

TŁUMACZENIE POŚWIADCZONE Z JĘZYKA ROSYJSKIEGO

Prof. dr hab. inż. Sergii Pavlov,
Wydział Inżynierii Biomedycznej i Systemów Optyczno-Elektronicznych
Winnicki Narodowy Uniwersytet Techniczny, Winnica, Ukraina

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej Vladimira Kovaleva pt.: „Metoda elipsometrii spektralnej LED z przełączaniem ortogonalnych stanów polaryzacji”

1. Podstawa do sporządzenia recenzji.

- pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Lubelskiej z dnia 29.06.2022 r., Uchwała nr AEiE/23_2.9b/20-24,
- rozprawa doktorska mgr. inż. Vladimira Kovaleva pt.: "*Metoda elipsometrii spektralnej LED z przełączaniem ortogonalnych stanów polaryzacji*"
- Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r., poz. 85);
- Ustawa z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2018 r., poz. 1669).

2. Charakterystyka pracy.

Przedstawiona do rozpatrzenia rozprawa doktorska napisana jest w języku rosyjskim, liczy 146 stron z załącznikami, w tym 145 stron tekstu głównego drukowanego oraz spis piśmiennictwa w ilości 122 tytułów. Bibliografia odzwierciedla aktualny stan wiedzy w zakresie badań i zastosowań nowych informacyjnych systemów pomiarowych opartych na metodzie elipsometrii spektralnej w celu poszerzenia zakresu stosowania, poprawy dokładności i powtarzalności pomiarów parametrów elipsometrycznych, a także uproszczenia projektowania urządzenia pomiarowego w celu poprawy parametrów technicznych i ekonomicznych oraz rozszerzenia możliwości zastosowania w rozwiązaniach interdyscyplinarnych i produkcji.

Dobór literatury jest celowy i prawidłowy.

Rozprawa podzielona jest na 9 głównych rozdziałów, obejmujących wstęp, wnioski, literaturę i załączniki. Przedstawiony w pracy materiał ilustracyjny jest przejrzysty i odzwierciedla dorobek Vladimira Kovaleva w opracowaniu metody elipsometrii LED z przełączaniem ortogonalnych stanów polaryzacji, co umożliwiło zwiększenie dokładności w powtarzalności i czułości pomiarów stałych optycznych, w połączeniu z możliwością znacznego uproszczenia konstrukcji elipsometru widmowego dzięki wyłączeniu ze schematu optycznego ruchomych elementów polaryzacyjnych.



H. Różańska

Postawione w rozprawie zadania są poprawne i jasne, a zastosowana terminologia rzetelna i zrozumiała.

3. Aktualność tematu pracy doktorskiej.

Elipsometria jest szeroko stosowana w związku z pojawieniem się źródeł promieniowania laserowego i komputerów. Rozwój mikroelektroniki zdeterminował dominujący rozwój elipsometrii, opartej na analizie odbitej wiązki promieniowania. Obecnie szeroko stosowana jest elipsometria spektralna (ES), w której mierzone są widma parametrów elipsometrycznych. Jest to jedna z głównych metod analizy nowoczesnych nanostruktur.

Pomiary elipsometryczne mają charakter uniwersalny. W szczególności można wykonać badania dichroizmu liniowego i kołowego, rotacji płaszczyzny polaryzacji, anizotropii optycznej, mikroskopii polaryzacyjnej.

Uniwersalność i zawartość informacyjna metody SE determinuje szeroki obszar jej zastosowania.

ES umożliwia dokładne wyznaczenie widm stałych optycznych całego zbioru materiałów wykorzystywanych w współczesnych technologiach (metali, półprzewodników, dielektryków) w stanie masowym i warstwowym oraz grubości powłok, warstw powierzchniowych i przejściowych w złożonych strukturach wielowarstwowych w zakresie od kilku do tysięcy nanometrów.

Elipsometria spektralna umożliwia badanie właściwości mechanicznych, strukturalnych, fizycznych i chemicznych materiałów, mikrochropowości powierzchni, profilu rozkładu mikroporowości i mikrowtrąceń. Elipsometria spektralna jest skutecznym narzędziem do kontroli in situ procesów natrysku i trawienia.

