

dr hab. inż. Agata Jasik
Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki
al. Lotników 32/46
02-495 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Olgi Markowskiej pt.

“Mechanizmy generacyjno-rekombinacyjne generowanych optycznie nadmiarowych nośników w heterostrukturach z tellurku kadmowo-rtęciowego”

Rozprawa doktorska mgr inż. Olgi MARKOWSKIEJ została wykonana pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Krzysztofa Jóźwikowskiego w Wojskowej Akademii Technicznej (WAT). Rozprawa jest poświęcona analizie mechanizmów generacyjno-rekombinacyjnym (G-R) występujących w przyrządach do detekcji promieniowania z zakresu podczerwieni wykonanych na bazie heterostruktur ze związków tellurku rtęciowo-kadmowego HgCdTe. Celem, jaki postawiła sobie Doktorantka było wyznaczenie czasów życia nośników generowanych w fotodetektorach z HgCdTe pracujących w nierównowagowych warunkach z uwzględnieniem wpływu różnych mechanizmów generacyjno-rekombinacyjnych i przy zachowaniu zasady niezmienności ładunku elektrycznego. Modele zjawisk generacyjno-rekombinacyjnych opracowane przez Doktorantkę przyczyniły się do wzbogacenia programu komputerowego autorstwa prof. dr hab. inż. K. Jóźwikowskiego, wykorzystywanego w pracy do obliczeń, a te z kolei do osiągnięcia celu pracy i udowodnienia tez postawionych we wstępie.

Rozwój fotodetektorów pracujących w zakresie podczerwieni jest jednym z ważniejszych celów fotoniki podczerwieni popartych potrzebami definiowanymi przez rynek zarówno z sektora cywilnego (np. monitorowanie szczelności instalacji chemicznych) jak i związanego z obronnością kraju (np. naprowadzanie). Zapotrzebowanie na detekcję w skali przemysłowej znajduje swoje odzwierciedlenie w prawodawstwie. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE dotycząca monitorowania wycieku substancji chemicznych nakazuje wykorzystanie m.in. techniki optycznego obrazowania gazów. Wytyczne zawarte w rozporządzeniu Rady (WE) nr 1334/2000 wprowadzają restrykcyjną kontrolę obrotu technologiami i towarami podwójnego zastosowania, co sprzyja rozwojowi rodzimej technologii fotodetektorów, w szczególności do zastosowań militarnych. Mając

powyższe na uwadze, prace prowadzone przez Doktorantkę mieszczą się w głównym nurcie prac prowadzonych obecnie na świecie.

Rozprawa doktorska składa się z sześciu rozdziałów (wprowadzenia i pięciu rozdziałów zasadniczych), podsumowania, dwóch dodatków A i B oraz spisu literatury i spisu rysunków.

Rozdział pierwszy, tj. Wprowadzenie zawiera uzasadnienie potrzeby zajęcia się tematyką fotodiod z zakresu podczerwieni, w szczególności modelami zjawisk generacyjno-rekombinacyjnych. Definiuje główny cel, jakim jest określenie czasów życia nośników dla różnych mechanizmów G-R w warunkach braku równowagi termicznej w przyrządach oraz stawia trzy tezy. Pierwsza teza rozprawy mówi o wpływie rekombinacji z udziałem płytkich donorów na czas życia nośników, przy czym wprowadza gradację: duży wpływ na nośniki mniejszościowe i warunkowanie czasu życia nośników większościowych. Druga teza mówi o konieczności zastosowania zasady zachowania ładunku przy obliczaniu czasu życia nośników, natomiast trzecia - że oddziaływanie elektryczne nośników zgromadzonych w dyslokacjach niedopasowania wpływa na funkcje ich rozkładu i w niewielki sposób na gęstość wygenerowanych dyslokacji.

