,
Житомирський державний технологічний університет,
завідувач кафедри радіотехніки та телекомунікації

д.т.н., старший науковий співробітник
Бех Олександр Дмитрович,
Інститут проблем математичних машин
та систем НАН України, м. Київ,
завідувач лабораторією

Захист відбудеться 15 січня 2011 р. о 9³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.02 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ауд. 210 ГНК.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий 14 грудня 2010 р.

В. о. вченого секретаря
спеціалізованої вченої ради

В.Ю. Кучерук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним з ключових факторів у досягненні високої якості продукції та забезпеченні автоматизації технологічних процесів є оперативний контроль їх параметрів. У мікроелектронній технології плазмохімічні процеси на даний час забезпечують найвищу точність відтворення рельєфного рисунку на кремнієвих пластинах. Найбільш інформативним та технологічним методом, який використовується для визначення параметрів плазмохімічних процесів є емісійно-спектральний метод. Однак, існують задачі технічної реалізації даного методу при малих значеннях інтенсивності спектру власного випромінювання плазми. Розв'язок цих задач можливий за рахунок значного підвищення чутливості оптичних перетворювачів, зокрема, шляхом перетворення інформативного електричного сигналу в частотний. Характеристики перетворювачів визначають точність і надійність систем управління і регулювання технологічними процесами, характеристик навколишнього середовища, безпеку роботи промислових установок тощо. Тому до оптичних сенсорів пред'являються жорсткі вимоги. Вони повинні бути економічними, забезпечувати високу точність вимірювання, мати мінімальну вагу, габарити та енергоспоживання, бути сумісними з сучасними ЕОМ та мати можливість виготовлення за стандартною груповою інтегральною технологією. Перспективним науковим напрямком є розробка та створення радіовимірювальних перетворювачів, які реалізують принцип перетворення "освітленість-частота-час плазмохімічного травлення", на основі реактивних властивостей напівпровідникових структур з від'ємним опором. Використання таких приладів виключає з їх конструкцій аналого-цифрові перетворювачі, що дозволяє знизити собівартість систем управління, а також створити "інтелектуальні" вимірювальні перетворювачі в результаті поєднання на одному кристалі схем обробки інформації та первинного перетворювача.

Тому необхідність розробки теоретичних підходів до створення радіовимірювальних оптичних перетворювачів з частотним виходом на основі реактивних властивостей напівпровідникових приладів з від'ємним опором, а також розробки схем, конструкцій, експериментального дослідження параметрів, оцінюванню їх метрологічних характеристик, розробки мікропроцесорної системи вимірювання величини освітленості в промисловості з використанням радіовимірювальних оптичних перетворювачів та впровадження їх у виробництво є актуальним на даний час.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота проводилась відповідно до госпдоговірних та держбюджетних фундаментальних науково-дослідних робіт протягом 2005-2010 рр.: "Розробка математичних моделей і принципових схем радіовимірювальних перетворювачів витрат газу" (НДР № державної реєстрації 0108U00935) "Розробка математичних моделей мікроелектронних радіовимірювальних перетворювачів для систем променевої парофазної технології" (НДР № державної реєстрації 0105U002419), а також згідно Програми розвитку електронної промисловості України на 2005-2010 рр. "Електроніка України-2010".

Мета і завдання дослідження

Метою роботи є покращення метрологічних показників, зокрема, чутливості та завадостійкості оптичних перетворювачів технологічно сумісних з мікроелектронною технологічною базою за рахунок перетворення електричного сигналу в частотний.

Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі розв'язуються такі завдання:

1. Проаналізувати існуючі методи визначення часу плазмохімічних процесів та обґрунтувати вибір емісійно-спектрального методу по відношенню до існуючих;
2. Розробити математичні моделі радіовимірювальних оптичних частотних перетворювачів, на основі яких отримати аналітичні залежності вольт-амперних характеристик перетворювачів, залежність повного вихідного опору від електричних параметрів живлення, функції перетворення та рівняння чутливості;

3. Розробити радіовимірювальні оптичні перетворювачі на основі МДН- та біполярної транзисторної структури з пасивним та активним індуктивними елементами;

4. Виконати експериментальну перевірку математичних моделей і дослідити властивості радіовимірювальних оптичних перетворювачів від впливу освітленості випромінювання плазми;

5. Розробити мікропроцесорну систему вимірювання освітленості з використанням радіовимірювальних оптичних перетворювачів на основі транзисторних структур з від'ємним опором для визначення часу плазмохімічного процесу.

Об'єктом дослідження є процес перетворення освітленості у частотний сигнал у чутливих напівпровідникових структурах, що породжує задачу розбудови радіовимірювальних оптичних перетворювачів з покращеними метрологічними показниками.

Предметом дослідження є характеристики радіовимірювальних оптичних перетворювачів на основі реактивних транзисторних структур з від'ємним опором.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні рівнянь математичної фізики для розробки математичних моделей перетворювачів; основних положень теорії функції комплексної змінної для визначення функції перетворення та рівняння чутливості; теорії розрахунку нелінійних електричних кіл з використанням законів Кірхгофа для визначення повного опору радіовимірювальних оптичних перетворювачів на основі МДН- та біполярного транзисторних структур.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Вперше запропоновано метод використання реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором для створення первинних перетворювачів величини освітленості випромінювання плазми, що працюють за принципом "освітленість – частота - час плазмохімічного травлення", який, на відміну від наявних, дав можливість покращити параметри радіовимірювальних оптичних перетворювачів, а також поліпшити метод визначення часу травлення в плазмохімічних процесах.

2. Вперше запропоновано метод визначення часу процесу плазмохімічного травлення, який відрізняється від існуючих тим, що використовуються залежності в часі освітленості відповідних спектральних ліній і смуг та частотне перетворення аналогового сигналу, що дає можливість підвищити точність визначення часу травлення.

3. Удосконалено математичні моделі радіовимірювальних оптичних перетворювачів, в яких на відміну від існуючих, враховано вплив освітленості на елементи нелінійних еквівалентних схем перетворювачів на основі МДН- та біполярної транзисторної структури з від'ємним опором, що дозволило отримати рівняння чутливості та функції перетворення освітленості у частоту.

Практичне значення одержаних результатів

1. У результаті математичного моделювання отримані аналітичні вирази, які можуть бути використаними для інженерного розрахунку вольт-амперних характеристик радіовимірювальних оптичних перетворювачів, що забезпечують вибір оптимального режиму їх електричного живлення. Отримано аналітичні вирази для функції перетворення і чутливості розроблених радіовимірювальних оптичних перетворювачів, які можуть бути використані для інженерного розрахунку первинних оптичних перетворювачів.

2. Розроблено частотні радіовимірювальні оптичні перетворювачі на основі МДН- та біполярної транзисторної структури для виміру зміни величини освітленості в діапазоні від 0 до 80 люкс з чутливістю від 2 до 62 кГц/люкс для перетворювача з фоторезистором та з чутливістю від 2 до 130 кГц/люкс для перетворювача з фототранзистором при похибці вимірювання 0,21% і амплітудою вихідного сигналу 5В. Розроблено частотні радіовимірювальні оптичні перетворювачі на основі МДН- та біполярної транзисторної структури з активним індуктивним елементом для виміру зміни величини освітленості в діапазоні від 0 до 80 люкс з чутливістю від 2 до 61 кГц/люкс для перетворювача з

фоторезистором та з чутливістю від 2 до 170 кГц/люкс для перетворювача з фототранзистором при похибці вимірювання 0,21% і амплітудою вихідного сигналу 5 В.

3. Розроблено пакет прикладних програм в обчислювальному середовищі "Matlab 6.5" для моделювання та розрахунків характеристик розроблених радіовимірювальних частотних оптичних перетворювачів.