Obecnie znaczenie stosowania metod elipsometrii spektralnej wiąże się z takimi obszarami zastosowań, jak nanotechnologia, fizyka i chemia powierzchni i cienkich warstw, optyka, fizyka krysztalów, elektrochemia, urządzenia sensoryczne dla ekologii, biologii i medycyny.

We współczesnej elipsometrii istnieje kilka głównych kierunków. Najbardziej rozwiniętym kierunkiem jest elipsometria z obracającymi się elementami polaryzacyjnymi. Szeroko stosowana jest również elipsometria z fotoelastycznymi modulatorami prędkości. Znacznie rzadziej stosowana jest elipsometria spektralna z podziałem wiązki promieniowania odbitej od próbki na kilka kanałów o różnych stanach polaryzacji i kilka fotodetektorów. Elipsometria zerowa, polegająca na znajdowaniu azymutów polaryzatora i analizatora odpowiadających minimum sygnału na fotodetektorze, była wcześniej szeroko stosowana w przypadku źródeł promieniowania laserowego, ale jest nieefektywna w elipsometrii spektralnej.

Obecnie szeroko stosowana jest analityczna metoda elipsometrii spektralnej (ES). Za pomocą elipsometrii spektralnej możliwe jest wyznaczanie grubości i widm stałych optycznych szerokiej gamy różnych materiałów (metali, półprzewodników, dielektryków). Jednocześnie metoda elipsometrii spektralnej dostarcza największej ilości danych analitycznych i umożliwia prowadzenie badań in situ podczas wytwarzania struktur cienkowarstwowych, co znajduje zastosowanie w szerokim obszarze badań interdyscyplinarnych.



Zatem rzeczywistymi zadaniami przy opracowywaniu nowych systemów informacyjno-pomiarowych opartych na metodzie elipsometrii spektralnej jest rozszerzenie zakresu działania, zwiększenie dokładności i powtarzalności pomiarów parametrów elipsometrycznych, a także uproszczenie konstrukcji aparatury pomiarowej w celu poprawy parametrów technicznych i ekonomicznych oraz rozszerzenia możliwości zastosowania w rozwiązaniach interdyscyplinarnych i produkcji.

4. Analiza przedmiotowa i ocena pracy.

Pierwszy rozdział rozprawy, będący wstępem, zawiera wprowadzenie do tematu, który jest rozważany w rozprawie, a także opisuje aktualność pracy. Rozdział ten stanowi syntetyczny przegląd literatury dotyczącej zagadnień poruszanych w pracy.

Przedstawiono własne refleksje autora na temat zalet stosowania analitycznej metody elipsometrii spektralnej.

Stwierdzono, że technologie tworzenia struktur cienkowarstwowych mają kluczowe znaczenie w procesie wytwarzania szeregu produktów w sektorze zaawansowanych technologii. Cechy tych produktów zależą bezpośrednio od parametrów fizycznych tworzonych struktur powierzchniowych, co warunkuje konieczność ich kontroli. W takich przypadkach często stosuje się metody i układy optyczne, które charakteryzują się możliwością bezdotykowego i bardzo precyzyjnego pomiaru grubości i stałych optycznych takich struktur cienkowarstwowych.

Rozdział drugi zawiera tezę, cel i zakres pracy. W niniejszym rozdziale postawiono tezę, że w niniejszej rozprawie opracowano metodę elipsometrii LED z przełączaniem ortogonalnych stanów polaryzacji, która pozwala na osiągnięcie wysokich parametrów technicznych, takich jak powtarzalność, dokładność i czułość pomiarów stałych optycznych, w połączeniu z możliwością znacznego uproszczenia konstrukcji elipsometru spektralnego dzięki wyłączeniu ze schematu optycznego ruchomych elementów polaryzacyjnych. Celem niniejszej pracy jest zmniejszenie błędu i poprawa powtarzalności pomiarów grubości i stałych optycznych struktur cienkowarstwowych przy występowaniu wpływów zewnętrznych. Sformułowano zadania badawcze.