Mankamentem rozdziału jest chaotyczny sposób przedstawiania argumentacji uzasadniającej potrzebę zajęcia się tematem. Doktorantka nie ustrzegła się powtórzeń, co wpływa na jakość odbioru przez czytającego. Na trzech stronach: 7, 17, 91 przedstawiono różne, za każdym razem niepoprawne tłumaczenie akronimu MOCVD. Inne usterki to: brak spacji pomiędzy wartościami a jednostkami (np. str. 17), „stosunkowo niska stała dielektryczna”, „stosunkowo wysoki współczynnik absorpcji”, „stosunkowo mała gęstość dyslokacji” (str. 17) – nietechniczne sformułowania, dyslokacje są policzalne, więc raczej liczba dyslokacji niż ilość, a najlepiej gęstość (teza 3, str. 21 i w wielu innych miejscach pracy).

W rozdziale drugim Doktorantka prezentuje założenia fizyczne programu komputerowego wykorzystywanego do obliczeń w postaci pięciu równań transportu: nośników (cztery) i fotonów (jedno). Rozwiązując ten układ równań możliwe jest obliczenie wielkości fizycznych opisujących transport ładunku i energii. Jako przykład możliwości obliczeniowych tego programu zaprezentowane zostały wyniki symulacji dla fotodetektorów z zakresu MWIR i LWIR typu pin bez barier (P^+vN^+) i z barierami (P^+BvBN^+) pracujących przy polaryzacji zaporowej.

Dla fotodetektorów z zakresu MWIR został pokazany wpływ mechanizmu ekskluzji i ekstrakcji na zmniejszenie koncentracji elektronów w absorberze i dominujące znaczenie tego drugiego niezależnie od faktu istnienia barier w diodzie. Zredukowana koncentracja nośników skutkuje zdtawieniem procesów G-R, które w tym przypadku wyznaczane są przez mechanizmy SRH (dla 300 K przy napięciu polaryzacji $U = -0.4$ V), przy czym silniejszy wpływ obserwowany jest dla procesów rekombinacji. W pracy oszacowano wpływ dyslokacji na gęstość prądu ciemnego dla sytuacji zero-jedynkowej pokazując w ten sposób celowość dążenia do optymalizacji zarówno architektury jak i technologii materiałów. Wynikiem, na który zwraca uwagę Doktorantka jest dwudziestokrotna redukcja prądu szumów w strukturze spolaryzowanej wstecznie napięciem dwudziestokrotnie wyższym (0.4 V względem 0.02 V), co jest porównywalne do wyniku uzyskiwanego dla kriogenicznie chłodzonych detektorów. Obliczając wartości detekcyjności z uwzględnieniem szumów G-R i Jonsona dla struktury z barierami, Doktorantka stwierdza, że uzyskane wartości plasują się powyżej granicy BLIP ($2 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{0.5}\text{W}^{-1}$) i predysponują strukturę do zastosowania w praktyce bez konieczności zastosowania chłodzenia kriogenicznego. Warty zastanowienia jest, jak dziesięciokrotne zwiększenie gęstości dyslokacji w absorberze wpłynie na uzyskane parametry. Założenie gęstości dyslokacji w absorberze równej $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ jest mało realne

przy gęstości dyslokacji w warstwie dolnej bariery o dwa rzędy wielkości większej. Poczynione założenie jest konsekwencją przyjętego do symulacji modelu określania gęstości dyslokacji w heterostrukturach. W opinii recenzenta – niewłaściwego modelu. Model przyjęty w pracy [25] zakłada istnienie dyslokacji jednorodnie rozłożonych w materiale i biegnących równoległe do granicy rozdziału faz. Zastosowanie tego modelu w heterostrukturze na bazie HgCdTe zostało zilustrowane na rys. 3. Widać na nim, że dyslokacje powstałe w danym obszarze są zamknięte w obrębie tego obszaru i nie propagują się dalej. Jest to błędne założenie. Idąc w kierunku wzrostu, dyslokacje niedopasowania powstałe w warstwie pod absorberem będą się propagować przez wszystkie kolejne warstwy i ich gęstość w warstwie nad absorberem będzie większa niż pod nim. Niezasadne jest również założenie, że na granicy faz gęstość dyslokacji zostanie skokowo zredukowana o dwa rzędy wielkości. Nie są znane mechanizmy, które mogłyby za to odpowiadać. Nie wynika to z architektury fotodetektorów. Nie zostało również wyjaśnione, na jakiej podstawie określono bezwzględne wartości gęstości dyslokacji w poszczególnych obszarach. Istotne jest podkreślenie, że w obszarze absorbera jest to wartość zaniżona, co może mieć znaczenie dla poprawności obliczeń w aspekcie wartości bezwzględnych szybkości procesów generacyjno-rekombinacyjnych wyznaczonych przez mechanizm SRH z uwzględnieniem stanów w przerwie energetycznej pochodzących od dyslokacji.

