

RECENZJA

rozprawy doktorskiej magistra Marcina Białka zatytułowanej
“Spektroskopia THz magnetoplasmonów w heterostrukturze
GaAs/AlGaAs o wysokiej ruchliwości elektronów”

Recenzowana rozprawa doktorska powstała w ramach Studium Doktoranckiego Fizyki na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem dr. hab. Jerzego Łusakowskiego prof. UW. Jej tematyka koncentruje się na eksperymentalnych badaniach charakterystyk magnetoplasmonów wzbudzanych promieniowaniem THz w heterostrukturach GaAs/AlGaAs z dużą ruchliwością elektronów. Wyżej wspomniane heterostruktury zostały wychodowane w laboratoriach Weizman Institute of Science (Izrael). Większości pomiarów dokonano w laboratoriach Zakładu Fizyki Ciała Stałego Instytutu Fizyki Doświadczalnej UW. Praktycznie wszystkie wyniki prezentowane w rozprawie zostały opublikowane w pięciu wieloautorskich artykułach w czasopismach z tzw. listy filadelfijskiej - Acta Phys. Pol. A (Ref. 133), J. Appl. Phys. (Ref. 137), Appl. Phys. Lett. (Ref. 134), Phys. Rev. B (Ref. 135), Optical Engineering (Ref. 136). Liczba autorów waha się od dziewięciu (Ref. 133 i 137) do czterech (Ref. 136). Doktorant jest pierwszym autorem we wszystkich wyżej wspomnianych artykułach. Niestety, mgr M. Białek nie precyzuje jak duży i jakiego rodzaju był jego udział w powyższych publikacjach. Przypuszczam, że tego typu informacje będą zawarte w opinii promotora. Dorobek naukowym mgra M. Białka obejmuje ponadto współautorstwo kilku innych publikacji (głównie doniesienia konferencyjne) o tematyce bliskiej problematyce rozprawy. Wskazuje to niewątpliwie na dużą aktualność i wysoki poziom badań prowadzonych z udziałem doktoranta.

Licząca 153 strony rozprawa składa się z pięciu rozdziałów. Poprzedza je pięciostronicowe streszczenie, które można traktować jako wstęp do rozprawy. Rozdział piąty jest podsumowaniem rozprawy. Bibliografia zawiera 153 pozycje. Mam pewne zastrzeżenia co do jej kompletności, gdyż autor jako najnowszą pracę przeglądową związaną z tematyką rozprawy wymienia pozycję z 2010 (Ref. 104). Moim zdaniem bibliografia powinna uwzględniać również nowsze prace przeglądowe z tego zakresu, np. T. Otsuji et al., "Emission and detection of terahertz radiation using two-dimensional plasmons in semiconductor nanoheterostructures for nondestructive

tive evaluations” Optical Engineering **53**, 031206 (2014), gdzie omawiana jest między innymi najnowsza generacja plazmonowych detektorów terahertzowych z podwójnym asymetrycznym ”gratingiem”. Szkoda także, że autor nie wspomina o pracach wskazujących na możliwość istotnej poprawy charakterystyk wyżej wspomnianych detektorów (również w obszarze temperatur pokojowych) poprzez wbudowanie do nich warstwy grafenu (patrz J. M. Jornet and I. F. Aksyildiz ”*Graphene-based plasmonic nano-transceiver for terahertz band communication*” Proc. of the 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2014)).

W pierwszym akapicie streszczenia/wstępu (patrz również podrozdział 1.3) autor uzasadnia celowość badania wzbudzeń plazmonowych w układach HEMT. W pełni zgadam się z przedstawionymi tam argumentami. Jedynie zaakcentowałbym mocniej możliwość wykorzystania mikrochipowych emiterów i detektorów promieniowania THz w komunikacji bezprzewodowej (S. Blin et al. ”*Wireless communication at 310 GHz using GaAs high-electron-mobility transistors for detection*” Communications and Networks **15**, 559 (2013)). W tym miejscu warto również podkreślić fakt, że badanie wzbudzeń plazmonowych w tranzystorach polowych może być interesujące także z punktu widzenia istotnej roli (objętościowych) wzbudzeń plazmonowych przy skalowaniu tranzystorów MOSFET (M-J. Chen et al., IEEE Electron Device Letters, **36**, 265 (2015)). W drugiej części streszczenia/wstępu autor prezentuje cel rozprawy i omawia zawartości poszczególnych rozdziałów.

