

ОПТИЧНИЙ СЕНСОР НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНОГО ДІОДА

Вінницький національний технічний університет

Анотація. В роботі показано можливість використання тунельно-резонансного діода як оптичного сенсора з частотним вихідним сигналом. Тунельно-резонансний діод створено на основі квантової двобар'єрної гетероструктури, що характеризує існування від'ємного диференційного опору в діоді і його надвисокочастотні властивості у всьому діапазоні радіочастот. Отже, діод виступає як первинний сенсор оптичної потужності, так і як надвисокочастотний автогенератор із зовнішньою LC-структурою. Це значно спрощує конструкцію оптичного сенсора. Використання принципу перетворення «оптичний сигнал-частота» дозволяє суттєво покращити метрологічні показники приладу.

Ключові слова: тунельно-резонансний діод, квантова гетероструктура, частота, від'ємний диференційний опір.

Abstract. The paper shows the possibility of using a tunnel resonance diode as an optical sensor with a frequency output signal. The tunnel resonance diode is based on a quantum two-barrier heterostructure, which characterizes the existence of negative differential resistance in the diode and its ultrahigh-frequency properties throughout the radio frequency range. Thus, the diode acts as a primary optical power sensor and as an ultra-high-frequency autogenerator with an external LC structure. This greatly simplifies the design of the optical sensor. The use of the principle of conversion "optical signal-frequency" can significantly improve the metrological performance of the device.

Keywords: tunnel resonance diode, quantum heterostructure, frequency, negative differential resistance.

Вступ

Використання сучасних технологій мікро- і наноелектроніки в аналітичному приладобудуванні привело до значних успіхів у створенні різноманітних приладів контролю і керування виробничих процесів в усіх галузях промисловості [1, 2]. Оптичні сенсори знайшли широке застосування в технологічних процесах плазмохімічного травлення в мікроелектроніці, мікрохвильовій фотоніці, в оптоелектроніці та в інших галузях промисловості [3, 4]. Їх характеристики і параметри визначають як якість виробів електронної техніки, так і якість передачі і прийому інформації [5]. Вказані вище переваги оптичних сенсорів можна отримати при використанні досягнень сучасної нанотехнології, що дозволяє створювати квантові гетероструктури.

Одним з перспективних напрямків у створенні оптичних сенсорів є використання квантових гетероструктур, які мають на вольт-амперній характеристиці спадну ділянку. Ця ділянка відповідає існуванню від'ємного диференційного опору. Використання від'ємного диференціального опору діода разом з коливальною LC-системою дозволяє створити автогенератор. Таким чином, наноелектронна квантова гетероструктура виступає як первинний оптичний перетворювач, так і надвисокочастотний автогенератор.

Принцип роботи і структура оптичного сенсора

Оптичний сенсор на основі тунельно-резонансного діода уявляє собою двобар'єрну квантову гетероструктуру, яка складається з епітаксіальних шарів напівпровідникових матеріалів InGaAs/AlAs товщиною 10 нм. На квантову двобар'єрну структуру з двох сторін напилюється нелеговані фотопровідні шари InAlAs і InGaAs. В подальшому на ці шари напилюються сильно леговані шари p+-InAlAs і p+-InGaAs, до яких створюються омичні контакти. Вся структура оптичного сенсора розташована на підкладці з InP [6].

Розглянемо принцип роботи оптичного сенсора. Тунельно-резонансний ефект, який лежить в основі роботи тунельно-резонансних діодів, виник за рахунок досягнень гетероепітаксіальної