Wśród rozpatrywanych procesów G-R Doktorantka również uwzględniła zjawisko wtórnej absorpcji fotonów. Dla fotodetektorów z zakresu LWIR wykorzystano mniejszą mesę, w związku z czym procesy generacyjne uwzględniające to zjawisko odgrywały pomijalną rolę. W odróżnieniu od zakresu MWIR, niezależnie od zastosowanej polaryzacji, mechanizmem limitującym procesy G-R jest mechanizm Augera A1, natomiast SRH nie ulega zmianie. Doktorantka zidentyfikowała mechanizmy SRH jako limitujące pracę detektorów z HgCdTe w obydwu zakresach spektralnych w temperaturach chłodziarek termoelektrycznych TEC (thermoelectric cooler).

Mniej istotne niedociągnięcia w pracy to: rysunki w tekście pisanym w języku polskim zapisywane są zwyczajowo z małej litery (np. str. 25 i konsekwentnie w całej pracy), ułatwieniem w analizie porównawczej byłoby zastosowanie tej samej skali wszędzie tam, gdzie jest to możliwe (np. rys. 2), budzi zastrzeżenia stylistyka bardzo złożonych zdań (powtórzenia, uogólnienia, np. str. 27), rysunki mogłyby być umieszczone bliżej tekstu, w którym są omawiane.

Rozdział trzeci poświęcony jest różnym mechanizmom generacyjno-rekombinacyjnym w HgCdTe i związanym z nimi czasem życia nośników. Doktorantka wprowadza w podstawowe zagadnienia ww. mechanizmów (procesy zderzeniowe Augera A1 i A7, międzypasmowy mechanizm promienisty, dwustopniowe procesy SRH z wykorzystaniem płytkich (luki metali i dyslokacje) i głębokich (stany powierzchniowe) poziomów w przerwie energetycznej). Przywołuje argumentację potwierdzającą celowość uwzględniania mechanizmów SRH z wykorzystaniem płytkich poziomów w analizie procesów rekombinacji, szczególnie w zakresie temperatur niższych niż TEC. We wstępie do analizy poszczególnych mechanizmów G-R definiuje czas życia nadmiarowych nośników, oddzielnie dla elektronów i dziur z uwzględnieniem wpływu wtórnej absorpcji fotonów luminescencyjnych. Procesy SRH z udziałem donorów i akceptorów zostały omówione oddzielnie z podziałem na procesy promieniste, fononowe i Augera. Wprowadza to uporządkowanie do prowadzonej analizy, a zarazem grupuje procesy dotyczące elektronów i dziur. Dla każdego z mechanizmów została określona szybkość rekombinacji i generacji. Wypracowano zależności pozwalające powiązać zmianę koncentracji zjonizowanej domieszki ze zmianą koncentracji odpowiedniego nośnika ładunku elektrycznego: dla donora – elektronu, dla akceptora – dziury. W przypadku dziur uwzględniono zarówno pasmo dziur lekkich jak i ciężkich i określono uśrednione współczynniki rekombinacji. Dla mechanizmów SRH z

