

dr hab. Łukasz Kłopotowski
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
al. Lotników 32/64
02-668 Warszawa

Wpłynęło dnia 2019-07-30
Warszawa, 29 lipca 2019

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Piotra Drózdza zatytułowanej *Dynamika kwazicząstek w strukturach InGaN/GaN na podłożach o różnym odorientowaniu*

Praca doktorska pana Piotra Drózdza dotyczy właściwości optycznych studni kwantowych z InGaN hodowanych na specjalnie przygotowanych podłożach pozwalających na płynne sterowanie zawartością indu. Jest to możliwe dzięki uzyskaniu tzw. odorientowania podłoża — wprowadzeniu niezerowego kąta między powierzchnią podłoża, a krystalograficzną osią c struktury wurcytu poprzez stosowną strukturyzację powierzchni przy pomocy fotolitografii. Studnie takie są ciekawe same w sobie, gdyż pozwalają na badania wpływu warunków hodowania na właściwości morfologiczne i optyczne, a także mogłyby znaleźć zastosowania jako obszar aktywny diód świecących w różnych kolorach. Praca liczy 139 stron, podzielona jest na sześć rozdziałów. Pierwszy z nich stanowi ogólne wprowadzenie do tematu i przedstawia motywację do podjęcia opisywanych badań. Rozdział drugi opisuje zjawiska z którymi Autor następnie spotyka się w toku badań. Autor przedstawia ogólnie właściwości optyczne półprzewodników, właściwości planarnych struktur azotkowych, wpływ fluktuacji na właściwości optyczne oraz mechanizm i konsekwencje dyfuzji ekscytonów. Kolejny rozdział poświęcony jest omówieniu technik doświadczalnych. Rozdział czwarty zawiera opis badanych próbek. W szczególności Autor omawia tu w jaki sposób można wprowadzić kąt odorientowania podłoża przy użyciu fotolitografii na poszczególnych obszarach próbki wyhodowanej w jednym procesie. Uzyskanie różnych kątów odorientowania w jednej próbce jest istotnym osiągnięciem, gdyż większość dotychczasowych badań wpływu tego kąta na właściwości optyczne odbywała się na próbkach hodowanych w osobnych procesach. W rozdziale piątym, najobszerniejszym, Autor przedstawia oryginalne wyniki swoich badań. Rozdział szósty zawiera podsumowanie i wnioski, po których następuje jeszcze spis cytowanej literatury. Wyniki zamieszczone w rozprawie pana mgr. Drózdza zostały opublikowane w czterech artykułach i przedstawione w formie referatu na czterech międzynarodowych konferencjach. Brak jest informacji o prezentacjach w formie plakatu.

Rozdział poświęcony autorskim badaniom pana Drózdza podzielony na pięć podrozdziałów. W podrozdziale 5.1 Autor przedstawia wyniki badań powierzchni próbek przy użyciu mikroskopu sił atomowych. Badania te pozwalają Autorowi określić kąt odorientowania w poszczególnych obszarach próbki zdefiniowanych litograficznie. W podrozdziale 5.2 Autor opisuje wpływ kąta odorientowania na energię i czas życia fotoluminescencji. Analiza tych wielkości oraz badań rozpraszania rentgenowskiego pozwala stwierdzić, iż wraz z rosnącym kątem odorientowania maleje zawartość molowa indu w stopie InGaN budującym studnię. Fotolitografia pozwala zatem na uzyskanie strojenia zawartością indu w monolitycznych urządzeniach, co zostało wykorzystane do

