

オンチップ°微小光学素子を利用した
撮像素子の多機能化に関する研究

Study on multi-functionality improvement in an imager
by micro-optics on a chip

博士学位論文

香山 信三

2017年6月

奈良先端科学技術大学院大学

物質創成科学研究科

【目次】

第1章 緒言	1
1-1 カメラの進化.....	1
1-1-1 カメラの歴史.....	1
1-1-2 カメラの用途.....	2
1-1-3 カメラの多画素化.....	5
1-2 本論文の目的と構成.....	7
参考文献.....	9
第2章 カメラの多機能化を実現する微小光学素子.....	12
2-1 光の性質.....	13
2-2 カメラの構成要素.....	15
2-3 オンチップ波長フィルタ.....	19
2-3-1 単層膜による光学フィルタ.....	19
2-3-2 多層膜による光学フィルタ.....	24
2-3-3 フォトニックカラーフィルタ.....	34
2-3-4 オンチップ波長フィルタのまとめ.....	39
2-4 オンチップレンズ.....	40
2-4-1 マイクロレンズ技術.....	40
2-4-2 デジタルマイクロレンズ.....	45
2-4-3 微小レンズの光学設計.....	46
2-4-4 オンチップレンズのまとめ.....	50
2-5 結言.....	51
参考文献.....	52
第3章 可視光／近赤外光を同時に撮像する撮像素子.....	54
3-1 緒言.....	55
3-2 フォトニックカラーフィルタを用いた可視光と近赤外光を同時撮像する 画素構成.....	59
3-3 近赤外光信号成分の減算による信号処理.....	64
3-4 試作.....	67
3-5 実験.....	68
3-6 考察.....	75
3-7 結言.....	76
参考文献.....	77
第4章 広い色温度の照明に対応する昼夜兼用撮像素子.....	79

4-1 緒言	80
4-2 変化する環境光の色温度と差分処理の課題	82
4-3 可視領域の広帯域下と近赤外領域の狭帯域化を実現するフォトニックカラーフィルタの設計	85
4-3-1 波長設計	85
4-3-2 信号ノイズ比とダイナミックレンジの試算	88
4-4 実験結果	92
4-5 考察	95
4-6 結言	96
参考文献	97
第5章 オンチップ微小光学素子による入射角度毎に光線分離する撮像素子 ..	99
5-1 緒言	100
5-2 単眼レンズを用いた多眼ステレオカメラの撮像システム	103
5-3 多眼撮像素子用のオンチップ微小光学素子	105
5-3-1 オンチップビームスプリッタと層内マイクロレンズの協調設計	105
5-3-2 層内メタマイクロレンズ	108
5-4 ステレオビジョン用の多眼信号処理	112
5-5 デバイス特性	114
5-5-1 試作実験	114
5-5-2 光学特性	116
5-6 実験	118
5-6-1 立体視の実証	118
5-6-2 視差による画素ずれ量の評価	120
5-7 考察	122
5-8 結言	123
参考文献	124
第6章 結言	126
6-1 本研究の成果	126
6-2 今後の展望	128
参考文献	130
謝辞	131
研究業績一覧	133

【略語】

B 画素	Blue 画素
B+IR 画素	Blue and Infrared 画素
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CVD	Chemical Vapor Deposition
DR	Dynamic Range
DML	Digital Micro Lens
FIR	Far Infrared
FDTD	Finite-Difference Time-Domain
FWHM	Full Width at Half Maximum
GRIN	Graduated Index
G 画素	Green 画素
G+IR 画素	Green and Infrared 画素
IR	Infrared
IRCF	Infrared Cut Filter
LED	Light Emitting Diode
LSI	Large-Scale Integration
ML	Micro Lens
MOS	Metal Oxide Semiconductor
NIR	Near Infrared
PCF	Photonic Color Filter
RGB	Red Green Blue
R 画素	Red 画素
R+IR 画素	Red and Infrared 画素
SEM	Scanning Electron Microscope
SNS	Social Networking Service
SNR	Signal to Noise Ratio
VGA	Video Graphic Array

第1章 緒言

1-1 カメラの進化

1-1-1 カメラの歴史

写真(photography)とは、光(phos：ギリシャ語)が描くもの(graphê：ギリシャ語)として定義された[1]。先人達は目に見える世界、「光が描くもの」を如何に再現するか試行錯誤してきた。カメラは19世紀初めに誕生した[2]。光により感光材料を化学変化させることで映像を記憶する原理を利用した。当時、写真を記憶する媒体は、大きな金属板やガラスだったため、使い勝手は悪かった。19世紀後半に、厚みが薄く、かつ、軽い記憶媒体の巻取り型のフィルムを用いる銀塩カメラが発売されてから、カメラで写真を取る行為が身近になり、世界中に写真文化が広がった。しかし、まだ、化学溶剤を用いる手間や、取った写真をその場で確認できないなど、現在から振り返ると、課題も多かった。

そこに、手間のかかる化学反応を用いた現像作業を必要としない画期的な新しい撮像原理が登場した。光を電子に変換する光電変換の物理現象を用い、映像情報を電気信号で扱う。半導体デバイスのCCD (Charge Coupled Device)が1969年に発明された[3,4,5]。そのデバイスを活用した世界初の電子式カメラが1975年に発明された[6]。画像データはテープデバイスで磁気記憶される方式から始まった。その後、半導体の微細プロセスの進化により高密度な半導体不揮発デバイスが記憶素子として利用可能になり、その不揮発メモリを記憶媒体として活用するカメラが増えた。その結果、カメラの大きさは劇的に小さくなり、かつ、安価に入手できるようになった。カメラ市場は軍事、科学、医療などから民生にまで用途が拡大し、その結果、電子式カメラが感光剤による銀塩カメラを完全に置き換えた。そして、2017年の現在に至るまで、電子式カメラの数、そしてカメラを活用する用途は広がり続けている。

電子式カメラの普及が始まった当初は、撮像を必要とする時にカメラを持ち運び、写真を撮像することが主な用途だった。カメラの中の撮像素子の小型化と並行して、周辺のカメラレンズの小型化の進化も進み、電子式カメラが携帯

端末の機能のひとつになる小型カメラモジュールとして内蔵されるようになった。カメラモジュールの小型化と、通信機能の備わった情報端末の普及とが相乗し、結果的にカメラ機能付き端末は爆発的に普及し続けている。日本では、携帯端末の人口普及率はすでに 100%を超え[7]、一人 1 台以上のカメラを常時所有する状況になった。また、世界市場でも、年間 13 億台を超えるカメラ機能付きのスマートフォンが販売され広がり続けている[22]。カメラモジュールの画素数も 1000 万画素以上の製品も登場し[8]、銀塩カメラと遜色ない解像度の性能を実現している。その結果、性能の高いカメラを誰もが常時携帯し、いつでも撮像できる世の中が常識になった。

1-1-2 カメラの用途

カメラの用途は写真を取ることに起源があったが、現在までに様々な用途に広がってきた。表 1-1 にカメラが用いられている用途とそれぞれの用途で求められる特徴をまとめた。

表 1-1 カメラの用途

用途大分類	用途中分類	利用される波長域	特徴
携帯機器	フロントカメラ	400nm～700nm	小型レンズ、小光学サイズ、動画
	インカメラ	400nm～700nm	小型レンズ、小光学サイズ、動画
民生用途カメラ	コンパクトカメラ	400nm～700nm	小型レンズに対応する小光学サイズ
	レンズ交換式カメラ	400nm～700nm	交換式レンズに対応する大光学サイズ
	デジタルムービー	400nm～700nm	動画
	監視カメラ	400nm～1000nm	昼夜撮像、広ダイナミックレンジ
業務カメラ	放送用カメラ	400nm～700nm	動画、昼夜撮像、広ダイナミックレンジ
医療カメラ	手術支援用カメラ	400nm～700nm	立体視
	軟性内視鏡カメラ	400nm～1000nm	小径、立体視、動画
	硬性内視鏡カメラ	400nm～1000nm	小径、立体視、動画
	カプセル内視鏡カメラ	400nm～1000nm	小型
	X 線カメラ	0.1nm～10nm	X 線に感度の高いセンサ
車載カメラ	フロントビュー	400nm～1000nm	動画、昼夜撮像、広ダイナミックレンジ
	バックビューカメラ	400nm～1000nm	動画、昼夜撮像、広ダイナミックレンジ
	周辺ビュー・カメラ	400nm～1000nm	動画、昼夜撮像、広ダイナミックレンジ

	ドライバ監視カメラ	400nm~1000nm	動画、近赤外撮像
	ナイトビューカメラ	800nm~10 μ m	動画、近赤外撮像/遠赤外撮像
	センシングカメラ	400nm~1000nm	動画、昼夜撮像、広ダイナミックレンジ
娯楽	ゲーム機用カメラ	400nm~700nm	小型
公共施設	テラヘルツカメラ	30 μ m~3mm	テラヘルツ波に感度の高いセンサ
	X線カメラ	0.1nm~10nm	X線に感度の高いセンサ
科学用途	顕微鏡用カメラ	400nm~1000nm	高解像度

静止画や動画を楽しむための用途の携帯機器やコンパクトデジタルカメラは、手軽に映像を撮ることを楽しみたいという要求から小型化、軽量化が求められている。一方、感度が高く映像の質の高い撮像が求められる業務用カメラやレンズ交換式カメラはより多くの光を取り入れることが可能な大きなレンズに対応できる大型の撮像素子を搭載したカメラが求められている。このように映像を撮像する用途でも異なる性能がカメラの用途に応じて違う。そのため、サイズはそれぞれ小型化、大型化という対極的な進化が求められる。特に、小型化するためには、単位面積あたりの画素数を多くしなければ小型化出来ない。そのため、微細化してきた半導体プロセス技術を取り込みながら、画素サイズを小さくする研究開発が進んできた。近年では1.1 μ m²の画素セルサイズの撮像素子が登場している[13]。さらに、半導体LSIを製造するプロセス技術は2017年時点で、トランジスタのゲート長は7nmである。一方撮像素子に用いられているプロセス技術は65nm程度である[18,19]。今後、撮像素子の製造に先端の微細半導体技術の適用が進むことで、撮像素子の画素サイズは1 μ m²以下にまで進む可能性はあると考える。また、材料や構造を変えることで、50nmの画素サイズまで微細化できるという報告もある[20]。一方、仮に微細画素が実現しても、カメラレンズが光の波長相当のサイズの画素に光を解像できるかは課題が残る。例えば、波長500nmの光をF値1のレンズで結像しても直径1.2 μ m程度にまでしか解像できないことがエアリーディスクの式から推測できる[22]。しかし、レイリーが見出した分解能の定義[21]を適用すると、波長の半分程度の幅まで解像できる。そのため、可視光の中でも短波長の青色光の400nmの半分200nm程度までの画素サイズまで微細化できる可能性がある。技術的に、今後の画素

のさらなる微細化は可能と考える。

また、監視カメラは、社会インフラの一部として普及が著しい[14]。監視カメラに求められる性能は、屋内、屋外問わず取付けでき、昼も夜も撮像できることである。そのため、熱源から発する波長の光である遠赤外線センサを用いた遠赤外カメラが昼夜を問わないカメラとして有望である。しかし、遠赤外線カメラは可視光の画像が撮像できないため、人の判別などに不向きである。また、遠赤外光が透過するレンズの価格も高価であり普及が進んでいない。そのため、暗闇では近赤外の照明と併用して撮像できる近赤外カメラの普及が進んできている[24]。一般の可視光カメラでは近赤外カットフィルタで近赤外光を除去するが、夜間に近赤外光を撮像する場合は、機械的に脱着することが可能な近赤外光カットフィルタをカメラに内蔵し、夜間はフィルタなしで、昼間はフィルタを挿入することで昼夜の撮像を実現している。

また、医療用途の内視鏡カメラは、近年、癌などの腫瘍の場所を特定することを可能としている。癌腫瘍は大きく成長しようとするため、血管を増やし栄養分を取り込もうとする特性がある。そのため、癌腫瘍が拡大すると毛細血管が増え粘膜表面が込み入った模様になり、血管の密度が高い。そのため、血管の観察ができれば癌の位置が特定できる。血液内のヘモグロビンは 540nm 付近の狭帯域の光を吸収する特徴がある。そのため、この波長の光の画像を観察することで癌の位置が特定できることが報告され既に多くの医療現場で実用化されている。もちろん、このような内視鏡カメラでも一般的な可視光のカラー画像は手術の可視性の観点から必要であり、細かい多波長の撮像が求められる。そのため、光源から発する光の波長は異なる波長を透過する複数の光学フィルタを時間軸で変えながら、多波長の撮像を実現している[15]。

空港などの公共設備においては X 線やテラヘルツ波といった可視光や近赤外光とは異なる波長の電磁波を撮像することで、金属物や液体の場所を推定し、不法な武器や危険物などの輸出入管理に利用されている。しかし、これらのカメラは、可視光の同時撮像は同じ撮像素子では難しく、設置場所に余裕のある箇所では可視光カメラと併設される。

上記のように、可視光以外の波長で撮像すると、可視光では見ることで

ない映像が取得でき、異なる機能が追加できる。しかし、可視光の映像は人間が見ている映像そのものであり、最も、人間が理解しやすく扱いやすい映像であるため、可視光の画像が不要になることは少ない。そのため、可視光とは異なる波長を撮像する場合、可視光カメラとは別に異なる波長を撮像するカメラが必要になるが、カメラ台数の増加を招くなど課題がある。このように異なる波長の撮像をどのように実現していくかは、カメラ開発の課題である。

1-1-3 カメラの多画素化

電子式カメラの進化は撮像素子の進化と共に進んできたが、図 1-1 にデジタルカメラ、デジタル一眼カメラ、スマートフォン用カメラなどの画素数と年と画素数と商品化された西暦を示す。

民生用に初めて商用化された 1990 年頃の電子式カメラの画素数は 9 万画素相当であった[17]。光学サイズが推定 2/3 インチであったので、画素サイズは 10 μm より大きなサイズである。フィルムのサイズと感光物質の粒子サイズから換算した 35mm 判銀塩カメラの画素数は 3.5 億画素相当で、等価画素サイズの 1.5 μm 程度のため、当時の画素サイズは、かなり大きく、解像度は低かった[16]。半導体プロセスの微細化がムーアの予言則に従い進んだことにより、撮像素子の画素の微細化の開発も進み、1990 年台に入ると、100 万画素を超える民生用途のカメラが次々に登場した。2000 年台には 1000 万画素を超えるカメラが当然となった。2016 年では、画素数は 2000 万画素から 4000 万画素程にも高解像化されるカメラが既に市場に出ている。画素サイズは 1.1 μm の撮像素子も発表され

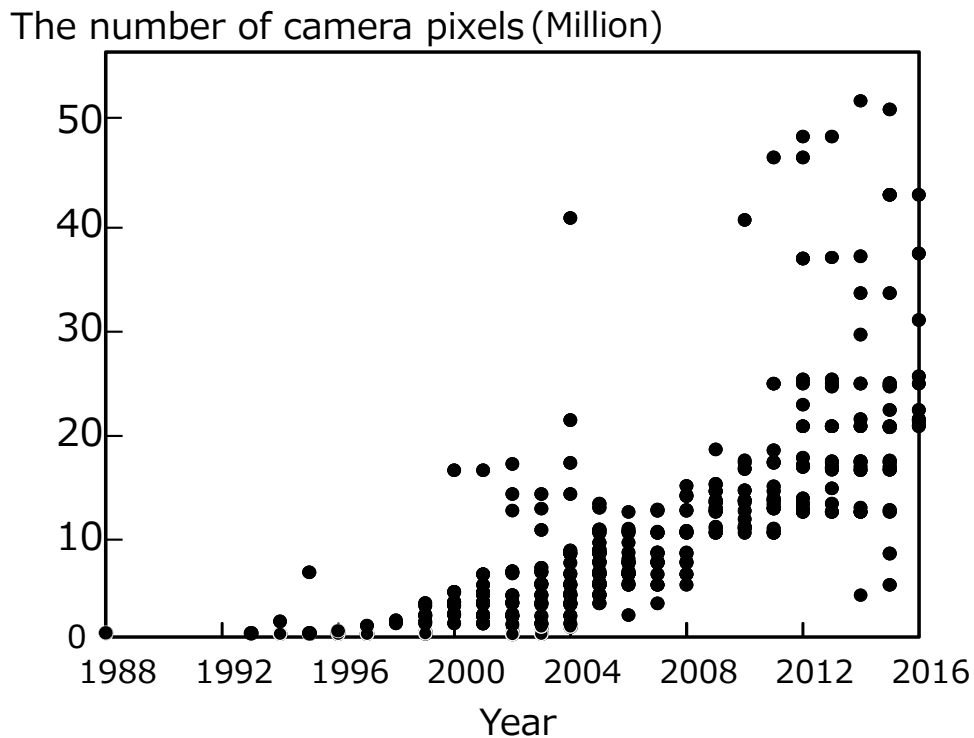


図 1-1 電子式カメラの発売年とカメラの画素数

ている[12]。その結果、既に銀塩カメラとは遜色のない解像度に達しており、デジタル画像処理の進化も伴い、高い画質を実現している。電子式カメラは、画像の取り直しの容易性や動画撮像など単純に画像を撮像する目的には留まらない利便性も含め、市場に広く受け入れられている。

同時に、一般の多くの消費者が、現在、主に用いているデジタル画像の用途は SNS への画像の登録や、個人撮影の記録を見返すなどの用途である。そのため、画素数はそれ程必要ないのが実際であり、冗長な程多画素化していることは現実である

そのような多くの画素数は、その冗長性を活かすことで、単純な撮像以外の機能が登場してきている。例えば、遠方の物体を撮像する場合、解像度の低いカメラではカメラレンズによる光学的なズームを行い、適切な解像度の遠方画像を撮像する。一方、画素数が多ければ、光学ズームすることなく、画像の切り出しを行うだけで高解像度な遠方画像が撮像できる。すなわち、光学レンズ

の機械機構を変化させることで実施していたズーム機能を省略、または簡素化でき、結果的に、機械部の移動時間がなくなるため、より高速な応答速度を実現できる。このことは、カメラモジュール、または、カメラの小型化につながる。

多画素の他の応用の一例として、暗いところから明るいところまで撮像するためにはダイナミックレンジの広い撮像素子が必要である。一般的には、撮像素子が撮像できるダイナミックレンジは 60dB 程度であり、それを越えたダイナミックレンジのシーンは、露光時間の異なる 2 フレームの情報を保存し、合成される[9]。しかし、多画素化が進むと撮像素子で冗長な情報を取得できる。例えば、感度の異なる画素を配置し、その画素出力を合成することで、撮像素子で広いダイナミックレンジに必要な露光時間の異なる画像が同じ撮像タイミングで撮像できる[10]。

このように、多画素化が進むことで、画素数に冗長性が生まれ、従来のカメラで取得していた画像情報とは異なる情報を取得することが可能になってきている。

1-2 本論文の目的と構成

上述したように、電子式カメラの画素数は冗長なまでに画素数が増加してきている。一方、複数の波長画像の撮像など、新たな光学的な機能を追加することで、新たなカメラの用途が生まれる可能性が高い。同時に、従来の可視光の画像が同じように撮像できることを工業的に求められる可能性もある。本論文では、冗長になった画素を活用して、新たな機能を付加する撮像素子の多機能化に関する研究を実施した。特に、多機能化のために、従来の多機能カメラと違い、カメラのレンズや光学フィルタなどの光学系を追加することで多機能化するのではなく、撮像素子の上に微小な光学系を搭載することで多波長化や多機能化を実現した。

本論文の構成を図 1-2 に示す。1 章ではこれまでのカメラの歩みに関して振り

返った。2章では、今後、カメラがどのように進化できるか、まず、カメラが撮像できる様々な情報に関してまとめる。次に、本論文で対象とする多波長化、光線分離の進化を微小な光学素子を撮像素子上に搭載する際に、設計するために前提とした物理光学の基本式、シミュレーション方法に関して述べる。3章に可視光と近赤外光を同時撮像できる多波長化した撮像素子原理、設計、試作結果について述べる。4章に更に実用上の課題を解決するための考え方と、設計、試作結果について述べる。5章では、ひとつのレンズで立体撮像できる撮像素子の考え方、設計、試作結果に関して述べる。最後にまとめを6章で述べる。

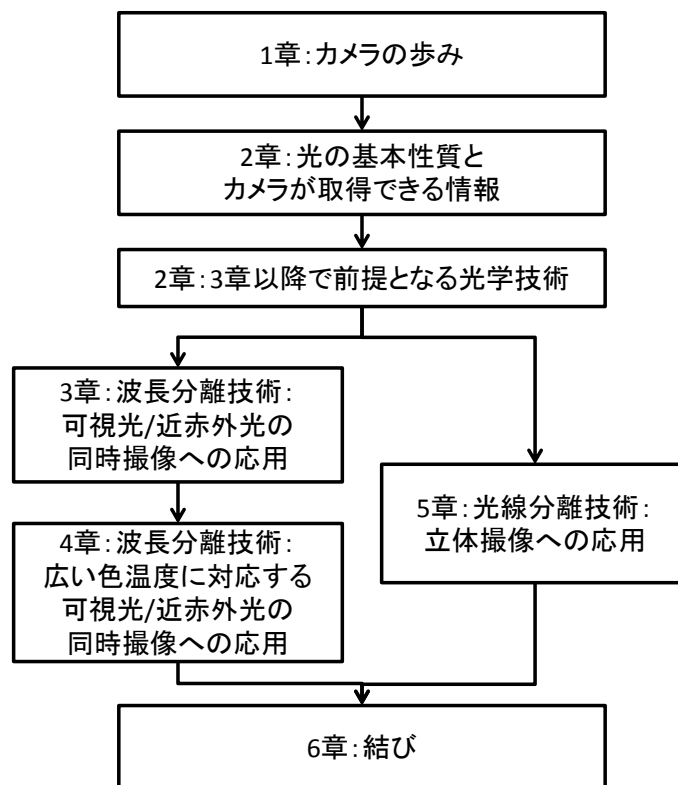


図 1-2 本論文の構成概略

参考文献

- [1] John F. W. Herschel, “Note on the art of photography, or the application of the chemical rays of light to the purposes of pictorial representation,” *J. of the Franklin Institute*, vol. 28, no. 2, pp. 112-113, 1839.
- [2] Marien Mary Warner, *Photography: A cultural history*, Laurence King Publishing, 2006, p. 11.
- [3] G. S. W. Boyle, “Buried channel charge coupled devices,” 米国特許, no. 3792322A, 1974.
- [4] W. S. Boyle and G. E. Smith, “Charge Coupled Semiconductor Devices,” *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 49, no. 4, pp. 587–593, 1970.
- [5] G. S. W. Boyle, “Three dimensional charge coupled devices,” 米国特許, no. 3796927A, 1974.
- [6] G. A. Lloyd, and J. S. Steven, “Electronic still camera,” 米国特許, no. 4131919, 1978.
- [7] 総務省, “電気通信サービスの契約数及びシェアに関する四半期データの公表 (平成 27 年度第 4 四半期(3 月末)),” 2016,
http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban04_02000106.html
- [8] Apple, “iPhone7 Tech Specs,” <http://www.apple.com/iphone-7/specs/>, 2016.
- [9] 奥田正浩, “HDR 画像~ 色空間から符号化まで~,” *The Journal of The Institute of Image Information and Television Engineers*, vol. 64, no. 3, pp. 299-305, 2010.
- [10] K. Nishimura, Y. Sato, J. Hirase, R. Sakaida, M. Yanagida, T. Tamaki, Y. Inoue, “6.1 An over 120dB simultaneous-capture wide-dynamic-range 1.6e⁻ ultra-low-reset-noise organic-photoconductive-film CMOS image sensor,” in *Digest of Technical Papers - IEEE International Solid-State Circuits Conference*, vol. 59, pp. 110–111, 2016.
- [11] 池田園子, “撮りっぱなし派が多数？スマホ写真の使い道,”
<http://smartphone.r25.jp/news/112597>, 2014.

