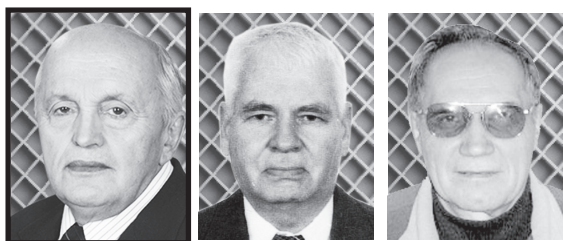




УДК 53.082:612.017.1

ПЛАЗМОННИЙ РЕЗОНАНС. ДОСЯГНЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ



І.Д. Войтович, *докт. техн. наук*,
І.О. Яворський, *канд. техн. наук*,
Б.О. Грабовський

Вступ. Резонанс у коливальних системах і процесах є досить поширеним у природі явищем. Це безпосередньо стосується і коливальних (валентних) електронів під впливом зовнішніх чинників, наприклад, електромагнітного випромінювання [1].

Валентні електрони вивільнюються з атомів твердого тіла під час формування його кристалічної структури. Вони утворюють надзвичайно рухливий «електронний газ» із концентрацією $\sim 10^{22} \div 10^{23} \text{ см}^{-3}$, який відповідає за електро- і теплопровідність. Оскільки електрони в кристалічних ґратах знаходяться між відносно малорухомими іонізованими атомами речовини, то формується загалом нейтральна електронна плазма.

Поведінка електронної плазми підкоряється квантово-механічним законам, і середовище для її збудження має бути квантово-розмірним. Таким середовищем є природні наноструктури, зокрема: різного роду неоднорідності і нанокристалічні утворення; кристаліти; кластери; квантові точки в твердому тілі; наночастинки і їхні агрегати в рідинах і колоїдних розчинах тощо. Можливо, й біоречовина належить до цієї категорії, принаймні, молекули ДНК, віруси, бактерії і живі клітини також є наноструктурами

[2; 3]. Існують і штучно створені матеріали, а саме: надтонкі ($\sim 3 \div 80 \text{ нм}$) провідні плівки; нанопорошки металів і напівпровідників (*Au, Ag, Ni, Si, C*); деякі полімери, наприклад, *поліпірол* [4].

Спільним для цих матеріалів є те, що вони можуть інтенсивно поглинати електромагнітне (оптичне, теплове, ВЧ) випромінювання і мають резонансні властивості. Такими, наприклад, є квантові точки в твердих напівпровідникових розчинах, на основі яких будуються сучасні твердотільні лазери, швидкісні транзистори, ефективні світлодіоди, сонячні елементи тощо [5]. Завдяки надзвичайно малим розмірам наноструктур електромагнітне поле проникає в них (подібно до скін-ефекту), збуджуючи в середовищі електронів інтенсивні зарядові колювання – плазмонний резонанс [1; 6].

На основі плазмонного резонансу набули успішного розвитку новітні напрями у фізиці (нанооптика), електроніці (плазмонна електроніка, надщільний запис інформації), матеріалознавстві (створення композитних матеріалів із незвичайними властивостями). Розроблені унікальні за своєю результативністю методи аналізу в біохімії, генетиці, медицині, десятки дослідницьких пристроїв

різноманітної конструкції і призначення [1; 6–9], а для деяких, наприклад біосенсорів уже існує комерційний ринок. Спостерігається потужний вплив плазмонного резонансу на трактування багатьох електронних і фізико-хімічних процесів, у тому числі і процесів каталізу.

Кількість наукових праць у галузі досліджень плазмонного резонансу невинно зростає і вже становить кілька тисяч. Успішно проводяться дослідження в Японії, Південній Кореї, Тайвані, Індії, майже в усіх країнах Європи, у США. Дослідження в Україні почалися наприкінці 80-х років в Інституті напівпровідників, із середини 90-х – в Інститутах біохімії, молекулярної біології і генетики, з 2002 р. – в Інституті кібернетики НАНУ. У результаті нашими вітчизняними науковцями були розроблені оригінальні методики біохімічних аналізів, створені новітні біосенсори серії «Bio-suplar», «Плазмонтест» тощо.

Збудження плазмонного резонансу

Явище плазмонного резонансу вперше спостерігалось у 1902 р. Р. Вудом під час вивчення дифракційних спектрів, однак тоді воно було визначене як своєрідний оптичний шум («фантом»). Пізніше було теоретично доведено, що за певних умов при електромагнітному опромінюванні плоскої межі між провідником і діелектриком генеруються приграничні коливання вільних електронів (електронні плазмони) і утворюються й розповсюджуються зарядові хвилі. Поряд з ними можуть розповсюджуватися електромагнітні хвилі й відбуватися інші процеси, отже, явище має комплексний характер і відоме як збудження поверхневих поляритонів [1; 6].

Особливістю електронних плазмонів є те, що зарядові коливання не можуть розповсюджуватися зі швидкістю світла (заряди, на відміну від фотонів, мають масу спокою), і тому утворювані ними хвилі надзвичайно короткі – нм. Область їхнього розповсюдження – мкм.

Поверхневим плазмонним хвилям властиві всі закономірності, характерні для хвильових

процесів – розсіювання, заломлення, дифракція, інтерференція тощо [1]. Крім того, при поверхневому плазмонному резонансі (ППР) майже все світлове випромінювання витрачається на збудження плазмонів. Оскільки вони локалізуються в нанорозмірному об'ємі, то в речовині при цьому може спостерігатися висока концентрація електричного поля й енергії.

