

# 微小散乱体の空間配置による光波制御

山田 博仁・大寺 康夫

## Control of Lightwave with Coherent Optical Scattering by Nano-Photonic Elements

Hirohito YAMADA and Yasuo OTERA

Unique methods of controlling lightwave with coherent optical scattering by nano-photonic elements were proposed. We describe a method of controlling directivity of light emission, polarization control of lightwave, and a device with guided-mode resonance. Radiation and Polarization conversion characteristics of a tailored array of sub-wavelength dielectric cylinders, and resonance characteristics of sub-wavelength grating-assisted disk resonators are presented.

**Key words:** lightwave control, coherent optical scattering, nano-photonic element

物体による光の散乱には、表1に示すように散乱体物質との相互作用に基づいた原子共鳴による非弾性散乱（ラマン散乱やブリュアン散乱など）と、散乱体物質との相互作用のない弾性散乱とがある。弾性散乱の場合、散乱される光の波長は散乱の前後で等しい。弾性散乱はさらに、散乱体による光共振を伴う、したがって散乱体のサイズや形状に強く依存する共鳴散乱と、散乱体での共振を伴わない非共鳴な散乱とに分けられ、非共鳴の場合はさらに散乱体のサイズと波長との関係によって、ミー散乱やレイリー散乱に分けられる。本稿で述べる光散乱はこのうち散乱体の共振を利用するもので、散乱の仕方が散乱体の形状やサイズに強く依存する。このような光散乱体をナノフォトニックエレメントとよぶことにする。

複数のナノフォトニックエレメントが空間的に規則正しく配置された場合には、さらに興味深い現象がみられる。図1に示すように、ナノフォトニックエレメントが空間的にランダムに配置されている場合、光の散乱はインコヒーレントに起きるが、空間的に規則正しく配置されている場合にはコヒーレントな散乱となり、特定の方向にのみ強く散乱されたり<sup>1)</sup>、偏波状態が変換されたりすることもある<sup>2)</sup>。本稿ではそれらの現象について解説し、光デバイスや光回路などへの応用についても言及する。

### 1. ナノフォトニックエレメント

上に述べたナノフォトニックエレメントに関しては、表2に示すようなフォトニックナノ構造がすでに知られており、このうちのフォトニック結晶やフォトニック分子とよばれる構造体はこのようなナノフォトニックエレメントにおける光のコヒーレント散乱を利用するものであるといえる。例えば、フォトニック結晶デバイスの多くは、屈折率の多次元ナノ周期構造における光のコヒーレント散乱によって発現するフォトニックバンドギャップ内に、点欠陥や線欠陥を導入し、光共振器や光導波路として機能させるものである。これと逆の発想で、光が自由に伝搬可能な自由空間やスラブ導波路内にナノフォトニックエレメントを配置し、光波のコヒーレント散乱によって光の伝搬を制御するデバイスも考えられる。これに関しては、2~4章で紹介する。また、サブ波長周期の回折格子は、特定波長の入射光に対して導波モード共鳴現象を発現し、反射率がほぼ1になるという興味深い現象を呈する。これに関しても5章で紹介する。

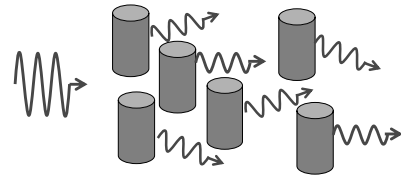
### 2. ナノフォトニックエレメントによる発光体の指向性制御

ナノフォトニックエレメントによる興味深い現象のひとつとして、発光体の発光指向性の制御がある。電波のアン

表1 各種光散乱メカニズム.

サイズ	$d \approx \lambda$		$d \ll \lambda$	
弾性 ( $\lambda_{in} = \lambda_{out}$ )	非共鳴	ミー散乱	非共鳴	レイリー散乱
	共鳴	光共振による 物質による	共鳴	光共振による 物質による
非弾性 ( $\lambda_{in} \neq \lambda_{out}$ )	物質による共鳴 ナノフォトニックエレメントと呼ぶことに ブリュアン散乱 ラマン散乱 コンプトン散乱			

1. インコヒーレントな光散乱



2. コヒーレントな光散乱

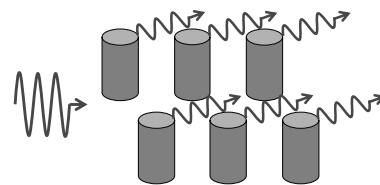


図1 コヒーレント散乱とインコヒーレント散乱.

