

Streszczenie

W ramach badań, opisanych w niniejszej pracy doktorskiej, zajmowałem się charakteryzacją wzbudzeń dwuwymiarowego gazu elektronowego (2DEG) w polu magnetycznym pod wpływem promieniowania terahercowego (THz). Promieniowanie THz to promieniowanie elektromagnetyczne o zakresie częstości 0.1–10.0 THz. Przedmiot moich badań wywodzi się z szerszego nurtu inżynieryjno-naukowego, zapoczątkowanego w latach 90. XX w., mającego na celu stworzenie detektorów promieniowania THz opartych na wzbudzeniach plazmy w urządzeniach półprzewodnikowych o przestrajalnej częstości detekcji. Zastosowania promieniowania THz są bardzo obiecujące ze względu na jego niezwykle własności – jest to promieniowanie elektromagnetyczne przenikliwe dla licznej grupy materiałów nieprzezroczystych w świetle widzialnym, a jednocześnie wiele związków chemicznych ma w tym zakresie charakterystyczne linie absorpcyjne i emisyjne. Poza obrazowaniem, wskazuje się również promieniowanie THz jako nośnik zdalnej komunikacji. Ze względu na liczne potencjalne zastosowania urządzeń pracujących w zakresie THz, nastąpił duży postęp technologiczny w tej dziedzinie i obecnie dostępne są już komercyjne urządzenia, umożliwiające np. obrazowanie w zakresie THz.

Inspiracją dla tych badań były prace M. Dyakonova oraz M. Shura przewidujące, że w tranzystorze polowym (FET), poddanym wpływowi promieniowania THz, powstaje stałe napięcie pomiędzy kontaktami prądowymi tego urządzenia. Taki skok napięcia nazywany jest fotonapięciem (PV). Powstanie tego zjawiska tłumaczone jest niestabilnością prądu spowodowaną wzmocnieniem fal plazmowych na granicach tranzystora. Dyakonov i Shur przewidzieli, że FET powinien odpowiadać na promieniowanie THz w częstościach rezonansowych, związanych z jego wymiarami – spodziewali się, że kanał tranzystora polowego stanowi wnękę rezonansową dla fal plazmowych. Nie było to nowatorskie podejście, gdyż już w latach 70. XX w. obserwowano wzbudzenia dwuwymiarowej plazmy w 2DEG o skończonych wymiarach. Wcześniej jednak nie przewidywano powstawania rezonansowego sygnału fotonapięciowego. Co więcej, Dyakonov i Shur spodziewali się, że jako detektory można wykorzystać powszechnie dostępne tranzystory polowe. Przewidywana przez autorów częstość takich rezonansowych modów mieściła się w zakresie THz widma promieniowania elektromagnetycznego. Jednocześnie, Dyakonov i Shur przewidzieli, że FET będzie również odpowiadać w częstościach nierezonansowych, jeśli ruchliwość elektronów nie jest zbyt duża.

Zgodnie ze teorią Dyakonova-Shura, tranzystor polowy może być detektorem i źródłem promieniowania THz. Jednak zaobserwowana do tej pory emisja promieniowania THz z tranzystorów polowych ma zbyt niską moc, aby możliwe było praktyczne wykorzystanie FET jako emitera. Tym bardziej, że konieczne jest jego schłodzenie to temperatur kriogenicznych. Z tego względu, FET obecnie przegrywa z takimi źródłami promieniowania dalekiej podczerwieni, jak np. kwantowe laser kaskadowe.

Detekcję nierezonansową odkryto na całej serii materiałów i w różnych typach tranzystorów polowych. Badano m.in. tranzystory typu MOSFET (metal-tlenek-półprzewodnik) oparte na krzemie oraz HEMT (tranzystory o wysokiej ruchliwości nośników) oparte na różnych złączach materiałów (np. GaN/AlGaN, GaAs/AlGaAs, InGaAs/InAlAs). Sygnał nierezonansowy pojawia się nawet w temperaturze pokojowej i urządzenia wykorzystujące ten efekt są już wytwarzane jako produkty komercyjne (np. wielopikselowa kamera THz oparta na krzemowych MOSFETach). Obecnie bada się możliwość spektralnego zwiężenia nierezonansowej odpowiedzi tranzystora polowego za pomocą rezonansowych anten.

