

К.М. Божко¹, Н.В. Качур², В.П. Маслов²

ОЦІНКА ЯКОСТІ СЕНСОРА НА ОСНОВІ ЯВИЩА ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСУ ІЗ ЗАХИСНИМ НАНОШАРОМ ОКСИДУ ЦИНКУ ЗА МЕТОДИКОЮ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Явище поверхневого плазмонного резонансу широко застосовують для вивчення біологічних, хімічних та фізичних процесів, які виникають на границі метал-діелектрик. Воно засноване на резонансних коливаннях електронів при збудженні поверхневого плазмону на резонансній частоті зовнішньою електромагнітною хвилею. Чутливий елемент ППР-сенсора складається з тонкої пластинки з оптичного скла, на яку нанесений адгезивний шар хрому товщиною 5 нм та чутливий шар золота товщиною 50 нм. Наношар золота наноситься шляхом вакуумного розпилення. При цьому десять скляних пластинок розміщуються на столику установки ВУП-5М, золото розпилюється з мішені конусом. Через це товщина плівки золота змінюється в межах 1-2 нм для різних сенсорів навіть з однієї партії. Така різниця в товщині чутливого шару спричиняє зсув мінімуму кривої поверхневого плазмонного резонансу. Чутливий шар золота нестійкий і деградує при довготривалих дослідженнях рідин або суспензій, що призводить до необхідності заміни сенсора в процесі дослідження і виникнення додаткових похибок, обумовлених різною товщиною чутливого шару. Суттєво кращий результат збільшення чутливості в 1,5 рази та зменшення похибки в десятки разів досягається нанесенням додаткового захисного золь-гель шару оксиду цинку за рахунок рекордного зменшення ($\epsilon=0,005\%$) внутрішніх напружень в шарі золота та зменшення шорсткості поверхневого шару. За обмеженою кількістю виготовлених зразків із захисним шаром та проведених експериментальних вимірювань можна оцінити такі сенсори на основі нечіткого моделювання. В цій роботі було оцінено ефективність удосконаленого сенсора на основі явища поверхневого плазмонного резонансу із захисним наношаром оксиду цинку за методикою нечіткої логіки.

Використання захисної золь-гель наноплівки оксиду цинку товщиною 5 нм призводить до можливості отримати якісно кращий сенсор ППР. Нечітка логіка та нечітке моделювання є одним з найпоширеніших методів для визначення помилок та типу помилок у різних системах. Така схема є достатньо логічною та забезпечує зручний метод зіставлення входу з виходом за допомогою лінгвістичних правил, сформованих на основі людського розуміння (даних експертів), а не тільки математичних моделей. Нечітка логіка може поєднувати дані різних діагностичних тестів і практичні знання експертів з проведення діагностики. Нечітке моделювання дозволило оцінити покращення сукупності експлуатаційних параметрів сенсора у додаткові 24,9 балів відносно контрольного зразка за стобальною шкалою оцінювання, а саме: коефіцієнт якості сенсора підвищено з 50 для традиційного сенсора до 74,9 балів для удосконаленого захисним наношаром оксиду цинку при можливому максимальному значенні 85,4 бали для «ідеального» сенсора.

Ключові слова: поверхневий плазмонний резонанс, оксид цинку, нечітка логіка, золь-гель технологія.

1. ВСТУП

Явище поверхневого плазмонного резонансу широко застосовують для вивчення біологічних, хімічних та фізичних процесів, які виникають на границі метал-діелектрик [1]. Воно засноване на резонансних коливаннях електронів при збудженні поверхневого плазмону на резонансній частоті зовнішньою електромагнітною хвилею [2]. Чутливий елемент ППР-сенсора складається з тонкої пластинки з оптичного скла, на яку нанесений адгезивний шар хрому товщиною 5 нм та чутливий шар золота товщиною 50 нм [3]. Наношар золота наноситься шляхом вакуумного нанесення. При цьому десять скляних пластинок розміщуються на столику установки ВУП-5М, золото розпилюється з мішені конусом. Через це товщина плівки змінюється в межах 1-2 нм для різних зразків навіть з однієї партії. Така різниця в товщині чутливого шару спричиняє зсув мінімуму кривої поверхневого плазмонного резонансу. Чутливий шар золота нестійкий і деградує при довготривалих дослідженнях рідин або суспензій, що призводить до необхідності заміни сенсора в процесі дослідження і виникнення додаткових похибок, обумовлених різною товщиною чутливого шару. Суттєво кращий результат збільшення чутливості в 1,5 рази та

© К.М. Божко, Н.В. Качур, В.П. Маслов, 2025

зменшення похибки в десятки разів досягається нанесенням додаткового захисного золь-гель шару оксиду цинку за рахунок рекордного зменшення ($\epsilon=0,005\%$) внутрішніх напружень в шарі золота, зменшення шорсткості поверхневого шару та підвищення стійкості до зносу навіть в умовах сухого тертя бавовняною серветкою [4,5].

