

„Ostry metal”, czyli od piorunochronu do oddziaływania światło–materia w pikownękach

Krzysztof M. Czajkowski

Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski*

Streszczenie. Światło jest dla nas cennym źródłem informacji o świecie, który nas otacza niezależnie od skali dzięki temu, że oddziałuje ono z materią. Jednym z wyzwań naukowych XXI wieku bez wątpienia jest kształtowanie tego oddziaływania. W niniejszym artykule przedstawię metodę realizacji silnego sprzężenia światło–materia, jaką jest zastosowanie wnęk optycznych, z uwzględnieniem intrygującego przypadku pikownek plazmonicznych, czyli tytułowych „ostrych metali”.
Słowa kluczowe: nanotechnologia, wnęki rezonansowe, optyka, oddziaływanie światło–materia

Abstract. Light is a valuable source of information of the surrounding world as a consequence of light–matter interactions. One of the major challenges in contemporary science is shaping those interactions. In this article, I present a method of reaching strong light–matter coupling regime using optical cavities with special focus on the case of plasmonic picocavities, which are formed by sharp metallic features.

Keywords: nanotechnology, resonant cavities, optics, light–matter interactions

1. Wstęp

Światło jest dla nas cennym źródłem informacji o świecie, który nas otacza, niezależnie od rozmiarów badanych obiektów dzięki temu, że oddziałuje ono z materią. Codziennie dokonujemy różnych obserwacji z tym związanych np. dostrzegamy zielony kolor trawy czy błękit nieba. Podobnie przebiegają eksperymenty w laboratoriach badawczych. Dysponujemy spektrometrami mierzącymi widmo (rozumiane jako zależność natężenia od długości fali) światła podczerwonego absorbowanego przez cząsteczki wody czy związków organicznych, co pozwala określić, w jaki sposób drgają te cząsteczki i zidentyfikować ich budowę chemiczną na tej podstawie. Mamy też gigantyczne teleskopy, które dostarczają wiedzy o tym, z jakich pierwiastków składają się gwiazdy poprzez badanie emitowanego przez nie światła. Te niezwykle obserwacje są możliwe właśnie dzięki oddziaływaniu światła z materią. Jednym z wyzwań naukowych XXI wieku bez wątpienia jest wykorzystanie tego oddziaływania w praktyce. Z jednej strony w nadchodzącej dobie informatyki kwantowej potrzebujemy źródeł światła umożliwiających badania eksperymentalne nad optyką kwantową, z drugiej zaś strony chcemy jeszcze lepiej wykorzystywać światło do gromadzenia wiedzy o własnościach materii i jej oddziaływaniu ze światłem w nanoskali, gdzie rządzą reguły dyk-

towane przez mechanikę kwantową. W artykule przedstawię metodę kształtowania oddziaływania, jaką jest zastosowanie wnęk optycznych, uwzględniając intrygujący przypadek pikownek plazmonicznych, tj. „ostrych metali”.

Aby zrozumieć, czym jest wnęka optyczna i w jaki sposób jej użycie pomaga we wzmocnieniu oddziaływania światła z materią, należy najpierw zrozumieć złotą regułę Fermiego, którą można bez wątpienia nazwać „regułą kciuka” dla oddziaływania światło–materia w nanoskali. W tym celu rozpatrzmy szczególny efekt tego oddziaływania jakim jest emisja spontaniczna. Jest to proces przejścia ze stanu wzbudzonego cząsteczki lub kropki kwantowej (tj. nanocząstki półprzewodnikowej będącej wydajnym emitorem światła) do niższego stanu energetycznego, któremu towarzyszy wyemitowanie różnicy energii w formie światła. Złota reguła Fermiego określa prawdopodobieństwo przejścia na jednostkę czasu między dwoma stanami układu kwantowego (materii w postaci np. cząsteczki czy kropki kwantowej) w wyniku oddziaływania ze światłem i wyraża się wzorem (uwaga dla czujnych fizyków: stosuję tu sformułowanie złotej reguły Fermiego, w przybliżeniu dipolowym, przy założeniu, że zaburzeniem jest fala elektromagnetyczna) [1]