4. Розроблено вимірювальний блок для визначення величини освітленості, що входить в систему управління плазмохімічним процесом видалення фоторезисту, яка використовується в технології виготовлення напівпровідникових приладів.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в НДІ індикаторних приладів "Гелій" (м. Вінниця), а також у навчальний процес при вивченні спецкурсу "Напівпровідникові перетворювачі інформації", для студентів спеціальності 07.09.0801 "Мікроелектроніка та напівпровідникові прилади".

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. В роботах опублікованих у співавторстві здобувачеві належать: аналіз сучасного стану розвитку методів визначення часу плазмохімічних процесів [1], розробка математичної моделі вольт-амперної характеристики частотного оптичного перетворювача на основі МДН-біполярної структури з від'ємним опором та фоточутливим резистивним елементом, та її експериментальна перевірка [2, 7], розробка математичної моделі частотного оптичного перетворювача на основі МДН-біполярної структури з від'ємним опором та фоточутливим резистивним елементом, на основі вирішення якої отримані аналітична залежність функції перетворення, залежності активної та реактивної складової повного опору від впливу зміни величини освітленості і режимів електричного живлення та їх експериментальна перевірка [3], розробка математичної моделі частотного оптичного перетворювача на основі МДН-біполярної структури з від'ємним опором та активним індуктивним елементом на основі вирішення якої отримані аналітичні залежності функції перетворення та чутливості, залежності активної та реактивної складової повного опору від зміни величини освітленості і режимів електричного живлення та їх експериментальна перевірка [4], проведення дослідження частотного оптичного перетворювача в системі управління плазмохімічним процесом [5, 9], розрахунок вольт-амперної характеристики оптичного частотного перетворювача на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним опором та фоточутливим резистивним елементом, [6, 10], розрахунок вольт-амперної характеристики оптичного частотного перетворювача з фототранзистором в якості фоточутливого елемента [8], розробка вимірювального блоку для визначення часу плазмохімічного травлення у складі системи управління технологічним процесом [11], включення фоторезистора в коло бази біполярного транзистора [12, 13], включення фотодіода в коло бази колектор-затвор біполярного та польового транзисторів [14, 15].

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, що викладені в дисертації, були апробовані на наукових конференціях, серед них: III Міжнародна науково-технічна конференція "Оптоелектронні інформаційні технології. Фотоніка ОДС-2005" (27-28 квітня 2005 р., м. Вінниця); I Міжнародна науково-технічна конференція "Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування" (2-5 червня 2005 р., м. Вінниця); II Міжнародна науково-технічна конференція "Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування" (16-19 листопада 2006 р., м. Вінниця); IV Міжнародна науково-практична конференція "Перспективні напрацювання науки і техніки" (07-15 листопада 2008 р., м. Пшемишль); Міжнародна науково-практична конференція "Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании" (15-25 грудня 2008 р., м. Одеса); IV Міжнародна науково-практична конференція "Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування" (8-9 жовтня 2009 р., м. Вінниця); Міжнародна науково-практична конференція "Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія" (19-21 травня 2010 р., м. Вінниця); XXXIII науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів

університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області (2004 р.); XXXIV науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м.Вінниці та області (2005 р.); XXXVIII науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м.Вінниці та області. (17-20 березня 2010 р., м. Вінниця); XXXIX науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м.Вінниці та області. (9-12 березня 2010 р., м. Вінниця).

Публікації. Результати дисертації опубліковано у 15 наукових працях. Серед них 6 статей у науково-фахових журналах, 5 статей у науково-технічних журналах та збірниках праць науково-технічних конференцій, отримано 4 патенти на корисну модель України.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу і 4-х розділів, списку використаних джерел і 8-ти додатків. Загальний обсяг дисертації 205 сторінок, з яких основний зміст викладений на 150 сторінках друкованого тексту, містить 121 рисунок, 4 таблиці. Список використаних джерел складається з 133 найменувань. Додатки містять результати розрахунків, фрагменти програмного забезпечення та акти впровадження результатів роботи.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** до дисертації обґрунтовано актуальність задач досліджень, сформульовано мету роботи та задачі дослідження. Дана характеристика наукової новизни та практичної цінності отриманих результатів. Показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

У **першому розділі** проведено аналіз існуючих методів визначення часу плазмохімічного травлення, які займають провідне місце в напівпровідниковій технології і до яких на сучасному етапі розвитку науки і техніки висувають підвищені вимоги точності при одночасному ускладненні експлуатаційних умов, що пов'язано з автоматизацією технологічних процесів.

Показано, що найбільш перспективним є метод емісійної спектроскопії, в якому підвищення достовірності визначення часу плазмохімічних процесів можливе лише при значному зростанні чутливості первинних оптичних перетворювачів, зокрема, за рахунок перетворення оптичного інформативного сигналу в частотний. Це можливо реалізувати використовуючи в якості первинних перетворювачів радіовимірювальні оптичні перетворювачі з частотним виходом на основі реактивних властивостей напівпровідникових структур з від'ємним опором. Використання частотного принципу роботи оптичних перетворювачів дає змогу підвищити завадостійкість пристроїв, що підвищує точність, отримати значно більші вихідні сигнали в порівнянні з амплітудними перетворювачами, покращити метрологічні та економічні показники пристроїв. Виходячи з аналізу літературних джерел визначено мету та задачі дослідження.

У **другому розділі** розроблено радіовимірювальні оптичні перетворювачі на основі польового та біполярного транзисторів з фоторезистором та фототранзистором в якості фоточутливих елементів.

Електрична схема радіовимірювального оптичного перетворювача з фоторезистором подана на рис. 1. Вона складається з біполярного транзистора VT1 та МДН-транзистора VT2, які разом з індуктивністю L1, ємностями C1 та C2 утворюють автогенератор. Живлення приладу здійснюють джерела напруги U1 та U2. Фоточутливим елементом є фоторезистор R1.

Еквівалентна ємність на електродах колектора біполярного транзистора VT1 і стоку

МДН-транзистора VT2 разом з індуктивність L1 утворюють коливальний контур, втрати енергії в якому компенсуються від'ємним опором. Під час дії оптичного випромінювання на фоторезистор R1 змінюється еквівалентна ємність і динамічний опір коливального контуру перетворювача, що викликає зміну частоти генерації пропорційній величині освітленості.

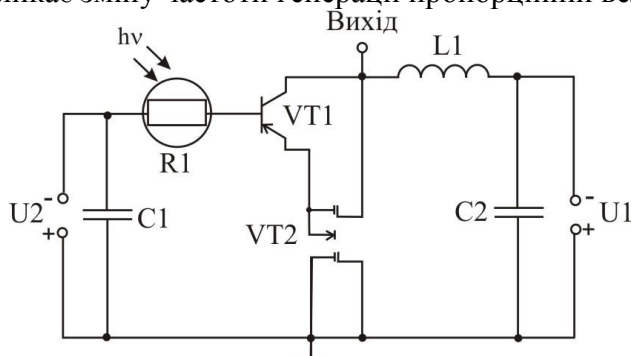


Рис. 1. Електрична схема радіовимірювального оптичного перетворювача з фоторезистором

На основі еквівалентної схеми перетворювача визначена функція перетворення. Вона описує залежність частоти генерації від освітленості випромінювання та має вигляд

$$F = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{2} \sqrt{L_1 C_4 (-L_1 C_4 + R_1^2(E) C_3^2 + R_1^2(E) C_3 C_4 + A)}}{L_1 C_3 C_4 R_1(E)}, \quad (1)$$

де $A = \sqrt{L_1^2 C_4^2 + 2L_1 C_3^2 C_4 R_1^2(E) - 2L_1 C_4^2 C_3 R_1^2(E) + R_1^4(E) C_3^4 + 2R_1^4(E) C_3^3 C_4 + R_1^4(E) C_3^2 C_4^2}$,

L_1 - зовнішня індуктивність, R_1 - опір фоторезистора, C_3 - ємність фоторезистора, C_4 - ємність між зовнішнім виводом бази і колектора біполярного транзистора VT1.