За обмеженою кількістю виготовлених зразків із захисним шаром та проведених експериментальних вимірювань можна оцінити такі сенсори на основі нечіткого моделювання. Нечітке моделювання – це підхід до моделювання, який використовує теорію нечітких множин, щоб упоратися з невизначеністю та нечіткістю інформації, коли класичні логічні методи виявляються недостатніми [6]. Метою роботи була оцінка якості удосконаленого сенсора на основі явища поверхневого плазмонного резонансу із захисним нанощаром оксиду цинку за методикою нечіткої логіки.

Нечітке моделювання в умовах невеликої статистичної вибірки дозволяє створювати штучні нечіткі нейронні мережі (ANFIS), в яких можливо прогнозувати параметри створюваних наноматеріалів [7].

Нечітке моделювання дозволяє отримувати комплексну експертну бальну оцінку об'єкта дослідження при наявності кількох вхідних факторів із різними величинами вимірювання. При цьому вихідну оцінку зазвичай отримують в умовах малої вибірки, що не дозволяє безпосередньо застосувати методи математичної статистики.

Нечіткі моделі застосовують при порівняльному аналізі наноматеріалів, які отримують за різними технологічними умовами. В роботі [8] отримано рейтингові оцінки для магнітних наноматеріалів в межах нечіткої моделі із п'ятьма вхідними параметрами. Ці наноматеріали були отримані з метою визначення оптимального технологічного ланцюжка для виробництва.

В роботі [9] наноматеріали оцінюють нечітким моделюванням за фізичними параметрами оптичних, хімічних, механічних, електричних, магнітних властивостей.

Нечітка модель надає порядковий номер у рейтингу, що достатньо для створення порівняльного ряду, проте не дозволяє визначити конкретну величину, яка відрізняє оцінку одного матеріалу від іншого.

2.МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ППР-СЕНСОРА

Розглянемо нечітку модель якості наноплівки оксиду цинку для сенсора на основі поверхневого плазмонного резонансу (ППР).

При створенні нечіткої моделі наноплівки ZnO визначаємо три вхідні нечіткі функції:

- Ftr (Transparency Factor) – коефіцієнт прозорості;
- Limsr (Level of internal mechanical stresses reduction) – рівень розвантаження внутрішніх механічних напружень;
- Lst (Level of Stability) – рівень стійкості сенсора.

Для коефіцієнта прозорості Ftr діапазон значень призначаємо від 0,7 (це типова величина для коефіцієнта прозорості мікроплівок оксиду цинку, взято з довідника) до 1.

Рівень розвантаження внутрішніх механічних напружень Limsr показує, в скільки десятків або сотень раз зменшується величина напружень. Тому тут, виходячи з масштабу змінної, доцільно використати логарифмічну шкалу в діапазоні від 0 децибел до 30 децибел (зменшення напружень в 1000 раз).

Для третьої нечіткої вхідної змінної – рівня стійкості ППР-сенсора Lst – теж доцільно застосувати логарифмічну шкалу в діапазоні від 0 децибел (однократне використання сенсора) до 15 децибел (30-кратне використання).

Кожна із вхідних функцій має по три нечітких функції належності (Membership Functions) із такими назвами (лінгвістичними термами):

- sufficient («достатньо»);

- good («добре»);
- best («найкраще»).

Нечіткі функції належності поділяють діапазон кожної із вхідних функцій на три рівні частини.

При створенні нечіткої моделі використано алгоритм Мамдані [10]. Для вхідних функцій належності застосовано Гаусову форму статистичного розподілу, а для вихідних – трикутну форму. Кількість правил нечіткого виведення (база нечітких знань) дорівнює 27.

Оцінка ефективності наноплівки має діапазон від 0 балів до 100 балів. Лінгвістичні терми виходу такі:

- low («низький»);
- average («середній»);
- high («високий»).

Вихід має назву SensQI (Sensors Quality Index) – «Коефіцієнт якості сенсора». Чим вищим є значення SensQI, тим кращим є ППП-сенсор із нанесеною додатковою нано-плівкою оксиду цинку.

Нечітку модель об'єкта оцінювання розробили в пакеті MATLAB 2016 (в модулі конструктора нечітких моделей – FuzzyLogicToolBox).

Проект отримав назву “SensorQuality-1”. Структуру моделі наведено у першому вікні редактора нечіткої логіки (рис.1).