Rozdział trzeci zawiera analizę metod i środków technicznych do monitorowania stałych optycznych i grubości cienkich warstw powierzchniowych. W tym przypadku właściwym zadaniem jest scharakteryzowanie cech powstałych struktur cienkowarstwowych, takich jak gradienty mikrostruktury, porowatość, uszkodzenia i ewentualne wady. Interesujące są badania cienkich warstw składających się z nanostruktur i mikrostruktur, zastosowania biocujników struktur cienkowarstwowych, a także nowe rozwiązania w oprzyrządowaniu i omijanie istniejących fundamentalnych ograniczeń techniki pomiarowej. W tym kontekście oczywista staje się potrzeba przemysłu i sektora naukowego na nowoczesne systemy informacyjno-pomiarowe do monitorowania właściwości optycznych i grubości wielowarstwowych struktur powierzchniowych, które łączą w sobie możliwość spójnej interakcji między rzetelnymi podejściami teoretycznymi a nowoczesnymi, dostępnymi na rynku przyrządami pomiarowymi. Rozdział zawiera przegląd alternatywnych metod określenia charakterystyk struktur cienkowarstwowych. Celem tego przeglądu było zidentyfikowanie najbardziej obiecującej i odpowiedniej techniki



[Handwritten signature]

charakteryzowania struktur cienkowarstwowych, która ma zastosowanie w szerokim zakresie badań interdyscyplinarnych. Autor doszedł do wniosku, że zastosowanie elipsometrii do charakteryzowania trójwymiarowych nanostruktur, w tym nanocząstek, kropek kwantowych, fulerenów i dentrimerów, zawsze wiąże się z inną cechą strukturalną lub kompozycyjną opisaną na rysunku. W przypadku nanostruktur w ponad połowie przypadków elipsometria jest wspierana przez mikroskopię w celu wizualizacji ich wielkości i rozkładu przestrzennego.

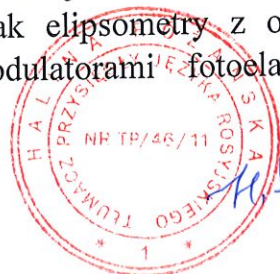
W tym samym rozdziale autor określa miejsce elipsometrii spektralnej wśród innych analitycznych metod badania struktur cienkowarstwowych z subnanometrową rozdzielczością. W trakcie przeglądu literatury i poszukiwań patentowych ujawniono, że obecnie istniejące układy i urządzenia elipsometrii spektralnej, prezentowane na rynku komercyjnym, mają zasadnicze ograniczenia, co narzuca rygorystyczne wymagania dotyczące stabilności wibracyjnej oraz konieczność skomplikowanej procedury kalibracji. Elipsometry z modulacją fazową nie mają tych wad, ale wysokie częstotliwości i zależność temperaturowa modulacji polaryzacji są czynnikami ograniczającymi. Badając teoretyczne możliwości poprawy wskaźników techniczno-ekonomicznych zaprojektowanego systemu pomiarowo-informacyjnego do kontrola grubości i właściwości optycznych struktur cienkowarstwowych z wykorzystaniem elipsometrii spektralnej wykazano, iż możliwe jest zastąpienie tradycyjnych lampowych zespołów oświetleniowych źródłami promieniowania LED w zakresie spektralnym UV-VIS-NIR, co znacznie poprawi stosunek sygnału do szumu i stabilność promieniowania sondującego.

Zaproponowano rozwiązanie problemu naukowego polegające na opracowaniu systemu pomiarowo-informacyjnego do monitorowania stałych optycznych i grubości cienkich warstw, który implementuje zmodyfikowaną metodę elipsometrii spektralnej z szerokozakresowym źródłem promieniowania LED, co zmniejsza błąd i zwiększa powtarzalność pomiarów parametrów elipsometrycznych przy jednoczesnej poprawie parametrów technicznych i ekonomicznych systemu pomiarowo-informacyjnego.

Rozdział czwarty poświęcony jest opracowaniu aparatu matematycznego do formalizowania pomiarów elipsometrycznych i polaryzacji promieniowania.

