

ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СЕНСОРІВ НА ОСНОВІ ОПТИЧНИХ ЕФЕКТІВ У ПРОДУКТАХ БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У цій роботі проаналізовано фізичні основи функціонування електромагнітних сенсорів на основі оптичних ефектів Поккельса, Керра та Фарадея, а також розглянуто спосіб реалізації електромагнітного сенсора на основі ефекту Поккельса для використання у продуктах біомедичної інженерії.

Ключові слова: електромагнітний сенсор, оптичний ефект, вимірювання, вимірювальний пристрій, біомедична інженерія.

Abstract

Analytical review of the physical foundations of electromagnetic sensors functioning based on the optical Pockels, Kerr, and Faraday effects is carried in this work, a variant of electromagnetic sensor based on the Pockels effect implementation in biomedical products is proposed.

Keywords: electromagnetic sensor, optical effect, measurement, measuring device, biomedical engineering.

Вступ

Сенсори – складні пристрої, які використовуються для вимірювання фізичних величин досліджуваних фізичних та біологічних об'єктів. Вони набули широкої популярності у техніці, медицині та промисловості через те, що їхнє застосування забезпечує точну та швидку діагностику об'єкта або середовища.

Стрімкий розвиток електроніки у другій половині ХХ ст. уможливив створення сучасних сенсорів, які характеризуються компактними розмірами, високою швидкодією та багатфункціональністю (здатністю з високою точністю зняти широку низку фізичних показників).

Метою роботи є дослідження фізичних принципів функціонування електромагнітних сенсорів (ЕМС) на основі оптичних ефектів Поккельса, Керра, Фарадея та пошук шляхів їхнього використання у продуктах біомедичної інженерії (БМІ).

Результати дослідження

Застосування ЕМС у БМІ умовно поділяється на два напрями: вимірювання електромагнітних параметрів усього організму та дослідження електромагнітних параметрів руху мічених біологічних речовин у людському організмі.

Людський організм переважно складається з речовин-діамагнетиків (вода, білки, жири, вуглеводи, кров, кістки тощо). Через це людське тіло не сильно реагує на вплив зовнішнього магнітного поля, адже якість реакції цих речовин на зовнішній магнітний вплив обмежується (фактично, нівелюється) тепловими коливаннями на атомному та молекулярному рівнях.

Окрім пасивної взаємодії зі зовнішніми магнітними полями, у тілі людини постійно генеруються власні внутрішні магнітні поля, що обумовлено електричною активністю нервової системи. Прикладом цього є магнітне поле величиною ≈ 25 пТл, яке створюється серцем. Сигнали, які генеруються головним мозком, дорівнюють ≈ 1 пТл.

ЕМС на основі оптичних ефектів функціонують завдяки нелінійним оптичним явищам, які виникають у кристалах (ефекти Поккельса, Керра та Фарадея) [1].

Вимірювання в ЕМС на основі ефекту Поккельса здійснюється наступним чином: зовнішнє електричне поле змінює показник заломлення в електрооптичному кристалі, що впливає на рух лазерного променя через кристал. Тобто, промінь світла у кристалі розщеплюється під впливом електричного поля. За допомогою цього визначають параметри зовнішнього електричного поля, яке було у взаємодії з ЕМС.

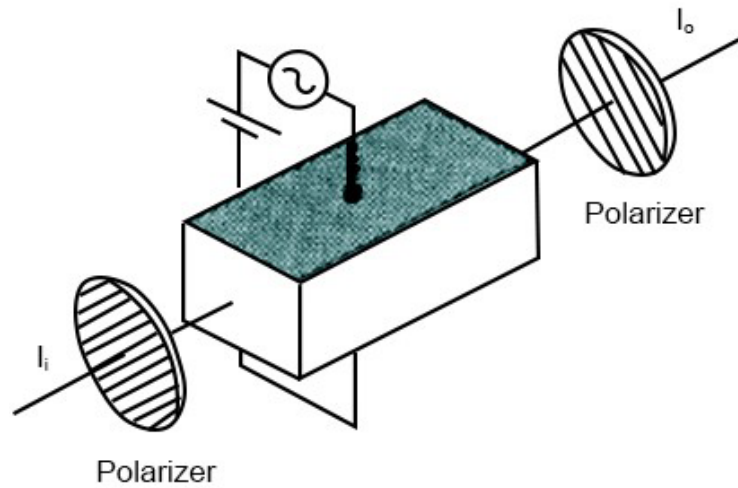


Рис. 1 – Схематичне зображення ефекту Поккельса [5]

Зміну показника заломлення світла (Δn) за ефектом Поккельса відображено у наступній формулі:

$$\Delta n = n_0^3 \cdot r \cdot E \quad (1)$$

де: n_0 – початковий показник заломлення, r – електрооптичний коефіцієнт Поккельса, E – напруженість електричного поля.

Вимірювання в ЕМС на основі ефекту Керра є подібним до вимірювання в ЕМС на основі ефекту Поккельса з різницею у тому, що ефект Керра базується на квадраті напруженості електричного поля [1].

