

АНОТАЦІЯ

Дорожинська Г. В. Підвищення метрологічних характеристик сенсора на основі явища поверхневого плазмонного резонансу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2021.

Дисертація присвячена підвищенню метрологічних характеристик оптичного сенсора на основі явища поверхневого плазмонного резонансу (ППР) при використанні комплексного підходу, що включає вдосконалення конструкції сенсора та методу визначення резонансного кута. Аналітичний метод на основі явища ППР використовується для дослідження фізико-хімічних та біохімічних реакцій у рідких та газоподібних середовищах. Сенсори на основі явища поверхневого плазмонного резонансу (ППР-сенсори) складаються з чутливого елемента та фізичного перетворювача. Чутливий елемент реагує на зміну показника заломлення досліджуваної речовини, внаслідок зміни концентрації певної її складової або товщини адсорбованого на його поверхню нанорозмірного шару. Фізичний перетворювач формує на виході ППР-сенсора різницю потенціалів, пропорційну зміні показника заломлення. Чутливий елемент таких сенсорів є високопровідним металевим шаром, товщиною від 10 до 100 нанометрів, який розташований на діелектричній підкладинці, що має показник заломлення більший за показник заломлення досліджуваного середовища. При опроміненні металевого шару зі сторони підкладинки р-поляризованим монохроматичним світлом під кутом більшим за критичний виникає резонанс частоти падаючого світла з плазмонною частотою вільних електронів у металі, внаслідок чого на межі метал-діелектрик виникає поверхнева оптична хвиля – поверхневий плазмон.

Більшість існуючих ППР-сенсорів побудовані за оптичною схемою з використанням призми для забезпечення умов повного внутрішнього відбиття (схема Кречмана). На призму через імерсійну рідину для забезпечення оптичного контакту встановлюють діелектричну підкладку з металевим шаром. Для досягнення резонансних умов виконується зміна кута падіння світла зі сторони призми на межу діелектрик-метал. У цьому випадку резонанс частот виникає при певному куті падіння світла – резонансному куті, а відгуком ППР-сенсора є зсув кутового положення мінімуму резонансної характеристики відбиття, яка представляє собою графік залежності інтенсивності відбитого світла від кута його падіння. При цьому визначення точного кутового положення мінімуму характеристики відбиття, а саме резонансного кута, як до зміни показника заломлення досліджуваного середовища, так і після є важливою метрологічною задачею, яка потребує вирішення, оскільки збільшення похибки вимірювання цього кута підвищує похибку величини відгуку ППР-сенсора та суттєво знижує достовірність результатів дослідження.

Метою дисертаційної роботи є підвищення метрологічних характеристик сенсора на основі явища поверхневого плазмонного резонансу шляхом вдосконалення конструкції та методу визначення резонансного кута.

Доповнено наукові дані щодо важливості врахування впливу шорсткості поверхні металевої плівки та додаткового діелектричного шару на вимірювання резонансного кута ППР-сенсорами та визначено функції перетворення для таких сенсорів. Розроблено алгоритм розрахунку невизначеності вимірювання резонансного кута. Проаналізовано існуючі методи визначення резонансного кута та визначено їх недоліки та переваги. Особлива увага приділена методу середньої лінії та найпоширенішими методами апроксимації поліномами 2-го, 3-го степенів. Оцінено абсолютну похибку вимірювання резонансного кута з використанням теоретичних характеристик відбиття цими методами при зміні таких параметрів досліджуваного середовища як: показник заломлення, температура, а також довжина хвилі випромінювання. Також в роботі досліджено точність визначення резонансного кута різними методами при зміні

товщини додаткового діелектричного шару, зміні шорсткості металевої поверхні та скляної поверхні призми ППР-сенсора.