технології, за допомогою якої створено квантово-розмірні структури. В таких структурах використовують хвильову природу носіїв заряду, тобто явище резонансного тунелювання через послідовно розташовані напівпрозорі потенціальні бар'єри, розділених квантовими ямами. Це аналогічно резонансному проходженню фотонів через систему напівпрозорих дзеркал, які утворюють інтерферометр Фабрі-Перо [7]. Основною оптичною структурою з резонансного тунелювання електронів є квантова гетероструктура InGaAs/AlAs. Шар напівпровідника InGaAs має вузьку енергетичну зону в порівнянні з бар'єроутворюючими напівпровідниками AlAs. Потенціальні бар'єри і квантова яма між ними утворені за рахунок різних значень ширини заборонених зон для напівпровідникових сполук InGaAs і AlAs, що приводить до розриву енергетичних рівнів дна зони провідності і стелі валентної зони. При дії світлового імпульсу, який падає на тунельно-резонансну структуру, що працює у режимі пікової напруги, утворюються додаткові фотозаряди: дірки у валентній зоні і електрони у зоні провідності. При цьому дірки накопичуються на бар'єрах резонансного шару структури, тоді як електрони збираються зовнішнім колом. Внаслідок цього прикладене електричне поле в нелегованому шарі частково екранується, а всередині резонансної структури підсилюється. Отже, спадна ділянка вольт-амперної характеристики оптичного сенсора зміщується у бік більш низьких напруг, що приводить до зміни від'ємного диференційного опору приладу. Математична модель оптичного сенсора базується на його еквівалентній схемі, яка витікає з його електричної схеми (рис. 1).

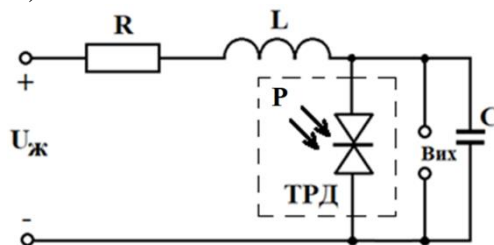


Рис.1. Електрична схема оптичного сенсора на основі тунельно-резонансного сенсора

Електрична схема сенсора живиться від джерела постійної напруги $U_{ж}$, опору втрат R , який включає всі омичні опори схеми, зовнішньої індуктивності L , яка послідовно включена до внутрішньої індуктивності діода, а також сам тунельно-резонансний діод, на який діє оптичне випромінювання P . Слід підкреслити, що в схемі оптичного сенсора з частотним виходом тунельно-резонансний діод виступає як первинний сенсор оптичного випромінювання, так як і генератор надвисокочастотних коливань з коливальною LC системою.

При дії світла на сенсор змінюється енергія електронів у квантовій гетероструктурі, що приводить до зміни квантових станів і ефективної маси електронів. Ці явища викликають зміну коефіцієнта прозорості потенціальних бар'єрів, що, у свою чергу, приводить до зміни струму через діод. Зміна струму діода викликає зсув піка і долини його вольт-амперної характеристики. Отже, при освітлюванні діода змінюються всі параметри еквівалентної схеми сенсора, що викликає зміну вихідної частоти оптичного сенсора. Проте їх вклад у зсув вольт-амперної характеристики є різним, що залежить від частоти вихідного сигналу. Резонансна частота автогенератора сенсора визначається на основі формули вхідного імпедансу схеми [9]. Імпеданс оптичного сенсора описується виразом

$$Z_{ax} = R + \frac{-\frac{R_g L}{C} - \frac{R_g}{\omega C} \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}{R_g^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} - j \frac{\frac{R_g^2}{\omega C} + \frac{L}{C} \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}{R_g^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}. \quad (1)$$

В режимі резонансного стану уявна складова виразу (1) дорівнює нулю

$$\frac{\frac{R_g^2}{\omega C} + \frac{L}{C} \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}{R_g^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} = 0. \quad (2)$$

З рівняння (2) визначаємо резонансну частоту [8]

$$F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R_g^2(P)}{L^2}}, \quad (3)$$

У виразі (3) тільки від’ємний диференційний опір залежить від оптичної потужності, на зовнішні емність та індуктивність світло не діє. Графік залежності зміни вихідної частоти від потужності падаючого світла подано на рис. 2. Цей графік є функцією перетворення оптичного сенсора. Як видно з рис. 2 відбувається нелінійне зростання частоти від $2 \cdot 10^9$ Гц до $2,75 \cdot 10^9$ Гц в діапазоні зміни оптичної потужності від 1 мВт до 10 мВт. Це пояснюється зростанням від’ємного диференційного опору в цьому діапазоні оптичної потужності.

