

# Magnetospektroskopia terahercowa studni kwantowych CdTe/CdMgTe o wysokiej ruchliwości elektronów

W ciągu ostatnich dwóch dekad obserwuje się gwałtowny rozwój zastosowań promieniowania terahercowego (THz), gdyż stwierdzono jego użyteczność w obszarach takich, jak obrazowanie medyczne, systemy bezpieczeństwa czy wykrywanie narkotyków, by wymienić tylko niektóre. Tym niemniej, mimo ogromnego wysiłku już włożonego w te badania, w dalszym ciągu wyzwaniem jest konstrukcja małych urządzeń THz pracujących w temperaturze pokojowej. Jak dotąd, w optoelektronice stosowane są głównie heterostruktury oparte na GaAs lub GaN i warstwy inwersyjne w krzemie. W takich układach obserwowano zjawiska rezonansowe takie, jak kolektywne wzbudzenia dwuwymiarowej (2D) plazmy elektronowej i rezonans cyklotronowy swobodnych elektronów (CR).

Przegląd literatury pokazuje, że prace dotyczące magnetospektroskopii THz studni kwantowych (QW) opartych na CdTe są nieliczne. Z powodu polarnego charakteru wiązań w sieci krystalicznej i stosunkowo niskiej energii fononów optycznych, wpływ efektu polaronowego na rezonans cyklotronowy oraz oddziaływanie plazmon - fonon są istotnie większe w CdTe niż w wymienionych powyżej materiałach. Lepsze zrozumienie tych podstawowych zjawisk jest niezwykle ważne dla działania urządzeń opartych na CdTe, takich jak np. detektory o przestrajalnej częstotliwości rezonansowej.

Celem niniejszej pracy jest badanie efektów wywołanych promieniowaniem THz w 2D plazmie elektronowej w studniach kwantowych opartych na CdTe, przy czym uwaga była skoncentrowana na wzbudzeniach dwuwymiarowej plazmy elektronowej i efektach wynikających z polarnej natury materiału. Doświadczenia były prowadzone na studniach kwantowych CdTe/CdMgTe o wysokiej ruchliwości elektronów, domieszkowych modulacyjnie domieszkami typu  $n$  w barierze bliższej powierzchni próbki. Wszystkie pomiary były przeprowadzone w temperaturze ciekłego helu. Seria próbek o różniących się parametrach, takich jak stopień domieszkowania i szerokość studni kwantowej, była badana w doświadczeniach polegających na pomiarze fotoprądu. Ponadto, wykonano pomiary transmisji na próbkach zawierających utworzoną litograficznie metalową bramkę w postaci siatki. Badano także fotoprąd w kwantowym kontakcie punktowym, wytworzonym za pomocą elektronolitografii.

W pierwszej kolejności, w celu charakteryzacji próbek, przeprowadzono pomiary magnetoprzewodnictwa. Analizując oscylacje Shubnikova - de Haasa określono koncentrację dwuwymiarowego gazu elektronowego, a także masę efektywną elektronów i kwantowy czas rozpraszania. Zaobserwowano także strukturę w spektrach dla czynnika wypełnienia poziomów Landaua  $\nu=4/3$ , którą można przypisać ułamkowemu kwantowemu efektowi Halla.

Badano widma fotoprądu w zależności od pola magnetycznego  $B$  przy pobudzaniu promieniowaniem o ustalonej częstotliwości generowanego przez laser THz. W niektórych próbkach zaobserwowano jedynie wąski pik rezonansu cyklotronowego ( $\Delta B_{FWHM} \sim 0.2$  T), zaś w innych - indukowane optycznie oscylacje Shubnikova - de Haasa oraz rezonans cyklotronowy. Nieobecność oscylacji SdH w niektórych próbkach może być wyjaśniona grzaniem dwuwymiarowego gazu elektronowego przez płynący przez próbkę prąd.

Analizując optycznie indukowane oscylacje SdH zauważono interesujący fakt - dodatkowe rozszczepienie poziomów Landaua dla czynnika wypełnienia równego  $\nu = 1, 2$  i  $4$ . To zjawisko zachodzi być może wskutek zniszczenia stanów związanych z całkowitym kwantowym efektem Halla wywołanego efektem bolometrycznym wynikającym z obecności padającego promieniowania THz. Pełniejsze zrozumienie zaobserwowanego zjawiska wymaga jednak dalszych badań.