Вдосконалено метод визначення резонансного кута. Було встановлено, що розроблений метод є менш залежним від зміни форми резонансної характеристики відбиття, на відміну від більшості існуючих методів. Зміна форми характеристики відбиття проявляється у її розширенні та зростанні інтенсивності відбитого світла в її мінімумі, що є наслідком зміни величини показника заломлення та температури досліджуваного середовища при проходженні фізико-хімічних та біохімічних реакцій. Розроблений метод було порівняно з методом середньої лінії та методами апроксимації поліномами 2-го, 3-го степенів. Для цього було проведене чисельне моделювання характеристик відбиття, використовуючи формули Френеля і математичний формалізм матриць розсіювання Джонса для перевірки функціонування методу за умов зміни довжини хвилі випромінювання, зміни показника заломлення, температури досліджуваного середовища, зміни товщини додаткового шару та шорсткості поверхні. За результатами моделювання для чутливого елемента з додатковим діелектричним шаром було встановлено, що абсолютна похибка вимірювання резонансного кута для вдосконаленого методу була у 9 разів менша, ніж для методу середньої лінії, який в свою чергу дозволяє зменшити абсолютну похибку щонайменше в 2,5 рази у порівнянні з методами апроксимації поліномом.

Особливістю явища ППР також є те, що частота поверхневого плазмону та швидкість його загасання, при розповсюдженні вздовж межі метал-досліджуване середовище, залежать не тільки від зміни показника заломлення на поверхні чутливого елемента, а й від шорсткості поверхні металу, яка контактує з досліджуваним середовищем. Стан металевої поверхні в свою чергу залежить від технології формування металевого шару на діелектрику, а також від стану поверхні самої діелектричної скляної підкладки, який визначається технологією її обробки. Скляна підкладка оптично узгоджена з призмою ППР-сенсора та призначена для багаторазового використання призми.

Для встановлення впливу технології обробки поверхні підкладинки чутливого елемента було порівняно найпоширеніший метод обробки оптичних скляних поверхонь (механічне фінішне полірування) із вперше застосованим для обробки підкладинок ППР-сенсорів – методом електронно-променевої обробки. Даний метод, на відміну від існуючих, таких як механічне полірування, йонна обробка та хімічне полірування, не змінюють поверхневого складу матеріалу підкладинки та не створюють дефектного порушеного приповерхневого шару. На скляну поверхню з середньоквадратичною шорсткістю поверхні від 5 нм і більше методом термічного випаровування у вакуумі було нанесено металевий шар. Внаслідок електронно-променевої обробки скляних підкладинок чутливих елементів ППР-сенсорів, які пройшли попередньо механічну обробку, було зменшено шорсткість поверхні металевого шару в 3 рази з 4,67 нм до 1,64 нм, що зменшило півширину характеристики відбиття майже в 2 рази з 0,453 град. до 0,867 град., і як наслідок зменшило абсолютну похибку визначення резонансного кута в 3 рази з 1,8 кут.сек. до 0,58 кут.сек. вдосконаленим методом. При цьому характеристика відбиття зсунулась у сторону менших кутів на 0,34 градуси, що розширило діапазон вимірювання ППР-сенсора. Збільшено чутливість по інтенсивності в 1,5 рази через збільшення глибини проникнення поля поверхневого плазмону у досліджуване середовище.

Одним з відомих напрямків підвищення чутливості ППР-сенсорів є підвищення адсорбційної здатності поверхні металевого шару. Для цього чутливі елементи покривають зі сторони досліджуваного середовища додатковими діелектричними шарами органічного чи неорганічного походження з розвиненою поверхнею. Це особливо актуально у сенсорах газоподібних середовищ, адсорбція яких у порах суттєво підвищує величину відгуку. До найпоширеніших недоліків ППР-сенсорів з такими покриттями, слід віднести низьку відновлювальну здатність після адсорбції, зниження з часом рівня відгуку та деградацію покриття через його руйнування, особливо після взаємодії з агресивними середовищами.

Для підвищення чутливості ППР-сенсора до газоподібних середовищ у якості додаткового діелектричного покриття було застосовано нанометровий шар політетрафторетилену, осаджений на металевий шар. Було проведено експериментальне дослідження вдосконаленого сенсора з шаром політетрафторетилену різної товщини від 5 до 50 нм при взаємодії з насиченими парами розчинників: метанолу, етанолу, ацетону та ізопропанолу. За результатами експерименту було встановлено, що максимальне збільшення чутливості у 2,8 рази забезпечила товщина політетрафторетилену 30 нм. Аналіз поверхні такого сенсора за допомогою атомно-силової мікроскопії дозволив встановити, що причиною зростання чутливості стало збільшення площі поверхні взаємодії з досліджуванним середовищем.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Удосконалено метод визначення резонансного кута, який на відміну від відомих, враховує вплив зміни інтенсивності в мінімумі характеристики відбиття сенсора на основі поверхневого плазмонного резонансу, що дало змогу підвищити точність його визначення у 9 разів при збільшенні товщини додаткового діелектричного верхнього шару в нанометровому діапазоні.

