

Kraków, 15.03.2025

dr hab. Agata Skwarek-Illés

Sieć Badawcza Łukasiewicz- Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki

Oddział Kraków

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Imię i nazwisko doktorantki: mgr Katarzyna Wasilewska

Tytuł rozprawy: „*Opracowanie technologii wytwarzania inteligentnego opakowania termokurczliwego z drukowanym sensorem temperatury*”

Dyscyplina naukowa: Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne

Dziedzina naukowa: Nauki inżyniersko-techniczne

Jednostka organizacyjna: Politechnika Warszawska

Promotor: prof. dr hab. inż. Małgorzata Jakubowska

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Jarosław Szusta

Praca doktorska mgr Katarzyny Wasilewskiej pt. „*Opracowanie technologii wytwarzania inteligentnego opakowania termokurczliwego typu SSL z drukowanym sensorem temperatury*” została wykonana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Małgorzaty Jakubowskiej na Politechnice Warszawskiej. Cel pracy został jasno postawiony i obejmował wytworzenie kompleksowej, zintegrowanej inteligentnej etykiety do monitorowania temperatury oznakowanego produktu w czasie rzeczywistym.

Rozprawa doktorska licząca 123 strony została podzielona na 5 rozdziałów. Na początku pracy przedstawiono streszczenia pracy w języku polskim i angielskim, spis skrótów oraz spis treści pracy.

W rozdziale 1 przedstawiono stan wiedzy i techniki dotyczący wytwarzania inteligentnych opakowań. Rozdział 2 zawiera opis celu pracy. Opis opracowanej technologii druku anteny NFC na podłożu termokurczliwym przedstawiono w rozdziale 3, a technologie

wytworzenia sensora temperatury w rozdziale 4. Rozdział 5 zawiera opis układu pomiarowego do bezprzewodowego odczytu temperatury z opracowanego czujnika. Na końcu pracy umieszczono podsumowanie pracy, spis cytowanej literatury oraz kartę technologiczną zadruku układu NFC oraz sensora temperatury na etykiecie termokurczliwej.

W rozdziale 1, Doktorantka opisuje stany wiedzy i techniki dotyczące wytwarzania etykiet termokurczliwych i integracji na nich wybranych układów elektronicznych. W opisie podkreślono potencjał zastosowania elektroniki drukowanej na opakowaniach branży „consumer goods”. Opisano również wagę odpowiedniego znakowania produktów spożywczych i monitorowania ich warunków przechowywania. W rozdziale tym poruszono również zagadnienia technologiczne związane z integracją elementów drukowanych z podłożami termokurczliwymi. Opisano również zasadę druku [REDACTED] stanowiącą podstawę opracowanej technologii.

Rozdział 2 zawiera cel pracy oraz uzasadnienie podjęcia postawionego problemu technologicznego. Opisano potrzeby opracowania (I) farby przewodzącej utrwalanej w temperaturze poniżej 50 °C, (II) opracowania technologii wytwarzania anteny NFC, (III) opracowania niskotemperaturowego procesu montażu filip-chip oraz, w celu rozszerzenia funkcjonalności opracowanego rozwiązania, (VI) opracowania drukowanego czujnika temperatury.

W rozdziale 3 opisano wyniki badań prowadzących do wytworzenia anteny NFC [REDACTED] z użyciem komercyjnych farb i tuszy przewodzących. Do badań użyto 6 komercyjnych farb przewodzących. Badania prowadzono przy zmiennych parametrach procesu druku tj prędkości druku, parametrów suszenia czy ilości farby. Opisano wyniki badań dla drukowalności, adhezji, odporności mechanicznej oraz parametry elektryczne nadrukowanych warstw. W drugiej części rozdziału, opisano sposób wytworzenia i parametry opracowanej autorskiej farby przewodzącej.

Rozdział 4 opisuje prace koncepcyjne i metodyką wytworzenia czujnika temperatury z komercyjnie dostępnej farby sensorycznej [REDACTED] oraz opracowanej autorskiej farby przewodzącej, jako materiału elektrodowego. W rozdziale opisano tożsame zagadnienia jak w rozdziale 3 w odniesieniu do opracowanej autorskiej farby przewodzącej oraz proces skalowania do procesu produkcyjnego.

W rozdziale 5 opisano schemat elektryczny układu pomiarowego demonstratora bezprzewodowego pomiaru temperatury.