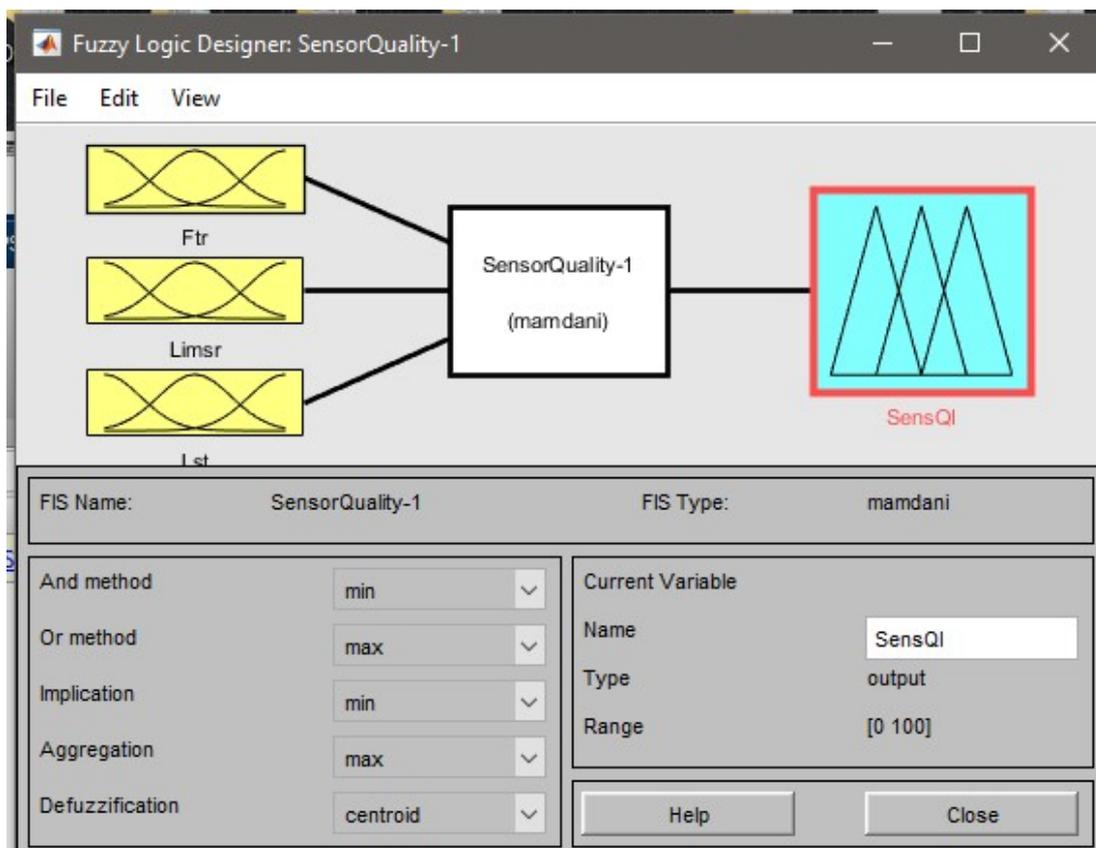


Рис.1. Структура нечіткої моделі якості наносенсора.

На рис.2 наведено редагування нечітких функцій належності першого входу – “Ftr”.

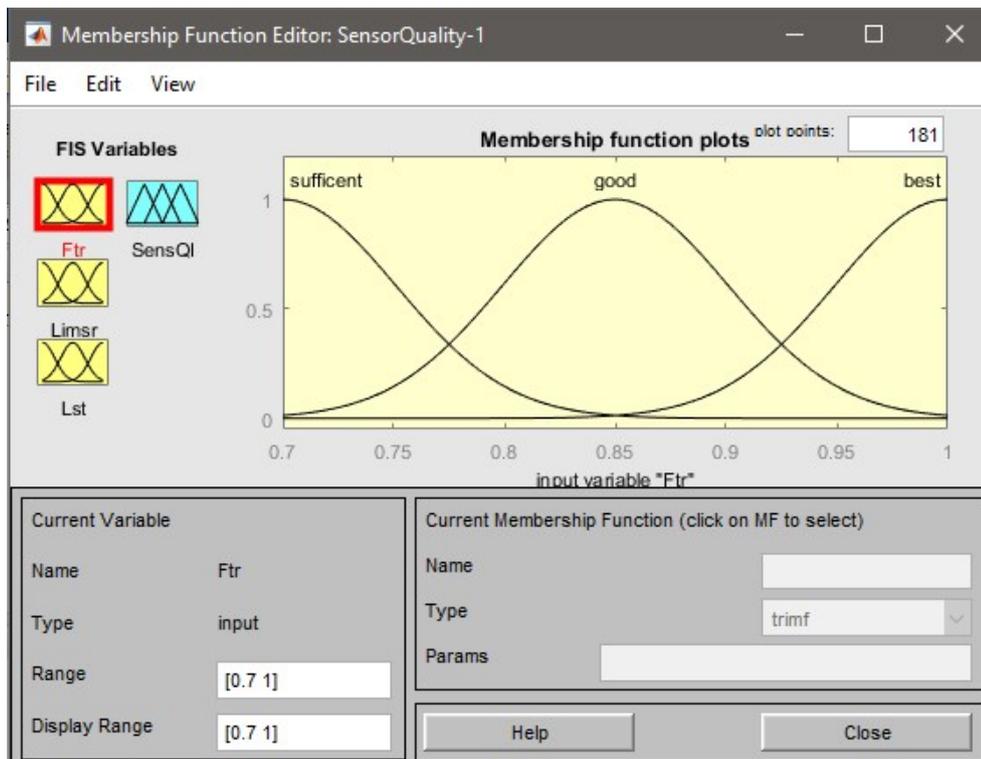


Рис.2. Вхідна функція "Ftr" нечіткої моделі "SensorQuality-1".

