

イメージセンサ用フォトニクス技術

Photonics Technologies for Image Sensors

田中 圭介*
Keisuke Tanaka

小野澤 和利*
Kazutoshi Onozawa

イメージセンサ用フォトニクス技術として、1) フォトニック結晶技術を基に、積層周期構造の膜厚設計によって、透過波長帯域を自由に設計できるフォトニックカラーフィルタ技術、2) 光の波長より小さい同心リング構造を粗密に配置し、実効的な屈折率分布の変化で光を集光するデジタルマイクロレンズ技術、について紹介する。

Proprietary photonics technologies consisting of a photonic color filter and digital microlens, achieve new levels of performance in image sensors. The photonic color filter is based on photonic crystal technology and is composed of a periodic structure with a defect layer. The digital microlens has an effective refractive index profile realized by designing the density of subwavelength concentric ring structures.

1. イメージセンサに求められる新機能

イメージセンサは、車載や監視カメラなどさまざまな分野に用途を拡大している。可視光帯域だけでなく、赤外光帯域も含む広い波長帯域での撮像や、屋外使用での高耐候性など新しい機能が求められている。

イメージセンサが撮像できる波長帯域は、センサ上に集積したカラーフィルタの光の透過波長帯域で決まる。従来の有機顔料カラーフィルタの透過波長帯域は、添加している顔料材料で一意的に決まるため、波長帯域を任意に設定できない。また、紫外線による有機材料の劣化により、カラー分光特性が変化する懸念があった。そこで、フォトニック結晶技術を基に、可視光から赤外光帯域までの広い波長帯域での透過波長帯域制御と高耐候性を実現する新しいイメージセンサ用フォトニックカラーフィルタを開発した。

また、カメラモジュール薄型化への要望も強い。しかし、カメラモジュールを薄型化するためにカメラレンズとイメージセンサを近づけて配置すると、センサ周辺部の入射光の光線角度が大きくなり、センサ周辺部の画像が暗くなる。カメラモジュール薄型化と画面全体の明るい撮像を両立するデジタルマイクロレンズ技術を開発した。

2. フォトニックカラーフィルタ (PCF)

2.1 色選択原理とフィルタ構造

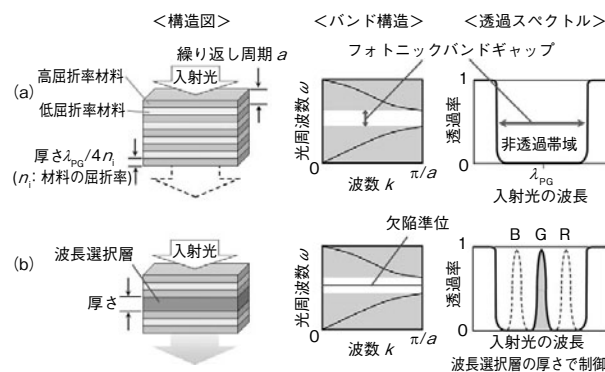
フォトニック結晶技術を応用したイメージセンサ用

フォトニックカラーフィルタ (Photonic Color Filter: PCF) について説明する。

フォトニック結晶とは、低屈折率と高屈折率の材料を光の波長程度の周期で交互に積層した積層周期構造で (第1図 (a)), その構造パラメータで決まる特定波長帯域で光を透過させない。この波長帯域をフォトニックバンドギャップと呼ぶ。

PCFは、低屈折率材料の酸化シリコン (屈折率: 1.45) と高屈折率材料の酸化チタン (屈折率: 2.53) を交互に積層し、フォトニックバンドギャップが可視光と近赤外帯域を含むように、それぞれの膜厚を $\lambda_{PG} / 4n_i$ (λ_{PG} : ギャップ中心波長, n_i : 材料の屈折率) に設計する[1]。

この積層周期構造に、 $\lambda_{PG} / 4n_i$ と異なる厚さの波長選択層を挿入することで周期性を乱し、光学的な欠陥準位を発生させる。この欠陥準位によりフォトニックバンドギャップ中に光の透過帯域が発生する (第1図 (b))。こ



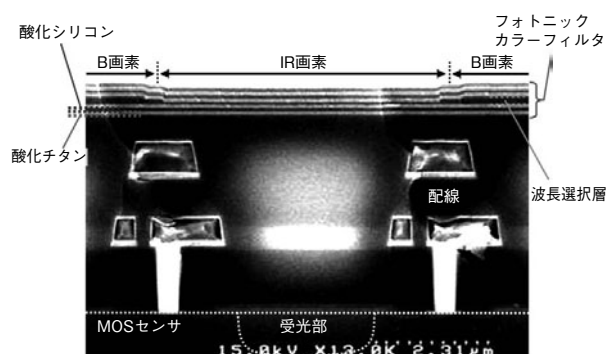
第1図 (a) フォトニック結晶の構造図、バンド構造および透過スペクトル、(b) フォトニックカラーフィルタの構造図、バンド構造および透過スペクトル