wytworzenia macierzy diód świecących w różnych długościach fal. Badania tych diód, w szczególności określenie zakresu strojenia długością fali emisji światła, są przedmiotem podrozdziału 5.4. W podrozdziale 5.3 Autor bada wpływ fluktuacji potencjału studni kwantowej na jej właściwości optyczne — energię i czas życia fotoluminescencji. Do wyników pomiarów Autor dopasowuje trzy modele teoretyczne, w tym własny tzw. model dynamiczny, który jako jedyny pozwala na ilościowe odtworzenie zależności temperaturowych obu mierzonych parametrów. Na podstawie dopasowanych wielkości Autor stara się następnie wyciągnąć wnioski na temat statystyk fluktuacji obecnych w poszczególnych próbkach. Autor komentuje także czasowe zmiany kształtu widma fotoluminescencji wzbudzonego krótkim impulsem laserowym i odnosi je do czasowych zmian pól elektrycznych obecnych w studniach. W podrozdziale 5.5 Autor opisuje wyniki badań nad dyfuzją ekscytonów w płaszczyźnie studni kwantowych wbudowanych w strukturę diód $p-n$. Pomiarów te są wynikiem trudnego eksperymentu, w którym Autor mapuje przestrzenny rozkład intensywności fotoluminescencji z próbki i pokazuje na jaką odległość rozprzyskują się ekscytony po fotowzbudzeniu. Okazuje się, że zasięg dyfuzji ograniczony jest dopiero przez strukturyzację próbki: wytworzenie większego potencjału przez niższą zawartość indu w studni, bądź przez obecność napyłonych na powierzchni kontaktów. Dopasowując model teoretyczny oparty na równaniu dyfuzji do danych doświadczalnych Autor uzyskuje informację o stałej dyfuzji i porównuje wyniki z badaniami innych studni azotkowych.

Należy podkreślić, że badania pana Drózdza dotyczą bardzo skomplikowanych struktur, wytwarzanych w wieloetapowych procesach i składających się z wielu warstw różnych półprzewodników. Poszczególne etapy wytwarzania jak również poszczególne składowe struktury wprowadzają parametry, często trudne do kontrolowania, wpływające na globalne właściwości optyczne. Interpretując dane doświadczalne Autor rzetelnie stara się odwickłać wkłady od różnych zjawisk. Na podkreślenie zasługuje także przeprowadzenie pomiarów obrazowania dyfuzji ekscytonów, a w szczególności skorelowanie obserwowanego obrazu fotoluminescencji z obrazem struktury próbki, co pozwoliło na wnikliwą analizę procesu dyfuzji.

Badania pana mgr. Drózdza są ciekawe, ale lektura rozprawy narzuca szereg pytań, na które chciałbym aby Autor udzielił odpowiedzi w czasie publicznej obrony.

1. W kontekście modelu dynamicznego rozwiniętego przez Autora i opisanego w rozdziale 2.5 narzucają się dwa pytania. Po pierwsze Autor milcząco zakłada, iż rekombinacja ekscytonów jakie trafiły do stożka światła odbywa się znacznie szybciej niż rozpraszanie ekscytonów między stanami o wyższych energiach. Czy to założenie istotnie jest spełnione? Jakich czasów rozpraszania należy się spodziewać i jaki jest radiacyjny czas życia w studni z InGaN? Po wtóre, wyprowadzając równanie 2.57 opisujące czas życia fotoluminescencji ekscytonów w nieuporządkowanym potencjale, Autor rozważa zależność prawdopodobieństwa rozpraszania do stożka światła p_r od temperatury. Zależność ta jest, jak pokazuje równanie 2.54, uwarunkowana wymiarowością problemu, ale Autor nie pisze jaką wymiarowość zakłada. Okazuje się, że równanie 2.57 wyprowadzone jest zakładając rozpraszanie jak dla układu zero-

