

АВТОГЕНЕРАТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Запропоновано і досліджено автогенераторний перетворювач для вимірювання потужності оптичного випромінювання на основі двобар'єрних квантових гетероструктур, які є базою створення тунельно-резонансних діодів, що дозволяє значно зменшити апаратні затрати в комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних системах. Розроблено математичну модель опису роботи оптичного перетворювача, яка базується на принципі перетворення енергії оптичного випромінювання в енергію змінного електричного поля на виході перетворювача, що дозволяє отримати параметричну залежність вихідної частоти перетворювача від параметрів тунельно-резонансного діода і параметрів автогенератора. Чутливість перетворювача змінюється від 15,27 кГц/мкВт/см² до 16,37 кГц/мкВт/см² при зміні вимірювальної потужності від 0 мкВт/см² до 100 мкВт/см².

Ключові слова: автогенераторний перетворювач оптичного випромінювання, частотний перетворювач, оптичний чутливий елемент, функція перетворення, рівняння чутливості.

Вимірювання оптичного випромінювання потрібно в багатьох галузях виробництва і техніки, зокрема, у мікроелектронній технології, сонячній енергетиці, космічних дослідженнях, військовій техніці, ядерній енергетиці, дослідженні довкілля, що потребує створенню вимірювальних приладів високої точності та чутливості, стабільності і швидкодії, а також дослідження впливів всієї сукупності факторів, що супроводжують вимірювальний процес [1 – 3].

Для вимірювання інтенсивності світла на даний час використовуються напівпровідникові або мікроелектронні сенсори, що виконані у вигляді мікроелектронних схем з фоторезисторами, фотодіодами та фототранзисторами. Вони знаходять широке застосування у комп'ютерних системах і мереж загального та спеціального призначення, системах автоматики як пристрої вмикання освітлення вулиць, тунелів, приміщень, світлових вогнів аеропортів, сигналізатори вогню та диму, системами стеження за положеннями об'єкта, фотореле різних промислових автоматів, тощо [4 – 6].

Подальшим перспективним розвитком перетворювачів вимірювання оптичної потужності є автогенераторні перетворювачі, що працюють в режимі перетворення «оптичне випромінювання – частота», що дає можливість значно зменшити апаратні затрати в комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних системах і мережах загального та спеціального призначення [7 – 9].

Запропоновано і досліджено автогенераторний перетворювач для вимірювання потужності оптичного випромінювання на основі двобар'єрних квантових гетероструктур, які є базою створення тунельно-резонансних діодів, що дозволяє значно зменшити апаратні затрати в комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних системах. Квантова двобар'єрна гетероструктура складається з епітаксialьних шарів напівпровідникових матеріалів InGaAs/AlAs товщиною 10 нм. На квантову двобар'єрну структуру з двох сторін напілюються нелеговані фотопровідні шари InAlAs і InGaAs. 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.

Математична модель опису роботи оптичного перетворювача базується на принципі перетворення енергії оптичного випромінювання в енергію змінного електричного поля на виході перетворювача, що дозволяє отримати параметричну залежність вихідної частоти перетворювача від параметрів тунельно-резонансного діода і параметрів автогенератора. Для цього визначено коефіцієнт корисної дії перетворювача. Спочатку енергія оптичного випромінювання перетворюється в енергію постійного електричного поля, яка є вхідною енергією для автогенератора. В подальшому енергія постійного електричного поля в тунельно-резонансному діоді перетворюється в енергію змінного електричного поля, яка зв'язана з еквівалентною ємністю коливального контуру автогенератора. Коефіцієнт корисної дії оптичного перетворювача визначається відношенням

$$K = \frac{P_{out}}{P_{in}}, \quad (1)$$

де P_{in} і P_{out} , відповідно вхідна і вихідна потужність оптичного перетворювача. Вхідна потужність визначається виразом

$$P_{in} = I_{\Phi}^2 R_g = \frac{q^2 \eta_i^2 \Phi^2 b^2 V^2 R_g}{(h\nu)^2}, \quad (2)$$