udziałem płytkich stanów określono wypadkową zależność wiążącą zmiany koncentracji nadmiarowych elektronów i dziur powstałych w materiale na skutek pobudzenia optycznego. W międzypasmowych procesach G-R wzięto pod uwagę wtórną absorpcję fotonów oraz wymianę fotonów pomiędzy półprzewodnikiem a otoczeniem. Natomiast dla międzypasmowych procesów Augera A1 i A7 określono łączną szybkość zarówno dla generacji jak i rekombinacji. W podsumowaniu podano wzory na czasy życia nośników uwzględniające wpływ poszczególnych mechanizmów G-R. Rozdział w swym przekazie i formie bardzo trudny. Doktorantka wyraźnie starała się o systematyczne i logiczne przekazanie sensu fizycznego tego, co zostało zapisane za pomocą złożonego aparatu matematycznego. Oprócz układu początkowych podrozdziałów, cel został osiągnięty. Trudnością jest jasne określenie, co jest wkładem merytorycznym Doktorantki w tym rozdziale. Wydaje się, że powstał on głównie na bazie dotychczasowych osiągnięć Promotora pracy, a Doktorantka pokazała, że umiejętnie potrafi z tego korzystać. Trudny do przecenienia jest ogólny wniosek płynący z symulacji przeprowadzonych przez Doktorantkę: mając wiedzę o procesach limitujących czasy życia nośników można optymalizować parametry przyrządu.

Mało znaczące niedociągnięcia w tym rozdziale to: podpis pod rys. 19b mało precyzyjnie oddaje sens schematu SRH, błędy językowe takie jak niewłaściwa odmiana przez przypadki (np. str. 42), błędy stylistyczne (np. str. 43, 71), literówki (np. str. 44, 45), cząstki naładowane elektrycznie są policzalne (str. 46).

W rozdziale czwartym Doktorantka zaprezentowała wyniki obliczeń czasów życia nośników w materiale HgCdTe z zakresu LWIR o dziurowym i elektronowym typie przewodnictwa. Szczególnie istotne są wyniki dla tego pierwszego w aspekcie materiału na fotodetektory HOT. Dla materiału typu p w zakresie koncentracji donorów resztkowych od $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ do $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (zakres dostępny technologicznie) dominującym mechanizmem G-R jest Augera z udziałem zjonizowanych donorów. Czas życia nośników mniejszościowych zmienia się w zakresie dwóch rzędów wielkości pomiędzy 10^{-10} – 10^{-8} s. Jest to ważna informacja dla konstruktorów i technologów fotodetektorów, bowiem wskazuje kierunek optymalizacji technologii przyrządów. Ważnym wynikiem jest przedstawienie wyводу potwierdzającego wartość współczynnika $\gamma = 3$ będącego stosunkiem czasu życia A7 do A1 w materiale samoistnym. Doktorantka wykorzystując narzędzie obliczeniowe pokazała, jak można skrócić procedurę dopasowywania wyników teoretycznych do eksperymentalnych opartą na kolejnych iteracjach. Zakładając rekombinację z udziałem płytkich poziomów donorowych uzyskała dobrą zgodność do wyników eksperymentalnych prezentowanych w pracy [51] oraz pokazała udział luk w procesie rekombinacji. Dla materiałów HgCdTe o podobnym składzie chemicznym otrzymanych różnymi metodami (epitaksja z fazy ciekłej [57] bądź rekrytalizacji [51]) wyznaczyła wartości gęstości luk rtęciowych i donorów resztkowych na poziomie 10^{14} cm^{-3} czyniąc z tego niejako cechę materiału o dziurowym typie przewodnictwa. Tym samym rola luk rtęciowych w procesach G-R mających miejsce w materiałach HgCdTe została niejako „spłycona”. W materiale o elektronowym typie przewodnictwie w temperaturze TEC, o czasie życia nośników obydwu typów decydują głównie międzypasmowe procesy Augera A1. Z zestawienia czasów życia nośników mniejszościowych w materiałach HgCdTe z zakresu LWIR o różnych typach przewodnictwa widać, że osiągają one porównywalne wartości, a poprawa czasu życia nośników jest możliwa w materiale typu p poprzez poprawę czystości materiału. Doktorantka postawiła za cel wykazanie poprawności obliczeń przez zgodność z wynikami eksperymentalnymi, ale odczuwalny jest brak wykorzystania aplikacyjnych wniosków płynących z tych symulacji.