На рис. 2 подані теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації перетворювача від освітленості.

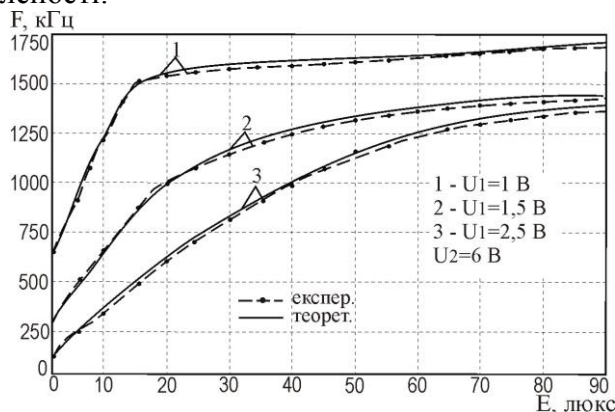


Рис. 2. Теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації оптичного перетворювача з фоторезистором від зміни величини освітленості ($\lambda=520$ нм)

Чутливість пристрою визначається на основі виразу (1) і описується рівнянням

$$\begin{aligned}
S_E^F = & \frac{1}{4} \sqrt{2} \left(2R_1(E)C_3^2 \left(\frac{\partial}{\partial E} R_1(E) \right) + 2R_1(E)C_3C_4 \left(\frac{\partial}{\partial E} R_1(E) \right) + \right. \\
& + \left. \left(\frac{1}{2} \left(4L_1R_1(E)C_4C_3^2 \left(\frac{\partial}{\partial E} R_1(E) \right) - 4L_1R_1(E)C_4^2C_3 \left(\frac{\partial}{\partial E} R_1(E) \right) + \right. \right. \right. \\
& + 4R_1^3(E)C_3^4 \left(\frac{\partial}{\partial E} R_1(E) \right) + 8R_1^3(E)C_3^3C_4 \left(\frac{\partial}{\partial E} R_1(E) \right) + \\
& \left. \left. \left. + 4R_1^3(E)C_3^2C_4^2 \left(\frac{\partial}{\partial E} R_1(E) \right) \right) \right) / \sqrt{D_1} \right) / \left(\sqrt{-L_1C_4(D_2 + \sqrt{D_1})} \right) - \frac{1}{2} \sqrt{2} \times \\
& \times \sqrt{L_1C_4(D_2 + \sqrt{D_1})} \left(\frac{\partial}{\partial E} R_1(E) \right) / \left(L_1C_4C_3R_1^2(E) \right),
\end{aligned} \tag{2}$$

де

$$D_1 = L_1^2C_4^2 + 2L_1C_4C_3^2R_1^2(E) - 2L_1C_4^2C_3R_1^2(E) + R_1^4(E)C_3^4 + 2R_1^4(E)C_3^3C_4 + R_1^4(E)C_3^2C_4^2;$$

$$D_2 = -L_1C_4 + R_1^2(E)C_3^2 + R_1^2(E)C_4C_3.$$

Графік залежності чутливості від величини освітленості представлений на рис. 3.

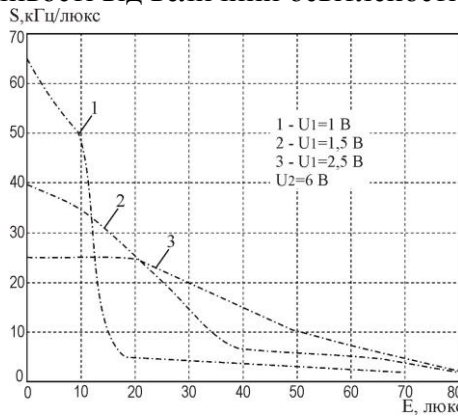


Рис. 3. Залежності чутливості радіовимірювального оптичного перетворювача з фоторезистором від величини освітленості ($\lambda=520$ нм)

З рис. 3 видно, що найбільша чутливість пристрою лежить в діапазоні від 1 до 40 люкс та змінюється від 64 до 5 кГц/люкс.

Для покращення метрологічних параметрів було розроблено радіовимірювальний оптичний перетворювач із фототранзистором в якості фоточутливого елементу. Електрична схема пристрою подана на рис. 4. Вона складається з біполярного транзистора VT1 та МДН-транзистора VT2, які утворюють ємність коливального контуру. У вихідне коло перетворювача увімкнено фототранзистор VT3.

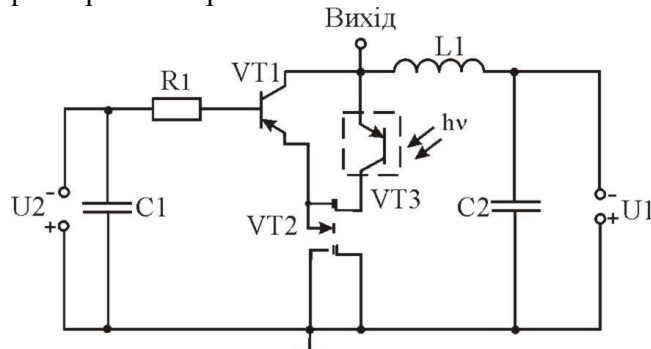


Рис. 4. Електрична схема радіовимірювального оптичного перетворювача з фототранзистором

На основі еквівалентної схеми перетворювача визначена функція перетворення. Вона описує залежність частоти генерації від освітленості випромінювання та має вигляд

$$F = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{2} \sqrt{L_1 C_{12} (-L_1 C_{12} + R_1^2(E) C_{15}^2(E) + R_1^2(E) C_{15}(E) C_{12} + A)}}{L_1 C_{15}(E) C_{12} R_1(E)}, \quad (3)$$

$$\text{де } A = \sqrt{L_1^2 C_{12}^2 + 2L_1 C_{15}^2(E) C_{12} R_1^2(E) - 2L_1 C_{12}^2 C_{15}(E) R_1^2(E) + R_1^4(E) C_{15}^4(E) + 2R_1^4(E) C_{15}^3(E) C_{12} + R_1^4(E) C_{15}^2(E) C_{12}^2},$$

L_1 - зовнішня індуктивність, R_1 - опір резистора R1, C_{12} - ємність між першим і другим затвором МДН-транзистора VT2, C_{15} - ємність р-п переходу діода фототранзистора VT3.

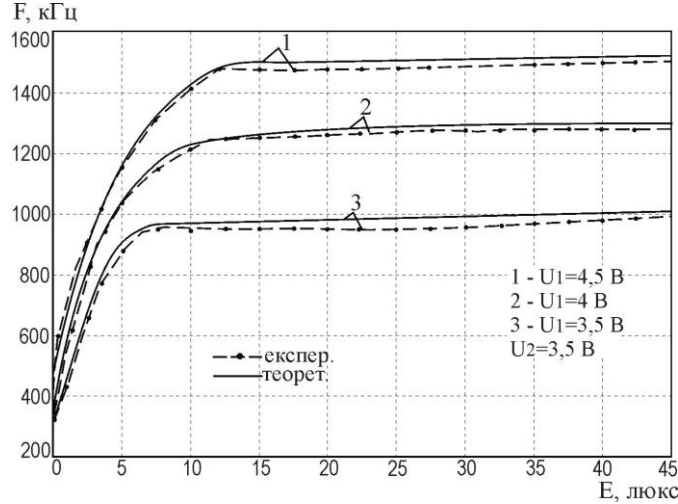


Рис. 5. Теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації від зміни величини освітленості ($\lambda=520$ нм)