Podano opis aparatu matematycznego stosowanego do budowy elipsometrycznych układów pomiarowych oraz związanych z nim przyrządów polaryzacyjnych. Rozpatrzono model propagacji fali elektromagnetycznej w przestrzeni. Sformułowano główne założenia formalizmu macierzy Jonesa i Mullera. Odnośnie elementów polaryzacyjnych toru optycznego, takich jak polaryzator, analizator i kompensator, uzyskano wyrażenia opisujące ich wzajemne oddziaływanie z promieniowaniem. W oparciu o ten formalizm zaproponowano skonstruowanie modelu matematycznego toru pomiarowego elipsometru spektralnego o ograniczonej liczbie stanów polaryzacji.

Rozdział piąty poświęcony jest opracowaniu zmodyfikowanej metody elipsometrii ze skończoną liczbą stanów polaryzacji, przy czym metody elipsometryczne można podzielić na dwie zasadniczo różne kategorie. W pierwszej kategorii zmiana polaryzacji promieniowania sondującego następuje w wyniku zmiany azymutu urządzeń polaryzacyjnych w czasie, do tej kategorii zaliczana jest większość nowoczesnych komercyjnych urządzeń elipsometrycznych, takich jak elipsometry z obracającymi się elementami polaryzacyjnymi i elipsometry z modulatorami fotoelastycznymi. We



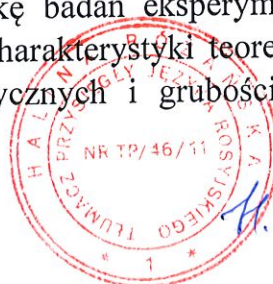
wcześniejszej części pracy zauważono występowanie podstawowych ograniczeń w określaniu parametrów elipsometrycznych właściwe dla tych metod konstruowania elipsometrów spektralnych. W drugiej kategorii, tzw. elipsometrii statycznej, pomiary elipsometryczne są wykonywane z pomiarem natężenia promieniowania sondującego w skończonej liczbie zadanych położań azymutalnych urządzeń polaryzacyjnych.

W tym rozdziale zaproponowano model matematyczny opisujący proces pomiaru stopnia polaryzacji wiązki sondującej przy zastosowaniu zmodyfikowanej metody elipsometrii statycznej. Rozwiązano problem sformalizowania modelu czterostrefowych statycznych pomiarów elipsometrycznych w celu określenia statycznych architektur elipsometru, optymalizujących błąd estymacji parametrów elipsometrycznych przy występowaniu dwóch głównych źródeł szumu zniekształcających pomiary: addytywnego szumu gaussowskiego i szumu śrutowego. Ze względu na fakt, że przedstawione źródła szumu są nieuniknione, otrzymane wyniki reprezentują podstawowe granice dokładności pomiaru parametrów elipsometrycznych w statycznych pomiarach elipsometrycznych. W celu uzasadnienia racjonalności zastosowania tego modelu przeprowadzono analizę oceny jego odporności na addytywny szum Gaussa i szum Poissona (szum śrutowy). Zastosowano metodę przetasowanej złożonej ewolucji (Shuffled Complex Evolution - SCE), która jest odporna na występowanie lokalnych maksimum, gdy konieczna jest optymalizacja kilku parametrów.

W rozdziale szóstym autor opracował algorytm obliczania płaskiego widma LED, który jest niezbędny do zszycia skończonego zbioru widm LED w widmo szerokozakresowe o zadnym natężeniu. Głównym celem proponowanego algorytmu dla danej liczby diod LED jest znalezienie współczynników wagowych, które mnożą prądy sterujące diody LED tak, aby całkowity wyjściowy profil widmowy był jak najlepiej zbliżony do pożądanego. Zaproponowany algorytm wypada korzystnie w porównaniu z innymi metodami kształtowania wyjściowego profilu spektralnego przestrajalnych źródeł światła LED, co stanowi skuteczną podstawę teoretyczną do praktycznej implementacji szerokopasmowych źródeł LED. Opracowano oryginalne urządzenia polaryzacyjne realizujące przełączanie ortogonalnych stanów polaryzacji i wprowadzające określone przesunięcie fazowe, co pozwala na zwiększenie odporność pomiarów elipsometrycznych na wpływy zewnętrzne, takie jak drgania i wahania temperatury (odtworzalność przesunięcia fazowego A do $0,001^\circ$).

