

І. Я. Яремчук, Г. А. Петровська, В. М. Фітьо, Я. В. Бобицький
Національний університет “Львівська політехніка”

ДЕТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕЛЕМЕНТА ПРИЗМОВОГО СЕНСОРА, ЩО ПРАЦЮЄ НА ЯВИЩІ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСУ

© Яремчук І. Я., Петровська Г. А., Фітьо В. М., Бобицький Я. В., 2017

Виконано числовий аналіз оптичних характеристик елемента призмовеого сенсора, що працює на явищі поверхневого плазмонного резонансу, залежно від його геометричних параметрів, джерела зовнішнього опромінення та показника заломлення навколишнього середовища. Отримано оптимальні геометричні параметри сенсорного елемента для досягнення максимальної чутливості сенсора. Виготовлено та досліджено макет сенсорного елемента. Між експериментальними та теоретичними результатами добра кореляція.

Ключові слова: призмовий сенсор, поверхневий плазмонний резонанс, коефіцієнт відбивання, кут падіння, чутливість.

I. Ya. Yaremchuk, H. A. Petrovska, V. M. Fitio, Ya. V. Bobitski,
Lviv Polytechnic National University

DETAIL ANALYSIS OF THE SURFACE PLASMON RESONANCE PRISM BASED SENSORS ELEMENT

© Yaremchuk I. Ya., Petrovska H. A., Fitio V. M., Bobitski Ya. V., 2017

The theoretical research and experimental verification of the surface plasmon resonance prism based sensors element have been carried out. This research includes the simulation of optical characteristics, optimization of geometric parameters and the production and research of an experimental low cost prototype with simple construction. The influence of the thickness change of the silver and chromium layers on the position of the reflectance minimum, which corresponds to the surface plasmon resonance, has been investigated. The change in the thickness of the silver layer affects on the position of the surface plasmon resonance, the value of the reflectance in the minimum and the curve shape. The change in the thickness of the chromium layer practically does not affect on the position of the surface plasmon resonance. However, it should be noted that the thickness of the chromium film affects on the value of the reflectance minimum and the curve shape. It is founded that the smaller the wavelength of the radiation source will correspond to the greater the angle of the surface plasmon resonance. The dependences of the reflectance on the change in the refractive index of the studied gas and water media with different refractive indices were simulated. The optimal parameters of the sensor element with enhanced sensitivity have been determined. A prism based sensors element was produced. The experimental scheme of investigation optical characteristics of the prism based sensors element was developed. There is a good correlation between theoretical and experimental results.

Key words: prism sensor, surface plasmon resonance, reflectance, angle of incidence, sensetivity.

Вступ

Поверхневий плазмонний резонанс широко використовується у різних сенсорних застосуваннях, оскільки забезпечує швидку, неруйнівну здатність виявляти різноманітні біохімічні реакції в режимі реального часу. Поверхнева плазмонна хвиля – це коливання вільного заряду, яке відбувається на поверхні між діелектричним та металевим середовищами і збуджується зовнішнім електромагнітним джерелом випромінювання. Коли хвильовий вектор поверхневої плазмонної хвилі збігається з хвильовим вектором випромінювання, що падає, відбувається так зване явище поверхневого плазмонного резонансу [1]. Встановлено, що ця умова резонансу дуже легко порушується навіть дуже невеликими змінами в умовах інтерфейсу, спричиненими зміною показника заломлення навколишнього середовища [2]. Отже, якщо довжина хвилі фіксується, то явище поверхневого плазмонного резонансу дає змогу не тільки точно виміряти зміни показника заломлення або товщину середовища, що прилягає до металевої плівки, але й виявити зміни адсорбційного шару на поверхні металу. Вже розроблено велику кількість різноманітних сенсорів, що працюють на явищі поверхневого плазмонного резонансу, для прикладу, сенсори на основі ґраток [3, 4], призм [5, 6], різноманітних наноструктурованих матеріалів [7, 8] тощо. Однак найбільшого поширення набули призмові сенсори, що працюють на явищі повного внутрішнього відбивання. Ці пристрої є потужними інструментами для дослідження у реальному часі біомолекулярних взаємодій, водних та газових середовищ.

