

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ



МАТЕРІАЛИ
VII ФОРУМУ
**«Автоматизація, електроніка та
робототехніка. Стратегії розвитку та
інноваційні технології»**
AERT-2025

11 - 12 грудня 2025 р.

Харків 2025



Збірник матеріалів VII форуму «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» AERT-2025. – Харків, ХНУРЕ, 2025. – 105 стр.

В збірник включені матеріали VII форуму «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» AERT-2025.



VII форум «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» AERT-2025 проведено кафедрами:



- мікропроцесорних технологій і систем (MTC),



- комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (KITAR).

Видання підготоване
кафедрою мікропроцесорних технологій і систем (MTC)
Харківського національного університету радіоелектроніки (ХНУРЕ)

61166 Україна, Харків, просп. Науки, 14

Тел. +38 (057) 755 0220

Е-mail:

oleh.zubkov@nure.ua

© Харківський
національний університет
радіоелектроніки (ХНУРЕ), 2025

АДАПТИВНИЙ ОПТИЧНИЙ СЕНСОР НА ПЛАНАРНОМУ ХВИЛЕВОДІ ДЛЯ СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

доцент, к.ф.м.н., Галат О.Б., студент Стаднік Д.В., студент Лашко Е.І.
Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МЕЕПП

м. Харків, Україна

e-mail: daniil.stadnik@nure.ua

Abstract. This paper investigates an adaptive optical sensor based on a planar waveguide for environmental monitoring systems. The proposed design offers a simpler technological alternative to D-shaped fiber sensor while retaining the advantages of total internal reflection and evanescent-field interaction. The study includes modeling of light propagation in the glass plate and calculation of key parameters such as penetration depth, number of reflections, and total attenuation. The results show that adjusting the input angle provides an effective mechanism for tuning sensor sensitivity. The approach enables the development of a flexible, microcontroller-controlled multispectral system suitable for field environmental measurements.

Ключові слова: оптичний сенсор, планарний хвилевід, екологічний моніторинг.

Вступ. Дослідження продемонстрували високий потенціал D-подібних волоконних сенсорів, що працюють на принципі повного внутрішнього відбиття (ПВВ) та взаємодії еванесцентного поля з середовищем. Такі сенсори є надзвичайно привабливими для задач сучасного моніторингу завдяки їхній високій чутливості до приповерхневих змін, можливості роботи в реальному часі та стійкості до електромагнітних завад, що є критичним для промислової автоматизації. Було показано, що їхня чутливість сильно залежить від оптичних параметрів системи (показників заломлення n_1 , n_2) та геометрії (кут падіння θ) [1].

Водночас, незважаючи на їхні характеристики, практична реалізація сенсорів на базі D-подібного волокна пов'язана зі значними технологічними викликами. Процес бокового шліфування є складним, дорогим та важко відтворюваним у серійному виробництві. Крім того, точне введення випромінювання в такій мікроструктурі вимагає складного юстувального обладнання.

Ці фактори обумовлюють необхідність пошуку альтернативних, технологічно простіших та економічно ефективніших конфігурацій, які б зберігали фундаментальні переваги методу ПВВ. Для подальшого дослідження фундаментальних принципів та розробки практичної, автоматизованої системи моніторингу, було проведено моделювання альтернативної, простішої в реалізації конфігурації сенсора. Ця конфігурація базується на тих самих фізичних принципах, але використовує макроскопічний планарний хвилевід – скляну пластину, що

відкриває широкі перспективи для її інтеграції в автоматизовані системи та використання як навчального стенду для підготовки фахівців.

Основна частина. Розглянемо систему, що складається зі стандартної скляної пластини (76x26x1.2 мм) з показником заломлення $n_{glass} \approx 1.5$, яка занурена у кювету з досліджуваною рідиною (рис. 1). Випромінювання від джерела світла (лазера) вводиться через один із торців пластини під певним кутом падіння θ_{in} .

Світло, увійшовши в пластину, зазнає заломлення і поширюється всередині неї, послідовно відбиваючись від плоских граней "скло-середовище" та "скло-повітря".