Rozdział siódmy przedstawia wymagania funkcjonalne opracowanego systemu pomiarowo-informacyjnego, na podstawie których dobrane są główne komponenty zastosowane w elipsometrze spektralnym LED. Sformułowano i przeanalizowano główne wymagania dotyczące parametrów i możliwości, przedstawiono schemat blokowy układu sterowania stałymi optycznymi i grubościami cienkich warstw, na którym w całości przedstawiono wszystkie rodzaje oprogramowania stosowanego w systemie pomiarowo-informacyjnym. Otrzymano schemat funkcjonalny kanału pomiarowego do monitorowania parametrów optycznych i grubości cienkich warstw podczas badań eksperymentalnych.

W rozdziale ósmym przedstawiono metodykę badań eksperymentalnych, a także wyniki eksperymentów potwierdzające otrzymane charakterystyki teoretyczne elipsometru spektralnego LED do monitorowania stałych optycznych i grubości cienkich warstw.



H. Rodebuda

Pomiary kalibracyjne przeprowadzono na płytce krzemowej Ocean Optics StepWafer Si-SiO₂. Odchylenie zmierzonych grubości od wartości referencyjnej nie przekracza 0,4 nm, co pozwala stwierdzić subnanometrową rozdzielczość pomiarów grubości cienkich warstw. Szum RMS przy długości fali 600 nm i grubości tlenku 450 nm wynosił 0,003° (dla ¥) i 0,02° (dla A); przy długości fali 1000 nm i grubości tlenku 501 nm - 0,005° (dla ¥) i 0,03° (dla A).

Nowe podejście opracowane w niniejszej pracy znacznie rozszerza możliwości pomiarowe czułych elipsometrów z przełączaniem ortogonalnych stanów polaryzacji. Wyeliminowanie modulatorów polaryzacji o niskiej częstotliwości zmniejsza utratę intensywności wiązki, upraszcza konstrukcję elipsometrów spektralnych i umożliwia znaczne zwiększenie szybkości pomiarów elipsometrycznych przy użyciu szybkościowych impulsowych źródeł promieniowania. Przy wybranych długościach fal możliwe jest wyznaczenie przestrzennego rozkładu parametrów elipsometrycznych na obszarze badanych płytek, szybki pomiar zmiany parametrów przepływów cieczy i gazów w czasie oraz wykonanie pomiarów kinetycznych w konfiguracji pump/probe. Ten elipsometr spektralny może być używany do kontrolowania procesów wzrostu.

W części dziewiątej przedstawiono bibliografię współczesnych źródeł, na które składają się 122 pozycje w pełni skorelowane z tematyką badań prowadzonych w rozprawie.

Rozdział dziesiąty stanowi załącznik do rozprawy, w którym autor przedstawił certyfikat zgodności z płytą referencyjną.

5. Szczegółowe komentarze.

Teza, jak i cel pracy zostały sformułowane poprawnie i rzetelnie, nie budząc wątpliwości ani niedomówień. Praca prowadzona jest konsekwentnie zgodnie z zamierzonym celem, co prowadzi do udowodnienia postawionej tezy. Przyjęta metodologia dowodu jest logiczna, gdyż prowadzona jest od określenia potrzeb i wymagań poprzez analizę, opracowanie metod i modeli matematycznych aż po zastosowania w nowoczesnych narzędziach modelowania.

Na pracę składają się stwierdzenia teoretyczne, modelowanie oraz badania praktyczne.