Експериментальне вивчення ППР почалося з кінця 60-х років минулого століття, коли німецький дослідник Кречман запропонував досить просту й оригінальну методику [10], відому під назвою «спосіб порушеного оптичного повного внутрішнього відбивання» (рис. 1). На вільну грань зі скла з високим показником заломлення ($n \sim 1,7$) вакуумно-термічним способом наноситься нанорозмірна (товщиною $\sim 10 \div 80$ нм) провідна плівка з Au, Ag або іншого металу (сплаву) чи напівпровідника – плазмпідтримуюча плівка. Плоско-поляризоване світло падає на грань з цієї

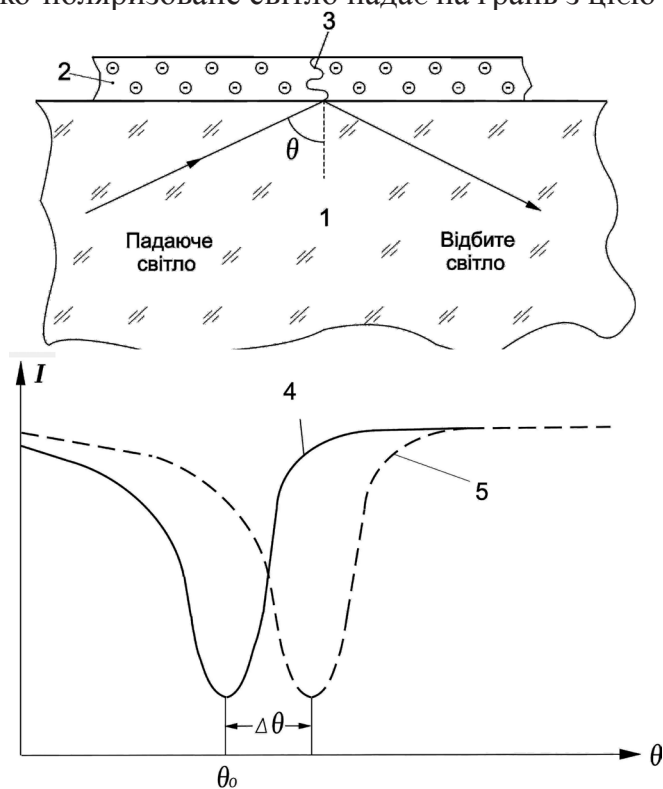


Рис. 1. Схема спостереження ППР: 1 – скло; 2 – нанорозмірна металева плівка; 3 – затухаюча хвиля; 4 – еталонна крива ППР; 5 – крива ППР при змінах у плівці

плівкою і відбивається. Зазвичай при кутах падіння $\theta \geq \arcsin \frac{1}{n}$ має місце повне внутрішнє відбивання. Зазначене явище давно відоме і на практиці широко використовується в оптичних пристроях, опто-волоконних лініях зв'язку тощо.

За умов повного внутрішнього відбивання світло при падінні на грань завдяки своїм хвильовим властивостям виходить назовні за межі скляної поверхні приблизно на довжину хвилі λ (ефект оптичного тунелювання), розповсюджується паралельно грані і потім повертається назад на скло. При цьому точки падіння і повернення світла виявляються розділеними певним ($\sim 10\lambda$) просторовим інтервалом. Світлова хвиля, розповсюджуючись на цій ділянці паралельно до плівки і затухаючи в ній по товщині, за умови $\frac{2\pi}{\lambda} n \sin \theta = \text{const}$ збуджує в металі на оптичних частотах *ППР*. Величина *const* характеризує конкретні умови резонансу, які для різних плівок можуть бути різними. У разі його пошуку можна змінювати довжину хвилі λ чи кут падіння θ , або те й друге одночасно, але так, щоб величина *const* зберігалася.

За фіксованої λ резонанс визначатиметься появою гострого провалу на залежності інтенсивності відбитого світла від кута падіння $I = f(\theta)$ – так званою кривою *ППР* (див. рис. 1). Це пов'язано з квантово-механічним перетворенням енергії світлового випромінювання в енергію коливань електронів металу, що супроводжується різким зменшенням частки світла, яке відбивається. І чим гостріша ця крива, тим точніше можна встановити її кутовий зсув $\Delta\theta$ відносно еталонної кривої, що виникає під час фізико-хімічних змін у плазмпідтримуючій плівці. Певним радіотехнічним аналогом цього явища можна вважати зсув резонансної частоти коливального контура в разі внесення в нього сторонніх предметів, але в нашому випадку це відбувається в оптичному діапазоні частот

електромагнітного випромінювання.

Окрім порушеного повного внутрішнього відбивання, існують й інші методи збудження *ППР*, наприклад, дифракційний.

Особливим і надзвичайно важливим типом плазмонного резонансу є локалізований плазмонний резонанс (*ЛПР*), який може збуджуватися в провідних нанорозмірних частинках [1]. При цьому наночастинки поведуть себе як електричні диполі – нанорезонатори. Під впливом зовнішнього випромінювання вони генерують електричні поля, напруженість яких завдяки резонансу може на порядки перевищувати напруженість збуджуючих полів.