表2 各種フォトニックナノ構造.

フォトニック結晶	フォトニック原子	フォトニック分子	フォトニックフラクタル	サブ波長周期回折格子
 $d < \lambda$	 石英球内WGモード $d > \lambda$	 結合マイクロディスク $d > \lambda$	 メタマテリアル	 導波モード共鳴 (GMR)現象
 分散関係	 分散関係	 分散関係		

テナの一種に八木・宇田アンテナがあるが、この原理を光に対して応用すると、発光の指向性の制御が可能となる<sup>1)</sup>。図2は、波長 1550 nm 付近に共振波長を有する誘電体ロッドから、波長 1550 nm の光が放射される様子を FDTD (finite-difference time-domain) 法で計算したものである。孤立した誘電体ロッドからの発光は図2 (a) に示すように等方性となるが、発光体から 4 分の 1 波長離れた位置に、共振波長がわずかに短い (共振周波数がわずかに高い) 誘電体ロッド (導波器) を配置すると、図2 (b) に示すように導波器の方向に強く放射されるようになる。逆に、発光体から 4 分の 1 波長離れた位置に、共振波長がわずかに長い (共振周波数がわずかに低い) 誘電体ロッド (反射器) を配置すると、図2 (c) に示すように反射器とは反対方向に強く放射されるようになる。これらナノフォトニックエレメントの数をさらに増やしていくと、図2

(d) ~ (f) に示すようにより鋭い指向性をもった発光が得られるようになる。このように、発光体の光放射パターンの制御が可能となる。

3. ナノフォトニックエレメントによる光導波路出射ビームの指向性制御

光導波路端からの光出射パターンを制御する方法としては、ビームスポットサイズ変換器などがあるが、ナノフォトニックエレメントを用いると、コンパクトに出射パターンを制御することが可能となる。図3は、チャンネル光導波路からスラブ導波路への出射光ビームの伝搬の様子を FDTD 法で計算したものである。チャンネル導波路からの出射光ビームはスラブ導波路内では図3 (a) に示すように大きく広がるが、ナノフォトニックエレメントを用いると、図3 (b), (c) に示すように出射光ビームを鋭くすること