Przykład tego, jakie konsekwencje może mieć niedbałość o terminologię i precyzję wypowiedzi znajduje się w tym rozdziale. Doktorantka deklaruje, że w podrozdziałach 4.1 i 4.2 (w rozprawie jest pomyłka – przywołano dwa razy rozdział 4.1) obliczenia zostały wykonane dla detektora (str. 77), a tymczasem chodzi o warstwę HgCdTe, ale co ważniejsze o innym składzie chemicznym niż jest to

wskazane. W podrozdziale 2.1 na str. 26 Doktorantka podała formę ogólną wzoru sumarycznego prostego dla tellurku kadmowo-rtęciowego $Hg_xCd_{1-x}Te$. Zgodnie z nim, obliczenia w rozprawie doktorskiej, przynajmniej do rozdziału czwartego, zostały przeprowadzone dla warstwy $Hg_{0.2}Cd_{0.8}Te$, dla której pokazano zgodność wyników teoretycznych z danymi eksperymentalnymi zaczerpniętymi z pracy [57] dla półprzewodnika typu p i [58] dla półprzewodnika typu n. Z tym, że w przytoczonych pracy jest mowa o warstwie $HgCdTe$ o innym składzie chemicznym, a mianowicie zbliżonym do $Hg_{0.8}Cd_{0.2}Te$ o stałej sieci porównywalnej ze stałą sieci podłoża z $CdZnTe$. Zatem trzymając się nomenklatury wprowadzonej przez Doktorantkę w początkowym rozdziale rozprawy i dotychczas nie zmienionej, przeprowadziła Ona obliczenia czasów życia nośników dla materiału zrelaksowanego bez udziału mechanizmu SRH uwzględniającego pasmo stanów pochodzących od dyslokacji oraz co gorsza uzyskała zgodność obliczeń z danymi eksperymentalnymi zmierzonymi dla warstwy dopasowanej sieciowo do podłoża przez autorów prac [57, 58]. A wszystko to na skutek zamiany położenia indeksu x we wzorze chemicznym. Powyższe jedynie ilustruje konsekwencje niedbałości zapisu danych i nie podważa jakości uzyskanych wyników.

Uciążliwością w analizie danych prezentowanych na wykresach jest brak zachowania tej samej kolorystyki krzywych oznaczających ten sam parametr (np. rys. 25), różna grubość krzywych, różna skala na wykresach, które są porównywane, zbyt mała czcionka przy opisie osi, a różna wielkość wykresów nie poprawia estetyki pracy.

W rozdziale piątym Doktorantka rozważa wpływ dyslokacji niedopasowania na czas życia nośników w heterostrukturach $HgCdTe$ osadzonych na buforowanym podłożu $CdTe/GaAs$. W sposób syntetyczny, na bazie wcześniej opublikowanych prac pokazała, że o odkształceniu warstwy decyduje energia elastyczna/sprężysta i energia elektryczna dyslokacji, przy czym udział tej ostatniej jest niewielki. Doktorantka uzyskała bardzo dobrą zgodność obliczeń średniej odległości pomiędzy liniami dyslokacji niedopasowania na granicy $CdTe/GaAs$ (2.66 nm) z danymi opublikowanymi w pracy [61] uzyskanymi z eksperymentu (3.1 nm) oraz otrzymała wyniki dla każdego kolejnego obszaru międzyfazowego w złożonej heterostrukturze fotodetektora. Znajomość odkształcenia sieci została też ujęta w strukturze pasmowej fotodetektora. Policzyła również energię elektryczną w obszarze otaczającym rdzeń dyslokacji na jednostkę powierzchni równą $10^{-7} - 10^{-5} J/cm^2$, uznając jej wkład w odkształcenie za niewielki w porównaniu do energii sprężystej. Doktorantka prezentuje dwa modele dyslokacji jako kanału G-R: opracowany przez Promotora i opublikowany w pracy [24] oraz opracowany w ramach rozprawy. Pierwszy przyjmuje dyslokację za rurkę na powierzchni której następuje rekombinacja, co odwzorowują formuły określające czas życia nośników. Drugi model odwołuje się do mechanizmu SRH z uwzględnieniem płytkich stanów w przerwie energetycznej tworzonych przez dyslokacje. W zależności na szybkość rekombinacji uwzględnia wpływ pola elektrycznego poprzez wprowadzenie zmian w efektywnych współczynnikach wychwytu nośników. Jest to szczególnie istotne w warunkach nierównowagowych pracy fotodetektorów. Po zastosowaniu warunku neutralności Doktorantka przedstawia wyrażenia na czasy życia nośników uwzględniające mechanizmy SRH z pośrednictwem stanów pułapkowych od luk metali, od płytkich domieszek, od dyslokacji oraz procesy międzypasmowe. Zarówno szybkość procesów G-R jak i czas życia nośników powiązane są z równowagową funkcją rozkładu określającą prawdopodobieństwo obsadzenia stanu w paśmie dyslokacyjnym przez elektron w warunkach równowagi termicznej. Określeniu tej funkcji Doktorantka poświęciła dwa podrozdziały rozprawy 5.7 i 5.8 odpowiednio nie biorąc pod uwagę wzajemnego elektrycznego oddziaływania dyslokacji i z uwzględnieniem tego oddziaływani. W pierwszym przypadku, z obliczonych zależności funkcji rozkładu od koncentracji nośników w materiale $Hg_{1-x}Cd_xTe$ w temperaturze pokojowej (warunki HOT dla pracy fotodetektorów LWIR) wynika, że dyslokacje będą gromadzić dodatkowe elektrony, niezależnie od typu przewodnictwa ale w zakresie poziomu domieszkowania stosowanego w materiałach wykorzystywanych w detekcji. W drugim przypadku, tj.

