

京都大学	博士（工学）	氏名	Yang Yang
論文題目	Local structural modification by femtosecond laser pulses and light manipulation by dielectric metasurface hologram （フェムト秒レーザーによる局所構造改質と誘電体メタサーフェスホログラムによる光操作）		
（論文内容の要旨） 本論文は、透明材料内部へのフェムト秒レーザー直接描画による局所構造改質と誘電体メタサーフェスホログラムによる光操作に関するものであり、序章および全四章から構成されている。 序章では、研究背景としてフェムト秒レーザーによる透明材料プロセッシングに関して、フェムト秒レーザーパルス発振原理、誘電体メタサーフェスによる光学操作の原理について述べ、フェムト秒レーザー直接描画法の有効性と誘電体メタサーフェスの学術的な意義を説明している。 第1章では、フェムト秒レーザーと物質内部の典型的な相互作用に基づき、フェムト秒レーザー直接描画法により誘電体メタサーフェスを作製するために解決すべき課題について検討している。フェムト秒レーザーと物質の相互作用は、フェムト秒レーザーの強度に応じて3つに分類できることに触れ、第1は、相互作用体積におけるレーザーエネルギー密度がイオン化および構造損傷の閾値を下回る場合で（典型的には $10^{12}\text{W}/\text{cm}^2$ 程度以下）、構造緻密化やカラセンター形成などが光誘起されること、第2に、中程度のレーザー強度（典型的には $10^{12}\sim 10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ 程度）では、複屈折を発現する、いわゆるナノグレーティングが自己配列すること、第3として、レーザー強度が十分に高い場合には（典型的には $10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ 程度以上）、クーロン爆発に由来した亀裂や空隙が発生することを示している。フェムト秒レーザー直接描画の場合も光の回折限界のため、第1のレーザー強度における加工精度は数百ナノメートル程度となるが、第2のレーザー強度では、自己配列するナノグレーティング構造の周期（$150\sim 300\text{ nm}$）および欠陥形成幅（$\sim 20\text{ nm}$）から、本手法によるメタサーフェスの製造方法としての可能性を議論している。さらに、レーザー加工精度に由来したメタサーフェス構造端部の丸み等によって、理想的なメタサーフェスの光操作に及ぼす影響を調べることで課題を明らかにしている。 第2章では、フェムト秒レーザー誘起相分離現象に着目し、Physical Vapor Transport (PVT)-AlN 上に形成した Hydride Vapor Phase Epitaxy (HVPE)-AlN 単結晶厚膜のレーザースライシングを実現している。比較的作製が容易な PVT-AlN 基板上に成長させた HVPE-AlN 単結晶のみを切り出す手法は、高品位単結晶 AlN ウェハを得るための効果的な技術である。本章では、フェムト秒レーザーにより達成される非常に高い光電場強度と光の回折限界程度の空間分解能により、PVT-AlN と HVPE-AlN の界面にフェムト秒レーザーを集光照射し、HVPE-AlN 単結晶のみをスライシングすることに成功している。レーザー照射により、AlN の一部が Al と N に相分離するエネルギー閾値は、PVT-AlN と HVPE-AlN の界面において最低となることを発見し、PVT-AlN と HVPE-AlN の格子不整合に由来するためと考察されている。さらに、直線偏光のエネルギー閾値が円偏光の閾値よりも常に低いことを示すとともに、多光子イオン化断面積の偏光依存性に起因した挙動であると明らかにしている。また、HVPE-AlN 単結晶のみをスライシングした PVT-AlN 基板は、$100\text{ }\mu\text{m}$ 程度研磨後に種結晶基板として再利用可能であることも X 線トポグラフィ解析により実証している。			

