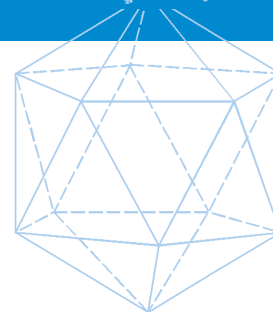




Osiągnięcia Nauki i Techniki Kierunki Rozwoju i Metody

KONWERSATORIUM POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ
Wydawnictwo nr 22 do Międzylatnika Politechniki Warszawskiej nr 6/2012

Redaktor merytoryczny — Stanisław Janeczko



Daleka podczerwień (THz) w półprzewodnikach — fizyka i aplikacje

Na podstawie odczytu wygłoszonego w dniu 23 lutego 2012 roku

prof. dr hab. Marian Grynberg

Instytut Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego
e-mail: marian.grynberg@fuw.edu.pl

W obszarze dalekiej podczerwieni energie kwantów promieniowania elektromagnetycznego są bardzo małe. Zatem, „w naturalny sposób” spektroskopia dalekiej podczerwieni jest narzędziem do badania pobudzeń elementarnych niskoenergetycznych. W fizyce półprzewodników pobudzeń takich jest bardzo wiele, np. energie wiązania płytkich donorów czy energie drgań plazmy w słabo domieszkowanych półprzewodnikach. Energie fotonów dalekiej podczerwieni to obszar 3–15 meV (długość fali 1 mm–100 μ m).

Ponieważ w tym obszarze nie ma intensywnych źródeł promieniowania ciągłego, używa się monochromatycznych źródeł (lasery molekularne, karciotrony, lasery półprzewodnikowe). Zamiast zmiany długości fali umieszcza się badany obiekt w zewnętrznym polu magnetycznym, które zmienia energie stanów kwantowych, „dostrajając je” do energii padającego fotonu. Energia jonizacji płytkiego, wodoropodobnego donora w półprzewodniku jest około 1000 razy mniejsza niż w atomie wodoru (mniejsza masa efektywna i większa stała dielektryczna)

4 meV–20 meV, zatem w obszarze dalekiej podczerwieni. Metodami absorpcji w polu magnetycznym lub fotoprzewodnictwa udało się zmierzyć stany domieszkowe w półprzewodniku. Jest to analogon widma absorpcyjnego atomu wodoru tylko w obszarze spektralnym około 1000 razy dłuższych fal. W uzyskanych widmach „zakodowanych” jest wiele informacji o stanach donorowych, a tym samym o półprzewodniku. W układach dwuwymiarowych (2D) — studniach kwantowych — problem donora jest znacznie bardziej złożony.

Położenie energetyczne płytkiego donora bardzo wyraźnie zależy od szerokości i głębokości studni. Dodatkowo dla studni o szerokości ~ 100 Å energia wiązania płytkiego donora wynosi $4 Ry^*$, dla donora w środku studni (Ry^* energia wiązania w kryształ trójwymiarowym), a jeśli donor znajduje się na powierzchni studnia — bariera energia ta wynosi $1 Ry^*$, zatem w zależności od położenia donora w studni energia ta zmienia się 16 razy. Dokonując umiejętnego domieszkowania studni kwantowej (metodą

Molecular Beam Epitaxy — MBE) udało się zjawisko to zaobserwować w wybranych materiałach półprzewodnikowych.

Badania płytkich stanów domieszkowych (stanów wodoropodobnych) w studniach kwantowych pozwoliły zaobserwować w laboratorium stan ujemnie naładowanego płytkiego donora, D^- (analogon ujemnie naładowanego atomu wodoru H^-). Astrofizycy od wielu lat obserwowali w widmie korony słonecznej w bliskiej podczerwieni (około $1,5 \mu\text{m}$) silną linię spektralną, której natury fizycznej nie udawało się wyjaśnić. W latach czterdziestych ubiegłego stulecia Chandrashekar wykazał, że atom wodoru potrafi wiązać drugi elektron tworząc stan H^- . Obydwa związane elektrony muszą mieć przeciwnie skierowane spiny, a drugi elektron posiada tylko jeden stan związany. Energia wiązania tego stanu wynosi 5,5% Rydberga ($13,6 \text{ eV}$). Przejście między tym stanem a „poziomem jonizacji” dokładnie odpowiada obserwowanej linii z korony słonecznej.

