

論文内容の要旨

博士論文題目

塗布型酸化亜鉛を用いた多次元ナノ周期構造体創製に関する研究

氏名 荒木 慎司

(論文内容の要旨)

フォトニック結晶(PhC)やフォノンニック結晶(PnC)を始めとする多次元(2D, 3D)ナノ周期構造体は、材料固有の特性に加え周期構造由来の特性も発現することから、デバイスのさらなる高性能化および多機能化が期待されている。これらの構造体実現には厳密な構造サイズ設計や構造形成が必要となるため、従来は原子層堆積(ALD)法や化学気相成長(CVD)法を利用した作製手法が一般的であるが、実用化に向けたプロセスの短時間化および低コスト化が重要課題である。本研究では、塗布型酸化亜鉛(ZnO)を用いた非真空プロセスによる構造体形成に着目し、多次元ナノ周期構造体の新規作製手法確立を目的とした。

本論文は第1章「序論」から第5章「結論」までの全5章で構成されている。

第2章では、2D周期構造体創製に向け、本研究で提案したゲルナノインプリントリソグラフィ(NIL)プロセスによる2D PhCの作製、および光学シミュレーションによりライトマネジメントデバイスとして適用可能な光学特性を有するナノパターン構造について検討した結果を述べている。また、光学シミュレーションソフト BandSOLVE を使用した PhC の特性評価では、ZnO ナノパターンの形状と周期を変化させてフォトニックバンド構造を解析することで光スイッチとして機能する条件についても示唆している。

第3章では、3D周期構造体創製に向け、Proximity field nanopatterning (PnP)プロセスを用いた感光性樹脂の3D構造体形成について検討している。PnPプロセスでは、使用する位相シフトマスクの設計値を変更して構造サイズを変化させるだけでなく、目的とする3D構造体に応じてポジ型・ネガ型レジストを使い分けることで形成可能な3D構造体の設計自由度の高さを示唆した。

第4章では、PnPプロセスで形成したネガ型感光性樹脂の3Dナノ周期構造体をテンプレートとして利用し、塗布型 ZnO を充填することによる3D反転構造

作製について検討した。その結果、充填プロセス1~6サイクルの試料全てにおいて ZnO 3D 反転構造形成を実現した。エネルギー分散型 X 線分析(EDX)による元素分析では、3D テンプレートに塗布型 ZnO を充填した試料とポストバーク後の試料の測定結果を比較することで、ZnO 前駆体の残留溶媒および感光性樹脂のテンプレートが除去されたことを確認し、ZnO の組成比は Zn : O = 58.3 : 41.7 であることを明らかにした。

以上の結果より、塗布型 ZnO を用いたゲル-NIL プロセスおよび充填プロセスによる周期構造体創製を実証し、非真空プロセスによる多次元ナノ周期構造体作製手法として有効であることを示した。本研究で得られた知見により、PhC および PnC によるライトマネジメントやフォノンエンジニアリングが実現可能となり、光・熱を相互に利用する新たなデバイス展開に貢献すると期待される。

氏名	荒木 慎司
----	-------

(論文審査結果の要旨)

本研究では、光子・フォノンが操作可能となるフォトニック結晶(PhC)やフォノン結晶(PnC)を始めとする周期構造体に着目し、塗布型酸化亜鉛(ZnO)を用いた非真空プロセスによる多次元(2D, 3D)ナノ周期構造体の新規作製プロセス確立を目的とした研究である。そこで、4つの研究課題に取り組んだ結果、以下の結論を得た。

(1) 2D 周期構造体創製に向け、本研究で提案したゲルナノインプリントリソグラフィ(NIL)プロセスによる 2D PhC の作製、および光学シミュレーションによりライトマネジメントデバイスとして適用可能な光学特性を有するナノパターン構造について検討した。その結果、従来の熱-NIL プロセスと比較して、作製されるナノパターンのサイズエラーが大幅に改善された(幅方向: 8%, 高さ方向: 3%)。また、そのインプリント時間は従来の約 1/10 であり、高スループットで高精度なパターンングを実証した。

(2) 光学シミュレーションソフト BandSOLVE を使用した PhC の特性評価では、ZnO ナノパターンの形状と周期を変化させてフォトニックバンド構造を解析することで光スイッチとして機能する条件を検討した。その結果、電気光学効果を利用した屈折率変化を想定し、屈折率を変化させることで波長 1064 nm に対するフォトニックバンドギャップが形成される形状・周期条件を見出した。

(3) 3D 周期構造体創製に向け、感光性樹脂の 3D テンプレート形成に向けた位相シフトマスク(PSM)の作製および UV レーザー照射システムを構築し、ポジ型・ネガ型レジストに対してプロセス条件の検討および構造体形成を行った。それらの結果より、Proximity filed nanopatterning (PnP)プロセスを用いた 3D 構造体の作製では、PSM の設計値を変更して構造サイズを変化させるだけでなく、目的とする 3D 構造体に応じてポジ型・ネガ型レジストを使い分けることで、PnP プロセスにより形成可能な 3D 構造体の設計自由度の高さを示唆した。

(4) PnP プロセスで形成したネガ型感光性樹脂の 3D ナノ周期構造体をテンプレートとして利用し、塗布型 ZnO を充填することによる 3D 反転構造作製について検討した。その結果、充填プロセス 1~6 サイクルの試料全てにおいて ZnO 3D 反転構造が得られ、充填サイクル数に応じて構造欠陥および構造サイズへの影響の差異を明らかにした。エネルギー分散型 X 線分析(EDX)による元素分析では、3D テンプレートに塗布型 ZnO を充填した試料とポストバーク後の試料の測定結果を比較することで、ZnO 前駆体の残留溶媒および感光性樹脂のテンプレートが除去されたことを確認し、ZnO の組成比は Zn : O = 58.3 : 41.7 であることを示した。

以上のように、本論文は多次元ナノ周期構造体創製に向けて、塗布型 ZnO を用いた非真空プロセスによる新規作製プロセスを提案・実施し、それらが有効であることを実証した点で工学的に高い価値を有すると考えられる。従って本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。