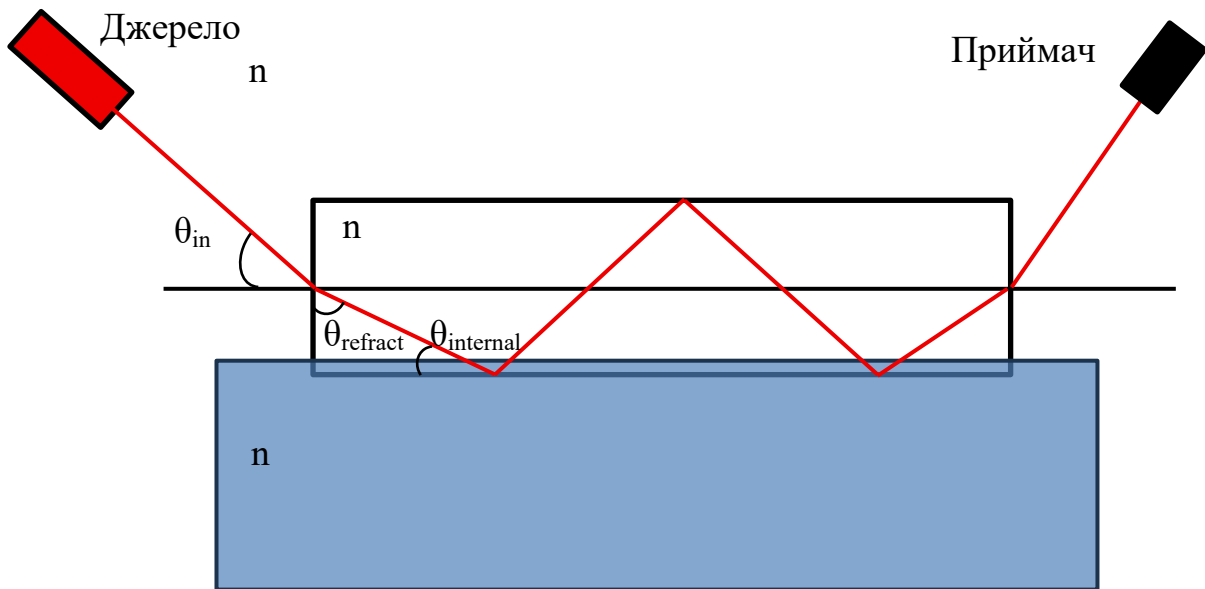


Рис 1. – Схематичне зображення поширення променя у планарному хвилеводі (скляній пластині) при введенні через торець.

Ключовим параметром, що визначає всю фізику процесу, є внутрішній кут $\theta_{internal}$ (кут падіння на робочу грань "скло-середовище") [2]. Цей кут безпосередньо пов'язаний із вхідним кутом θ_{in} , враховуючи геометрію введення:

$$n_{air} \cdot \sin(\theta_{in}) = n_{glass} \cdot \cos(\theta_{internal}), \quad (1)$$

Це співвідношення є надзвичайно важливим: воно показує, що, змінюючи зовнішній, легко контрольований кут, ми можемо прецизійно керувати внутрішнім кутом, а отже – всіма характеристиками сенсора [3].

Глибина проникнення еванесцентного поля (δ) є функцією λ (довжини хвилі) та $\theta_{internal}$ (а отже, і θ_{in}):

$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{n_{glass}^2 \sin^2(\theta_{internal}) - n_{sol}^2}}, \quad (2)$$

Розрахунки (рис. 2) показують, що при збільшенні вхідного кута θ_{in} (що відповідає зменшенню $\theta_{internal}$ та його наближенню до критичного кута

θ , глибина проникнення δ різко зростає. Наприклад, для $\lambda_3 = 650$ нм, δ зростає від ≈ 150 нм до ≈ 450 нм при зміні θ_{in} від 0 до 40 градусів. Це означає, що еванесцентне поле "опитує" значно товщий шар рідини.

