

УДК 536.5537.227

Леваш Л. В., Ліптуга А. І., Самойлов В. Б.

ІНЖЕКЦІЙНІ МОДУЛЯТОРИ ДЛЯ МАЛОПОТУЖНИХ ПОТОКІВ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Досліджено властивості інжекційного напівпровідникового модулятора інфрачервоного випромінювання і встановлено, що він є джерелом власного теплового випромінювання, яке суттєво ускладнює вимірювання слабких радіаційних потоків. Першопричиною його появи є струм керування, що протікає через напівпровідниковий модулятор. Встановлено, що власне випромінювання має дві змінні складові, які різняться зсувом фази щодо напруги керування. Запропоновано оригінальний модульовальний блок, який дає змогу компенсувати вплив власного випромінювання модулятора на точність вимірювання потоків малої потужності.

Більшість приладів, що використовуються для вимірювання випромінювання, містять блок модуляції випромінювання. Як основні елемен-

ти цього блока зазвичай використовують механічні переривачі потоку випромінювання. До недоліків цих елементів слід віднести їх неза-

довільну сумісність із сучасними цифровими системами обробки електричних сигналів та можливість появи у вимірювальному каналі паразитного оптичного сигналу на частоті модуляції, що знижує точність результатів вимірів. Особливо важливим є випадок, коли здійснюються вимірювання потоків малої потужності, величина яких одного порядку або менше паразитного сигналу. Тут похибки вимірювань можуть бути значними.

Високий ступінь сумісності з цифровими системами обробки сигналів забезпечують добре вивчені германієві інжекційні модулятори з електронним керуванням, що працюють у діапазоні від 6 до 14 мкм [1]. Робота цих модуляторів базується на зміні поглинання 14-випромінювання в напівпровідниковому кристалі під впливом напруги керування. Проте, як було виявлено нашими дослідженнями, інжекційні модулятори також спричиняють появу у вимірювальному каналі паразитного оптичного сигналу. Може, саме внаслідок цього в літературі практично відсутні дані щодо особливостей їх використання для модуляції малопотужних потоків ІЧ-випромінювання.

Цю працю присвячено дослідженню природи паразитного випромінювання германієвих інжекційних модуляторів, його амплітудних та фазових характеристик, а також розробці методів мінімізації впливу цього випромінювання на точність вимірювань оптичних сигналів.

Модулятор у вигляді механічного переривача поряд з недоліками має досить важливу перевагу. Він здатен забезпечити 100-відсоткову амплітудну модуляцію випромінювання, що важливо для досягнення високої чутливості приладу, в якому використовується цей модулятор. Ми показали, що напівпровідниковий інжекційний модулятор також може забезпечити високий ступінь модуляції. Нагадаємо принцип його роботи.

Коефіцієнт поглинання ІЧ-випромінювання k у напівпровіднику за межею власного поглинання визначається концентрацією електронів n і концентрацією дірок p , $k = a_n n + a_p p$ (a_n , a_p - перерізи поглинання електронів і дірок відповідно). Перерізи поглинання a_n і a_p , що залежать від параметрів матеріалу і довжини хвилі випромінювання, яке поглинається, для більшості напівпровідників сильно відрізняються один від іншого. Розглянемо модулятор товщиною d (рис. 1), що виконаний з електронного ($n > p$) напівпровідника.

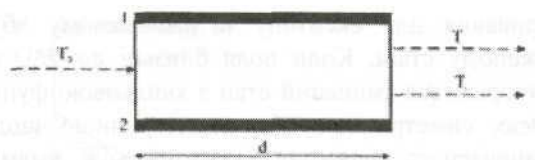


Рис. 1. Інжекційний модулятор:
1,2 - інжекційний та омичний контакти відповідно

У цьому випадку $k = \sigma_n n$, а потік випромінювання T , що виходить з модулятора, зв'язаний з потоком T_0 , що падає на модулятор, співвідношенням