- [12] 妹尾亜紀子, “写真撮影で最もよく使うのは「スマートフォンのカメラ」で 84.9%、10代女性では 96.8%,”
https://mmdlabo.jp/investigation/detail_1578.html, 2016.
- [13] T. Arai et al., “6.9 A 1.1 μ m 33Mpixel 240fps 3D-stacked CMOS image sensor with 3-stage cyclic-based analog-to-digital converters,” in Digest of Technical Papers - IEEE International Solid-State Circuits Conference, vol. 59, pp. 126–128, 2016.
- [14] 大阪マーケティング本部 第三部, 2015 セキュリティ関連市場の将来展望, 富士経済, 2015.
- [15] T. Yoshida, H. Inoue, S. Usui, H. Satodate, N. Fukami, and S. E. Kudo, “Narrow-band imaging system with magnifying endoscopy for superficial esophageal lesions,” *Gastrointest. Endosc.*, vol. 59, no. 2, pp. 288–295, 2004.
- [16] FujiFilm, FUJICHROME Velvia 50 Professional [RVP50]/ FUJIFILM PRODUCT INFORMATION BULLETIN: AF3-0221E2, FujiFilm, p. 7.
- [17] J. S. Barrett, “Instant electronic camera,” 米国特許, no. 4074324, 1978.
- [18] Xilinx, “Xilinx Collaborates with TSMC on 7nm for Fourth Consecutive Generation of All Programmable Technology Leadership and Multi-node Scaling Advantage,”
<https://www.xilinx.com/news/press/2015/xilinx-collaborates-with-tsmc-on-7nm-for-fourth-consecutive-generation-of-all-programmable-technology-leadership-and-multi-node-scaling-advantage.html>, 2015.
- [19] TowerJazz Panasonic SEMICONDUCTOR, “TowerJazz Panasonic Semiconductor Co. and Synopsys Announce Availability of Custom Design Kit for 65nm CMOS Image Sensor Technology,”
<https://tpsemico.com/2015/06/tpsco-synopsys-custom-design-kit/>, 2015.
- [20] C. Jiang, and J. Song, “An Ultrahigh-Resolution Digital Image Sensor with Pixel Size of 50 nm by Vertical Nanorod Arrays,” *Advanced Materials* vol. 27, no. 30, pp. 4454–4460, 2015.

- [21] L. Rayleigh, "LVI. Investigations in Optics, with Special Reference to the Spectroscope," *Philosophical Magazine Series 5*, vol. 8, no. 51, pp. 477–486, 1879.
- [22] TRENDFORCE, "TrendForce Reports Global Smartphone Production Volume Totaled 1.36 Billion Units," <http://press.trendforce.com/node/view/2741.html>, 2017.
- [23] J. F. W. Herschel, "Light," *Transactions Treatises on physical astronomy, light and sound contributed to the Encyclopaedia Metropolitana*, Richard Griffin & Co., p. 491, 1828.
- [24] Axis Communications, "Day and night functionality," <https://www.axis.com/sk/en/learning/web-articles/technical-guide-to-network-video/day-&-night-functionality>, 2017.

第2章 カメラの多機能化を実現する微小光学素子

本章では 3 章以降のカメラの多機能化技術を議論する上で必要となる基礎的な光の性質と、これまでに研究されてきた光学技術について述べる。2-1 節で、光そのものの基本性質を簡単に解説し、続けて、2-2 節ではカメラの基本構成と、カメラで取得できる光の性質について述べる。次に、光の性質の中で特に波長情報と光線情報に着目し、それぞれの情報を信号とした時、信号光を個別に分離するための波長フィルタと光線分離の基礎的な光学技術についてそれぞれ 2-3 節と 2-4 節で述べる。波長フィルタに関しては光学多層膜フィルタの設計に必要なマトリックス法を導出し、その使用例を通じ波長フィルタとなるフォトニックカラーフィルタ技術を議論する。光線分離技術については、屈折率分布レンズにおけるレンズ設計方法を解説する。最後に、2-5 節で本章をまとめる。

2-1 光の性質

1960年以降、ムーアの法則に沿って、半導体プロセスの微細化技術が進化し、単位面積あたりに搭載できるトランジスタ数が18ヶ月で約2倍になる速度で高密度化してきた。その結果、半導体からなる撮像素子においても、画素に搭載されるトランジスタのサイズが小さくなり、画素サイズが小さくなった。その結果、単位面積あたり、すなわち、同一画角に収まる撮像素子の画素数は増え続け、その画素数は一般的な撮像用途では冗長になるまでになった。その結果、その冗長な画素数に別の新しい機能に振り分けが可能になり、新しい応用を生む可能性が出てきている。カメラにどんな機能を付加できるかを考察するため、光そのものの性質をまず議論する。

図 2-1 に光が伝搬していく場合の光の振幅の模式図を示す。光は波としての特性を持つ。波は何らかの変位が時間の経過とともに空間的に伝搬する現象のことである。光の波とは電磁場、すなわち、電界と磁界の変化によって形成される波であることは、マクスウェルによって19世紀後半に発見されて以来、知られている[1]。実際には、電場と磁場がお互いに垂直に交わり、電磁波の進行方向に対して電場と磁場は互いに垂直に振動するように、作用し合いながら伝搬していく。

同時に、光は粒子としての性質も持つ。光の最小単位は光子(フォトン)と呼ばれ、離散的な個数で光強度が決まる。つまり、光子の数が多ければ、光の強度が強くなる。

このような光の特性の進行方向、振幅や振動周波数が組み合わさることで、現実には、様々な状態で光は存在している。例えば、波の振動周波数が異なれば違う波長の電磁波、光となる。可視光であれば、周波数が違うと、青色、緑色、赤色など人間に見える光の色が変わる。そのような異なる種類の光を区別するため、カメラには様々な工夫を行い、光の性質を分離して撮像できるように構成されている。次節にカメラの基本構成について述べる。

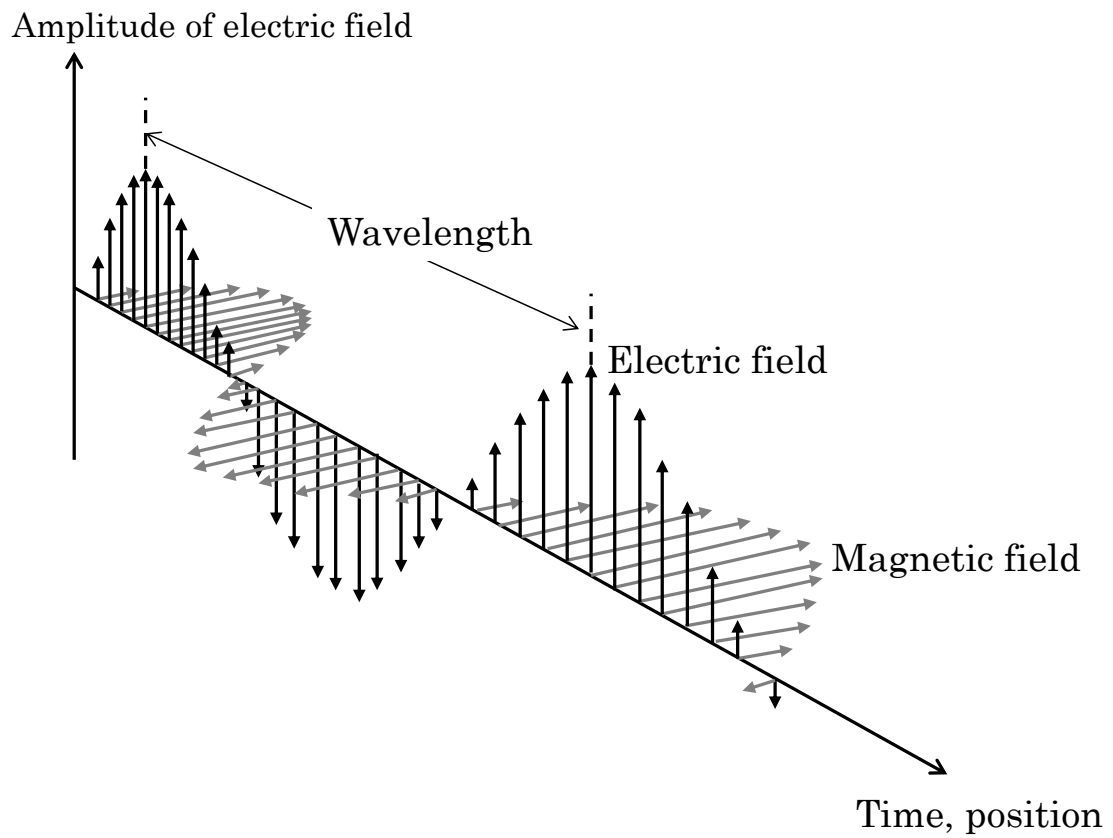


図 2-1 光の振動状態の模式図。光は電界と磁界が互いに直行しながら伝搬する。進行方向、波長、偏光状態などが様々な状態で存在する。

2-2 カメラの構成要素

カメラに重要な構成要素のひとつとして、入射光を電気信号に変換する光電変換素子を二次元状に配列した半導体からなる撮像素子がある。光電変換するだけの撮像素子以外に構成要素が無ければ、光は電気信号に変換されるが、入射光を時間、波長、進行方向、偏光状態などは区別されずに出力される。例えば、可視光で波長の区別をしなければ、光の色の情報はわからない。また、同様に、時間軸で異なる情報を区別しなければ、動く物体の瞬間を切り取ることはできない。

そのため、カメラは光の波長や時間など光の入力情報の属性を分離して受光するように、光電変換以外の付加機能を実装している。例えば、時間軸方向の変化を区別するために、特定の時間だけ開口するようなシャッター機能を付加することで、有限の時間区間の光のみを分離して受光できる。そのようなシャッター機能は外部の機械式の機構で実現でき、撮像素子の制御、すなわち電子式シャッターにより同等の機能を実現できる。その結果、高速に動く物体も短い露光時間に撮像すれば、時間軸で切り出した撮像ができる。そのような静止画を連続して撮像することで動画が撮像できる。

また、被写体の空間位置情報を区別して撮像するために、レンズを撮像素子と組み合わせ、カメラを構成する。図 2-2 にそのカメラの概略構成図を示す。

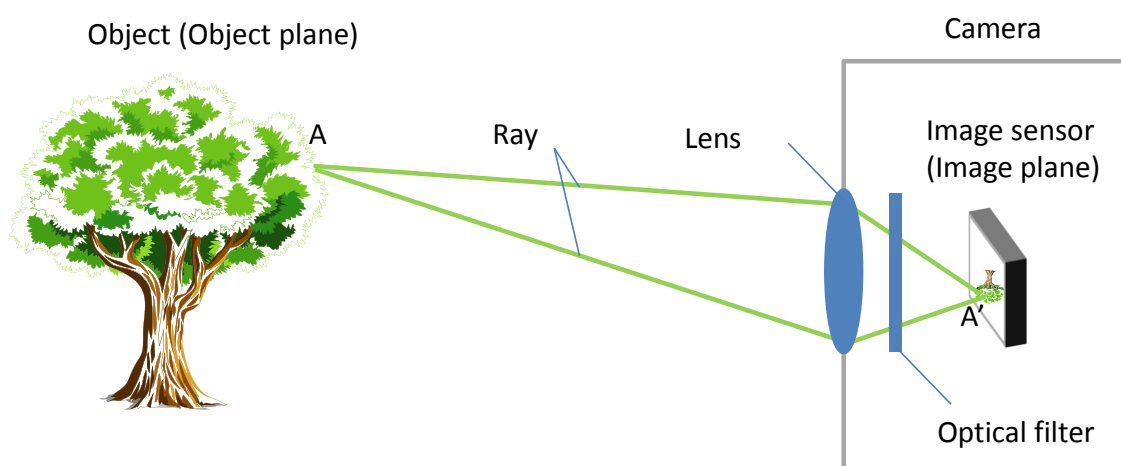


図 2-2 カメラの基本構成とレンズによる結像

カメラは光情報をレンズからなる光学系で光を曲げ、撮像素子へ光情報を入射して撮像する。図 2-2 の物体面にある被写体の A 点からでた光線は、レンズで屈折して方向を変え、像面の A' に結像する。結像とは A 点からでた光は開口径を通過し、レンズにより進行方向を曲げられる。開口径は有限の大きさなので、異なる開口位置を通過する異なる光線が最終的に像面で合流することをいう。結像している状態では像はボケない。像面の位置に光を電気信号に変換する撮像素子を配置すれば、ボケの無い像を撮像できる。ボケとは焦点のあっていない撮像領域を意味する。すなわちレンズにより、物体面上の点を二次元状に撮像面に再現できる。撮像素子で画素を二次元配置することで物体の位置情報を区別して撮像できる。また、この被写体からの光線と撮像素子の間に光学フィルタを配置し、特定の光特性を持つ光のみを取得することもできる。

時間や光の位置情報を分離するのと同様に、その他の光の属性に対しても、特定の範囲だけサンプリングし情報を区別して撮像すれば、個別に意味を持つ特徴的な映像情報が取得できる。

光そのものは先に述べたように、電磁波であり、電磁波の属性は光の強度、時間変動量、波長、光の進行方向、偏光状態などがある。それらの光の属性を分割する場合、どのような基本手段があるかを表 2-1 にまとめた。

時間軸の情報と空間情報を区別して分割する方法は既に解説した。波長を分離する方法に関して述べる。一般的に知られているカラー出力のカメラは、近年では単板式カメラが主流である。撮像素子の画素ごとに光の三原色を透過させることが可能な青フィルタ、緑フィルタ、赤フィルタが画素にどれか 1 種類だけ実装されている[2]。実装されていない色のフィルタは画素を補完してカラー画像を出力する。この単板式カメラの 3 種類のカラーフィルタ方式は人間の眼にある錐体の種類が 3 つであることに対応し、人間にとって理解できるカラー画像を撮像することを目的としている。科学計測や美術品撮像の用途などで、さらなる波長分割をする場合、波長分離が可能なカメラとしてマルチバンドカメラが知られている[3]。マルチバンドカメラは 1 台のカメラで異

表 2-1 分離可能な光の属性と基本の分離手段

	分離可能な光情報	分離手段
1	時間情報	機械式／電子式シャッター
2	空間情報	2次元アレーに配置された光電変換素子とカメラレンズ
3	波長情報	光学波長フィルタ
4	変更情報	偏光フィルタ
5	ライトフィールド (同一被写体からの光線情報)	異なる開口位置を通過する光線を区別する光学素子

なる複数の波長の画像を取得できる。このカメラで得られる画像は被写体の反射率の波長ごとに取得できるので、被写体のより詳細な光学的な特徴、すなわち、細やかな色の分析が可能になる。例えば美術品など、繊細な色にこだわる被写体を撮像したりするのに活用されている。

このマルチバンドカメラは、例えば撮像素子の前面に特定の波長が透過することのできる複数の種類のバンドパスフィルタを配置し、そのバンドパスフィルタをレボルバー式の回転物に配置し、レボルバーを撮像ごとに回転させることで異なるバンドパスフィルタを通過した画像を撮像できる。すなわち、それぞれ異なる波長の画像を取得できる。

しかし、レボルバー式のフィルタの交換機構の大きさが大きくなることや、レボルバーの回転に時間がかかり、各波長の画像の時間の同時性が無いので動体では撮像できないなど課題が多い。

偏光を区別して撮像することも既存のカメラで取り組まれている。これは水面をより反射する s 波を遮断し、p 波のみを透過するような偏光フィルタをカメラのレンズの前面に備えることで、水中の様子が鮮明に撮像できることも知られている。

また、太陽光などの通常の光は様々な方向に振動している光が存在している。この電磁波の振動の方向が特定の方向にのみ存在している光を偏光と呼ぶ。偏

光方向によって、水面に対して垂直に振動する偏光と平行に振動する偏光は反射する光量が変わる。そのため、表面で反射してしまう偏光では水中の様子をみることは難しいが、水中で反射した光は水中の様子を観察可能である。このように偏光を区別するため、特定の振動方向のみを透過する偏光フィルタを用い、特定の方向に偏光した光の情報を取得できる。

従来カメラでは、光はレンズの開口を通過し集光され撮像素子面で結像されその像を映像化する。しかし、撮像素子でその開口を通過した経路を区別して撮像していない。この光の経路すなわち受光部への入射角度を区別して撮像できるカメラがライトフィールドカメラとして近年注目されている[4]。ライトフィールドとは被写体の位置情報に加え、被写体からの光線角度を区別したベクトル関数で光を定義する。カメラへの入射角度も分離して撮像することのでき、その分離された光線角度の情報を信号処理することで、カメラレンズの開口サイズ範囲内の異なる視点からの画像を得ることが可能である。撮像後でも再フォーカスが可能になるなど新しい応用が期待されている[5]。

このように、外部素子を用いることで、波長、偏光、入射角度を区別して撮像することに取り組まれている。一方で、外部の光学素子で行うために、カメラのサイズが大きい点や、外部素子を切り替える場合などに撮像時間の同時性が無い点など撮像の制約もある。外部素子で実現されている機能が多画素化した撮像素子の冗長な画素で実現できれば、カメラの小型化、汎用カメラで高機能化が進む可能性がある。

上記のような考えにもとづけば、カメラに新たな工夫を実装することで、光の特定の性質を分離、分解して撮像できる。本論文では、特に、撮像素子で異なる波長を分離する技術と、光を入射角度により分離する技術に着目した。次節では 3 章以降の議論の前提となる従来の波長分離技術と、光線分離技術について述べる。

2-3 オンチップ波長フィルタ

波長の異なる可視光は、人間には異なる色の光として認識できる。波長を区別して撮像する場合、青、緑、赤などの所望の波長の光を撮像素子で別々に受光する必要がある。特定の波長域の光だけが透過し、その他の波長の光は除外する光学フィルタが必要である。光学フィルタは撮像素子の外部に配置する場合と、撮像素子に直接実装して配置する場合がある。外部フィルタで、例えば可視光のみを撮像する場合は、可視光以外の波長の光を不透過にする近赤外光カットフィルタ(Infrared Cut Filter : IRCF)を使用する。このような外部フィルタは一般的にガラスに波長透過率の異なる材料を混ぜて生成した色ガラスが用いられる。しかし、材料で透過波長が決まってしまう、透過波長の設計は材料開発から行う必要がある。

一方、透過する光の波長を自由に設計するため、多層膜をガラス上に蒸着して作製する多層膜フィルタが用いられることも、近年では多くなってきている。多層膜フィルタの特徴は、製造工程は色ガラスに比べて多いものの、蒸着する材料の膜厚によって波長帯域を設計できる点である。

2-3-1 単層膜による光学フィルタ

透過する光の波長を制御する光学フィルタ技術のひとつとして、ファブリ・ペロー干渉の原理を利用した薄膜フィルタがある。このフィルタは薄膜に光を入射すると特定の波長の光だけが透過する特徴を使う。膜厚を変えると透過する波長を制御できる。このフィルタの膜厚と透過率の波長分散に関して、原理を導出する。

単層膜への光の入射、反射の様子を図 2-3 に示す。入射面、出射面をそれぞれ、 M_1 、 M_2 とし、薄膜の厚みを d 、屈折率 n とし、薄膜へ光が入射する場合と出射する場合の振幅反射率をそれぞれ r_1 、 r_2 、振幅透過率を t_1 、 t_2 とする。議論を単純化するため、ここでは光の吸収が薄膜ではない場合を考える。すると、

振幅反射率、振幅透過率には下記の式(2-1)、式(2-2)に示すストークスの関係式が成立する。

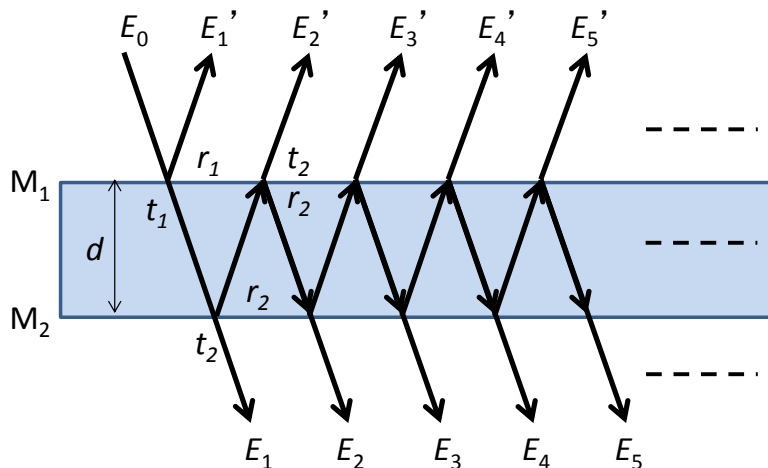


図 2-3 単層膜での光の反射の概略図。

$$r_1 = -r_2 \quad (2-1)$$

$$t_1 \cdot t_2 + r_1^2 = 1 \quad (2-2)$$

入射光の振幅を E_0 とした時、一度も反射せず薄膜を透過する光の振幅 E_1 は

$$E_1 = t_1 \cdot t_2 \cdot E_0 \quad (2-3)$$

である。一度 M_2 で反射して外に出た光の振幅 E_2 は

$$E_2 = t_1 \cdot r_2^2 \cdot t_2 \cdot E_0 \cdot \exp(-i\varphi) \quad (2-4)$$

である。ここで φ は M_1 に対し、光が追加で経由した光路長を波長で割り 2π を乗算した位相差である。更に薄膜の中で 2 度往復、すなわち 4 度反射してから出射する光の振幅 E_3 は

$$E_3 = t_1 \cdot r_2^4 \cdot t_2 \cdot E_0 \cdot \exp(-2i\varphi) \quad (2-5)$$

とできる。これが k 回往復する場合を一般式にすると

$$E_{k+1} = t_1 \cdot r_2^{2k} \cdot t_2 \cdot E_0 \cdot \exp(-ki\varphi) \quad (2-6)$$