Вихідні функції належності показано на рис.3.

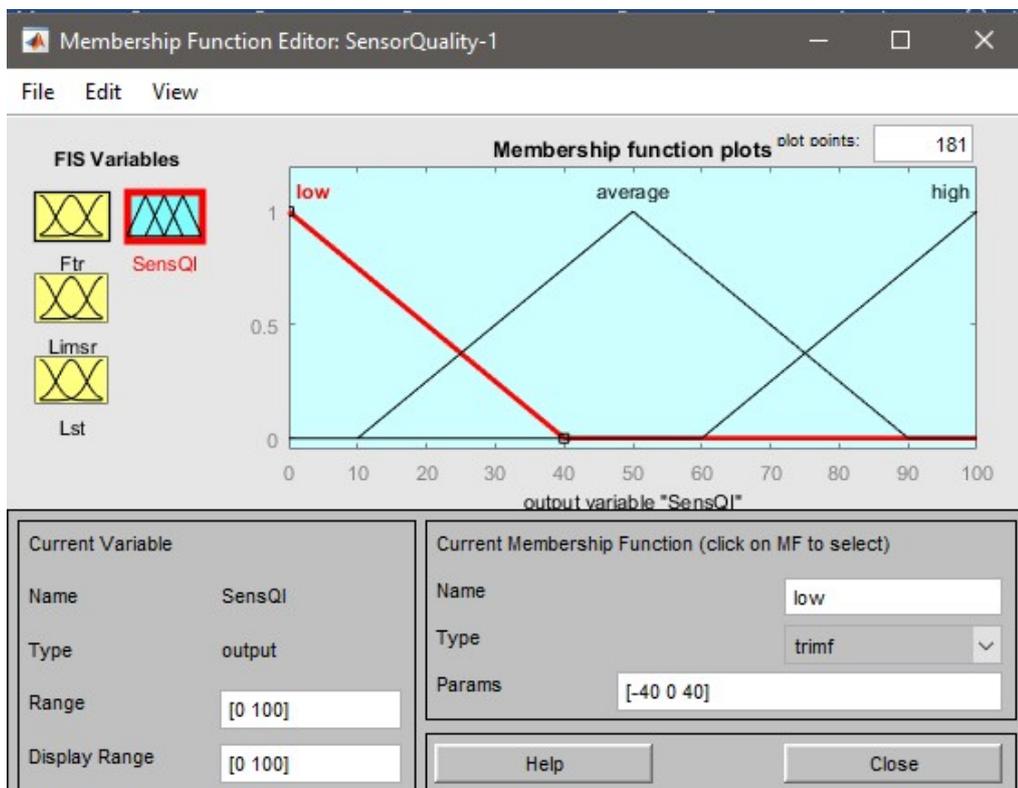


Рис. 3. Вихідні функції належності.

На рис.4 наведено правила нечіткого виведення (бази нечітких знань). Правила нечіткого виведення є симетричними відносно усіх трьох входів і побудовані в базисі “AND”.