Na podstawie przeprowadzonego modelowania matematycznego procesu czterostrefowych statycznych pomiarów elipsometrycznych przeanalizowano wpływ nieusuwalnych szumów na błąd oszacowania parametrów elipsometrycznych w skończonej liczbie zadanych położeń azymutalnych urządzeń polaryzacyjnych toru pomiarowego, co pozwoliło na wyznaczenie podstawowej granicy dokładności statycznego schematu pomiarowego. Cechą charakterystyczną prezentowanego systemu pomiarowo-informacyjnego jest zastosowanie zespołu diod LED jako szerokopasmowego źródła promieniowania elipsometru spektralnego, który zapewnia ciągły profil widmowy w zakresie UV-Vis-NIR z wymaganym stosunkiem sygnału do szumu. Opracowane autorskie urządzenia polaryzacyjne pozwalają na zwiększenie odporności systemu pomiarowo-informacyjnego na wpływy zewnętrzne, takie jak wibracje i wahania temperatury, a badania teoretyczne potwierdzają wyniki eksploatacji próbki laboratoryjnej opracowanego systemu pomiarowo-informacyjnego do monitorowania stałych optycznych i grubości z cienkich warstw.



H. Różańska

Badania eksperymentalne wykazały dużą zbieżność z wynikami symulacji. Świadczy to o wykonaniu 6 zadań badawczych określonych w rozdziale drugim.

Za dorobek własny autorki uważam następujące:

- Opracowano zmodyfikowaną metodę elipsometrii ze skończoną liczbą stanów polaryzacji. Jednocześnie zaproponowano podział metod elipsometrycznych na dwie zasadniczo różne kategorie. W pierwszej kategorii zmiana polaryzacji promieniowania sondującego następuje w wyniku zmiany azymutu urządzeń polaryzacyjnych w czasie, do tej kategorii zaliczana jest większość nowoczesnych komercyjnych urządzeń elipsometrycznych, takich jak elipsometry z obracającymi się elementami polaryzacyjnymi i elipsometry z modulatorami fotoelastycznymi. We wcześniejszej części pracy zauważono występowanie podstawowych ograniczeń w określaniu parametrów elipsometrycznych właściwe dla tych metod konstruowania elipsometrów spektralnych. W drugiej kategorii, tzw. elipsometrii statycznej, pomiary elipsometryczne są wykonywane z pomiarem natężenia promieniowania sondującego w skończonej liczbie zadanych położań azymutalnych urządzeń polaryzacyjnych.
- Zaproponowano model matematyczny opisujący proces pomiaru stopnia polaryzacji wiązki sondującej przy zastosowaniu zmodyfikowanej metody elipsometrii statycznej. Rozwiązano problem sformalizowania modelu czterostrefowych statycznych pomiarów elipsometrycznych w celu określenia statycznych architektur elipsometru, optymalizujących błąd estymacji parametrów elipsometrycznych przy występowaniu dwóch głównych źródeł szumu zniekształcających pomiary: addytywnego szumu gaussowskiego i szumu śrutowego.
- Opracowano algorytm obliczania płaskiego widma LED, który jest niezbędny do zszycia skończonego zbioru widm LED w widmo szerokozakresowe o zadanym natężeniu. Zaproponowany algorytm wypada korzystnie w porównaniu z innymi metodami kształtowania wyjściowego profilu spektralnego przestrajalnych źródeł światła LED, co stanowi skuteczną podstawę teoretyczną do praktycznej implementacji szerokopasmowych źródeł LED. Opracowano oryginalne urządzenia polaryzacyjne realizujące przełączanie ortogonalnych stanów polaryzacji i wprowadzające określone przesunięcie fazowe, co pozwala na zwiększenie odporność pomiarów elipsometrycznych na wpływy zewnętrzne, takie jak drgania i wahania temperatury (odtworzalność przesunięcia fazowego A do $0,001^\circ$).
- Sformułowano wymagania funkcjonalne opracowanego systemu pomiarowo-informacyjnego, na podstawie których dobrane są główne komponenty zastosowane w elipsometrze spektralnym LED.
- Przedstawiono schemat blokowy układu sterowania stałymi optycznymi i grubościami cienkich warstw, na którym w całości przedstawiono wszystkie rodzaje oprogramowania stosowanego w systemie pomiarowo-informacyjnym. Otrzymano schemat funkcjonalny kanału pomiarowego do monitorowania parametrów optycznych i grubości cienkich warstw podczas badań eksperymentalnych.
- Opracowano metodykę badań eksperymentalnych, a także wyniki eksperymentów potwierdzające otrzymane charakterystyki teoretyczne elipsometru spektralnego LED do monitorowania stałych optycznych i grubości cienkich warstw. Pomiary kalibracyjne przeprowadzono na płycie krzemowej Ocean Optics StepWafer Si-SiO₂.