$$T = T_0 \frac{(1-R)^2 e^{-kd}}{1-R^2 e^{-2kd}}, \quad (D)$$

де R - коефіцієнт відбивання. Звичайно величини k і d вибираються малими, щоб забезпечити високе початкове пропускання модулятора. Відповідно до цього у виразі (1) враховуються перевідбивання випромінювання в кристалі. Якщо кристал має p - n перехід, то за наявності струму (пряме зміщення) у напівпровідник інжектуватимуться неосновні носії заряду, якими в розглянутому випадку є дірки. Переріз поглинання дірок σ_p звичайно більше перерізу поглинання електронів σ_n . До того ж концентрація введених (нерівноважних) дірок може бути значно більше концентрації рівноважних електронів. Тому під час інжекції дірок потік випромінювання T_i , що виходить з модулятора, може сильно зменшитися порівняно з T :

$$T_i = T_0 \frac{(1-R)^2 e^{-(k+\Delta k)d}}{1-R^2 e^{-2(k+\Delta k)d}}, \quad (2)$$

де Δk - добавка до коефіцієнта поглинання, що обумовлена нерівноважними дірками.

Роботу модулятора характеризують параметром, який називається глибиною модуляції t :

$$m = \frac{T - T_i}{T} = 1 - \frac{(1-R^2 e^{-2kd}) e^{-\Delta kd}}{1-R^2 e^{-2(k+\Delta k)d}}. \quad (3)$$

Як бачимо з формули (3), глибина модуляції t прямує до свого максимального значення (до 1) у разі необмеженого збільшення d . Однак досягнення великих глибин модуляції внаслідок збільшення товщини поглинаючого шару супроводжується зменшенням як T , так і T_i [7]. На практиці такий модулятор виявляється не завжди прийнятним, хоча його параметр m може бути великим. (У низці випадків модулятори з малим початковим пропусканням, але великим значенням m успішно використовуються.) Тому

під час аналізу роботи модулятора використовують також такий параметр, як ефективність модуляції η :

$$\eta = \frac{T - T_i}{T_0} = \frac{(1-R)^2 e^{-kd}}{1-R^2 e^{-2kd}} - \frac{(1-R)^2 e^{-(k+\Delta k)d}}{1-R^2 e^{-2(k+\Delta k)d}} \quad (4)$$

Цей параметр дає можливість зіставити падаючий та промодульований потоки випромінювання. З формули (4) бачимо, що ідеальним є випадок, коли початкове пропускання модулятора T дорівнює T_0 , а пропускання в умовах інжекції дірок T_i дорівнює нулю (аналог механічного модулятора). У цьому разі ефективність модуляції максимальна ($\eta = 1$). Аналізуючи вираз (4), можна знайти значення R і d , за яких η буде прямувати до максимуму. На рис. 2 представлено залежності η і m від d за різних значень R . Коефіцієнти k і Δk ($0,1 \text{ см}^{-1}$ і 10 см^{-1} відповідно) прийнято такими, які можуть бути реалізовані експериментально.

При R , який прямує до нуля, ефективність модуляції за обраних k і Δk може бути близькою до одиниці (рис. 2). Максимуму параметр η досягає при $d \sim 0,4 / 0,6$ см. Цікаво, що глибина модуляції за обраних значень R майже не залежить від коефіцієнта відбивання і при $d \sim 0,6$ см досягає одиниці.

Таким чином, інжекційний модулятор може не тільки забезпечити 100 %-ву модуляцію ($m = 1$), але за відповідних значень d , R , k і Δk його ефективність η може бути близькою до одиниці. Відзначимо, що для досягнення високих значень параметра η на робочій грані модулятора мають бути нанесені покриття для просвітлення.