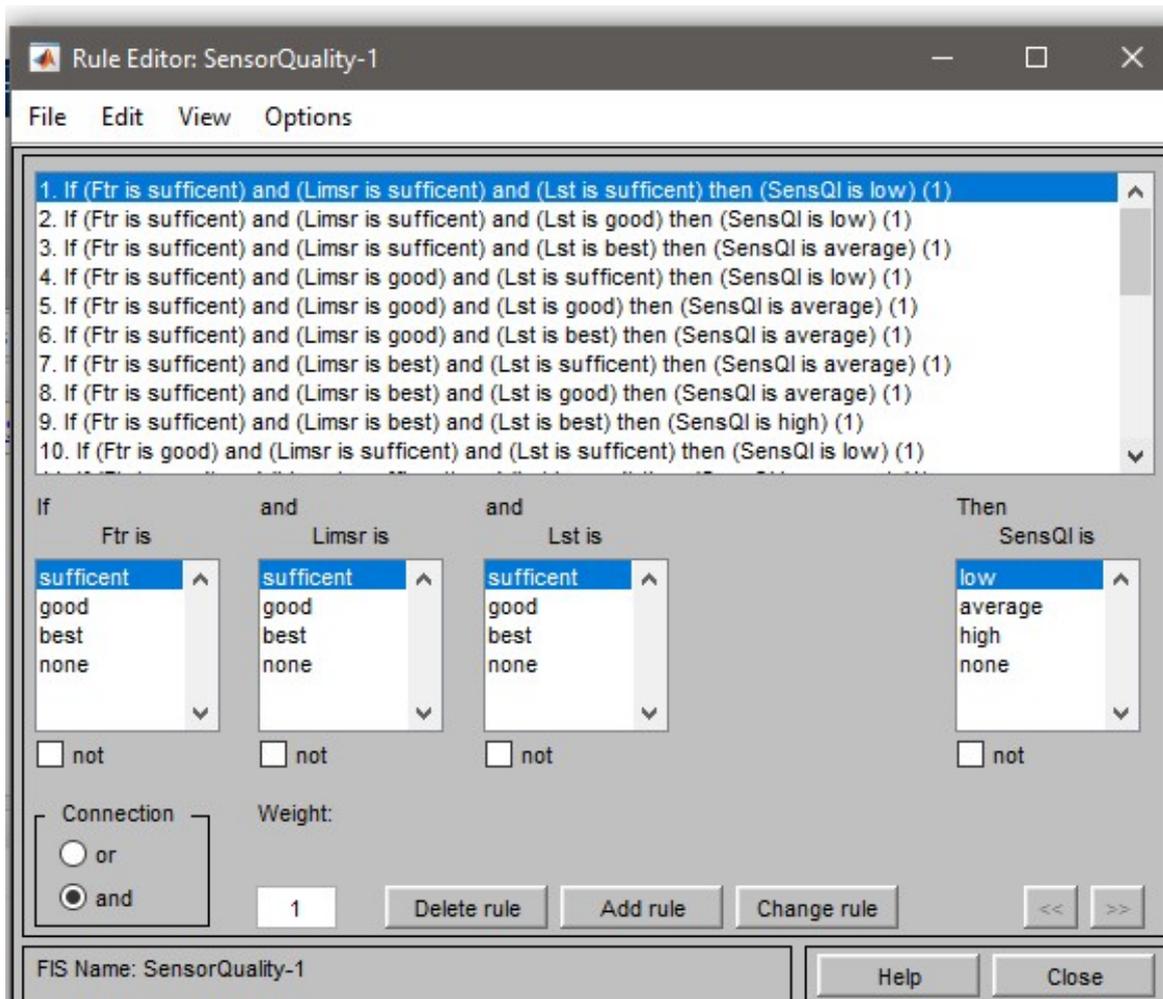


Рис.4. Правила нечіткого виведення проекту “SensorQuality-1”.

Результат моделювання виводять в двох формах:

- у формі перерізу вихідної функції (отримують поверхню рішень);
- у формі числового оцінювання в балах, при цьому входні параметри моделі задають в таблиці або за допомогою движків.

На рис.5 наведено поверхню рішень в координатах Ftr, Limsr. Змінна Lst має при цьому середнє значення для діапазону [0 ... 15] – 7,5 дБ.

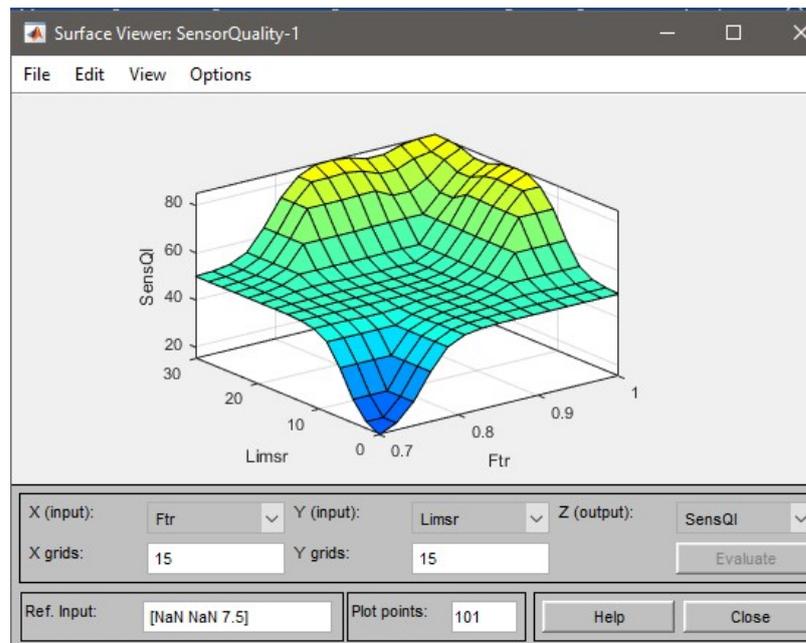


Рис.5.Поверхня рішень в координатах Ftr, Limsr.

Поверхня рішень наближена до такої форми, яка є всюди опуклою (рис.5), що свідчить про відсутність грубих помилок у правилах нечіткого виведення.

Також було оцінено мінімальне (рис.6) та максимальне (рис.7) значення індексу якості сенсора.



Рис.6. Мінімальна оцінка якості сенсора:14,6 балів.