Основна мета нашої роботи – теоретичне дослідження та експериментальна верифікація призмового сенсора, який працює на явищі поверхневого плазмонного резонансу, що передбачає моделювання оптичних характеристик, оптимізацію геометричних параметрів та виготовлення і дослідження експериментального макета, який матиме хороші характеристики за нескладної конструкції та низької вартості. Отже, в роботі досліджено призмовий сенсор, що складається зі скляної призми, шару срібла та тонкого шару хрому між ними для кращої адгезії. Аналіз такої структури здійснено матричним методом [9].

Числовий аналіз оптичних характеристик призмового сенсора, що працює на явищі поверхневого плазмонного резонансу

Щоб дослідити поведінку запропонованого сенсора, спершу проводили теоретичні дослідження призмової структури з такими параметрами: показник заломлення матеріалу призми $n_0 = 1,511$, довжина хвилі випромінювання лазера $\lambda = 0,633$ мкм, плівка хрому завтовшки 5 нм з комплексним показником заломлення на цій довжині хвилі $n_1 = 3,1399 - i3,3150$, плівка срібла завтовшки 50 нм з комплексним показником заломлення на цій довжині хвилі $n_2 = 0,056253 - i4,2760$ [10], показник заломлення досліджуваного середовища $n_s = 1,000290$ (повітря). Розраховану залежність коефіцієнта відбивання від кута падіння пучка для довжини хвилі 0,633 мкм подано на рис. 1. За таких параметрів мінімум коефіцієнта відбивання для хвиль ТМ-поляризації спостерігався, якщо кут $q_{\min} = 43,03^\circ$, $R_{\min} = 0.00704$.

На наступному етапі роботи досліджено вплив зміни товщини шарів срібла і хрому на положення кута мінімуму коефіцієнта відбивання, що відповідає поверхневому плазмонному резонансу.

На рис. 2, а зображено залежності коефіцієнта відбивання від кута падіння пучка на призмовий сенсор для різних товщин плівки срібла. З рис. 2 видно, що зміна товщини шару срібла впливає на положення поверхневого плазмонного резонансу, на значення коефіцієнта відбивання в мінімумі та на форму кривої. Зі зменшенням товщини плівки срібла положення значення мінімуму відбивання зсувається у бік збільшення. Розрахунки показали, що значення коефіцієнта відбивання найменше для плівки срібла завтовшки 50 нм. На рис. 2, б зображено залежності коефіцієнта відбивання від кута падіння пучка на призмовий сенсор для різних товщин плівки хрому. Зміна товщини шару хрому практично не впливає на положення кута поверхневого плазмонного резонансу, що можна пояснити невеликою товщиною плівки хрому. Однак варто зазначити, що товщина плівки хрому впливає на значення коефіцієнта відбивання у мінімумі та форму кривої.

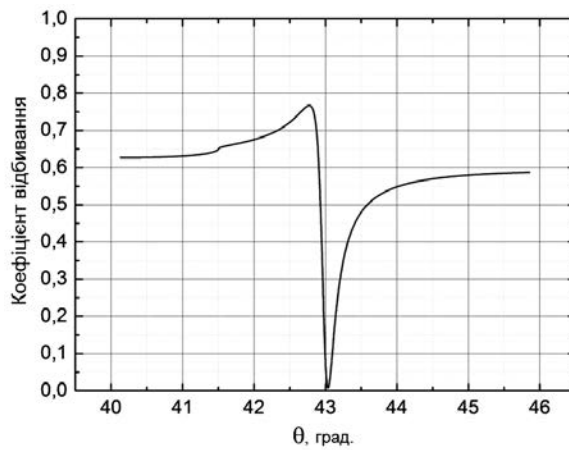


Рис. 1. Залежність коефіцієнта відбивання від кута падіння пучка на металеву плівку для довжини хвилі 0,633 мкм