В експериментальних дослідженнях використовувалась установка, основними вузлами якої були джерело випромінювання, інжекційний мо-

дулятор і приймач випромінювання. Як джерело ІЧ-випромінювання використовувалось чорне тіло, нагріте до температури 300°C , інтенсивність його випромінювання змінювалася за допомогою каліброваних діафрагм. Модулятори розміром $1,5 \times 1,5 \times 6 \text{ мм}^3$, виготовлялися з монокристала Ge n-типу, орієнтованого в площині (100). Кристали оснащені інжекційними і омичними контактами, розташованими на протилежних широких гранях. Випромінювання проходило через відполіровані дзеркальні грані кристала ($R = 0,36$) розміром $1,5 \times 1,5 \text{ мм}$ (покриття для просвітлення були відсутні). Модулятори розташовувалися на мідному радіаторі. На модулятор подавалася напруга керування у вигляді прямокутних імпульсів тривалістю 21 мс і шпаруватістю 2. Напругу можна було змінювати в межах від 0 до 3 В. Як приймач випромінювання використовувався неохолоджуваний піроелектричний приймач з чутливим елементом на основі LiTaO₃

Головним фактором, що ускладнює роботу з інжекційним модулятором, є його нагрів протікаючим струмом. При напрузі 1,3-1,5 В, що забезпечує максимальну глибину модуляції, підвищення середньої температури модулятора $\Delta\theta_0$ щодо температури навколишнього середовища становить $8-10^\circ\text{C}$ та додатково супроводжується відповідною змінною компонентою приросту температури $\Delta\theta(t)$. Таким чином, модулятор являє собою напівпрозоре середовище з модульованим приростом температури $\Delta\theta(t)$ та модульованим коефіцієнтом сірості $A(\tau)$, яке випромінює власну модульовану теплову радіацію.

Як бачимо з вищенаведеного, потік паразитного теплового випромінювання складається з двох компонент. Перша з них залежить від середнього приросту температури модулятора $\Delta\theta_0$ та змінної складової коефіцієнта сірості $A(f)$. Друга компонента залежить від змінної складової приросту температури модулятора $\Delta\theta(t)$ та середнього значення коефіцієнта сірості A_ν . В цьому наближенні ми нехтуємо компонентами вищого порядку, які пов'язані із сумісним впливом змінних чинників $A(t)$ та $\Delta\theta(t)$.

Оскільки зростання коефіцієнта сірості модулятора супроводжується зменшенням його прозорості, перша компонента паразитного сигналу збігається за фазою з корисним радіаційним потоком або знаходиться у протифазі (залежно від співвідношення температур модулятора та об'єкта). Аналіз теплових процесів у модуляторі свідчить, що фазовий зсув другої паразитної компоненти становить 90° .

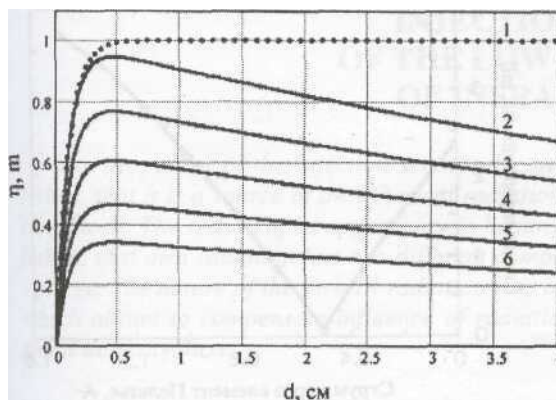


Рис. 2. Залежності m (1) та η (2-6) від d :

2-R = 0,1; 3-R = 0,1; 4-R = 0,2;

5-R = 0,3; 6-R = 0,4



Рис. 3. Залежності амплітуд сигналу приймача випромінювання від величини напруги керування модулятора за різних діаметрів вихідного отвору чорного тіла (у мм): 1-0; 2-3; 3-4; 4-5; 5-6; 6-7; 7-8; 8-9; 9-10

