

Prof. dr hab. inż. Małgorzata Jakubowska, prof. zwyczajny PW
Wydział Mechatroniki
Politechnika Warszawska
ul. Św. Andrzeja Boboli 8
02-525 Warszawa

Warszawa, 16 grudnia 2016 r.

Ocena dorobku naukowego oraz autoreferatu

dr inż. Ireneusza Głowackiego

(w związku z postępowaniem o nadanie stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie elektronika)

Niniejsza recenzja została wykonana w oparciu o analizę życiorysu naukowego, wykazu osiągnięć w pracy naukowej, autoreferatu, oraz 0 publikacji i 1 zgłoszenia patentowego przedstawiającego główne osiągnięcia naukowe Habilitanta.

1. Sylwetka Habilitanta

Dr inż. Ireneusz Głowacki jest absolwentem Wydziału Elektrycznego Politechniki Łódzkiej (PŁ), który ukończył w roku 1982. Następnie podjął pracę w Instytucie Polimerów Politechniki Łódzkiej. Swoją działalność naukową rozpoczął badaniami w zakresie właściwości fizycznych polimerów i półprzewodników polimerowych. Owocem tych badań jest 16 publikacji oraz uzyskany w roku 1995 stopień naukowy doktora nauk chemicznych. Praca doktorska, wykonana pod kierunkiem prof. Jacka Ulańskiego, dotyczyła badania procesów pułapkowania i rekombinacji nośników ładunku w poli(N-winylokarbazolu) (PVK) i jego mieszanin z poliwęglanem i została. W ramach pracy doktorskiej Kandydat zaprojektował i zbudował układ do jednoczesnego pomiaru termoluminescencji (TL) i prądów termicznie stymulowanych (TSC) w cienkich warstwach polimerowych w zakresie 83-350 K.

W roku 1997 dr inż. Ireneusz Głowacki został zatrudniony na stanowisku adiunkta, najpierw w Instytucie Polimerów a później w Katedrze Fizyki Molekularnej Politechniki Łódzkiej, gdzie pracuje do chwili obecnej. Jego aktywność naukowa po uzyskaniu stopnia doktora obejmuje przede wszystkim badania podstawowe i aplikacyjne półprzewodników organicznych wykorzystywanych w elektronice i optoelektronice.

2. Ocena dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego

Dr inż. Głowacki jest współautorem łącznie 43 artykułów (w tym 31 po uzyskaniu stopnia doktora) opublikowanych w czasopismach występujących w bazie Journal Citation Report (JCR). Ponadto jest autorem lub współautorem 23 publikacji spoza bazy JCR (w tym 19, które ukazały się po uzyskaniu stopnia doktora). Jest autorem rozdziału w monografii Instytutu Tele- i Radiotechnicznego „Drukowana Elektronika w Polsce” oraz współautorem rozdziału „Conductivity Measurements” w encyklopedii „Polymer Science: A Comprehensive Reference” Elsevier BV, Amsterdam 2012. Jest również współautorem jednego patentu.

Prace były cytowane 578 razy (526 bez autocytowań), a indeks Hirscha dra Głowackiego wynosi 12. Wyniki prowadzonych przez Niego badań były prezentowane na wielu konferencjach międzynarodowych jak i krajowych, jako referaty i postery, w tym 19 referatów zostało wygłoszonych przez dra Głowackiego.

Należy podkreślić, że w ostatnich dwudziestu latach dr Głowacki był bardzo aktywny, jeśli chodzi o realizację projektów badawczych. Realizował ponad 19 projektów badawczych, krajowych i zagranicznych oraz uczestniczył w 4 europejskich sieciach badawczych. Był koordynatorem ze strony polskiej dwóch projektów realizowanych w ramach programu współpracy polsko-francuskiej. Współpracował z wieloma krajowymi i zagranicznymi ośrodkami naukowymi.

Jego praca naukowa znalazła uznanie poprzez uzyskanie szeregu nagród (zespołowa I-go stopnia MEN i zespołowa II stopnia MNSzWiT oraz 10 nagród naukowych indywidualnych Rektora PŁ).

Cechą wyróżniającą działalność naukową Habilitanta jest długofalowe i konsekwentne prowadzenie badań w określonej tematyce, co w efekcie przyniosło rezultaty, dzięki którym Habilitant i Zespół w którym pracuje jest uważany za jeden z czołowych w skali międzynarodowej.