Мінімальне значення індексу якості сенсора відповідає такій комбінації значень вхідних параметрів:

$$F_{tr} = 0,7;$$

$$L_{imsr} = 0;$$

$$L_{st} = 0;$$

$$\text{SensQI}(0,7;0;0) = 14,6 \text{ балів.}$$

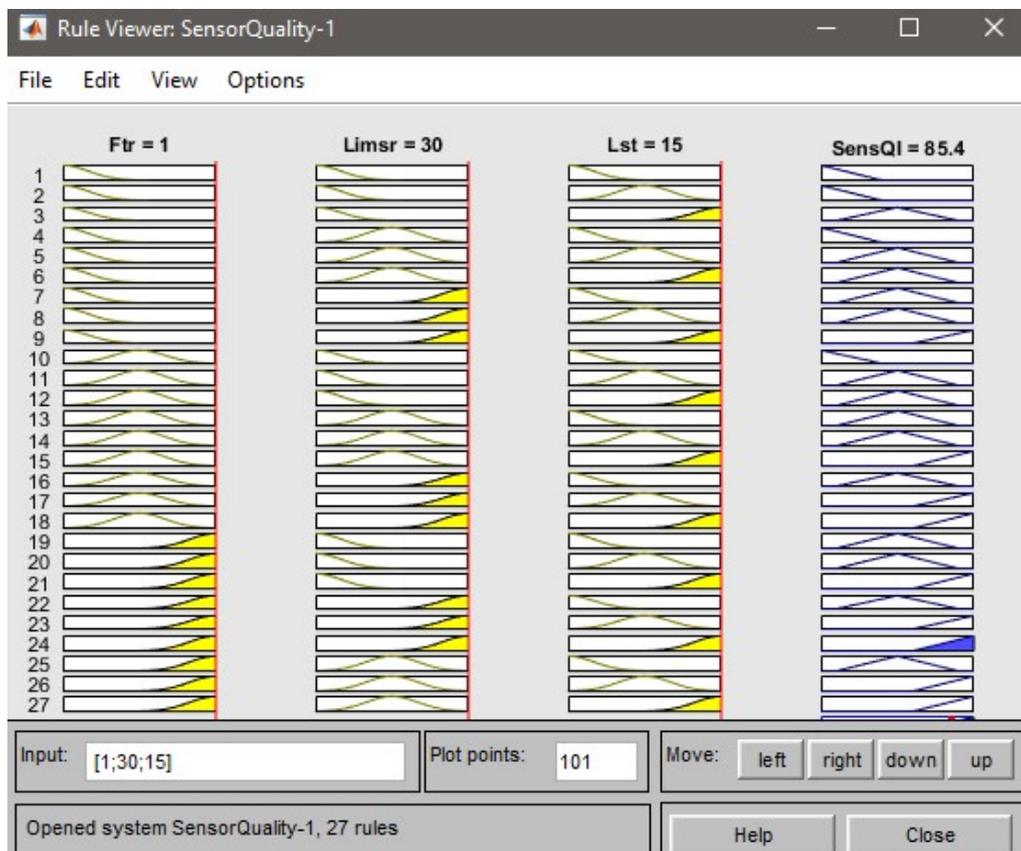


Рис.7. Максимальна оцінка якості сенсора:85,4 балів.

Максимальне значення індексу якості сенсора відповідає такій комбінації значень вхідних параметрів:

$$F_{tr} = 1;$$

$$L_{imsr} = 30;$$

$$L_{st} = 15;$$

$$\text{SensQI}(1;30;15) = 85,4 \text{ балів.}$$

Таким чином, при стобальному діапазоні вихідної шкали нечіткої моделі оцінювання якості сенсора: $\text{SensQI} \in [0 \dots 100]$, всі оцінки знаходяться в межах меншого діапазону $[14,6 \dots 85,4]$. Діапазон оцінювання є симетричним відносно своєї середини в 50 балів, а для «ідеального» сенсора – 85,4 бали.

Вхідні параметри моделі встановлюються у свої серединні значення. При цьому бальна оцінка набуває також свого медіанного значення – 50 балів за стобальною шкалою.

3.РЕЗУЛЬТАТИ ОЦІНЮВАННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Для сенсора ППР із додатковою наноплівкою ZnO були визначені такі параметри:

- $F_{tr} = 0,85;$

- $Limsr = 20$;
- $Lst = 13$.

За результатами нечіткого моделювання було визначено коефіцієнт якості сенсора із наноплівкою ZnO у 74,9 балів за стобальною шкалою (рис. 8).