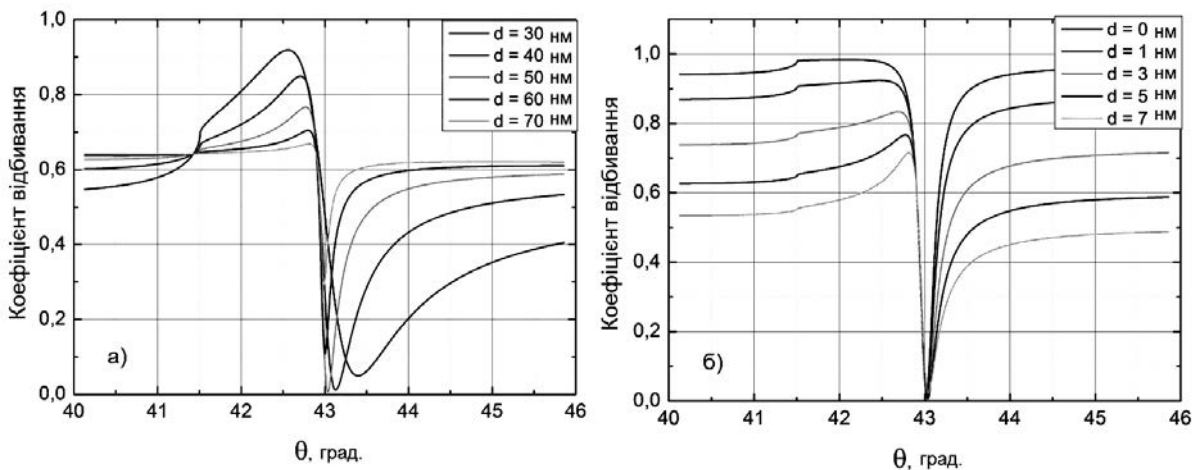


Рис. 2. Залежності коефіцієнта відбивання від кута падіння лазерного пучка ($\lambda = 0,633$ мкм) на поверхню призмового сурсора за різних товщин шару срібла (а) та хрому (б)

Джерело лазерного випромінювання також впливає на положення поверхневого плазмонного резонансу, як показано на рис. 3. Зі зменшенням довжини хвилі випромінювання положення мінімуму коефіцієнта відбивання зміщується вправо, тобто що меншою буде довжина хвилі випромінювання, то за більшого кута спостерігається мінімум коефіцієнта відбивання.

Основним параметром сенсора є його чутливість, тому наступний етап досліджень – розрахунок залежності коефіцієнта відбивання від зміни показника заломлення досліджуваного середовища (n_s). Виконано розрахунки для двох типів середовищ з різними показниками заломлення: повітряного та водного. Дослідження здійснювали для довжини хвилі випромінювання 0,633 мкм. Залежність положення мінімуму коефіцієнта відбивання від кута падіння на призмовий сенсор для чистого повітря ($n_s = 1,000290$) та повітря з метаном ($n_s = 1,000441$) подано на рис. 4, а, з якого видно, що за невеликих змін показника заломлення досліджуваного середовища $\Delta n_s = 0,000151$ положення кута поверхневого плазмонного резонансу $\Delta \theta$ змістилося на $0,01147^\circ$. Результати моделювання зміщення положення мінімального значення коефіцієнта відбивання для випадку, коли досліджуваним середовищем є чиста вода $n_{s1} = 1,332986$ та вода, в яку додано спирт ($n_{s2} = 1,34$), наведено на рис. 4, б.

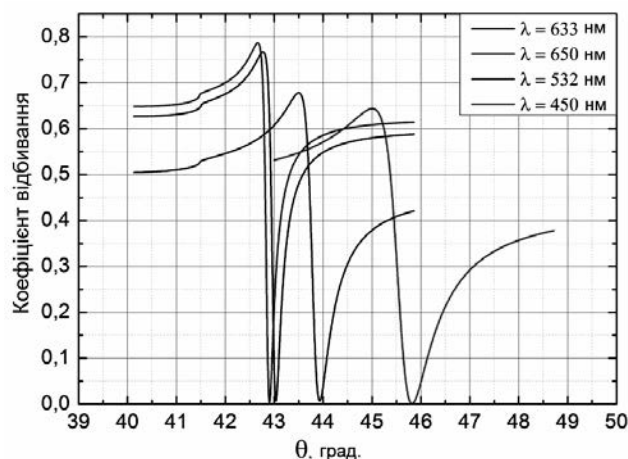


Рис. 3. Залежність коефіцієнта відбивання від кута падіння лазерного пучка на металеву плівку для різних значень довжин хвиль тестувального випромінювання

