

2026年6月15日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

**シリコンチップ上に直接作製できる
「ナノコンポジット磁性ガーネット材料」を開発
—よりシンプルで高性能な集積型光アイソレーターを実証、
AI時代の高速・安定な光通信へ貢献—**

【発表のポイント】

- シリコン基板上に直接成膜できる磁気光学材料^(注1)「ナノコンポジット磁性ガーネット膜」^(注2)を作製しました。直径約 10 nm の酸化セリウム (CeO₂) ナノ粒子が Ce:YIG^(注3) の単結晶状の母相中に分散した、報告例のない構造です。
- アモルファス膜^(注4)をゆっくり昇温することで、過剰なセリウムが CeO₂ として自発的に析出して Ce:YIG 母相の結晶性が向上し、磁気光学の性能指数^(注5)が従来の多結晶 Ce:YIG 膜の約 4 倍 (510°/dB) に達しました。
- 本材料を非対称マツハ・ツェンダー干渉計^(注6)に実装し、シリコンチップ上にモノリシック集積された光アイソレーター^(注7)を実証しました。シードレイヤー (接着層) を用いない単純な構造で、従来の集積型アイソレーターに匹敵する性能を達成しています。

【概要】

AI の急速な普及によりデータセンターの消費電力増大が深刻な問題となっています。光信号で情報を伝送するシリコンフォトニクスが次世代技術として注目され、その心臓部となる光部品の鍵を握るのが磁気光学材料「磁性ガーネット」です。しかし最高性能の単結晶膜はシリコン基板上に直接成長できず貼り合わせ工程が必要で、直接成膜できる多結晶膜は性能が劣るため、この性能と集積性のトレードオフは 30 年来の難問でした。

そこで東北大学と京セラ株式会社による共同研究グループは、独自の「緩昇温結晶化プロセス」により、シリコン基板上に直接成膜できる新材料「ナノコンポジット磁性ガーネット膜」を作製しました。本材料は磁気光学の性能指数で従来の多結晶 Ce:YIG 膜の 4 倍を達成し、これを用いた集積型光アイソレーターもシリコンチップ上に実証しています。実用化に向けての大きな壁を乗り越えたと言えます。

本成果は 2026 年 6 月 12 日 (現地時間)、米国化学会発行の学術誌 ACS Applied Optical Materials に掲載されました。論文は ACS Editors' Choice に選ばれ、オープンアクセスで公開されています。

【詳細な説明】

研究の背景

近年の AI（人工知能）の急速な普及に伴い、大規模データセンターでの電力消費が深刻な問題となっています。電気配線によるデータ伝送の限界を打破する技術として、光信号で情報をやり取りするシリコンフォトニクスが急速に発展しており、とりわけ、電子回路と光回路を同一パッケージ内に集積する「光電融合パッケージ（Co-packaged Optics, CPO）」が、AI 向けデータセンターの中核を担う次世代基盤として、世界的な開発競争の中心となっています。

このような電子と光のハイブリッド集積回路を安定に動作させるためには、レーザー光源への戻り光を遮断する「光アイソレーター」のオンチップ集積化が不可欠です。その動作原理は磁気光学効果（ファラデー回転）に基づき、心臓部となる磁性ガーネット薄膜のシリコン基板への集積が、シリコンフォトニクスと CPO 実現における最大の課題の一つとされてきました。

磁性ガーネットは、特殊なガーネット基板上に結晶成長させた単結晶膜が最高の磁気光学性能を示しますが、シリコン基板には直接結晶成長できず、別基板で成長した膜を貼り合わせる工程を要するため、量産プロセスとの整合性に課題がありました。一方、シリコン上に直接成膜できる多結晶膜は工程が簡便である反面、結晶粒界の影響で光吸収が大きく、単結晶膜に大きく劣るのが常識でした。1990 年代から 30 年以上続くこの「性能と集積性のトレードオフ」が、磁気光学材料分野の最大の障壁となっていました。

研究グループは、独自に開発してきたイオンビームスパッタリング法による成膜と真空中での結晶化アニール技術を基盤に、結晶化時の昇温速度を膜質の鍵と着目し、その最適化を進めてきました。