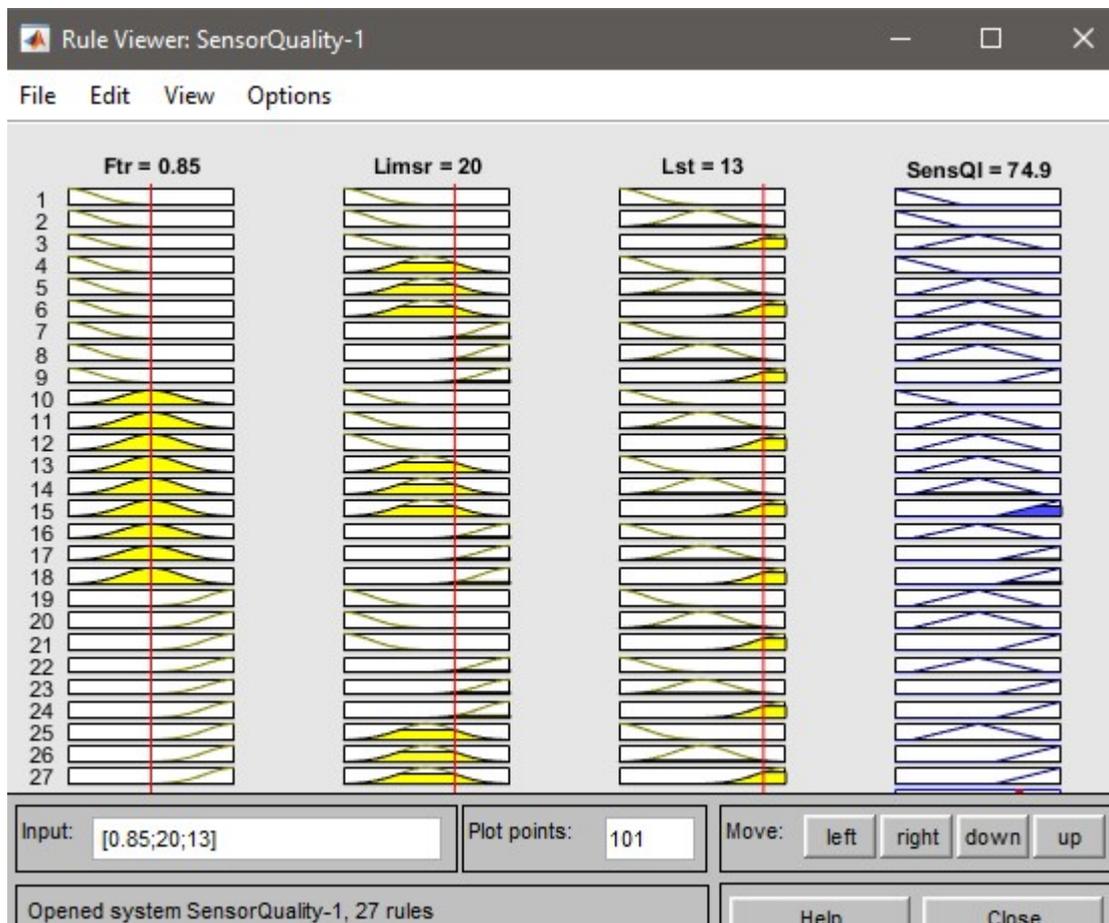


Рис.8. Коефіцієнт якості сенсора ППР із наноплівкою оксиду цинку (останній стовпчик) дорівнює 74,9.

Оцінимо в рамках нечіткого моделювання наносенсор без захисної плівки оксиду цинку (тільки шар золота). Для такого сенсора приймаємо такі значення вхідних параметрів:

- $Ftr = 1$;
- $Limsr = 0$;
- $Lst = 0$.

Визначена оцінка якості наносенсора дорівнює 50 балам, що збігається із середньою оцінкою якості.

Таким чином, нанесення захисного золь-гель шару оксиду цинку товщиною 5 нм призводить до можливості отримати якісно кращий сенсор ППР. Нечітке моделювання дозволило оцінити покращення сукупності експлуатаційних параметрів сенсора у додаткові 24,9 балів відносно контрольного зразка за стобальною шкалою оцінювання, а саме: коефіцієнт якості сенсора підвищено з 50 для традиційного сенсора до 74,9 балів для удосконаленого захисним наночаром оксиду цинку при можливому максимальному значенні 85,4 бали для «ідеального» сенсора.

4. ВИСНОВКИ

Запропонована нечітка модель для оцінювання якості сенсорів поверхневого плазмонного резонансу дозволяє не тільки встановлювати рейтингові місця для різних зразків сенсорів, але і отримати абсолютні оцінки їхньої якості за стобальною шкалою.

Використана золь-гель технологія дозволила підійти до вирішення нагальної проблеми з подовження терміну експлуатації сенсорів поверхневого плазмонного резонансу і отримати сенсор із покращеними характеристиками чутливості та багатократним збільшенням терміну служби.

Нечітке моделювання дозволило оцінити покращення сукупності експлуатаційних параметрів сенсора у додаткові 24,9 балів відносно контрольного зразка за стобальною шкалою оцінювання, а саме: коефіцієнт якості сенсора підвищено з 50 для традиційного сенсора до 74,9 балів для удосконаленого захисним наношаром оксиду цинку.

