

氏名	西 則男
授与した学位	博士
専攻分野の名称	工学
学位授与番号	博甲第5552号
学位授与の日付	平成29年 3月24日
学位授与の要件	自然科学研究科 産業創成工学専攻 (学位規則第4条第1項該当)
学位論文の題目	ナノ秒パルスレーザーによる透明導電膜の除去メカニズムに関する研究
論文審査委員	教授 岡田 晃 教授 藤井 正浩 教授 大橋 一仁

学位論文内容の要旨

本論文は、レーザー光による透明導電膜の除去加工に関する検討を行ったものである。ナノ秒パルスレーザーによる酸化亜鉛 (ZnO) 透明導電膜と銀ナノワイヤ透明導電膜の除去特性を検討し、除去プロセスを解明することでレーザー光による最適な除去加工法を検討した。

まず、研究の背景、目的および本論文の構成と概要について述べた後、ナノ秒パルスレーザーによる各種透明導電性酸化物 (TCO) 膜に対する除去加工特性と、ZnO 膜に対する除去加工における高品質化を目的とした加工方法について述べている。波長 1060nm, 532nm, 355nm の 3 種類のナノ秒パルスレーザーによるガウシアンモードのレーザー光強度分布を用いた Indium Tin Oxide (ITO) 膜, 酸化スズ (SnO₂) 膜, 及び ZnO 膜の除去加工では、レーザー光の波長、パルス幅ともに長い方が良好な加工が可能である適正パルスエネルギーの範囲は広がることがわかった。同様に、3 種類の波長のナノ秒パルスレーザーを用いたトップハットモードのレーザー光強度分布による ZnO 膜の除去加工では、ガウシアンモードと比較して高いエネルギー密度を必要とするがビームモード端でも十分なエネルギーを受け取ることができることからバリの発生が低減された。また、波長 1060nm のナノ秒ファイバレーザーを用いたトップハットモードのレーザー光強度分布において高速度観察による単レンズとアクロマティックレンズの除去プロセスを観察したところ、単レンズはレーザースポット中心から膜を押し出すように除去が進展し、アクロマティックレンズはレーザースポット全体に膜を押し付けるように除去が進展する様子が明らかとなった。そこで、トップハットモードのレーザー光強度分布に、単レンズとスリットマスクを光路中に組み合わせることによるレーザー光強度分布の調整を行い、レーザー光走査方向とレーザー光走査方向に垂直な方向のそれぞれに異なった特性のレーザー光強度分布を与えたところ、良好な絶縁状態を得ながらバリの少ない良好な溝形状を得ることができた。

次に、銀ナノワイヤ透明導電膜に対するナノ秒パルスファイバレーザーを用いた除去加工特性について述べている。本透明導電膜においては、オーバーコート層内の銀ナノワイヤが除去されることにより絶縁状態を得られる。この時、銀ナノワイヤが飛散するために空洞として除去痕が形成されることから、加工品に影響を及ぼすと考えられる除去痕の比率を除去面積比率として定義して検討した。その結果、長いパルス幅の方が除去面積比率は小さいが、良好な絶縁状態を得るためには、パルス幅の長い方が大きなフルエンスを必要とした。一方、視認性の変化を評価するために色差計を用いて除去加工部の測定を行ったところ、パルス幅一定の場合はフルエンスの増加にともなって銀ナノワイヤが短時間で除去され、オーバーコート層への熱影響の時間が短縮されることから色差は小さくなった。一方、加工部の光拡散状態はパルス幅一定の場合に、フルエンスの増加にともなって光が拡散する状態、拡散が少なく光が透過する状態、再び光が拡散する状態へと遷移した。視認性の変化を抑えるためにはレーザー光照射前後で拡散性に変化が無く、色差の値が変化しない状態を両立することが望ましいことから、各パルス幅にて良好な絶縁性を得ながら色差と拡散性の変化を抑える適切なフルエンスの存在が明らかとなった。

論文審査結果の要旨

本研究は、産業界で多用されているナノ秒パルスレーザを用いて、主に酸化亜鉛 (ZnO) 透明導電膜と銀ナノワイヤ透明導電膜の 2 つの材料に対する高品位な除去加工を行うことを目的として、除去加工特性とその加工メカニズムの解明に関して取り組んでいる。

ナノ秒パルスレーザを用いた透明導電性酸化物 (TCO) 膜の除去加工においては、各種レーザ光波長を用いて加工特性を明らかとした。さらに、TCO 透明導電膜の一種である ZnO 透明導電膜の除去加工において、レーザ光強度分布の裾が急峻である場合と緩やかな変化である場合で除去の進展が異なることを示した。また、オーバーラップをともなう加工においては、裾が緩やかな変化を示すレーザ光強度分布の方が絶縁状態を安定して得られることを明らかとした。そして、トップハットモードのレーザ光強度分布に単レンズとスリットマスクを用いて、走査方向とその垂直方向に異なる裾特性のレーザ光強度分布をつくり、これを用いて急峻な加工端とバリの抑制を達成しつつ、安定した絶縁状態を得ることができた。

トップハットモードのナノ秒パルスレーザを用いた銀ナノワイヤ透明導電膜の除去加工においては、銀ナノワイヤの除去状態と視認性の変化に関して検討している。パルス幅一定の場合、フルエンスの増加にともない銀ナノワイヤは短時間で除去され、オーバーコート層への熱影響時間も短くなることから加工部の色差が小さくなることを示した。また、短いパルス幅や大きなフルエンスでは色差の値が小さくなるが、銀ナノワイヤの除去によるレイリー散乱の生じない状態となり、除去痕にてミー散乱が生じることで未加工部と類似した光の拡散状態となることを明かした。このことから、加工部の視認性へ影響を及ぼす色差とヘーズは熱影響による変色と除去痕の形成に各々起因し、パルス幅の長短により相反する特性を示した。しかし、色差を抑制しつつヘーズの変化割合が緩やかとなる適切なパルス幅とフルエンスを選択することにより、加工部の視認性の変化を低減できることを明かした。

本研究によって得られた成果は、今後のレーザ装置産業ならびにその応用工業分野における革新的な技術開発として有効な資料を提供するものであり、工学的・工業的価値が高い。よって本研究は博士 (工学) の学位に値するものと認められる。