2. Набула подальшого розвитку фізико-математична модель сенсора, яка містить додатковий діелектричний верхній шар з врахуванням шорсткості перехідних шарів в нанометровому діапазоні, що дозволило розробити метод точнішого визначення резонансного кута.

3. Вперше встановлено вплив зміни в нанометровому діапазоні шорсткості скляних підкладинок сенсора при електронно-променевої обробці їх поверхні на зміну чутливості внаслідок збільшення крутизни схилів резонансної характеристики відбиття, що дозволило підвищити чутливість по інтенсивності в 1,5 рази.

4. Набуло подальшого розвитку дослідження впливу на чутливість сенсора товщини та топології додаткового діелектричного верхнього шару, що дозволило встановити залежність між площею поверхні взаємодії з

досліджуваним середовищем та чутливістю сенсора та обрати оптимальну товщину шару.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному:

1. Вперше запропоновано метод визначення резонансного кута, який полягає в визначенні цього кута як точки перетину осі кутів падіння світла та лінії, що проходить через середини відрізків між еквірівневими точками на схилах характеристики відбиття, та зміщення цієї характеристики на величину значення інтенсивності в її мінімумі, що дало можливість зменшити похибку вимірювання резонансного кута щонайменше у 5,5 рази.

2. Вдосконалено спосіб виготовлення сенсорів, який включає електронно-променеву обробку скляних, попередньо механічно полірованих, підкладинок, що дало можливість збільшити чутливість та зменшити похибку вимірювання резонансного кута щонайменше у 3 рази.

3. Розроблено сенсор для аналізу газоподібних середовищ з додатковим шаром політетрафторетилену з оптимальною товщиною (30 нм), що забезпечує підсилення відгуку до насичених парів розчинників щонайменше у 2,8 рази, у порівнянні з аналогічним сенсором без додаткового шару.

Результати досліджень, проведених в роботі, є перспективними для застосування у промисловості, в науковій діяльності та в навчальному процесі. Розглянуто практичне застосування вдосконаленого високочутливого ППР-сенсора з додатковим шаром політетрафторетилену у газовій сенсоричі. Вдосконалений метод визначення резонансного кута дозволяє зменшити похибку вимірювання при дослідженні біологічних взаємодій, оскільки цей метод менш чутливий до змін коефіцієнта поглинання світла чи адсорбції тонких поглинаючих шарів. Результати досліджень підтверджені відповідними актами використання.

Ключові слова: поверхневий плазмонний резонанс, метрологічні характеристики, чисельний метод, резонансний кут, мінімум характеристики відбиття, чутливість, додатковий шар, шорсткість.

SUMMARY

Dorozhynska H.V. Improvement of metrological characteristics of the sensor based on surface plasmon resonance phenomenon. - Qualifying scientific work, the manuscript.

Thesis for the scientific degree of Doctor of Philosophy on speciality 152 "Metrology and Information-Measuring technology". - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to increase of metrological characteristics of the optical sensor based on surface plasmon resonance phenomenon (SPR) at use of the complex approach including improvement of a design of the sensor and a method of definition of a resonant angle. Analytical method based on SPR phenomenon is used to study physicochemical and biochemical reactions in liquid and gaseous media. Sensors based on surface plasmon resonance (SPR-sensors) consist of a sensitive element and a physical transducer. The sensitive element responds to changes in the refractive index of the test substance, due to changes in the concentration of a certain component, or the thickness of the nano-layer adsorbed on its surface. The physical transducer generates a difference of electrical potential at the output of the SPR sensor, proportional to the change in the refractive index. The sensitive element of such sensors is a high-conductivity metal layer, 10 to 100 nanometers thick, which is located on a dielectric substrate having a refractive index greater than the refractive index of the test medium. When the metal layer is irradiated from the substrate side with p-polarized monochromatic light at an angle greater than critical, the frequency of incident light resonates with the plasmon frequency of free electrons in the metal, as a result of which a surface optical wave - surface plasmon - is formed at the metal-dielectric interface. Most of the existing SPR sensors are built on an optical scheme using a prism to provide conditions of total internal reflection (Kretschman's scheme) on which through an immersion fluid to ensure optical contact set a dielectric substrate with a metal layer. To achieve resonant conditions, the angle of incidence of light from the prism to the dielectric-metal boundary is changed. In this case, the