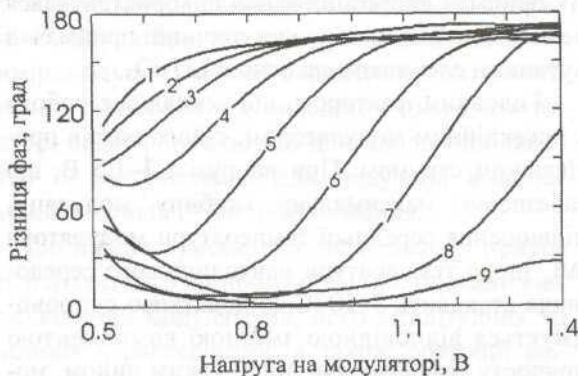


Рис. 4. Залежності фаз сигналу приймача випромінювання від величини вольної напруги керування модулятора за різних діаметрів вихідного отвору чорного тіла (у мм): 1-0; 2-3; 3-4; 4-5; 5-6; 6-7; 7-8; 8-9; 9-10

На рис. 3 і 4 зображені залежності амплітуд та фаз сигналу приймача випромінювання від величини напруги керування модулятора за різних значень теплових потоків, що вимірюються. Значення теплових потоків змінювалися за допомогою набору діафрагм з різними діаметрами на виході джерела випромінювання - чорного тіла. Бачимо, що наявність паразитних потоків суттєво спотворює результати вимірювання слабких сигналів. У діапазоні малих напруг керування фазовий зсув наближається до 90° , що свідчить про переважну роль другої компоненти, яка пов'язана з виникненням змінної складової приросту температури модулятора.

У діапазоні великих напруг керування ми бачимо переважну роль першої компоненти, що залежить від середнього приросту температури модулятора $\Delta\Theta_0$ та змінної складової коефі-

цієнта сірості $A(t)$, яка в нашому випадку знаходиться у протифазі з корисним сигналом. У діапазоні помірних керувальних напруг, коли паразитний потік, зумовлений зростанням середньої температури модулятора, не перевищує корисний потік, фаза сумарного сигналу задається корисним потоком. При подальшому зростанні напруги керування збільшення паразитної компоненти призводить до зменшення сумарного сигналу аж до повної компенсації паразитної та корисної компонент. Після цього має місце зміна фази на 180° . Це свідчить, що переважну роль відіграє тільки паразитна компонента.

Оскільки найважливішим є саме діапазон великих напруг керування, який відповідає оптимальним значенням коефіцієнта модуляції, першочерговою проблемою постає компенсація приросту середньої температури модулятора в його робочому режимі. Для цього нами було використано систему примусового охолодження модулятора за допомогою елемента Пельтьє. В цьому разі на модулятор подавалася напруга керування з амплітудою, яка забезпечувала необхідний коефіцієнт модуляції. Підбирався такий режим роботи елемента Пельтьє, щоб температура модулятора понижувалася і стала рівною температурі навколишнього середовища. На рис. 5 показано залежність сигналу піроелектричного приймача від струму через елемент Пельтьє за умови, що джерелом зовнішнього оптичного випромінювання є навколишнє середовище.

Збільшенню струму через елемент Пельтьє від 0 до 1,5 А відповідає різниця температур модулятора і навколишнього середовища $\Delta\Theta$, що змінюється від $+7$ до -11 $^\circ\text{C}$. При струмі 0,5 А, що протікає через елемент Пельтьє, $\Delta\Theta$ і сигнал, що знімається з приймача, прямують до

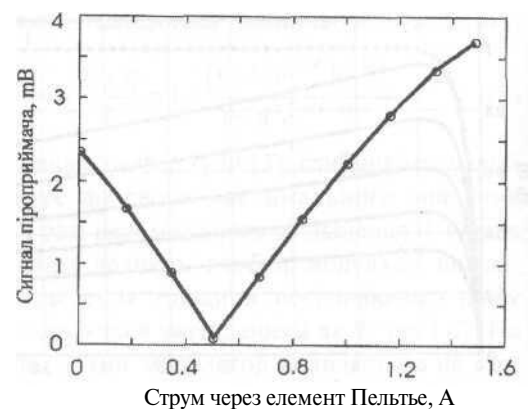


Рис. 5. Залежність амплітуди сигналу піроелектричного приймача від струму через елемент Пельтьє

