

Kraków, 13.05.2019 r.

Prof. dr hab. Tomasz Stapiński
Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica
w Krakowie
Katedra Elektroniki
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Recenzja rozprawy doktorskiej

Pana mgr inż. Jakuba Krzemińskiego
pt. Opracowanie technologii wysokoprzewodzących nanosrebrowych tuszów do
wytwarzania elementów elektronicznych metodą druku aerozolowego

Promotor: Prof. dr hab. inż. Małgorzata Jakubowska

Promotor pomocniczy: Dr inż. Grzegorz Wróblewski

Problematyka rozprawy

Jednym z wyzwań cywilizacyjnych poprzedniego i obecnego stulecia jest rozwój szeroko rozumianej elektroniki. W ostatnich latach wzrasta zainteresowanie elektroniką drukowaną. Istotnym elementem jest możliwość uzyskiwania coraz to lepszej precyzji i rozdzielczości jak również możliwość wytwarzania elementów dla tzw. „*Wearable electronics*” i *Internetu rzeczy* (ang. *Internet of Things*). Zainteresowanie Doktoranta związane jest z wykorzystaniem technik druku w oparciu o zastosowanie tuszu w postaci aerozolu, co umożliwiło wytworzenie ścieżek o szerokości ok. 10 μm i grubości poniżej 2 μm podczas ciągłego procesu druku, czyli znaczącego zminiaturyzowania wykonywanych wydruków. Warto zaznaczyć, że taka szerokość ścieżki jest już poniżej możliwości rozróżniania przez oko ludzkie, a poprzez ciągłość druku powala na wytwarzanie bardziej spójnych ścieżek niż ma to miejsce w przypadku techniki druku strumieniowego (ink-jet). Zaletą wspomnianego procesu druku jest możliwość wytworzenia elementów elektronicznych na elastycznych podłożach z możliwością masowej produkcji przy niskim koszcie. Tak duża rozdzielczość druku możliwa do osiągnięcia w sposób ciągły otwiera szerokie możliwości aplikacyjne dla elektroniki drukowanej.

Pan mgr inż. Jakub Krzemiński w przedstawionej do oceny dysertacji skoncentrował się na opracowaniu technologii wytwarzania wysoko przewodzącego tuszu do druku aerozolowego z użyciem fazy funkcjonalnej w postaci nanoproszku srebra. Taka kompozycja pozwoliła osiągnąć wysokie przewodnictwo elektryczne właściwe wykonywanych wydruków. Metoda spiekania fotonicznego umożliwiła wykonanie wydruków na podłożach nie odpornych na wysoką temperaturę. Dowodem na osiągnięcie przez Doktoranta zamierzonego celu było wykonanie demonstratorów - elastycznego mikroukładu elektronicznego (czujnika pojemności) oraz optrody stosowanej w optogenetyce, co potwierdziło biegłe opanowanie warsztatu druku jak i niewątpliwych zdolności w projektowaniu i budowie maszyn. Na podkreślenie zasługuje fakt, że badania prowadzone przez Pana mgr inż. Jakuba Krzemińskiego zakończyły się sukcesem aplikacyjnym.

Charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska składa się z 149 stron i ma prawidłowy układ edytorski, a jej struktura jest przejrzysta. Przytoczona bibliografia jest obszerna, zawiera 155 pozycji w większości z kilku ostatnich lat wydane w liczących się czasopismach naukowych, z czego Pan mgr inż. Jakub Krzemiński jest współautorem 9 pozycji. Autor wykazał się bardzo dobrym rozeznaniem literaturowym w uprawianej przez Niego dyscyplinie naukowej oraz ukształtowanej pozycji naukowej. Rozprawa zawiera wykaz skrótów i akronimów oraz 1 Załącznik.

We Wprowadzeniu (rozdział 1) Autor naświetlił rozwój elektroniki drukowanej i elektroniki osobistej, wprowadził pojęcie elektroniki „niedostrzegalnej” oraz przedstawił rynek przewodzących tuszów i perspektywy rozwoju.

Rozdział 2 poświęcony jest opisowi stanu wiedzy dotyczącej elektroniki drukowanej oraz metod stosowanych w technologii elektroniki drukowanej. Przedstawiono kategorie i metody mikrodruku z podziałem na techniki przepływowe, druk laserowy, druk transferowy i druk kroplą. Pan mgr inż. Jakub Krzemiński skoncentrował się na druku aerozolowym z ultradźwiękową atomizacją do wytwarzania elastycznych mikroukładów do elektroniki „niedostrzegalnej”. Dokonał też wyboru tuszu C8i/C6i z uwagi na najwyższe przewodnictwo elektryczne właściwe $5,6 \times 10^6$ S/m przy spiekaniu w temperaturze 130°C metodą spiekania fotonicznego.

