HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	光波干渉による微粒子の3次元結晶性配列
Author(s)	原田, 康浩
Citation	電子科学研究, 4, 102-104
Issue Date	1997-02
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/24388
Type	departmental bulletin paper
File Information	4_P102-104.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

光波干渉による微粒子の3次元結晶性配列

光システム計測研究分野　原　田　康　浩

3次元フォトニック結晶を実現する一方法として，多光束の干渉によって形成される3次元の干渉光強度分布と光放射圧を用いて誘電体微小球を規則的に配列するというアイディアを提案し，特に面心立方格子を得るための四光束照明の条件を明らかにした。また四光束照明を簡単に実現する素子としてコーナーキューブプリズムを利用することを提案した。さらに完全なバンドギャップをもつフォトニック結晶を生成する手段として，提案した方法が有利であることが明らかとなった。

1．はじめに

周囲媒質に比較して大きな屈折率をもつ誘電体微小球を光強度分布を有する光で照射すると，微小球には光強度の空間勾配に比例した勾配力が作用し，光強度が極大となる位置に捕捉することができる[1]。本研究は，この光トラッピング現象と多光束干渉による3次元的な光強度の規則構造生成を結び付け，微粒子を光の波長程度の格子定数をもつ3次元結晶状に配列する方法を提案するものである。

このような誘電体媒質は光波に対してバンド構造をもつことからフォトニック結晶[2]と呼ばれ，新たなオプトエレクトロニクス素子としての応用が期待されている。フォトニック結晶の作成法として誘電体微小球を用いた試み[3,4]があるが，実現された構造は未だ2次元系の域を出ていない。ここでは，フォトニックバンドの形成に有効と考えられる面心立方格子を実現するための照明条件を光波干渉の理論に基づき明らかにするとともに，この照明配置を簡単に実現する光学素子を提案する。またこの方法によって生成される媒質の光学的特性に期待される効果について検討する。

2．光束数と周期構造の数および次元の関係

強度が1，波数ベクトルが $\boldsymbol{k}_i$（$i=1,2,\ldots N$）の可干渉な N 本の平面波の合成光強度分布は，

$$I(\boldsymbol{r})=N+\sum_{i=1}^{N}\sum_{\substack{j=1\\(j\neq i)}}^{N}\exp[i(\boldsymbol{k}_i-\boldsymbol{k}_j)\cdot\boldsymbol{r}]$$

$$=N+\sum_{i=1}^{N}\sum_{j>i}^{N}2\cos[(\boldsymbol{k}_i-\boldsymbol{k}_j)\cdot\boldsymbol{r}] \quad (1)$$

で与えられ，右辺第2項目の干渉項により光強度の周期構造（向きと周期）が決まる。干渉項の数は，二つの総和記号を評価して，

$$n=N(N-1)/2 \quad (2)$$

で与えられる。もっとも単純な二光束照明（$N=2$）の場合，生成される周期構造は1次元系となる。三光束（$N=3$）では干渉項の数は $n=3$ であるが三つの干渉項の波数ベクトル（$\boldsymbol{k}_1-\boldsymbol{k}_2$，$\boldsymbol{k}_2-\boldsymbol{k}_3$，$\boldsymbol{k}_3-\boldsymbol{k}_1$）は必ず一つの平面上に存在するため，周期構造は2次元系となる。以上より，3次元の周期構造をもつ光強度分布を達成するには少なくとも四光束の照明が必要であることがわかる。

3．四光束照明と干渉光強度の3次元的周期構造

三光束照明において，球座標系で表示した各光束の波数ベクトルを

$$\begin{cases}\boldsymbol{k}_1=(k,\ 0,\ \theta)\\ \boldsymbol{k}_2=(k,\ 2\pi/3,\ \theta)\\ \boldsymbol{k}_3=(k,\ 4\pi/3,\ \theta)\end{cases} \quad (3)$$

