

Dr hab. inż. Tomasz Chmielewski, prof. uczelni
Politechnika Warszawska
Wydział Inżynierii Produkcji
Instytut Techniki Wytwarzania
ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa

Warszawa, dn. 26.05.2019 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

„Opracowanie technologii wysokoprzewodzących nanosrebrowych tuszów do wytwarzania elementów elektronicznych metodą druku aerozolowego”

Autor: mgr inż. Jakub Krzemiński

Promotor: prof. dr hab. inż. Małgorzata Jakubowska
Promotor pomocniczy: dr inż. Grzegorz Wróblewski

Opracowano na zlecenie Rady Wydziału Mechatroniki
Politechniki Warszawskiej

1. Treść i zakres rozprawy

Recenzowana praca dotyczy nowoczesnego druku aerozolowego stosowanego w elektronice, który staje się coraz bardziej popularny wśród innych metod mikrodruku. Zastosowanie tuszu w postaci aerozolu umożliwia wytwarzanie ścieżek o szerokości poniżej 30 μm i grubości poniżej 5 μm podczas ciągłego procesu druku. Druk aerozolowy umożliwia znaczną miniaturyzację i rozszerzenie zastosowania elektroniki drukowanej w wysokiej rozdzielczości o elastyczne mikroukłady elektroniczne wytwarzane na niepłaskich powierzchniach.

Rozprawa liczy 149 stron, składa się z dziesięciu rozdziałów, przy czym jej zasadnicza część, opisująca badania naukowe Doktoranta obejmuje rozdziały od czwartego do ósmego. Pozostałe części pracy to: wprowadzenie, szeroka analiza stanu zagadnienia, podsumowanie, streszczenie w języku polskim i angielskim, spis literatury cytowanej w rozprawie, zawierający 155 pozycji w tym dziewięć prac Doktoranta.



W rozdziale pierwszym autor wprowadza czytelnika w problematykę rozwoju elektroniki drukowanej „niedostrzegalnej” oraz przedstawia perspektywę rozwoju tuszów przewodzących.

Rozdział drugi poświęcono szerokiemu opisowi stanu zagadnienia w obszarze metod elektroniki drukowanej. Scharakteryzowano metody alternatywne wobec druku aerozolowego z ultradźwiękową atomizacją. Uzasadniono wybór tuszu do prowadzonych badań.

W rozdziale trzecim obrano cel pracy oraz określono jej zakres, którym było opracowanie technologii wysokoprzewodzącego tuszu kompozytowego z nanometrycznymi cząstkami srebra przeznaczonego do druku aerozolowego stosowanego do wytwarzania elektroniki „niedostrzegalnej”. Opracowany tusz miał być podatny na atomizację ultradźwiękową i umożliwiać drukowanie linii o szerokości poniżej 30 μm i przewodnictwo właściwe powyżej 10^7 S/m na podłożach elastycznych. Tusz powinien być przystosowany do spiekania za pomocą światła, a druk możliwy do wykonania na podłożach wrażliwych na działanie relatywnie wysokiej temperatury, takich jak papier, PET czy ABS. Wydrukowane ścieżki powinny charakteryzować się jednorodnością, spójnością oraz dobrą przyczepnością do podłoża umożliwiającą zastosowanie tuszu do wytwarzania elastycznych mikroukładów elektronicznych. Niezbędnym do osiągnięcia założonego celu było zaprojektowanie i zbudowanie stanowiska do prowadzenia badań atomizacji ultradźwiękowej tuszu, wskazanie rozpuszczalników podatnych na atomizację ultradźwiękową, zaprojektowanie i zbudowanie zespołu drukującego, zastosowanie dodatków powierzchniowo czynnych, zbadanie wpływu udziału fazy funkcjonalnej na podatność tuszu na atomizację ultradźwiękową oraz na właściwości elektryczne i mechaniczne wydrukowanych ścieżek.

Rozdział czwarty zawiera opis metod stosowanych w trakcie prowadzonych badań wytwarzania i nanoszenia tuszów, spiekania oraz charakteryzowania właściwości wykonanych ścieżek przewodzących.

W rozdziale piątym Autor opisał budowę i stanowiska do badań atomizacji tuszu oraz system drukujący, które po połączeniu umożliwiły przeprowadzenie zaawansowanych testów drukowalności tuszu w druku aerozolowym.

Michał

Rozdział szósty dotyczy badania wpływu wybranych parametrów procesu druku na właściwości geometryczne i elektryczne wydrukowanych ścieżek z uwzględnieniem: średnicy dyszy drukującej, przepływu gazu nośnego i osłonowego oraz prędkości druku.

Rozdział siódmy zawiera opis zrealizowanych badań tuszów o różnym składzie i kompozycji z uwzględnieniem wpływu różnych składników na lepkość i stopień atomizacji tuszu. Zbadano wpływ rozpuszczalników, dodatków powierzchniowo czynnych, fazy funkcjonalnej, warunków spiekania na właściwości uzyskanych wydruków.