今回の取り組み

研究グループは、アモルファス状態で成膜した Ce:YIG 膜を結晶化させる昇温時間を、従来の 0.6 分（25°C から 800°C まで急速昇温）から 30 分へと大幅に延長する新しい「緩昇温結晶化プロセス」を開発しました。

このプロセスで形成された膜は、マイクロメートルスケールでは多結晶構造を持つ一方、その粒内部はナノメートルスケールで、約 10 nm のナノ粒子が Ce:YIG 母相中に均一に分散した「ナノコンポジット構造」を持つことが、電子線後方散乱回折（EBSD）と走査型透過電子顕微鏡（STEM）観察、および元素マッピングにより明らかになりました（図 1）。ナノ粒子は酸化セリウム（CeO₂）、母相は単結晶に近い Ce:YIG です。Ce:YIG 膜中における CeO₂ の存在はこれまで複数の研究グループから示唆されてきましたが、その形状を電子顕微鏡で明瞭に捉えた報告は本研究が初めてです。

この構造形成の鍵は「自己浄化メカニズム」と考えています。Ce:YIG 母相が許容できるセリウム量を超えた過剰分が、熱処理過程で CeO₂ として母相外へ

自発的に排出され、ナノ粒子として析出します。これにより母相の Ce:YIG から組成の非化学量論性と酸素欠陥が取り除かれ、単結晶に迫る高い結晶品質が得られます。

材料性能評価の結果、波長 1550 nm におけるファラデー回転は $-0.25^\circ/\mu\text{m}$ （従来比約 1.2 倍）、光吸収は -4.9 dB/cm （従来比約 4 分の 1）、磁気光学の性能指数は $510^\circ/\text{dB}$ （従来比約 4 倍）に達しました（図 2）。シードレイヤーや貼り合わせ工程を用いない量産可能な手法で、単結晶膜と多結晶膜の性能ギャップを大幅に縮めた点に大きな意義があります。なお、 CeO_2 ナノ粒子は動作波長 1550 nm に対して 2 桁以上小さく、光散乱による追加損失は無視できるレベルです。

さらに本材料を、シリコンフォトリソの標準プロセスで作製した非対称マツハ・ツェンダー干渉計（AMZI）の光導波路上にシードレイヤーを介さず直接搭載した集積型光アイソレーターを試作しました（図 3）。その結果、磁気光学部の挿入損失 4.4 dB、アイソレーション比 18.7 dB（波長 1555 nm）を達成し、シードレイヤーを介する従来の集積型アイソレーターに匹敵する性能を、より単純な単一膜構造で実現しました。

今後の展開

今回開発したナノコンポジット磁性ガーネット膜の応用範囲は、本研究で実証した光アイソレーターに留まりません。磁気光学スイッチ、磁気光学センサ、磁気フォトリソ結晶、磁気光学イメージング素子など、磁性ガーネット薄膜を用いる広範な光部品への展開が期待されます。

本材料を作製する「緩昇温結晶化プロセス」は、シリコンフォトリソの標準プロセスとの整合性が高く、レーザー加熱による局所結晶化技術とも組み合わせ可能であることから、量産プロセスへの展開も視野に入ります。

研究グループは今後、ナノコンポジット構造の形成機構の詳細解明、 CeO_2 ナノ粒子のサイズと分散状態の精密制御、熱膨張差に起因する膜の亀裂抑制などに取り組み、さらなる高性能化と量産対応を進めていきます。本技術の社会実装を通じて、AI 時代のエネルギー問題の解決と、低消費電力なシリコンフォトリソ基盤の実現への貢献が期待されます。