На рис. 5 подані теоретична та експериментальні залежності частоти генерації перетворювача від освітленості. Чутливість пристрою визначається на основі виразу (3) і описується рівнянням

$$\begin{aligned} S_E^F = & \frac{1}{4} \sqrt{2} \left(2R_{18}(E) C_{15}^2(E) \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{18}(E) \right) + 2R_{18}^2(E) C_{15}(E) \left(\frac{\partial}{\partial E} C_{15}(E) \right) + \right. \\ & + 2R_{18}(E) C_{15}(E) C_{12} \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{18}(E) \right) + R_{18}^2(E) C_{12} \left(\frac{\partial}{\partial E} C_{15}(E) \right) + \frac{1}{2} (4L_1 C_{12} R_{18}(E) \times \\ & C_{15}^2(E) \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{18}(E) \right) + 4L_1 C_{12} R_{18}^2(E) C_{15}(E) \left(\frac{\partial}{\partial E} C_{15}(E) \right) - 4L_1 C_{12}^2 R_{18}(E) \times \\ & \times C_{15}(E) \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{18}(E) \right) - 2L_1 C_{12}^2 R_{18}^2(E) \left(\frac{\partial}{\partial E} C_{15}(E) \right) + 4R_{18}^3(E) C_{15}^4(E) \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{18}(E) \right) + \\ & + 4R_{18}^4(E) C_{15}^3(E) \left(\frac{\partial}{\partial E} C_{15}(E) \right) + 8R_{18}^3(E) C_{15}^3(E) C_{12} \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{18}(E) \right) + 6R_{18}^4(E) C_{15}^2(E) C_{12} \times \\ & \times \left. \left(\frac{\partial}{\partial E} C_{15}(E) \right) + 4R_{18}^3(E) C_{15}^2(E) C_{12}^2 \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{18}(E) \right) + 2R_{18}^4(E) C_{15}(E) C_{12}^2 \left(\frac{\partial}{\partial E} C_{15}(E) \right) \right) / D_1 \Bigg/ \\ & \Bigg/ \left(\sqrt{L_1 C_{12} (D_2 + D_1)} R_{18}(E) C_{15}(E) \right) - \frac{1}{2} \sqrt{2} \sqrt{L_1 C_{12} (D_2 + D_1)} \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{18}(E) \right) \Bigg/ (L_1 C_{12} R_{18}^2(E) \times \\ & \times C_{15}(E) - \frac{1}{2} \sqrt{2} \sqrt{L_1 C_{12} (D_2 + D_1)} \left(\frac{\partial}{\partial E} C_{15}(E) \right) \Bigg/ (L_1 C_{12} R_{18}(E) C_{15}^2(E)), \quad (4) \end{aligned}$$

$$\text{де } D_1 = \sqrt{L_1^2 C_{12}^2 + 2L_1 C_{12} C_{15}^2(E) R_{18}^2(E) - 2L_1 C_{12}^2 C_{15}(E) R_{18}^2(E) + R_{18}^4(E) C_{15}^4(E) + 2R_{18}^4(E) \times} \\ \times C_{15}^3(E) C_{12} + R_{18}^4(E) C_{15}^2(E) C_{12}^2,$$

$$D_2 = -L_1 C_{12} + R_{18}^2(E) C_{15}^2(E) + R_{18}^2(E) C_{15}(E) C_{12}.$$

Графік залежності чутливості від величини освітленості представлений на рис. 6.

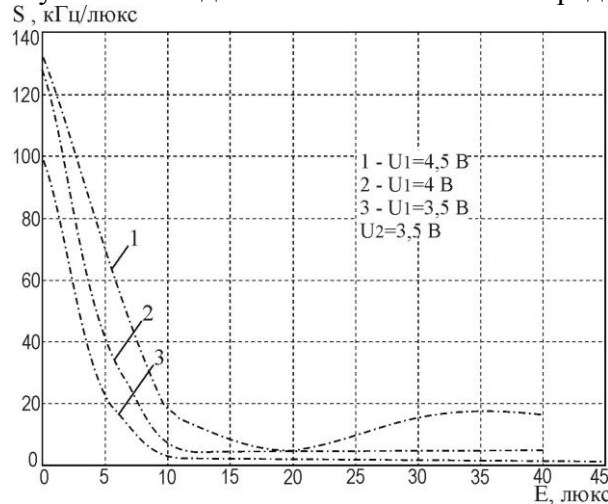


Рис. 6. Залежності чутливості оптичного перетворювача з фототранзистором від зміни величини освітленості ($\lambda=520$ нм)

З графіку видно, що із зміною освітленості від 1 до 15 люкс, чутливість змінюється від 130 до 2 кГц/люкс.

У **третьому розділі** розроблено радіовимірювальні оптичні перетворювачі з активним індуктивним елементом на основі польового та біполярного транзисторів з фоторезистором та фототранзистором в якості фоточутливих елементів, що дало змогу покращити метрологічні параметри перетворювачів і здійснити виготовлення приладів за інтегральною технологією. Розроблені математичні моделі, за допомогою яких отримані вольт-амперні характеристики, залежності активної та реактивної складових повного опору, частоти генерації та чутливості від впливу освітленості, від режимів живлення та проведені їх експериментальні дослідження.

Схему радіовимірювального оптичного перетворювача з активним індуктивним елементом подано на рис. 7.

Транзистори VT1, VT2 і VT3 реалізують генератор електричних коливань, в якому коливальний контур утворено ємнісною складовою повного опору на електродах колектор – стік транзисторів VT1 і VT2 та індуктивною складовою повного опору на електродах емітер-колектор біполярного транзистора VT3. Таким чином, схема перетворювача повністю реалізується у вигляді інтегральної схеми.

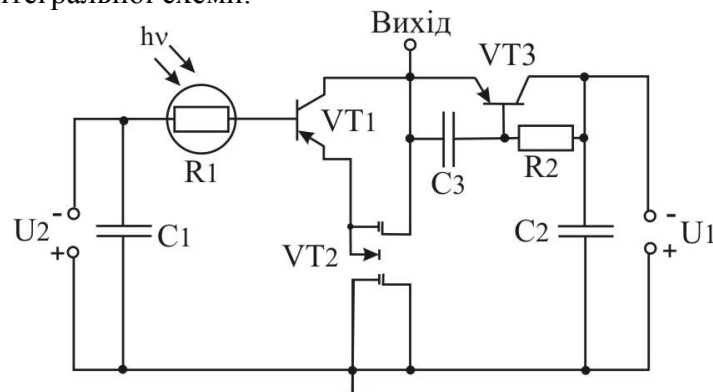


Рис. 7. Електрична схема оптичного перетворювача з фоторезистором та активним індуктивним елементом

Функція перетворення визначається з еквівалентної схеми перетворювача і описується виразом

$$F = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{2} \sqrt{L_{екв} C_6 (-L_{екв} C_6 + R_1^2(E) C_4^2 + R_1^2(E) C_4 C_6 + A)}}{L_{екв} C_4 C_6 R_1(E)}, \quad (5)$$

де

$$A = \sqrt{L_{екв}^2 C_6^2 + 2L_{екв} C_4^2 C_6 R_1^2(E) - 2L_{екв} C_6^2 C_4 R_1^2(E) + R_1^4(E) C_4^4 + 2R_1^4(E) C_4^3 C_6 + R_1^4(E) C_4^2 C_6^2},$$

$L_{екв}$ - еквівалентна індуктивність активного елемента, R_1 - опір фоторезистора R1 на схемі перетворювача, C_4 - ємність фоторезистора R1, C_6 - ємність між зовнішнім виводом бази і колектора транзистора VT1. Графічна залежність функції перетворення подана на рис. 8.