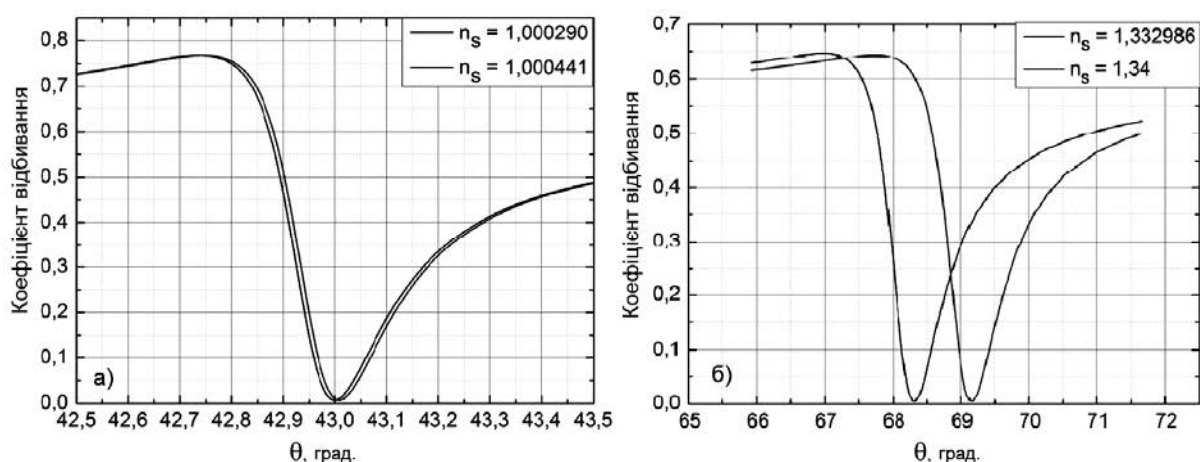


Рис. 4. Зміщення кута поверхневого плазмонного резонансу призмовеого сенсора у разі зміни показника заломлення повітряного (а) та водного (б) середовищ

Після зміни показника заломлення досліджуваного водного середовища на 0,007 кут поверхневого плазмонного резонансу $\Delta\theta$ змістився на 0,84.

Експериментальні результати

Експериментальний макет призмовеого сенсора виготовлено на основі скляної призми (матеріал БК7) з покриттям, яке складається з шару хрому Cr завтовшки близько 5 нм, шару срібла завтовшки 50 нм, які нанесені методом термічного розпилення у вакуумі. Під час термічного напилення у вакуумній камері створювали і підтримували вакуум на рівні $1 \div 5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Напилення матеріалів здійснювали за попереднього прогрівання підкладки до температури $200 \div 250$ °С. Швидкість напилення матеріалів витримували в межах 0,04–0,06 мкм/хв.

Дослідження оптичних характеристик отриманого призмовеого сенсора проводили на експериментальній установці, структурну схему та макет якої подано на рис. 5.

Дослідження проведено для двох різних джерел випромінювання з довжинами хвиль 0,633 та 0,650 мкм. Для довжини хвилі 0,633 мкм мінімум коефіцієнта відбивання $R_{\min} = 0,41613$ отримано за кута падіння $q_{\min} = 43,58518^\circ$, для довжини хвилі 0,650 мкм мінімум коефіцієнта відбивання $R_{\min} = 0,43073$ – за кута падіння $q_{\min} = 43,3276^\circ$. Експериментальні результати добре корелюють з теоретичними, як показано на рис. 6.

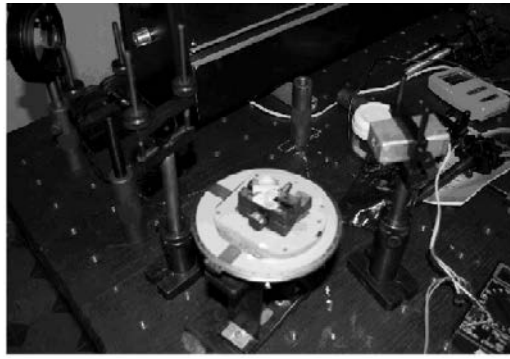
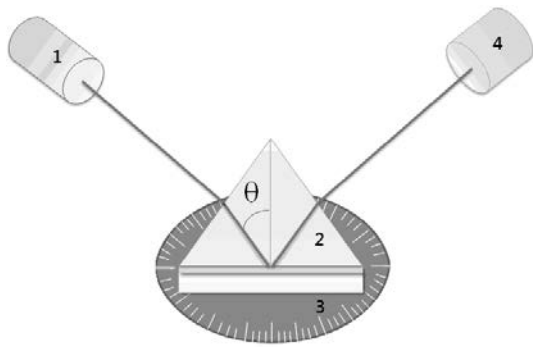