За таких умов речовина, яка контактує з нанорезонаторами, виявляє нові фізичні властивості. До того ж і сама речовина, залежно від її фізико-хімічних характеристик, може певним чином впливати на перебіг резонансних процесів. Прикладом є зростання на 12–14 порядків комбінаційного розсіювання світла. Стало можливим спостерігати флюоресценцію однієї окремо взятої органічної молекули [1].

Локалізований плазмонний резонанс має місце в багатьох фізичних і фізико-хімічних процесах і матеріалах, зокрема у: фото- і термоелектронній емісії; фотопроекті; фотодетекторах; світловипромінюючих структурах; деяких полімерах і металополімерах; каталізі тощо [6; 11; 12].

Отже, наведений опис збудження плазмонів і їхніх фізичних властивостей свідчить про широкі можливості практичного застосування плазмонного резонансу. Цим пояснюється і викликаний ним значний науковий інтерес.

Застосування плазмонного резонансу в біосенсорці

Одним із найбільш важливих, на нашу думку, застосувань плазмонного резонансу слід вважати його використання в біохімічних дослідженнях і медицині, яке почалося в 1984 р. після публікації Лідберга [13], який запропонував вивчати закономірності процесів і змін, що виникають в плазмпідтримуючій

плівці при нанесенні на її поверхню біологічно активних об'єктів – вірусів, бактерій, клітин (рис. 2).

На поверхню металевої (*Au*) плазмпідтримуючої наноплівки 2 біохімічними методами висаджується мономолекулярний шар ліганду (рецептор) 3, молекули якого можуть вибірково з'єднуватися з органічними молекулами або часточками (аналітом) 4, наявність і концентрацію яких у досліджуваному розчині (пробі) потрібно визначити. Коли молекули аналіту приєднуються до молекул ліганду, електричне поле в металевій наноплівці змінюється, унаслідок чого резонансний мінімум на кривій *ППР* зміщується (див. рис. 1, криві 4; 5). Це зміщення тим помітніше, чим більше молекул аналіту приєднується до ліганду. Вимірюючи зміщення $\Delta\theta$, можна визначити концентрацію аналіту.

Слід зазначити, що *ППР* є чутливим до присутності в пробі навіть одиночних молекул аналіту. У високій чутливості, вибірконості й можливості налаштування на різні аналіти і полягають переваги методу.

Для пристроїв, які використовують *ППР* (перш за все біосенсорів) відкрилась широка сфера застосування, а саме можливість: швидкої індикації наявності вірусів, бактерій,

біохімічних речовин у рідинах; виявлення забруднень, хімічно шкідливих домішок у воді, харчових продуктах тощо; проведення тонких досліджень у медицині, фармацевтиці, молекулярній біології і генетиці. Так, під час здійснення аналізу крові вдається в реальному часі спостерігати динаміку взаємодії вірусів і бактерій з антитілами.

У деяких сенсорах число проб, які можна дослідити за один вимірювальний цикл, становить сотні (і навіть тисячі). Використовуються стаціонарні рецептори з великою кількістю чутливих ділянок для проб, комп'ютеризовані системи доставки реагентів до цих ділянок і оптико-електронні схеми спостереження й реєстрації плазмонного резонансу.

Незважаючи на значну кількість існуючих (у тому числі і рекламаних комерційних) *ППР*-сенсорів, відомості про які можна знайти в численних публікаціях [1; 7–9], актуальним залишається створення недорогих (~300÷500 дол. США), простих у виробництві й обслуговуванні портативних сенсорних пристроїв, придатних для накопичення й оперативного аналізу в одному вимірювальному циклі обсягу біохімічної інформації, що відповідала б десяткам досліджуваних

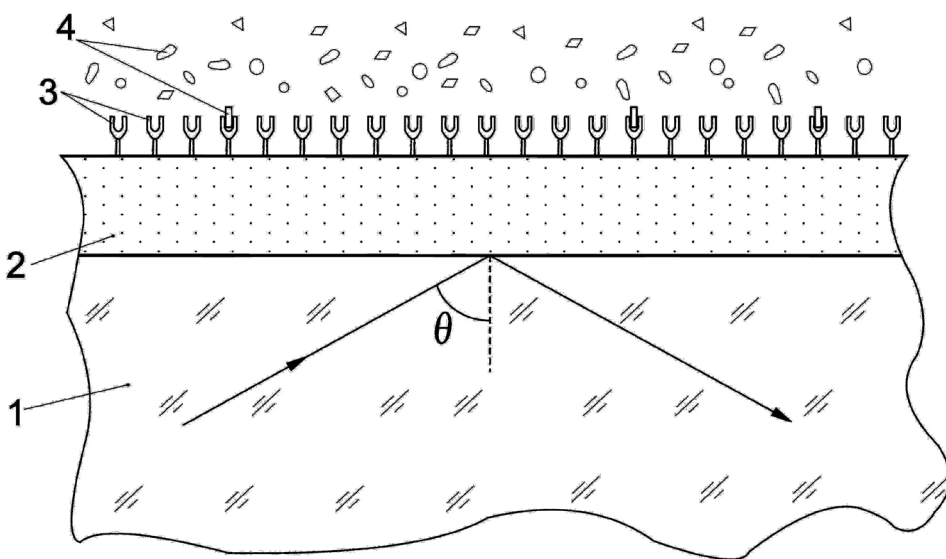


Рис. 2. Схема спостереження за наявністю аналіту:

1 – прозоре середовище; 2 – плазмпідтримуюча плівка; 3 – ліганд (рецептор); 4 – аналіт

проб, і орієнтованих на експлуатацію в польових умовах. При цьому найважливіший функціональний елемент сенсора – чутливий рецептор – має бути дешевим і придатним для масового виробництва і застосування.