*ORCID: 0000-0001-9106-2837

$$\gamma = \rho(\omega) |\vec{d} \cdot \vec{E}(\vec{r}_{emitter})|^2 \quad (1)$$

gdzie γ to prawdopodobieństwo przejścia na jednostkę czasu, ρ to gęstość stanów fotonowych dla częstotliwości światła pobudzającego równej ω na jednostkę objętości, \vec{d} to moment dipolowy związany z przejściem, zaś \vec{E} to natężenie pola elektrycznego światła pobudzającego w położeniu cząsteczki (\vec{r}_{emiter}).

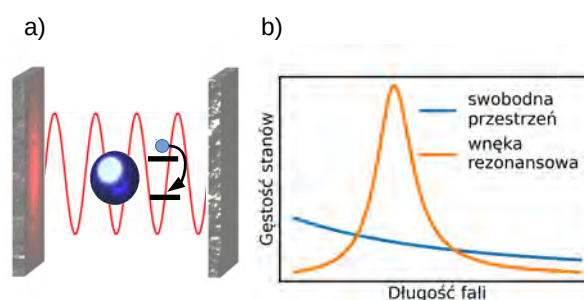
Za główną obserwację związaną ze złotą regułą Fermiego należy uznać to, że prawdopodobieństwo emisji zależy nie tylko od właściwości samej materii, z którą oddziałuje światło, ale również od właściwości otoczenia, które należy ukształtować w taki sposób, aby umożliwić zatrzymanie światła we wnęcie jak najdłużej (tzw. przekrycie widmowe) oraz by pole w miejscu emitera było maksymalnie wzmocnione (tzw. przekrycie przestrzenne). Ten pierwszy warunek stosunkowo łatwo spełnić używając pary lusterek (rys. 1a). Jest to najprostszy przykład optycznej wnęki rezonansowej, czyli przyrządu służącego do wzmocniania oddziaływania światło–materia. Zastosowanie wnęk rezonansowych pozwala na kształtowanie zarówno natężenia pola, jak i gęstości stanów. O ile natężenie pola elektrycznego to intuicyjna wielkość i łatwo sobie wyobrazić, jak np. zwierciadło wklęsłe skupia światło na niewielkich obszarach zwiększając w ten sposób natężenie pola, tak gęstość stanów, szczególnie w odniesieniu do światła, jest wielkością nieintuicyjną.

Światło rozchodzące się swobodnie na dużym obszarze posiada określoną gęstość stanów wynikającą z kwantowej natury światła. Wnęki rezonansowe zwiększają gęstość stanów dla konkretnych częstotliwości poprzez ograniczenie możliwości propagacji fal niespełniających zadanych warunków. Dobrym przykładem jest drgająca struna. W jej punktach zaczepienia wytworzona fala musi mieć zerową wartość przemieszczenia (tzw. węzeł), co nakłada warunek na częstotliwość takiej fali. Podobnie, zerowe natężenie pola elektrycznego znajduje się na granicy powietrza i zwierciadła. Układ złożony z dwóch zwierciadeł w analogii do zaczepionej w dwóch punktach struny umożliwia rozchodzenie się między zwierciadłami światła wyłącznie o określonych częstotliwościach. Jeśli jedna z tych częstotliwości pokrywa się z energią przejścia emitera, mamy do czynienia ze zwiększonym prawdopodobieństwem emisji w myśl złotej reguły Fermiego. Foton (pojedynczy kwant światła), który trafi do wnęki może odbić się od jednego ze zwierciadeł, a następnie przemieścić się do drugiego zwierciadła i odbić od niego. I tak w nieskończoność, przynajmniej w teorii. W praktyce nawet znakomite zwierciadła z pewnym prawdopodobieństwem absorbują lub (rzadziej) przepuszczają światło, co sprawia, że światło opuszcza wnękę, co obniża gęstość stanów i poszerza zakres dopuszczalnych częstotliwości światła (rys. 1b).