W rozdziale ósmym potwierdzono technologiczność opracowanego procesu i oczekiwane właściwości użytkowe ścieżek wydrukowanych tuszem przewodzącym. Wydrukowano pełnowartościowe obiekty mikroelektroniczne o unikalnych na skalę europejską właściwościach potwierdzając w ten sposób założony, bardzo ambitny cel pracy. Uzyskane wyniki są niewątpliwym wkładem Pana mgr. inż. Jakuba Krzemińskiego w rozwój mikroelektroniki i świadczą o nieprzeciętnych kompetencjach w projektowaniu urządzeń i znajomości technologii mikro druku w elektronice

Z powyższych względów wybór tematyki uważam za uzasadniony zarówno ze względów naukowych jak i utylitarnych.

2. Ocena merytoryczna

Doktorant obrał ambitny cel, którym było opracowanie technologii wysokoprzewodzących nanosrebrowych tuszów do wytwarzania elementów elektronicznych metodą druku aerozolowego. Recenzowaną rozprawę cechuje wysoki poziom naukowy. Opracowanie przedmiotu rozprawy świadczy o wyjątkowo wysokich kompetencjach autora.

Do najważniejszych osiągnięć autora należą:

- Opracowanie składu tuszu do druku aerozolowego.
- Budowa stanowiska do analizy geometrii kropeł generowanych w trakcie atomizacji.

- Wskazanie przedziału parametrów procesu technologicznego drukowania ścieżek o najwyższym przewodnictwie elektrycznym.
- Wydrukowanie elastycznego czujnika pojemności oraz optrody.
- Opracowanie kompleksowej technologii o wysokim potencjale wdrożeniowym.

Po wnikliwym zapoznaniu się z treścią rozprawy stwierdzam, że analiza stanu zagadnienia, plan badań, metodyka i realizacja badań, dobór aparatury naukowo-badawczej oraz opracowanie wyników, prezentują bardzo wysoki poziom merytoryczny, a sformułowane przez autora cele pracy zostały zrealizowane w planowanym zakresie.

Do dużych zalet pracy zaliczam kompleksowe ujęcie badanego problemu, opracowano unikalny materiał w postaci tuszu, który wykorzystano do wytworzenia ścieżek przewodzących z użyciem opracowanej technologii mikro druku aerozolowego. Dużą zaletą pracy to również poprawność metodologiczna wynikającą ze struktury opracowania i poprawność metodyczna w rozwiązywaniu zadań cząstkowych.

Autor wykazał się szeroką, interdyscyplinarną wiedzą, umiejętnością planowania badań oraz interpretacji uzyskanych wyników. W wielu fragmentach pracy można dostrzec wysoką świadomość naukową i duże doświadczenie technologiczne autora. Wysoko oceniam analizę wyników badań, jest kompleksowa.

4. Uwagi do pracy

W pracy występują nieliczne niedoskonałości gramatyczne, językowe i stylistyczne. Zastosowane w pracy nazewnictwo jest generalnie poprawne.

Poniżej wymieniono uwagi o charakterze dyskusyjnym, jednak należy podkreślić, że mają one charakter jedynie nomenklaturowy, a nie naukowy.

1. Tytuł dysertacji odnosi się do opracowanie technologii, jednak w rozprawie, autor stan zaawansowania opracowania określa jedynie jako model eksperymentalny.

2. Powierzchnia swobodna kropli zbliżona jest do sfery i powinna być charakteryzowana średnicą. Autor często posługuje się w pracy określeniem „wielkość kropli” w μm .
3. Na rys. 11 zaznaczono wymiar X: 81,0698 μm , który nie został opisany, a z drugiej strony należało go zaokrąglić.
4. W treści pracy autor wielokrotnie błędnie utożsamia przewodność z przewodnictwem elektrycznym właściwym.
5. W pracy nie ponumerowano wzorów.

5. Wnioski końcowe

Uważam, że recenzowana rozprawa prezentuje bardzo wysoki poziom merytoryczny, zawiera wiele elementów nowości i oryginalności oraz wnosi wkład w rozwój mikrodruku w układach elektronicznych.

Ponadto stwierdzam, że Autor wykazał się szeroką interdyscyplinarną wiedzą, umiejętnością planowania i realizacji badań naukowych, umiejętnością krytycznej oceny uzyskanych wyników, co świadczy o predyspozycjach do realizacji prac badawczych.

Wyniki badań zaprezentowane w dysertacji zostały opublikowane w kilku artykułach w czasopismach naukowych w obiegu międzynarodowym.

W związku z powyższym uważam, że rozprawa doktorska opracowana przez Pana mgr. inż. Jakuba Krzemińskiego pt. „Opracowanie technologii wysokoprzewodzących nanosrebrowych tuszów do wytwarzania elementów elektronicznych metodą druku aerozolowego” spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy prawa i może być dopuszczona do publicznej obrony w dyscyplinie Budowa i eksploatacja maszyn.

Mając na uwadze wymienione powyżej bardzo wysokie walory naukowe dysertacji, istotne znaczenie opracowania dla rozwoju dyscypliny naukowej oraz znaczny dorobek publikacyjny Pana mgr. inż. Jakuba Krzemińskiego wnioskuję o wyróżnienie pracy.

Tawun Chmelinski