京都大学	博士（工学）	氏名	Yang Yang
第3章では、石英ガラス内部へのフェムト秒レーザーの集光照射により、自己配列するナノ周期構造形成に関して、2度書きの集光位置を変化させることで、波長板として機能するナノ周期構造の局所的な消去を実現している。レーザー伝搬方向を+Zとし、1回目の集光位置を $Z=0\text{ }\mu\text{m}$、2回目の集光位置を正または負方向に変化させて2度書きし、発現する複屈折を評価した。1回目の照射によるナノ周期構造（構造長：約 $20\text{ }\mu\text{m}$）に対して、偏光方向を変え2回目の集光位置を $0\text{ }\mu\text{m}<Z<5\text{ }\mu\text{m}$ または $-15\text{ }\mu\text{m}<Z<0\text{ }\mu\text{m}$ として2度書きすると、1回目の照射で形成されたナノ周期構造は消去され2回目の構造が上書きされるが、2回目の集光位置を $Z>5\text{ }\mu\text{m}$ または $Z<-15\text{ }\mu\text{m}$ とすると、1、2回目のどちらのナノ周期構造も残り（上書きされない）独立した波長板として機能した。特に、2回目の集光位置を $Z=5\text{ }\mu\text{m}$ とすると、形成されたナノ周期構造は偏光子としての機能を持つことを発見した。以上の結果から、ナノ周期構造の上部に主に形成される酸素欠乏型欠陥や 10 nm 以下の細孔が光の吸収や散乱因子として働き、偏光子としての機能も発現すると結論している。 第4章では、TiO_2 で構成した誘電体メタサーフェス構造の対称性がその特性に及ぼす影響を調査している。本章では、ナノ長方形柱や二等辺三角柱構造端部に丸みを帯びた角（フィレット）を導入し、フィレットの異なる形状による対称性の影響を数値計算することで、特定のフィレット形状において Bound states in the continuum (BIC) が現れ、吸収体として機能することを示している。さらに、各要素の対称性が保持されたフィレット形状では入射光にほとんど影響を与えないが、対称性がやぶれたフィレット形状、特に二等辺三角柱で構成されるメタサーフェス構造では、振幅と位相に歪みが生じることをシミュレーションにより明らかにしている。フェムト秒レーザー直接描画法により達成される空間分解能は数十 nm であるため、メタサーフェス構造端面の 10 nm 程度の僅かな形状変化がその特性に影響を及ぼし、更なる加工精度の向上や僅かな形状変化を事前に考慮したメタサーフェス構造の設計が必要であると結論している。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、透明材料内部におけるフェムト秒レーザー直接描画による局所構造改質、特に AlN 単結晶のレーザースライシングと石英ガラス内に形成したナノ周期構造の局所的な消去、および誘電体メタサーフェスホログラムによる光操作に関してまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

(1) レーザーの強度に応じて、物質との相互作用は大きく三種類に分類されることを示すとともに、それらを利用して精密なメタサーフェス構造を実現するために必要な加工条件について検討し、加工精度に対する課題を明示した。

(2) フェムト秒レーザー誘起相分離現象を利用し、HVPE-AlN 基板上に成長させた PVT-AlN 単結晶のレーザースライスに成功し、本手法が加工効率向上に有効であることを実証するとともに、剥離した PVT-AlN 基板は剥離面から 100 μm 程度の分離層を研磨後に種結晶基板として再利用可能であることを実証した。

(3) フェムト秒レーザー照射によって石英ガラス内部に自己配列するナノ周期構造に関して、偏光方向および集光位置を変えて 2 度書きすることで、ナノ周期構造の局所的な消去に成功した。さらに、ナノ周期構造の上部が光学異方性に重要な役割を果たしており、波長板だけでなく、偏光子としての機能も有することを明らかにした。

(4) 誘電体メタサーフェスホログラムとして機能するように設計したナノ構造の端部に、丸みを帯びた角（フィレット）を導入してシミュレーションし、特定のフィレット形状において **Bound states in the continuum (BIC)** が現れ、吸収体として機能することを明らかにした。誘電体メタサーフェスの機能は、フィレット形状の対称性と強く関連していることを確認し、フェムト秒レーザー直接描画法により、誘電体メタサーフェスホログラムを作製する場合、更なる加工精度の向上や僅かな形状変化を事前に考慮したメタサーフェス構造設計が重要であることを示した。

以上、本論文は、フェムト秒レーザー直接描画を利用することで、レーザースライシングによる高品位 AlN 単結晶ウェハ作製の高効率化と石英ガラス内部に自己配列するナノ周期構造の局所構造制御が可能であることを実証し、加えて誘電体メタサーフェス構造が、特定のフィレット形状において **Bound states in the continuum (BIC)** を示し、吸収体として機能することを明らかにしており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 6 年 1 2 月 1 3 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。