q – заряд електрона, η_i – квантовий вихід фотоіонізації фотоелектронів і фотодірок, Φ – оптичне випромінювання, b – коефіцієнт поглинання фотонів, V – об'єм тунельно-резонансного діода, $h\nu$ – енергія фотонів. Вихідна потужність перетворювача описується формулою

$$P_{out} = \frac{C_{ekv} U_{\sim}^2}{2t}, \quad (3)$$

де C_{ekv} – еквівалентна ємність коливального контуру автогенератора, t – період коливань вихідної напруги. Коефіцієнт корисної дії перетворювача приймає вигляд

$$K = \frac{C_{ekv} U_{\sim}^2 (h\nu)^2}{2t q^2 \eta_i^2 \Phi^2 b^2 V^2 R_g}. \quad (4)$$

З формули (8) визначаємо C_{ekv} , яке описується виразом

$$C_{ekv} = \frac{2K t q^2 \eta_i^2 \Phi^2 b^2 V^2 R_g}{U_{\sim}^2 (h\nu)^2}. \quad (5)$$

Параметрична залежність резонансної частоти F_0 від параметрів самого тунельно-резонансного діода і автогенератора описується виразом

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_{\sim}^2 (h\nu)^2}{2L K t q^2 \eta_i^2 \Phi^2 b^2 V^2 R_g} - \frac{R_g^2}{L^2} \right]^{1/2}. \quad (6)$$

На рис. 1 подано графічну залежність розрахункової та експериментальної кривих функції перетворення оптичного перетворювача. Чутливість автогенераторного перетворювача визначається похідною функції (6) за параметром інтенсивності світла Φ .

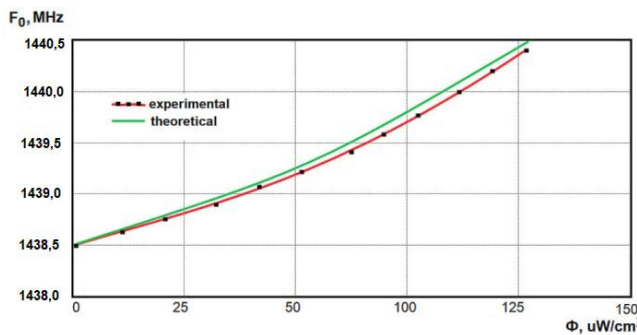


Рис. 1. Залежність функції перетворення перетворювача від оптичної потужності

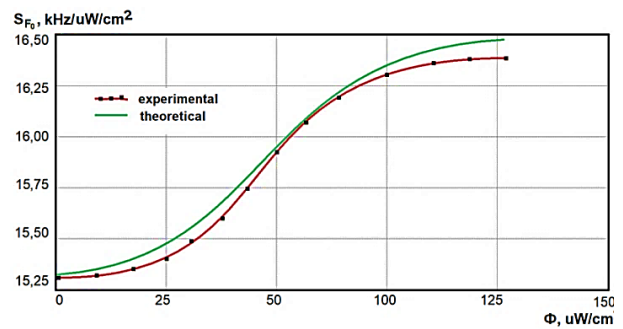


Рис. 2. Залежність функції чутливості перетворювача від оптичної потужності

Як показують експериментальні дослідження вихідна змінна напруга $U_{\sim}$ також залежить від інтенсивності світла, що необхідно врахувати при визначенні чутливості. Отже, функція чутливості описується виразом

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} \left[U_{\sim}^2(\Phi) \Phi^{-2} R_g^{-1}(\Phi) m_1 - R_g^2(\Phi) m_2 \right]^{-1/2} \times \left\{ \left[(2U_{\sim}(\Phi) \frac{dU(\Phi)}{d\Phi} \Phi^{-2} - 2\Phi^{-3} U_{\sim}^2(\Phi)) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times R_g^{-1}(\Phi) - R_g^{-2}(\Phi) \frac{dR_g(\Phi)}{d\Phi} U_{\sim}^2(\Phi) \Phi^{-2} \right] m_1 - 2R_g(\Phi) \frac{dR_g(\Phi)}{d\Phi} m_2 \right\}. \quad (7)$$