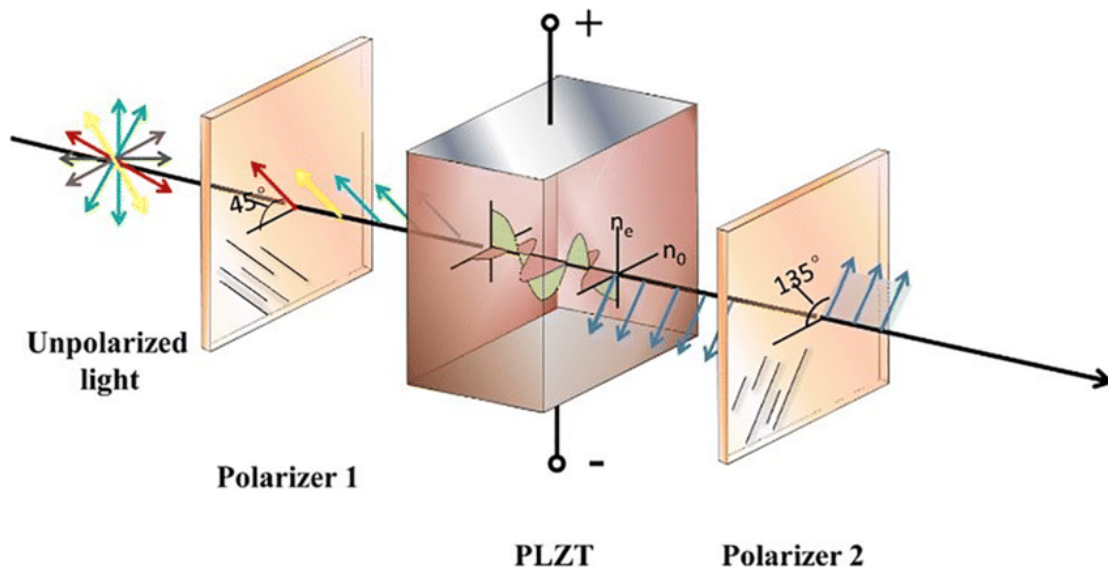


Рис. 2 – Схематичне зображення ефекту Керра [3]

Ефекту Керра відповідає наступна рівність:

$$\Delta n = \lambda \cdot K \cdot E^2 \quad (2)$$

де: Δn – зміна показника заломлення, λ – довжина хвилі світла, K – електрооптичний коефіцієнт Керра, E – напруженість електричного поля.

Вимірювання в ЕМС на основі ефекту Фарадея здійснюється завдяки зміні напрямку поляризації світла під час його проходження через магнітооптичний кристал під впливом зовнішнього магнітного поля. Тобто, парамагнетик повертає площину поляризації у магнітному полі. Кут цього повороту є пропорційним силі зовнішнього магнітного поля.

Зміну кута поляризації світла (θ) за ефектом Фарадея знаходять за формулою:

$$\theta = V \cdot B \cdot d \quad (3)$$

де: V – константа Верде, B – індукція магнітного поля, d – довжина шляху світла у кристалі.

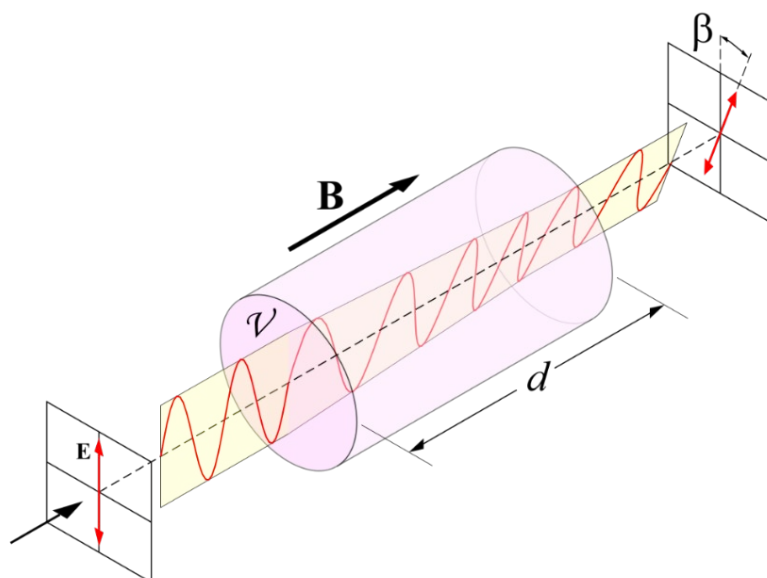


Рис. 3 – Схематичне зображення ефекту Фарадея [4]

У праці Ш. Флєсха ЕМС на основі оптичного ефекту Погкельса виготовлено з кристалу ніобату Літію ($LiNbO_3$), який має значну електрооптичну чутливість [2]. Вплив зовнішнього електричного поля призводить до змін активності нейронів головного мозку, що фіксувалось фотодіодами цього ЕМС як зсув фази лазерного променя у кристалі. Експериментальне застосування досліджуваного ЕМС показало його високу чутливість до зсуву фази лазера та лінійність відповіді.