のように選ぶと，z 軸に垂直な平面内に光波長で規格化した格子定数が $2/(3\sin\theta)$ の六方格子を形成できる[3]。ここではこの配置に

$$\boldsymbol{k}_4=(k,\ 0,\ 0) \tag{4}$$

の波数ベクトルをもつ第4番目の平面波を追加し，z 軸方向に周期構造を導入することを考えた。

図1は，六つの干渉項の波数ベクトルをそれぞれ(a) $z/k=0$ および(b) $y/k=0$ の平面に投影して，波数ベクトルで規格化した大きさを添えて表示したものである。y/k 軸方向には，各波数ベクトルの投影成分の寄与により，規格化逆格子ベクトル $(\sqrt{3}/2)\sin\theta$ の周期構造が形成される(図1(a))。この位置関係は z/k 軸に関して $\pm 2\pi/3$ 回転した場合にも成立するため，結局 $z=0$ の平面では波長で規格化した格子定数が $2/(\sqrt{3}\sin\theta)$ の六方格子構造が形成される。一方 $y/k=0$ の面では，図1(b)に示すように，x 軸に対して角度 β，γ，$\pi/2$ の向きに規格化逆格子ベクトルがそれぞれ $(3/2)\sin\theta\cos\beta$，$(3/2)\sin\theta\cos\gamma$，$1-\cos\theta$ の周期構造が形成される。これら逆格子ベクトルの位置関係は z 軸に関して $\pm 2\pi/3$ だけ回転した面でも成立するため，β および γ の方向に生成される光強度極大点は，$z=0$ の平面に形成される六方格子に対してそれぞれ最密構造を形成する点に位置する。すなわち，光強度が極大値となる点群は面心構造を形成する。

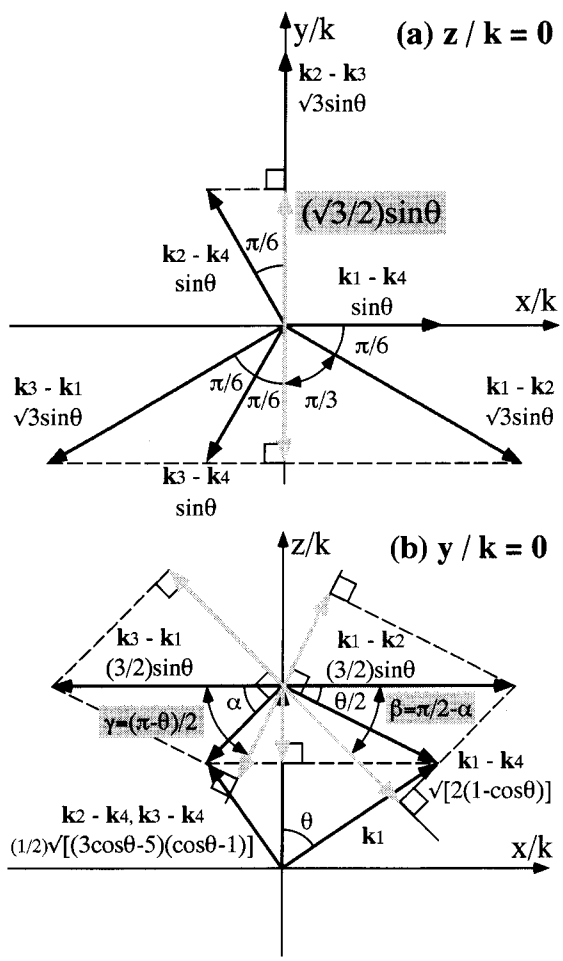

図1　六つの干渉項の波数ベクトルの位置関係：(a) $z/k=0$ 面内，(b) $y/k=0$ 面内。

四本もの光束を式(3)，(4)に従って正確に交差させ，照明することは一般に困難である。図2はコーナーキューブプリズムを用いて交差四光束照明を簡単に実現する方法を示す。図2(a)の様に，直交する三面に対して通常とは逆向きに平面波を照射すると，上面からの出射光は，各面での屈折により自動的に式(3)を満足する三本の光束となる。さらに図2(b)の様に頂角部を上面と平行にカットすれば，式(4)を満足する光束を導入することができる。交差角 θ は出射四光束をレンズを用いて収束することにより調節可能である。

4．面心立方格子の生成条件

面心立方格子はそのブリュアンゾーンが球形に近いため，良好なバンドギャップを形成すると考えられる[2]。前述の四光束干渉によって形成される光強度の周期構造は，逆格子定数の一致条件より，

$$\frac{\sqrt{3}}{2}\sin\theta=\frac{3}{2}\sin\theta\cos\beta \tag{5}$$

が成立するときに面心立方格子となる。ここで，$\cos\beta=\sin\alpha=2(1-\cos\theta)/\sqrt{(3\cos\theta-5)(\cos\theta-1)}$ なので，照明条件として次式を得る。