W uproszczeniu miarą sprzężenia światło–materia jest czynnik

$$F = \frac{\omega_0}{\sqrt{V}\Gamma}, \quad (2)$$

w którym oprócz położenia ω_0 oraz szerokości widmowej rezonansu Γ (odwrotnie proporcjonalnej do czasu życia fotonu we wnęcie) rolę odgrywa tzw. objętość modowa V , która jest tym mniejsza im bardziej skoncentrowane jest pole elektryczne. Warto nadmienić, że to właśnie ta ostatnia wielkość sprawia, że naukowcy dążą do wytwarzania wnęk o niewielkich rozmiarach i silnie skupionym polu elektrycznym.



Ryc. 1. Schematyczna reprezentacja oddziaływania światło–materia we wnękach rezonansowych: a) w molekułę (niebieskiej sferze) zachodzi przejście ze stanu wzbudzonego do podstawowego skutkujące emisją spontaniczną światła utrzymywanego we wnęcie, b) gęstość stanów optycznych jest zwiększona w pobliżu długości fali spełniającej warunek rezonansu (poszerzenie widmowe wynika ze strat we wnęcie)

Mimo tego, że we wnękach rezonansowych następują straty energii, eksperymentalnie możliwe jest uzyskanie nadzwyczaj długiego czasu od pojawienia się do „ucieczki” fotonu z wnęki — około 130 ms. Pozornie to krótko, ale światło jest bardzo szybkie (odległość, którą przebędzie w tym czasie foton, to około 40 tys. km, czyli ponad 6 razy większa od promienia Ziemi). W praktyce jest to dostatecznie długo, by wykonać w tym czasie wiele intrygujących eksperymentów związanych z kwantową naturą światła. Poprzez oddziaływanie światła z atomami umieszczonymi we wnęcie możliwe jest badanie kwantowego stanu, w jakim znajduje się światło i obserwowanie procesu dekoherencji, czyli utraty informacji o kwantowym stanie światła w wyniku jego oddziaływania z otoczeniem. Badania te zostały nagrodzone w roku 2012 nagrodą Nobla z fizyki [2]. Składające się na nie eksperymenty prowadzone były w ekstremalnych warunkach, m.in. zwierciadła wnęki wykonane były z nadprzewodnika, temperatura zaś, w jakiej je wykonano, była istotnie poniżej 1 kelwina. Jedną z silnych motywacji do dalszych badań jest zatem obserwacja efektów kwantowych w warunkach bliższych pokojowym.

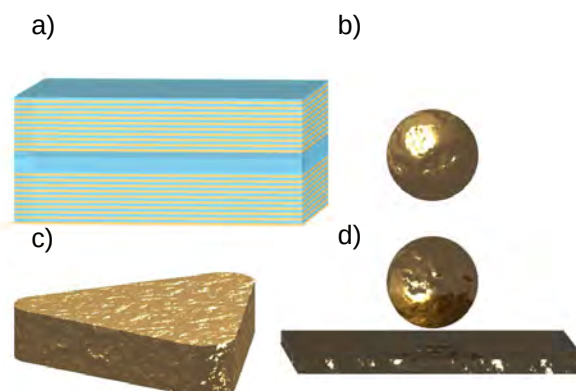
2. Półprzewodnikowe wnęki rezonansowe i ich zastosowania