Kolejnym tematem badań była detekcja promieniowania THz za pomocą próbek z plazmą 2D w studniach kwantowych CdTe/CdMgTe wyposażonych w bramki. W tym celu przygotowano kilka próbek z bramką w postaci złotej elektrody umożliwiającej zmianę koncentracji elektronów w studni. W tym przypadku zaobserwowano oscylacje SdH i rezonans cyklotronowy oraz niemonotoniczną zależność amplitudy rezonansu cyklotronowego od  $V_g$ . W ogólności, zmieniając  $V_g$  można zmniejszyć amplitudę piku rezonansu cyklotronowego aż do poziomu oscylacji SdH lub zwiększyć ją tak, by przekraczała wielkość oscylacji aż 20-krotnie. Ponadto, badano odpowiedź próbki dla kilku linii lasera i ustalonego pola magnetycznego  $B = B_{CR}$ . Opisana powyżej zależność amplitudy rezonansu cyklotronowego od  $V_g$  oznacza, inaczej mówiąc, możliwość strojenia on/off czułości detektora za pomocą napięcia przyłożonego do bramki. Inna próbka użyta w tych pomiarach miała kształt krzyża Halla z bramką nad przewodzącym kanałem, przy czym wykazano niemonotoniczną zależność amplitudy rezonansu cyklotronowego od napięcia polaryzującego bramkę. W tym jednak przypadku, zależność amplitudy rezonansu cyklotronowego od  $V_g$  ujawniła obecność kilku dobrze zaznaczonych plateau.

Widma fotoprądu w zależności od pola  $B$  były badane także dla kontaktu punkowego. Kontakt punkowy miał boczne bramki i kształtem przypominał klepsydrę. Widma zmierzono dla kilku linii laserowych i kilku wartości napięć przyłożonych do bramki. W obu przypadkach na niskopółowym zboczu piku rezonansu cyklotronowego zaobserwowano struktury. Stwierdzono, że odpowiadają one wzbudzeniu pierwszego i kolejnych modów oscylacji plazmy w polu magnetycznym, zwanych magnetoplazmonami. Stwierdzono, że częstota plazmonów nie zależy od polaryzacji bramki, co sugeruje, że wzbudzony rezonans pojawia się w szerokiej części

kanalu, a nie w jego przewężeniu. Stwierdzono, że częstość plazmonu nie zależy od napięcia polaryzującego bramkę, co sugerowało, że obserwowane rezonanse pojawiają się w szerokiej części kanału, a nie w jego przewężeniu. Analiza danych wykazała, że zaobserwowane plazmony mają charakter wzbudzeń plazmy niebramkowej i są związane w kanale o szerokości  $W = 2.4 \mu\text{m}$ .

W pomiarach transmisji wykonanych za pomocą spektrometru Fourierowskiego na próbkach z bramkami w kształcie siatek zaobserwowano wzrost masy efektywnej w silnym polu magnetycznym, który jest związany z rezonansowym efektem polaronowym. Widma transmisji otrzymane przy użyciu promieniowania lasera THz wykazują - dla próbki referencyjnej, bez bramki w postaci siatki - obecność głębokiego, symetrycznego minimum, wynikającego ze wzbudzenia rezonansu cyklotronowego. W przypadku próbek z bramką w postaci siatki na niskopółowym zboczu piku rezonansu cyklotronowego widoczne są dodatkowe struktury. Były one zaobserwowane dla dwóch różnych linii laserowych i dla siatek o różnym okresie. Zgodnie z analizą teoretyczną struktury te odpowiadają wzbudzeniom pierwszych czterech modów magnetoplazmonów o wektorach falowych określonych przez okres siatki. Wykazano, że te plazmony są mieszanym wzbudzeniem plazmonów ekranowanych - wzbudzanych pod metalowymi "palcami" siatki oraz nieekranowanych - wzbudzanych pomiędzy nimi. Stwierdzono, że proporcja plazmonów ekranowanych do nieekranowanych jest w przybliżeniu równa geometrycznemu czynnikowi wypełnienia powierzchni próbki przez siatkę. Analiza teoretyczna pozwoliła także na stwierdzenie, że częstość plazmonów w badanych studniach kwantowych jest silnie zależna od oddziaływania plazmon - fonon.

Podsumowując, wykazano obecność THz rezonansowej (rezonans cyklotronowy i dwuwymiarowe plazmony) oraz nierezonansowej (oscylacje Shubnikova - de Haasa) detekcji w studniach kwantowych CdTe/CdMgTe o dużej ruchliwości elektronów. Wykazano istotną rolę efektów wynikających z polarnej natury sieci CdTe - rezonansowego efektu polaronowego i oddziaływania plazmon - fonon. Zgodnie z najlepszą wiedzą autora, praca niniejsza jest pierwszą, w której badano plazmony w studniach kwantowych CdTe/CdMgTe metodami spektroskopii THz.