Dr Głowacki, jako pracownik akademicki realizował bardzo wiele zajęć dydaktycznych. Prowadzi wykłady, zajęcia projektowe jak również laboratoryjne z wielu przedmiotów, w tym z przedmiotu „Elektrotechnika z elementami elektroniki” na Wydziale Chemicznym Politechniki Łódzkiej. Obecnie jest kierownikiem wielu

przedmiotów na I stopniu studiów oraz jednego na II stopniu z zakresu organicznych materiałów do zastosowań w elektronice i optoelektronice. Pod kierunkiem dra Głowackiego zostało zrealizowanych 5 prac inżynierskich i dwie prace magisterskie. Ich tematyka dotyczyła wytwarzania i badań urządzeń elektronicznych i optoelektronicznych z materiałów organicznych. Był konsultantem naukowym 3 prac magisterskich oraz 4 prac doktorskich. Obecnie jest promotorem pomocniczym dwóch rozpraw doktorskich.

Reasumując dorobek naukowy i dydaktyczny dra Głowackiego jest znaczący i w pełni uzasadnia jego starania o przyznanie stopnia naukowego doktora habilitowanego.

3. Ocena osiągnięcia naukowego

Dr Głowacki przedstawił, jako najważniejsze osiągnięcie omówione w autoreferacie zatytułowanym „Procesy pułapkowania i rekombinacji promienistej nośników ładunku w polimerowych materiałach elektroluminescencyjnych” jest syntetycznym opisem wyników i analiz zawartych w przedstawionym cyklu jednotematycznym dziewięciu publikacji, w tym siedmiu o zasięgu międzynarodowym. Sumaryczny Impact Factor tych prac wynosi ponad 13. Habilitant jest pierwszym autorem 5 prac i autorem korespondującym 7 publikacji. Z załączonych oświadczeń podpisanych przez współautorów wynika wiodący i dominujący wkład dr Głowackiego w autorstwo przedstawionych artykułów (najmniejszy 60% dla jednej pracy, a dla pozostałych 8 publikacji zawiera się w zakresie 70-85%).

Siedem z przedstawionych prac dotyczy wyników badań procesów pułapkowania i rekombinacji nośników ładunku materiałów elektroluminescencyjnych przy wykorzystaniu metody termoluminescencji (TL) w zakresie 15-325 K. Natomiast dwie pierwsze publikacje prezentują wyniki uzyskane dla skonstruowanych urządzeń elektroluminescencyjnych, w których warstwy emisyjne wykonano w oparciu o wybrane polimerowe materiały, głównie o mieszaninę PVK z PBD domieszkowanej emiterami fosforescencyjnymi: kompleksami irydu. Te dwie prace są opisem technologii wytwarzania polimerowych diod elektroluminescencyjnych (PLEDów). Pod kierunkiem Habilitanta opracowano i wdrożono metodę wytwarzania i

hermetyzacji stabilnie pracujących PLEDów oraz zbudowano układ do wyznaczania ich podstawowych parametrów pracy. Zdobyte doświadczenie w wytwarzaniu stabilnie pracujących PLEDów, umożliwiło dokonywanie porównania otrzymywanych widm elektroluminescencji (EL) z widmami termoluminescencji i fotoluminescencji (PL) dla wybranych układów polimerowych. Uzyskując powtarzalne widma elektroluminescencji (EL), dr Głowacki porównywał je z widmami fotoluminescencji (PL) i termoluminescencji dla wybranych układów polimerowych. Na podstawie wyznaczonych stanów pułapkowych określono ich wpływ na aktywność centrów rekombinacyjnych w badanych materiałach. Znalazł także korelację pomiędzy wynikami TL a właściwościami emisyjnymi diod elektroluminescencyjnych.

Osiągnięciem Habilitanta było niewątpliwie zbudowanie aparatury do pomiarów TL umożliwiającej obniżenie temperatury do 15 K, od której jest rejestrowane widmo TL, co pozwoliło określić udział płytszych stanów pułapkowych. Wynikiem prowadzonych na niej badań była publikacja: „Charge carrier detrapping in PVK films as seen by thermoluminescence after excitation at 15 K”. Dotyczyła porównania widm TL otrzymanych dla PVK po wzbudzeniu w 15 i 83 K. Widma rozkładu spektralnego światła emitowanego w temperaturze występowania maksimów TL pozwoliły stwierdzić, że poniżej 50 K dominuje emisja pochodząca od trypletów monomerowych, a w wyższych temperaturach dominuje emisja związana z ekscymerami trypletowymi. Wykazano istnienie w PVK dwóch rodzajów pułapek.