Podstawowy element klasycznych wnęk rezonansowych stanowią zwierciadła. Typowe zwierciadła optyczne są wykonane z cienkiej warstwy metalu umieszczonej na szklanym podłożu i odbijają około 95% światła. Nowoczesne techniki wytwarzania cienkich warstw pozwalają na uzyskanie grubości nawet kilku nanometrów dla wielu materiałów półprzewodnikowych. Z cienkich warstw takich materiałów możliwe jest uzyskanie tzw. zwierciadeł Bragga (ang. *distributed Bragg reflector*, DBR), które dla wąskiego zakresu długości fali wykazują współczynnik odbicia powyżej 99% (rys. 2a). Wnęki optyczne złożone z pary zwierciadeł DBR rozdzielonej cienką warstwą półprzewodnika, tzw. mikrownęki stanowiły i nadal stanowią źródło niezwykle ciekawych eksperymentów związanych z oddziaływaniem światło–materia.

Mikrownęki mogą posłużyć do kształtowania procesu emisji pod względem wydajności i rozkładu kątownego emitowanego promieniowania, co sprawia, że są stosowane jako elementy źródeł światła np. laserów. Szczególnym przykładem są wydajne źródła pojedynczych fotonów, które są niezbędne do realizacji eksperymentów związanych z optyką kwantową. Takie źródła cechuje to, że w odróżnieniu od np. emisji termicznej z wolframowego drutu żarówki w danej chwili czasu emitowany jest co najwyżej jeden foton. Pozwala to na badanie kwantowych właściwości światła. Standardowe źródła pojedynczych fotonów wykorzystują zjawisko spontanicznej parametrycznej konwersji w dół (ang. *spontaneous downconversion*, SPDC). Ich wadą jest niska wydajność emisji, a zaletą — że jest to dobrze poznana technologia, emitować zaś można również splątane pary fotonów. Alternatywą może być użycie kropek kwantowych, które cechuje niezwykle wysoka wydajność, ale problemem jest to, że emisja z kropek kwantowych następuje izotropowo (identycznie dla każdego kąta obserwacji). Umieszczenie kropki w mikrowniecie skutkuje istotnym wzmocnieniem wydajności ekstrakcji światła, ale uzyskanie splątanego stanu wymaga użycia pary mikrownęk w formie słupków, dla których możliwe jest kształtowanie procesu emisji poprzez rozmiar słupków i ich wzajemną odległość [3].

Innym przykładem zastosowania mikrownęk jest wytwarzanie układów optycznych imitujących zachowania złożonych układów kwantowych występujących w fizyce ciała stałego. W tym roku polscy naukowcy zaprezentowali układ wykorzystujący mikrownękę, w którym zachowanie polaryzacji światła przypomina oddziaływanie spin–orbita [4]. Wewnątrz mikrownęki umieścili oni ciekły kryształ, który jest materiałem o dwujłom-

ności zmienianej przykładanym do komórki ciekłokrystalicznej napięciem. Dwujłomność polega na tym, że współczynnik załamania światła zależy od polaryzacji światła padającego na dany materiał. Wykorzystując polaryzację światła jako analog spinu elektronu udało się odtworzyć hamiltoniany Raaschby–Dresselhausa i Zeemana. Te badania mogą w przyszłości pozwolić na lepsze zrozumienie układów kwantowych cechujących się oddziaływaniem spin–orbita.



Ryc. 2. Wnęki rezonansowe omówione w niniejszej pracy: a) półprzewodnikowe zwierciadło Bragga, b) złota nanosfera, c) złoty nanoprzyzmat, d) nanosfera nad zwierciadłem

3. Od piorunochronu do oddziaływania światło–materia w pikownękach

Mikrownęki wzmacniają oddziaływanie światła z materią głównie ze względu na niezwykle małe straty. Dal-
sze zwiększenie tego oddziaływania wymaga manipulacji parametrem V w równaniu 2, czyli objętością modową, co nie jest łatwe w przypadku mikrownęk. Jako alternatywne rozwiązanie zaproponowano nanocząstki z metali szlachetnych, które są zdolne do skupiania światła na obszarach dużo mniejszych niż długość fali światła widzialnego sprawiając, że objętości modowe są dużo mniejsze niż w mikrownękach (rys. 2b-d).