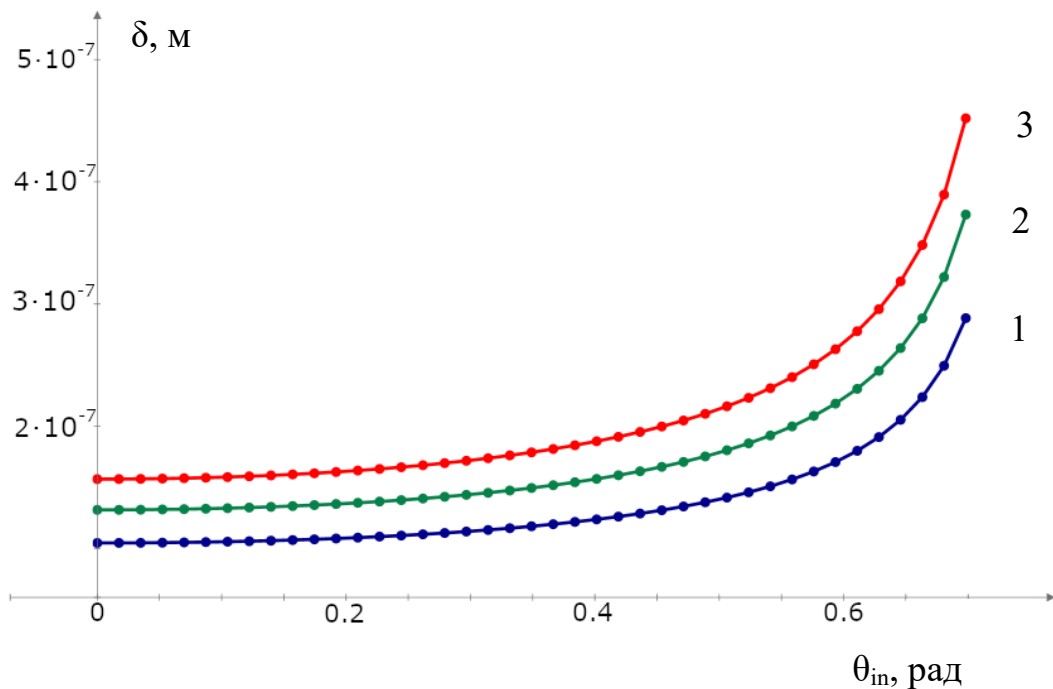


Рис 2. – Залежність глибини проникнення еванесцентного поля від вхідного кута для трьох довжин хвиль.

Для пластини довжиною $L=76$ мм і товщиною $t=1.2$ мм, кількість відбиттів N також залежить від кута:

$$N = \frac{L}{t \cdot \tan(\theta_{internal})} \quad (3)$$

При збільшенні θ_{in} (зменшенні $\theta_{internal}$), кількість відбиттів N збільшується (з 1-2 до 5-6).

Сумарне затухання сигналу має характер помножувального ефекту, який визначається як втратами на кожному окремому відбитті, так і загальною кількістю цих відбиттів. Вихідна потужність (P_{out}) описується наступною моделлю:

$$P_{out} = P_{in} \cdot (1 - Loss)^N \quad (4)$$

де P_{in} – вхідна напруга, P_{out} –

Втрати на одному відбитті ($Loss$) моделюються як функція, пропорційна глибині проникнення ($Loss = k \cdot \delta$), а N – це кількість повних відбиттів.

Аналіз показує, що при збільшенні вхідного кута θ_{in} одночасно зростають і втрати на кожному відбитті, і їх загальна кількість, що спричиняє стрімке експоненціальне падіння P_{out} , ступінчастий характер якого обумовлений дискретною зміною N .