Badania dr Głowackiego obejmują różne klasy materiałów polimerowych: polimery o układach wiązań sprzężonych reprezentowane na przykład przez polifluoreny oraz polimery nieskonjugowane takie jak PVK stanowiący matrycę dla emiterów światła w układach typu gospodarz-gość. Na podstawie wyników TL stwierdzono, że fluorescencyjna domieszka PAQ tworzy w PVK i mieszaninie PVK/PBD głębokie pułapki dla elektronów i jednocześnie stanowi efektywne centrum rekombinacji promienistej. Na tej podstawie w publikacji „Thermoluminescence of the blue light-emitting system based on poly(9-vinylcarbazole) doped with a pyrazoloquinoline dye” przedstawiono mechanizm przeniesienia elektronu i dziury, prowadzący do emisji pochodzącej tylko od cząsteczek tego emitera. Ponadto wykazano, że dodanie PBD do PVK przyczynia się do obniżenia intensywności

sygnału TL w stosunku do sygnału TL dla czystego PVK, co świadczy, że obecność PBD poprawia zdolność matrycy do transportu elektronów, a co za tym idzie sprzyja osiągnięciu zrównoważonych właściwości transportowych dla nośników obydwu znaków.

Jako jedno z najcenniejszych osiągnięć należy uznać zaprojektowanie i zbudowanie pod kierunkiem dra Głowackiego unikatowego w skali światowej systemu pomiarowego do spektralnie rozdzielczej termoluminescencji (SRTL) w zakresie 350-950 nm z możliwością pomiaru od 15 do 325 K. Wykorzystano ten unikatowy system pomiarowy do bardziej zaawansowanych badań stanów pułapkowych i centrów rekombinacji promienistej obecnych w PVK oraz mieszaninie PVK/PBD. Wyniki badań i analiz są zwarte w pracy „The nature of trapping sites and recombination centres in PVK and PVK–PBD electroluminescent matrices seen by spectrally resolved thermoluminescence”. Interesujących wyników dostarczyło porównanie widm SRTL z widmami EL. O ile w widmach SRTL dominująca rolę odgrywają stany trypletowe: ekscymerowe w PVK a ekscypleksowe w PVK/PBD to w elektroluminescencji dla PVK dominują singletowe stany ekscymerowe, a dla PVK/PBD singletowe stany ekscypleksowe.

Należy także podkreślić, że rozwijana przez dra Głowackiego technika spektralnie rozdzielczej termoluminescencji pozwoliła również zidentyfikować centra rekombinacji promienistej odpowiedzialne za niepożądaną, zieloną emisję w polifluorenach. W publikacji „Energy and charge transfer in polymers as seen by spectrally resolved thermoluminescence” na podstawie pomiarów SRTL, wykazano, że wprowadzenie cząsteczek trójfenyloaminy (TPA) do polifluorenów powoduje pojawienie się w układzie nowych, głębszych stanów pułapkowych. Obecność głębszych pułapek zlokalizowanych na cząsteczkach TPA powoduje wygaszenie niepożądanej emisji pochodzącej od keto defektów łańcuchów fluorenowych i jednocześnie zwiększenie wydajności elektroluminescencji.

W dwóch ostatnich latach zostały opublikowane w Organic Electronics i Synthetic Metals, czasopismach wiodących w tej dziedzinie, trzy prace, których pierwszym i jednocześnie korespondującym autorem jest dr Głowacki. Dotyczą one badań i analiz procesu transferu ekscytynu i ładunku w układach fosforescencyjnych

opartych na matrycach PVK lub PVK/PBD domieszkowanych kompleksami irydu. Szeroki zakres odpowiedzi spektralnej nowego układu detekcyjnego pozwolił wskazać kompleksy irydu emitujące światło trzech podstawowych barw zakresu widzialnego tzw. emiterów RGB, które są stosowane w organicznych kolorowych wyświetlaczach.

Wpływ obecności fosforescencyjnego emitera światła o barwie zielonej – tris(2-fenylpirydyny) irydu ($\text{Ir}(\text{ppy})_3$) na proces pułapkowania i rekombinacji promienistej w matrycach PVK i PVK/PBD przedstawiono w pracy „The impact of 1 wt % of $\text{Ir}(\text{ppy})_3$ on trapping sites and radiative recombination centres in PVK and PVK/PBD blend seen by thermoluminescence”. $\text{Ir}(\text{ppy})_3$ tworzy głębokie pułapki dla dziur ($\sim 0,4$ eV) w PVK i mieszaninie PVK/PBD. Wyznaczono względny udział tych stanów pułpkowych na cząsteczkach emitera do całej populacji pułpek.

W artykule „Spectrally resolved thermoluminescence versus electroluminescence spectra of PVK doped with 1 wt % of $\text{Ir}(\text{btp})_2(\text{acac})$ ” wykazano, że cząsteczki tego emitera przy stężeniu 1 % wag., tworzą również głębokie pułapki dla dziur. Porównano widma SRTL i EL tego układu i szczegółowo przeanalizowano procesy występujące w obydwu zjawiskach. Udowodniono, że po wzbudzeniu optycznym w niskich temperaturach i po wzbudzeniu wywołanym przepływem prądu w temperaturze pokojowej, mechanizm generowania ekscytonów trypletowych na cząsteczkach tego emitera umieszczonych w PVK jest taki sam.