Завдання полягає передусім у знаходженні оптимальних конструкторських рішень і напрацюванні раціональних функціональних схем сенсорних вимірювань.

Нами запропоновано кілька типів портативних ППР-сенсорів. Один із них (рис. 3) – сенсор із реверсивним оптико-електронним каналом [14]. У ньому світловий промінь на шляху від джерела випромінювання до фотоприймача змінює свій напрямок на 180° . До складу сенсора входить освітлювальна система (лазер 1, поляризатор 2, фокусуюча лінза 3), ретропризма 4 із дзеркальним покриттям 5 і кюветою 6 для імерсійної рідини, змінний рецепторний чіп 7 і фотоприймальна система з апертурною діафрагмою 8 і матричним фотоприймачем 9. Деталі освітлювальної і фотоприймальної систем змонтовані в паралельних циліндричних каналах 10; 11 металевого корпусу 12, який конструктивно

об'єднує їх в єдиний вузол, відділений від ретропризми регульованим робочим проміжком 13 шириною ~ 2 мм. Клиновидність проміжку регулюється в межах $\pm 2,5^\circ$ з допомогою мікрогвинта 14 і пружної перемички 15. Захист від впливу зовнішніх факторів забезпечує зйомний кожух 16.

Кутова розгортка світла по рецептору здійснюється за допомогою фокусуючої лінзи, яка формує збіжний світловий промінь. Показники заломлення ретропризми, імерсійної рідини й основи рецепторного чіпа однакові. Вихідний сигнал, пов'язаний з просторовим розподілом відбитого від рецептора світла (просторова крива ППР), реєструється масивом фоточутливих елементів фотоприймача. З допомогою рухомих вузлів в освітлювальній і фотоприймальній системах і регульованого робочого проміжку виконується точне налаштування сенсора. Завдяки наявності в ретропризми кута 90° оптичні вісі вхідного і вихідного світлових променів у разі зміни робочого проміжку залишаються паралельними, що принципово важливо для стабільної роботи пристрою. Обробка інформації здійснюється

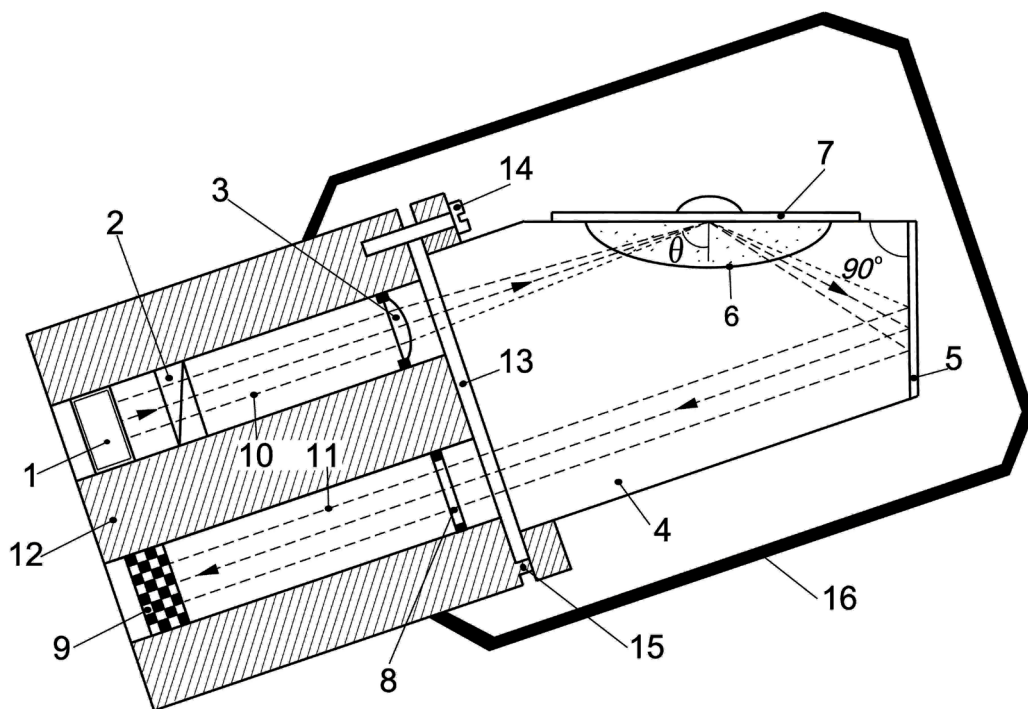


Рис. 3. ППР-сенсор з реверсивним оптико-електронним каналом

вмонтованим мікрокомп'ютером. Перевагами сенсора є можливість регулювання кута падіння світла на рецептор, механічна і світлова захищеність і малогабаритність. Сенсор розрахований на дослідження окремих проб.

На рис. 4 зображена конструкція лінійного мультипробного ППР-сенсора [15].