Rozprawa podejmuje aktualny i istotny temat opracowania nowej technologii wytwarzania inteligentnej etykiety termokurczliwej z wbudowanym sensorem temperatury. Celem pracy było opracowanie i optymalizacja technologii integracji sensora temperatury z materiałem podłożowym oraz ocena jego funkcjonalności w warunkach rzeczywistych. Rozprawa ma charakter eksperymentalno-technologiczny. Przedstawione badania obejmują m.in.: dobór materiałów, opracowanie metody druku sensora, charakterystykę jego właściwości elektrycznych i temperaturowych, a także analizę kompatybilności z podłożem termokurczliwym.

W wyniku realizacji pracy z powodzeniem opracowano kompozyt przewodzący prąd elektryczny, dla którego temperatura suszenia nie przekracza 50°C, co umożliwia wytworzenie inteligentnej etykiety z zintegrowanym czujnikiem temperatury na podłożu termokurczliwym. Dzięki zastosowaniu warstw izolujących ograniczony został niekorzystny wpływ warunków procesu skurczu podłoża na wytworzone układy elektroniczne. Uzyskana warstwa przewodząca charakteryzowała się dobrą adhezją i niską rezystancją.

Uwagi ogólne:

1. Doktorantka wykazała się dobrą znajomością tematu oraz dużą samodzielnością w realizacji badań. Zakres przeprowadzonych eksperymentów jest szeroki i odpowiada wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim. W pracy zastosowano nowoczesne metody pomiarowe oraz przeprowadzono adekwatne do zagadnienia analizy.
2. Według recenzentki układ pracy budzi wątpliwości. Najważniejszymi osiągnięciami Doktorantki jest patent pn „*Heterofazowa przewodząca kompozycja polimerowa do druku na podłożach termokurczliwych i sposób jej otrzymywania*” i to na tym zagadnieniu powinna zostać zbudowana rozprawa doktorska. Niestety, w obecnym kształcie pracy to ważne osiągnięcie ginie w natłoku innych informacji, zwłaszcza w pierwszej połowie rozprawy. Dominują wyniki badań komercyjnych past/farb przewodzących, które o ile równie ważne, nie stanowią o nowatorskim charakterze pracy.
3. Dyskusja naukowa wyników badań opisanych w pracy jest dość uboga. W niektórych tylko jej fragmentach można odnaleźć próbę wyjaśnienia zachodzących zjawisk.

Recenzentka zdaje sobie sprawę, że praca realizowana jest w ramach doktoratu wdrożeniowego, którego celem jest przede wszystkim znalezienie rozwiązania, które znajdzie zastosowanie w działalności przedsiębiorcy zatrudniającego Doktorantkę, niemniej aspekt naukowy pracy powinien być jasno podkreślony.

4. Najłabszym elementem pracy jest niedostateczne, według recenzentki, uzasadnienie wykorzystania [REDACTED] w opracowanym rozwiązaniu. Na stronie 52 Doktorantka stwierdza: „[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED] Po lekturze rozprawy doktorskiej, recenzentka nie jest przekonana o wyższości tej metody nad innymi technikami wytwarzania elektroniki drukowanej, jednakże decyzja o stosowaniu tej metody do masowej produkcji inteligentnych etykiet pozostaje do decyzji przedsiębiorcy.

5. W pracy doszukać się można odniesienia tylko do jednego artykułu opublikowanego z udziałem Doktorantki, co w prawdzie spełnia warunek publikacyjny stawianym kandydatom do stopnia doktora, niemniej opublikowanie jednej pracy (czy to w czasopiśmie czy na konferencji) podczas czteroletniej realizacji pracy doktorskiej w ramach doktoratu wdrożeniowego pozostawia pewien niedosyt.
6. Rozdział 5 jest, według recenzentki, nieskończony. Opis zajmuje tylko 2 strony. Nie zostały przedstawione pomiary temperatury potwierdzające działanie czujnika.