- wymiarowego, chociaż Autor bada studnie kwantowe i zakłada paraboliczną dyspersję energii ekscytynu w funkcji wektora falowego. Jak rozwiązać tę sprzeczność?
2. Chociaż modele opisane w rozdziale 2.5 dobrze opisują dane doświadczalne (jak pokazano w rozdziale 5.3), nie uwzględniają one możliwości transferu (hoppingu) ekscytynów pomiędzy stanami zlokalizowanymi związanymi z fluktuacjami zawartości indu. Możliwość taka nie jest dyskutowana w rozprawie, choć wydaje się iż jej istnienie doprowadziłoby do obserwacji kształtu S w zależności temperaturowej widma fotoluminescencji oraz do przesunięcia jego środka ciężkości w stronę niższych energii z czasem po impulsowym wzbudzeniu. (Patrz Baranovskii *et al.* Phys. Rev. B **58**, 13081 (1998) i Baranowski *et al.* Appl. Phys. Lett. **100**, 202105 (2012).) Oba te zjawiska są obserwowane przez mgr. Drózdza. Czy zatem Autor rozważał możliwość hoppingu pomiędzy stanami zlokalizowanymi i czy ten mechanizm może być odpowiedzialny za część jego obserwacji?
 3. Inną interesującą możliwością nie realizowaną przez Autora są rozdzielone czasowo pomiary dyfuzji ekscytynów. Opisując układy doświadczalne Autor wskazuje taką możliwość na str. 33, gdzie pisze, że *możliwe jest zatem rzutowanie obrazu próbki na detektor liniowy CCD lub na szczelinę kamery smugowej*. Jednak w rozprawie opisane są wyniki uzyskane jedynie przy pomocy kamery CCD, czyli w stanie ustalonym. Pomiary kamerą smugową pozwoliłyby bezpośrednio zmierzyć dynamikę dyfuzji ekscytynów. Czy takie pomiary były prowadzone?
 4. Innym, być może ważniejszym pytaniem jakie narzuca się w kontekście badań dyfuzji, jest pytanie o rolę badanych przez Autora fluktuacji potencjału studni. Można by się spodziewać, że dla próbki o większym nieporządku, czyli większych fluktuacjach potencjału, droga dyfuzji będzie krótsza. W rozdziale 5.3 Autor uzyskał informację o rozkładzie energii fluktuacji w zależności od kąta odorientowania. W rozdziale 5.5 Autor pokazuje zależność drogi i współczynnika dyfuzji od tego kąta. Czy możliwe jest zatem powiązanie tych danych i uzyskanie odpowiedzi na pytanie, czy fluktuacje ograniczają dyfuzję ekscytynów?
 5. Kluczowym wnioskiem z badań nad rozprzeczaniem się sygnału fotoluminescencji w przestrzeni jest stwierdzenie, że za efekt ten odpowiedzialna jest dyfuzja ekscytynów. Wniosek ten wyciągnięty jest w oparciu o badania drogi dyfuzji w funkcji temperatury. Do danych dopasowana jest zależność 2.42, której postać jest bardzo skrótowo opisana w tekście. Na str. 21 Autor pisze tylko, że *po uwzględnieniu procesów rozpraszania otrzymuje się [taki] wzór na zależność drogi dyfuzji od temperatury*. Moim zdaniem ten opis jest niedostateczny, gdyż uniemożliwia stwierdzenie czy zastosowany model jest spójny. Prosiłbym o szczegółowe wyjaśnienie, skąd wzięto się równanie 2.42.

Opisawszy ogólnie zawartość merytoryczną rozprawy pana mgr. Drózdza muszę odnieść się do tego, jak praca jest napisana. Kwestia ta ma znaczenie, gdyż rozprawa doktorska powinna nie tylko dokumentować oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, ale także wykazywać ogólną wiedzę kandydata na temat podjętej tematyki oraz dowodzić jego umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Tymczasem, jeśli chodzi o ten ostatni warunek, praca pana mgr. Drózdza pozostawia stanowczo poczucie niedosytu. Poniżej wymieniam najpoważniejsze uchybienia i chciałbym prosić, aby Autor odniósł się do nich w czasie publicznej obrony.