W uproszczeniu modelem nanocząstki może być mała sfera umieszczona w stałym polu elektrycznym. Prosty model matematyczny opisujący nanocząstkę z metalu pokazuje, że szerokość rezonansu w widmie ekstynkcji światła (ekstynkcja to suma natężeń światła rozproszonego i zaabsorbowanego przez nanocząstkę) zależy, w przybliżeniu, głównie od materiału — na podstawie danych eksperymentalnych dla srebra można pokazać, że szerokość rezonansu to około 200 meV. Dla porównania, w mikrownękach można uzyskać wartości wynoszące poniżej 1 meV. Sferyczne nanocząstki cechują się zbyt dużymi objętościami modowymi, aby można było zaobserwować silne sprzężenie światło–materia. Doprowadziło to do poszukiwania metalicznych wnęk rezonansowych o znacznie mniejszych

objętościach modowych, które cechuje strukturyzacja w skali pojedynczych atomów.

Metale odróżnia od półprzewodników to, że mają dużą koncentrację tzw. swobodnych elektronów. Mają one tendencję do ekranowania objętości przewodnika, czyli gromadzenia się elektronów na powierzchni i w konsekwencji niwelowania pola elektrycznego wewnątrz. Elektrony na powierzchni odpychają się od siebie. To powoduje, że potencjał pola elektrycznego jest taki sam w każdym punkcie powierzchni, co minimalizuje całkowitą energię potencjalną przewodnika i sprawia, że właściwości elektromagnetyczne metalu (czy w ogólności przewodnika) silnie zależą od kształtu powierzchni. Klasycznym przykładem wykorzystania tego efektu jest powszechnie używany piorunochron. Jako prosty model piorunochronu posłuży nam układ składający się z dwóch kul przewodnika o różnych rozmiarach, połączonych cienkim drutem (rys. 3a). Jest to model zaczerpnięty z wykładów Feynmana [5]. Potencjał elektryczny na powierzchni sfery wynosi

$$\phi_{1,2} = \frac{q_{1,2}}{4\pi\epsilon_0 r_1}, \quad (3)$$

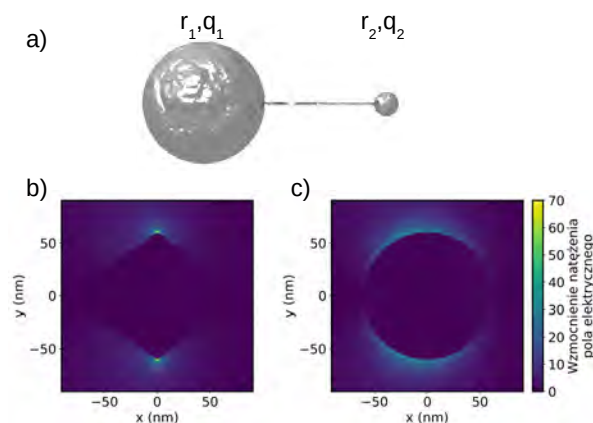
gdzie q to ładunek zgromadzony na sferze, r to promień sfery. Ze względu na to, że sfery są połączone drutem ich potencjał musi być identyczny ($\phi_1 = \phi_2$), co prowadzi do równania