[Handwritten signature]

Wśród mankamentów pracy, które doktorant powinien wyjaśnić, można wymienić:

- Stwierdzono, że celem rozprawy jest zmniejszenie błędu i zwiększenie powtarzalności pomiarów grubości i stałych optycznych struktur cienkowarstwowych przy występowaniu wpływów zewnętrznych, zatem należałoby podać wartości błędu, ponieważ błąd jest wartością.
- W pracy nie ma ogólnych wniosków, które pozwoliłyby na usystematyzowanie wyników, chociaż zostały one ujęte w poszczególnych rozdziałach.
- W rozdziale czwartym autor stwierdza, że sformułowano główne twierdzenia formalizmu macierzy Jonesa i Mullera dotyczące elementów polaryzacyjnych toru optycznego, takich jak polaryzator, analizator i kompensator oraz uzyskano wyrażenia opisujące ich interakcji z promieniowaniem, lecz twierdzenia te są dobrze znane.
- W rozdziale piątym, przy opracowywaniu systemu informacyjno-pomiarowego do kontroli stałych optycznych i grubości cienkich warstw, można było zastosować syntezę strukturalno-parametryczną, która pozwoliłaby na dokładniejsze określenie budowy obiektu i wartości parametrów jego elementów składowych w celu spełnienia warunków zadań syntezy opracowania.
- W pracy występuje wiele nieściśłości stylistycznych.
- niedogodności w sporządzaniu wykazu literatury.

Wady te nie wpływają na ogólny odbiór dzieła, który uważam za pozytywny.

6. Podsumowanie i wnioski.

Po zapoznaniu się z przedłożoną do oceny rozprawą doktorską stwierdzam, że:

- udowodniono tezę, postawioną w drugim rozdziale, a mianowicie: opracowano metodę elipsometrii LED z przełączaniem ortogonalnych stanów polaryzacji, która pozwala na osiągnięcie wysokich parametrów technicznych, takich jak powtarzalność, dokładność i czułość pomiarów stałych optycznych, w połączeniu z możliwością znacznego uproszczenia konstrukcji elipsometru spektralnego dzięki wyłączeniu ze schematu optycznego ruchomych elementów polaryzacyjnych.
- temat pracy jest aktualny, a wiedza teoretyczna i wyniki praktyczne są odpowiednio zestawione;
- w rozprawie wskazano na potrzebę i perspektywę przyszłych badań mających na celu rozwiązanie zagadnień związanych z rozwojem technologii tworzenia struktur cienkowarstwowych, które mają kluczowe znaczenie w procesie wytwarzania szeregu produktów w sektorze produkcji high-tech.

Z powyższego wynika, że doktorant posiada kompetencje do samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz charakteryzuje się znaczną znajomością dyscypliny naukowej, której dotyczy problematyka rozprawy.

W mojej ocenie doktorant wykazał się umiejętnością sformułowania problemu, samodzielnego rozwiązania go oraz sprawdzenia jego przydatności, potwierdzając poprawność przyjętej teorii i narzędzi do jej realizacji. Zaplanowane prace zostały zakończone, a teza potwierdzona.



H. Rostalski

Reasumując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Vladimira Kovaleva pt.: *“Metoda elipsometrii spektralnej LED z przełączaniem ortogonalnych stanów polaryzacji”* spełnia ustawowe wymogi stawiane pracom doktorskim w odniesieniu do oryginalności problemu naukowego, umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wiedzy teoretycznej.

W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr. inż. Vladimira Kovaleva do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

[podpis] /recenzent/

prof. dr hab. inż. Sergii Pavlov

Ja, mgr Halina Różańska, tłumacz przysięgły języka rosyjskiego, poświadczam zgodność powyższego tłumaczenia z okazanym mi skanem dokumentu w języku rosyjskim.

Tekst kursywą w kwadratowych nawiasach jest komentarzem tłumacza.

Lublin, dnia 27 kwietnia 2023 r.

Repertorium nr 277/2023



H. Różańska