Silne sprzężenie pomiędzy modami braggowskimi we wnęce dielektrycznej

Aleksandra Gajkowska, Ada Hryniewicka, Karina Świderska

17.04.2020

Streszczenie

W doświadczeniu badano dwa różne typy zwierciadeł Bragga, różniące się materiałem warstwy wierzchniej. Dla każdej próbki wyznaczono zakres fotonicznej przerwy wzbronionej, poprzez zmierzenie widma odbicia. Z dwóch zwierciadeł złożono mikrownękę i zaobserwowano powstawanie modów wnękowych. Odległości pomiędzy zwierciadłami tworzącymi wnękę kontrolowano elementem piezoelektrycznym, co pozwoliło stroić energię modu wnękowego przez mod Bragga pojedynczego lustra. Zaobserwowano sprzęganie się tych modów dla luster składających się z różnych materiałów końcowych.

1 Wstęp teoretyczny

Modem wnękowym nazywa się silnie zlokalizowane wewnątrz wnęki pole elektryczne o specyficznej, rezonansowej częstotliwości. Okazuje się, że taki mod fali elektromagnetycznej można utworzyć we wnęce dielektrycznej, gdy pada na nią światło o odpowiedniej długości. Wówczas we wnęce powstaje fala stojąca. Tak zlokalizowana fala elektromagnetyczna może oddziaływać z materią - ekscytonem, tworząc dwa antyprzecinające się stany.

Analogiczny efekt można uzyskać stosując dwa odpowiednio względem siebie ułożone lustra Bragga, oddzielone cienką warstwą powietrza. Nie obserwujemy wtedy sprzężenia światła z materią; tym razem to same mody wnękowe zdają się silnie ze sobą oddziaływać.

Celem naszych badań było zobrazowanie efektu sprzężenia modów braggowskich i wyznaczenie energii ich wzajemnego oddziaływania.

1.1 Lustra Bragga i mikrownęki

Do zlokalizowania fali elektromagnetycznej posłużyły nam lustra Bragga. Nazywamy nimi ciąg od kilku do kilkudziesięciu cienkich warstw dielektrycznych lub półprzewodnikowych, różniących się znacznie współczynnikami załamania światła n. Grubość d_i każdej z warstw jest dobierana w ten sposób, aby mieściła się w niej całkowita wielokrotność jednej czwartej długości padającej fali λ_0 (1). Typowa grubość każdej takiej warstwy jest rzędu 100 nm.

$$d_i = \frac{\lambda_0}{4n_i} \tag{1}$$

Najczęściej spotyka się dwa identyczne lustra Bragga połączone ze sobą grubszą warstwą, która może pełnić rolę wnęki rezonansowej. Warunek rezonansu zachodzi, gdy grubość wnęki wyraża zależność (2).

$$d_w = N \frac{\lambda_0}{2n_w} \tag{2}$$

Warunek ten odpowiada sytuacji gdy we wnęce mieści się całkowita wielokrotność połowy długości fali o długości λ_0 . Oznacza to, że we wnęce powstaje fala stojąca, zlokalizowana pomiędzy lustrami.

Podobną wnękę można utworzyć rozdzielając dwa lustra Bragga warstwą powietrza. Takie rozwiązanie jest wygodne ze względu na możliwość swobodnego zmieniania grubości wnęki i badania zachowania energii fotonów w zależności od jej wartości.



Rysunek 1: Wizualizacja luster Bragga. Między nimi znajduje się powietrze.

1.2 Energia fotonów a kąt padania wiązki

Kąt padania wiązki światła na układ zwierciadeł oddzielonych wnęką ma duże znaczenie, jeśli bada się energię modu wnękowego. Wektor falowy można rozłożyć na dwie składowe - prostopadłą i równoległą, zależne od kąta padania światła na wnękę. Składowa prostopadła będzie zawsze taka sama, bez względu na kąt padania; będzie zależała jedynie od grubości wnęki. Ze względu na spełnienie warunku rezonansu, składowa równoległa może się za to zmieniać, i w wyniku tego energia fali również ulegnie zmianie.