resonance of frequencies occurs at a certain angle of incidence of light - resonant angle, and the response of the SPR sensor is a shift of the angular position of the minimum resonant reflection characteristic, which is a graph of the intensity of reflected light from its angle of incidence. In this case, determining the exact angular position of the minimum reflection characteristics, namely the resonant angle, both before and after the refractive index of the studied medium is an important metrological problem that needs to be solved, because increasing the measurement error increases the response error and reduces the reliability of the study results.

The aim of the dissertation is to increase the metrological characteristics of the sensor based on the phenomenon of surface plasmon resonance by improving the design and method of determining the resonance angle.

The scientific data on the importance of taking into account the influence of the surface roughness of the metal film and the additional dielectric layer on the measurement of the resonance angle by SPR sensors are supplemented and the transformation functions for such sensors are determined. An algorithm for calculating the uncertainty of resonance angle measurement has been developed. The existing methods of determining the resonance angle are analyzed and their disadvantages and advantages are determined. Particular attention is paid to the most common methods, namely: the method of approximation by polynomials of 2nd and 3rd degrees, as well as the method of the middle line. The absolute error of resonance angle measurement is estimated using the theoretical characteristics of reflection by these methods when changing such parameters of the studied medium as: refractive index, temperature, as well as the wavelength of radiation. The paper also investigates the accuracy of determining the resonance angle by different methods when changing the thickness of the additional dielectric layer, and changing the roughness of the metal surface and the glass surface of the prism of SPR sensor.

The method of determining the resonant angle has been improved. It was found that the developed method is less dependent on the change in the shape of the resonant reflection characteristic, in contrast to most existing methods. The change in the shape of the reflection characteristics is manifested in its expansion and increase

in the intensity of reflected light in its minimum, which is a consequence of changes in the refractive index and temperature of the studied medium during physicochemical and biochemical reactions. The developed method was compared with the middle line method and the most common methods of approximation by polynomials of 2nd and 3rd degrees. To do this, numerical modeling of reflection characteristics was performed using Fresnel formulas and mathematical formalism of Jones scattering matrices to test the method under the conditions of changing the wavelength of radiation, changes in refractive index, temperature of the medium, changes in additional layer thickness and surface roughness. According to the simulation results for the sensitive element with an additional dielectric layer, it was found that the absolute error of resonance angle measurement for the advanced method was 9 times less than for the midline method, which in turn reduces the absolute error by at least 2.5 times compared with polynomial approximation methods.

The peculiarity of the SPR phenomenon is also that the frequency of the surface plasmon and its rate of attenuation, when propagating along the metal-medium medium, depend not only on the change in refractive index on the surface of the sensing element, but also on the surface roughness of the metal contacting the medium. The condition of the metal surface in turn depends on the technology of forming a metal layer on the dielectric, as well as on the condition of the surface of the dielectric glass substrate, which is determined by the technology of its processing. The glass substrate is in optical contact with the prism of the SPR sensor and is designed for multiple use of the prism.