po uwzględnieniu wzajemnego oddziaływania elektrycznego linii dyslokacji i przy małej gęstości dyslokacji zdefiniowanej parametrem $p > 10^{-7}$ m (p – średnia odległość pomiędzy liniami od dyslokacji) w strukturach z zakresu LWIR o dziurowym typie przewodnictwa dyslokacje są naładowane dodatnio, natomiast w materiale typu n – ujemnie. W obydwu przypadkach dyslokacje oddziałując ze sobą, zwiększają energię elektryczną. Dla większych gęstości dyslokacji i mniejszej odległości pomiędzy ich liniami wzrost energii elektrycznej powoduje dążenie do neutralności elektrycznej dyslokacji.

Mankamentem tego rozdziału jest podejście do generacji dyslokacji w złożonej heterostrukturze. Na podstawie wartości odległości pomiędzy liniami dyslokacji powstałymi w obszarze danego interfejsu można sądzić, że jest on rozpatrywany niezależnie od pozostałych obszarów międzyfazowych. Dla ustalenia uwagi: w obszarze interfejsu absorber – kontakt typu p odległość pomiędzy liniami dyslokacji wynosi 4.0 mm. Tymczasem prawdopodobne jest, że w obszarze tego interfejsu nie zostaną wygenerowane żadne dyslokacje związane bezpośrednio z niedopasowaniem tych dwóch warstw, ponieważ rolę uwalniania energii sprężystej przejmą dyslokacje niedopasowania powstałe np. w obszarze interfejsu podłoże-bufor i przechodzące przez kolejne warstwy heterostruktury, w tym przez omawiany interfejs. Grubość trzynastu mikrometrów (sumaryczna grubość bufora, warstwy kontaktu typu n i absorbera) nie jest wystarczająca by można było założyć redukcję gęstości dyslokacji o kilka rzędów. Zatem uwolniona energia elastyczna czy odkształcenie plastyczne może być większe niż wynika to z niedopasowania materiałów tworzących interfejs. To oznaczać może, że wyrażenie na odkształcenie zakładające udział dyslokacji generowanych na każdym interfejsie na skutek istniejącego tam niedopasowania sieciowego może być obarczone błędem. A jeśli tak, to struktura pasmowa policzona dla heterostruktury fotodetektora z uwzględnieniem odkształcenia sieci też jest obarczona błędem. Nie ma też informacji o sposobie obliczenia gęstości dyslokacji w absorberze, co jest sprawą absolutnie kluczową dla określenia czasu życia nośników.