とできる。最終的な透過光の振幅は無限に加算することにより導出でき、透過光の干渉強度 I_T は、ストークスの関係式も考慮し

$$I_T = \left| t_1 \cdot t_2 \sum_{k=0}^{\infty} E_{k+1} \right|^2 \quad (2-7)$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{t_1^2 \cdot t_2^2}{1 - 2r_2^2 \cdot \cos\varphi + r_2^4} \\
&= \frac{(1 - r_1^2)^2}{1 - 2r_1^2 \cdot \cos\varphi + r_1^4} \\
&\quad \varphi = \frac{4\pi nd}{\lambda}
\end{aligned}$$

と表せる。さらに $R = r_1^2$ が薄膜の光強度の反射率となることと、加法定理を用いることで次式に透過光の干渉強度 I_T が変形できる。

$$I_T = \frac{1}{1 - F \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \quad (2-8)$$

$$F = \frac{4R}{(1 - R)^2} \quad (2-9)$$

この式が表す透過率の波長分散のグラフを図 2-4 に示す。

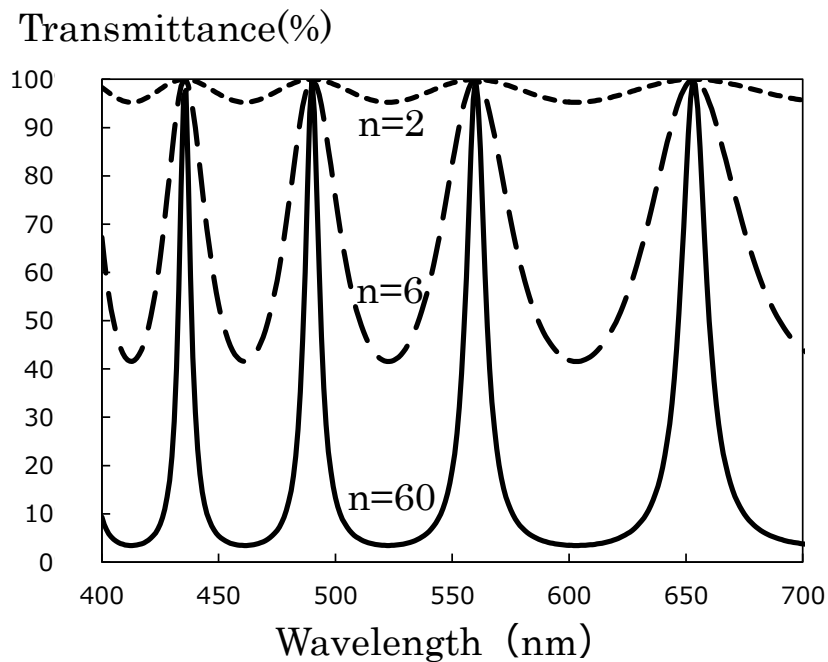


図 2-4 屈折率が 2、6、60 の材料を仮定し、それぞれの膜厚が 700nm の仮想的な単層膜の真空中での透過率を示す。透過する波長が選択的に出現していることを確認できる。

単層膜反射の原理説明のため、屈折率がそれぞれ 2、6、60 の仮想的な材料で、膜厚が 700nm の単層膜を設定した。縦軸はそれぞれの材料での真空中での透過率である。注目すべきことは透過する波長が選択的に出現していることである。すなわち、膜厚と屈折率、反射率を適切に与えることで、透過する光の波長を選択的に設計できる。撮像素子で単層膜フィルタを応用するためには、所望の透過光以外の光は不要であるため、フィルタに求められる特性は、不透過帯と透過帯の透過率の比率を高くとる必要がある。

図 2-4 では複数の透過帯のピークが出現している。撮像素子の画素フィルタに応用する場合、複数の透過帯域が存在していることは色の混色を招くため不都合である。そのため、対象とする波長域で一つの透過帯域のみを出現する特性を実現しなければならない。まず考えられる設計方法は、複数の単層膜フィルタの重ね合わせる方法である。透過帯域の間隔の異なるフィルタを用意し、透過させたい唯一の透過帯域のみを一致させていれば、対象となる波長域でひとつだけの透過帯域を実現できる。この概念を図 2-5 で示す。

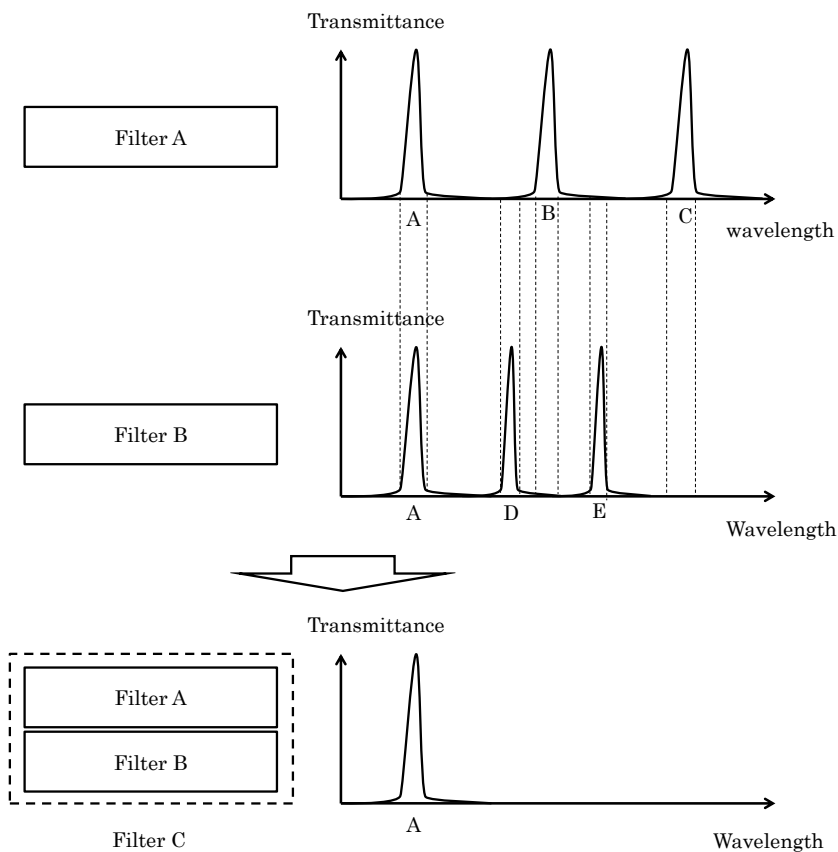


図 2-5 異なる透過率のフィルタ A とフィルタ B の組み合わせによる所望の透過率を有するフィルタ C の概念図を示す。透過率 A のみがフィルタ A とフィルタ B で一致しており、その他の透過帯 B、C、D、E は互いに不透過な帯域となっている。そのため、フィルタ A とフィルタ B を重ね合わせた場合、透過帯 A のみが実現できる

フィルタ A では透過帯域 A、B、C が、フィルタ B では透過帯域 A、D、E が存在している。そのうち、透過帯 A のみがフィルタ A とフィルタ B の透過帯として一致している。そのため、フィルタ A とフィルタ B を重ねたフィルタ C では透過帯 A のみが実現され、その他の帯域は不透過となる。このように異なるフィルタを重ね合わせることで所望の透過率だけを実現できる。

しかし、先の図 2-4 で示したように、高い透過率の透過帯域と低い透過率の不透過帯域を同時に実現するフィルタは、現実には選択が困難な高い非屈折率の材料、例えば非屈折率が 60 程度必要となる。また、異なる画素フィルタを同

一平面で実現する必要があるが、単層膜の組み合わせでは単純には実現できない。異なる透過帯を画素ごとに実現するためには、画素ごとに個別の工程を経る必要がある。カラーフィルタ工程も、マスクによりパターンニングするが、通常パターンニングの工数が増大するほど製造価格が上昇してしまう。

2-3-2 多層膜による光学フィルタ

本節では、単純な単層膜フィルタでは実現できない高い透過率と低い不透過率の光学フィルタを実現する手段として、誘電体多層膜フィルタを議論する。これは高屈折率の薄膜と低屈折率の薄膜を人工的に交互に積層することで透過帯域と不透過帯域を実現できることが知られている。このような周期的な薄膜を多層化した構造の透過特性は、光の電界と磁界の伝搬を各層での透過と反射を定義できる特性行列を用いた方法で下記にて導出する。

図 2-6 に多層膜の光伝搬モデルの説明図を示す。光の進行方向が z 軸、積層面に平行な方向を x 軸、 y 軸とし、 z 軸の原点を M_1 面とする。屈折率 n_j 、膜厚 d_j と表す。この時、前述したように単層で多重反射を繰り返す、また、多層にすることでそれぞれ進行波と後退波が相互に関係しながら干渉を繰り返す。その結果、 j 番目の層で z 軸方向へ進行する電場と後退する電場を E_{ij} 、 E_{oj} と集約できる。その結果、電場を以下の式で表現できる。

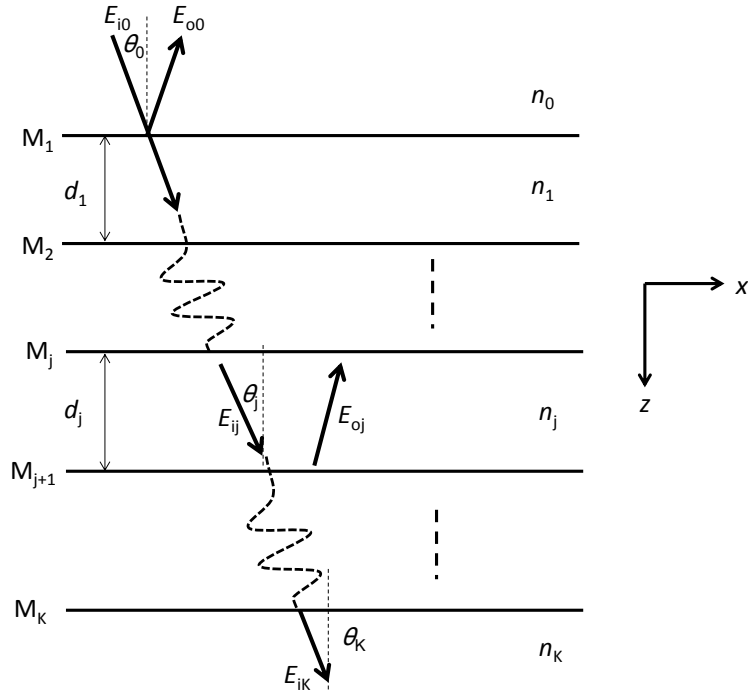


図 2-6 多層膜の光伝搬モデルの説明図。光の進行方向が z 軸、積層面に平行な方向を x 軸、 y 軸とし、 z 軸の原点を M_1 面とする。 j 番目の層での z 軸方向へ進行する方向、後退する方向の電場を E_{ij} 、 E_{oj} 、屈折率 n_j 、膜厚 d_j と表す。

$$E_{ij}(z) = E_{ij} e^{ik_0(\xi x + \zeta_j z)}$$

$$E_{oj}(z) = E_{oj} e^{ik_0(\xi x - \zeta_j z)}$$
(2-10)

ここでは、 j 番目の層での光線と光軸(z 軸)とがなす角度を θ_j とし、 $\xi = n_j \sin \theta_j$ 、 $\zeta = n_j \cos \theta_j$ としている。 x 方向は同一の膜を進行するので干渉の影響を受けない。そのため、 x が 0 の場合のみを考えても問題ない。また、 ξ はすべての j に対して成り立つ。また、 z は各層での相対座標、すなわち M_j 面を $z=0$ 、 M_{j+1} 面を $z=d_j$ として表す。

各層の境界面では電磁場の境界に対して平行成分は連続的であるため、電場、磁場それぞれの横方向の成分を e 、 h とすると s 偏光では下記の式が成り立つ。

$$e_j = E_{ij}(0) + E_{oj}(0)$$

$$h_j = \{E_{ij}(0) - E_{oj}(0)\} \cdot m_j \cdot \cos \theta_j$$
(2-11)

ここで、 $\eta_j^s = m_j \cdot \cos \theta_j$ とおき、上の式を E_{ij} 、 E_{oj} で解くと

$$E_{ij} = 0.5 \cdot \left(e_j + \frac{h_j}{\eta_j^s} \right) \quad (2-12)$$

$$E_{oj} = 0.5 \cdot \left(e_j - \frac{h_j}{\eta_j^s} \right)$$

とできる。 m_j は各層の磁場と電場の比率を表す修正光学アドミッタンスであり、各層の材料の透磁率と誘電率から決まる値である。同様に p 偏光に対しても下記の式が成り立つ。

$$e_j = \left\{ E_{ij}(0) + E_{oj}(0) \right\} \cdot \cos \theta_j \quad (2-13)$$

$$h_j = \left\{ E_{ij}(0) - E_{oj}(0) \right\} \cdot m_j$$

ここで、 $\eta_j^p = \frac{m_j}{\cos \theta_j}$ とおき、式を E_{ij} 、 E_{oj} で解くと

$$E_{ij} = \frac{1}{2 \cos \theta_j} \left(e_j + \frac{h_j}{\eta_j^p} \right) \quad (2-14)$$

$$E_{oj} = -\frac{1}{2 \cos \theta_j} \left(e_j - \frac{h_j}{\eta_j^p} \right) \quad (2-15)$$

とできる。j 番目の層を光が伝搬した時の位相変化は z 方向での光路長と波数の積で求まり、

$$\phi_j = k_0 n_j d_j \cos \theta_j \quad (2-16)$$

となる。すなわち、各層で光の進行波に関しては入射面 M_j から出射面 M_{j+1} 進む間に位相 ϕ_j 変化し、後退波に対しても同様である。これを式で表すと

$$E_{ij}(0) = e^{-i\phi_j} \cdot E_{ij}(d_j) \quad (2-17)$$

$$E_{oj}(0) = e^{i\phi_j} \cdot E_{oj}(d_j)$$

とできる。これを先に導出した e 、 h で表すと、s 偏光、p 偏光のどちらも同じ下記の式が導出できる。

$$e_j + \frac{h_j}{\eta_j} = e^{-i\phi_j} \left(e_{j+1} + \frac{h_{j+1}}{\eta_j} \right) \quad (2-18)$$

$$e_j - \frac{h_j}{\eta_j} = e^{i\phi_j} \left(e_{j+1} - \frac{h_{j+1}}{\eta_j} \right) \quad (2-19)$$

もちろん、 η_j は s 偏光と p 偏光でそれぞれ η_j^s 、 η_j^p 前出のものを使う。これを解くと、

$$\begin{pmatrix} e_j \\ h_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi_j & -\frac{i}{\eta_j} \sin \phi_j \\ -i\eta_j \sin \phi_j & \cos \phi_j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_{j+1} \\ h_{j+1} \end{pmatrix} = M_j \cdot \begin{pmatrix} e_{j+1} \\ h_{j+1} \end{pmatrix} \quad (2-20)$$

が得られる。 M_j は特性行列である。1 番目の層から最後の K 番目の層まで特性行列を積算することで、多層膜全体の特性、すなわち、入射する光の電場と磁場の変化を得ることができる。この特性行列の行列式は 1 となる。

$$\begin{pmatrix} e_1 \\ h_1 \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} e_K \\ h_K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} e_K \\ h_K \end{pmatrix} \quad (2-21)$$

$$M = M_1 M_2 \cdots M_K$$

次に、多層膜の反射率と透過率を導出する。 $E_{i0} = 1$ 、 $E_{o0} = r_s$ 、 $E_{iK} = t_s$ 、 $E_{oK} = 0$ であるので導出した特性行列と境界条件を用いて、s 偏光では、

$$1 + r_s = (M_{11} + \eta_K M_{12}) \cdot t_s \quad (2-22)$$

$$(1-r_s) = (M_{12} + \eta_K M_{12}) \cdot t_s \quad (2-23)$$

が得られる。p 偏光では、

$$(1-r_p) \cos \theta_0 = (M_{11} + \eta_K M_{12}) \cdot t_p \cos \theta_K \quad (2-24)$$

$$(1+r_p) \eta_0 \cos \theta_0 = (M_{21} + \eta_K M_{22}) \cdot t_p \cos \theta_K \quad (2-25)$$

となる。さらに、

$$\begin{aligned} \rho_s &= r_s, \tau_s = t_s \\ \rho_p &= -r_p, \tau_p = \frac{\cos \theta_K}{\cos \theta_0} t_p \end{aligned} \quad (2-26)$$

を定義すると s 偏光と p 偏光に関して、 ρ と τ は下記の同じ式に導出できる。

$$\rho = \frac{\eta_0(M_{11} + \eta_0 M_{12}) - (M_{21} + \eta_K M_{22})}{\eta_0(M_{11} + \eta_0 M_{12}) + (M_{21} + \eta_K M_{22})} \quad (2-27)$$

$$\tau = \frac{2\eta_0}{\eta_0(M_{11} + \eta_0 M_{12}) + (M_{21} + \eta_K M_{22})} \quad (2-28)$$

これより反射率 R と透過率 T が導出でき

$$R = |r|^2 = |\rho|^2 \quad (2-29)$$

$$T = \frac{M_K \text{での屈折率ベクトル } z \text{ 方向成分}}{M_0 \text{での屈折率ベクトル } z \text{ 方向成分}} \cdot |t|^2 = \frac{\eta_K}{\eta_0} \cdot |\tau|^2 \quad (2-30)$$

特に、ここでは 3 章以降の議論に必要な高屈折材料の膜と低屈折材料の膜の 2 層の膜に関して考える。その時の特性行列は下記式で計算できる。

$$\begin{aligned} M_{12} &= M_1 M_2 \\ &= \begin{pmatrix} \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \frac{\eta_2}{\eta_1} \sin \theta_1 \sin \theta_2 & -\frac{i}{\eta_1} \sin \theta_1 \cos \theta_2 - \frac{i}{\eta_2} \cos \theta_1 \sin \theta_2 \\ -i\eta_1 \sin \theta_1 \cos \theta_2 - i\eta_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 & \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \frac{\eta_1}{\eta_2} \sin \theta_1 \sin \theta_2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2-31)$$

それぞれ膜の光学膜厚が 1/4 波長である時を考える。すると、各層の入射面から出射面までの位相変化 ϕ は $2\pi/4 = \pi/2$ なる。すなわち $\cos \theta_1 = \cos \theta_2 = 0$ 、 $\sin \theta_1 = \sin \theta_2 = 1$ となり、上の特性行列は

$$M_{12} = \begin{pmatrix} -\frac{\eta_2}{\eta_1} & 0 \\ 0 & -\frac{\eta_1}{\eta_2} \end{pmatrix} \quad (2-32)$$

と対角行列となる。これを N 回繰り返す多層膜、すなわち層数が 2N ある多層膜を考えると、特性行列は下記の式に表せる。

$$M_{12}^N = \begin{pmatrix} \left(-\frac{\eta_2}{\eta_1}\right)^N & 0 \\ 0 & \left(-\frac{\eta_1}{\eta_2}\right)^N \end{pmatrix} \quad (2-33)$$

この特性行列を用い、中心波長の透過率を計算できる。

上記の式を用いることで、透過率を計算する計算機プログラムを作成できる。疑似コードを Algorithm1 に示す。この疑似コードは 2 つの計算部から構成されている。1 つ目は、多層膜の構造を決定する計算部である。層数の変数 `num_layer` を用いて、各層の材料と膜厚をそれぞれ変数 `material` と `thickness` に設定する。2 つ目は 1 つ目で定義した多層膜の構造に従って、行列式を計算し、多層膜の透過率を導出する計算部である。この例では、波長は変数 `lambda` を用いて 400nm から 1100nm まで 1nm 刻みで計算している。`TransMat` 関数は、式(2-20)を用いて行列式を演算し、`Transmittance` 関数は多層膜の透過率は式(2-30)を用いて計算する。`Transmittance` 関数は材料、膜厚、波長を引数とし、式(2-30)を用いて、多層膜の透過率を計算する。材料を指定することで実測した屈折率の波長分散の関係を読み出す。

Algorithm 1 多層膜フィルタの透過率を計算する疑似コード

Begin

//

//積層構造を決定

//

`material [0] = TiO2`

`thickness[0] = 40`

`material [1] = SiO2`

```

thickness[1] = 60
.....
material [num_layer-1] = TiO2
thickness[num_layer-1] = 40

////////////////////////////////////
//波長 400nm から 1100nm まで 1nm 毎に透過率を計算
////////////////////////////////////

for lambda = 400 to 1100 step 1 do
  //行列式を単位行列に初期化
  initialize M to identity matrix
  //全レイヤの行列式を積算
  for i=0 to num_layer-1 do
    // 式(2.20)
    M = M*TransMat(lambda,thickness[i],material[i]);
  end for
  //透過率の計算 // 式(2.30)
  Transmittance(lambda,M);
end for
end

```

上記プログラムを用い様々な検討が可能になる。例えば、屈折率 2.1 の高屈折材料と屈折率の 1.4 の低屈折材料膜の光学厚みを波長 520nm の 1/4 に設定したペア層を 2、4、6、8、10 とした時の中心波長の透過率の波長分散を計算した結果を図 2-7 に示す。

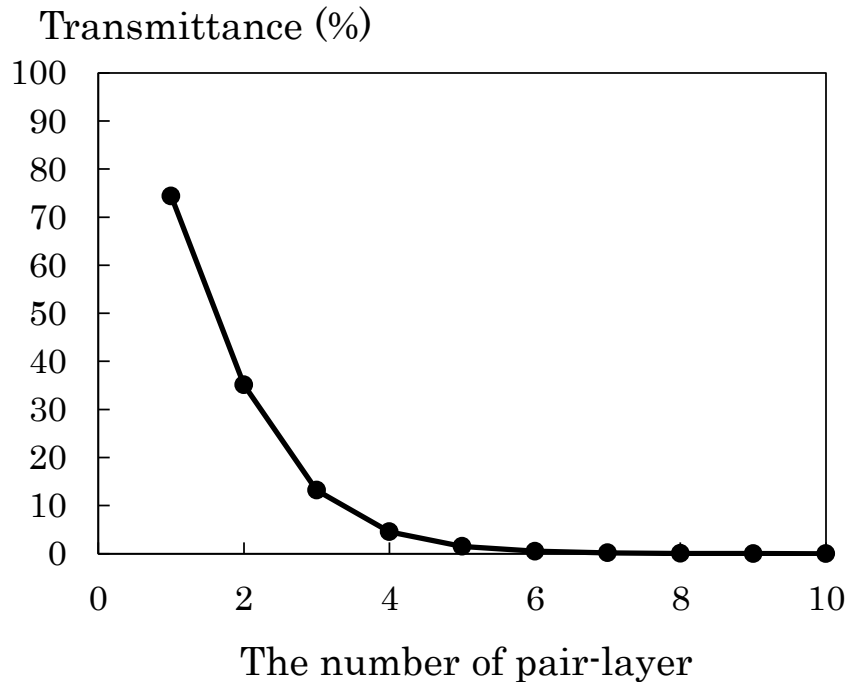


図 2-7 屈折率がそれぞれ 2.1 と 1.4 の高屈折材料と低屈折材料の薄膜の光学厚みを設定する中心波長 520nm の 1/4 に設定して重ねた 2 層の薄膜をペア層 (pair-layer) とし、そのペア層のペア数 (The number of pair-layer) を 2、4、6、8、10 とした時の中心波長の透過率のグラフ。