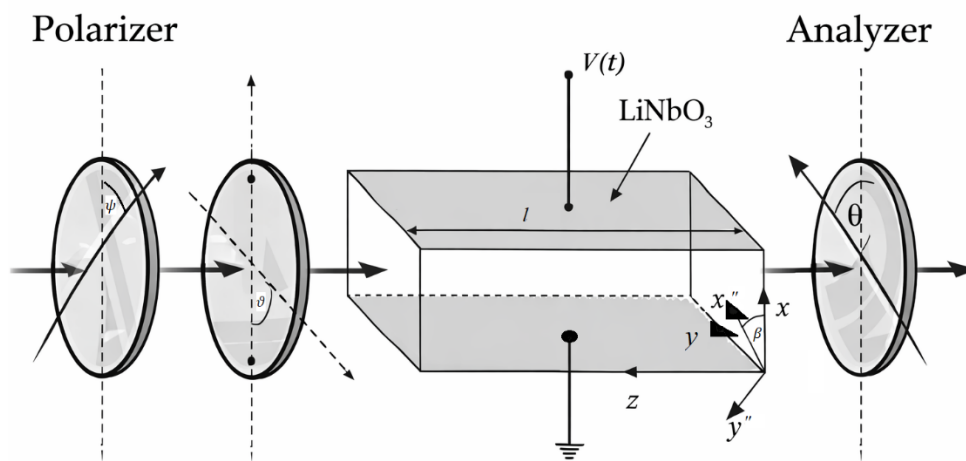


Рис. 4 – Схема функціонування досліджуваного ЕМС на основі ефекту Погкельса [2]

ЕМС відіграють значну роль у синтезі та використанні продуктів БМІ, адже забезпечують точне та неінвазивне вимірювання фізіологічних параметрів людського організму. ЕМС входить до типової будови ЕКГ, ЕЕГ, МРТ, пульсоксиметра.

Зокрема, ЕМС на основі оптичних ефектів використовуються у вимірювальних пристроях, які забезпечують безконтактну реєстрацію навіть незначних за величиною змін електромагнітних параметрів досліджуваного об'єкта або середовища. Такі ЕМС входять до складу вимірювальних модулів біомедичних імплантів, систем моніторингу активності живих тканин.

Аналіз результатів, наведених у праці Ш. Флєсха, показує, що використання розробленого ЕМС забезпечує лінійну залежність фазового зсуву оптичного сигналу від прикладеної напруги, стабільність калібрувальної кривої, високу чутливість до слабких електричних полів, мале відносне стандартне відхилення експериментальних даних [2].

Таким чином, структуру представленого у праці Ш. Флєсха ЕМС на основі оптичного ефекту Погкельса можна розглядати як базову архітектуру перспективного біомедичного сенсора, який

уможливило високоточну та безконтактну реєстрацію, наприклад, електричної активності головного мозку.

Висновок

Отже, у цій роботі було проаналізовано фізичні принципи функціонування ЕМС на основі оптичних ефектів Поккельса, Керра, Фарадея. Досліджено засади роботи ЕМС на основі ефекту Поккельса, розробленого Ш. Флєсхом на основі кристалу ніобату Літію. Запропоновано варіант його використання у продуктах біомедицинської інженерії, зокрема, для неінвазивного моніторингу біопотенціалів головного мозку, що обумовлено такими параметрами цього сенсора, як значна чутливість до слабких електромагнітних полів, висока прецизійність результатів вимірювань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Fan X., Pei Z., Peng Q. Electromagnetic Sensors. *Electrostatics – Fundamentals and Modern Applications*. 2025.
2. Fleyeh S. Investigation the Performance of Electro-Optical AC Voltage LiNbO₃ Sensor Based on Pockels Effect. *Tikrit Journal of Engineering Science*. 2013, Vol. 20, No. 7 : pp. 32-37.
3. Ling L., Qiu P., He X. The electrical and optical properties of Nb-doping PLZT (9/65/35) transparent ceramics. *Journal of Electroceramics*. 2020, Vol. 44, No. 3–4 : pp. 215–222.
4. Nature of Faraday Effect. URL: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/wave-optics/99205446-faraday-effect> (дата звернення: 13.12.2025)
5. What is Pockels Effect? URL: <https://www.gophotonics.com/community/what-is-pockels-effect> (дата звернення: 13.12.2025)

Гончар Богдан Віталійович – студент групи БМІ-226, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, e-mail: bogdgonchar@gmail.com

Науковий керівник – Тимчик Сергій Васильович, канд. тех. наук, декан факультету інформаційних електронних систем, доцент кафедри біомедицинської інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, e-mail: tymchik@vntu.edu.ua

Bohdan Honchar – student of Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: bogdgonchar@gmail.com

Supervisor – Serhiy Tymchik, PhD (Biomedical Engineering), Dean of the Faculty of Information Electronic Systems, Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronics, Vinnytsia National Technical University, e-mail: tymchik@vntu.edu.ua