Mniej istotne wady tego rozdziału to: kolokwializm (np. struktura hodowana, str. 90), zdanie co najmniej nieprecyzyjne: „Zastosowanie warstwy buforowej z CdTe pozwala na izolację defektów powstających na styku podłoże – warstwa buforowa, od epitaksjalnej warstwy HgCdTe” (str. 91), stylistyka zdań (np. str. 93, przedostatnie zdanie), niekonsekwencja oznaczeń we wzorze (131) i tekście pod nim, powtórzone zdanie: „W tym wyrażeniu” (str. 94), niezrozumiałe: „... odległości między niedopasowanymi liniami dyslokacji w interfejsach” (str. 95), nieprecyzyjne stwierdzenie: „Wytworzone dyslokacje niedopasowania mają bardzo silny wpływ na relaksację naprężeń w sieci krystalicznej heterostruktury ...” (str. 96), niezrozumiałe: „...obszar styku kolejnych interfejsów warstw epitaksjalnych” (str. 96), niezgodność informacji w tekście (ostatnie zdanie na str. 96) z danymi na rys. 41, niepoprawna jednostka grubości w podpisie osi na rys. 41, niepoprawna jednostka gęstości ładunku elektrycznego dyslokacji (str. 97), zmiana oznaczeń promienia cylindra na rys. 44 i w jego podpisie oraz tekście na str. 103, „ilość jamek trawienia przypadająca na jednostkę powierzchni” to po prostu gęstość jamek, abstrahując od tego, że są policzalne (str. 104), literówka w formule (206), brak ciągłości prowadzonych obliczeń/prac merytorycznych dla jednego zakresu spektralnego (w 5.2 – MWIR, w 5.6 - LWIR).

Rozdział szósty poświęcony jest procesom rekombinacji nośników przebiegających z udziałem aktywnych elektrycznie pułapek zlokalizowanych na powierzchni fotodetektora, wynikających z zerwanych wiązań chemicznych. Wyprowadzenie formuły określającej szybkość rekombinacji par elektron-dziura w przeliczeniu na 1.0 s i odniesieniu do jednostki powierzchni ma swoje konsekwencje w postaci sformułowania warunków brzegowych. Dzięki takiemu podejściu możliwe jest np. ustalenie wpływu wbudowanego pola elektrycznego na procesy rekombinacji, a tym samym na gęstość prądu upływu czy przeanalizowanie wpływu parametrów materiałów użytych do pasywacji na charakterystyki elektryczne przyrządu. Osiągnięcie to jest trudne do przecenienia w dobie powszechnej miniaturyzacji, która ma szczególny wydźwięk w przyrządach do detekcji zmierzających w kierunku obrazowania.

Jednakże zgodnie z tym, co napisała i przedstawiła Doktorantka, praktyczne zastosowanie tego osiągnięcia jest istotne przede wszystkim w detektorach pracujących w temperaturach kriogenicznych. W warunkach HOT w prądzie ciemnym dominuje składowa objętościowa. Na dowód powyższego Doktorantka przedstawiła dane uzyskane eksperymentalnie w rodzimym laboratorium, co znacząco podkreśla walory rozprawy.

Mankamenty rozdziału to: „substancja” i „materiał” raczej nie mogą być używane zamiennie w aspekcie uporządkowanej struktury krystalicznej (str. 132), istnieje stała sieci nie sieciowa (str. 132), dyslokacje są policzalne (str. 132). „Pasywacja jest korzystna patrząc długofalowo na właściwości detektora, bo ogranicza degradację powierzchni, ale wykonana bezpośrednio po wytrawieniu struktury detekcyjnej, najczęściej powoduje pogorszenie jej parametrów prądowo-napięciowych” - we wprowadzeniu do rozdziału Doktorantka myli pasywację detektorów w celach zabezpieczenia przed degradacją z pasywacją elektryczną, istotniejszą z punktu widzenia prowadzonych rozważań. Ponadto na podstawie jakich badań zostało napisane TAK jednoznacznie brzmiące TAK ogólne stwierdzenie? Inne błędy to: detektor jest przyrządem nie urządzeniem (str. 140); „Proces pasywacji polega na pokryciu zboczy warstwy mesy materiału izolacyjnego przed warunkami zewnętrznymi” (str. 141) – zdanie niepoprawne stylistycznie i merytorycznie w kontekście pasywacji elektrycznej.