To establish the influence of the technology of surface treatment of the substrate of the sensitive element, the most common method of treatment of optical glass surfaces (mechanical finishing polishing) was compared with the first used for the treatment of SPR sensor substrates - the method of electron beam treatment. This method, in contrast to existing ones, such as mechanical polishing, ion processing and chemical polishing, does not change the surface composition of the substrate material and does not create a defective disturbed near-surface layer. A metal layer was

applied to a glass surface with a root mean square surface roughness of 5 nm or more by thermal evaporation in vacuum. As a result of electron beam treatment of glass substrates of sensitive elements of SPR sensors, which have undergone pre-machining, the surface roughness of the metal layer was reduced by 3 times from 4.67 nm to 1.64 nm, which reduced the half-width of the reflection characteristic by almost 2 times from 0.453 deg. to 0.867 deg., and as a consequence reduced the absolute error of determining the resonant angle in 3 times from 1.8 arc.sec. up to 0.58 arc.sec. for the advanced method. At the same time, the reflection characteristic shifted towards smaller angles by 0.34 degrees, which expanded the measurement range of the SPR sensor. The sensitivity in intensity is increased by 1.5 times due to the increase in the depth of penetration of the surface plasmon field into the studied medium.

One of the known ways to enhance the sensitivity of SPR sensors is to increase the adsorption capacity of the surface of the metal layer. To do this, the sensitive elements are covered on the side of the test medium with additional dielectric layers of organic or inorganic origin with a developed surface. This is especially true in gaseous media sensors, the absorption of which in the pores significantly increases the magnitude of the response. The most common disadvantages of SPR sensors with such coatings include low reproducibility after absorption, reduced over time, the level of response and degradation of the coating due to its destruction, especially after interaction with aggressive media.

To increase the sensitivity of the SPR sensor to gaseous media, a nanometer layer of polytetrafluoroethylene deposited on a metal layer was used as an additional dielectric coating. An experimental study of an advanced sensor with a layer of polytetrafluoroethylene of different thickness from 5 to 50 nm when interacting with saturated pairs of solvents: methanol, ethanol, acetone and isopropanol. According to the results of the experiment, it was found that the maximum increase in sensitivity by 2.8 times was provided by the thickness of polytetrafluoroethylene at 30 nm. Analysis of the surface of such a sensor using atomic force microscopy revealed that

the reason for the increase in sensitivity was an increase in the surface area of interaction with the studied medium.

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

1. Improved the method of determining the resonance angle, which, in contrast to the known methods, takes into account the effect of changing the intensity in the minimum reflection characteristics of the sensor based on surface plasmon resonance, which increased the accuracy of its determination by 9 times increasing the thickness of the additional dielectric upper layer in the nanometer range.

2. The physico-mathematical model of the sensor, which contains an additional dielectric upper layer taking into account the roughness of the transition layers in the nanometer range, was further developed, which allowed developing a method for more accurate determination of the resonance angle.

3. For the first time the influence of the change in the nanometer roughness range of the sensor glass substrates during electron beam treatment of their surface on the change in sensitivity due to the increase in the slope of the resonant reflection characteristics, which increased the sensitivity by 1.5 times

4. The study of the influence on the sensitivity of the thickness sensor and the topology of the additional dielectric upper layer was further developed, which allowed finding the relationship between the surface area of interaction with the studied medium and the sensitivity of the sensor to choose the optimal layer thickness.

The practical significance of the results is as follows:

1. For the first time proposed a method of determining the resonant angle, which consists in determining this angle as the point of intersection of the axis of angles of incidence of light and a line passing through the midpoints of segments between equivalent points on the slopes of the reflection characteristic, and shifting this characteristic which made it possible to reduce the measurement error of the resonance angle by at least 5.5 times.

2. Improved method of manufacturing sensors, which includes electron beam treatment of glass, pre-mechanically polished, substrates, which allowed to increase

the sensitivity and reduce the measurement error of the resonant angle at least 3 times.

3. Developed a sensor for the analysis of gaseous media with an additional layer of polytetrafluoroethylene with an optimal thickness (30 nm), which enhances the response to saturated solvent vapors at least 2.8 times, compared with a similar sensor without an additional layer.

The results of research conducted in the work are promising for use in industry, research and educational process. The practical application of an advanced high-sensitivity SPR sensor with an additional layer of polytetrafluoroethylene in a gas sensor is considered. The improved method of determining the resonance angle allows reducing the measurement error in the study of biological interactions, because this method is less sensitive to changes in the light absorption coefficient or adsorption of thin absorbing layers. The research results are confirmed by the relevant acts of use.