Рис. 5. Структурна схема та макет експериментальної установки для досліджень параметрів сенсора зміни показника заломлення, що працює на явищі плазмонного резонансу:

1 – лазер; 2 – скляна призма; 3 – кутомірний столик; 4 – фотоприймач

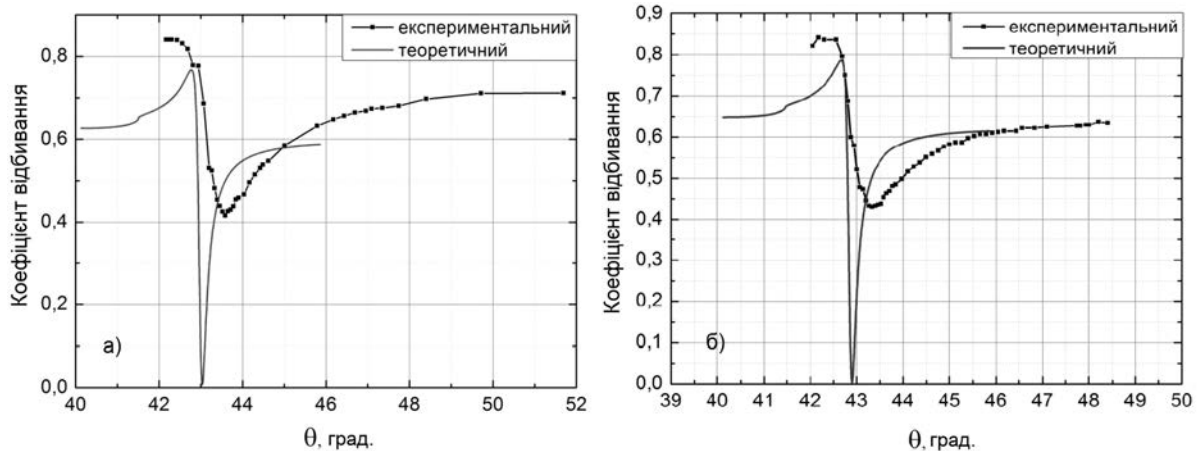


Рис. 6. Експериментальні та теоретичні результати дослідження залежності коефіцієнта відбивання від кута падіння променя на призмовий сенсор для довжин хвилі 0,633 мкм (а) та 0,650 мкм (б)

Порівнявши результати досліджень, можна зробити висновок про незначний незбіг положення кута поверхневого плазмонного резонансу. Для довжини хвилі 0,633 мкм він становить $\Delta q = 0,55^\circ$, а для довжини хвилі 0,650 мкм $\Delta q = 0,45^\circ$. Таке відхилення можна пояснити неточностями товщин формованих шарів під час виготовлення, або тим, що реальні значення комплексних показників металів відрізнялись від використаних у розрахунках. Варто зауважити, що незбіг за глибиною коефіцієнта відбивання в мінімумі може бути спричинений дифузєю і розсіянням у шарах металів, напилених на поверхню призми, оскільки для теоретичних розрахунків ці явища не враховували.

Висновки

Теоретично та експериментально досліджено характеристики сенсора зміни показника заломлення, що працює на явищі поверхневого плазмонного резонансу. Досліджено вплив різних параметрів на положення кута поверхневого плазмонного резонансу та на значення коефіцієнта відбивання у мінімумі. Досліджено чутливість сенсора та параметри, які на неї впливають. Підібрано оптимальні параметри сенсорного елемента, необхідні для підвищення чутливості вимірювання. Виготовлено призмовий елемент сенсора, складено експериментальну вимірювальну схему та на практиці досліджено роботу сенсора.

Запропонований сенсор може бути дуже корисним для дослідження різних хімічних та біологічних середовищ.