Необхідний середній резонансний кут θ_0 падіння світла на чутливу плівку забезпечується кутом φ_0 в основі призми. Проби 9 розміщуються з інтервалами вздовж рецептора. Кутова розгортка світла по рецептору здійснюється завдяки використанню розбіжного променя. Реєстратором кутового розподілу інтенсивності відбитого світла слугує лінійний фотоприймач, і резонансна крива фіксується усім масивом фоточутливих елементів. Зміна проб здійснюється пересуванням касети з рецептором. На рецепторі прийнятних розмірів (наприклад, з поверхнею $6 \times 10 \text{ см}^2$) можна в один ряд розмістити більше десятка проб, так що швидкодія сенсора за умови використан-

ня набору касет із наперед підготовленими рецепторами може становити сотні аналізів на годину.

Перевагою такого мультипробного сенсора є відсутність імерсійної рідини внаслідок об'єднання рецептора з призмою повного внутрішнього відбивання. Такі рецептори (точніше, їхні бази) довільної форми і розмірів можна з високою точністю ($\nabla \sim 1 \text{ нм}$) виконувати з оптичних полімерних матеріалів методом інжекційного лиття під тиском і реплікації за аналогією з виробництвом лазерних дисків [16]. Так можна отримати недорогі ($\sim \$ 0,1 \div 0,2$) рецептори, придатні для масового застосування, вага яких становитиме $\sim 50 \text{ г}$.

Досить перспективними є дифракційні рецепторні структури, які можуть бути планарними, компактними і які виготовляються з використанням полімерних матеріалів і методів реплікації, рельєфографії і мікроелектроніки [17].

На рис. 5 зображено дослідний зразок

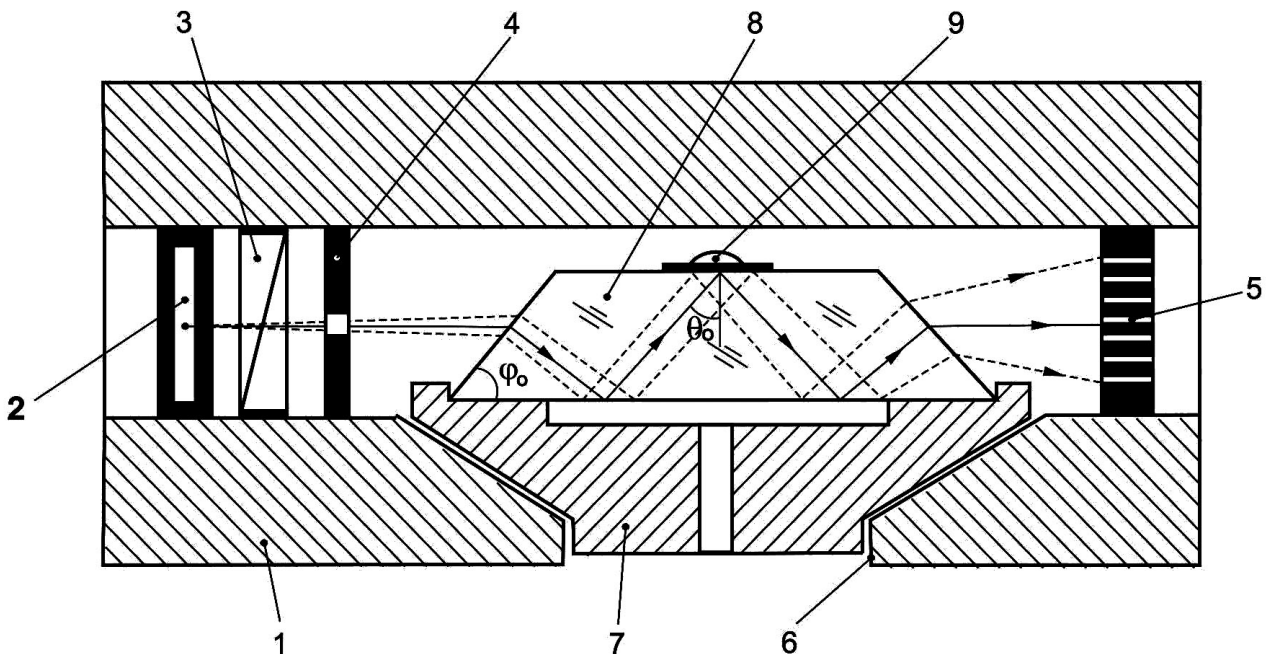


Рис. 4. Мультипробний ППР-сенсор:

1 – базовий циліндричний корпус; 2 – лазер; 3 – поляризатор; 4 – апертурна діафрагма; 5 – фотоприймач. У нижній частині корпусу знаходиться напрямний паз 6, призначений для встановлення касети 7 з призмовидним рецепторним блоком 8