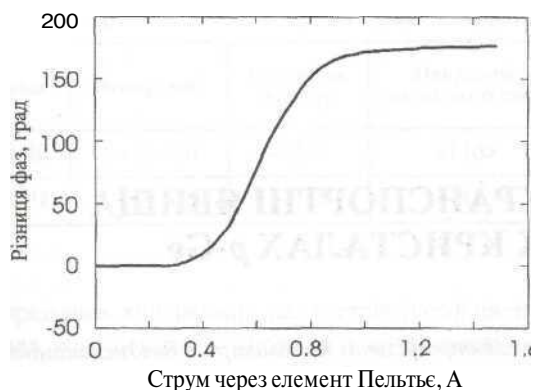


Рис. 6. Залежність фазового зсуву сигналу піроелектричного приймача від струму через елемент Пельтьє

нуля. Відзначимо, що в умовах підвищеної температури модулятора (струм через елемент Пельтьє - 0-0,5 А), інтенсивність паразитного випромінювання модулятора зростає у разі зростання напруги керування на модуляторі. В області 0,5-1,5 А вона зменшується. Про це свідчить зміна різниці фаз опорного сигналу і сигналу піроприймача (рис. 6).

Оскільки за допомогою температурної компенсації ми можемо керувати тільки синфазною компонентою паразитного сигналу, неможливо досягнути його повного знищення. В точці, що відповідає його мінімальному значенню, завжди залишається деякий «п'єдестал», який залежить

від квадратурної компоненти, що пов'язана зі змінною складовою приросту температури модулятора.

Для повної компенсації паразитних компонент нами було запропоновано двоканальну компенсаційну схему [2, 3]. В цьому випадку використовувалося два ідентичних модулятори, укріплені поруч на спільному радіаторі (без елемента Пельтьє). Через один модулятор проходив корисний оптичний сигнал. На інший модулятор падало випромінювання зачорненого об'єкта, що є мініатюрною моделлю чорного тіла з температурою навколишнього середовища. Випромінювання з обох модуляторів через систему зведення надходило на приймач. У цьому варіанті ідентичні паразитні потоки від кожного з модуляторів, які працюють у протифазі, віднімаються, що забезпечує адекватну й стабільну роботу блока інжекційних модуляторів.

Одним з основних видів неселективних швидкодіючих неохолоджуваних сенсорів 14-випромінювання є піроелектричні приймачі випромінювання, але їх широке використання в системах дистанційного теплового контролю ускладнюється необхідністю використання механічних модуляторів. Запропоновані нами принципи відкривають можливості побудови піроелектричних систем безконтактної температурної діагностики з неселективною електронною модуляцією теплового випромінювання [4].

Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Методы модуляции и сканирования света.— М.: Наука, 1970.- 374 с.
 Пат. Україна, № 34740 15.06.2001 р. Пірометр (варіанти) і система модуляторів, що використовується в пірометрах / Л. В. Леваш, А. І. Липтуга, В. Б. Самойлов.

3. Пат. Россия, № 2159414 20.11.2000 г. Пирометр (варианты) и система модуляторов, используемая в пирометрах / Л. В. Леваш, А. И. Липтуга, В. Б. Самойлов.
4. Ведула М. Ю., Леваш Л. В., Липтуга А. И. и др. Бесконтактный ИК-измеритель локальной температуры // Пром. теплотехника.- 2003,- Т. 25, №2.-С. 81-84.

L. Levash, A. Liptuga, V. Samoylov

INJECTION MODULATORS OF THE LOW-INTENSITY FLUXES OF INFRARED RADIATION

The properties of the injection semiconductor modulator of IR-radiation were investigated. It was established, that it is a source of own thermal radiation, which essentially complicates measurement of weak radiation fluxes. The reason of its appearance is heating of the modulator crystal by managing current. It was established, that own radiation has two different components, which differ by phase shift in relation to a managing voltage. The nature of the own IR radiation was investigated and the original modulating block was developed which allows to compensate influence of radiation of the modulator on accuracy of the measurement of the small intensity fluxes.