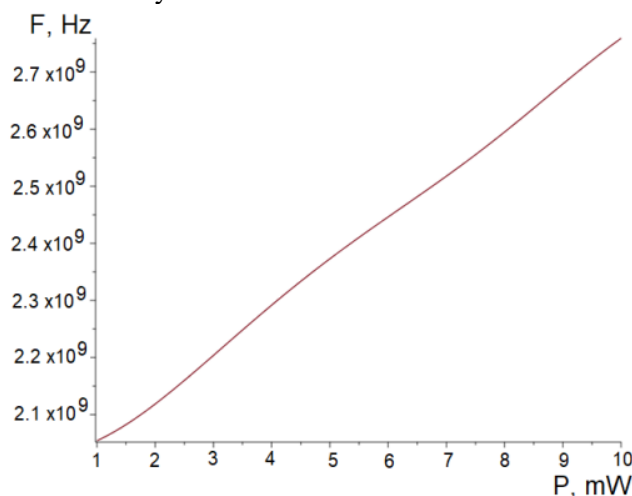


Рис. 2. Залежність зміни резонансної частоти від оптичної потужності

Висновки

Розглянуто фізичні процеси у тунельно-резонансному діоді на базі двобар’єрної квантової гетероструктури InGaAs/AlAs, визначено аналітичні залежності функцій перетворення. Показано, що основний внесок у функцію перетворення вносить зміна енергії електронів і їх кількість в квантовій гетероструктурі тунельно-резонансного діода при дії потужності світлового потоку. Це приводить до зміни від’ємного диференційного опору, що у свою чергу, змінює вихідну частоту оптичного сенсора. Чутливість сенсора змінюється від $4,7 \cdot 10^7$ Гц/мВт до $7,4 \cdot 10^7$ Гц/мВт в діапазоні оптичної потужності від 1 мВт до 10 мВт. Вихідна частота при цьому змінювалась від $2 \cdot 10^9$ Гц до $2,75 \cdot 10^9$ Гц.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. –Москва: Техносфера, 2007. – 384 с.
2. Дж. Фрайден. Современные датчики. Справочник.– Москва: Техносфера, 2005. - 592 с.
3. Optical Sensors. Industrial Environmental and Diagnostic Applications. Ramaier Narayanaswamy Otto S. Wolfbeis. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004. – 423 p.
- 4 V.S. Osadchuk, A.V. Osadchuk. Radiomeasuring Microelectronic Transducers of Physical Quantities // Proceedings of the 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 21-23 May 2015. Omsk. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147167
5. A.V.Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.O. Osadchuk, N.V. Titova, O.Yu. Pinaeva, Piotr Kisała, Saule Rakhmetullina, Aliya Kalizhanova, Zhanar Azeshova. Optical-frequency gas flow meter on the basis of transistor structures with negative differential resistance // Proc. SPIE 11456, Optical Fibers and Their Applications 2020, 114560F (12 June 2020); –P.74-81. <https://doi.org/10.1117/12.2569771>
6. Halimatus Saadiah, Warsuzarina Mat Jubadi, Nabihah Ahmad, M. Hairol Jabbar. Resonant Tunneling Diode Design for Oscillator Circuit. International Postgraduate Conference. Physics 2017. pp.1-8.
7. Hartmann F.; Langer F; Bisping D.; Musterer A.; Hofling S.; Kamp M.; Forchel A.; Worschech L.; GaAs/AlGaAs resonant tunneling diodes with a GaInNAS absorption layer for telecommunication light sensing. Appl. Lett. 2012, 100. 172113.
8. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Maksat Kolimoldayev, Paweł Komada, Kanat Mussabekov. Optical transducers with frequency output. Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments, 2017, 104451X (2017).
9. Осадчук О.В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О. Дослідження реактивних властивостей тунельно-резонансного діода // Вісник Хмельницького національного університету. Том 1. №4, 2020 (287). –С.160-167.

Осадчук Ярослав Александрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехніки Вінницький національний технічний університет, E.mail osadchuk.j93@gmail.com

Osadchuk Yaroslav Oleksandrovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radio Engineering, Vinnitsya National Technical University, E.mail osadchuk.j93@gmail.com