Okazuje się, że energia wiązki światła zależy kwadratowo od długości składowej prostopadłej wektora falowego. Minimum energii fali odpowiada kątowi padania równemu 0 stopni (prostopadle do płaszczyzny wnęki).

1.3 Oddziaływanie światła z polarytonem i jego analogia do sprzężenia modów Bragga

Ekscytonem nazywa się cząstkę powstałą w wyniku oddziaływania elektronu oraz pozostałej po nim dziury. Dziura jest wynikiem przejścia elektronu do pasma przewodnictwa w półprzewodniku, jest więc obdarzona ładunkiem dodatnim; może się związać z elektronem poprzez zwykłe oddziaływanie elektrostatyczne.

Można zbudować układ składający się z dwóch zwierciadeł Bragga oddzielonych wnęką zawierającą studnię kwantową, w którym energia modu fotonowego jest nieznacznie mniejsza niż energia ekscytonów powstałych w studni kwantowej. Oznaczałoby to, że będzie się ona przecinać z energią fotonów dla pewnych liczb falowych. We wnękach o wysokiej jakości obserwowany efekt jest jednak inny, sprzeczny z takimi oczekiwaniami. Energie światła i materii nigdy nie nachodzą na siebie. Wiąże się to z tym, że dochodzi do sprzężenia fotonu i ekscytonu. Powstaje osobne indywiduum, zwane polarytonem ekscytonowym. Tworzący się polaryton ma dwa poziomy energetyczne, nazywane odpowiednio polarytonem dolnym oraz górnym. Im wyższa jest liczba falowa wiązki fotonów, tym bardziej energia polarytonu dolnego zbliża się do energii ekscytonu, a energia górnego polarytonu - do energii fotonu. Wartości te nie są w stanie się zrównać.

Analogiczne zachowanie można zaobserwować korzystając z dwóch luster Bragga oddzielonych warstwą powietrza, przy czym z jednej strony wnęka kończy się innym dielektrykiem niż z drugiej. Można wtedy zaobserwować oddziaływanie między samymi modami wnękowymi, powstałymi w wyniku połączenia zwierciadeł. Wpływ oddziaływania jest najlepiej widoczny, gdy mody znajdują się najbliżej siebie. Efekt nie występuje w przypadku, gdy lustra są ułożone symetrycznie.

2 Pomiary



2.1 Układ eksperymentalny

Rysunek 2: Schemat układu pomiarowego.

Na rysunku 2 przedstawiono elementy wykorzystane podczas przeprowadzania pomiarów. Na początku użyliśmy lasera, aby określić odpowiednią odległość między obiektywem a próbką. Główne pomiary polegały na pomiarze widma światła białego odbitego od próbki. Po kilkukrotnym przejściu światła przez zwierciadła oraz kostkę światłodzielącą, pada ono na próbkę, ulegając odbiciu. Powstała wiązka równoległa, przechodząc przez soczewki obrazujące rozdzielczość kątową wpada do spektrometru oraz kamery.

Podczas pomiarów dostęp światła zewnętrznego w pracowni był ograniczony do minimum.

2.2 Widma odbicia od pojedynczych luster

Badanie efektów sprzężenia modów Bragga rozpoczęłyśmy od stworzenia czterech próbek z użyciem pojedynczych zwierciadeł:

- Lustra, które kończyło się warstwą dwutlenku tytanu TiO $_2$ (DBR 520 nm),
- Lustra, które kończyło się warstwą dwutlenku krzemu SiO₂ (DBR 543 nm),
- Dwóch zwierciadeł z warstwami srebrnymi Ag.

Wybrane lustro przemywałyśmy acetonem, aby pozbyć się występujących zanieczyszczeń mogących zniekształcić wyniki. Następnie osadzałyśmy je w piezoelemencie zabezpieczając jego brzegi cienką warstwą kleju. Tak przygotowaną próbkę umieszczałyśmy w układzie eksperymentalnym (rysunek 2.). Za pomocą lasera dobierana była odpowiednia odległość pomiędzy obiektywem, a badaną próbką, tak aby obraz wiązki odbitej od lustra widoczny był na ekranie w postaci punktu.