На рис. 2 подано розрахункову та експериментальну залежність функції чутливості від дії оптичної потужності на прилад. Як видно з графіка (рис. 2), чутливість перетворювача змінюється від 15,27 кГц/мкВт/см² до 16,37 кГц/мкВт/см² при зміні вимірювальної потужності від 0 мкВт/см² до 100 мкВт/см² в діапазоні частот від 1438,5 МГц до 1440,5 МГц.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. S. Watson, Zhang Weikang, Tavares Joana, Figueiredo José, Cantu Horacio, Wang Jue, Wasige E., Salgado Henrique, "Resonant tunneling diode photodetectors for optical communications", *Microwave and Optical Technology Letters*, 61. 10.1002/mop.31689, 2019.
2. Schaumburg H. Sensoren, Stuttgart.: Teubner, 1992. –517 p.
3. Готра З. Ю. Мікроелектронні сенсори фізичних величин. В 3 томах, Львів: Ліга-Прес, 2003. Т.2.
4. Gupta A., Pal P. Flexible sensors for biomedical application // *Environmental, Chemical and Medical Sensors*, Springer, Singapore, 2018. pp. 287-314.
5. A.Rothmayr, Guarin Castro, F. Hartmann, G. Knebl, A. Schade, S. Höfling, J. Koeth, A. Pfenning, L. Worschech, Lopez-Richard V, "Resonant Tunneling Diodes: Mid-Infrared Sensing at Room Temperature", *Nanomaterials*, 12(6):1024, 2022.
6. Pfenning, Andreas & Hartmann, Fabian & Langer, Fabian & Kamp, M. & Höfling, Sven & Worschech, Lukas, "Sensitivity of resonant tunneling diode photodetectors", *Nanotechnology*. 27. 355202. 10.1088/0957-4484/27/35/355202, 2016.
7. A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.A. Osadchuk, "The Generator of Superhigh Frequencies on the Basis Silicon Germanium Heterojunction Bipolar Transistors", in *Proceedings of the XIIIth International Conference TCSET'2016. "Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science". Lviv-Slavsko, Ukraine, pp.336-338, 2016.*
8. A.V. Osadchuk, I.O. Osadchuk, A.O. Semenov, "The Mathematical Model of Radio-measuring Frequency Transducer of Optical Radiation Based on MOS Transistor Structures with Negative Differential Resistance", *Journal of Nano- and Electronic Physics. Scientific journal*. Vol. 13 No 4, 04001(6 pp), 2021.
9. O.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, Ya.O. Osadchuk, "Research of a temperature sensor with a frequency output based on a quantum heterostructure with a differential negative resistance", *Bulletin of the Khmelnytskyi National University*, No. 2, (295) – P.156-164, 2021.

Осадчук Ярослав Александрович – к.т.н., доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: osadchuk.j93@gmail.com

Осадчук Олександр Володимирович – д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

SELF-OSCILLATING TRANSDUCER FOR MEASURING THE POWER OF OPTICAL RADIATION

Abstract

A self-oscillating transducer for measuring the power of optical radiation based on double-barrier quantum heterostructures, which are the basis for creating tunnel-resonant diodes, has been proposed and investigated, which allows significantly reducing hardware costs in computer and information and measuring systems. A mathematical model for describing the operation of an optical transducer has been developed, which is based on the principle of converting the energy of optical radiation into the energy of an alternating electric field at the output of the transducer, which allows obtaining a parametric dependence of the output frequency of the transducer on the parameters of the tunnel-resonant diode and the parameters of the self-oscillator. The sensitivity of the transducer changes from 15.27 kHz/μW/cm² to 16.37 kHz/μW/cm² when the measuring power changes from 0 μW/cm² to 100 μW/cm².

Keywords: self-oscillating optical radiation transducer, frequency transducer, optical sensing element, conversion function, sensitivity equation.

Osadchuk Iaroslav Oleksandrovych - Ph.D., Associate Professor of the Department information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: osadchuk.j93@gmail.com

Osadchuk Oleksandr Volodymyrovych - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com