W publikacji „Blue iridium complexes as electron trapping sites and efficient recombination centres in poly(N-vinylcarbazole) seen by spectrally resolved thermoluminescence”. Wykazano, że domieszkowanie PVK kompleksami irydu emitującymi światło o barwie niebiesko-zielonej: di(2-(4,6-difluorofenyl)pirydynian-N,C2') pikoliny irydu (FIrpic) lub tri(2-(2,4-difluorofenyl)pirydyny) irydu ($\text{Ir}(\text{Fppy})_3$) powoduje powstawanie głębokich pułpek elektronowych na cząsteczkach tych emiterów. Ponadto wykazano, że największa intensywność emisji w eksperymencie TL występuje, gdy koncentracja pułpek elektronowych jest zbliżona do koncentracji pułpek dla dziur występujących na matrycy PVK i dla układu PVK + FIrpic . Sytuacja taka ma miejsce dla koncentracji 0,1 % mas. domieszki. Dla tego składu oszacowane wartości koncentracji pułpek dla nośników obydwu znaków są zbliżone.

Na podstawie widm SRTL dr Głowacki wraz ze współpracownikami wykazał, że obecność stosowanych emiterów tworzy nowy kanał transferu energii w tzw. układach gospodarz-gość. Nawet dla małej koncentracji domieszki, cząsteczki tych emiterów działają, jako centra rekombinacji promienistej, które efektywnie konkurują z innymi centrami rekombinacyjnymi obecnymi w matrycy PVK i mieszaninie PVK/PBD. W celu wyjaśnienia emisji pochodzącej tylko od cząsteczek emitera w PLEDach opartych na układach gospodarz-gość rozważano dwa konkurencyjne mechanizmy: pułapkowanie nośników ładunku i transfer energii ekscytonu. Stwierdzono, że w przypadku, kiedy nośniki ładunku są bezpośrednio pułapkowane na cząsteczkach domieszki i które jednocześnie stanowią efektywne centra rekombinacji promienistej, wtedy pułapkowanie nośników ładunku odgrywa dominującą rolę w zjawisku elektroluminescencji.

Reasumując, należy zauważyć, że dr Głowacki koncentrował się nie tylko na aspekcie poznawczym, ale pod jego kierunkiem został opracowany i zbudowany unikatowy system pomiarowy, jak również została opracowana technologia wytwarzania i hermetyzowania polimerowych diod elektroluminescencyjnych. Ponadto wykazał, że metoda SRTL jest użyteczną techniką identyfikacji stanów pułapkowych i centrów rekombinacji promienistej w materiałach elektroluminescencyjnych. Na podstawie wyników SRTL można wstępnie selekcjonować materiały oraz optymalizować skład warstw emisyjnych wydajnych OLEDów o wymaganej barwie emitowanego światła.

Na podstawie przeglądu ocenianych publikacji można odnieść wrażenie bardzo dojrzałego warsztatu naukowego Kandydata. Zakres prowadzonych eksperymentów doświadczalnych jest bardzo szeroki a uzyskane wyniki i ich analiza teoretyczna oceniam bardzo wysoko. Uważam, że opis ocenianego osiągnięcia opartego na 9 wskazanych publikacjach jest spójny i dobrze opracowany przez Habilitanta. Osiągnięcie spełnia z nadmiarem wymagania dotyczące pracy habilitacyjnej.

Opinia końcowa

Stwierdzam, że dorobek naukowy dra Ireneusza Głowackiego jest bardzo duży, a przedstawiona praca habilitacyjna jest podsumowaniem prowadzonych badań i

stanowi istotne pogłębienie wiedzy o obecności stanach pułapkowych i ich wpływie na aktywność centrów rekombinacji promienistej w polimerowych materiałach elektroluminescencyjnych i całkowicie mieszczą się w dyscyplinie elektronika. Porównanie wyników doświadczalnych uzyskanych różnymi technikami w połączeniu z dogłębną ich analizą świadczą o dobrym zrozumieniu istoty prowadzonych badań i potwierdzają dojrzałość i samodzielność naukową dra Głowackiego.

Uważam, że całokształt dorobku naukowego Habilitanta, jak i osiągnięcie naukowe przedstawione w postaci 9 publikacji po wspólnym tytule „*Procesy pułapkowania i rekombinacji promienistej nośników ładunku w polimerowych materiałach elektroluminescencyjnych*” spełniają wymagania stawiane przez Ustawę o Stopniach i Tytule Naukowym z dnia 14 marca 2003 r. (DZ. U. z r 65 poz.595 ze zm.) osobie ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie elektronika. W związku z tym stawiam wniosek o dopuszczenie dra Ireneusza Głowackiego do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.