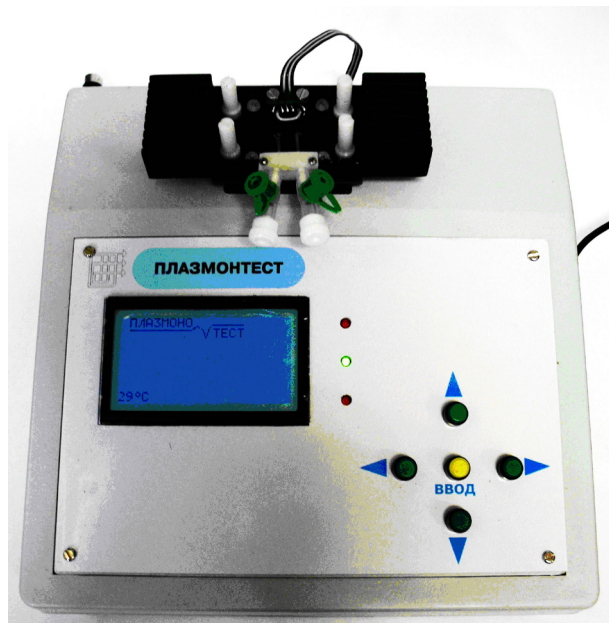


Рис. 5. Біосенсор «Плазмонтест»

ППР-сенсора «Плазмонтест», побудованого за схемою Кречмана. Сенсор розроблено в Інституті кібернетики НАНУ і призначено для експрес-аналізу молока корів на лейкоз. Він містить мікрокомп'ютерну систему управління, терморегуляції і стабілізації процесу вимірювань, рідкокристалічний дисплей, належне програмне забезпечення. Його кутова роздільна здатність відповідає сучасним вимогам і становить $\sim 0,001^\circ$, вага $\sim 2,5$ кг.

Плазмонний резонанс, каталіз і енергетика

Плазмонний резонанс займає особливе місце в каталізі. Щоб викликати енергетичну перебудову (дисоціацію, збудження, іонізацію) речовини, яка контактує з резонансною наноструктурою, і тим самим інтенсифікувати в речовині перебіг фізико-хімічних процесів, необхідно створити електричне поле належної величини за допомогою саме плазмонного резонансу. При цьому енергія для збудження і підтримки резонансного процесу надходить від робочого середовища або ззовні через теплове (оптичне) випромінювання. Її запасів може бути цілком достатньо для підтримки високоенергетичних реакцій, а діапазон робочих температур досить широкий.

Отже, множина нанорезонаторів може бути каталізатором, а її базою – електропровідні речовини (метали, напівпровідники), окремі полімери і навіть біоматеріали. Можна припустити, що ймовірний механізм перенесення, накопичення і трансформації енергії при каталітичних реакціях – електромагнітне випромінювання і резонанс за умови виконання закону збереження енергії.

У каталітичних процесах за участю плазмонного резонансу відбувається різка зміна (зростання) інтенсивності електронних енергообмінних процесів у речовині на атомно-молекулярному рівні. На ці процеси посиляються в [1; 6].

У разі збільшення (завдяки резонансу) напруженості електричного поля поблизу нейтрального атома або молекули вони поляризуються і стає можливим їхнє польове збудження. За достатньої величини поля через тунелювання валентних електронів у речовині відбувається польова іонізація [18]. Припускається також можливість розпаду плазмонів і передача їхньої енергії електронам [6; 12].

Для здійснення зазначених процесів необхідне електричне поле відповідної величини. За особливих умов на структурних неоднорідностях

рідностях, вістрях, ребрах при плазмонному резонансі можуть утворюватися осцилюючі поля з напруженістю $E \rightarrow \infty$ (на практиці $E = \infty$ не досягається) [19]. І чим більшими є ці поля, тим швидше змінюється енергетичний стан атомно-молекулярних структур, а зазвичай замасковані фізичні процеси стають яскравими, інтенсивними.

В аспекті, що розглядається, прикладом (можливо) є «холодний ядерний синтез» [20; 21]. Як повідомлялося, в реакторі *E-Cat* (*Energy Catalyzer*) А. Россі використовується нанопорошок *Ni* насичений воднем при високому (до $10 \div 15$ атм) тиску. Робота реактора (принаймні, на початку) вимагає певних витрат енергії, а потім він функціонує при температурі активного середовища в декілька сот (до тисячі) °C. У результаті виділяється тепло явно не хімічного походження. Енергетичний вихід на порядки перевищує енергетичні затрати. Витрати матеріалів зовсім незначні і спостерігається часткове перетворення *Ni* в *Cu* і *Fe*, що може свідчити про перебіг відповідних ядерних процесів.

Механізм зазначеного явища нині залишається нез'ясованим, проте його можна пояснити гіпотетично так: у нанопорошку *Ni* під дією теплового (оптичного) випромінювання збуджується локалізований плазмонний резонанс унаслідок того, що активне середовище реактора розігрівається після подачі енергії ззовні. Під впливом електричних полів, пов'язаних з плазмонним резонансом, а також енергетичного рельєфу на поверхні і в кристалічній ґратці *Ni* водень дисоціює до атомарного стану, іонізується, дифундує в *Ni* і знаходиться там у вигляді протонного газу. Протони мають розміри $\sim 10^{-13}$ см і в 10^5 разів менші за атоми водню. До того ж водень знаходиться під значним зовнішнім тиском, завдяки чому досягається висока воднева (протонна) насиченість нікелю. Це якимось чином впливає на кулонівські потенціальні бар'єри в протонах (ядрах нікелю), і створюються умови для низькоенергетичних ядерних

перетворень.