$$\frac{q_1}{r_1} = \frac{q_2}{r_2}. \quad (4)$$

Natężenie pola elektrycznego na powierzchni sfer wyraża się wzorem $E_{1,2} = \frac{q_{1,2}}{4\pi\epsilon_0 r_{1,2}^2}$, co prowadzi do tego, że stosunek natężeń wynosi $\frac{E_2}{E_1} = \frac{r_1}{r_2}$. A zatem im mniejszy promień małej sfery tym większy stosunek natężeń. W efekcie, gdy powierzchnia metalu posiada ostre krawędzie, pole elektryczne jest silnie wzmocnione w ich obszarze. W szczególności, jest tym większe im mniejszy jest charakterystyczny rozmiar zaostrenia. Natężenie pola elektrycznego jest miarą tendencji danego obszaru do przyciągania ładunku podczas wyładowania atmosferycznego. Sprawia to, że piorun trafia dokładnie w piorunochron. Jeśli jest on uziemiony, to zgromadzony ładunek zostanie bezpiecznie odprowadzony. To rozumowanie tylko pozornie nie ma związku z oddziaływaniem światło–materia. Stanowi ono elementarny argument za tym, że zastosowanie struktur metalowych o elementach rzędu pojedynczych nanometrów pozwala na uzyskanie silnych wzmocnień pola potrzebnych, zgodnie ze złotą regułą Fermiego i czynnikiem Purcella, do silnego oddziaływania światła z materią pomimo stosunkowo dużej szerokości rezonansów. Potwierdzają to symulacje metodą różnic skończonych w dziedzinie czasu przedstawione na rys. 3b–c. Wzmocnienie natężenia pola jest znacznie większe w przypadku

złotego oktaedru posiadającego ostre krawędzie niż na powierzchni gładkiej sfery o tym samym rozmiarze i z tego samego materiału.

Ten efekt został wykorzystany do zbadania sprzężenia światło–materia w układzie złożonym z nanopryzmatu ze złota i barwników (agregatów J) [6]. Obserwowany czynnik F rzędu $10^6 \text{ nm}^{-3/2}$ jest bardzo dobrym wynikiem w porównaniu z wnękami rezonansowymi wykorzystującymi DBR [6]. Okazało się, że choć eksperyment był prowadzony w warunkach pokojowych udało się zaobserwować rozszczepienie piku emisyjnego cząsteczki na dwa, co nazywamy rozszczepieniem Rabiego. Jest to efekt tzw. silnego sprzężenia światło–materia, w którym światło we wnęce wymienia z materią energię szybciej niż zachodzi proces ucieczki światła z wnęki. Prowadzi to do licznych zjawisk wynikających z tego, że w tej sytuacji cały układ wykazuje kolektywne zachowanie tzn. jak gdyby stanowił jedną cząstkę (taki sprzężony układ nazywamy w fizyce kwazicząstką). Niezwykły przykład takiego zjawiska stanowi kondensacja Bosego-Einsteina tak powstałych kwazicząstek [7].



Ryc. 3. a) Schemat przedstawiający eksperyment myślowy Feynmana obrazujący efekt piorunochronu; b), c) przestrzenny rozkład wzmocnienia pola elektrycznego dla oktaedru i sfery (odpowiednio) wykonanych ze złota, oświetlonych światłem o rezonansowej długości fali (ok. 550 nm). Zaostrome brzegi oktaedru cechuje znacznie większe wzmocnienie niż obserwowane na powierzchni sfery

Ekstremalnie wysokie czynniki F (równanie 2) można uzyskać stosując nanocząstkę umieszczoną około nanometr ponad metalowym zwierciadłem. Światło rozproszone przez nanocząstkę po trafieniu na zwierciadło wraca do nanocząstki, która rozprasza je ponownie. W efekcie wielokrotnego rozpraszania pole elektryczne między nanocząstką i zwierciadłem jest dużo większe niż byłoby bez obecności zwierciadła. Praktyczna realizacja takiego układu nastąpiła w 2014, a wyniki zostały opublikowane w czasopiśmie *Nature* [8]. Trudno jest nie docenić spektakularności opisanego w artykule eksperymentu. Autorzy potrafią w sposób wytworzalny wytwarzać struktury, w których nanocząstki