Z drugiej strony, odkryte dotychczas rezonanse plazmowe w sygnale fotonapięcia z tranzystorów polowych okazały się być słabe i widoczne tylko w niskich temperaturach. Aby zrozumieć powody, które stoją za takim wynikiem, zdecydowaliśmy się przygotować próbki przykryte siatką metalicznych pasków o określonym okresie – tj. klasyczny układ, w jakim zaobserwowano plazmony po raz pierwszy w półprzewodnikowym 2DEG – a następnie zmierzyć sygnał PV z takich próbek, gdzie plazmony powinny zachowywać się w dobrze znany sposób. Interesujące było to, jaką odpowiedź w fotonapięciu uzyskuje się w przypadku struktur, w których powinny wzbudzić się, dobrze znane od lat 70. XX w., rezonanse magnetoplazmowe. Dla porównania postanowiono również zbadać struktury referencyjne: nieprzykryte bramką i przykryte bramką jednorodną.

Mój obszar badań obejmuje temat detekcji rezonansowej w 2DEG przykrytym i nieprzykrytym bramką. Podstawowym celem mojej pracy była charakteryzacja wzbudzeń plazmy w zależności od takich parametrów, jak pole magnetyczne, częstość promieniowania THz czy napięcie polaryzujące bramkę. Posługując się źródłami monochromatycznego promieniowania THz o przestrajanej częstości, pokrywającymi zakres 0.1–0.7 THz, scharakteryzowano wzbudzenia magnetoplazmowe obserwowane w sygnale detekcji generowanym przez serię różnych próbek. Celem było porównanie wzbudzeń w próbkach z bramkami o różnych

geometriach i w próbkach bez bramek. Wyniki te uzupełniono pomiarami wykonanymi z wykorzystaniem pojedynczych linii laserowych z zakresu 1.5–1.8 THz.

Wykonano również porównanie wyników otrzymanych przy oświetleniu próbki monochromatycznym i niemonochromatycznym promieniowaniem THz, w celu sprawdzenia, czy detektor daje równoważne wyniki w obu przypadkach. Jest to informacja bardzo istotna w przypadku projektowania detektorów, gdyż, w zależności od potrzeb, mogą one być poddane działaniu obu rodzajów promieniowania. Przeprowadzono także pomiary charakteryzujące zależność częstości magnetoplazmonów od napięcia polaryzującego bramkę oraz od obecności promieniowania widzialnego. Te zależności są bardzo istotne w praktycznym zastosowaniu detektorów THz oraz umożliwiają strojenie rezonansowej częstości detektora.

Teoretyczny opis badanych zjawisk jest przedmiotem 1. rozdziału niniejszej pracy. Opis próbek i ich procesu wytworzenia znajduje się w 2. rozdziale. Do najważniejszych faktów należy zaliczyć to, że do wytworzenia próbek wykorzystano heterostrukturę GaAs/AlGaAs o wysokiej ruchliwości elektronów. Wybrana została heterostruktura pochodząca z laboratorium prof. Vladimira Umanskyego z Instytutu Weizmanna w Izraelu. Próbki te charakteryzują się bardzo dużą ruchliwością elektronów, nieosiągalną obecnie w innych materiałach. Heterostruktury na których wytworzono badane w niniejszej pracy próbki, charakteryzował się ruchliwością elektronów ok. $1.5 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ w $T = 4 \text{ K}$. Wytworzone próbki miały postać prostokątów o powierzchni ok. 0.06 mm^2 , niektóre z nich zostały przykryte bramką, a inne pozostawiono bez bramki. Bramki miały różne kształty, co pozwalało na lepsze zrozumienie ich wpływu na odpowiedź próbki.

Rozdział 3. poświęcony jest opisowi wykorzystanych technik eksperymentalnych. Próbki badane były jako detektory w niskich temperaturach, najczęściej w 4.2 K. Próbka była poddawana działaniu promieniowania THz pochodzącego z szeregu źródeł monochromatycznych, w tym karcinotronu, diody VDI i lasera THz, o częstościach z zakresu 0.1–1.8 THz lub z lampy rtęciowej wykorzystanej w spektrometrze fourierowskim. Próbka była umieszczona w polu magnetycznym o kierunku prostopadłym do jej powierzchni, pomiar sygnału detekcji odbywał się w zależności od wielkości pola magnetycznego. Mierzono odpowiedź próbki będącą fotonapięciem generowanym przez promieniowanie THz pomiędzy dwoma kontaktami prądowymi.