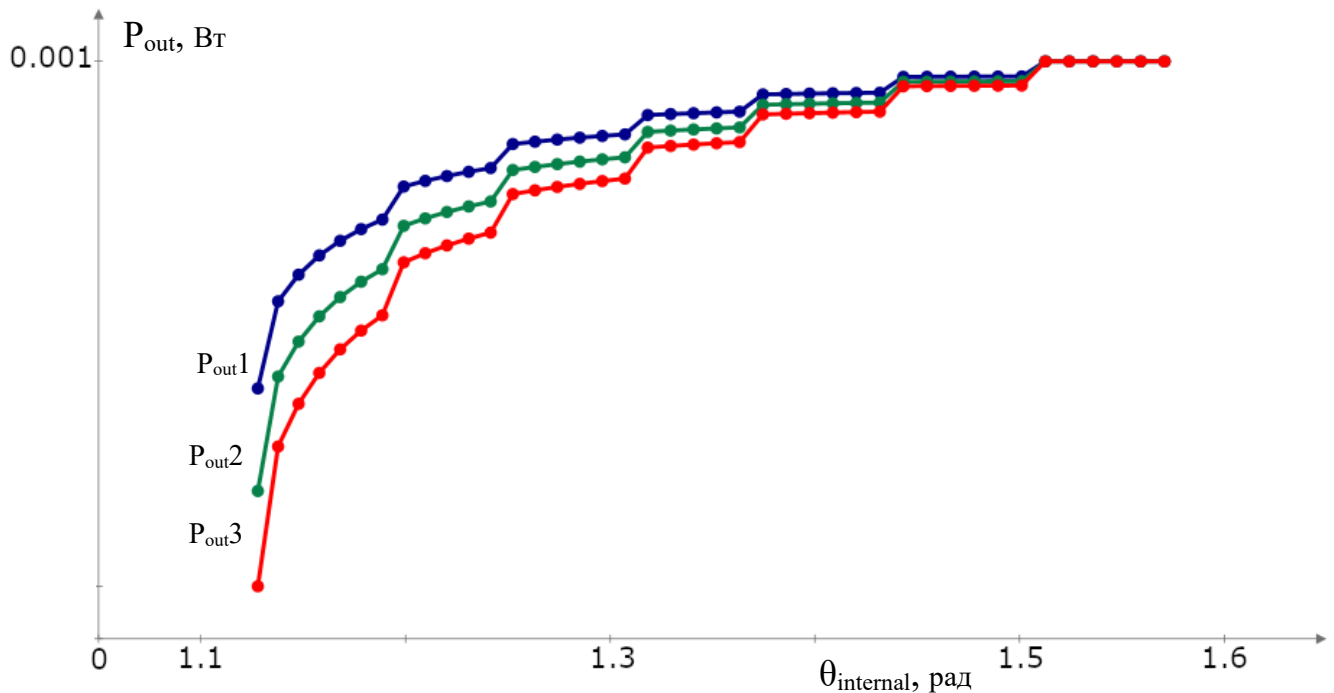


Рис 3. – Модельна вихідна потужність (P_{out}) як функція внутрішнього кута ($\theta_{internal}$) для трьох довжин хвиль.

Висновки. Моделювання сенсора на основі планарного хвилеводу підтвердило фундаментальні принципи, раніше розглянуті для D-подібного волокна. Водночас воно виявило новий, механізм керування – адаптацію чутливості шляхом зміни кута введення.

Цей підхід дозволяє проектувати не просто статичний сенсор, а інтелектуальну систему. Використання мікроконтролера для керування кутом та перемикання між різними довжинами хвиль перетворює пристрій на гнучкий, багатопараметричний аналізатор.

Поєднання такого вимірювального вузла з сучасними інформаційними технологіями відкриває шлях до створення нового покоління засобів автоматизації для польового екологічного моніторингу.

Список використаних джерел:

1. Surface Plasmon Resonance Based Sensors / ed. by J. Homola. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2006. URL: <https://doi.org/10.1007/b100321>
2. Snyder A. W., Love J. D. Optical Waveguide Theory. Boston, MA : Springer US, 1984. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2813-1>
3. Luo Z., Huang Y. Sensitivity enhancement of surface plasmon resonance sensor based on wavelength and angular combined modulations. Optik. 2018. Vol. 168. P. 271–277. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.04.085> (date of access: 13.11.2025).