Fig. 1 Cross sections, band structures and transmittance spectra of (a) photonic crystal and (b) photonic color filter

* デバイス社 半導体事業グループ
Semiconductor Business Group, Industrial Devices Company

の光学的な欠陥準位は波長選択層の膜厚で決まるため、波長選択層の膜厚を制御することで、フォトニックバンドギャップ中の任意の透過帯域を有するカラーフィルタを設計できる。

第2図は、MOS (Metal Oxide Semiconductor) イメージセンサ上に集積したPCFの断面顕微鏡写真である。この例では近赤外 (IR) と青色 (B) 帯域が透過するように波長選択層となる酸化シリコンの厚さを変えている。波長選択層以外の積層周期構造は、異なるIR画素とB画素で共通とすることで、製造工程を単純化している。

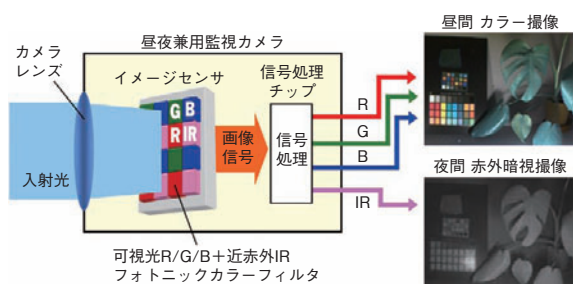


第2図 フォトニックカラーフィルタを搭載したイメージセンサ画素部の断面電子顕微鏡写真

Fig. 2 Cross sectional photograph of pixel with PCF

2.2 フォトニックカラーフィルタ搭載昼夜兼用イメージセンサ

PCFの波長選択層の膜厚を画素ごとに変えることで、可視光のR/G/B三原色のカラーフィルタや赤外線を透過するフィルタなど多彩な透過帯域をもつフィルタが実現できる。光の透過帯域を任意に設計できるPCF技術を応用し、第3図のような監視カメラ用イメージセンサを実現



第3図 フォトニックカラーフィルタ搭載 昼夜兼用イメージセンサの応用例

Fig. 3 Application of PCF to day-and-night image sensor

現した[2]. イメージセンサの画素には、R/G/BおよびIRを透過するPCFを集積している (第3図).

昼間はR/G/Bのカラー撮像、夜間はIR光を照射した暗視撮像が画像信号処理により可能である。信号処理でカラー撮像と暗視撮像の選択を行うことで、高速撮像切り替えを可能とし、途切れのない昼夜連続監視動作が実現できる。

また、無機材料のみで構成されるPCFは紫外線による劣化が起こらず、屋外用監視カメラに適する。

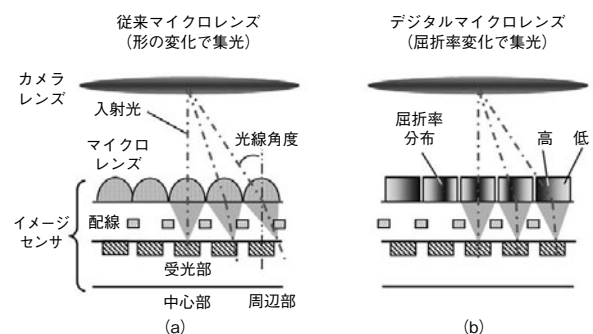
3. デジタルマイクロレンズ (DML)

3.1 デジタルマイクロレンズの設計と構造

イメージセンサの画素には、集光のためにマイクロレンズが形成されている。そのマイクロレンズは、樹脂材料の熱変形により作製されるため、全画素で同形の凸状の形状である (第4図 (a)). センサ周辺部での入射光の光線角度は中心部より大きくなるが、レンズ形状を周辺部と中心部のそれぞれの光線角度に最適化することができず、そのためイメージセンサ周辺部の集光率が大きく低下する。

この課題を解決する屈折率変化で集光するデジタルマイクロレンズ (Digital MicroLens: DML) について説明する。第4図 (b) にDMLの屈折率変化を色の濃淡で示す。DMLは、入射光の光線角度に応じて画素ごとに異なる屈折率分布をもち、その分布は光の入射方向の屈折率を大きくしている。光は屈折率が大きい方向へ光を曲がるため、このような屈折率分布をもつDMLは、入射光を受光部へ集光することができる。