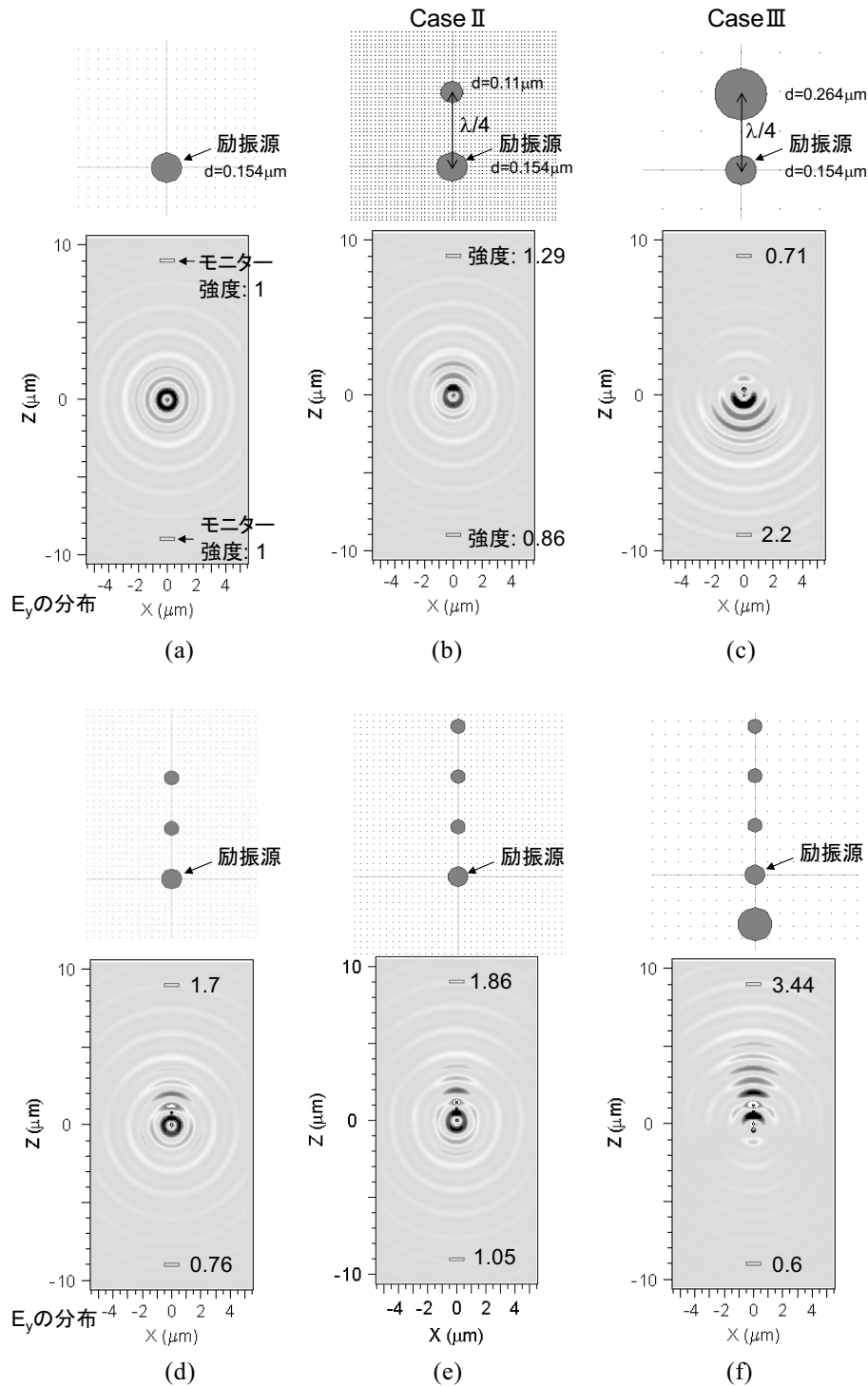


図2 ナノフォトニックエレメントによる発光体の指向性の制御.

ができる。出射ビームのパターンは、ナノフォトニックエレメントの形やサイズ、位置などに大きく依存し、これらを適切に配置することにより、光ビームを整形したり、導いたりすることも可能となる。

#### 4. ナノフォトニックエレメントによる偏光制御

ナノフォトニックエレメントによって散乱される光波

は、散乱の際に何がしかの位相変化がもたらされる。エレメントの形状が異方性の場合、位相変化は光波の偏光に依存する。これを利用することで、エレメントを偏光子や波長板として機能させることもできる<sup>2)</sup>。図4はエレメントの直径と、エレメントに対して縦横両偏光の位相差の関係を、FDTD法で求めた電磁界分布から計算したものである。ここでエレメントの長さは700nmとし、300nm角の