1. Nie jest dla mnie jasne, jaką częścią opisywanych eksperymentów mgr Drózdź zajmował się osobiście. Na podstawie rozdziału o technikach doświadczalnych można sądzić, iż Autor zajmował się jedynie pomiarami fotoluminescencji oraz badaniami mikroskopem sił atomowych. Tymczasem, jak wspomniałem powyżej, opisywane badania dotyczą skomplikowanych próbek, których wytworzenie składa się z wielu etapów i które wymagają licznych badań charakterystycznych. Wytworzenie odorientowanych obszarów oraz kontaktów do diód p-n odbywa się przez fotolitografię, kontakty elektryczne wymagają bondowania drutów. W pracy pojawiają się wyniki pomiarów charakterystyk prądowo-napięciowych, pomiarów dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego, pomiarów profilometrem. Nie jest nigdzie napisane, kto to zrobił. Dopiero z podziękowań można dowiedzieć się, kto wyhodował próbki, ale są także podziękowania za pomiary fotoluminescencji.
2. Jednym z najistotniejszych zjawisk badanych przez Autora jest wpływ kąta odorientowania na właściwości optyczne studni z InGaN. Tymczasem kąt ów nie jest nigdzie w pracy jednoznacznie zdefiniowany. Co gorsza, Autor odnosi się do tego kąta czasem jako do kąta odorientowania, czasem jako do kąta do odchylenia, a czasem jako do kąta skosu, co sugeruje że ma on do czynienia z trzema różnymi wielkościami. Sprawę utrudnia fakt, iż w rzeczywistości Autor ma do czynienia z dwoma wkładami do kąta odorientowania: od dezorientacji samego podłoża i od odorientowania uzyskanemu przez post-processing (czyli fotolitografię). Jeden rysunek rozwiązałby problem i sprawił, że praca stałaby się znacznie bardziej zrozumiała. Zadziwiającym jest dla mnie brak takiego rysunku zwłaszcza, iż jest on pokazany w artykule mgr. Drózdźa z *physica status solidi A* z roku 2017. Co więcej, opis wyznaczenia kąta odorientowania zawarty w rozdziale 4.2.1 jest tak mętny, iż nie jest nawet jasne czy odbywa się przez pomiar mikroskopem sił atomowych, czy profilometrem. Autor opisuje też słownie co należy przez co podzielić, zamiast napisać równanie.
3. Rozdział 2.5 zawiera omówienie modeli teoretycznych opisujących wpływ fluktuacji potencjału studni kwantowej na energię i czas życia fotoluminescencji. Omówienie to zawiera ponadprzeciętną liczbę błędów i niedookreśleń. W konsekwencji czytający ma wrażenie, że Autor nie ma pojęcia o czym pisze. Na przykład, wielkość E_0 pojawia się po raz pierwszy jako (niezdefiniowana) energia przerwy energetycznej w temperaturze $T = 0$ we wzorze 2.43 na str. 22. Na kolejnej stronie, we wzorze 2.44 E_0 to *średnia energia elektronu zlokalizowanego w minimum potencjału*. Natomiast na str. 26, omawiając równanie 2.52 Autor pisze, iż E_0 to energia stanu zdelokalizowanego. Omawiając własny model, tzw. model dynamiczny, Autor myli prawdopodobieństwo rozproszenia do stożka światła (parametr p_r) z prawdopodobieństwem rekombinacji promienistej (parametr γ , równanie 2.54). Największym defektem opisu modeli teoretycznych jest jednak brak jasnej definicji wszystkich parametrów (a jest ich dziewięć), określenia które z nich są parametrami dopasowania, a które są ustalone i na jakiej podstawie. Na przykład, Autor enigmatycznie stwierdza, że *temperatura T_{eff} jest efektywną temperaturą gazu ekscytonowego, która wiąże się z temperaturą sieci w sposób opisany wzorem 2.63*, w którym pojawia się temperatura sieci T_{latt} i czytelnikowi tylko pozostaje domyślić się iż T_{latt} to to samo co T . Czytelnik dowiaduje się też, że $\Delta T = 95$ K, ale nie wiadomo dlaczego. Nie wiadomo też, jak r_{tot} wiąże się z równaniem 2.26. Ponadto, dyskutując wyniki dopasowań modeli teoretycznych do danych doświadczalnych na str. 65 Autor podaje tylko wartości parametrów σ , ΔE i E_n (który

zresztą nazywa się E_{nrad} na str. 29), chociaż parametrami dopasowania wydają się być także a , τ_{rad} i r_{nrad} , których wartości ani sens fizyczny nie są nigdzie omówione.