ペア層数を増やすと中心波長の透過率が下がっていることを確認できる。また、の透過率の波長分散に関して、先に述べたプログラムを用いると図 2-8 となる。ペア層数が少ない 2 層では透過率はどの波長も 80%程度であるが、ペア層数を 4 層以上に増やしていくと、波長 520nm を中心に不透過帯域の透過率が 0%に近づく。すなわち、先の図 2-4 で仮想的に示したような高い屈折率材料の代わりに、中心波長の 4 分の 1 の光学厚の高屈折率材料と低屈折率材料の薄膜をペア層にして積層することで透過率の低いフィルタを実現できる。図 2-8 では、どのペア層数であっても、不透過帯の透過率はペア層数で変化するが、不透過帯域幅は一定であることがわかる。この不透過帯域幅を光が存在できない帯域のことをフォトリックバンドギャップと呼ぶ。

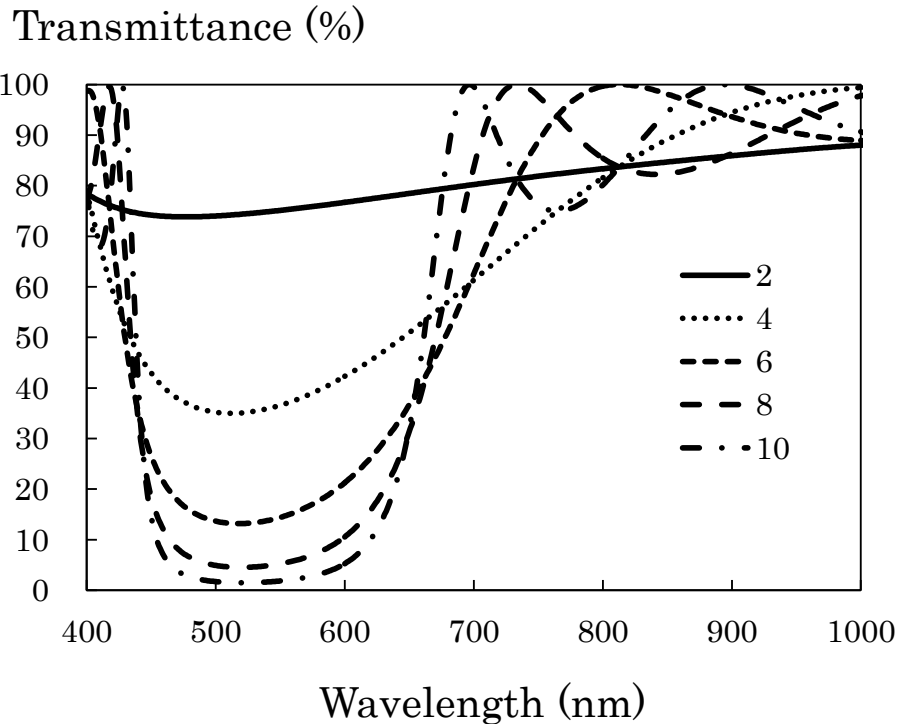


図 2-8 屈折率がそれぞれ 2.1、1.4 の高屈折材料と低屈折材料の薄膜の光学厚みを設定する中心波長 520nm の 1/4 に設定したペア層数を 2、4、6、8、10 とした時の透過率の波長分散のグラフ。

このフォトニックバンドギャップのバンド幅は構成する材料の屈折率で決定できることを以下に示す。先の式(2-16)で各層を進行した時の位相シフト量を示した。 λ_0 はフォトニックバンドギャップの中心波長とし、各層の光学厚が $\lambda_0/4$ であり、垂直入射の場合を考えることで議論を簡単化する。その時、 λ が透過波長とすると、式(2-16)は $\phi=(\pi/2)(\lambda_0/\lambda)$ となる。波数は $k_0=2\pi/\lambda_0$ である。これより透過波長が中心波長から外れると位相は $\pi/2$ から外れることがわかる。式(2-31)も加えて考察すると、透過波長が中心波長付近では、行列式 M の M_{11} 、 M_{22} の $\cos \varphi_1 \cos \theta \varphi_2$ の項は、べき乗で 0 に近づく。一方、透過波長が中心波長から外れると 1 に近づく。つまり、近似的に考えると、式(2-16)が π になることがフォトニックバンドギャップのバンド端と同義である。同時に、式(2-30)に導出した屈折率と行列式から導出される透過率の関係式で透過帯域幅が決まる。すなわち、波長と多層膜の屈折率でバンドギャップは決定される。このことを図 2-9 と図 2-10 に示す。図 2-9 は、仮想的に材料の屈折率を変化させて計算した透過率の波長分散のグラフである。図 2-10 は、図 2-9 を元に横軸が多層膜の高

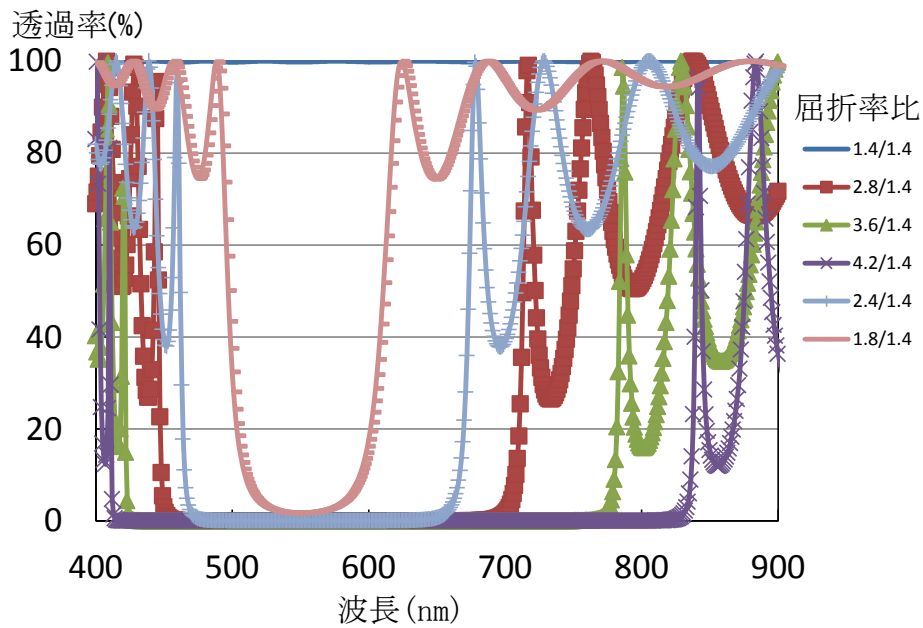


図 2-9 ペア層の材料の屈折率比をパラメータにして先述した **algorithm1** のプログラムで計算したフォトニックバンドギャップの波長分散のグラフ。

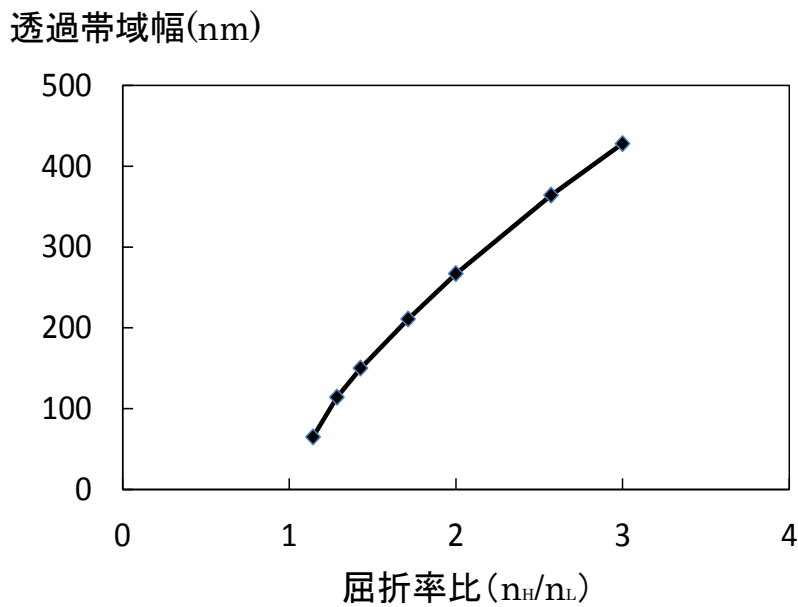


図 2-10 光学厚が $\lambda_0/4$ である高屈折率と低屈折率の薄膜のペア層が 10 層の多層膜フィルタの透過帯域幅はペア層を構成する材料の屈折率比での変化を確認できる。

屈折率材料と低屈折率材料の屈折率比、縦軸が透過帯域幅と示している。議論を簡単化するため、消衰係数は 0 とし、中心波長は 520nm とした。また、透過帯域幅の定義を透過率が 50%となる幅とした。また、高屈折率の $\lambda/4$ 膜と低屈折率の $\lambda/4$ 膜を 1 組とするペア層の数を、図 2-8 の結果から 10 程度で十分にバンド端が明確であるため、ペア層数を 10 とし上述した algorithm1 を利用して計算した。この図 2-8 より、屈折率比の大きい材料の組み合わせにより、より広いフォトニックバンドギャップが得られることを確認できる。実際は、用途や、製造上選択できる材料などの制約条件のなかで設計する。例えば、高屈折材料、低屈折材料としてそれぞれ TiO_2 、 SiO_2 を選択した場合の屈折率比は、1.7 程度となり、その時の帯域幅は 215nm となる。

以上のように、本節では不透過帯域であるフォトニックバンドギャップを多層膜フィルタで設計できることを解説した。一方、実際の撮像素子で用いるために重要なのは画素ごとに不透過帯域と透過帯域を区別することである。次の節では、画素ごとに透過帯域を区別するため、多層膜技術を応用したフォトニックカラーフィルタ技術を解説する。

2-3-3 フォトニックカラーフィルタ

上で述べたように、ある波長 λ_0 の $1/4$ の厚みの薄膜を周期的に積層することで、 λ_0 を中心とする帯域で不透過なバンドを形成できる。上記の多層膜フィルタを撮像素子に適用するためには画素毎にフィルタの透過率を設計できる必要がある。透過帯を生成するためには、例えば 2 つのバンドを掛け合わせることで可能である。しかし、そのような手法を多層膜に適用すると画素毎に膜厚の異なる多層膜を積層する必要が生じ、構造が複雑化しかつ工数が増加する。

異なる透過帯の画素間で共通の層構成が多ければ、より構造が単純化し工数が少ない。そのようなカラーフィルタを目指し、フォトニックカラーフィルタを研究開発した。前節で説明した多層膜の積層構造に加えて、その周期の乱れを起こす欠陥層を導入することで透過帯域を生成することが基本概念である。欠陥層の膜厚を画素毎変えることで、画素毎に透過率を設計でき、少ない工数

で実装が可能になる。

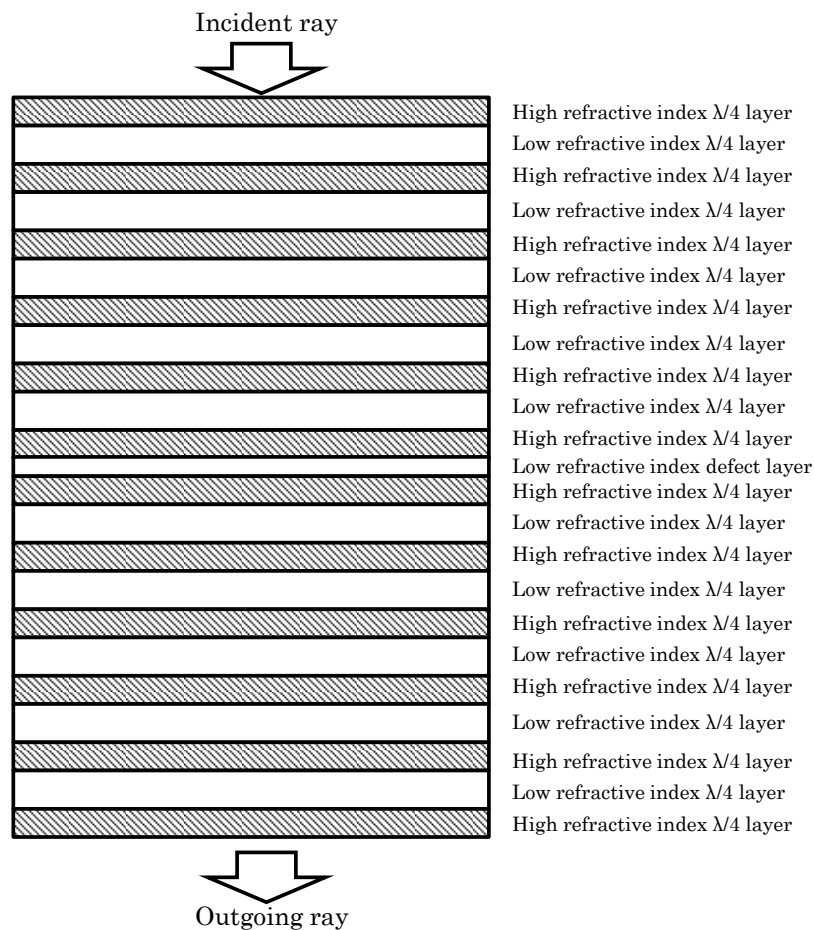


図 2-11 フォトニックカラーフィルタの構造図例。高屈折材料と低屈折材料の $\lambda/4$ 膜が周期的に積層されている。その積層構造の周期が一部乱れるような欠陥層が存在する。

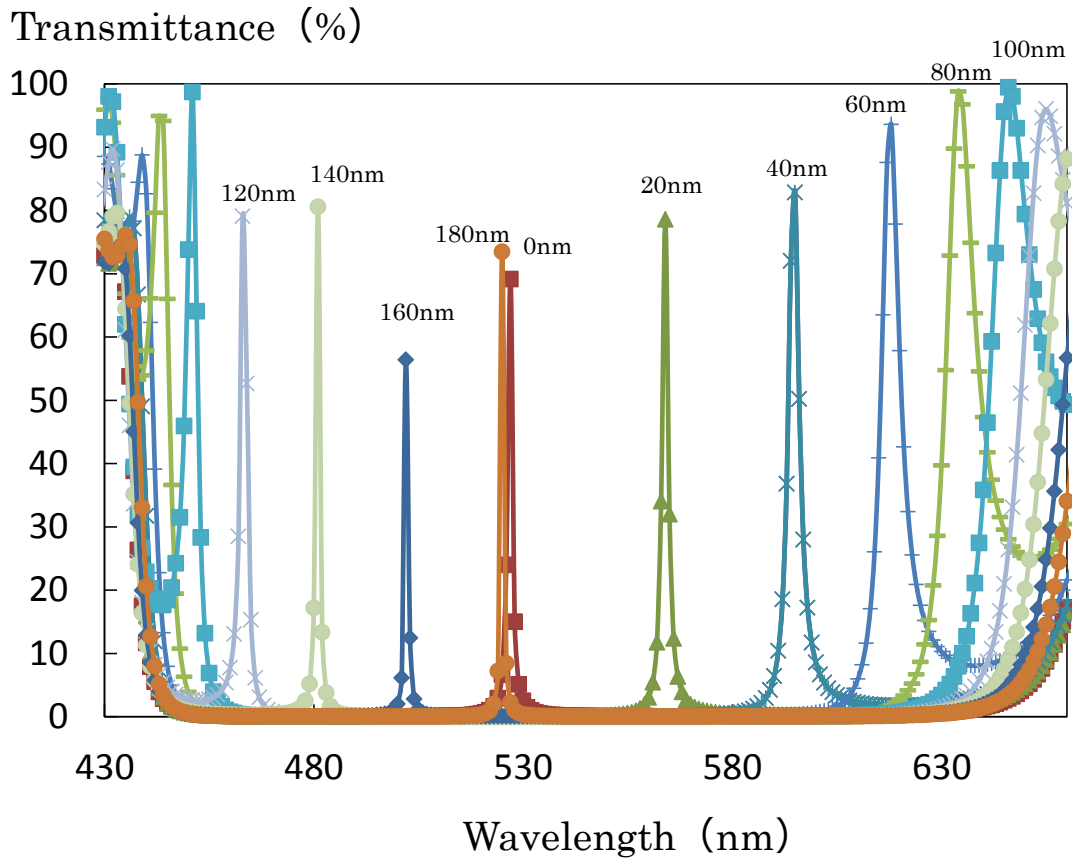


図 2-12 図 2-9 の構造のフォトニックカラーフィルタの透過帯域例。各透過帯の数字は、対応する欠陥層の膜厚を示している。欠陥層の膜厚を変えるだけで透過帯がシフトしていることを確認できる。

図 2-11 に中心波長 λ_0 を 520nm として、高屈折率の $\lambda_0/4$ 膜を 12 層、低屈折率の $\lambda_0/4$ 膜を 10 層、低屈折率の欠陥層を 1 層積層した光学フィルタの構造を示す。欠陥層の膜厚を 0nm から 180nm まで 20nm 刻みに変化させた場合の各光学フィルタの透過特性を図 2-12 に示す。欠陥層の膜厚の変化のみで透過するピーク波長を制御できていることを確認できる。本シミュレーションでの透過率は一見、低く見えている波長もあるが、シミュレーションの精度を 1nm で実施したためである。ピーク波長の出現は欠陥層に電磁場が局在していることに起因しており。局在欠陥モードと呼ばれる。図 2-13 (a)と図 2-13 (b)にそれぞれ欠陥層の光学厚みが異なる場合の透過波長の入射光の電場分布を示す。

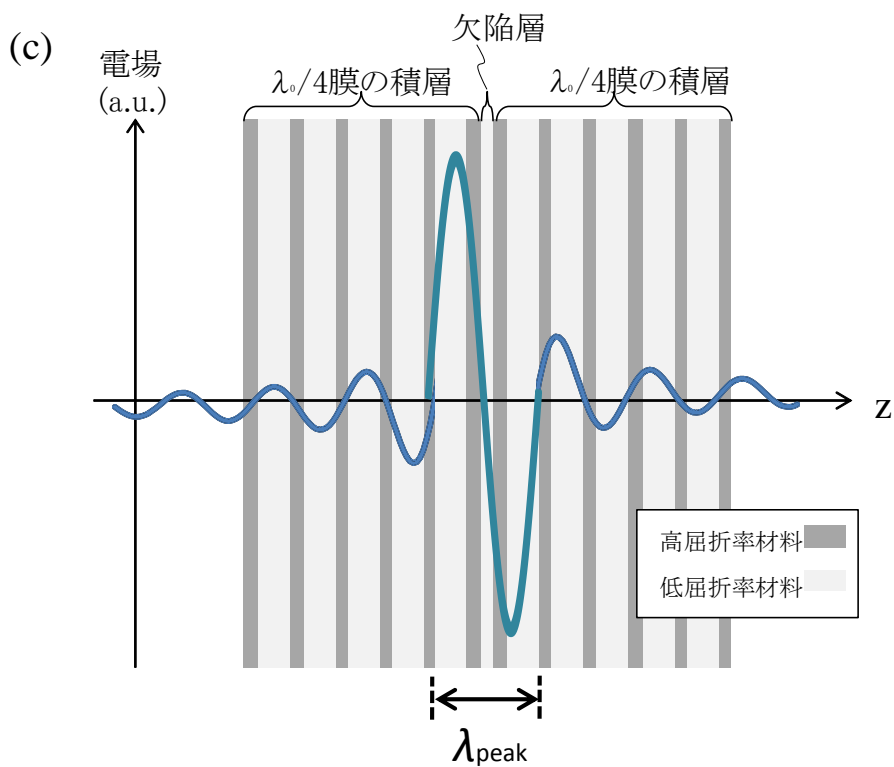
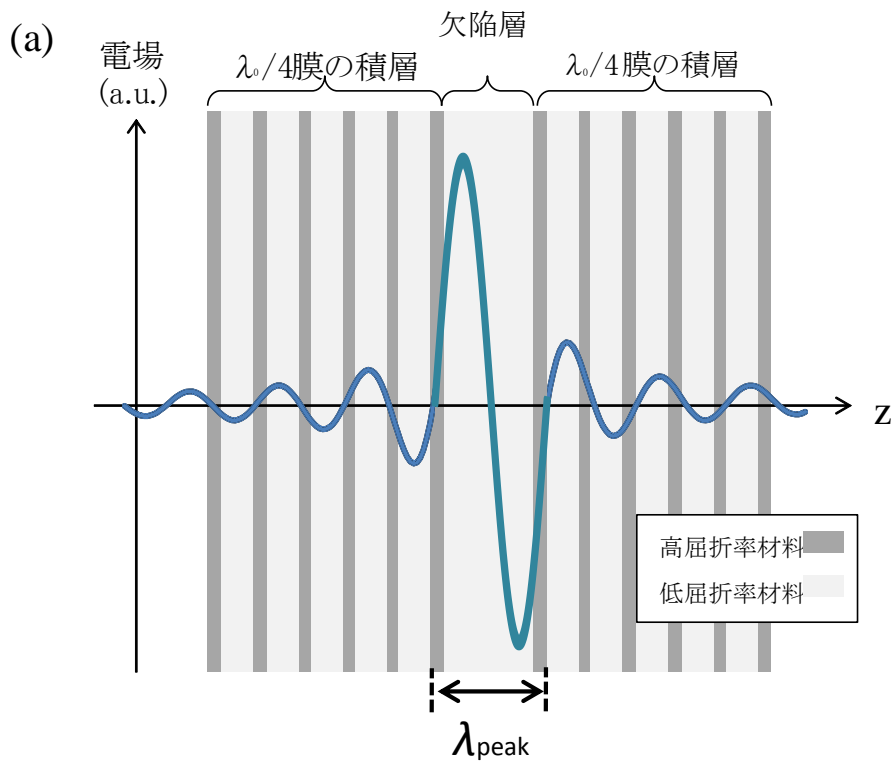


図 2-13 フォトニックフィルタの欠陥層の光学厚みの違いによる電磁波の局在モードの違いを示す概念図。(a)欠陥層の光学厚みが $\lambda_0/4$ より厚く、かつ $3\lambda_0/4$