Po zakończeniu kalibracji przeszłyśmy do mierzenia widm odbicia od przygotowanych wcześniej próbek. Pierwsze zmierzyłyśmy widmo referencyjne, czyli widmo odbicia światła białego od lustra srebrnego. Następnie, także dla lustra srebrnego, wykonałyśmy pomiar tła, czyli pomiar zliczeń ciemnych kamery, które odejmowałyśmy od mierzonych później widm odbicia w celu otrzymania prawdziwej intensywności światła odbitego. Kolejne pomiary wykonałyśmy dla luster, których ostatnie warstwy składały się odpowiednio z TiO₂ i SiO₂. Rozpoczęłyśmy od zbierania widma 10 razy akumulując sygnał po 2 sekundy. Gdy okazało się to niewystarczające ponowiłyśmy pomiary, tym razem zliczając widmo 30 razy po 2 sekundy.



Rysunek 3: Widmo odbicia od lustra ${\rm TiO}_2$ pomniejszone o widmo światła białego i widmo tła.



Rysunek 4: Widmo odbicia od lustra ${\rm SiO}_2$ pomniejszone o widmo światła białego i widmo tła.

Na podstawie znormalizowanych widm, wyznaczono fotoniczną przerwę wzbronioną, która odpowiada zakresowi długości fal dla których zwierciadło charakteryzuje się wysokim współczynnikiem odbicia. Dla lustra z wierzchnią warstwą TiO₂ (Rys. 4) wynosi ona 160 nm, a dla tej z SiO₂ (Rys. 6) okolo 180 nm. Dodatkowo z wykresów można było stwierdzić, że lustro z wierzchnim TiO₂ było projektowane na długość fali 540 nm, a z SiO₂ 560 nm.

2.3 Widma odbicia od luster złożonych asymetrycznie

Kolejne pomiary wykonywałyśmy już dla trzech próbek złożonych z dwóch luster:

- Luster, których ostatnim materiałem był odpowiednio SiO₂ i TiO₂,
- Dwa lustra, których ostatnim materiałem był SiO₂,
- Dwa lustra, których ostatnim materiałem był TiO₂.

Przygotowanie próbki przebiegało niemalże identycznie jak poprzednio, z wyjątkiem umieszczenia drugiego zwierciadła naprzeciw pierwszego, a następnie ściśnięcia ich, tak aby pozostała mikro wnęka.

Tak przygotowany egzemplarz osadzany był w układzie eksperymentalnym (Rys. 2). Do elementu piezoelektrycznego podłączyłyśmy napięcie, które podczas pomiaru było zmieniane w przedziale 15-70 V, co powodowało zmienianie długości wnęki. W takiej wnęce powstawała fala stojąca, która przy zmniejszającej się przestrzeni między zwierciadłami zmieniała swoją długość, tym samym zwiększając swoją energię.

Zmiana napięcia następowała co 1 V w całym przedziale. W trakcie pomiarów podążano oknem spektralnym za modem wnękowym przy 35 V, zmieniając położenie siatki dyfrakcyjnej spektrometru.



Rysunek 5: Zachowanie modów braggowskich dla serii napięć (lustra złożone asymetrycznie).

W ten sposób badaliśmy jak zachowują się mody podczas przestrajania ich napięciem, zmieniając tym samym warunek rezonansu, co skutkowało zmienną energią modu wnękowego.

Widma wykonane za pomocą spektrometru zobrazowano na serii map, przedstawiających zależność długości fali światła od kąta nachylenia, dla każdej ustalanej wartości napięcia, co przedstawiono na Rys. 5. Kolory na mapach opisują intensywność światła o danej długości. Ciemne krzywe na wykresach odpowiadają modom wnękowym. Można zauważyć, że nigdy nie nachodzą one na siebie.