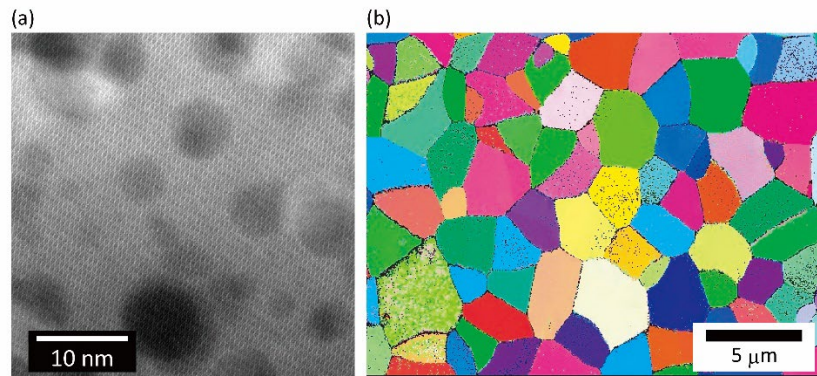


図 1. ナノコンポジット磁性ガーネット膜の電子顕微鏡像

(a) 高角度散乱暗視野走査型透過電子顕微鏡 (HAADF-STEM) による断面像。粒の内部には、直径約 10 nm の酸化セリウム (CeO_2) ナノ粒子 (黒い粒子状の領域) が単結晶状の Ce:YIG 母相中に均一に分散している。(b) 電子線後方散乱回折 (EBSD) による表面解析像。直径 1~5 μm の結晶粒から構成された多結晶膜であり、それぞれの粒の結晶方位が異なることを色で表している。本材料は、ナノメートルスケールのナノコンポジット構造と、マイクロメートルスケールの多結晶構造という二階層の特徴をもつ。

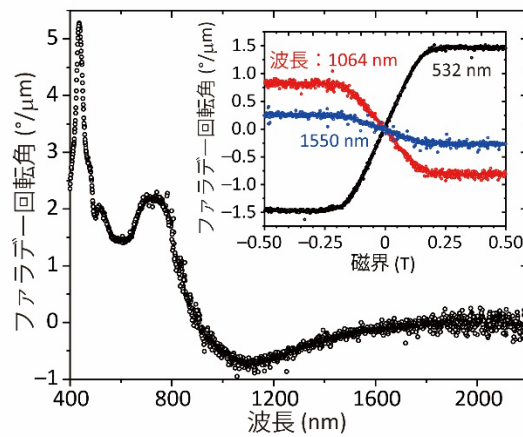


図 2. ナノコンポジット磁性ガーネット膜の磁気光学性能

磁性ガーネット膜に磁場を加えた状態で光が透過する際の偏光面回転 (ファラデー回転) の波長依存性。波長 1550 nm におけるファラデー回転は $-0.25^\circ/\mu\text{m}$ 、磁気光学の性能指数は $510^\circ/\text{dB}$ に達し、研究グループが従来報告してきた多結晶 Ce:YIG 膜の 4 倍となる。

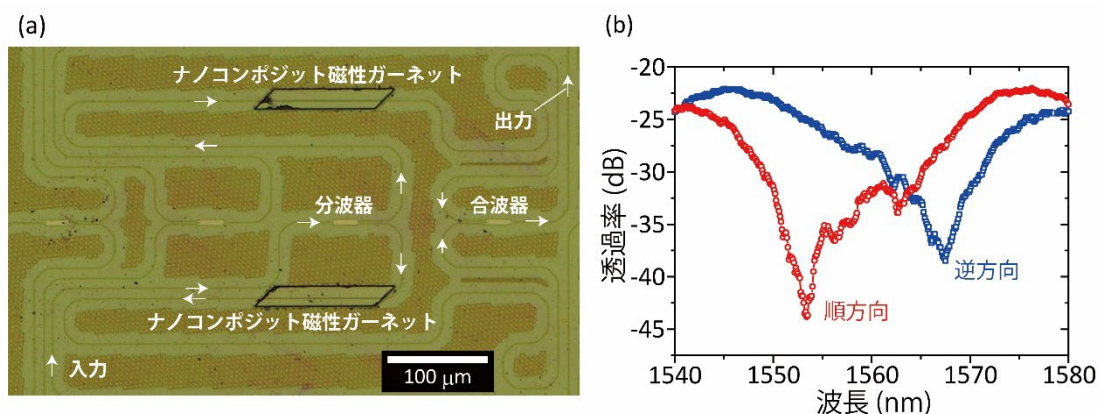


図 3. ナノコンポジット磁性ガーネット膜を用いた集積型光アイソレーター

(a) 試作した集積型光アイソレーターの上面光学顕微鏡像。シリコン光導波路で構成した非対称マッハ・ツェンダー干渉計 (AMZI) の 2 本の腕の上に、ナノコンポジット膜が直接搭載されている。(b) 光透過特性。順方向 (赤) と逆方向 (青) で透過率に明確な差が生じており、シリコンチップ上で光アイソレーターとして動作していることが確認できる。波長 1555 nm において磁気光学部の挿入損失 4.4 dB、アイソレーション比 18.7 dB を達成した。