より薄く、欠陥層と欠陥層に接する $\lambda_0/4$ 膜の 3 層で局在モードを起こす場合と、
(c) 欠陥層の光学厚みが $\lambda_0/4$ より薄く欠陥層を含む 5 層で局在モードを起こす
場合の透過帯域の波長の入射光の電場分布を示している。いずれの場合も欠陥
層付近で電場が局在している。

図 2-13 (a)は欠陥層の厚みが $\lambda_0/4$ より厚く、 $3\lambda_0/4$ より薄い場合の透過波長
の光が局在している電磁波の概念図である。欠陥層だけでは光学厚みが薄いた
め不透過帯の中に 1 波長相当の局在波は形成できない。しかし、前後の $\lambda_0/4$ 膜
の高屈折率材料の 2 層と欠陥層からなる 3 層の領域で局在波を形成する。また、
図 2-13 (b)ではさらに欠陥層の厚み薄く $\lambda_0/4$ より薄い。そのため欠陥層や接す
る層の 3 層でも 1 波長の局在波が形成できない。この場合は、さらに前後に接
する $\lambda_0/4$ 膜も含めた 5 層の領域で局在波を形成する。いずれの場合も局在波が
発生しない層では電場はほとんど存在できないが、局在波が生成する欠陥層を
含む層では入射光より強い強度の電磁波が存在できる。各層に用いる材料の消
衰係数が 0 なら、理論上、光は減衰せず局在波を形成する波長の光が透過する。
そのため、消衰係数の小さい無機材料を適切に選択すれば、透過率が低下する
有機物によるカラーフィルタと比べ、透過波長の透過率は高いフィルタを形成
できる。

次に、欠陥層の厚みと透過ピーク波長の関係について述べる。先に局在波と
は欠陥層で局在する定在波が透過帯の起源である。先で議論したような局在波
が 1 波長の場合、下記のような関係式が導出できる。

$$\lambda_{peak} = \begin{cases} n_L d_{defect} + \lambda_0 & \text{if } n_L d_{defect} < \frac{\lambda_0}{4}, \\ n_L d_{defect} + \frac{\lambda_0}{2} & \text{if } \frac{\lambda_0}{4} < n_L d_{defect} < \frac{3\lambda_0}{4}. \end{cases} \quad (2-34)$$

ここで、 n_L 、 d_{defect} はそれぞれ、低屈折材料の屈折率、欠陥層の膜厚である。
例えば欠陥層 0nm の場合は λ_{peak} が 520nm となる。また、欠陥層 180nm の場
合は λ_{peak} が 522nm となる。この結果と図 2-12 の透過ピーク波長と欠陥層の膜
厚の関係を比較すると、近似していることが確認できる。また、式(2-34)で透過
波長 λ_{peak} を設計する場合、 λ_{peak} は $3\lambda_0/4$ から $5\lambda_0/4$ の範囲で設計できる。

すなわち、 λ_0 が 520nm であれば、 λ_{peak} は 390nm から 650nm の範囲となる。また、欠陥層の光学厚は $3\lambda_0/4$ までの場合を示しているが、この膜厚までで反射帯の中に透過帯域を設計できるため、この波長範囲で十分である。ただし、正確な波長分散の透過率は `algorithm1` で示したプログラムにより計算機で計算する必要がある。

2-3-4 オンチップ波長フィルタのまとめ

以上のように、本節では特定の波長の光を透過させることのできる光学フィルタにおける光学技術を解説した。基本は単層膜へ光を入射させる場合、反射と透過に関してスネルの法則に従って計算でき、多層膜化、欠陥層を導入したフォトニックカラーフィルタまでの光学理論を示した。3章、4章では、この光学フィルタを撮像素子に応用する研究について述べていく。

2-4 オンチップレンズ

本設では、光の入射角度によって光を画素ごとに集光する従来の微小光学素子技術について解説する。

2-4-1 マイクロレンズ技術

撮像素子の各画素には光を集光するために画素サイズのマイクロレンズを搭載することが多い。これまで提案されているマイクロレンズの断面構造を図 2-14 に示す。主に 3 つに分類できる。一つ目は、物体を物理的に曲面で加工して作られる凸型マイクロレンズである。樹脂を溶かして実装したりするなど、比較的容易に製造できるため、このタイプのマイクロレンズが撮像素子に適用されていることが多い。二つ目は屈折率を位置によって変化させることで光を曲げるレンズである GRIN(Graduated Index/Gradient Index)レンズである。三つ目は、微小なフレネルレンズである。フレネルレンズは凸型レンズの高さを低くするため、凸型レンズの屈折面を分割し光の屈折のない部分を省略している。結果的に形状はリング状の構造体が同心円状に配置される。

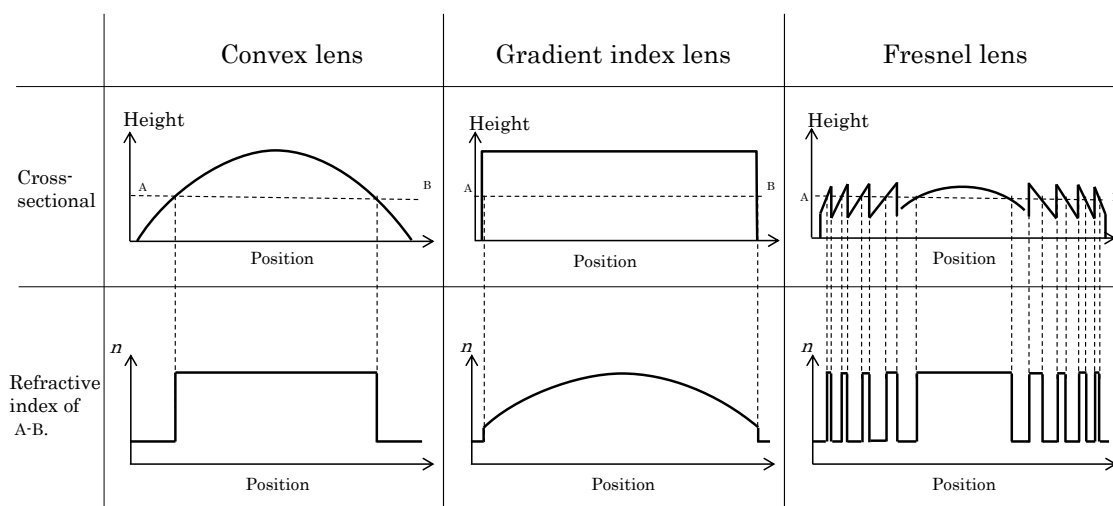


図 2-14 断面形状と断面部の屈折率分布によるレンズの分類。

上記のレンズを撮像素子に搭載した場合、それぞれに特徴がある。凸型レンズ (Convex lens) はドット状の樹脂に熱を与えて溶かし、樹脂の表面張力で球面を生成することが可能であり製造上容易である。近年はエッチングなどで整形することも多いが、撮像素子に最も用いられている。

撮像素子で光の進行方向と集光を画素ごとに制御するためには、画素ごとに独立した設計ができる必要がある。そのため、凸型レンズは、製造プロセス上、全画素が同一の形状になるため、不向きである。

屈折率分布レンズは一定の厚みの光学膜が、場所によって屈折率を変化させることで、光を屈折させることを実現する。特に、1点で焦点を結ぶレンズの場合の屈折率分布レンズの設計手法を下記に示す。まず、図 2-15 に屈折率分布レンズと光線を示す。

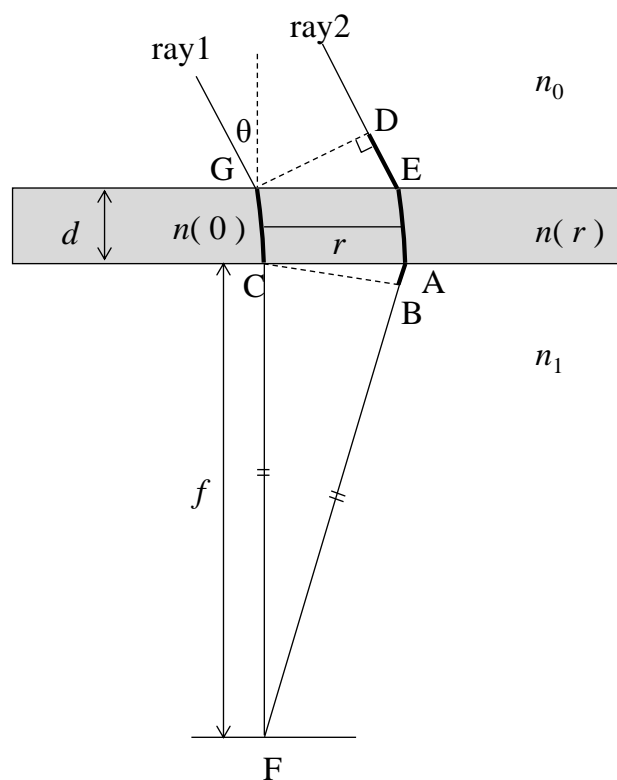


図 2-15 屈折率分布レンズと光線が屈折する様子。

光線 1(ray1)と光線 2(ray2)が F で焦点を結ぶためには、屈折率分布レンズでの

光路長の差 OP が波長の整数倍である必要がある。光路長の差 OP は

$$OP = AF + AE + DE - (CF + CG) = m\lambda_0 \quad (2-35)$$

ここで、 m は整数である。また、OP のそれぞれの項は下記のようになる。

$$AF = n_1 \sqrt{r^2 + f^2}, AE = n(r)d, DE = n_0 r \sin \theta \quad (2-36)$$

$$CF = n_1 f, CG = n(0)d$$

ここで、入射角度を θ 、入射側の屈折率、出射側の屈折率をそれぞれ n_0 、 n_1 とし、屈折率分布レンズの屈折率を座標 r に対して $n(r)$ としている。また、屈折率分布レンズは薄く、光は実質的に屈折率分布レンズ内では曲がらないと近似した。以上より、下記式が成り立つ。

$$\sqrt{r^2 + f^2} + n(r)d + n_0 r \sin \theta - \{f + n(0)d\} = m\lambda_0 \quad (2-37)$$

これより $n(r)$ は

$$\begin{aligned} n(r) &= n(0) - \frac{n_0 r}{d} \sin \theta - \frac{n_1}{d} (\sqrt{r^2 + f^2} - f) + \frac{m\lambda_0}{d} \\ &\approx n(0) - \frac{n_0 r}{d} \sin \theta - \frac{n_1}{2df} r^2 + \frac{m\lambda_0}{d} \\ &= n(0) - \frac{n_1}{2df} \left(r + \frac{n_0}{n_1} f \sin \theta \right)^2 + \frac{fn_0^2}{2dn_1} \sin^2 \theta + \frac{m\lambda_0}{d} \\ &= n_{\max} - \frac{n_1}{2df} \left(r + \frac{n_0}{n_1} f \sin \theta \right)^2 + \frac{m\lambda_0}{d} \end{aligned} \quad (2-38)$$

ここで、 $n_{\max} = n(0) + \frac{fn_0^2}{2dn_1} \sin^2 \theta$ と置いた。この $n(r)$ は図 2-16 のような屈折率分布である。

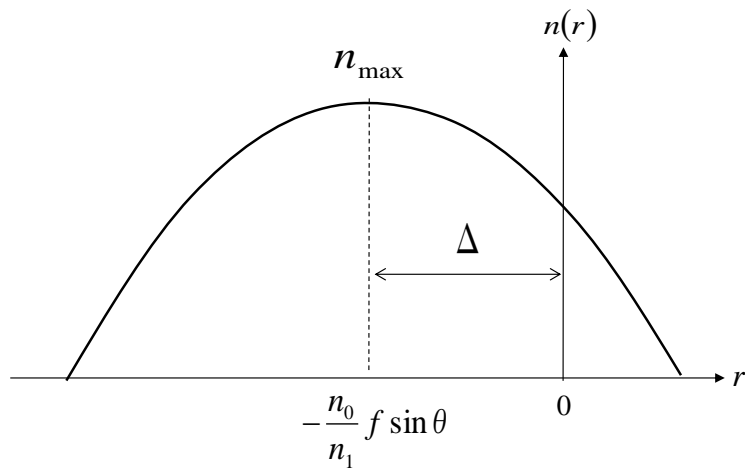


図 2-16 屈折率分布レンズの屈折率の位置 r に対する関数のグラフ。入射側の屈折率と出射側の屈折率と焦点距離 f で のずれ量を設定できる。すなわち、もし、屈折率を膜の中で自由に設定することができれば、画素単位に光の集光、屈折を設計できる。

このようなレンズを実現するために、これまで報告されている GRIN レンズの製造方法を表 2-2 にまとめた。

表 2-2 GRIN レンズの製造方法の一覧。

	製法	特徴
1	中性子照射法[7]	ボロンが多いガラスに中性子を注入することで、ボロン中心に電子を発生させ、屈折率を局所的に変える。
2	CVD(Chemical vapor deposition)法 [8]	屈折率の異なるガラスを積層し凸型屈折率を生成する。通信用の光ケーブル用としてチューブに対して行う。
3	部分多分子化法[9]	紫外線照射によって、有機単分子を部分的に多分子化し屈折率を変化させる。
4	イオン交換法[10]	ガラスをリチウムイオンが溶けた液体に浸し、拡散によって Na イオンが Li イオンと置換する。置換した部分の屈折率が変化する。

5	イオン埋め込み法[11]	特殊ガラスの層分離が細い穴を作る。後にこの穴に塩を入れる。
6	直接レーザ書き込み法 [12]	ドーズをスキヤニングスピードやレーザパワーを変えながら一点一点設計した構造を形成する

表 2-2 に示すように、様々な製造方法が提案されている。基本的に屈折率を部分的、局所的に変化させるためにイオン、中性子などを注入するか、高いエネルギーの光を照射し物質を変化させる、もしくは穴に異なる物質を埋め込むかを行っている。

上記の 1 番、4 番、5 番のような方法で、イオンや中性子をレンズ材料に注入することは、撮像素子のマイクロレンズに適用することは難しい。通常半導体への不純物注入工程は半導体基板に対して行うが、注入工程はクリーン度の高い工程である。一方、撮像素子のマイクロレンズは有機物を用いたカラーフィルタ工程の後になるため、注入機へ適用されるクリーン度の基準を満たすウェハにはならない。また半導体ウェハをリチウムイオンの溶けた溶剤に浸す場合、回路基板にまでリチウムイオンが拡散し回路動作が不安定化する可能性があり不向きである。

また、2 番の CVD 法は異なる材料の屈折率を積層するが、画素内で積層する薄膜のパターンを変えながら製造することになり、多工数及び数ナノメートル程度の位置合わせ精度が必要である。いわば 3 次元的な積層構造が必要となる。

一方、3 番、6 番の光を照射することでレンズ材料の屈折率を変える方式は、半導体回路基板にまで照射光が影響を及ぼすことは少ない。ただし、スキヤニングスピードや光パワーを変動させながら構造を作り込むため、撮像素子に適応する場合、工程の時間が長くなり不向きである。

以上のような製法で画素ごとに屈折率を変えることは、マイクロレンズ設計の自由度を飛躍的に向上させる概念では有るが、半導体素子の上に実装することは製造上いずれも現時点では技術障壁が高い。

2-4-2 デジタルマイクロレンズ

屈折率分布(GRIN : Gradient Index / Graded Index)レンズを、従来とは異なる方法で実現することが報告されている[13, 14]。デジタルマイクロレンズ(Digital Micro Lens : DML)と呼ばれるこの技術は、屈折率分布レンズでありながら、半導体プロセスで使用するリソグラフィ、ドライエッチで製造するため半導体工場で加工できる。

まず、このDMLの基本的な概念を説明する。DMLは屈折率分布レンズをフレネルレンズ化し、フレネルレンズの各微小構造を波長以下の大きさの構造物で構成する。そのため、構造物の粗密構造で実現できる。

このレンズの概念を構造の設計式で導出する。前節で述べた屈折率分布レンズの屈折率関数 $n(r)$ をさらに式変形すると、下記のようにできる。

$$\begin{aligned}
 n(r) &= n_{\max} - \frac{n_1}{2df} \left(r^2 + \frac{2n_0 r}{n_1} f \sin \theta + \frac{n_0}{n_1} f^2 \sin^2 \theta \right) + \frac{m\lambda_0}{d} \\
 &= n_{\max} - \frac{n_1}{2f} \frac{\Delta n}{\lambda_0} \left(r^2 + \frac{2n_0 r}{n_1} f \sin \theta + \frac{n_0}{n_1} f^2 \sin^2 \theta \right) + \frac{m\lambda_0}{d} \\
 &= n_{\max} + \frac{\Delta n}{2\pi} \left(-\frac{k_0 n_1}{2f} r^2 - k_0 n_0 r \sin \theta - \frac{k_0 n_0^2}{2n_1} f \sin^2 \theta \right) + \frac{m\lambda_0}{d} \\
 &= n_{\max} + \frac{\Delta n}{2\pi} (Ar^2 + Br \sin \theta + C) + \frac{m\lambda_0}{d}
 \end{aligned} \tag{2-39}$$

ここで $A = -\frac{k_0 n_1}{2f}$ とし、 $B = -k_0 n_0$ 、 $C = -\frac{k_0 n_0^2}{2n_1} f \sin^2 \theta$ と置いた。 Δn はGRIN

レンズで設定できる最小の屈折率と最大の屈折率をそれぞれ n_{\min} 、 n_{\max} とする時、 $\Delta n = n_{\max} - n_{\min}$ とする屈折率差である。 n_{\min} は適用するレンズが取りうる最小の屈折率となる。例えば、入射側が空気であれば n_{\min} は1となる。その場合、 $n(r) < n_{\min}$ の場合の屈折率は存在しない。そのため、屈折率 $n(r)$ は n_{\max} で折り返すことで、GRINレンズをフレネルレンズに擬似的に近似できる。この時、図2-17のように各ゾーンを設計するため、第 k ゾーン境界の r_k を導出する。第 k ゾーンでは m は $k-1$ となる。この時、屈折率の分布関数は

$$n(r) = n_{\max} - \frac{n_1}{2df} \left(r + \frac{n_0}{n_1} f \sin \theta \right)^2 + (k-1) \frac{\lambda_0}{d} \tag{2-40}$$

となる。ゾーン境界 $r = r_N$ で屈折率は n_{\min} となるから、

$$r_k = -\frac{n_0}{n_1} f \sin \theta \pm \sqrt{\frac{2kdf\Delta n}{n_1}} \quad (2-41)$$

となる。この式からゾーン境界 r_k は入射側と出射側の屈折率には依存するもののレンズの屈折率には依存しない。

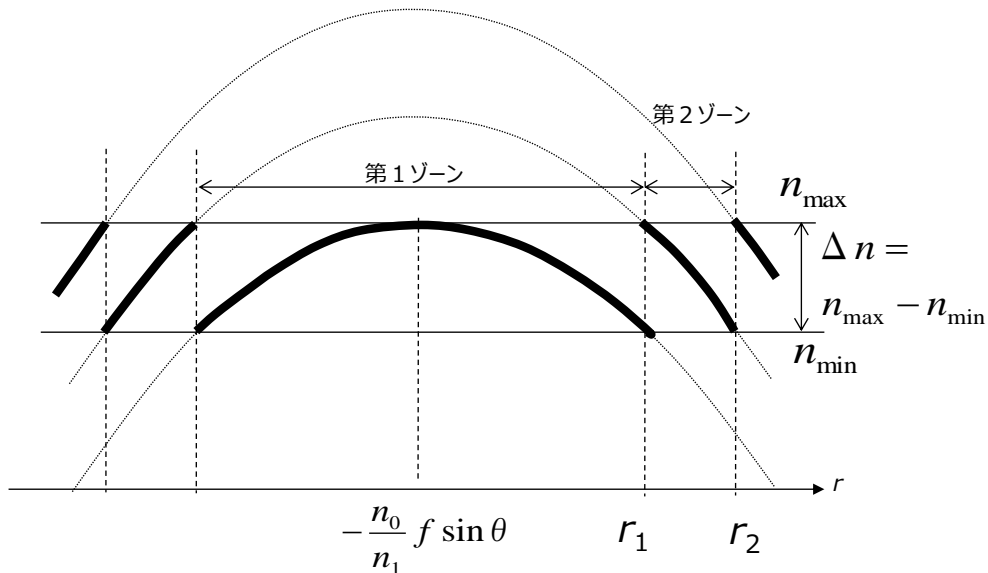


図 2-17 屈折率分布レンズをフレネルレンズ化する概念図

このように屈折率分布レンズを撮像素子に適用し画素ごとに設計すれば、設計自由度の高いオンチップ集光素子を実現できる。

2-4-3 微小レンズの光学設計

上記のような微小レンズの設計は、波長以下の大きさの構造物が光の屈折に与える影響を考慮する必要がある。光線を追跡する光学設計手法では、光の波としての挙動の回折現象を把握できない。光の波の挙動をシミュレーションする場合、FDTD法(finite-difference time-domain)を用いる。一般的にFDTD法は、空間を細かくメッシュ状に分割し、各分割区間で入出力関数を解くことで物理現象の解析が可能になる。微小レンズ設計では、光学的な構造としてメッシュ毎に材料の屈折率や消衰係数などを定義し、光の入出力を計算する。それにより、光が定義した構造をどのように伝搬するかをシミュレーションでき、

所望の性能を満たすレンズを設計できる。各分割区間のメッシュで定義した光学特性に対して、マクスウェルの方程式を解くことで、電磁場を算出できる。

電流と電荷がない空間を想定すると、マクスウェルの方程式は 6 つの単純なスカラー方程式として、直交座標系で表現できる。

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (2-42)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (2-43)$$

他の 4 式は上の 2 式に対して、x、y、z の添字が一文字ずつずれた対称な式となる。上記に示したマクスウェルの方程式では、磁界の時間変化は電界の空間変化の差分に依存しており、また逆に、電界の時間変化は磁界の空間変化の差分に依存していることを表している。すなわち、マクスウェル方程式を時間領域と空間領域の差分方程式をプログラムによりで逐次的に解くことで電磁界の過渡現象を計算できる。