4. W rozdziale 5.4, na str. 83, Autor zwraca uwagę, że efekty takie jak zmiana energii świecenia studni kwantowej, czy zmiana czasu zaniku fotoluminescencji mogą [...] być spowodowane zarówno przez zmianę zawartości indu w warstwach InGa_N, jak również przez zmianę szerokości studni kwantowych. Jest to słuszna wątpliwość, która powinna była być poruszona wcześniej, w rozdziale 5.2, gdzie Autor zdążył skonkludować, że zmiany czasu życia i energii fotoluminescencji wynikają z różnicy w składzie chemicznym warstw w zależności od topografii podłoża (str. 55). Autor rozstrzyga tę wątpliwość w oparciu o wynik pomiaru dyfrakcji rentgenowskiej pokazany na rys. 5.32. Píše on (str. 83), że szerokość studni kwantowej jest określana na podstawie położenia oscylacji sygnału, ale nie píše w jaki sposób. Można się domyślać, iż odbywa się to w oparciu o jakieś symulacje, gdyż następnie Autor píše, że Na podstawie zgodności symulacji widma pomiaru rentgenowskiego z wynikami przedstawionymi na rys. 5.32, można określić zmianę zawartości indu w studni kwantowej pomiędzy badanymi obszarami. [...] Z kolei średnia szerokość studni kwantowej w tym zakresie kątów zmienia się o 0,2 nm. Wyniki owych symulacji nie są jednak przedstawione, nie jest nigdzie napisane, kto je przeprowadził, ani, co najważniejsze, w oparciu o jakie założenia zostały wykonane. Bez tej informacji, konkluzja o zanedbywalnej zależności szerokości studni od kąta odorientowania ma bardzo małą wartość.

Poza wymienionymi wyżej poważnymi, w moim mniemaniu, uchybieniach, zmuszony jestem zwrócić uwagę także na mniejsze niedostatki, gdyż, niestety, rozprawa pana mgr. Drózdza jest ich pełna.

1. Rysunki przedstawiające dane doświadczalne są opisane w języku angielskim lub częściowo po polsku, częściowo po angielsku (jak np. rys. 5.31, 5.35 i 5.40).
2. Jako przerwę energetyczną GaN Autor podaje na str. 11 wartość 3.51 eV, a na str. 13 3.39 eV
3. Na str. 18 Autor błędnie podaje wyrażenie na równanie Airy'ego. Píše także o polu elektrycznym $F = 1$, jakby pole elektryczne nie miało jednostek.
4. Rozwiązując równanie dyfuzji na str. 21, Autor wprowadza niezdefiniowany czas τ_r . Dodatkowo wyrażenie na czas dyfuzji τ_D sugeruje, że dla bardzo krótkiego impulsu wzbudzającego τ_D równy jest czasowi trwania impulsu. Tymczasem w takiej sytuacji należy oczekiwać, że czas trwania wzbudzenia nie ma znaczenia.
5. Opisy układów doświadczalnych zamieszczonych w rozdziale 3.2 są niekompletne i mylące. Na przykład, rysunek 3.3 sugeruje, że pomiar fotoluminescencji odbywał się przy pomocy dwóch soczewek (czy obiektywów) i sygnał zbierany był pod kątem prostym do pobudzenia. Nie ma informacji o częstotliwości repetycji lasera użytego do pomiarów dynamiki fotoluminescencji ani o tym, jak stroić tę częstotliwość. Jest to konieczne do pomiarów czasów życia dłuższych niż kilka nanosekund, a Autor mierzy czasy życia nawet rzędu mikrosekund (patrz rys. 5.49). Chciałbym prosić, aby w czasie publicznej obrony Autor wyjaśnił, jak zmierzyć tak długie czasy życia.
6. W opisach badanych próbek Autor przytacza zawartość indu w buforach i studniach. Nie jest jasne, skąd bierze te liczby gdyż wielokrotnie w pracy píše, iż zawartość indu zależy od kąta odorientowania. Czy to jest średnia zawartość indu, czy nominalna z warunków wzrostu?