Nie ulega wątpliwości, że tematykę rozprawy można uznać za bardzo aktualną. Cele badawcze są jasno sprecyzowane i odpowiadają tytułowi rozprawy. Sprowadzają się głównie do znalezienia zależności dyspersyjnych plazmonów/magnetoplazmonów wzbudzanych promieniowaniem z przedziału 0, 1–2, 5 THz (z szeregu różnych źródeł) w dwuwymiarowym gazie elektronowym w strukturach typu HEMT. Mierzone są fotonapięcia (pomiędzy źródłem i drenem) towarzyszące rezonansowym wzbudzeniom plazmonów/magnetoplazmonów. W układach, w których gaz elektronowy jest przykryty bramką, pomiary fotonapięcia wykonano dla różnych polaryzacji bramki. Wszystkie eksperymenty przeprowadzono w temperaturach helowych.

Rozdział pierwszy rozprawy stanowi wprowadzenie teoretyczne, potrzebne do analizy materiału doświadczalnego prezentowanego w pozostałej części pracy. W mojej opinii jest to najsłabsza część rozprawy, zarówno pod względem merytorycznym, jak i edytorskim. Należy jednak podkreślić, że zawarte w omawianym rozdziale usterki nie mają w zasadzie negatywnego wpływu na pozostałą część rozprawy. Niemniej jednak z obowiązku recenzenta omawiam je

poniżej.

Rozdział pierwszy zyskałby znacznie na kompletności, gdyby autor podał nawet przybliżone wartości energii podpasma podstawowego ($E_{\perp 0}$) i wzbudzonego ($E_{\perp 1}$) w zerowym polu magnetycznym. Nie ulega wątpliwości, że w badanych przez doktoranta próbkach energia wzbudzeń międzypodpasmowych jest dużo mniejsza niż energia plazmonów 2D $\hbar\omega_p$ ($\ll E_{\perp 10} = E_{\perp 1} - E_{\perp 0}$). Zatem pominięcie przez autora efektów związanych ze sprzężeniem pomiędzy wyżej wspomnianymi wzbudzeniami ma dobre uzasadnienie. Niestety nie jest to wyraźnie zaakcentowane przez autora. Z drugiej strony należy jednak zauważyć, że maksymalna energia fotonów wykorzystywanych w spektrometrze fourierowskim ($\hbar\omega \lesssim 10$ meV) może już być porównywalna z energią przejść międzypodpasmowych $E_{\perp 10}$ (patrz np. A. D. Wieck et al. "Intersubband energies in GaAs-Ga_{1-x}Al_x As heterojunctions" Phys. Rev. B 35, 4145 (1987)). Istnieje zatem potencjalna możliwość wzbudzania plazmonów międzypodpasmowych w próbkach z bramką periodyczną. Całkowity brak dyskusji roli wyżej wspomnianych wzbudzeń jest tym dziwniejszy, że w wykazie bibliografii znajdują się pozycje (Ref. 73 i 78) zawierające w tytule termin "intersubband Bernstein modes". Nie wiem czy należy to traktować jako usterkę natury redakcyjnej, czy raczej jako lukę w wiedzy teoretycznej doktoranta w zakresie wzbudzeń międzypodpasmowych. Drugą ewentualność wydaje się potwierdzać błędna interpretacja energii E_0 (pojawiającej się na Rys. 1.3) jako energii dna pasma przewodnictwa (E_c) a nie jako energii $E_{\perp 0}$. Ponieważ pasmo przewodnictwa nie jest paraboliczne, istnienie różnicy pomiędzy $E_{\perp 0}$ i E_c wpływa w sposób istotny na wartość masy cyklotronowej (M. Horst et al., Solid State Commun. 53, 403 (1985)). Podobnego typu usterka znajduje się na stronie 17. Pojawia się tam bowiem następujące zdanie. "W przypadku plazmonów propagujących się w trójwymiarowym gazie elektronowym $\omega_p^{3D}(k=0) > 0$, ... a więc wzbudzenie plazmonów przez światło jest możliwe." Wydaje się, że autor zapomniał, iż światło jest falą poprzeczną, a plazmon podłużną. Sprzężenie pomiędzy tego typu falami jest możliwe tylko przy udziale trzeciej fali (M.V. Goldman, Annales of Physics, 38, 95 (1996)).