o rozmiarach rzędu 40 nm ze złota oddzielone są od warstwy złota o grubości 70 nm warstwą cząsteczek o grubości 0,9 nm. Kluczową częścią eksperymentu jest ściśle określenie liczby i orientacji cząsteczek umieszczonych we wnętrzu. W tym celu wykorzystuje się osiągnięcia chemii makromolekularnej. Jeśli cząsteczka barwnika (błękitu metylenowego, znanego maturalistom z chemii) umieszczona jest w cząsteczce makrocyclicznej, to orientuje się wzdłuż osi łączącej nanocząstkę i lustro, w przeciwnym razie orientacja jest pozioma (wzdłuż warstwy). Cząsteczka makrocycliczna jest tak dobrana, aby pomieścić tylko jedną cząsteczkę barwnika. Dzięki temu zmyślnemu eksperymentowi udało się pokazać nie tylko obecność silnego sprzężenia światło–materia w temperaturze pokojowej, ale również pokazać przewidywaną przez model Jaynesa–Cummingsa zależność między siłą sprzężenia a liczbą cząsteczek we wnętrzu.

4. Zastosowania wnęk metalicznych

Wzmocnione oddziaływania światło–materia dają niezwykle możliwości badania materii w nanoskali. Na samym początku artykułu wspominałem o tym, że cząsteczki cechują charakterystyczne energie drgań. Do badania tych drgań stosowane jest zjawisko rozpraszania Ramana polegające na nieelastycznym rozpraszaniu światła, w którym zmiana energii następuje w wyniku pobudzenia cząsteczek do drgań. Od lat znany jest efekt polegający na wzmocnieniu tego rozpraszania ramanowskiego, gdy cząsteczki umieszczone są na chropowatej powierzchni metalu.

W przypadku zastosowania nanownęki metalicznej można uzyskać tak silne wzmocnienie, że możliwe jest uzyskanie widma ramanowskiego pochodzącego od pojedynczej cząsteczki. Niezwykły przykład stanowi pomiar nici RNA wykonany metalową zaostrzoną sondą skanującą [9]. Otrzymane widma ramanowskie w różnych położeniach sondy względem nici pozwalają na określenie sekwencji zasad nukleotydowych w nici.

Podobne badania z rozdzielczością czasową i przestrzenną udało się wykonać również w opisanym wyżej układzie złożonym z nanocząstki na zwierciadle. Przy tej okazji naukowcom udało się zaobserwować zaskakujące zjawisko. Za pomocą światła laserowego wytworzyli struktury na powierzchni metalowej cząstki o charakterystycznych rozmiarach porównywalnych z rozmiarem atomu złota [10]. Stosując niską temperaturę (na poziomie 10 K) udało im się ustabilizować tak powstałe struktury i zmierzyć widma ramanowskie cząsteczek znajdujących się w ich pobliżu. Zupełnie jak w przypadku piorunochronu obecność dodatkowej struktury na czubku metalowej sfery pozwala znacząco zwiększyć wzmocnienie pola w obrębie cząsteczki i zlokalizować

światło w objętościach mniejszych niż 1 nm^3 . Dzięki tym właściwościom możliwa jest obserwacja tego, jak zależą drgania cząsteczki od jej położenia względem pikownęki, które mierzone są z dokładnością do pojedynczych nanometrów. W konsekwencji obserwuje się ruch pojedynczych atomów złota tworzących pikownękę pod wpływem światła lasera. Analiza różnych procesów chemicznych z wykorzystaniem tego układu pozwala na badanie zmiany długości wiązań czy procesów utleniania i redukcji w czasie rzeczywistym na poziomie pojedynczych cząsteczek [11]. Ponadto analiza teoretyczna wykazała, że jakościowo przedstawiony tu elektrostatyczny model piorunochronu przewiduje liczne właściwości pikownęk [11].