Ponadto, opisy próbek w tekście wielokrotnie nie zgadzają się z tym, co Autor przedstawia na rysunkach (patrz opisy próbek Ax2232 i Ax2561). Opis próbki Ax2972 na str. 42 jest sprzeczny z jej opisem na str. 88. Probka P1839 nie jest opisana w ogóle.

7. Autor błędnie definiuje funkcja piłokształtną w równaniu 4.1.
8. W rozdziale poświęconym badaniom powierzchni próbek mikroskopem sił atomowych (rozdział 5.1) nie pojawia się ani jeden profil wysokości. Zresztą, co zdumiewające, ani jeden taki profil nie pojawia się w całej rozprawie. Z jednej strony ogromnie utrudnia to zrozumienie wyników pomiarów Autora, a z drugiej sprawia, iż jego wnioski są bardzo słabo uzasadnione. Autor pisze na przykład, że na rysunku *widać strukturę stopni atomowych* (str. 46), albo że inny rysunek *przedstawia topografię jednego z najbardziej stromych skosów* (str. 52), lub że w jakimś *obszarze pomiędzy zbitykami stopni atomowych widać jeszcze pojedyncze stopnie* (str. 50), ale moim zdaniem bez pokazania profili wysokości żadnej z tych rzeczy nie widać. Chciałbym prosić, aby w czasie publicznej obrony Autor pokazał profile wysokości i uzasadnił co miał na myśli w cytowanych kwestiach.
9. Na str. 52 Autor pisze, że obraz ma rozdzielczość $1 \times 1 \mu\text{m}$.
10. Na rysunku 5.7 pokazany jest jednowymiarowy wykres, a w podpisie Autor twierdzi, iż jest to *wynik dwuwymiarowej, dyskretnej transformaty Fouriera* (str. 53).
11. W kolejnych rozdziałach Autor wielokrotnie analizuje energii fotoluminescencji i czasu życia fotoluminescencji. Nie jest jednak nigdzie napisane, w jaki sposób uzyskane są te wielkości. Nie pokazane są żadne dopasowania. Na rysunku 5.12 widać, że sygnał fotoluminescencji studni kwantowej zlewa się z widmem bufora. Ważna jest zatem informacja, jak te dwa składniki zostały oddzielone. Czy zaniki fotoluminescencji są jednowykładnicze? Czy uzyskane czasy życia są wynikiem jakiegoś uśredniania? Te informacje nie tylko zaświadczyłyby o opanowaniu warsztatu eksperymentalnego przez Autora, ale dostarczyłyby także dodatkowych informacji o fizyce badanych układów.
12. Analizując obrazy z kamery smugowej (np. rys. 5.9 i 5.17) Autor zauważa, że w funkcji czasu po wzbudzeniu zmienia się kształt i położenie widma fotoluminescencji. Interpretuje to zjawisko, ale nigdzie nie przedstawia przekrojów pokazujących ilościowo ten efekt, czyli widm fotoluminescencji dla różnych opóźnień. Nie wiadomo więc, z jakimi zmianami ma Autor do czynienia.
13. Na rysunku 5.17 Autor obserwuje kilka maksimów fotoluminescencji, ale nie identyfikuje ich. Analizuje następnie położenie i dynamikę jednego z nich, wybranego na niewiadomej podstawie.
14. Parametry dopasowania modeli teoretycznych opisywane w rozdziale 5.3 przedstawione są dla jednej próbki w tabeli, a dla innych w tekście. Bardzo utrudnia to porównanie uzyskanych wartości, chociaż jednym z celów zastosowania tych modeli było właśnie porównywanie parametrów pomiędzy próbkami.
15. Nie ma informacji, w jakiej temperaturze prowadzone były badania nad macierzami diód opisane w rozdziale 5.4.
16. Rysunek 5.24 przedstawia zmianę długości fali na stopień odorientowania, a nie bezwzględną zmianę, jak Autor oznaczył na osi pionowej.