Należy również odnotować fakt, że omawiając metody wzbudzania plazmonów w dwuwymiarowym gazie elektronowym autor całkowicie pomija metodę ATR (*attenuated total reflection*). Wyżej wspomniana metoda jest ostatnio dyskutowana (w kontekście terahertzowych detektorów) przez D. V. Fateev et al. Semiconductors, 49, 23 (2015).

Pewne nieścisłości zauważyłem także na stronach 20, 25 i 30. W pierwszym przypadku

autor nawiązuje do pionierskich obserwacji wzbudzeń plazmonów w strukturach MOSFET z okresową bramką (Ref. 48). Znajduje się tam błędne stwierdzenie, że w wyżej wspomnianych strukturach koncentracja elektronów pod bramką była zerowa. Z kolei na stronie 25 autor pisze, że mod Bernsteina i magnetoplazmon oddziałują ze sobą, co prowadzi do tzw. antyprzecięcia. Następnie (bez odwołania się do literatury) pojawia się niezrozumiała uwaga, że takie zachowanie się magnetoplazmonu i modu Bernsteina uwarunkowane jest ich różną symetrią. Na stronie 30 autor błędnie stwierdza, że jednym z głównych zastosowań dwuwymiarowego gazu elektronowego są tranzystory polowe. Bardziej odpowiednia byłaby np. wzmianka o tzw. strojonych kropkach kwantowych na bazie dwuwymiarowego gazu elektronowego.

Przejdę teraz do usterek edytorskich. Ponieważ ich obszerny zestaw zawiera załączona do recenzji lista, ograniczę się tylko do następującej uwagi odnoszącej się zarówno do rozdziału pierwszego, jak i do całej rozprawy. Duża część prezentowanych w pracy rysunków pojawia się zbyt wcześnie, tzn. na stronach poprzedzających ich dyskusję. Podpisy rysunków są zbyt oszczędne, a objaśnienia symboli pojawiających się na rysunkach zawarte są często w tekście. Zdarzają się również przypadki, że rysunki nie są w ogóle komentowane w tekście (np. rys. 1.6, 1.7 i 1.8). Utrudnia to niewątpliwie czytanie pracy.

W rozdziale drugim autor opisuje cztery rodzaje badanych próbek podając istotne informacje dotyczące technologicznych aspektów (procesy litograficzne) ich przygotowania. Jako niespecjalista w zakresie technologii z zainteresowaniem przeczytałem powyższy rozdział. Jedyna istotniejsza uwaga dotycząca tego rozdziału związana jest z brakiem komentarza wyjaśniającego, dlaczego wybór padł na meandryczną bramkę. W kontekście wspomnianej już wcześniej pracy przeglądowej Otsuji et al., periodyczna bramka z wbudowaną asymetrią byłaby bardziej interesująca.

Rozdział trzeci rozprawy poświęcony jest opisowi wykorzystywanej przez doktoranta aparatury pomiarowej. Jej najważniejszą część stanowi kriostat z nadprzewodzącą cewką. Autor szczegółowo omawia procedury chłodzenia próbek. Następnie przechodzi do opisu elementów układu służącego do detekcji promieniowania THz tzn. źródła promieniowania (laser CO₂, VDI i karcionotron) oraz układ optyczny sprzęgający źródło promieniowania z kriostatem. Omawiane są również pomiary transportowe oraz sposoby pomiarów fotoodpowiedzi próbki z wykorzystaniem lock-in. Końcowa część rozdziału trzeciego omawia szczegóły techniczne dotyczące spektrometru fourierowskiego (w Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych w Grenoble), na którym mgr M.

Białek wykonał serię pomiarów fotoodpowiedzi dla części próbek.