Якщо напруженість кулонівського поля протона становить $\sim 10^{19}$ В·см⁻¹ (що набагато перевищує напруженість електричних полів, які можуть досягатися при ЛППР), то говорити про безпосередній вплив електронного плазмонного резонансу на потенціальні бар'єри не доводиться. Разом з тим при концентрації водню в нікелі $\sim 10^{19}$ см⁻³ (і більше) поведінка протонного газу визначатиметься квантово-механічними законами, і не виключається можливість збудження плазмонного резонансу вже в середовищі протонів. Під час розпаду протонних плазмонів їхня енергія, яка може значно перевищувати енергію електронних плазмонів, передається окремим протонам, які можуть втрачати свої зарядові властивості, наприклад шляхом нейтралізації електронами і перетворення в теплові нейтрони за схемою $p^+ + e^- \rightarrow n^0$ і вільно проникати через кулонівські бар'єри в ядра *Ni*.

Приблизно такий механізм у цілому відповідає теоретичній моделі Відома-Ларсена [22], яка передбачає польове збудження коливаний протонного газу в гідрогенізованому металі з наступним перетворенням протонів у нейтрони. Можна припустити, що трансформація протонів у нейтрони – це початкова ланка в багатоступінчастому процесі ядерного перетворення *Ni* в *Cu* і *Fe*.

На рис. 6 показана одна з малогабаритних ($\sim 10 \times 10 \times 30$ см³) діючих конструкцій реактора *E-Cat* [21]. Він містить три коаксіально розташовані функціональні вузли: зовнішній – теплоізолюючий; внутрішній – резистивний нагрівач; центральний – власне паливний елемент у вигляді сталевого циліндричного контейнера діаметром ~ 3 см і довжиною ~ 30 см, заповненого (насиченим воднем) нанопорошком нікелю (~ 3 г) з добавкою невідомого інгредієнта – каталізатора. Таким каталізатором могла б бути хімічно стійка речовина, яка, можливо, не поглинає водню і не взаємодіє з ним, але придатна для ефективного збудження плазмонного резонансу.

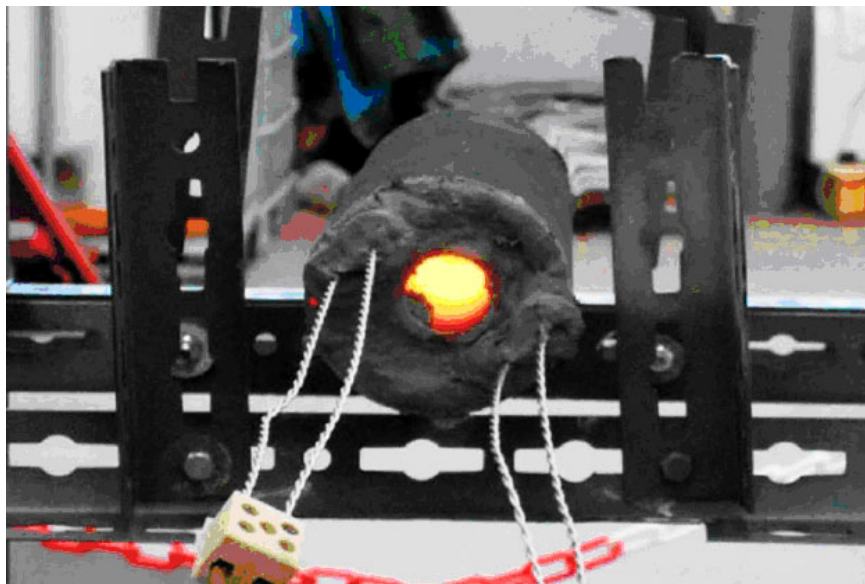


Рис. 6. Портативний реактор *E-Cat*

Резистивний нагрівач, очевидно, здійснює керування роботою реактора, регулюючи енергетичний баланс паливного елемента, оскільки останній має невеликі розміри і відповідно значне співвідношення між площею випромінюючої поверхні й енергоутворюючим об'ємом. Вихідна потужність наведеного пристрою оцінюється в декілька *kWt* при потужності нагрівача $\sim 360 \text{ Вт}$, час неперервної роботи – сотні *годин*. За деякими даними, у США вже побудовано (без участі Росії) реактор потужністю в 1 MWt [21]. Важливо, що функціонування подібних реакторів не супроводжується помітною радіацією і утворенням радіоактивних відходів.

Слід зазначити, що такі реактори потребують суттєвого технічного доопрацювання, а принципи їхньої роботи – глибокого наукового дослідження і обґрунтування.

Висновки

Плазмонний резонанс присутній у багатьох фізико-хімічних процесах. За своєю суттю він тісно пов'язаний із сучасною нанофізикою, нанотехнологіями і становить їхню вагому частину.

Особливо помітною є роль плазмонного резонансу як базового принципу створення новітніх аналітичних пристроїв і методик для біохімічних досліджень у медицині, фар-

мацевтиці, молекулярній біології, генетиці, екології, сільському господарстві тощо.

Значним є пізнавальний вплив плазмонного резонансу на розуміння багатьох фізичних процесів – фотоелектричних, емісійних, полімеризаційних, каталітичних. Каталітичним впливом плазмонного резонансу можна пояснити і низькоенергетичні ядерні перетворення в реакторі *E-Cat*.

