Siフォトニック結晶結合共振器を用いた光トポロジカル絶縁体

Photonic Topological Insulator Based on Si Photonic Crystal Resonator Array NTT ナノフォトニクスセンタ¹、NTT 物性基礎研²、東工大理³ O高田 健太^{1,2}、納富 雅也^{1,2,3}

NTT NPC¹, NTT BRL², Tokyo Inst. Tech.³, ^oKenta Takata^{1,2}, Masaya Notomi^{1,2,3}

E-mail: takata.kenta@lab.ntt.co.jp

系の乱雑性や散乱に強いエッジ状態を有する二次元光トポロジカル絶縁体[1]が最近実現し、そ の特性調査が行われつつある。二次元光トポロジカル絶縁体については種々の実現法があるが、 その一つとして、回転対称性によりクラマース縮退を誘起した上で、構造調整によりバンド反転 を起こす[2]というものがある。これについては、正六角形配置の結合 Si ピラーを単位胞とした構 造による原理提案[2]と、同様の原理で基本要素を三角形空気孔としたフォトニック結晶スラブ[3] が検討されている。しかし、前者では元々の構造が光の面直方向の閉じ込めを保証していない。 また後者では、エッジ状態がライトコーン内のΓ点のバルク状態に基づく為、全反射による光閉 じ込めの有効性の範囲が不明瞭であり、エッジ状態のバンド特性も詳細には示されていない。

そこで、光回路応用を見据え、面直方向の光閉じ込めが保証された通信波長帯の二次元光トポ ロジカル絶縁体として、Siフォトニック結晶結合共振器を用いた構造を提案する。全系は文献[2] に従い、正六角形型の結合光学系を単位胞とした三角格子とする[図(a)]。ただしここでは構成要 素として、Si フォトニック結晶スラブと H1 共振器を用いる。非自明な光波トポロジーを得る為 には素子構造と固有モードの六回対称性が要請されるが、これは磁気六重極モードを用いる事で

実現可能である。六重極モード自体は縮退しておらず、光 渦でもない(トポロジカル光波でない)。また、単一共振 器で実験Q値30万程度が期待出来る[6]。図(b)に系のバン ド構造の例を示す。ここで、個々の点は三次元構造の有限 要素法シミュレーションにより計算した。この系では、隣 接共振器間距離の調整によりバンド反転を生じさせる。共 振器間距離が単位胞間「図(a)左、L1及び単位胞内「図(a)左、 L₂]とで等しいと、系はほぼギャップレスとなる[図(b)左]。 -方、単位胞間の隣接共振器間距離をより短くすると[図 (a)左, *L*₁<*L*₂]、193.95 THz(波長 1,546.8 nm)近傍にバンド ギャップを持つ光トポロジカル絶縁体となる[図(b)右]。こ の時、ギャップ上下のバンドのペアは各々
Γ点でほぼ縮退 する。 Γ 点付近ではバンド反転が起き、ギャップ直上は p 軌道、直下はd軌道の光渦に相当する状態を持つ。このよ うな結合共振器系は、フォトニック結晶[2,3]とは異なり強 束縛近似モデルによく従う[図(b)実線]。Γ点での縮退を示 す強束縛近似モデルによれば、この時 Z,トポロジカル数 が1となり、系はトポロジカル絶縁体であると期待出来る。 尚、L₁>L₂の場合系はトポロジカルに自明な絶縁体である。 図(c)に、光トポロジカル絶縁体と自明な絶縁体を接合させ た境界における、アームチェア型エッジ状態のバンド構造 を示す。ここで、上下二つのエッジ状態はバルクバンドギ ャップ内に存在するが、バンド中心では縮退せず一般に有 限の分裂を持つ事が分かった。この分裂は、接合部で構造 の六回対称性が破れる事による実効的な disorder に起因す る。そこで、二つの絶縁体間の距離を調節した所、図(c) に示す通り、偶然縮退によりディラック型分散をほぼ回復 できる事が分かった。詳細については当日議論する。

参考文献: [1] L. Lu, J. D. Joannopoulos and M. Soljačić. Nat. Photon. 8, 821 (2014). [2] L. -H. Wu and X. Hu. PRL 114, 223901 (2015). [3] S. Barik et al. NJP 18, 113013 (2016). [4] T. Tanabe et al. Appl. Phys. Lett. 91, 021110 (2007).





Fig. (a) Schematic of the photonic topological insulator (left) and H_z field of the hexapole mode (right). (b) Band structures of the system with $L_1=L_2$ (left) and that with $L_1 \le L_2$ (right). (c) Band curves of armchair edge modes at a boundary between photonic topological and ordinary insulators.