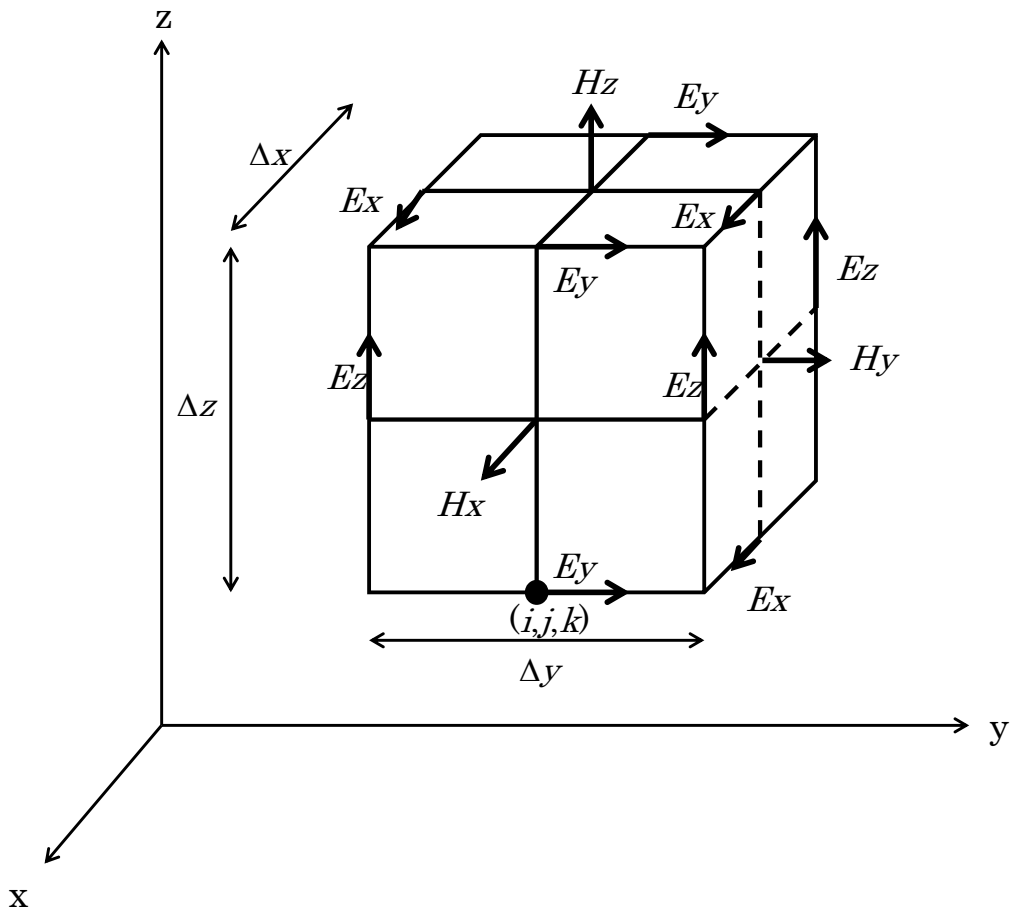


図 2-18 3次元の Yee セルを示す。 Δx 、 Δy 、 Δz はグリッド幅、 E_x 、 E_y 、 E_z はそれぞれ x 方向、 y 方向、 z 方向の電界要素、 H_x 、 H_y 、 H_z はそれぞれ x 方向、 y 方向、 z 方向の磁界要素を示している。

これらのマクスウェル方程式を解くのに最も一般的な方法は Yee が提唱したメッシュ空間に基づく [15]。各メッシュはグリッド幅の Δx 、 Δy 、 Δz で並んでいる。図 2-18 に示すように、電界成分と磁界成分は 3 次元空間でインターレース状に並んでいる。さらに、時間も Δt の離散ステップに分割し、電界成分は時刻が $t = n \Delta t$ (n : 整数) で計算され、磁界成分は時刻が $t = (n+1/2) \Delta t$ で計算される。例えば、時刻 $t = n \Delta t$ の電界は時刻 $t = (n-1) \Delta t$ の電界と空間変位から計算された追加の項、もしくは、時刻 t での磁界のローテーションが加算された量と等しい。

この方法を上記の 6 式のうちの 2 式に適用し、計算すると下記のようになる。

$$H_{x(i,j,k)}^{n+1/2} = H_{x(i,j,k)}^{n-1/2} + \frac{\Delta t}{\mu\Delta z} (E_{y(i,j,k)}^n - E_{y(i,j,k-1)}^n) - \frac{\Delta t}{\mu\Delta y} (E_{z(i,j,k)}^n - E_{z(i,j-1,k)}^n) \quad (2-44)$$

$$E_{x(i,j,k)}^{n+1} = E_{x(i,j,k)}^n + \frac{\Delta t}{\varepsilon\Delta y} (H_{y(i,j,k)}^{n+1/2} - H_{z(i,j,k)}^{n+1/2}) - \frac{\Delta t}{\varepsilon\Delta z} (H_{y(i,j,k+1)}^{n+1/2} - H_{z(i,j,k)}^{n+1/2}) \quad (2-45)$$

整数 i 、 j 、 k は整数である。これらの方程式は半グリッド単位ずつ電場と磁場がそれぞれずれながら、お互いに $\Delta t/2$ の間隔で相互に解くことができる。

上記の式を実装したソフトウェアで、例えば、図 2-19 のような構造体に対して上方から平面波が伝搬してくる場合の光の変化を計算すると、電界強度分布は図 2-20 に示すように、電界と磁界を空間のグリッド毎に時間経過させながら計算できる。本研究では FDTD 法に基づくシミュレータを本論文 5 章で微小レンズ構造の光学設計で活用した。

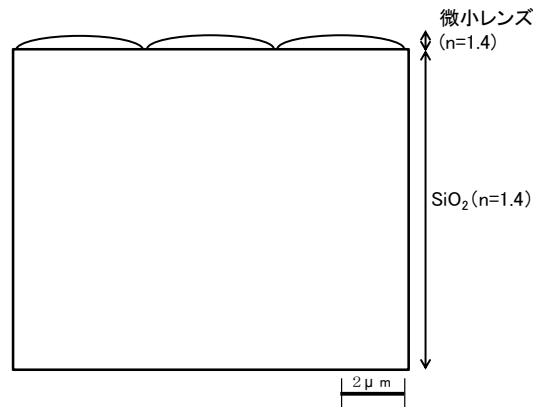


図 2-19 FDTD 法による光学シミュレーションを実施した構造。微小レンズを SiO_2 の上に搭載し光を右上面 15 度から照射する。

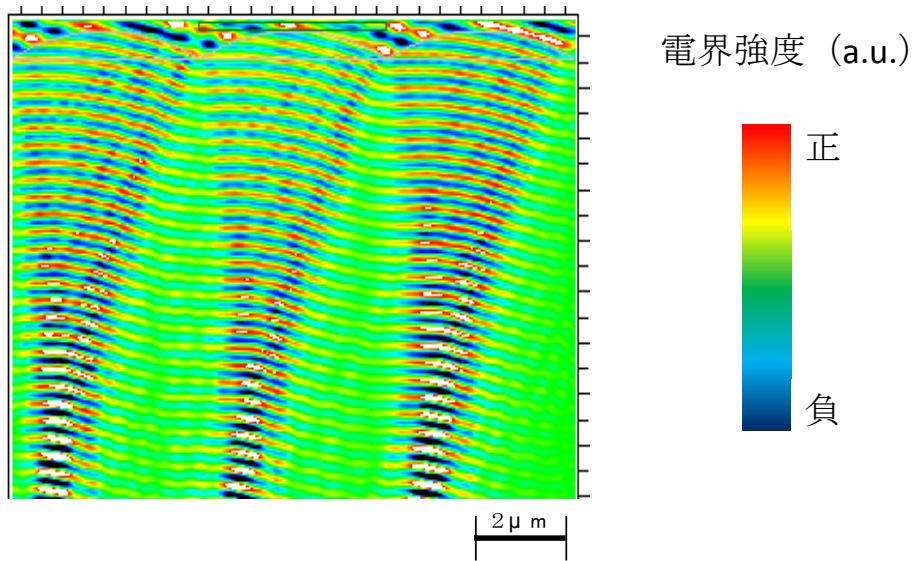


図 2-20 FDTD 法による光学シミュレーションの電界強度分布の図。この例では、微小レンズで電界が屈折し、集光している様子を確認できる。

2-4-4 オンチップレンズのまとめ

以上のように、本節では撮像素子の画素ごとに光を集光できるオンチップの微小レンズ技術を解説した。集光特性の設計はスネルの法則に従って計算できるが、詳細の計算は FDTD を用い計算する微小レンズの光学設計の考えかたを示した。5 章では、このオンチップレンズの光学設計を前提とした撮像素子に応用する研究について述べる。

2-5 結言

本章では、光の波として特徴や、カメラの多機能化するためにどのような光情報を取得可能か、次に、現在までにどのような取り組みがされてきたかを解説した。そして、特徴的な光学特性を実現する微小な光学素子として、多層膜フィルタとその応用の可能性に関して議論した。

また、現在までに組み込まれてきた微小レンズの特徴や、その光学素子の設計を支える光学的な議論や、実際に以降の章で用いたシミュレーション技術に関して述べた。

以上の議論を前提に、次章以降では、新たに提案した微小光学素子を撮像素子に実装し、新しい多機能化を実現した研究取り組みについて述べる。

参考文献

- [1] J. C. Maxwell, "A treatise on electricity and magnetism," Oxford: Clarendon Press. pp. 360–366, 1873.
- [2] B. E. Bayer, "Color imaging array," 米国特許, no. 3971065, 1976.
- [3] Y. Miyake, Y. Yokoyama, N. Tsumura, H. Haneishi, K. Miyata, and J. Hayashi, "Development of multiband color imaging systems for recordings of art paintings," Electronic Imaging'99, International Society for Optics and Photonics, 1998.
- [4] R. Ng, M. Levoy, M. Bredif, G. Duval, M. Horowitz, and P. Hanrahan, "Light field photography with a hand-held plenoptic camera," Comput. Sci. Tech. Report 2. 11, 2005.
- [5] R. Ng, M. Levoy, G. Duval, M. Horowitz, and P. Hanrahan, "Light Field Photography with a Hand-held Plenoptic Camera," Informational, pp. 1–11, 2005.
- [6] Y. Inaba, M. Kasano, K. Tanaka, and T. Yamaguchi, "Degradation-free MOS image sensor with photonic crystal color filter," Electron Device Letters, IEEE , vol.27, no.6 pp. 457-459, June 2006.
- [7] P. Sinai, "Correction of Optical Aberrations by Neutron Irradiation," Appl. Opt., vol. 10, pp. 99-104, 1971.
- [8] D. B. Keck, and R. Olshansky, "Optical Waveguide Having Optimal Index Gradient," 米国特許, no. 3904268, 1975.
- [9] R. S. Moore, "Plastic optical element having refractive index gradient," 米国特許, no. 3718383, 1973.
- [10] J. R. Hensler, "Method of Producing a Refractive Index Gradient in Glass," 米国特許, no. 3873408, 1975.
- [11] R. K. Mohr, J. A. Wilder, P. B. Macedo, and P. K. Gupta, "Gradient Index Lenses by the Molecular Stuffing Process," Tech. Dig. on Gradient Index Optical Imaging Systems (Paper WA1), Optical Society of America, 1979.

- [12] A. Žukauskas, I. Matulaitienė, D. Paipulas, G. Niaura, M. Malinauskas, and R. Gadonas, "Tuning the refractive index in 3D direct laser writing lithography: towards GRIN microoptics," *Laser Photon. Rev.*, vol. 9, no. 6, pp. 706–712, 2015.
- [13] K. Toshikiyo, T. Yogo, M. Ishii, K. Yamanaka, T. Matsuno, K. Onozawa, and T. Yamaguchi, "A MOS Image Sensor with Microlenses Built by Sub-Wavelength Patterning," *Dig. Tech. Pap. IEEE Int. Solid State Circuits Conf.*, 2007.
- [14] K. Onozawa, K. Toshikiyo, T. Yogo, M. Ishii, K. Yamanaka, T. Matsuno, D. Ueda, "A MOS image sensor with a digital-microlens," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 55, no. 4, pp. 986-991, 2008.
- [15] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 14, no. 3, pp. 302–307, 1966.

第3章 可視光／近赤外光を同時に撮像する撮像素子

本章では無機材料からなる薄膜を多層化したフォトニックカラーフィルタを設計し、オンチップの微小光学素子として応用することで、可視光と近赤外光を同時に撮像できる撮像素子を研究開発した成果について記す。

撮像素子に実装する分光フィルタであるフォトニックカラーフィルタを設計、製造、評価した。撮像素子に実装したそのフォトニックカラーフィルタは、従来のカラー撮像素子に搭載されている3原色の色フィルタの赤フィルタ(R)、緑フィルタ(G)、青フィルタ(B)に加え、新たに近赤外光だけを透過する近赤外フィルタ(IR)を追加する画素構成である。この可視光と近赤外光のフィルタを同一撮像素子に搭載することで、従来カメラで実装されている可視光と近赤外光を機械的にフィルタ切替する方式から、信頼性の高いメカレスで切り替えることが可能になり、機械故障の可能性が低減できる。そのため、本撮像素子に適した新しい信号処理を開発した。電子的にRGB信号からIR信号を減算処理する信号演算で色再現の劣化を抑えながら、昼間には可視画像、夜間では近赤外画像を提供する。赤信号、緑信号、青信号に含まれる近赤外成分は演算の前後でそれぞれ25%、21%、50%から9%、4%、21%にまで低減した。

また、屋外で使用した場合、太陽光によるカラーフィルタの透過特性の劣化が従来の有機材料のカラーフィルタでは発生する。オンチップのRGB-IRフィルタは無機材料の薄膜で構成されるフォトニックカラーフィルタで製造された。そのため、非常に信頼性も高く、耐光性がある良好な結果を得た。

3-1 緒言

可視光のみならず近赤外光を同時に撮像するモーションセンシング用の撮像素子がゲーム用途などで商品化されている[1]。この用途では、図 3-1 に示すように、可視光カメラと近赤外カメラをそれぞれ別々に用意し可視光と近赤外光の画像をそれぞれ取得する。そのため、カメラが 2 台必要になり装置のサイズやコストが大きくなる。また、それぞれの画像を重畳する場合、カメラの位置が異なるため、視差ずれなどを補正する必要もある。



図 3-1 製品化されているモーションセンシング用デバイス[1, 15]

また、テロや治安の悪化などの社会情勢に対応するため安全・安心への意識が高まってきており、監視カメラの需要が増えている。車載カメラのように、常時、屋外で用いるカメラの需要も増えている[2-5]。このような用途では昼や夜といった照明状況件が異なっても撮像できることが重要である。通常のカメラでは夜間はフラッシュ光を照射することで夜間の画像をとることが多いが、監視カメラやでは、住宅地や商業施設など露骨な監視を意図しない目的のため、可視光照明が使用できないような環境があり、夜間は不可視の近赤外光を照射して近赤外面像を撮像することが求められることがある。また、車載カメラでは対向車の運転手に対して、眩光とにならないようにする必要がある。そのため、

昼間では可視光が撮像でき、夜間ではアクティブに光源から近赤外光を照射し近赤外光画像を撮像するカメラの必要がある。

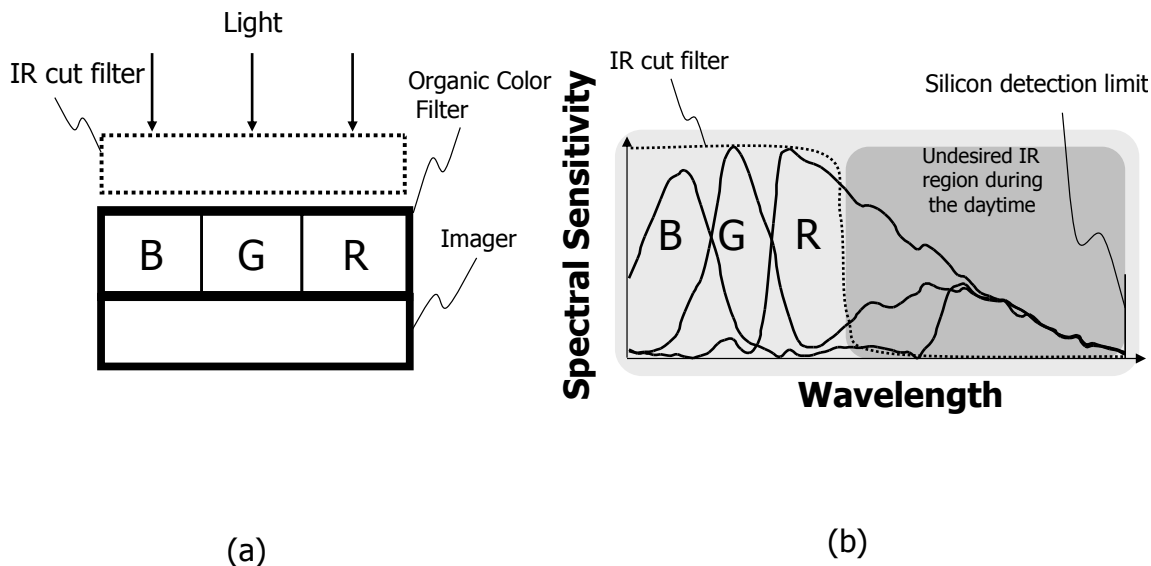


図 3-2 (a) IR カットフィルタを用いた従来のカメラシステムと、 (b) IR カットフィルタにより近赤外成分を除去して得られる分光特性の概念図。[14]

上述したような可視光と近赤外を両方撮像できる従来カメラの構成を図 3-2 (a)に示す。この従来の昼夜兼用のカメラでは、近赤外光を不透過にし、可視光だけを透過させる IR カットフィルタを RGB フィルタが実装された撮像素子の前面に備える。また図 3-2 (b)には、従来の有機顔料のカラーフィルタをベイヤー配列で実装するシリコンで製造された撮像素子の感度の波長分散のグラフを示す[6]。RGB フィルタへの入射光は各色フィルタに対応する波長帯の光のみ選択的に透過し色分離される。RGB の光はシリコンの量子効率に従い、電子に変換され、単結晶のシリコンのバンドギャップ 1.1eV で決まる波長 1100nm より短い波長の入射光を検出する。つまり、波長ごとの感度は RGB フィルタの透過率とシリコンの量子効率の積で決定される。本章と次章で対象とする受光素子の材料はシリコンであるため、近赤外光とは約 700nm から 1100nm の光のことをいうことにする。この波長帯域の近赤外光は監視カメラや車載カメラで暗闇をみるために近赤外光を発光する光源デバイスと組み合わせて使われる。

昼間では、光源は太陽になる。太陽から発する光は黒体放射に近似され、シリコンの撮像素子が受光できる可視光、近赤外光といった波長帯域を包含する波長領域で光を発する。そのため、**RGB** 画素には可視光と同時に近赤外光も入射する。可視光の **RGB** 信号は近赤外光がノイズ信号となり正しい可視光の色信号にはならない。純粋な **RGB** 信号を回復するために、**RGB** 信号を劣化させる近赤外光成分は取り除く必要がある。従来、撮像素子とレンズの間に **IR** カットフィルタを取り付け、近赤外光成分を除去することが一般的である。結果的に、図 3-2 (b)の実線で示すように、可視光のみ撮像素子に入射される。このようにして、従来の撮像素子は **RGB** のベイヤー配列のオンチップフィルタと外部の **IR** カットフィルタを組み合わせている。

夜間では、屋外で用いられるカメラでは光源で近赤外光を照らす [2]。車載カメラでは不可視な近赤外光を用いることで、対向車のドライバに対して自車のヘッドライトの眩光が無く遠方まで照らすナイトビジョンが可能になる。また、監視カメラでは光源に可視光を用いるとカメラの存在が疎まれる場合もあるが、不可視な近赤外光の利用によりさりげない監視が可能になる。従来のカメラでは機械的に **IR** カットフィルタを撮像素子の前面に挿入したり外したりして昼と夜を切り替える。

上で述べたように、昼夜兼用で使えるカメラを実現するために、カメラシステムは昼と夜の状況に応じて機械的に **IR** カットフィルタの挿入、または、脱着を選択する必要がある。この構成では、長期間使用し、繰返し脱着・挿入を繰り返すことで、機械的な劣化が発生するため長期間使用するには信頼性が課題となる [7]。

本章では、**IR** カットフィルタを機械的に脱着すること無く、信頼性の高いカメラシステムを実現するために、昼夜兼用で撮像できる **MOS** 型撮像素子を研究した。3-2 節で、フォトニックカラーフィルタ (**Photonic Color Filter : PCF**) 技術を用いて、近赤外光だけを透過する画素フィルタと従来の可視光を透過する **RGB** とフィルタに追加して実現する撮像素子について述べる。**PCF** の基本概念は前章で説明した通り、屈折率材料の周期構造で形成するフォトニックバンドギャップに透過すべき波長に対応する色フィルタごとに異なる「欠陥」層を

挿入することで実現できる[8]。PCFを用いることで、IR透過フィルタと同時にRGB透過フィルタの「透過」フィルタと「遮断」フィルタを同時に構成できることを説明する。また、3-3節で上記の画素構成で昼間のカラー画像と夜間の白黒画像を出力する信号処理について述べる。3-4節で試作工程について、3-5節で試作した撮像素子を用いた実験結果についてそれぞれ示す。3-6節では、今後の技術進化に関して考察し、最後に本章をまとめる。

3-2 フォトニックカラーフィルタを用いた可視光と近赤外光を 同時撮像する画素構成

可視光を透過する RGB 画素ともう一つ画素の近赤外光だけを透過する IR 画素を図 3-3 (a)に示す。この画素構成を用いることで、昼間は図 3-3 (b)に示すように、RGB 成分は RGB 画素の信号から IR 画素の信号を差分することで計算できる。その結果、IR カットフィルタは昼間不要となる。