W rozdziale 3 określono Cel i zakres pracy jako *opracowanie technologii wytwarzania tuszu, dedykowanego do druku aerozolowego do zastosowania w elektronice „niedostrzegalnej”*. *Opracowany tusz miał spełnić warunek podatności na atomizację*

ultradźwiękową i umożliwić drukowanie linii o szerokościach poniżej 30 μm i przewodnictwo elektryczne właściwe powyżej 10^7 S/m na podłożach elastycznych. Tusz winien być przystosowany do spiekania za pomocą źródeł światła a druk możliwy do wykonania na podłożach wrażliwych na działanie wysokich temperatur, takich jak papier, ABS czy folia PET. Wydrukowane ścieżki powinny charakteryzować się jednorodnością, spójnością oraz dobrą przyczepnością do podłoża umożliwiającą zastosowanie tuszu do wytwarzania elastycznych mikroukładów elektronicznych. Warunki takie spełnić mogło srebro jako faza funkcjonalna tuszu. Do osiągnięcia celu konieczne było zaprojektowanie i skonstruowanie stanowiska do przeprowadzenia badań ultradźwiękowej atomizacji opracowywanych materiałów, wytypowanie rozpuszczalników podatnych na atomizację ultradźwiękową o cechach umożliwiających samoistne uformowanie się ścieżek, zbudowanie modułu drukującego, określenie dodatków powierzchniowo – czynnych, zbadanie wpływu zawartości fazy funkcjonalnej na podatność tuszu na atomizację ultradźwiękową oraz parametry elektryczne wydruków i właściwości mechaniczne, zbadanie mechanizmu spiekania.

Rozdział 4 rozprawy odnosi się do określenia metodyki badań: wytwarzania tuszów do druku aerozolowego, przeprowadzenia ich badań, metodyki nanoszenia tuszów drukiem aerozolowym, spiekania i badania właściwości wydruków.

W rozdziale 5 Autor skoncentrował się na opracowaniu koncepcji i wykonaniu stanowiska do badań atomizacji ultradźwiękowej oraz drukowalności tuszów w druku aerozolowym według własnego projektu.

Kolejny rozdział 6 dotyczy badania wpływu parametrów procesu druku aerozolowego na właściwości wydrukowanych warstw z uwzględnieniem wpływu średnicy dyszy drukującej, wpływ przepływu gazu nośnego i osłonowego oraz wpływu szybkości druku geometrię i właściwości elektryczne ścieżki.

Rozdział 7 stanowi opis przeprowadzonych badań kompozycji tuszów, wpływu rozpuszczalników i ich mieszanek na lepkość i stopień atomizacji tuszu oraz dodatków środków powierzchniowo czynnych – surfaktantów, fazy funkcjonalnej, procesu spiekania fotonicznego na właściwości tuszów oraz właściwości wydruków w tym badania zmęczeniowe wydrukowanych wzorów.

Rozdział 8 stanowi praktyczne potwierdzenie możliwości aplikacyjnych opracowanego procesu i przewodzącego tuszu. Pan mgr inż. Jakub Krzemiński zastosował druk aerozolowy do wytwarzania elementów elektronicznych (drukowany elastyczny mikroukład elektroniczny, drukowane ścieżki na optrodach stosowanych w optogenetyce). Zaprezentowane wyniki w pełni potwierdzają osiągnięty przez Autora sukces i nie

pozostawiają wątpliwości, co do prawidłowości przeprowadzonych badań, opracowanej technologii druku i kompetencji Pana magistra inżyniera. Uzyskane wyniki są bez wątpienia wkładem Pana mgr inż. Jakuba Krzemińskiego w rozwój elektroniki drukowanej niewątpliwych zdolności w projektowaniu i budowie maszyn. Rozprawę kończy rozdział podsumowanie i wnioski, spis literatury oraz załącznik.

Oryginalne osiągnięcia Autora

Recenzent nie ma najmniejszych wątpliwości, że ocenianą dysertację cechuje wysoki poziom naukowy a Pan mgr inż. Jakub Krzemiński posiada wielkie kompetencje i dał się poznać jako utalentowany Badacz. Nie zawaham się stwierdzić, iż tak perfekcyjnie opanowany przedmiot rozprawy stawia Autora w gronie ekspertów w zakresie technik druku. Opracowana zarówno technologia jak i przebadany nowy materiał o potwierdzonych praktycznych zastosowaniach jest wyróżniającym się osiągnięciem Pana mgr inż. Jakuba Krzemińskiego.