1. Prasad P. N. *Nanophotonics*. John Wiley & Son, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004. 2. Jönsson U. *Real-time biospecific interaction analysis using surface plasmon resonance and a sensor chip technology* / U. Jönsson, L. Fägerstam, B. Ivarsson, B. Johnsson, R. Karlsson, K. Lundh, I. Rönnberg/ *Biotechniques*. – 1991. – Vol. 11. – No. 5. – P. 620–627. 3. Hu C. *Surface plasmon resonance sensor based on diffraction grating with high sensitivity and high resolution* / C. Hu / *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* – 2011. – Vol. 122. – No. 21. – P. 1881–1884. 4. Roh S. *Overview of the characteristics of micro- and nano-structured surface plasmon resonance sensors* / S. Roh, T. Chung, B. Lee / *Sensors*. – 2011. – Vol. 11. – No. 2. – P. 1565–1588. 5. Jha R. *High-performance sensor based on surface plasmon resonance with chalcogenide prism and aluminum for detection in infrared* / R. Jha, A. K. Sharma / *Optics letters*. – 2009. – Vol. 34. – No. 6. – P. 749–751. 6. Homola J. *Surface plasmon resonance sensors: review* / J. Homola, S. S. Yee, G. Gauglitz / *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 1999. – Vol. 54. – No. 1. – P. 3–15. 7. Valsecchi C. *Periodic metallic nanostructures as plasmonic chemical sensors* / C. Valsecchi, A. G. Brolo / *Langmuir*. – 2013. – Vol. 29. – No. 19. – P. 5638–5649. 8. Genç A. *Hollow metal nanostructures for enhanced plasmonics: synthesis, local plasmonic properties and applications*. / A. Genç, J. Patarroyo, J. Sancho-Parramon, N. G. Bastús, V. Puntès, J. Arbiol / *Nanophotonics*. – 2017. – Vol. 6. – No. 1. – P. 193–213. 9. Fitio V. *Optical excitation of surface plasmon polariton and waveguide modes resonances on prismatic structures* / V. Fitio, I. Yaremchuk, Y. Bobitski / *Optica Applicata*. – 2011. – Vol. 41. – No. 4. – P. 929–939. 10. Johnson P. B. *Optical constants of the noble metals* / P. B. Johnson, R-W Christy/ *Physical review B*. – 1972. – Vol. 6. – No. 12. – P. 4370.

References

1. Prasad, P. N. (2004). *Nanophotonics*. John Wiley & Son, Inc., Hoboken, New Jersey. 2. Jönsson U., Fägerstam L., Ivarsson B., Johnsson B., Karlsson R., Lundh K., Rönnberg I. (1991), *Real-time biospecific interaction analysis using surface plasmon resonance and a sensor chip technology*. *Biotechniques*, vol. 11, no 5, pp. 620–627. 3. Hu C. (2011), “*Surface plasmon resonance sensor based on diffraction grating with high sensitivity and high resolution*”, *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 122, no 21, pp. 1881–1884. 4. Roh S., Chung T., Lee B., (2011), *Overview of the characteristics of micro-and nano-structured surface plasmon resonance sensors*, *Sensors*, vol. 11, no 2, pp. 1565–1588. 5. Jha R., Sharma A. K., (2009), *High-performance sensor based on surface plasmon resonance with chalcogenide prism and aluminum for detection in infrared*, *Optics letters*, vol.34, no 6, pp. 749–751. 6. Homola J., Yee S. S., Gauglitz G., (1999), *Surface plasmon resonance sensors: review*, *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 54, no 1, pp. 3–15. 7. Valsecchi C., Brolo A. G., (2013), “*Periodic metallic nanostructures as plasmonic chemical sensors*”, *Langmuir*, vol. 29, no.19, pp. 5638–5649. 8. Genç A., Patarroyo J., Sancho-Parramon J., Bastús N. G., Puntès V., Arbiol J., (2017), *Hollow metal nanostructures for enhanced plasmonics: synthesis, local plasmonic properties and applications*, *Nanophotonic*, vol. 6, no . 1, pp. 193–213. 9. Fitio V., Yaremchuk I., Bobitski Y., (2011), *Optical excitation of surface plasmon polariton and waveguide modes resonances on prismatic structures*, *Optica Applicata*, vol. 41, no. 4, pp. 929–939. 10. Johnson P. B., Christy R-W., (1972), *Optical constants of the noble metals*, *Physical review B*, vol. 6, no 12, pp. 4370.