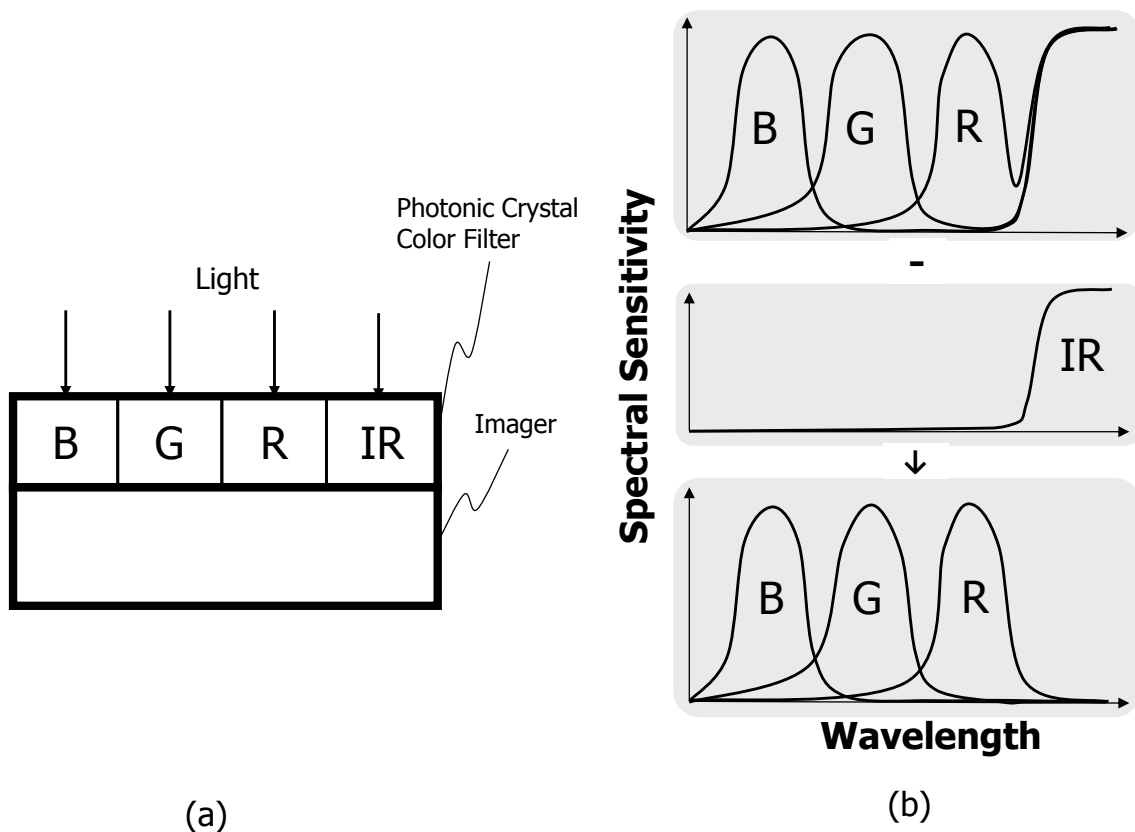


図 3-3 (a) IR カットフィルタの無いカメラシステム (本研究)、(b) 近赤外成分を差分することでカラー撮像することを可能にした分光特性の演算の概念図。
[14]

IR 透過フィルタを含んだこの画素構成を実現するために、フォトニックカラ

ーフィルタ(PCF)で MOS 型撮像素子のオンチップフィルタとして実装した。1 次元の PCF は高屈折率の材料と低屈折率の材料を光学的な厚みが $\lambda_0/4$ 層 (λ_0 : 中心波長)で周期的に繰り返すことで、 λ_0 を中心とする不透過帯域を形成できる。 λ_0 を可視光に設定すると、可視光領域を遮断し近赤外光のみを透過する IR 透過帯が生成できる(図 3-4 (a)、図 3-4 (b))。

通常が多層膜フィルタは外部光学素子などとして、撮像素子全面に適用されるフィルタとして使用するため、撮像素子の全画素で同じ波長しか透過できない。そのため、用途が限定される。撮像素子の画素ごとに透過する光の波長を制御する画素フィルタは、画素毎に固有のフィルタを搭載する必要がある。従来から用いられてきている一般的な画素フィルタは、半導体マスクによって、顔料や染料などの材料を画素毎のパターンで搭載する。例えば、可視光のカラー画像を撮像するカメラでは光の三原色である青、緑、赤の光か、または、補色であるシアン、マゼンタ、イエローの光を受光するために 3 種類のフィルタを備えている。しかし、顔料や染料といった材料で透過波長、吸収波長が決まるため、細かい波長設計を行うためには材料設計からする必要があるため、細かい波長制御には向かないという性質もある。

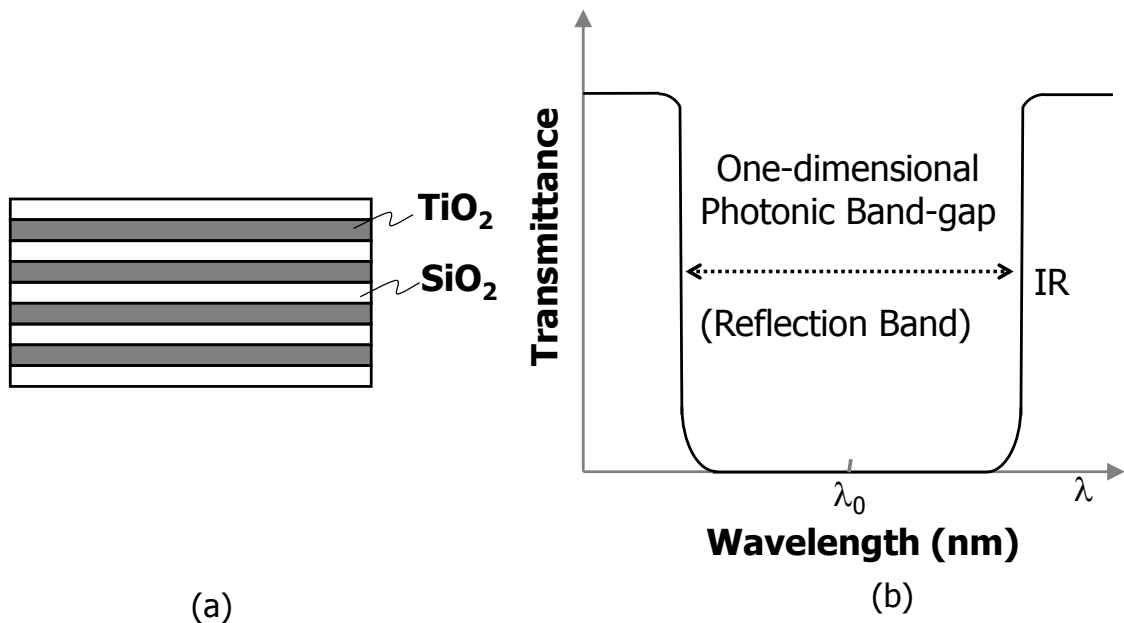


図 3-4 (a) SiO₂ 層と TiO₂ 層を交互に積層した 1 次元のフォトニック結晶の断面図と、(b) そのフォトニック結晶の透過帯を示す。[14]

本章で想定する用途は、可視光に加えて近赤外光(IR)の撮像を同時に行うことを目的とする。IR 透過帯域と同時に、禁止帯域の中に 3 つの可視透過帯の RGB 帯域を生成するため、各色の PCF にはそれぞれに対応する欠陥層を導入した。欠陥層により、周期構造に局所的な乱れを起こし禁止帯の中に透過帯域を生成できる[8]。各欠陥層の膜厚を調整することで、設計する波長の透過帯域である R+IR、G+IR、B+IR を容易に生成できる。図 3-5 (a) 、図 3-5 (b)は PCF の断面図と、R+IR 画素、 G+IR 画素、 B+IR 画素の透過帯域を示す。RGB の色分離を実現するために、フォトニック結晶の中の欠陥層として作用する中心の低屈折率材料が図 3-5 (a)に示されている。R、G、B の透過帯域は単純に各欠陥層の膜厚を変更するだけで形成される。

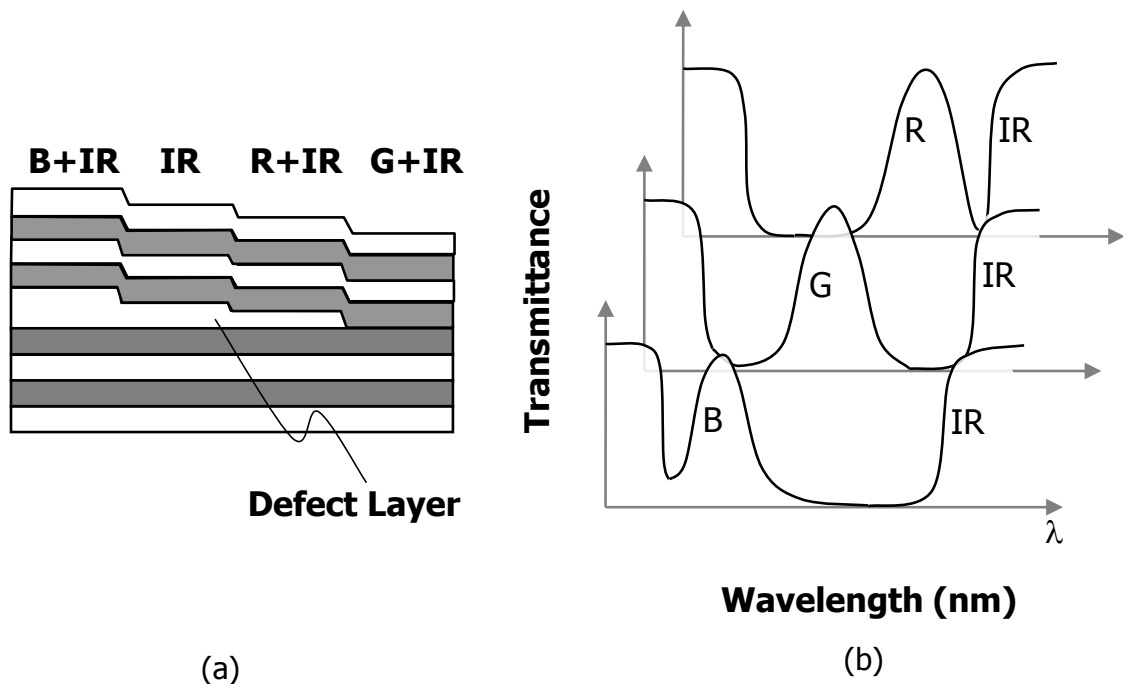


図 3-5 (a) 1次元のフォトニック結晶に欠陥層を導入することで、各画素で固有の透過スペクトルを実現するフォトニックフィルタの層構造の概念図と (b) そのフォトニックフィルタの各画素での透過スペクトルの概念図を示す。[14]

PCF のデバイス構造のスケーリングの限界に関して以下で予測する。 PCF の透過帯域のスペクトルは膜厚に依存する。これはセルサイズが縮小するとき、PCF の膜厚を薄くする必要がないが、画素サイズのみを小さくする必要がある。加えて、PCF は無機材料を多層化するため、半導体プロセスの範囲内で製造される技術である。そのため、セルサイズは半導体プロセス技術の進化がある限り微細化できる。異なる画素間の違いは欠陥層の膜厚のみであり、RGB+IR の画素構成では最大 133nm の差である。そのため、画素のセルサイズが $1 \mu\text{m}^2$ のサイズに微細化したとしても、隣接画素との厚み段差はセルサイズに対し数%程度と許容可能なレベルにあり、微細化も本質的に可能と推定する。

しかし、PCF の透過スペクトルは膜厚に依存するため、入射光の入射角度によって透過帯域が影響される。斜めに光が PCF に入射するとき、垂直な入射光に比べて光路長が長くなる。そのため、原理的に、PCF の透過帯域は入射角度で変化する。しかし、開口の大きな F#1.4 のレンズでも入射角度範囲は $\pm 20^\circ$

であり、それぞれのフィルタのピーク波長は **5nm** 程度しかシフトしないので人間の眼には無視できる程度である。また、仮にその **5nm** を許容できないカメラ仕様であれば、例えば、デジタルマイクロレンズのような斜入射光を垂直に屈折させる微小レンズ技術と組み合わせ、波長シフトの課題を解決できる。

3-3 近赤外光信号成分の減算による信号処理

RGB 光と IR 光の信号分離を実現するため、本研究の PCF を用いた撮像素子に対する新たな信号処理を研究した。図 3-6 (a)と図 3-6 (b)でその信号処理と撮像素子の撮像原理を説明する。カメラシステムで用いられる撮像素子の画像配列は R+IR 画素、G+IR 画素、B+IR 画素、IR 画素で構成される。各 R+IR 画素、G+IR 画素、B+IR 画素、IR 画素の上の PCF はそれぞれ赤色と近赤外光、緑色と近赤外光、青色と近赤外光、近赤外光のみが透過するように設計した。

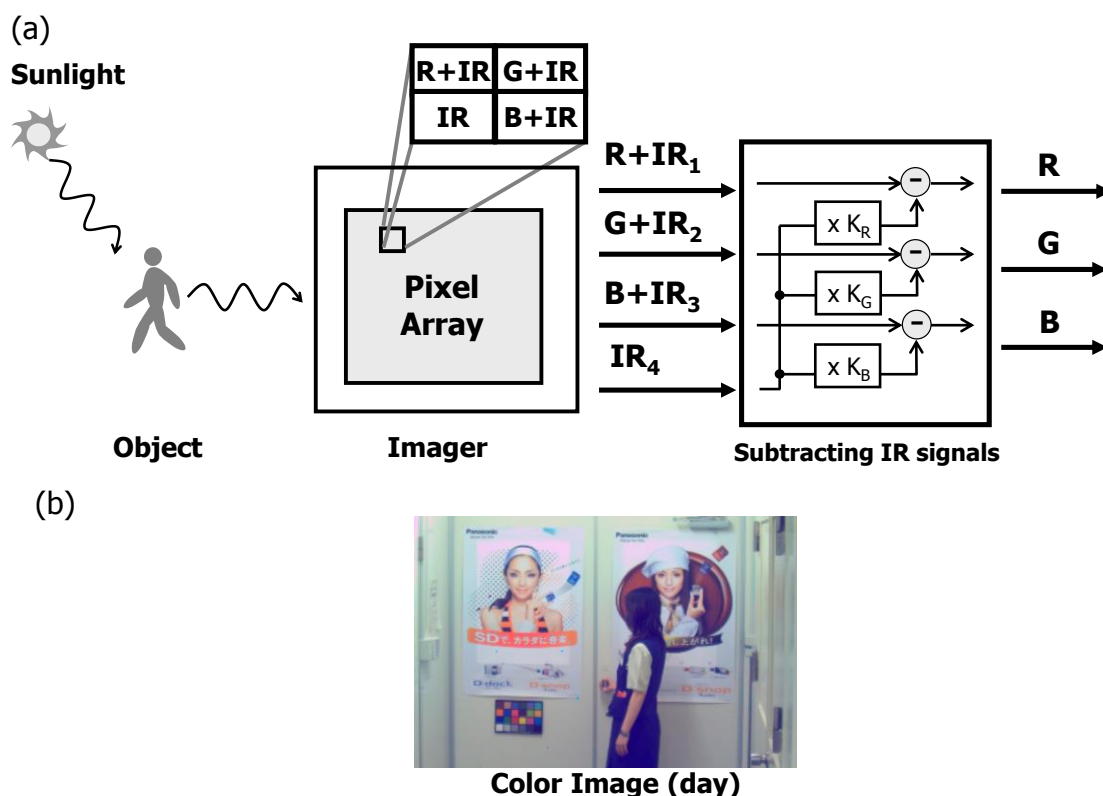


図 3-6 IR カットフィルタがないカメラで、昼間に近赤外光の信号成分を除去することでカラー撮像が可能になる利用シーンを示す。(a) 青画素、緑画素、赤画素のカラー画素で近赤外が透過するが、近赤外画素の信号を調整し差分することでカラー画像を撮像できる。(b) 撮像したカラー画像の一例を示す。[14]

昼間では、撮像素子は比率で重み付けした近赤外成分を可視光画素から差分

することで可視光のカラー画像を得ることができる。重みの掛かった係数である K_R 、 K_G 、 K_B は IR 除去画像が自然なカラー画像になるように調整する。ただし、近赤外光が極端に含まれる低色温度の照明下では K_R 、 K_G 、 K_B の不整合は生成された画像で正しく色再現しない。近赤外成分を可視光信号から差分すると同時に、カラーフィルタの分光特性を補正する 3×3 行列も実施することでより正確な色再現が可能になる。最適な色再現のために行列式は実測した撮像素子の PCF の分光データと理想とする分光データの差分の二乗の積分が最小になるように決定する。照明の色温度が変化しても、近赤外成分を差分した後、 3×3 行列により色補正することで、適切に自然な色を実現する。

画素補間は従来画素構成のベイヤー配列と異なる。ベイヤー配列では人間の視感度が高い G 画素の比率を高めるため、 2×2 画素を単位画素とし、G 画素が対角に 2 画素、B 画素、R 画素が対角に各 1 画素で構成されている。その上で各画素に RGB 信号が線形法などで予測し各画素で欠落した色信号を画素補間する。結果、全画素で RGB 信号を生成する。その時、人間の目に影響の大きい G 画素の解像度が高い。一方、本方式では 4 画素単位の中に G 画素が 1 画素のため、G 画素の解像度は B 画素、R 画素と同じであるが、例えば 2 倍の画素数になれば同等の解像度になる。多画素化してきた撮像素子を使う上では影響は軽微である。また、G 画素の感度は 2 画素から 1 画素で半減しているが、信号処理で G 出力を 2 倍することで自然な可視画像を出力できる。

可視光画素の出力に含まれる近赤外成分が差分されるため、信号量は減少する。このため可視光信号に対するノイズ成分が増加してしまう。それゆえ、例えば、入力光が弱いような夕暮れなどのシーンの場合、差分後の信号は非常に小さい。その結果、ノイズに対する信号の比率(signal-to-noise ratio : SNR)は劣化する。一方、入力光が十分ある日中のシーンの場合、近赤外成分を差分した後の可視光信号は十分大きい。結果的に、SNR の劣化は小さい。

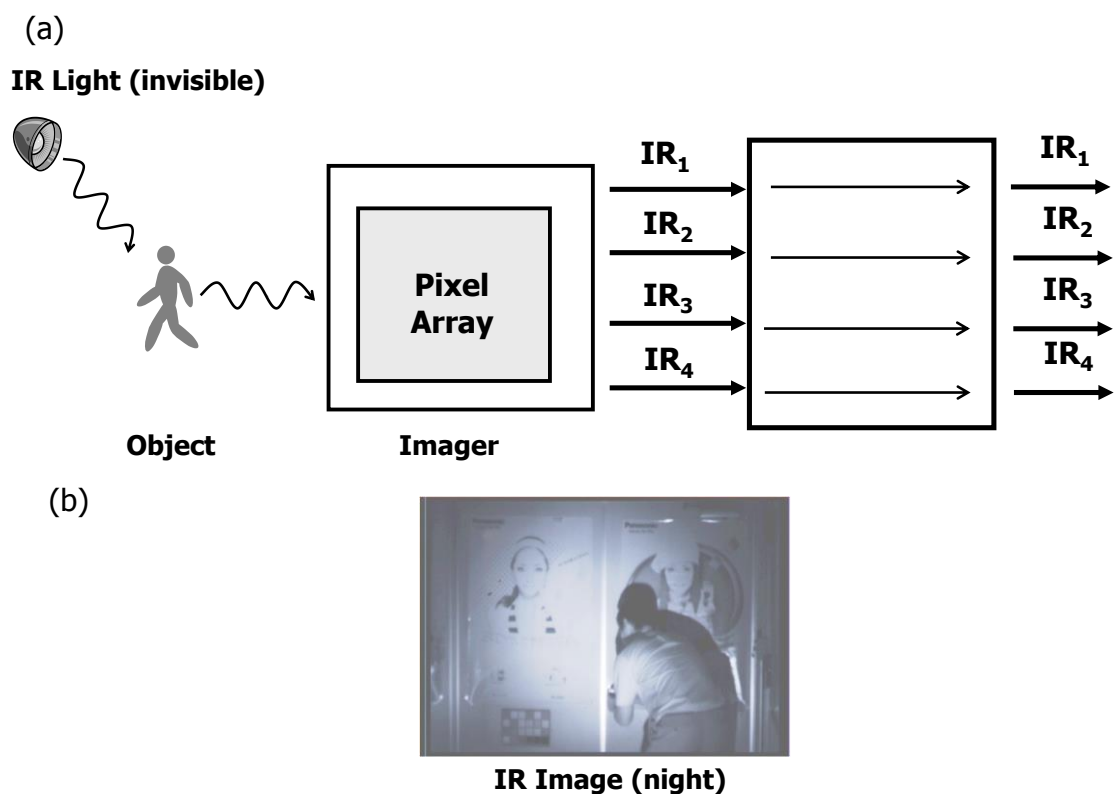


図 3-7 IR カットフィルタがないカメラで夜間に近赤外光を照射することで暗視撮像する利用シーンを示す。(a) 全画素で近赤外が透過するので高感度かつ高解像度で撮像できる。(b) 撮像した近赤外画像の一例を示す。[14]

それに対して、夜間の場合、カメラシステムは照明と同期して近赤外画像が適用される。そのため、近赤外画像は単純に全画素の近赤外成分を主成分として出力できる。これはこのカメラシステムは図 3-7 (a)と図 3-7 (b)で示されるように IR カットフィルタが除外されているから可能になる。近赤外信号は RGB 画素に入射する近赤外成分を用いることができるので、昼間のカラー画像と同じ解像度の画像である。

それゆえ、十分明るい昼間の間では SNR が大きい可視画像を撮像できる。一方、暗い夕方のシーンでは低い SNR の画像を防ぐため近赤外モードにカメラシステムで切り替える必要がある。

3-4 試作

フォトリソカラーフィルタの各薄膜層の形成の積層プロセスに、スパッタリング(図 3-8)を用いた。チャンバーを真空にし、 SiO_2 、 TiO_2 のターゲットを設置し、高電界を印加したアルゴン原子を衝突させターゲットの表面の原子を弾き飛ばす。弾き飛ばされたターゲットの原子は、基板上に形成される。成膜レートは、約数秒に1nmの膜厚を蒸着できるので、今回設計するナノメートルオーダーの膜厚制御も高精度に制御することが可能である。



図 3-8 多層膜生成を実現するスパッタ装置

3-5 実験

3-2 節で述べたフォトニックカラーフィルタ(PCF)の機能を実現するため、図 3-9 に示すように、PCF を MOS 撮像素子の上に実装した。試作した撮像素子の画素サイズは $5.6\mu\text{m}^2$ で、画素数は 640 (H) x 480 (V)、光学サイズは 1/4 インチである。図 3-9 (a)の中心には撮像領域の上方から見た時のチップ写真と、拡大したカラーフィルタの写真を示す。従来の RGB のベイヤーパターンを変更した本画素配列で、可視光と近赤外光の両方の撮像に対応できるように R+IR、G+IR、B+IR、IR 画素で構成していることを確認できる。