17. Na obrazach mikroskopowych pokazanych na rysunkach 5.26 - 5.28 nie widać skali. Ich zrozumienie dodatkowo utrudnia brak oznaczeń poszczególnych obszarów dyskutowanych w tekście.
18. Na rysunku 5.30, autor oznacza jedno maksimum fotoluminescencji jako związane z GaN i drugie jako związane z tzw. żółtą luminescencją, jakby ta nie pochodziła od GaN. (Oznaczenia powinny dotyczyć fotoluminescencji ekscytonowej i żółtej.)
19. Na rysunku 5.35 Autor posługuje się nazwami obszarów próbki, tzw. skosów, ale nie odnosi ich do kątów odorientowania, co utrudnia identyfikację danych tam przedstawionych z wynikami pokazanymi w dalszej części rozdziału np. na rysunkach 5.36 i 5.37. Dodatkowo kąty wyspecyfikowane na rys 5.36 nie zgadzają się z kątami na rys. 5.37.
20. Na stronach 92-93 Autor analizuje zależności prądowo-napięciowe i wyznacza na ich podstawie opór różniczkowy. Píše iż w tym celu do danych doświadczalnych dopasowuje równanie diody, ale nie podaje postaci tego równania, ani nie pokazuje wyników dopasowań.
21. Odległość między polami kontaktowymi zaznaczonymi na rys. 5.42 wynosi, jak Autor pisze na str. 96, 80 μm . Odległość między tymi polami zaznaczonymi na rys. 5.43 wynosi niecałe 70 μm , a na rys. 5.44 około 65 μm . Ponieważ pola te wykonane zostały litograficznie, można się spodziewać, że w różnych obszarach próbki, odległości powinny być te same. Autor nie komentuje tych rozbieżności.
22. Na str. 99 Autor pisze, że zjawisko Förstera polega na reabsorpcji wyemitowanego światła. Zjawisko to polega na nieradiacyjnym przekazie energii poprzez oddziaływanie dipol-dipol.
23. Na str. 100 Autor pisze, że w laserach półprzewodnikowych *akcja laserowa wymaga silnego sprzężenia ekscyton - foton*, co nie jest prawdą. W szczególności większość takich laserów pracuje w warunkach, w których ekscytony są niestabilne.
24. Nie wiadomo, co oznaczają poszczególne oznaczenia i symbole na rys. 5.45.
25. Na rys. 5.48 Autor pokazuje energie fotoluminescencji dla różnych kątów odorientowania, zmierzone w temperaturze pokojowej i w 4 K. Energie dla różnych temperatur prawie się nie różnią, chociaż podobne wyniki przedstawione w rozdziale 5.2 na rys. 5.10b i w rozdziale 5.3 na str. 59 i następnych pokazują silną zależność tej energii od temperatury. Nie jest wspomniane, czy Autor przesunął jeden zestaw danych względem drugiego, który, ani po co.

Wobec ogromnej liczby błędów, braków, niedookreśleń i przeinaczeń może powstać uzasadniona wątpliwość, czy Autor rozumiał istotę prowadzonych przez siebie badań i czy potrafi prowadzić samodzielnie eksperymenty naukowe. Ponieważ badania Autora dotyczyły skomplikowanych struktur, na których wykonywane były wyrafinowane eksperymenty, które pozwoliły na znaczne poszerzenie naszej wiedzy uznaję, że wspomniane mankamenty wynikiem są raczej pośpiechu w przygotowaniu rozprawy. Nie mam wątpliwości, że badania opisane w rozprawie pana Drózdza stanowią oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wnoszę o dopuszczenie mgr. Drózdza do dalszych etapów przewodu doktorskiego.


Łukasz Kłopotowski