W rozdziale 4. opisano wyniki eksperymentów oraz ich interpretację. Pomiar PV wykonany w zależności od pola magnetycznego pokazuje serię maksimów poprzedzających pole magnetyczne odpowiadające rezo-

nansowi cyklotronowemu. Sekwencja pomiarów wykonanych dla różnych częstości promienia THz pokazuje, że maksima przesuwają się w kierunku wyższych pól magnetycznych wraz z rosnącą częstością. Maksima zinterpretowane zostały jako kolejne mody magnetoplazmonu. W badanych próbkach magnetoplazmon może być wzbudzony na dwa sposoby: z wektorem falowym określonym okresem metalicznej siatki albo rozmiarem próbki. Dla większości próbek zaobserwowano drugi rodzaj wzbudzenia plazmy, który można wyobrażać sobie jak fale stojące w rezonatorze.

Pokazano, że widoczność wybranej rodziny modów magnetoplazmonów zależy od stosunków ich częstości oraz częstości pobudzającego układu promieniowania. Jest to efekt związany z nakrywaniem się maksimów odpowiadających kolejnym modom rezonansu magnetoplazmowego, w przypadku pomiarów wykonanych dla dostatecznie wysokich częstości promieniowania. Aby uniknąć tego efektu, przyszły detektor promieniowania THz należy projektować w możliwie prosty sposób, bez zbędnych wnęk rezonansowych, w których mogą wzbudzać się plazmony. Komercyjnie dostępne tranzystory mają często skomplikowane kształty, w których znajduje się wiele wnęk rezonansowych dla fal plazmowych. Z kolei, w przypadku urządzeń zawierających metaliczne siatki, rozmiar całego urządzenia musi być odpowiednio duży, aby wzbudzenia plazmy związane z wymiarami urządzenia miały znacząco mniejsze częstości od wzbudzeń związanych z okresem metalizacji.

Jeśli założyć dla każdego zaobserwowanego modu wzbudzeń plazmy odpowiadającą mu wartość wektora falowego, można wówczas wyznaczyć relację dyspersyjną plazmonu w szerokim zakresie częstości i wektorów falowych. Relacja dyspersyjna, obserwowanych w eksperymencie wzbudzeń, okazała się być taka sama dla próbek z cienką metalizacją bramki, jak i dla próbek bez bramki. Efekt ten został zinterpretowany jako skutek przezroczystości w zakresie THz cienkich warstw metalizacji (15 nm), z których wykonano bramki. Jednak w przypadku próbek z cienką bramką obserwowany jest wyłącznie co drugi mod, spośród tych obserwowanych w przypadku próbek bez bramki. W próbce o grubej metalizacji bramki, magnetoplazmon wzbudzany jest z dyspersją uwzględniającą ekranowanie 2DEG przez bramkę. Ta różnica w dyspersji plazmonów, w przypadkach próbek z cienką i grubą metalizacją, tłumaczona jest zależnością ekranowania promieniowania THz od grubości metalizacji. Kolejną obserwacją jest obecność w widmach, otrzymanych w szerokim zakresie częstości, maksimum odpowiadającego drugiej harmonicznej rezonansu cyklotronowego. Ten efekt tłumaczony jest jako skutek działania silnego i niejednorodnego w przestrzeni, oscylującego

pola elektrycznego, powstającego na krawędziach metalizacji, a w szczególności, na krawędziach bramek.

Wykonano także pomiary zależności widma detekcji od napięcia polaryzującego bramkę, pokazujące efekt przesuwania się położenia maksimumów rezonansów magnetoplazmowych. Jest to bardzo pożądane zjawisko, pozwalające na sterowanie rezonansową częstotliwością detekcji za pomocą napięcia przyłożonego do bramki FET. Przeprowadzono także eksperyment, w którym położenia maksimumów rezonansów magnetoplazmowych przesunięto poprzez oświetlenie próbki światłem widzialnym. Dowiedziono także, że spektroskopia fourierowska pozwala uzyskać wyniki będące w zgodzie z wynikami uzyskanymi za pomocą monochromatycznych źródeł promieniowania pracujących w podobnym zakresie częstotliwości, z dokładnością do faktu, że w eksperymencie fourierowskim obserwowany jest wyłącznie podstawowy mod magnetoplazmonu.

Przedstawione wyniki opisują wzbudzenia magnetoplazmowe w próbkach o średnich rozmiarach w zakresie częstotliwości promieniowania od 0.1 do 2.5 THz. Wnioski wynikające z niniejszej pracy mogą pozwolić na zbudowanie detektora promieniowania THz o przestrajalnej częstotliwości rezonansowej, a projekt urządzenia o dobrze rozdzielonych rezonansach magnetoplazmowych przedstawiony jest w podsumowaniu.