

氏名	富山 健男
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第10003号
学位授与年月日	令和3年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査学術院	理工情報生命学術院
学位論文題目	Study on the Anisotropy of Silver Nanowire-Polymer Composite Films by Optical Polarization Analysis (偏光解析による銀ナノワイヤー・ポリマー複合膜の異方性に関する研究)
主査	筑波大学教授(連係大学院) 博士(工学) 武田 良彦
副査	筑波大学教授 博士(工学) 長谷 宗明
副査	筑波大学教授(連係大学院) 博士(理学) 唐 捷
副査	筑波大学教授(連係大学院) 博士(工学) 深田 直樹
副査	筑波大学准教授(連係大学院) Ph.D. 石井 智

## 論文の要旨

本審査対象論文は、次世代透明導電性フィルムとして期待される銀ナノワイヤー(Ag NW)ポリマー複合フィルムの光学計測解析による異方性の解明と、光学計測による構造・電気異方性の定量的評価方法の確立、さらに、デバイス応用の際に生じる「液晶ディスプレイでの光漏れ」と「電極のパターン見え」の定量評価と抑制方法に関するものである。

第1章では、本論文の背景と研究目的について記述している。次世代デバイスに利用される透明導電性フィルムに望まれる特性とその候補材料について述べられ、Ag NW ポリマー複合フィルムの利点、大量生産工程やナノ光学材料を利用することにより生じる解決すべき課題について述べられている。

第2章では、Ag NW ポリマー複合フィルムの Roll to Roll slot-die coating による作製方法と試料の電子顕微鏡像、暗視野顕微鏡像を含む基本特性が示されている。

第3章では、Ag NW ポリマー複合フィルムの構造・電気・光学異方性の関係を明らかとしている。Roll to Roll slot-die coating による作製は工業生産に向いているが、塗布方向とその直交方向で Ag NW の配向が生じ、その結果異方性が生じることが説明され、暗視野顕微鏡像による構造異方性評価、電極パターン作製による電気異方性評価、偏光分光法による光学異方性評価結果が示されている。光学異方性は、Ag NW から生じる1次散乱のみを考慮したモデルで構造異方性との関係が説明できること、電気異方性との関係は連続膜における関係と同じであることを明らかとしている。その結果、光学異方性計測評価により、構造・電気異方性が定量的に評価できることを明らかとしている。

第4章では、Ag NW ポリマー複合フィルムの鉛直方向を含む3次元の光学異方性の波長分散計測解析について述べられている。液晶ディスプレイ応用においては、光漏れの抑制が重要な課題の一つであることが説明されている。その課題解決のため鉛直方向を含む異方性評価が必要であり、かつナノ材料から生じる散乱による偏光解消を含むことから、分光ミューラー行列エリプソメリー手法を適用した解析を行っている。その結

果、複合膜の3次元複素屈折率の波長分散、Ag NW が鉛直方向に僅かに傾きながら面内で配向分布し、面内・鉛直方向ともに複屈折が存在することを明らかとしている。

第5章では、液晶ディスプレイ応用における光漏れ低減のための計測評価及びその低減指針について述べられている。ディスプレイの薄型化に伴い、導電フィルム層が偏光板間に配置されるため、偏光板直交配置においても位相差や偏光部分解消から光が漏れることが説明されている。位相差はポリリメータを用いたミューラー行列測定 of 極分解より定量評価を実施し、面内の異方性に起因していることを明らかとしている。偏光解消は、ミューラー行列測定 of 極分解では、絶対値が小さく評価が困難であるため、考案したパラレルニコル及びクロスニコルでの透過率から算出する手法を適用し、その主要因がナノ光学材料としての Ag NW の散乱から生じ、その充填密度や軸径に依存することを明らかとしている。これら知見を元に最適化を行い、実用的に問題の無いレベルまで低減できることを明らかとしている。

第6章では、Ag NW ポリマー複合フィルムで電極をパターンニングした際にその有無の光学特性差から生じる「パターン見え」の定量的評価と低減指針について述べられている。従来の評価手法は目視による官能評価で定量的ではなかったこと、ナノ材料としてその後方散乱によって生じることが説明されている。積分球を用いた拡散反射スペクトルから測色指標を導入することで色差として定量化できることを明らかとしている。Ag NW の充填密度と軸径の依存性から、最適化したことを述べている。

第7章では、本研究論文の総括が行われている。次世代フレキシブル透明導電性フィルムとして応用が期待される Ag NW ポリマー複合フィルムに関して、構造・電気・光学異方性の関係を明らかとし、偏光分光測定より構造・電気・光学異方性の定量的評価手法を確立したこと、3次元複素屈折率の波長分散を明らかとしたこと、ディスプレイ化した際の光漏れ、パターン見えに関して定量的評価を実施し、その低減指針を明らかとしたこと、今後の課題について述べられている。

## 審 査 の 要 旨

〔批評〕

本審査対象論文は、次世代フレキシブル透明導電性フィルムとして期待される銀ナノワイヤーポリマー複合フィルムの光学デバイス応用に対し光学特性の評価方法を確立し、主に光学異方性に関して詳細に解析評価し、特性改善を実施したものである。現在透明導電性膜として使われているITO膜等連続膜とは異なり、ナノ材料特有の光学特性が複合フィルムとしてマクロな光学特性に及ぼす影響を評価解析している。本研究では、偏光分光手法により3次元の光学異方性を明らかとし、非破壊非接触の光学計測により、構造異方性、電気異方性の定量的評価手法を確立している。さらにデバイス化した際に生じる課題についても、計測手法・定量評価手法を確立し、それらにより特性改善指針を明らかとしている。

本研究はナノ光学材料を用いた透明導電性フィルム材料の定量的な光学解析評価並びに光学特性改善において工学的な貢献のみならず、学術的貢献を十分果たしている。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として十分な学術的価値を持つものと認められた。

〔最終試験結果〕

令和 3 年 2 月 19 日、理工情報生命学術院学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。