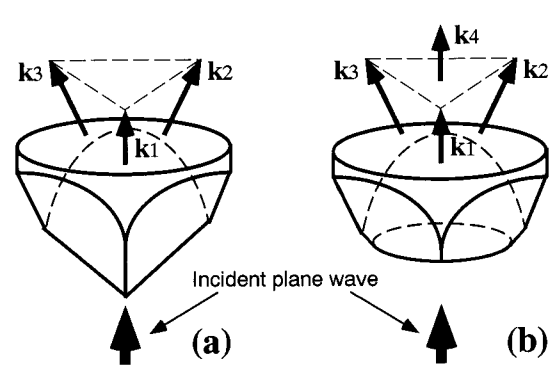

図2　交差四光束照明を実現する光学素子とその使用法の模式図：(a)コーナーキューブプリズム，(b)頂角をカットしたコーナーキューブプリズム。

$$\theta=\cos^{-1}(7/9)\approx 38.94^{\circ} \tag{6}$$

この場合，波長で規格化した格子定数は

$$\frac{a}{\lambda}=\left(\frac{3}{2}\right)^{3/2}\approx 1.837 \tag{7}$$

となり，ほぼ照射光波長の約2倍の値となる。

図3(a)および(b)は，それぞれ式(6)の条件における $z/\lambda=0$ および $y/\lambda=0$ の平面での干渉光強度分布を示す。光強度が極大となる点が，波長で規格化した格子定数 $(3/2)^{3/2}$ の面心立方格子を形成していることがわかる。また，z 軸方向とそれと直交する方向とで光強度の空間分布に違いがあることは興味深い。これは微粒子に作用する勾配力に異方性があることを示しており，各格子点に捕捉される微粒子数の密度も空間的に異方性が生ずることを意味する。面心立方格子で完全なバンドギャップを実現する場合，「格子点に置く〝原子〟の対称性を低下させる」[2] 必要があることが理論的に導出されているが，光強度分布の空間異方性は形成される誘電体周期構造が自動的にこの要求を満足することを意味しており，この点で本方法は有利である。

5．おわりに

交差四光束の干渉によって光強度が極大値となる点を光の波長程度の格子定数をもつ3次元の結晶構造に，特に面心立方格子とする条件を明かにするとともに，照明条件を簡単に実現する具体的な光学素子を提案した。この場合，光の勾配力によって形成される誘電体微粒子の結晶構造媒質は，完全なバンドギャップを実現するための条件を自動的に満足することが明らかとなった。

光波干渉と光トラッピングを組み合わせて誘電体微粒子の3次元結晶構造を生成する方法は，凝集によるコロイド単結晶の作成法[4,5] に比較して非常に柔軟性が高く，面心立方格子以外にも様々な結晶構造を簡単に作成することが可能である。今後は，ダイヤモンド構造など興味ある結晶構造を生成するための多光束照明の条件を探索するとともに，実験による実証を進める予定である。

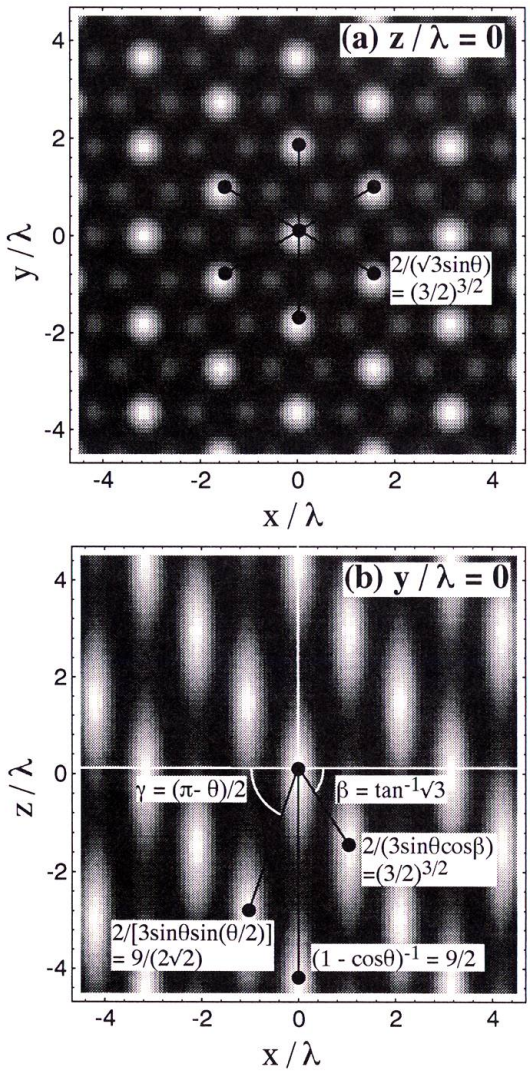

図3 $\cos\theta=7/9$ における四光束干渉光強度分布：(a) $z/\lambda=0$ 面内，(b) $y/\lambda=0$ 面内．

【参考文献】

[1] A. Ashkin, *et al*., Opt. Lett. **11**, 288 (1986).

[2] 解説記事として，たとえば，花村栄一：応用物理 **63**, 604 (1994)；井上久遠：応用物理 **64**, 19 (1995).

[3] W. Hu, *et al*., Opt. Lett. **20**, 964 (1995).

[4] 国府田隆夫：光学連合シンポジウム東京'95講演予稿集，22aA 02 (1995)，p.265.

[5] 大久保恒夫：日本結晶成長学会誌 **19**, 263 (1992).