Key words: surface plasmon resonance, metrological characteristics, numerical method, resonance angle, minimum reflection characteristics, sensitivity, additional layer, roughness.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

1. Dorozinska H.V., Maslov V.P., Ushenin Yu.V., Dorozinsky G.V., Kudryavtsev A.A. New method for determining the angular position of the light reflection intensity minimum observed in surface plasmon resonance // Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS), Vol. 3 Issue 3, (2017), 1514-1518. (ISSN: 2458-925X, Країна: Туреччина, індексується в наукометричних базах Google Scholar, Arxiv, ResearchGate, Scirus, getCITED). Здобувачем визначено вплив довжини хвилі випромінювання на точність визначення резонансного кута.
2. Дорожинська Г.В., Дорожинський Г. В., Ляпін О. М., Маслов В. П. Стан та проблеми розробки чутливих елементів приладів на основі явища поверхневого плазмонного резонансу // Оптоелектроника и полупроводниковая техника, № 52, (2017), 37-49. (ISSN: друковане - 0233-7577, наукове видання України, категорія Б, спеціальність 152, індексується в Google Scholar). Здобувачем проведено огляд існуючих конструкторсько-технологічних рішень удосконалення сенсорів на основі явища поверхневого плазмонного резонансу.
3. Maslov V.P., Ushenin Yu.V., Dorozinsky G.V., Dorozinska H.V. Trends in the development of analytical devices based on surface plasmon resonance and perspective directions of their application // Scholars' Press (OmniScriptum Publishing Group), 2018, 293 p. ISBN: 978-620-2-31164-9. (Монографія, ISBN: 978-620-2-31164-9). Здобувачем проведено огляд існуючих напрямів вдосконалення сенсорів на основі поверхневого плазмонного резонансу та написано 4 розділ.
4. Dorozinska H.V., Turu T.A., Markina O.M., Dorozinsky G.V., Maslov V.P. Influence of Temperature on the Measuring Accuracy of Devices Based on Surface Plasmon Resonance Phenomenon // Modern Instrumentation, Vol. 7, (2018), 1-10. (ISSN: 2165-9257, Країна: США, індексується в

наукометричних базах *Google Scholar, CrossRef, Worldcat, NSTL та ін.*).
Здобувачем проведено аналіз сучасного стану технічних рішень та методів по зменшенню впливу температурного фактору.

5. Vashchenko V.A., Yatsenko I.V., Kovalenko Yu.I., Kladko V.P., Gudymenko O.Yo, Lytvyn P.M., Korchovyi A.A., Mamykin S.V., Kondratenko O.S., Maslov V.P., Dorozinsky G.V., Dorozinska H.V. Effect of electron-beam treatment of sensor glass substrates for SPR devices on their metrological characteristics // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*, Vol.22, № 4, (2019), 444-451. (ISSN: друковане - 1560-8034 електронне - 1605-6582, наукове видання України, категорія А, спеціальність 152, індексується в наукометричних базах SCOPUS, Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar, CrossRef, Worldcat та ін.). Здобувачем проведена обробка вимірних даних та визначено оптичні константи гетероструктур.
6. Дорожинська Г.В., Дорожинський Г.В., Маслов В.П., Гриценко К.П., Коломзаров Ю.В., Литвин П.М., Дорошенко Т.П. Особливості застосування додаткового нанощару політетрафторетилену у сенсорах на основі явища поверхневого плазмонного резонансу // *Оптоелектроника и полупроводниковая техника*, № 54, (2019), 88-95. (ISSN: друковане - 0233-7577, наукове видання України, категорія Б, спеціальність 152, індексується в Google Scholar). Здобувачем проведено вимірювання та визначено основні рефрактометричні характеристики зразків з додатковим шаром.
7. Дорожинська Г.В. Моделювання чутливості сенсорів на основі явища поверхневого плазмонного резонансу з додатковим верхнім нанощаром політетрафторетилену // *Оптоелектроника и полупроводниковая техника*, № 54, (2019), 126-133. (ISSN: друковане - 0233-7577, наукове видання України, категорія Б, спеціальність 152, індексується в Google Scholar).
8. Дорожинська Г.В. Аналіз методів визначення мінімуму характеристики відбиття під час поверхневого плазмонного резонансу // *Наукові праці*

Вінницького національного технічного університету, № 1, (2020), 1-7. <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2020-1-1-7>. (ISSN: 2307-5376, наукове видання України, категорія Б, спеціальність 152, індексується в Google Scholar).