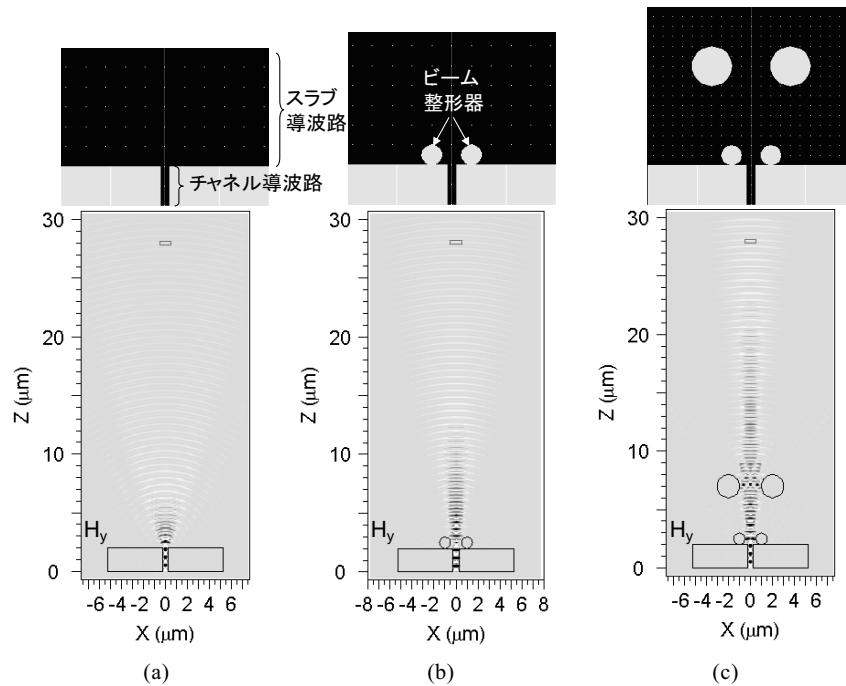


図3 ナノフォトニックエレメントによる光導波路出射ビームの制御.

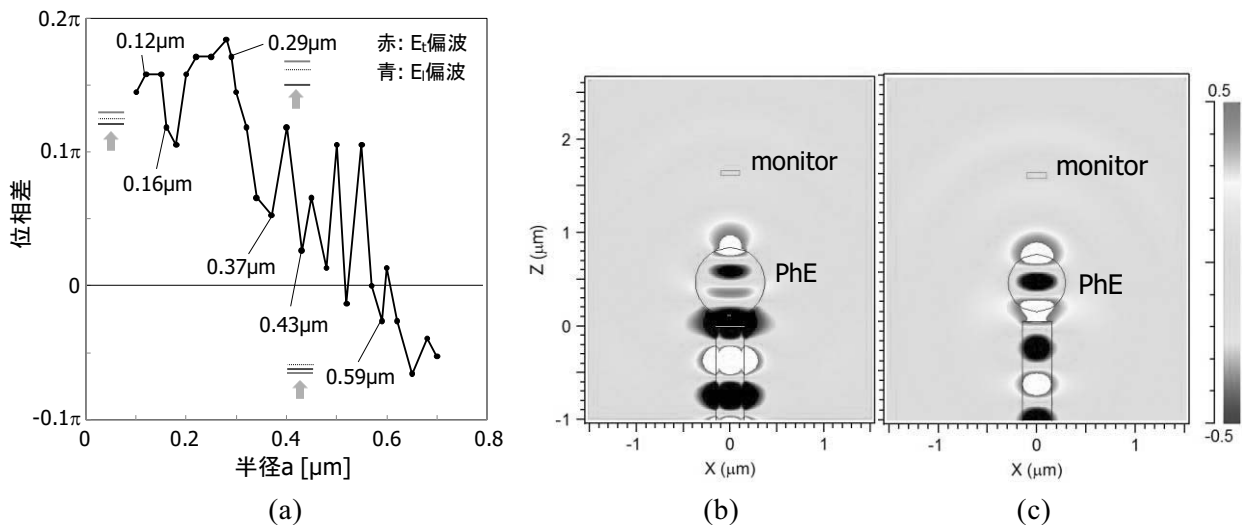


図4 フォトニックエレメントによる偏光制御の例. (a) 電界が紙面に平行 ( $E_t$ ) および垂直 ( $E_i$ ) の両偏光間の位相差, (b)  $E_t$  偏光入射時の電界分布, (c)  $E_i$  偏光入射時の電界分布, PhE はフォトニックエレメントの略.

光導波路から、波長  $1.55 \mu\text{m}$  の光を照射するものとした、エレメントの直径が導波路寸法と同程度から2倍程度の範囲で  $0.1\pi$  程度の位相差を生じることがわかる。なお、図に記した数字は、いずれかの偏波に対しエレメントが共振する点を表わしている。この共振の効果を利用し、さらにエレメントを2個・3個と直列配置することで、偏光面の回転に必要とされる  $0.25 \sim 0.5\pi$  の位相差も発生できると考えられる。

## 5. サブ波長周期回折格子

ディスク共振器やリング共振器などの円形共振器は光導波路型のレーザーキャビティーや波長選択フィルターなどに多用されている。前者で通常用いられるのは外周に沿って伝搬する whispering gallery mode (WGM) であり、ディスク側壁には平坦性が求められる。ここで側壁に意図的に散乱体を周期配列すると、2つの新しい機能を発現させることができる。1つ目は周方向のブラッグ反射であり、これを利用したレーザーはマイクロギア・レーザー