DMLの屈折率分布は、サブ波長サイズのリング構造の配置により制御する。DMLの微細リング構造を配置

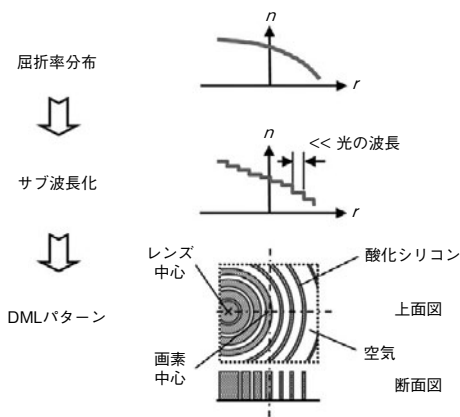


第4図 (a) 従来マイクロレンズ断面図, (b) デジタルマイクロレンズ (屈折率分布) の断面図

Fig. 4 (a) Schematic of conventional microlens, (b) Schematic of DML (index profile)

するレンズパターンの設計方法を、第5図に示す。光学設計した屈折率分布をサブ波長サイズで量子化し、それを高屈折率材料（酸化シリコン、屈折率：1.45）と低屈折率材料（空気、屈折率：1.0）のリングを粗密に配置することで構造化する[3]。

リング幅は入射光の波長より小さいため、光に作用する実効的な屈折率は、高屈折率材料と低屈折率材料の体積比で決まる。高屈折率材料の体積比を大きくすれば、実効的な屈折率を大きくすることができる。レンズ中心より酸化シリコンおよび空気のリングの幅を徐々に変えて同軸状に配列することで、傾いて入射する光を受光部に集光する実効的な屈折率分布が実現できる。



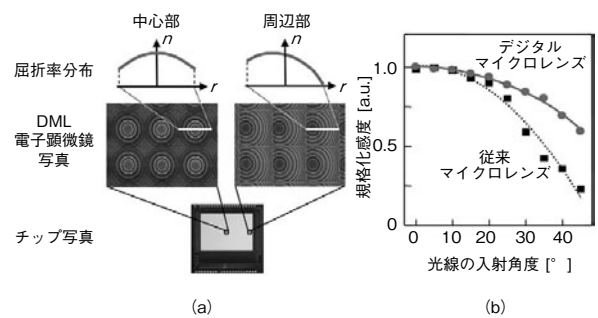
第5図 デジタルマイクロレンズの設計方法
Fig. 5 Design principal of DML

3.2 デジタルマイクロレンズ搭載イメージセンサ

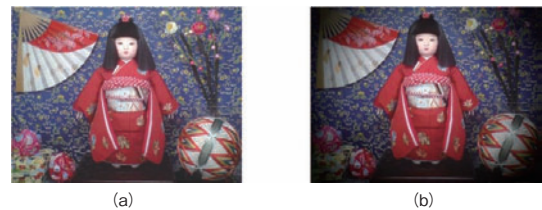
DMLの粗密構造の形成は、半導体微細リソグラフィ技術を用いており、リング形状を画素ごとにマスク設計して作り分けることが可能である。リングの最小幅は、光の波長よりも小さい100 nmである。

第6図 (a) のように、イメージセンサ周辺部では光線角度に応じてリング中心を画素中心より偏心させたり、屈折率の分布形状を変えたりすることができる。全画素でDMLを最適設計することで、入射光の光線角度の大きいイメージセンサ周辺部における集光効率の低下が小さい (第6図 (b))。

DMLを搭載したイメージセンサの撮像例を、第7図に示す。DML技術により画面全体で明るいイメージセンサを実現できた。例えば、イメージセンサ周辺部の光線角度がさらに大きくなる薄型カメラに有効な技術である。



第6図 (a) デジタルマイクロレンズのレイアウト、
(b) イメージセンサ感度の入射角特性
Fig. 6 (a) Arrangement of DMLs,
(b) Sensitivities as function of incident angle



第7図 (a) デジタルマイクロレンズ搭載イメージセンサの撮像例、
(b) 従来マイクロレンズ搭載イメージセンサの撮像例
Fig. 7 Captured images with (a) DML and (b) conventional microlens

4. 今後の展望

PCFを用いた高耐候性をもつ広い波長帯域での可視化技術と、DMLで画素ごとの入射光の光線角度に対応した集光構造の設計技術を構築した。今後、可視光だけではない任意の透過帯域を設計できるPCFの特長を生かし医療用カメラにおける病変部の視認性向上やマシンセンシングなどへ、またDMLの集光構造設計技術を、入射光の角度範囲の広い魚眼カメラやレンズ交換式の一眼カメラ用などのイメージセンサへ展開していく。

参考文献

[1] Y. Inaba et al., “Degradation-free MOS image sensor with photonic crystal color filter,” IEEE Trans. Electron Devices Letters, vol.27, no.6, pp.457-459, 2006.
[2] S. Koyama et al., “A day-and-night MOS imager with robust photonic-crystal-based RGB-and-IR integrated color filters,” IEEE Trans. Electron Devices, vol.55, no.3, pp.754-759, 2008.
[3] K. Onozawa et al., “A MOS image sensor with a digital-microlens,” IEEE Trans. Electron Devices, vol.55, no.4, pp.986-991, 2008.