Zasadniczą część rozprawy stanowi rozdział czwarty zatytułowany *Wyniki i interpretacja pomiarów*. Jego zawartość pokrywa się w znacznym stopniu z zawartością pięciu artykułów opublikowanych w (recenzowanych) renomowanych czasopismach. W związku z powyższym ograniczę się do wyliczenia najważniejszych osiągnięć prezentowanych w rozdziale czwartym. Wynikające z badań doktoranta wnioski można przedstawić następująco:

- Obecność bramki w sposób istotny wpływa na widmo wzbudzeń plazmonowych, nawet gdy bramka nie jest spolaryzowana. Wpływ bramki jest szczególnie silny, gdy jej grubość jest odpowiednio duża. Można wówczas, poprzez dobór kształtu bramki, wpływać na częstotści rezonansowe detektora. Dodatkowa modyfikacja częstotści rezonansowych jest możliwa poprzez polaryzację bramki.
- Występujące, w okolicy podwójnej częstotści cyklotronowej, rezonansowe wzmocnienie fotonapięcia ma związek z siłą pendomotoryczną pojawiającą się na krawędziach metalizacji, gdy próbki są oświetlone promieniowaniem terahertzowym.
- Wyniki pomiarów widma wzbudzeń magnetoplazmonów otrzymane przy pomocy spektroskopu fourierowskiego i w oparciu o źródła monochromatyczne są konsystentne. Niemniej jednak interpretacja pomiarów fourierowskich jest bardziej złożona, między innymi ze względu na mniejszą moc promieniowania. Wymaga też uwzględnienia rozgrzewania się gazu elektronowego i efektów wywołanych interferencją światła w podkładce.
- Zwiększenie koncentracji gazu elektronowego elektronów, a tym samym modyfikacja widma wzbudzeń plazmonowych/magnetoplazmonowych są możliwe poprzez oświetlenie próbki (niebramkowej) światłem widzialnym. Osiągane tą drogą zmiany koncentracji mają odwracalny charakter i są większe od otrzymywanych poprzez polaryzację bramki.

Jedyna istotniejsza uwaga dotycząca omawianego rozdziału związana jest z faktem, że analizując wyniki pomiarowe doktorant nie rozważał możliwości hybrydyzacji plazmonów z obszarów przykrytych i nieprzykrytych bramką (O. Sydoruk et al. Phys. Rev. B **92**, 195304 (2015)). Autor powinien również nieco więcej uwagi poświęcić oszacowaniu błędów pomiarowych. Przykładowo, na stronie 113 bez żadnego komentarza autor stwierdza "Za niepewność wielkości B_n przyjęto 0.01 T oraz uznano, że masę efektywną znamy z dokładnością do 1.0%."

Ze względu na duże walory poznawcze, wyniki otrzymane przez doktoranta mogą zainteresować szerokie grono fizyków pracujących nad problemem wykorzystania plazmonów do generacji i detekcji promieniowania terahertzowego. Wnioski wynikające z badań doktoranta są bardzo obiecujące, gdyż wskazują na możliwość optymalizacji kształtu bramki w detektorach opierających się o tranzystory HEMT. Niemniej jednak musimy pamiętać, że istotna poprawa ich charakterystyk związana jest z koniecznością stosowania bramek o bardziej złożonej geometrii, niż rozważane w rozprawie (T. Watanabe et al. *Ultrahigh sensitive plasmonic terahertz detector based on an asymmetric dual-grating gate HEMT* Solid State Electron. 78, 109 (2012)).

Wysoki poziom merytoryczny wykonanych przez doktoranta badań jest w dużym stopniu związany z faktem, iż korzystał on z bardzo solidnych metod i technik badawczych. Nie bez znaczenia było też wsparcie techniczne i merytoryczne otrzymane od bardziej doświadczonych pracowników IFD UW i IF PAN, jak również dostęp do doskonałej jakości heterostruktur GaAs/AlGaAs.

Podsumowując stwierdzam, iż opiniowana rozprawa spełnia stawiany przez ustawę warunek oryginalnego rozwiązania przez doktoranta zagadnienia naukowego. Daje również podstawę do stwierdzenia, że doktorant posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Świadczą o tym, zarówno pomiary wykonane na wysokiej klasy aparaturze, jak również staranna i krytyczna ich interpretacja przeprowadzona w powiązaniu z odpowiednimi modelami teoretycznymi. Uwzględniając powyższe oraz mając na uwadze wystąpienia seminaryjne doktoranta, które miałem okazję wysłuchać, stwierdzam też, że posiada on odpowiednią wiedzę teoretyczną w zakresie tematyki rozprawy.

W oparciu o powyższe fakty wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra Marcina Białka do publicznej obrony.

Lublin 11 - 01 - 2016 r.