Потенціал плазмонного резонансу ще далеко не вичерпаний. Отже, його реалізація потребує об'єднання фахівців різних галузей і концентрації їхніх зусиль на найбільш вагомим напрямках досліджень – у біосенсоріці, плазмонній електроніці, каталізі й енергетиці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Войтович И.Д. Сенсоры на основе плазмонного резонанса: принципы, технологии, применения / И.Д. Войтович, В.М. Корсунский. – К.: Сталь, 2011. – 534 с.
2. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / [Гусев А.И.]. – [2-е изд.]. – М.: Физматлит, 2009. – 416 с.
3. Балабанов В.И. Нанотехнологии. Наука будущего / В.И. Балабанов. – М.: Эксмо, 2009. – 256 с.
4. en.wikipedia.org/wiki/Polypyrrole
5. Васильев Р.Б. Квантовые точки: синтез, свойства, применения / Р.Б. Васильев, Д.Н. Дирин. – М.: изд. МГУ, 2007. – С. 26–30.
6. Дмитрук Н.Л. Поверхностные поляритоны в полупроводниках и диэлектриках / Н.Л. Дмитрук, В.Г. Литовченко, В.Л. Стрыжевский. – К.: Наук. думка, 1989. – 376 с.
7. Surface Plasmon Resonance Based Sensors. (Springer

Series on Chemical Sensors and Biosensors/ Vol. Elit.: *Homola J.* Berlin- Heidelberg. V.4, 2006). – 252 p.

8. *Ghosh S.K., Pal T.* Interparticle Coupling Effect on the Surface Plasmon Resonance of Gold Nanoparticles: From Theory to Applications // *Chem. Rev.* – 2007. – V.107, N_0 11. – P. 4797–4862.

9. *Homola J.* Surface Plasmon Resonance Sensors for Detection of Chemical and Biological Species // *Chem. Rev.* – 2008. – V.108, N_0 2. – P. 462–493.

10. *Kretschmann E., Raether H.* Zur Plasmarezonanz-emission in festen Körper // *Z.Naturforsch.* – 1968. – Bd.23, N_0 5. – P. 615–617.

11. *Добрецов Л.Н.* Эмиссионная электроника / *Л.Н. Добрецов, М.В. Гомоюнова.* – М.: Наука, 1966. – С. 218–252; 27–275; 306–314; 474–484.

12. *Borziak P.G., Katrich G.A., Naumovets A.G.* Physics of Low-Dimensional Structures. N_0 1/2 (1999).

13. *Liedberg B., Nylander C., Lundstrom I.* Surface plasmon resonance for gas detection and biosensing // *Sensors and Actuators B.* – 1983. – N_0 4 – P. 299–304.

14. Пат. №32512 Україна МПК G01N 21/55. Сенсорний пристрій. / *Войтович І.Д., Корсунський В.М., Яворський І.О.* Заявл. 19.12.2007; опубл. 26.05.2008, Бюл. №10.

15. Пат. №91404. Україна МПК G01N 21/55. Сенсорний

пристрій. / *Войтович І.Д., Яворський І.О.* Заявл. 9.09.2008; опубл. 26.07.2010, Бюл. №14.

16. *Овсянников В.* Тиражирование CD-DVD-дисков (www.rostoc-cd.kiev.ua/ihowtirag.htm)

17. *Войтович І.Д.* Кільцева фазова дифракційна структура для ППР-сенсора / *І.Д. Войтович, І.О. Яворський* // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. – 2013. – Т.10. – №1. – С. 70–84.

18. *Броддай И.* Физические основы микротехнологии / *И. Броддай., Дж. Мерей.* – М.: Мир, 1985. – С. 139–140.

19. *Ланчук А.С.* Фізико-технічні основи надшільної рестрації інформації: дис. докт. фіз.-мат. наук: 01.03 / *Ланчук Анатолій Степанович.* – К., 2012. – 306 с.

20. *Rossi A.* Method and Apparatus for Carrying Out Nickel and Hydrogen Exothermal Reaction. U.S.Patent Application Publication (2011/0005506 A1, Jun. 13).

21. *Levi G., Foshi E. et al.* Indication of anomalous heat energy production in a reactor device containing hydrogen loaded nickel powder. P. 1–31 (<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1305/1305/3913/pdf>); (expert.ru/expert/2013/22/vol-shebnyij-enerdzhajzer-rossi/); (<http://lenr.seplm.ru/>).

22. *Widom A., Larsen L.* Ultra low momentum neutron catalyzed nuclear reactions on metallic hydride surfaces // *European Phys. Journ. C* (2006) (e-mail:allan.widom@gmail.com)

УДК 621.771:67.02.001.57

ВИМОГИ ДО ТОЧНОСТІ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ОБТИСКАНЬ НА ТЛС



М.Г. Ієвлєв, канд. техн. наук,
В.Б. Корбут,
В.Г. Бутко,
С.Є. Мойсеєнко

Актуальність проблеми. Одним із найважливіших показників роботи товстолистого стану (ТЛС) є точність реалізації заданих геометричних розмірів прокатної продукції. Цей показник значною мірою залежить від точності прогнозування параметрів прокатки за математичними моделями, тому визначення вимог до їхньої точності є актуальним

завданням.

Виклад основного матеріалу. У процесі автоматичного розрахунку керувань режимом обтискань на ТЛС використовуються математичні моделі основних параметрів прокатки, що забезпечують необхідну точність заданих значень координат об'єкта автоматизації. При цьому отримання високих точнісних харак-