Чутливість перетворювача визначається на основі виразу (5) і описується рівнянням

$$\begin{aligned} S_E^F = & \frac{1}{8} \sqrt{2} \left(2R_1(E) C_4 \left(\frac{\partial}{\partial E} R_1(E) \right) + 2R_1(E) C_6 C_4 \left(\frac{\partial}{\partial E} R_1(E) \right) + \right. \\ & + 2L_{екв} R_1(E) C_6 C_4 \left(\frac{\partial}{\partial E} R_1(E) \right) - 2L_{екв} R_4(E) C_6^2 C_4 \left(\frac{\partial}{\partial E} R_1(E) \right) + \\ & + 2R_1^3(E) C_1^2 \left(\frac{\partial}{\partial E} R_1(E) \right) + 4R_1^3(E) C_6 C_4^2 \left(\frac{\partial}{\partial E} R_1(E) \right) + \\ & + 2R_1^3(E) C_6^2 C_4^2 \left(\frac{\partial}{\partial E} R_1(E) \right) / \sqrt{D_1} \left) / \left(\sqrt{L_{екв} C_6 C_4 (D_2 + \sqrt{D_1})} \pi R_1(E) - \frac{1}{2} \sqrt{2} \times \right. \\ & \left. \times \sqrt{L_{екв} C_6 C_4 (D_2 + \sqrt{D_1})} \left(\frac{\partial}{\partial E} R_1(E) \right) / \pi L_{екв} C_6 C_4 R_1^2(E) \right), \end{aligned} \quad (6)$$

де

$$D_1 = L_{екв}^2 C_6^2 + 2L_{екв} C_6 C_4 R_1^2(E) - 2L_{екв} C_6^2 C_4 R_1^2(E) + R_1^4(E) C_1^2 + 2R_1^4(E) C_4^2 C_6 + R_1^4(E) C_4^2 C_6^2,$$

$$D_2 = -L_{екв} C_6 + R_1^2(E) C_4 + R_1^2(E) C_4 C_1.$$

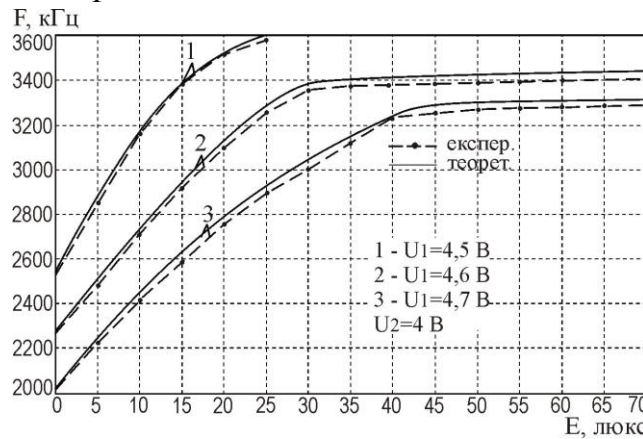


Рис. 8. Теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації від зміни величини освітленості ($\lambda=520$ нм)

Графік залежності чутливості від величини освітленості представлений на рис. 9.

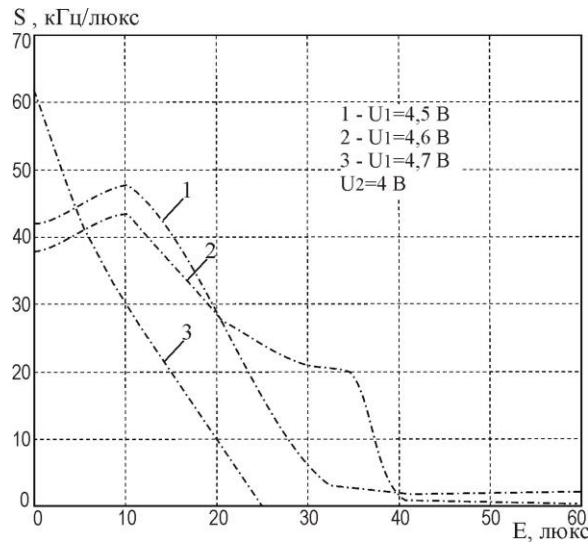


Рис. 9. Залежності чутливості оптичного перетворювача з фоторезистором та активним індуктивним елементом від величини освітленості ($\lambda=520$ нм)

З рис. 9 видно, що із зміною освітленості від 10 до 50 люкс, чутливість змінюється від 61 до 2 кГц/люкс.

Для покращення метрологічних параметрів було розроблено радіовимірювальний оптичний перетворювач з фототранзистором VT3 в якості фоточутливого елемента. Коливальний контур перетворювача утворений еквівалентною ємністю на основі МДН- та біполярного транзисторів VT1 і VT2 та еквівалентною індуктивністю, яка утворена біполярним транзистором VT4 та RC-колом. Електрична схема пристрою подана на рис. 10.

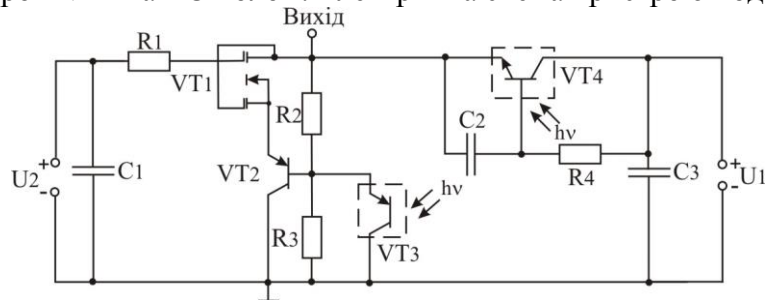


Рис. 10. Електрична схема оптичного перетворювача з фототранзистором та активним індуктивним елементом

Функція перетворення визначається з еквівалентної схеми перетворювача і описується виразом

$$F = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{L_{екв}(E)C_{17}(-L_{екв}(E)C_{17} + R_{19}^2(E)C_{19}^2(E) + R_{19}^2(E)C_{19}(E)C_{17} + A)}}{L_{екв}(E)C_{19}(E)C_{17}R_{19}(E)}, \quad (7)$$

де

$$A = \sqrt{L_{екв}^2(E)C_{17}^2 + 2L_{екв}(E)C_{19}^2(E)C_{17}R_{19}^2(E) - 2L_{екв}(E)C_{17}^2C_{19}(E)R_{19}^2(E) + R_{19}^4(E)C_{19}^4(E) + 2R_{19}^4(E)C_{19}^3(E)C_{17} + R_{19}^4(E)C_{19}^2(E)C_{17}^2}$$

$L_{екв}$ - еквівалентна індуктивність активного елемента, R_{19} - шунтуючий опір, що входить до складу фототранзистора VT3, C_{17} - ємність переходу база-емітер фототранзистора VT3, C_{19} - ємності р-п переходу фототранзистора VT3.

На рис. 11 подані теоретична та експериментальні залежності частоти генерації перетворювача від освітленості.

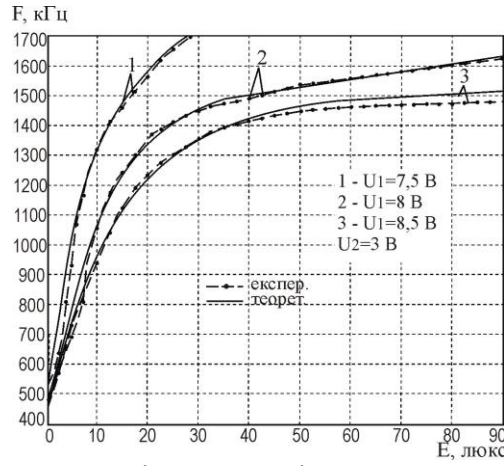


Рис. 11. Теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації від зміни величини освітленості ($\lambda=520$ нм)