Wykaz usterek

zauważonych w rozprawie doktorskiej mgra M. Białka

1. s. IV⁵ — laser $\rightarrow$ lasery
2. s. V¹⁸ — charakteryzował $\rightarrow$ charakteryzowały
3. s. VI¹⁹ — odpowiadającą $\rightarrow$ znamy odpowiadającą
4. s. 2 równanie (1.1) — $\sigma(\omega) \rightarrow \boldsymbol{\sigma}(\omega)$
5. s. 3 — $\tau^* \rightarrow \tau^*(\omega) \times 6$
6. s. 3₅ — widocznym $\rightarrow$ widoczne
7. s. 4 i 5 lewa strona wzorów (1.9), (1.10) i (1.11) — wstawić $H =$
8. s. 6 Rys. 1.3 — symbol E_0 koliduje z definicją (1.2)
9. s. 9¹¹ — ... o charakterze falowym $\rightarrow$ mające charakter fali podłużnej
10. s. 10 wzór (1.20) — $v_F k^2 \rightarrow (v_F k)^2$
11. s. 12₂ — ... to, że ... $\rightarrow$... to z tym, że ...
12. s. 13 wzór (1.25) — brak definicji symbolu $\omega_{p,l}$
13. s. 14⁹ — $\omega(k) \rightarrow \omega_p(k)$
14. s. 17 Rys. 1.7 — brak informacji o parametrach układu
15. s. 17₁₃ — ... zachowania pędu. $\rightarrow$... zachowania pędu i energii
16. s. 17₆ — $\omega(k=0) > 0 \rightarrow \omega_p^{3D}(k=0) > 0$
17. s. 18 Rys. 1.8 — rysunek błędnie sugeruje, że plazmony wzbudzone są dalekim polem, a nie polem bliskim, jak nadmieniono w tekście.
18. s. 23²⁷ — ... wektorowi falowemu plazmonu $\mathbf{k}$. $\rightarrow$... długości wektora falowego plazmonu k .
19. s. 23 wzór (1.31) — brak definicji wielkości $\omega_{p,n}$, która pojawia się wielokrotnie w tekście rozprawy.

20. s. 30 — Rys. 1.17 błędnie sugeruje, że dwuwymiarowy gaz elektronowy jest obecny również pod dranem
21. s. 32 — tekst błędnie informuje czytelnika, że na Rys. 1.2 pojawia się niebieska linia przerywana; wyżej wspomniana linia jest ciągła
22. s. 33₆ i wzór (1.33) — $m \rightarrow m^*$
23. s. 33 — równanie (1.34) powinno być uzupełnione równaniem wiążącym lokalną gęstość elektronów z potencjałem U .
24. s. 34¹⁹ — $\dots \omega_{p,n}(k_n) \dots \rightarrow \dots \omega_p(k_n) \dots$
25. s. 36 wzór (1.35) — $-\frac{\tau}{Nm} \frac{\partial N k_B T_e(x)}{\partial x} \rightarrow -\frac{\tau}{Nm^*} \frac{\partial N(k_B T_e(x))}{\partial x}$
26. s. 44² — omowych, jak i kolejne, rozpoczął $\rightarrow$ omowych, rozpoczął
27. s. 45⁴ — cp $\rightarrow$ co
28. s. 62 — nieprawidłowa kolejność pojawiania się rysunków
29. s. 74₇ — nadawać im nadawać $\rightarrow$ nadawać im
30. s. 83 Rys. 4.9 — usterki techniczne w rozmieszczeniu tekstu w podpisie rysunku; powyższy rysunek powinien pojawiać się po rys. 4.10
31. s. 83₉ — Zdecydowano się jednak uzupełnia... $\rightarrow$ Zdecydowano się jednak ?...
32. s. 88₁₆ — $\omega_p^2 \rightarrow \omega_{p,n}^2$
33. s. 95₁₃ — charaktery $\rightarrow$ charakteru
34. s. 97₁₇ — jednak powstania $\rightarrow$ jednak do powstania
35. s. 98₁₆ — $\hbar 2\omega \rightarrow 2\hbar\omega$
36. s. 100₆ — jakością widm $\rightarrow$ jakością
37. s. 109 podpis Rys. 4.25 — brak informacji, co przedstawiają linie niebieskie
38. s. 117₉ — Tutaj należy, że $\rightarrow$ Tutaj należy zauważyć, że
39. s. 119⁹ — że próbce $\rightarrow$ że w próbce
40. s. 137 — na próbce z bramką $\rightarrow$ na próbce bez bramki