Rozprawę kończy podsumowanie, które w sposób syntetyczny opisuje najważniejsze osiągnięcia Doktorantki.

Załączono dwa dodatki A i B, do których doktorantka odnosi się w pracy.

Spis literatury składa się z 84 pozycji, z czego 20 pozycji zostało opublikowanych przy udziale Promotora pracy, w tym trzy przy udziale Doktorantki. Jest ona pierwszą autorką w jednej pracy zaprezentowanej na międzynarodowej konferencji poświęconej detekcji.


Rozprawa została napisana poprawnie, układ następujących po sobie rozdziałów jest logiczny. Doktorantka wykazała się dogłębnym rozumieniem zarówno zjawisk fizycznych leżących u podstaw pracy złożonych fotodetektorów z zakresu podczerwieni jak i nie mniej skomplikowanego aparatu matematycznego opisującego wspomniane zjawiska. Rozprawa napisana z poszanowaniem praw autorskich Promotora pracy. Doktorantka wskazuje na Jego dokonania zaznaczając przy tym, co zostało zrobione w ramach rozprawy (wyjątkiem jest jeden rozdział).

Najważniejsze osiągnięcia pracy doktorskiej w opinii recenzenta to wykazanie, że rekombinacja z udziałem płytkich stanów domieszkowych ma znaczący wpływ na czas życia nośników mniejszościowych w heterostrukturach detektorowych, wskazanie mechanizmów G-R odpowiedzialnych za czas życia nośników w materiałach HgCdTe o różnym składzie z zakresu MWIR i LWIR, różnym typie przewodnictwa i w różnych temperaturach. Jest to silne wskazanie dla konstruktorów i technologów pracujących nad optymalizacją przyrządów do detekcji promieniowania IR, tym bardziej, że wyniki obliczeń teoretycznych zostały zweryfikowane, przynajmniej częściowo, poprzez porównanie z danymi eksperymentalnymi pochodzącymi z różnych międzynarodowych zespołów. Kolejnym osiągnięciem jest podejście do mechanizmu G-R z uwzględnieniem stanów energetycznych wprowadzanych do przerwy zabronionej przez dyslokacje. Zidentyfikowanie i wykazanie wkładu tego kanału rekombinacji jest o tyle istotne, że mamy do czynienia ze strukturami naprężonymi/zrelaksowanymi, których nieodłączną cechą są dyslokacje niedopasowania. Warty podkreślenia jest również wątek pracy związany z prądami upływu, a w szczególności ze składową powierzchniową. Mimo iż trendy w podczerwieni wskazują na rozwój detektorów w kierunku warunków HOT, gdzie dominujące są procesy G-R w objętości materiałów, to przy specyficznych zastosowaniach wymagających bardzo dużych czułości możliwych do uzyskania tylko w warunkach kriogenicznego chłodzenia, badania nad wpływem po powierzchni są ciągle istotne. I w aspekcie tego

zastosowania symulacja prądów ciemnych, w tym możliwość określenia udziału prądu płynącego po powierzchni wydaje się być cenna, szczególnie dla detektorów o małych średnicach do 200 μm . Na podkreślenie zasługuje fakt, iż praca zawiera elementy nowatorskie, co ma szczególną wagę w aspekcie teoretycznego charakteru pracy.

Doktorantka nie ustrzegła się również błędów, na które zwrócono uwagę analizując osiągnięcia opisane w poszczególnych rozdziałach rozprawy, ale nie wpływają one w sposób znaczący na jakość pracy.

Podsumowując należy podkreślić, że cel pracy postawiony we wstępie został osiągnięty a tezy udowodnione. Należy stwierdzić, że rozprawa mgr inż. Olgi MARKOWSKIEJ pt. „Mechanizmy generacyjno-rekombinacyjne generowanych optycznie nadmiarowych nośników w heterostrukturach tellurku kadmowo-rtęciowego” stanowi oryginalny i samodzielny dorobek Autorki i spełnia wymogi Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie przedłożonej pracy do publicznej obrony.



Agata Jasik