Чутливість перетворювача визначається на основі виразу (7) і описується рівнянням

$$\begin{aligned}
 S = & \frac{1}{4} \sqrt{2} \left(\left(\frac{\partial}{\partial E} L_{\text{екв}}(E) \right) C_{17} (D_1 + D_2) + L_{\text{екв}}(E) C_{17}^2 \left(- \left(\frac{\partial}{\partial E} L_{\text{екв}}(E) \right) + 2R_{19}(E) C_{19}^2(E) \times \right. \right. \\
 & \times \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{19}(E) \right) + 2R_{19}^2(E) C_{19}(E) \left(\frac{\partial}{\partial E} C_{19}(E) \right) + 2R_{19}(E) C_{19}(E) C_{17} \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{19}(E) \right) + \\
 & + R_{19}^2(E) C_{17} \left(\frac{\partial}{\partial E} C_{19}(E) \right) + \frac{1}{2} (2L_{\text{екв}}(E) C_{17}^2 \left(\frac{\partial}{\partial E} L_{\text{екв}}(E) \right) + 2R_{19}^2(E) C_{19}^2(E) C_{17} \left(\frac{\partial}{\partial E} L_{\text{екв}}(E) \right) + \\
 & + 4L_{\text{екв}}(E) R_{19}(E) C_{19}^2(E) C_{17} \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{19}(E) \right) + 4L_{\text{екв}}(E) R_{19}(E) C_{19}^2(E) C_{17} \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{19}(E) \right) + 4L_{\text{екв}}(E) \times \\
 & \times R_{19}^2(E) C_{19}(E) C_{17} \left(\frac{\partial}{\partial E} C_{19}(E) \right) - 2R_{19}^2(E) C_{19}(E) C_{17}^2 \left(\frac{\partial}{\partial E} L_{\text{екв}}(E) \right) - 4L_{\text{екв}}(E) R_{19}(E) C_{19}(E) C_{17}^2 \times \\
 & \times \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{19}(E) \right) - 2L_{\text{екв}}(E) R_{19}^2(E) C_{17}^2 \left(\frac{\partial}{\partial E} C_{19}(E) \right) + 4R_{19}^3(E) C_{19}^4(E) \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{19}(E) \right) + 4R_{19}^4(E) C_{19}^3 \times \\
 & \times (E) \left(\frac{\partial}{\partial E} C_{19}(E) \right) + 8R_{19}^3(E) C_{19}^3(E) C_{17} \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{19}(E) \right) + 6R_{19}^4(E) C_{19}^2(E) C_{17} \left(\frac{\partial}{\partial E} C_{19}(E) \right) + \\
 & \left. \left. + 4R_{19}^3(E) C_{19}^2(E) C_{17}^2 \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{19}(E) \right) + 2R_{19}^4(E) C_{19}(E) C_{17}^2 \left(\frac{\partial}{\partial E} C_{19}(E) \right) \right) / D_2 \right) \Bigg/ \\
 & \Bigg/ \left(\sqrt{L_{\text{екв}}^2(E) C_{19}(E) R_{19}(E) C_{17}^2 (D_1 + D_2)} \right) - \frac{1}{2} \sqrt{2} \sqrt{\frac{L_{\text{екв}}(E) C_{17} (D_1 + D_2) \left(\frac{\partial}{\partial E} L_{\text{екв}}(E) \right)}{L_{\text{екв}}^2(E) R_{19}(E) C_{19}(E) C_{17}}} - \\
 & - \frac{1}{2} \sqrt{2} \sqrt{\frac{L_{\text{екв}}(E) C_{17} (D_1 + D_2) \left(\frac{\partial}{\partial E} R_{19}(E) \right)}{L_{\text{екв}}(E) R_{19}^2(E) C_{19}(E) C_{17}}} - \frac{1}{2} \sqrt{2} \sqrt{\frac{L_{\text{екв}}(E) C_{17} (D_1 + D_2) \left(\frac{\partial}{\partial E} C_{19}(E) \right)}{L_{\text{екв}}(E) R_{19}(E) C_{19}^2(E) C_{17}}}, \tag{8}
 \end{aligned}$$

де

$$D_1 = -L_{\text{екв}}(E) C_{17} + R_{19}^2(E) C_{19}^2(E) + R_{19}^2(E) C_{19}(E) C_{17};$$

$$D_2 = \sqrt{L_{\text{екв}}^2(E) C_{17}^2 + 2L_{\text{екв}}(E) C_{17} R_{19}^2(E) C_{19}^2(E) - 2L_{\text{екв}}(E) C_{17} R_{19}^2(E) C_{19}(E) + R_{19}^4(E) C_{19}^4(E) + 2R_{19}^4(E) C_{19}^3(E) C_{17} + R_{19}^4(E) C_{19}^2(E) C_{17}^2}.$$

Графік залежності чутливості від величини освітленості представлений на рис. 12.

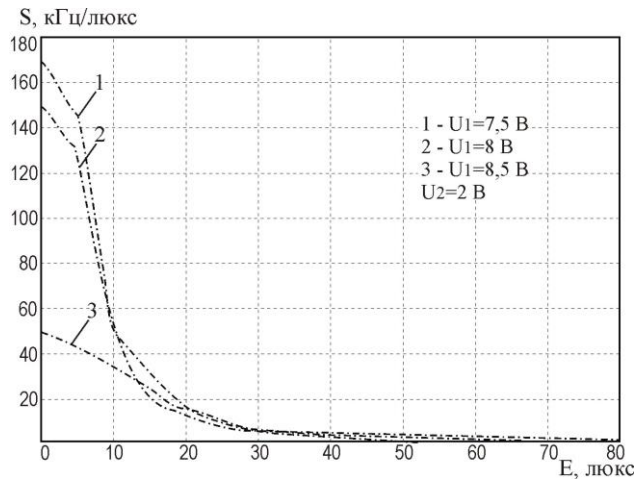


Рис. 12. Залежність чутливості від величини освітленості ($\lambda=520$ нм)

З рис. 12 видно, що із зміною освітленості від 10 до 50 люкс, чутливість змінюється від 170 до 2 кГц/люкс.

У **четвертому розділі** запропоновано використання розроблених перетворювачів у системі управління процесом плазмохімічного травлення фоторезисту для визначення часу травлення. Експериментально визначено зміну частоти генерації перетворювачів від часу перебігу плазмохімічного процесу зняття фоторезисту. В ході проведеного експерименту досліджувався спектр власного випромінювання нерівноважної плазми. Основним інформативним елементом був обраний спектр випромінювання окису вуглецю CO ($\lambda = 520$ нм), який є продуктом взаємодії хімічно активних частинок кисневої плазми і органічної сполуки (фоторезисту). Для вимірювання освітленості смуги CO використовувались оптичні перетворювачі (рис. 1, 4, 7, 10) в яких зміна провідності первинного фоточутливого елемента під дією світла перетворюється в ефективну зміну частоти. Зменшення частоти генерації до фонового рівня, який відповідає значенню частоти на нижньому стабільному рівні частотної характеристики дозволяє визначати момент закінчення процесу плазмового травлення. Чутливість перетворювачів становить від 1,3 кГц/с до 6 кГц/с для різних режимів роботи перетворювачів. Максимальну чутливість має перетворювач з фоторанзистором та активним індуктивним елементом (рис. 10). Зміна частоти генерації в часі під час процесу зняття фоторезисту для даного фотоперетворювача подана на рис. 13.

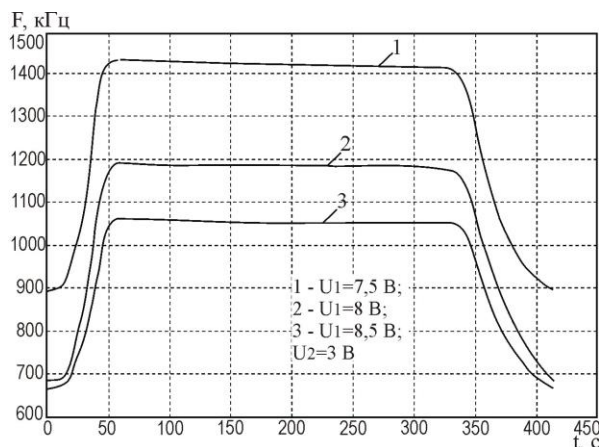


Рис. 13. Зміна частоти генерації в часі під час процесу зняття фоторезисту

Розраховано узагальнені показники технічної досконалості, за якими розроблені радовимірювальні оптичні перетворювачі кращі в 1,24 рази в порівнянні з існуючими, найкращою структурою по чутливості є структура з активним індуктивним елементом.