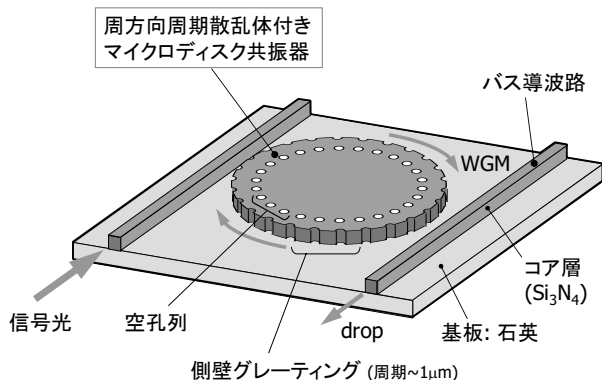


図5 周期散乱体付きディスク共振器の概念図。周期壁の共鳴波長に一致した波長の光のみがディスク内に同心円状の共振モードを形成する。

として知られている<sup>3)</sup>。もう1つは導波モード共鳴現象 (guided-mode resonance: GMR)<sup>4)</sup>であり、これはWGMをディスクの中心に向かう同心円状の界分布に変換する作用を示す。GMRの共鳴波長では、ディスク中心からみた側壁の反射率は理論上ほぼ100%に達するので、きわめて高いQ値をもつ共振器として動作させることができる。図5に示すのはSiO<sub>2</sub>基板上的Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>層に形成したGMR型ディスク共振器および励振用バス導波路の概念図である<sup>5)</sup>。WGMの散乱効果を強めるために、ディスク内部にも円孔列を配置するものとしている。ここでバス導波路からTMモード(電界主成分が基板面に垂直)を入射すると、GMRの共鳴波長において、同心円状の電磁界分布をもつ共振モードが発生する。二次元円柱座標系FDTD法で計算したこの共振モードの磁界分布を図6に示した。共鳴波長以外では側壁の反射率は低いいため、強い界の閉じ込めは起きない。すなわちこの素子は大面積でありながら、少数の高Q値モードしか存在しえない、「実効的単一モード共振器」という、波長選択フィルターに好適な機能を有しているといえる。

光の波長以下のサイズの微小光散乱体(ナノフォトニックエレメント)によるコヒーレント光散乱を用いて、発光

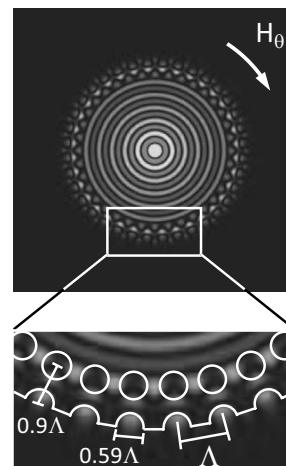


図6 周期散乱体付きディスク共振器の共振モードの磁界分布。側壁周期 $\Lambda$ は $1\mu\text{m}$ 、共振波長は $1.393\mu\text{m}$ 。この構造の面内Q値の試算値は100万以上。

の指向性や光出射パターンの制御、偏光制御、さらには導波路共鳴による波長選択的な光の反射といったさまざまな現象が現れることを示した。これらの現象を利用すれば、新しい動作原理に基づく光デバイスの実現や、光回路などに応用できるものと思われる。

## 文 献

- 1) 山田博仁, 牛田 淳: “フォトニック原子の他励振動による発光および出射光ビームの指向性制御”, 第51回応用物理学関係連合講演会, 29p-M-17 (2004).
- 2) 井元敦生, 大寺康夫, 山田博仁: “フォトニックエレメントによる偏波制御機能の検討”, 電子情報通信学会ソサエティ大会, C-3-34 (2010).
- 3) M. Fujita and T. Baba: “Microgear laser,” *Appl. Phys. Lett.*, **80** (2002) 2051–2053.
- 4) S. S. Wang and R. Magnusson: “Theory and applications of guided-mode resonance filters,” *Appl. Opt.*, **32** (1993) 2606–2613.
- 5) S. Iijima, Y. Ohtera and H. Yamada: “High-Q microdisk resonator having sub-wavelength grating on its sidewall,” *Conference on Lasers and Electro-Optics, Pacific Rim (CLEO/PR)*, W11-5 (2013).

(2014年6月9日受理)