【謝辞】

今回の研究は、東北大学電気通信研究所と京セラ株式会社が共同で実施しました。独立行政法人日本学術振興会 (JSPS) 科研費 (課題番号: 23K17758、23K26133)、JSPS 二国間交流事業 (JPJSBP120249401)、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業 (23200047)、公益財団法人天田財団、公益財団法人稲盛財団、文部科学省世界で活躍できる研究者戦略育成事業「学際融合グローバル研究者育成東北イニシアティブ (TI-FRIS)」、科学技術振興機構 (JST) 次世代研究者挑戦的研究プログラム (JPMJSP2114) の支援を受けて行われました。また、東北大学電気通信研究所研究基盤技術センター、東北大学電気通信研究所附属ナノ・スピン実験施設、東北大学ナノテク融合技術支援センター、東北大学金属材料研究所国際共同利用・共同研究拠点の支援を受けて実施されました。

【用語説明】

- 注1. 磁気光学材料: 物質が磁化することによって、その中を伝わる光の偏光状態が変化する現象を有する材料。光アイソレーターをはじめ多くの磁気光学部品に応用されている。
- 注2. ナノコンポジット磁性ガーネット: 本研究で作製された、ナノメートルサイズの粒子が磁性ガーネット母相中に分散した複合材料。本研究では、約 10 nm の酸化セリウム (CeO_2) ナノ粒子が、セリウム置換イットリ

ウム鉄ガーネット (Ce:YIG) の単結晶状の母相中に均一に分散した構造を指す。

- 注3. セリウム置換イットリウム鉄ガーネット (Ce:YIG) : イットリウム鉄ガーネット (yttrium iron garnet, YIG) の一部のイットリウムをセリウムで置換した磁性ガーネット。通常の YIG よりも大きな磁気光学効果 (ファラデー回転) を示し、光通信波長帯における磁気光学材料として注目されている。
- 注4. アモルファス状態 : 原子が規則的に配列せず、結晶構造を持たない無秩序な状態。本研究では、成膜直後の磁性ガーネット薄膜がこの状態にあり、その後の加熱および冷却プロセスによって結晶化される。
- 注5. 磁気光学の性能指数 (figure of merit, FOM) : 磁気光学材料の優劣を表す指標。ファラデー回転の大きさを光吸収で割った値で定義され、大きいほど低損失で強い磁気光学効果が得られる優れた材料であることを示す。
- 注6. 非対称マッハ・ツェンダー干渉計 (asymmetric Mach-Zehnder interferometer, AMZI) : 入射した光を 2 本の経路に分け、再び合流させて干渉させる光回路。2 本の経路の長さに意図的な差を設けることで、波長依存性のある光制御を実現する。
- 注7. 光アイソレーター : 光を一方向にのみ通し、逆方向の光を遮断する光部品。レーザー光源への戻り光を防ぎ、光回路の動作を安定化する役割を持つ。

【論文情報】

タイトル : Nanocomposite Garnet-Enabled Monolithically Integrated Magneto-Optical Isolator Using an Asymmetric Mach-Zehnder Interferometer

著者 : Tomoya Sugita, Hibiki Miyashita, Reona Motoji, Dan Maeda, Hiroki Yamamoto, Yuki Yoshihara, Kazushi Ishiyama, and Taichi Goto

*責任著者 : 東北大学電気通信研究所 准教授 後藤太一

掲載誌 : ACS Applied Optical Materials

DOI : 10.1021/acsaom.6c00176

URL : <https://doi.org/10.1021/acsaom.6c00176>

【問い合わせ先】

（研究に関すること）

東北大学 電気通信研究所

准教授 後藤太一

TEL: 022-217-5489

Email: taichi.goto.a6@tohoku.ac.jp

（報道に関すること）

東北大学 電気通信研究所 広報室

TEL: 022-217-5427

Email: riec-kohoshitsu@grp.tohoku.ac.jp