Розроблена принципова схема вимірювального блоку, що входить до складу системи управління плазмохімічним процесом видалення фоторезисту, яка використовується в технології виготовлення напівпровідникових приладів. Принципова схема вимірювального блоку для вимірювання освітленості та визначення кінцевого моменту травлення складається з мікроконтролера ATmega8, інтерфейсу програмування мікроконтролера та кварцового резонатора.

Визначено апроксимовану залежність частоти генерації від впливу освітленості, яка описана аналітичною функцією, радіовимірювального оптичного перетворювача. Розраховані статичні похибки радіовимірювальних оптичних перетворювачів. Визначено сумарну похибку радіовимірювального оптичного перетворювача, яка становить $\delta_{\Sigma} = \pm 0,21\%$, мультиплікативна похибка в діапазоні вимірювань величини освітленості від 0 люкс до 80 люкс, що змінюється від 0,11% до 0,41%, адитивна похибка вимірювання для цього ж діапазону зміни освітленості змінюється від 0,18 % до 0,86%.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі у науковому плані удосконалені математичні моделі радіовимірювальних оптичних перетворювачів з частотним виходом на основі нелінійних еквівалентних схем, що дозволило отримати вольт-амперні характеристики, функції перетворення і рівняння чутливості розроблених пристроїв, які використовуються для визначення часу плазмохімічного травлення.

В практичному плані створено новий клас радіовимірювальних оптичних перетворювачів з частотним виходом на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором, які працюють в широкому діапазоні частот від 10^3 до 10^6 Гц.

Розроблено пакет прикладних програм в обчислювальному середовищі "Matlab 6.5" для моделювання та розрахунків характеристик перетворювачів з урахуванням залежності параметрів елементів нелінійних еквівалентних схем пристроїв від впливу освітленості.

Отримано такі основні наукові і практичні результати:

1. Вперше запропоновано метод використання реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором для створення радіовимірювальних оптичних перетворювачів, що працюють за принципом "освітленість-частота – час плазмохімічного травлення".

2. Удосконалено математичні моделі радіовимірювальних оптичних перетворювачів з частотним виходом, в яких на відміну від існуючих, врахована залежність від величини освітленості параметрів елементів нелінійних еквівалентних схем перетворювачів на основі біполярної та МДН-транзисторної структури з від'ємним опором, що дало змогу отримати рівняння чутливості та функцію перетворення освітленості у частоту.

3. У результаті математичного моделювання отримано аналітичні вирази, які можуть бути використані для інженерних розрахунків вольт-амперних характеристик, функцій перетворення і чутливості розроблених радіовимірювальних оптичних перетворювачів.

4. Вперше розроблено радіовимірювальні оптичні перетворювачі з частотним виходом на основі біполярної та МДН-транзисторної структури з фоторезистором та фототранзистором в якості чутливих елементів для вимірювання величини освітленості в діапазоні від 0 до 80 люкс. Чутливість в даному діапазоні змінюється від 64 до 2 кГц/люкс для перетворювача з фоторезистором, а для перетворювача з фототранзистором чутливість змінюється від 130 до 2 кГц/люкс.

5. Вперше розроблено радіовимірювальні оптичні перетворювачі на основі біполярної та МДН-транзисторної структури з активним індуктивним елементом для вимірювання освітленості в діапазоні від 10 до 80 люкс. Для перетворювача з фоторезистором, чутливість змінюється від 61 до 2 кГц/люкс, а для перетворювача з

фототранзистором чутливість в діапазоні від 10 до 50 люкс змінюється від 170 до 2 кГц/люкс.

6. Розроблені радіовимірювальні оптичні перетворювачі з частотним виходом використані для створення вимірювального блоку визначення часу травлення, що входить в систему управління плазмохімічним процесом видалення фоторезисту, яка використовується в технології виготовлення напівпровідникових приладів. Сумарна похибка радіовимірювального оптичного перетворювача становить $\delta_{\Sigma} = \pm 0,21\%$. Аналіз проведених теоретичних та експериментальних досліджень показав, що математична модель описує поведінку перетворювачів з похибкою $\pm 5\%$.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Даниленко О.О. Оптичний емісійно-спектральний контроль процесів травлення в низькотемпературній плазмі / В.С. Осадчук, Ю.С. Кравченко, О.О. Даниленко // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. - №2.- 2005. - С.173-180.
2. Селецька О.О. Мікроелектронний оптичний перетворювач для контролю плазмохімічних процесів / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, Ю.С. Кравченко, О.О. Селецька // Вісник Хмельницького національного університету.- №6. – 2008. - С.117-121.
3. Селецька О.О. Оптичний мікроелектронний перетворювач з фототранзистором для контролю плазмохімічних процесів/ В.С. Осадчук, Ю.С. Кравченко, О.О. Селецька // Вісник Хмельницького національного університету. - №5.- 2009. - С.226-231.
4. Селецька О.О. Оптичний мікроелектронний оптичний перетворювач з активним індуктивним елементом для контролю плазмохімічних процесів / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, Ю.С. Кравченко, О.О. Селецька // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - №6.- 2009. - С.94-100.
5. Селецька О.О. Частотний оптичний перетворювач для контролю плазмохімічних процесів / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, Ю.С. Кравченко, О.О. Селецька // Вісник Хмельницького національного університету.- №4.- 2008. - С.160-163.
6. О.О. Даниленко Математична модель емісійно-спектрального частотного перетворювача [Електронний ресурс] / Ю.С. Кравченко // Наукові праці. – №1. -2007. Режим доступу до журн.: http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/vntu/2007-1/ru/07kusefc_ru.pdf.
7. Селецька О.О. Визначення вольт-амперної характеристики частотного оптичного перетворювача для контролю плазмохімічних процесів / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, Ю.С. Кравченко, О.О. Селецька // Перспективні напрацювання науки і техніки: IV міжнародна науково-практична конференція. – Пшемишль, 07-15 листопада 2008 р. – Пшемишль: „Nauka i studia”, 2008.- С.75-80.
8. Селецька О.О. Вольт-амперна характеристика частотного оптичного перетворювача з фототранзистором для контролю плазмохімічних / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, Ю.С. Кравченко, О.О. Селецька // Сучасні проблеми мікроелектроніки, радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування: 4-та міжнародна науково-технічна конференція. – Вінниця, 8-9 жовтня 2009 р. – Вінниця: „УНІВЕРСУМ - Вінниця”, 2009.- С.81.
9. Селецька О.О. Оптичний перетворювач з частотним виходом / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, Ю.С. Кравченко, О.О. Селецька // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании: міжнародна науково-технічна конференція. – Одеса, 15-25 грудня 2008 р. – Одеса, 2008.- С.6-9.
10. Даниленко О.О. Математична модель емісійно-спектрального частотного перетворювача / Ю.С. Кравченко, О.О. Даниленко // Фотоніка-ОДС-2005: III-я міжнародна науково-технічна конференція. – Вінниця, 27-28 квітня 2005 р. – Вінниця: „Універсум - Вінниця”, 2005.- С.218 .

* Даниленко О.О. вважати Селецька О.О. у зв'язку з одруженням і зміною прізвища

11. Селецька О.О. Оптичний перетворювач для визначення часу плазмохімічних процесів / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Ю.С. Кравченко, О.О. Селецька // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія: міжнародна науково-технічна конференція. – Вінниця, 19-21 травня 2010 р.– Вінниця: ВНТУ, 2010.- С. 279.

12. Пат. України № 4229, H01L 21/302. Пристрій для визначення моменту закінчення процесу плазмового травлення / Кравченко Ю.С., Даниленко О.О.; заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. - №2004032002; заявл. 18.03.04; опубл. 17.01.05, Бюл. № 1.