Następnie wykonano mapę obrazującą zmierzone widma odbicia dla różnych napięć (dla kąta 0 stopni), aby bliżej przyjrzeć się zachowaniu modów braggowskich (Rys. 6). Przy wzroście napięcia, początkowo zbliżają się do siebie, odległość między nimi osiąga minimum dla napięcia 50 V, po czym ponownie się oddalają. Korzystając z tych danych, wyliczyliśmy energię oddziaływania między tymi modami, korzystając ze wzoru:

$$\Delta E = \left|\frac{hc}{\lambda_1} - \frac{hc}{\lambda_2}\right|,\tag{3}$$

gdzie λ_1 i λ_2 są długościami fal odpowiadającymi minimum odległości między modami, c jest prędkością światła, a h stałą Plancka. Obliczona energia oddziaływania wyniosła w badanym przypadku około 42.41 meV.



Rysunek 6: Mapa obrazująca zmierzone widma odbicia dla różnych napięć; dane dotyczą kąta padania światła równego 0 stopni.

2.4 Widma odbicia od luster złożonych symetrycznie



Rysunek 7: Zachowanie modów wnękowych dla serii napięć (lustra złożone symetrycznie)

Podobne pomiary wykonałyśmy dla elementu złożonego z dwóch identycznych luster, napięcie w przedziale 0-150 V zmienialiśmy co 2.5 V. Dla luster z końcową warstwą krzemową kalibracja siatki nastąpiła dwa razy- przy napięciu równym 10 V i 79 V. W przypadku luster z końcową warstwą tytanową kalibracja wystąpiła przy 10 V i 27.5 V.

Ponownie jak poprzednio, z serii pomiarów widma dla różnych napięć, stworzyliśmy mapy. Wzięliśmy pod uwagę tylko widma dla napięć w przedziałe od 71 V do 128 V; dla tego przedziału zachowanie modów było najlepiej widoczne, co przedstawia Rys. 7. Tym razem, obserwowany efekt jest zupełnie inny. Wcześniej mody się antyprzecinały, tymczasem teraz nachodzą na siebie. Można dojść do wniosku, że efekt

oddziaływania między modami wnękowymi występuje jedynie w przypadku asymetrycznie złożonych luster.

To zachowanie dobrze pokazuje mapa intensywności odbitego światła w funkcji napięcia oraz długości fali dla kąta padania 0 stopni (analogiczna do tej dla dwóch symetrycznie złożonych luster), przedstawiona na Rysunku 8. Widać, że mody wnękowe zbliżają się do siebie ze wzrostem napięcia, następnie się przecinają i ponownie oddalają.



Rysunek 8: Analogia mapy z Rys. 6; przypadek luster złożonych symetrycznie.

3 Podsumowanie

W doświadczeniu badano dwa różne typy zwierciadeł Bragga. Ich cechą wspólną było wykonanie z warstw SiO_2 oraz TiO_2 . Różniły się one materiałem warstwy wierzchniej. Zmierzono widma odbicia od obu luster z czego wyznaczono zakresy fotonicznej przerwy wzbronionej. Następnie z dwóch zwierciadeł złożono mikrownękę i zaobserwowano powstanie modów wnękowych widocznych jako wąskie minima na widmach odbicia. Dzięki elementowi piezoelektrycznemu kontrolowano odległość pomiędzy zwierciadłami, która pozwalała na zmianę energii modu wnęki.

Po przestrajaniu energii modu wnękowego przez mod Bragga pojedynczego lustra, wnęka, złożona z luster składających się z różnych materiałów końcowych, charakteryzowała się antyprzecinaniem się dwóch stanów. Takie zachowanie przypomina układ sprzężonych mikrownęk albo mod wnęki silnie sprzężony z rezonansem ekscytonowym. Następnie wyznaczono energię tego sprzężenia, jako minimum energii między modami. Po obserwacji stwierdzono, że takie sprzężenie nie występuje we wnękach składających się z luster takiego samego typu, w których mody wnękowe przecinają się z minimami braggowskimi.