5. Podsumowanie

Zastosowanie mikro- i nanownek pozwala na badanie kwantowej natury światła, materii oraz wzajemnego oddziaływania światła i materii z niespotykaną dotąd dokładnością, a także w reżimie silnego sprzężenia, który nie był dotychczas łatwo dostępny eksperymentalnie. Granice tych badań istotnie przesunęła zastosowanie nanostruktur metalicznych, które dzięki silnej lokalizacji pola elektromagnetycznego przekraczają możliwości standardowych struktur półprzewodnikowych. Zaawansowane wykorzystanie prostego efektu, jakim jest dodatkowa lokalizacja pola na zaostrzonych powierzchniach metali, pozwoliło na realizację niezwykle ciekawych eksperymentów związanych z chemicznymi i fizycznymi właściwościami cząsteczek. Można przypuszczać, że takie metaliczne struktury nadal będą źródłem ciekawej fizyki związanej z oddziaływaniem światło–materia, a w przyszłości również zastosowań np. w analizie chemicznej czy optyce kwantowej.

Literatura

- [1] Lukas Novotny, Bert Hecht. *Principles of Nano-Optics*. Cambridge University Press, 2006.
- [2] Materiały komitetu noblowskiego: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2012/press-release/>
- [3] Adrien Dousse, Jan Suffczyński, Alexios Beveratos, Olivier Krebs, Aristide Lemaître, Isabelle Sagnes, Jacqueline Bloch, Paul Voisin, and Pascale Senellart. Ultrabright source of entangled photon pairs. *Nature*, 416(7303):217–220, 2010.
- [4] Katarzyna Rechcińska, Mateusz Król, Rafał Mazur, Przemysław Morawiak, Rafał Mirek, Karolina Łempicka, Witold Bardyszewski, Michał Matuszewski, Przemysław Kula, Wiktor Piecek, Pavlos G. Lagoudakis, Barbara Piętka, Jacek Szczytko. Engineering spin-orbit synthetic hamiltonians in liquid-

- crystal optical cavities. *Science*, 366(6466):727–730, 2019.
- [5] Richard Feynman. *The Feynman Lectures on Physics*, volume 2 of *The Feynman Lectures on Physics*. Addison-Wesley, Boston 1963.
- [6] Gülis Zengin, Martin Wersäll, Sara Nilsson, Tomasz J. Antosiewicz, Mikael Käll, Timur Shegai. Realizing strong light-matter interactions between single-nanoparticle plasmons and molecular excitons at ambient conditions. *Phys. Rev. Lett.*, 114:157401, Apr 2015.
- [7] J. Kasprzak, M. Richard, S. Kundermann, A. Baas, P. Jeambrun, J. M. J. Keeling, F. M. Marchetti, M. H. Szymańska, R. André, J. L. Staehli, V. Savona, P. B. Littlewood, B. Deveaud, Le Si Dang. Bose–Einstein condensation of exciton polaritons. *Nature*, 443(7110):409–414, 2006.
- [8] Rohit Chikkaraddy, Bart de Nijs, Felix Benz, Steven J. Barrow, Oren A. Scherman, Edina Rosta, Angela Demetriadou, Peter Fox, Ortwin Hess, Jeremy J. Baumberg. Single-molecule strong coupling at room temperature in plasmonic nanocavities. *Nature*, 535(7610):127–130, 2016.
- [9] Elena Bailo, Volker Deckert. Tip-enhanced raman spectroscopy of single rna strands: Towards a novel direct-sequencing method. *Angewandte Chemie Int. Ed.*, 47(9):1658–1661, 2008.
- [10] Felix Benz, Mikolaj K. Schmidt, Alexander Dreismann, Rohit Chikkaraddy, Yao Zhang, Angela Demetriadou, Cloudy Carnegie, Hamid Ohadi, Bart de Nijs, Ruben Esteban, Javier Aizpurua, Jeremy J. Baumberg. Single-molecule optomechanics in “picocavities”. *Science*, 354(6313):726–729, 2016.
- [11] Jeremy J. Baumberg, Javier Aizpurua, Maiken H. Mikkelsen, David R. Smith. Extreme nanophotonics from ultrathin metallic gaps. *Nature Materials*, 18(7):668–678, 2019.