13. Пат. України № 9698, H01L 21/302. Пристрій для визначення моменту закінчення процесу плазмового травлення / Кравченко Ю.С., Даниленко О.О.; заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. - №200502275; заявл. 14.03.05; опубл. 17.10.05, Бюл. № 10.

14. Пат. України № 4413, H01L 21/302. Пристрій для визначення моменту закінчення процесу плазмового травлення / Кравченко Ю.С., Даниленко О.О.; заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. - №20040503420; заявл. 06.05.04; опубл. 17.01.05, Бюл. № 1.

15. Пат. України № 9700, H01L 21/302. Пристрій для визначення моменту закінчення процесу плазмового травлення / Кравченко Ю.С., Даниленко О.О.; заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. - №u200502296; заявл. 14.03.05; опубл. 17.10.05, Бюл. № 10.

АНОТАЦІЯ

Селецька О.О. Радіовимірювальні оптичні перетворювачі для визначення часу плазмохімічного травлення. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.08 - радіовимірювальні прилади. - Вінницький національний технічний університет, Вінниця - 2010.

Дисертаційна робота присвячена розробці радіовимірювальних оптичних перетворювачів з частотним виходом на основі напівпровідникових структур з від'ємним опором, принцип роботи яких базується на функціональній залежності реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором від впливу освітленості оптичного випромінювання плазми, що надає можливість виготовлення та створення конкурентноспроможних зразків цієї продукції.

У дисертаційній роботі розроблені теоретичні підходи до створення радіовимірювальних оптичних перетворювачів у вигляді біполярних та МДН- транзисторних структур на основі розв'язку рівняння Кірхгофа, основних положень теорії комплексної змінної, що дало можливість отримати залежність активної і реактивної складових повного опору, функції перетворення та рівняння чутливості від впливу освітленості та доведено, що ці залежності є суттєвими для створення радіовимірювальних оптичних перетворювачів з поліпшеними метрологічними показниками. Удосконалені математичні моделі радіовимірювальних оптичних перетворювачів, в яких на відміну від існуючих, враховано вплив величини освітленості на елементи нелінійних еквівалентних схем перетворювачів на основі біполярних і МДН- транзисторних структур з від'ємним опором, що дало змогу отримати рівняння чутливості і функції перетворення освітленості у частоту. Розроблено пакет прикладних програм для моделювання та розрахунків характеристик розроблених радіовимірювальних оптичних перетворювачів для визначення часу травлення.

Ключові слова: радіовимірювальний оптичний перетворювач, частота, плазмохімічне травлення, функція перетворення, чутливість.

АННОТАЦИЯ

Селецкая Е.А. Радиоизмерительные оптические преобразователи для определения времени плазмохимического травления. - Рукопись.

Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.08 - радиоизмерительные приборы. - Винницкий национальный технический университет, Винница - 2010.

Диссертационная работа посвящена разработке теоретических основ и практической реализации радиоизмерительных оптических преобразователей с частотным выходом для определения времени плазмохимического травления на основе полупроводниковых структур с отрицательным сопротивлением, принцип работы которых основан на функциональной зависимости реактивных свойств транзисторных структур с отрицательным сопротивлением от воздействия освещенности излучения плазмы, что дает возможность создания и разработки конкурентоспособных образцов этой продукции.

Большинство оптических преобразователей являются аналоговыми, при помощи которых оптическое излучение преобразуются в электрический сигнал в форме напряжения или тока. Радиоизмерительные оптические преобразователи с частотным выходом имеют ряд преимуществ перед аналоговыми, которые заключаются в значительном увеличении помехоустойчивости, что позволяет повысить точность измерения, а также в возможности получения больших выходных сигналов, что создает предпосылки отказа от усилительных устройств при последующей обработке сигнала, использование частотного сигнала в качестве информативного позволяет отказаться от аналого-цифровых преобразователей, что повышает эффективность радиоизмерительной аппаратуры.

В диссертационной работе разработаны теоретические подходы по созданию радиоизмерительных оптических преобразователей в виде биполярных и МДП-транзисторных структур. На основе решения системы уравнений Кирхгофа составленных на базе нелинейных эквивалентных схем преобразователей, основных положений теории комплексной переменной, получены зависимости активной и реактивной составляющих полного сопротивления, функции преобразования и уравнения чувствительности от влияния освещенности излучения плазмы и доказано, что эти зависимости являются существенными для создания нового класса радиоизмерительных оптических преобразователей на основе полупроводниковых структур с отрицательным сопротивлением с улучшенными метрологическими и экономическими показателями.

Гибридная интегральная микросхема преобразователя с светочувствительным элементом на основе фоторезистора состоит из биполярного и МДП- транзисторов, составляющих схему автогенератора. Эквивалентная емкость и внешняя индуктивность создают колебательный контур, частота генерации которого зависит освещенности излучения. Для улучшения параметров преобразователя разработана схема с светочувствительным элементом на основе фототранзистора.

Дальнейшее улучшение метрологических параметров радиоизмерительных преобразователей возможно при использовании биполярных и МДП- транзисторных структур с активным индуктивным элементом на основе биполярного транзистора с RC-цепью. Это позволяет полностью применить интегральную технологию при создании преобразователей, а также повышает чувствительность и точность преобразования оптического излучения в частотный сигнал. Усовершенствованы математические модели, в которых учтено влияние освещенности оптического излучения на элементы нелинейных эквивалентных схем преобразователей на основе биполярных и МДП- транзисторных структур с отрицательным сопротивлением, которые описаны системами уравнений, на основе которых определены функции преобразования и уравнения чувствительности.

Разработаны пакеты прикладных программ в вычислительной среде "Matlab 6.5" для моделирования и вычислений характеристик разработанных радиоизмерительных оптических преобразователей. Анализ теоретических и экспериментальных исследований подтвердил адекватность разработанных моделей с погрешностью $\pm 5\%$. Предложено использование оптических преобразователей в системе управления процессом плазмохимического травления фоторезиста. Рассчитаны погрешности радиоизмерительных

оптических преобразователей, а также определена суммарная погрешность радиоизмерительного оптического преобразователя, которая составляет $\pm 0,21\%$.

Ключевые слова: радиоизмерительный оптический преобразователь, частота, плазмохимическое травление, функция преобразования, чувствительность.

ABSTRACT

Seletska O.O. Radiomeasuring Optical Transducers to Determine the Time of Plasma Chemical Etching. – A manuscript.

Thesis for the degree of Ph.D. by speciality 05.11.08 – radiomeasuring equipments. - Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia - 2010.

The thesis is devoted to the development radiomeasuring optical transducers with frequency output on the basis of semiconductor structures with negative resistance, the principle of which operation is based on the functional connection of reactive properties of transistor structures with negative resistance from the effects of illumination of plasma light, which enables creation and development competitive is models of this production.

In the thesis the theoretical approaches for creation of radiomeasuring optical transducers as bipolar and MOSfet transistor structures are designed on the basis of the solution of a Kirgoff equation, fundamental points of the theory of complex variable, that has enabled to receive dependences of an active and reactive components of complete resistance, function of conversion, and equation of sensitivity from exposure of light and is proved, that these dependences are essential for creation of the radiomeasuring optical transducers with improved metrological metrics. Mathematical models are improved, in which the intensity of plasma light to elements of nonlinear equivalent circuits of transducers is taken into account on the basis of bipolar and MOSfet transistor structures with negative resistance, which are described by set of equations, on the basis of which the functions of conversation and equation of sensitivity are defined.

The applications packages for simulation analysis and calculations of the characteristics of designed radiomeasuring optical transducers to determine the time of plasma etching are designed.

Keywords: radiomeasuring optical transducer, frequency, plasma chemical etching, function of conversion, sensitivity.

Підписано до друку 09.12.2010 р. Формат 29. 7x42 $\frac{1}{4}$

Наклад 115 прим. Зам. №2010-194

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел. 59-81-59