9. Дорожинська Г.В. Оцінка ефективності чисельних методів для обробки результатів вимірювання вдосконаленим ППР-сенсором // Вісник Вінницького Політехнічного Інституту, № 2, (2020), 7-13. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-149-2-7-13>. (ISSN: друковане - 1997-9266 електронне - 1997-9274, наукове видання України, категорія Б, спеціальність 152, індексується в Google Scholar).

Наукові праці апробаційного характеру

10. Дорожинська Г.В., Маслов В.П., Дорожинський Г.В. Новий метод для визначення кутового положення мінімуму інтенсивності відбитого світла при поверхневому плазмонному резонансі // Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників «ЛІШКАРЬОВСЬКІ ЧИТАННЯ – 2018». Збірник тез. – Київ, Україна. – **2-4 квітня, 2018**. – с. 85-86. *Здобувачем визначено вплив довжини хвилі випромінювання на точність визначення резонансного кута.*
11. Дорожинська Г.В. Моделювання чутливості сенсорів на основі явища поверхневого плазмонного резонансу з додатковим шаром політетрафторетилену // Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників «ЛІШКАРЬОВСЬКІ ЧИТАННЯ – 2019». Збірник тез. – Київ, Україна. – **3-5 квітня, 2019**. – с. 55-56
12. Maslov V., Ushenin Yu., Klestova Z., Blotskaya O., Yushchenko A., Dorozinsky G., Dorozinska H. Development high sensitivity sensors based on surface plasmon resonance phenomenon // IEEE 39th International conference on electronics and nanotechnology – Kyiv, Ukraine. – **16-18 April, 2019**. – p. 249-252. (Матеріали конференції проіндексовані в базах Scopus, Web of Science, Google Scholar та ін.). *Здобувачем проаналізовано основні впливи на чутливість сенсорів на основі поверхневого плазмонного резонансу.*

13. Маслов В.П., Литвин П.М., Коломзаров Ю.В., Ушенін Ю.В., Дорожинський Г.В., Дорожинська Г.В. Застосування політетрафторетилену в газових сенсорах на основі явища поверхневого плазмонного резонансу // XX Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та електронні технології: СІЕТ». Збірник тез. – Одеса, Україна. – **27-31 травня, 2019.** – С.126-127.
Здобувачем проведено вимірювання та визначено основні характеристики зразків з додатковим шаром.

14. Maslov V., Yatsenko I., Kladko V., Dorozinsky G., Gudymenko O. Dorozinska H. Improvement of sensor glass substrates for surface plasmon resonance devices // IEEE 40th International conference on electronics and nanotechnology – Kyiv, Ukraine. – **22-24 April, 2020.** – p. 81-84.
(Матеріали конференції проіндексовані в базах Scopus, Web of Science, Google Scholar та ін.). Здобувачем проведений аналіз впливу електронно-променевої обробки на фізичні характеристики поверхні скляної підкладки ППР-сенсора.

Праці, які додатково відображають наукові результати

15. Дорожинська Г.В., Дорожинський Г.В., Коломзаров Ю.В., Гриценко К.П., Ушенін Ю.В., Маслов В. П. Прилад для аналізу рідких та газоподібних середовищ // Патент України на КМ № 126835 від **10.07.2018**, бюл. №13, заявка № u 2018 00324 від 11.01.2018. *Здобувачем запропоновано діапазон товщини додаткового шару політетрафторетилену на поверхні ППР-сенсора.*

16. Дорожинська Г.В., Дорожинський Г.В., Маслов В.П. Спосіб детектування та визначення концентрації біомолекул та молекулярних комплексів // Патент України на КМ №142356 від **25.05.2020**, бюл. №10, заявка № u 2020 00497 від 28.01.2020. *Здобувачем запропоновано метод визначення резонансного кута.*