Rozpatrując atom wodoropodobny w półprzewodniku (np. płytki donor) należałoby się spodziewać powstawania ujemnie naładowanego donora D^- . W strukturach trójwymiarowych (3D), mimo usilnych prób, stanu takiego nie udało się zaobserwować. Energia wiązania drugiego elektronu, podobnie jak stanu H^- , powinna wynosić 5,5% energii wiązania pierwszego. Z tym tylko, że zamiast Ry w przypadku donora w półprzewodniku, energia wiązania wynosi Ry^* (około 1000 razy mniej niż dla atomu wodoru), a 5,5% z 5 meV (energia wiązania elektronu na donor w GaAs) wynosi około 300 μeV .

Domieszkując struktury tylko w środku bariery obserwuje się (w polu magnetycznym), że przejście z D^- zachodzi w małej energii. Domieszkując tylko w środku studni obserwuje się takie przejście w znacznie wyższej energii. W strukturach domieszkowanych zarówno w środku studni, jak i w środku bariery obserwuje się 3 linie absorpcyjne — dwie o energiach odpowiadających poprzednim przypadkom i trzecią (równie intensywną), która jak się okazało jest przejściem ze stanu D^- .

W temperaturze wzrostu struktury ($300-4000^\circ\text{C}$) wszystkie stany donorowe są zjonizowane. Przy

ochładzaniu do studni „wpadają” nie tylko elektrony z donorów ze studni, ale również część elektronów pochodzących z donorów w barierze. W ten sposób w studni znajduje się więcej elektronów niż centrów donorowych. Część z tych „dodatkowych” elektronów wiąże się na neutralnym donorze D^0 , tworząc stan D^- . W obecności silnego pola magnetycznego energia stanu związanego D^- silnie rośnie i dlatego może być łatwo zaobserwowana. Zatem w specyficznie domieszkowanych strukturach dwuwymiarowych powstają stany D^- , których nie udało się uzyskać w kryształach trójwymiarowych (3D).

W ostatnim dwudziestoleciu rozpoczęły się intensywne badania mikronowych i submikronowych pojedynczych tranzystorów polowych, traktowanych jako źródła i detektory promieniowania THz. W tranzystorach tych występuje, w kanale tranzystora, dwuwymiarowa warstwa plazmy, w której istnieją drgania plazmonów. Drgania te skutkują emisją fal elektromagnetycznych (dla submikronowych tranzystorów) rzędu pojedynczych THz. Emisja ta zachodzi zarówno w temperaturach helowych, jak i, co ważne, również w temperaturze pokojowej. Podobny tranzystor (podobnie spolaryzowany) oświetlony promieniowaniem THz generuje między źródłem a drenem napięcie, które linowo zależy od intensywności padającego promieniowania. Jest zatem detektorem THz, pracującym nie tylko w niskich temperaturach (helowych), ale również w temperaturze pokojowej. Dodatkowo „odpowiedź” detektora na promieniowanie o częstotliwości THz jest napięciem stałym (DC), a zatem detektor ten jest silnie nieliniowym elementem elektronicznym, z czego wynika, że pojedyncze tranzystory polowe mogą być źródłami i detektorami promieniowania THz. Potencjalne zastosowanie tych elementów jest ogromne w różnych dziedzinach życia. Niektóre doczekały się już zastosowań. Mechanizmy fizyczne — zarówno emisji, jak i detekcji — wymagają jeszcze szczegółowego zrozumienia. Wiele z tych mechanizmów fizycy już wyjaśnili, pozostaje jednak jeszcze wiele pracy. Pełne zrozumienie tego, co dzieje się w dwuwymiarowej plazmie w kanale tranzystora, jest nadal tematem zajmującym fizyków.