Najważniejsze osiągnięcia Pana mgr inż. Jakuba Krzemińskiego to:

- Opracowanie tuszu podatnego na ultradźwiękową atomizacją stosowaną w druku aerozolowym.
- Skonstruowanie stanowiska badawczego do analizy wielkości kropeł generowanych w trakcie atomizacji. Wymagało to dogłębnego poznania samego procesu druku, analizy parametrów technologicznych, jak i dużej sprawności warsztatu inżynierskiego przy zaprojektowaniu i wykonaniu stanowiska,
- Opracowanie konstrukcji głowicy drukującej zapewniającej właściwe mieszanie się gazu nośnego i osłonowego (bez turbulencji w przepływie)
- Wyznaczenie parametrów procesu druku aerozolowego dla uzyskania pożądanych właściwości wydrukowanych warstw
- Określenie okna technologicznego procesu dla stworzenia wydruku o możliwie najwyższym przewodnictwie elektrycznym przy optymalnej szerokości ścieżki.
- Zastosowanie druku aerozolowego do wytwarzania elementów elektronicznych w celu wykonania drukowanego elastycznego mikroukładu, montażu zewnętrznych elementów elektronicznych oraz pracowanie pól kontaktowych pod lutowany montaż powierzchniowy.
- Opracowanie mikro przelotek do wielowarstwowego mikroukładu elektronicznego
- Wykonanie drukowanego elastycznego czujnika pojemności



Uwagi szczegółowe

Pewne uwagi krytyczne muszą skierować w stronę rozłożenia akcentów w rozprawie. W mojej opinii Autor zbyt dużo miejsca w rozprawie poświęcił opisowi stanu wiedzy w tematyce technik druku. Jest to z całą pewnością cenny materiał przybliżający problematykę technik druku, lecz oczekiwana byłaby bardziej skondensowana forma w przypadku rozprawy, która nie ukazała się jako pozycja monograficzna np. nakładem Wydawnictw Politechniki Warszawskiej.

Na str. 53 przedstawiono Rys. 11. Przekrój ścieżki, wykonanej metodą druku aerozolowego, otrzymany za pomocą profilometru optycznego. Zaznaczona odległość X: 81,0698 mm nie może być wyznaczona z dokładnością do ułamka nanometra. Ponadto brakuje komentarza z wyjaśnieniem, co oznacza wartość X.

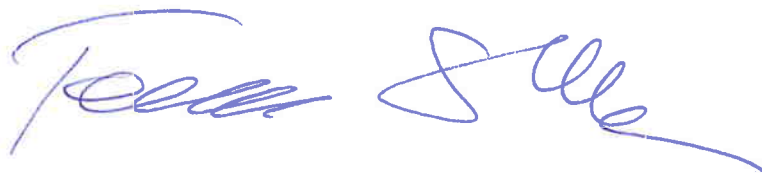
Ponadto Autor w kilku miejscach rozprawy przewodność utożsamia błędnie z przewodnictwem elektrycznym właściwym. Wymienione uchybienia nie wpływają na bardzo dobrą ocenę przedstawionej do recenzji pracy doktorskiej.

Wnioski końcowe

Pan mgr inż. Jakub Krzemiński w czasie realizacji swojej pracy doktorskiej wykazał się dużą wiedzą w zakresie technik druku. Podkreśleniu zasługuje aplikacyjny charakter pracy i możliwość wykorzystania wyników badań przy projektowaniu i wykonywaniu urządzeń. Cel pracy został osiągnięty a recenzowana rozprawa doktorska posiada wysoki poziom naukowy i stanowi znaczący wkład w dziedzinę nauk technicznych. Dojrzałość naukową Autora potwierdza fakt, iż niektóre wyniki prac były już opublikowane w czasopiśmie naukowych o szerokim oddziaływaniu.

Reasumując stwierdzam, że cel pracy został osiągnięty, recenzowana rozprawa doktorska posiada wysoki poziom naukowy i spełnia z naddatkiem warunki stawiane rozprawom doktorskim. Na podstawie Ustawy o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w zakresie Sztuki z 14 marca 2003 roku (z późniejszymi zmianami) wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Równocześnie, po przyjęciu publicznej obrony pracy doktorskiej Pana mgr inż. Jakuba Krzemińskiego, z uwagi na jej wysoki poziom naukowy, duże znaczenie wyników dla rozwoju dyscypliny naukowej, aspekty aplikacyjne, znaczny dorobek publikacyjny składam **wniosek o jej wyróżnienie.**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Tomasz J. ...', written in a cursive style.