K.M. Bozhko, N.V. Kachur, V.V. Maslov

SENSOR QUALITY ASSESSMENT BASED ON THE PHENOMENON OF SURFACE PLASMON RESONANCE WITH A PROTECTIVE ZINC OXIDE NANOLAYER USING THE FUZZY LOGIC METHOD

The phenomenon of surface plasmon resonance is widely used to study biological, chemical and physical processes that occur at the metal-dielectric interface. It is based on the resonant oscillations of electrons when a surface plasmon is excited at a resonant frequency by an external electromagnetic wave. The sensitive element of the SPR sensor consists of a thin plate of optical glass on which an adhesive layer of chromium 5 nm thick and a sensitive layer of gold 50 nm thick are applied. The gold nanolayer is applied by vacuum sputtering. In this case, ten glass plates are placed on the table of the VUP-5M installation, and gold is sprayed from the target with a cone. Because of this, the thickness of the gold film varies within 1-2 nm for different sensors even from the same batch. Such a difference in the thickness of the sensitive layer causes a shift in the minimum of the surface plasmon resonance curve. The sensitive gold layer is unstable and degrades during long-term studies of liquids or suspensions, which leads to the need to replace the sensor during the study and the occurrence of additional errors due to the different thickness of the sensitive layer. A significantly better result in increasing the sensitivity by 1.5 times and reducing the error by tens of times is achieved by applying an additional protective sol-gel layer of zinc oxide due to a record reduction ($\varepsilon=0.005\%$) of internal stresses in the gold layer and reducing the roughness of the surface layer. Based on a limited number of manufactured samples with a protective layer and experimental measurements, such sensors can be evaluated based on fuzzy modeling. The article evaluated the effectiveness of an improved sensor based on the phenomenon of surface plasmon resonance with a protective zinc oxide nanolayer using the fuzzy logic method.

The use of a protective sol-gel zinc oxide nanofilm with a thickness of 5 nm leads to the possibility of obtaining a qualitatively better SPR sensor. Fuzzy logic and fuzzy modeling are one of the most common methods for determining errors and types of errors in various systems. Such a scheme is quite logical and provides a convenient method of matching input with output using linguistic rules formed on the basis of human understanding (expert data), and not only mathematical models. Fuzzy logic can combine data from various diagnostic tests and practical knowledge of experts in conducting diagnostics. Fuzzy modeling made it possible to estimate the improvement of the set of operational parameters of the sensor by an additional 24.9 points relative to the control sample on a hundred-point evaluation scale, namely the quality factor of the sensor increased from 50 for a traditional sensor to 74.9 points for a zinc oxide nanolayer improved with a possible maximum value of 85.4 points for an "ideal" sensor.

Keywords: surface plasmon resonance, zinc oxide, fuzzy logic, sol-gel technology.

1. Raether H. Surface plasmons on smooth surfaces. In: Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings. *Springer Tracts in Modern Physics*. Springer, Berlin, Heidelberg. 1988. 111. <https://doi.org/10.1007/BFb0048319>.

2. Maier S. A. Plasmonics: Fundamentals and Applications. *Springer New York*, NY. 2010. 296 p. <https://doi.org/10.1007/0-387-37825-1>.

3. Homola J. Surface Plasmon Resonance Based Sensors. *Springer-Verlag Berlin- Heidelberg*. 2006. 251 p. <https://doi.org/10.1007/b100321>.
4. Lytvyn P., Gudimenko O., Maslov V., Korchovyi A., Kachur N. Influence of amorphous zinc oxide on structural changes in a gold nanolayer after annealing. *Thin Solid Films*. 2024. **806**. 140518. DOI:10.1016/j.tsf.2024.140518.
5. Fedorenko A., Kachur N., Sulima O., Maslov V. Protective properties of ZnO nanofilm against wear and mechanical damage of sensitive SPR sensor element. *Functional Materials*. 2024. **31**, №2. P.199-204.
6. Dubious D., Prade H. Fundamentals of fuzzy sets. *Springer New York, NY*. 2012. 647 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4429-6>.
7. Mantalas E.-M., Sagias V.D., Zacharia P., Stergiou C. I. Neuro-Fuzzy Model Evaluation for Enhanced Prediction of Mechanical Properties in AM Specimens, *Applied Sciences*. 2025. **15**, №7.
8. Javanbakht T. Analysis of Nanoparticles Characteristics with TOPSIS for Their Manufacture Optimization. *Journal of Engineering Sciences*. 2022. **9**, Issue 2. P.1-8. DOI: 10.21272/jes.2022.9(2).c1.
9. Nivetha M., Seyyed A. E. Application of Extended Fuzzy ISOCOV Methodology in Nanomaterial Selection Based on Performance Measures. *Journal of Operational and Strategic Analytics*. 2023. **1**, №2. P. 55-61. <https://doi.org/10.56578/josa010202>.
10. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for the control of a simple dynamic plant. *In Proc IEEE*. 1974. P.121-159.

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
кафедра інформаційно-вимірювальних технологій
приладобудівного факультету,
Берестейський просп.,37, 03056 Київ, Україна

Отримано: 14.05.2025

²Інститут фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,
41, просп. Науки,
03028 Київ, Україна
E-mail: natalykachur@gmail.com