Uwagi szczegółowe:

1. Str. 42, Par 2 „Z rysunku 3.5 wynika, że rezystancja maleje wraz ze wzrostem pojemności walka”. Rezystancja warstwy zależy od jej wymiarów geometrycznych.
2. Str. 42 „Im więcej cząsteczek przewodzących...” Cząsteczka to jest termin określający grupą atomów połączonych wiązaniami chemicznymi. W tym kontekście należałoby użyć słowa cząstka.
3. Str. 47 „...farby S3 i G1 charakteryzują się niską przyczepnością, poniżej 40%”. Jaki jest punkt odniesienia? Jaki wartości bezwzględne uzyskano przy pomiarach?

4. Str. 48 „Badania odporności na zadrapania...., która polega na pocieraniu zadrukowanej próbki”. Jaki ilościowo oceniania jest ta odporność? W jakiej skali?
5. Str. 51 Rys. 3.11 – W jakich dokładnie warunkach prowadzono pomiar skurczu (temperatura?)?
6. Str. 56, Rys 3.13 – Jaką średnicę miały płatki srebrowe [REDACTED] Na zdjęciu SEM jest podpis - 25µm, a w opisie wcześniej (i później) 10 µm.
7. Str. 64, Par 1 „Kompozycje srebrowe w bardzo krótkim czasie zasychały na wałkach rastowych i nie pozwalały na prawidłowe odwzorowanie wzoru” oraz „Linie są gładkie bez ubytków powierzchniowych, co świadczy o dobrej rozlewności farby na podłożu drukowanym”. Nie przedstawiono zdjęć porównawczych.
8. Str. 69, Rys 3.24 – przedstawiono zdjęcie powierzchni warstwy z zależności skurczu podłoża wynoszącego [REDACTED] W tekście, brak opisu co do różnic w zachowaniu się warstwy przewodzącej w zależności od stopnia skurczu podłoża.
9. Str. 70 Dlaczego do druku *roll 2 roll* wybrano farbę S1 skoro wcześniej jako rokującą do rozwoju technologii wybrano farbę S2?
10. Str. 71 Użyte podłoże termokurczliwe jest czułe na temperaturę powyżej 50°C. Czy nastawy [REDACTED] nie powodują topnienia podłoża?
11. Str. 73 „Podczas badań potwierdzono też współpracę między farbami przewodzącymi z farbami graficznymi utrwalanymi promieniowaniem UV”. Jakie badania potwierdzające fakt, że wspomniane farby nie reagują ze sobą zostały wykonane?
12. Str. 80 „Największe zmiany w rezystancji układów występowały po pierwszej serii pomiarowej. Zamiana rezystancji wynosiła 25% dla klejów nr 16 oraz nr 13 do 60% dla kleju nr 12”. Jaki jest punkt odniesienia? Czy to jest wartość początkowa rezystancji?
13. Str. 90 „Po przejściu zadrukowanych anten NFC przez tunel parowy zaobserwowano wzrost rezystancji.....”. Nie porównano wartości początkowych rezystancji oraz zmienionych po procesie kurczenia.
14. Str. 90 Jakie defekty widać na zdjęciu?
15. Str. 101 „Z uwagi na powyższe rezultaty badań zaleca się umieszczanie ...sensorów na [REDACTED] Jak można to wykonać? Jeżeli na etykiecie/opakowaniu skurcz występuje nierównomiernie to taka informacja powinna być podana dużo wcześniej. Czy etykieta jest zmapowana pod względem różnic skurczu w danych obszarach?

16. Str. 108 „*W kolejnym etapie prac porównano laboratoryjne stanowisko drukarskie z zespołem fleksograficznym maszyny drukującej*”? Co to znaczy? Jak porównano?

17. Str. 111 Brak opisu wyników pomiarów temperatury przeprowadzonych z wykorzystaniem wykonanego czujnika i układu pomiarowego.

Wymienione powyżej uwagi i pytania nie umniejszają wartości merytorycznej rozprawy i należy je potraktować jako głos recenzenta w dyskusji. Rozprawa wnosi oryginalny wkład w rozwój technologii inteligentnych opakowań i druku funkcjonalnych struktur elektronicznych na niestandardowych podłożach. Wyniki badań mogą znaleźć zastosowanie w przemyśle spożywczym, farmaceutycznym lub logistyce.

Na podstawie analizy treści rozprawy Doktorantki stwierdzam, że spełnione zostały wymogi określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, w szczególności:

- rozprawa prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne
- przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej
- doktorantka wykazała się zdolnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

dlatego wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

.....*Agata Skwarek-Illés*.....

Agata Skwarek-Illés