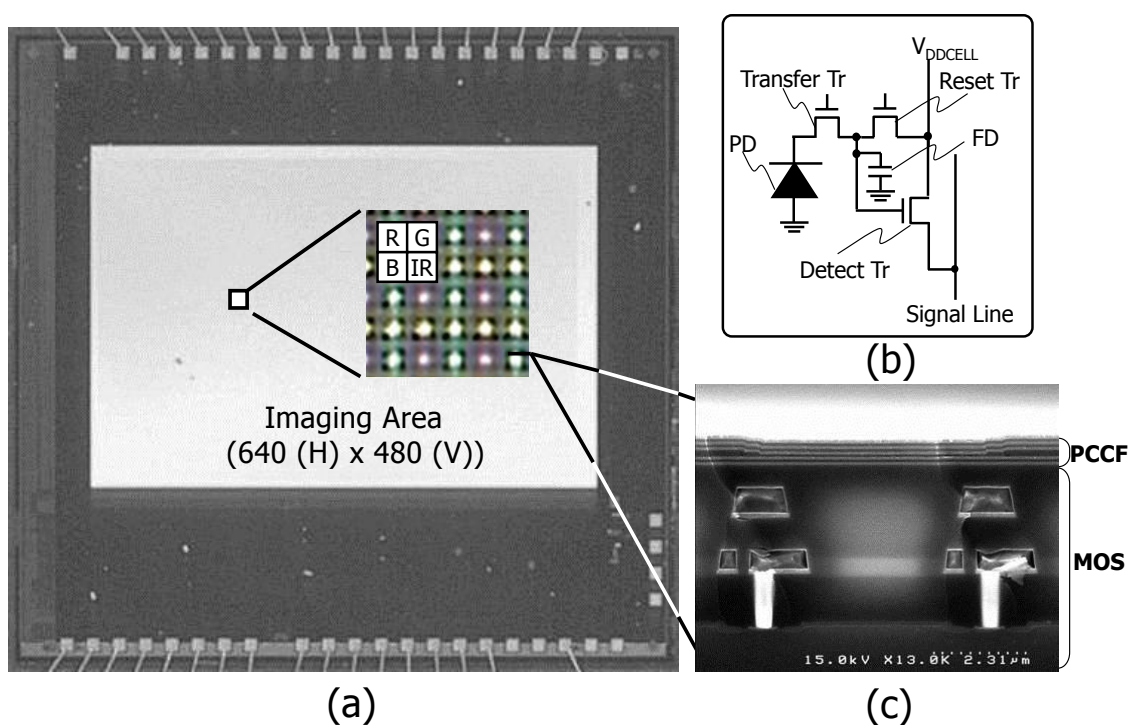


図 3-9 (a) 試作したチップ上面写真、(b) 画素の回路図、(c) PCF を集積化した画素構造の断面図を示す。[14]

図 3-9 (b)はリセットトランジスタ、転送トランジスタ、ソースフォロワトランジスタの3つのトランジスタで構成する画素回路を示している[10]。読み出し動作は下記のように行う。まず、VDDCELL ノードがグラウンドから電源電圧

VDD に駆動される。次に、フローティングディフュージョンノード(FD)が VDD になるようにリセットトランジスタをパルスで駆動する。次に転送トランジスタをオンすることでフォトダイオード(PD)に溜まった電荷を FD へ転送する。次に、ソースフォロワトランジスタで FD の電圧を信号線へ出力する。信号読み出しの後、リセットトランジスタを再びオンする。その後、VDDCELL は VDD の電圧値からグラウンドに落ちることで FD をグラウンドレベルに設定する。結果的に 3 つのトランジスタで構成されるセル回路の構造によって、高い 50% を超える開口比を確保した。27000 個の飽和電子数、フレームレート 30fps を実現した。

試作した撮像素子の断面 SEM 画像を図 3-9 (c)に示すように、PCF を MOS 撮像素子の最上面に集積した。十分に広い禁止帯を持つ 1 次元のフォトニック結晶を実現するため、 TiO_2 と SiO_2 をそれぞれ高屈折材料と低屈折材料として用いた。想定する波長域では、 TiO_2 、 SiO_2 の屈折率はそれぞれ 2.5、1.4 程度である。中心波長 λ_0 は 520nm とし、層数は 8、 $\lambda_0/4$ 膜の膜厚は TiO_2 、 SiO_2 でそれぞれ 52nm、91 nm である。 SiO_2 の欠陥層の膜厚は R 画素、G 画素、B 画素、IR 画素でそれぞれ 30nm、0nm、133nm、91nm である。欠陥層以外の膜構成と膜厚は画素によらず同じであるため、製造工程は複雑化しない。また、作製した MOS 撮像素子の仕様一覧を表 3-1 にまとめた。

表 3-1 撮像素子の仕様一覧。[14]

Pixel size		5.6 μm x 5.6 μm
Color filter	Pixel color	Red, Green, Blue, Near Infrared
	Principle	Photonic Crystal
	Material	TiO ₂ , SiO ₂
	Layers	9
	Thickness of TiO ₂ layer	52 nm
	Thickness of SiO ₂ layer	91 nm
	Thickness of defect SiO ₂ layer	30 nm (Red), 0 nm (Green), 133 nm (Blue), 91 nm (Near Infrared)
	Color lifetime	> 200,000 hours
	Heat resistance	> 300 °C
The number of pixels		640 (H) x 480 (V)
Saturation signal of a photodiode		27,000 electrons
Dynamic range of daytime imaging @6500K		63 dB
Dynamic range of nighttime imaging		65 dB
Frame rate		30 fps
Power supply voltage		3.3 V

図 3-10 に、PCF を集積化した MOS 撮像素子の実測した分光感度特性を示す。ハロゲンランプからの光を分光器で波長毎の光に分解し各波長の感度特性を試作した撮像素子で測定した。ハロゲンランプからの光をすべての波長で同じ強度となる白色光として光の強度を規格化するため、光強度計で測定した各波長の光強度で撮像素子からの出力電圧を除算した。各画素の最大感度で規格化した波長感度特性をプロットした。設計通りの R、G、B、IR 画素の分光特性を得ることができた。R 画素と G 画素の近赤外透過帯域は IR 画素の透過帯域より狭いのは、PCF がプロセスを単純化するために、わずか 8 層のみで構成されているからである。B 画素の IR 帯域は PCF の禁止帯の端から理想的に透過帯になっている。昼間の画像から IR 成分を除去するためには、IR 信号の差分と 3 x 3 行列による信号処理を実施する。計算後のスペクトルを図 3-11 に示す。R 画素と G 画素は完全に IR 成分が除去できている。また、各 RGB 信号は IR 減算後に 3 x 3 の行列演算を実施しているため、各透過帯域で本来不要な混色成分は減少できているが、同時に信号成分の透過帯域は狭くなっている。一方、

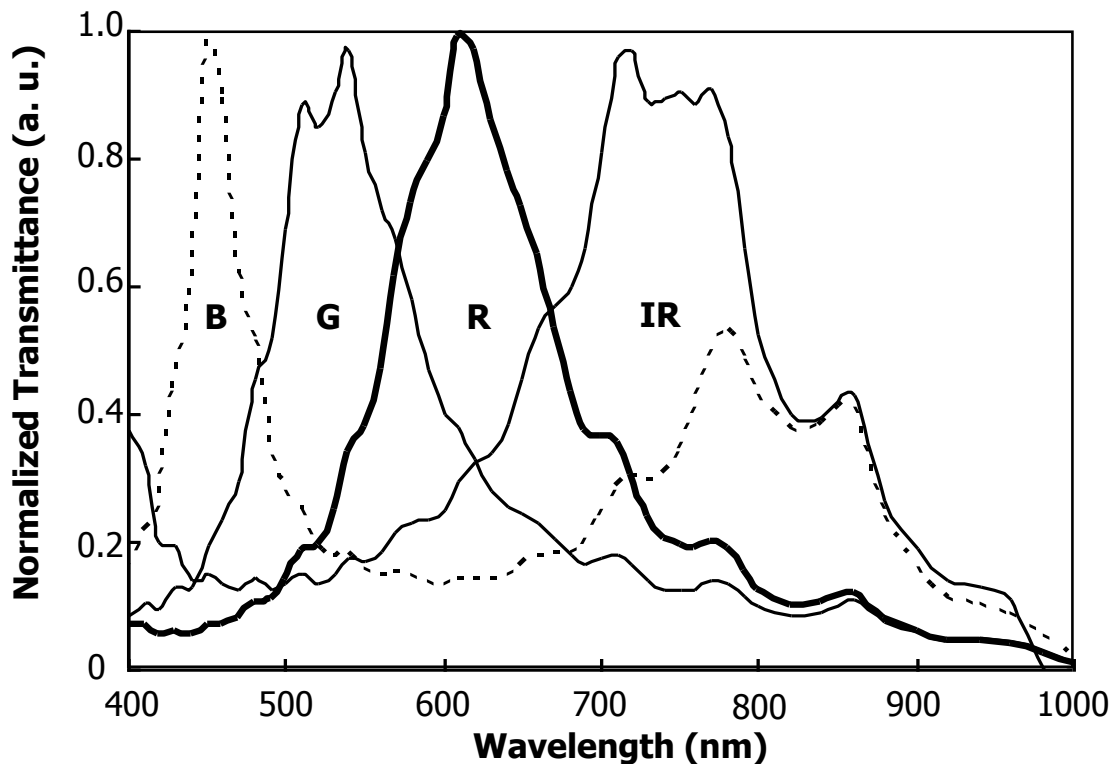


図 3-10 試作した撮像素子を実測した分光感度。[14]

B 画素は一部 IR 成分が残っている。結果的に、R 画素、G 画素、B 画素の IR 成分はそれぞれ 25%、21%、50%から 9%、4%、21%に低減できる。

試作した撮像素子を組み込んだ評価カメラで撮像したカラーチャートの画像を図 3-12 (a)に示す。この図には 3-3 節で述べた IR 成分を除去する処理は適用していない。画像全体で各色に IR 成分が含まれているため色彩的にくすんでいる。一方、図 3-12 (b)では、IR 成分を除去したカラーチャート画像を示す。IR 成分の差分処理は R 画素と G 画素で原理的に成功しているが、B 画素では IR 成分を完全に取り除ききれないため、B 画素は完全に正しい色を再現できない。例えば、緑のパッチの B 信号には IR 成分が少し残り、マゼンタのパッチの B 信号は IR 成分として差分されてしまっている。これは PCF の製造工程を単純化するために、少ない層数の 8 層で PCF を構成では近赤外透過帯がシフトすることに起因する。層数を増やすことでこのシフトは低減される。

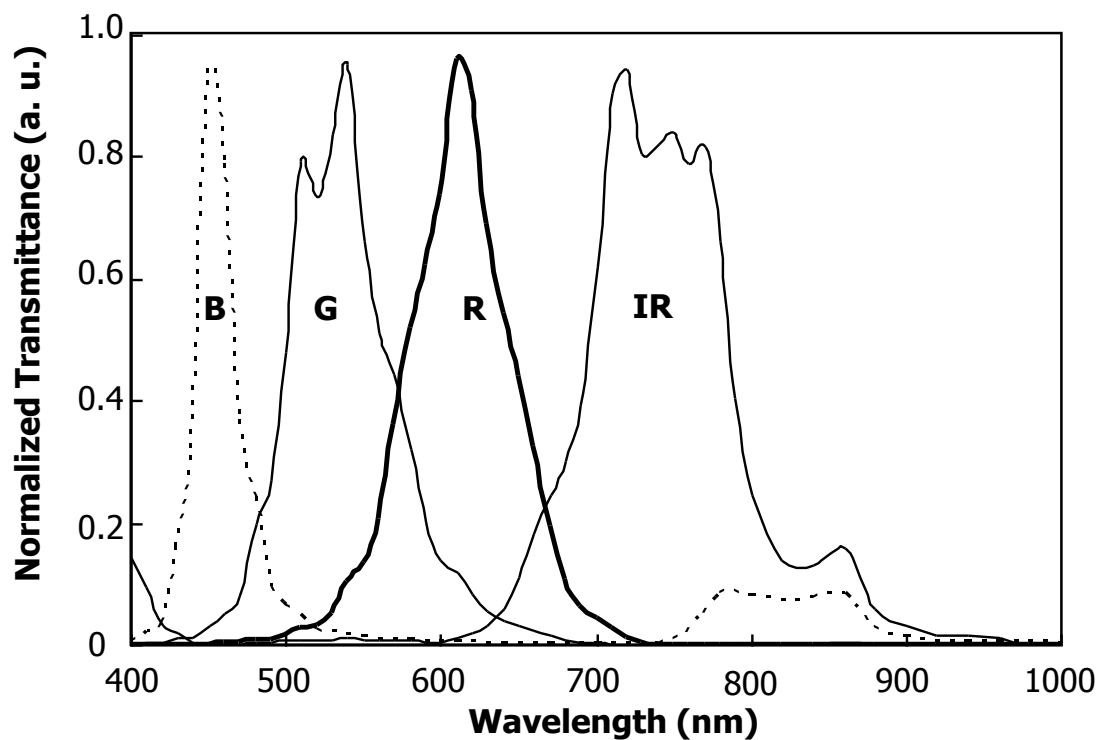


図 3-11 補正した分光感度。[14]



図 3-12 (a) 撮像した可視光と近赤外光が混ざった生画像、(b) 近赤外の信号成分を差分することで色再現したカラー画像の結果を示す。[14]

色再現の評価に加えて、差分処理の影響に関して以下に述べる。3-3 節で述べたように差分処理を適用する時の光強度に SNR が大きく影響を受ける。その影響を評価するために、IR 減算処理した画像と IR カットフィルタを用いた従来

の IR 成分の無い画像を比較した。一般的に光強度を正確にパラメータとして制御することは難しい。そのため、光量を調整する代わりに、撮像素子の電子シャッター機能を用いて電荷を蓄積する時間を光量評価と等価として 1ms から 16ms まで制御し評価画像を撮像した。光源は 20000lux で色温度は約 5000K の照明を用いた。IR 成分を減算した後の信号の分散(σ_{sub})は IR カットフィルタを用いた従来画像の信号の分散(σ_{conv})に比べて 1.7 倍大きくなった。一方、露光時間が 2 倍になると σ_{sub} と σ_{conv} は約 70 % に減少した。まとめると、IR 成分の減算処理は画素値の分散を大きくするが、十分光量の大きい昼間では画素値の分散が小さくなるので実用上問題にならない。また、近赤外光は可視光に比べて吸収係数が低いため、近赤外光が光電変換されるフォトダイオードの深さは可視光に比べて深い。そのため、基板に深く侵入し光電変換する光が隣接画素と混じり合う混色の影響は、可視光より近赤外光が多い。今回の撮像素子では画素サイズが $5.6\mu\text{m}$ と入射光の波長に対し十分大きいため、今回の撮像画像では実質的な影響はなかった。

夜間では、近赤外線検知機能を持つ多くの監視カメラは近赤外投光機を備えている。不可視照明を用いる用途の波長は 700nm から 1100nm なので、波長が 850nm の光を発光する照明が使われる。特に、照明の光の波長の半値幅(FWHM)は 50nm で、消費電流はバイアス電圧が 12V で 130 mA であった。

LED の発光ピーク波長のエネルギーはシリコンが感度を持つ検出限界に近いので、撮像した IR 画像の SNR は少し悪い。それに対して、全画素の IR 帯域は IR 光を検出でき、IR 画像の解像度は従来の撮像素子で取得する画像と同じである。差分処理が適用されるので、差分後の信号量はオリジナルの信号量に比べて小さい。しかし、飽和電子数が 27000 電子と大きいため、信号差分後の信号量は十分大きい。もし、より小さな画素に差分処理が適用された場合、飽和電子数を増加させることが差信号を増加させるための重要な取り組みになる。

加えて、試作した撮像素子上の PCF が無機材料で構成されている。従来のカラーフィルタは有機物からなる顔料で構成されている。そのため、20 万時間を超える色の耐久性も図 3-13 に示すように実現できた。エージングテストは強度の高い紫外線を放射するメタルハライド照明を用いた。紫外線の強度は 300

MJ/m²/year である。この照明を用いると照射時間 70 時間が太陽光照明の 8600 時間すなわち 1 年に相当する。

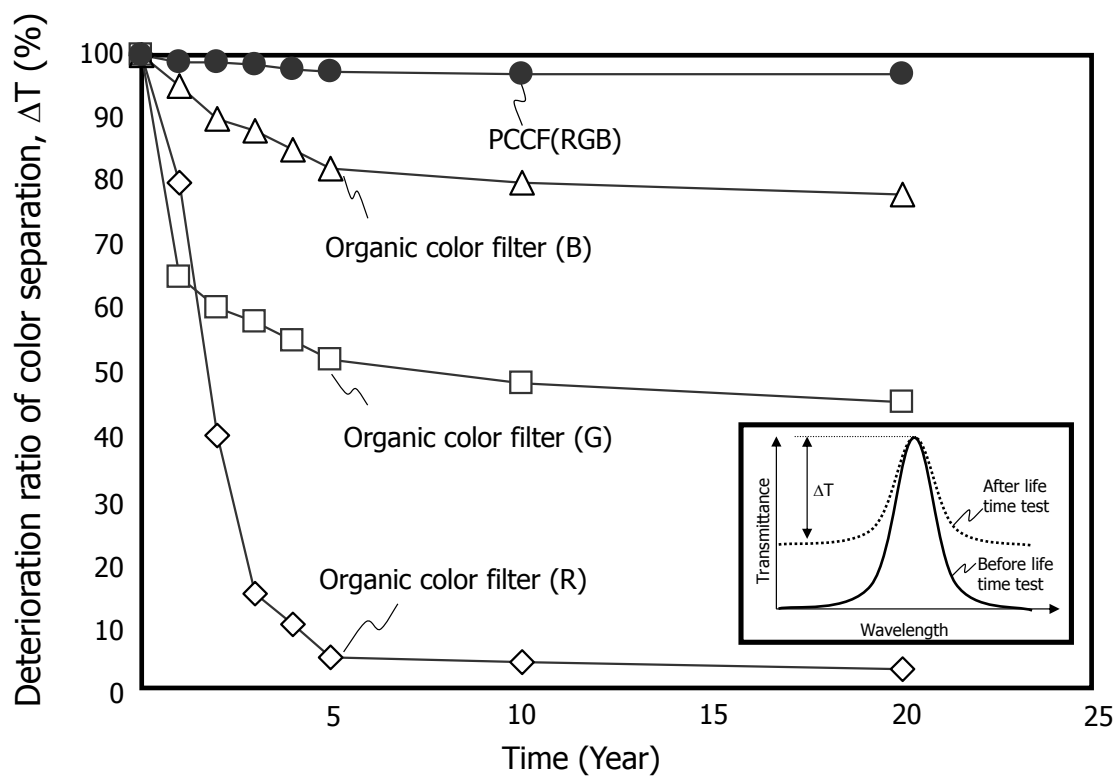


図 3-13 試作した PCF を搭載した撮像素子と有機顔料による従来のカラーフィルタを搭載した撮像素子の寿命テストの結果を示す。メタルハライドランプによる紫外線を加速的に照射し実環境での時間に換算した。[14]

3-6 考察

本研究では、 $5.6\mu\text{m}$ の画素サイズで RGB+IR の画素構成の撮像素子を試作し、可視光と近赤外光の同時撮像を信号処理の切り替えで実施し、実証した。昼間では近赤外光を除去し、鮮やかなカラー画像を実証した。夜間では、全画素で近赤外光を撮像できるため高解像度な白黒画像を提供できた。更なる今後の進化として 2 点議論する。1 点目は、画素サイズの微細化である。2 点目は夜間の画像の進化である。

一般に近赤外光がシリコン基板で光電変換される深さは可視光に比べて深い。そのため、シリコン基板に深く侵入してから光電変換する光は隣接画素と混じり合う度合いは、基板浅く光電変換する光に比べ大きい。吸収係数は可視光より近赤外光より大きいため、近赤外光で混色の度合いが多くなる。今回の撮像素子では画素サイズが $5.6\mu\text{m}$ と入射光の波長に対し十分大きいため、今回の撮像画像で確認する限り影響はなかった。画素サイズが微細化していくとこの影響が顕著化するため、対策が必要になるが、例えば、画素へ斜め入射してくる光を垂直に集光する画素レンズを用いることで、混色の影響を防ぐことが可能である [11,12]。

また、2 点目の夜間の画像の進化である。昼間はカラー画像が得られるが、夜間では近赤外光の短波長を用いているため白黒画像になってしまう。夜間もカラー画像化が望まれる。超微弱光の撮像素子としてアバランシェフォトダイオードを用いた撮像素子が提案されている [13]。このような超高感度撮像技術で微弱な可視光を取得できる。しかし、このような高感度撮像技術は信号の増倍率が高いため、ノイズ信号の倍率も高く画像の SNR が劣化してしまう傾向がある。今後、夜間画像は SNR の低いカラー画像と SNR の高い近赤外光の画像と組み合わせることで、SNR の高いカラー画像の可能性があり得ると考える。このように、デバイス技術で画素の微細化、夜間のカラー画像化に今後対応するような技術に発展していくことで、更なる新しい応用に活用される撮像素子に進化できる。

3-7 結言

昼夜で使用可能な監視カメラに向けて、フォトニックカラーフィルタ技術を用い層数 8 層の RGB+IR 画素構成のカラーフィルタを搭載した MOS 撮像素子を研究した。この撮像素子を用いて、近赤外信号を遮断もしくは透過を画素毎に実施することができた。その結果、昼間では、近赤外信号と可視信号を一つの画素で同時に受光してから信号処理で近赤外成分を除去することで、撮像素子によりカメラシステムは波長域が 400nm から 700nm までの可視光の光だけを撮像できる。夜間では、対称的に、850nm の近赤外照明を用い、機械的に IR カットフィルタを除去する機構を用いることなく、全画素で可視光と近赤外光を同時に受光し高感度な白黒画像を撮像することが可能であることを確認した。

参考文献

- [1] Z. Zhang, "Microsoft kinect sensor and its effect," *IEEE Multimedia*, vol. 19, no. 2. pp. 4–10, 2012.
- [2] Zehang Sun, G. Bebis, and R. Miller, "On-road vehicle detection: a review," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.28, no.5pp. 694- 711, May 2006.
- [3] Axis Communications, "AXIS 221 Day & Night Network Camera datasheet," 2005.
- [4] Kiyosumi Kidono, and Yoshiki Ninomiya, "Visibility Estimation on the Night Condition using a Multiband Camera," *Proceedings of Vision Engineering Workshop*, pp. 208-212, December 2006.
- [5] Masahiro Kasano, Yuichi Inaba, Mitsuyoshi Mori, Shigetaka Kasuga, Takahiko Murata, and Takumi Yamaguchi, "A 2.0- μm Pixel Pitch MOS Image Sensor with 1.5 Transistor/Pixel and an Amorphous Si Color Filter," *Transactions on Electron Devices, IEEE*, vol.53, no.4 pp. 611-617, APRIL 2006.
- [6] Bryce E. Bayer, Arthur Cobb Jr., Cydney Johnson, Gary Peterson, "Color imaging array," 米国特許, no. 3971065.
- [7] Yuichi Inaba, Masahiro Kasano, Keisuke Tanaka, and Takumi Yamaguchi, "Degradation-free MOS image sensor with photonic crystal color filter," *Electron Device Letters, IEEE* , vol.27, no.6 pp. 457-459, June 2006.
- [8] Peter Levine, Arthur Cobb Jr., Cydney Johnson, Gary Peterson, "Color television camera with selectively removable infrared rejection filter," U.S. Patent 4695878.
- [9] E. Yablonoitch, "Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, no. 20, pp. 2059–2067, May 1987.

- [10] Shigetaka Kasuga and Takumi Yamaguchi, "Solid state imaging device and the driving method," 日本国特許, 3782326.
- [11] K. Toshikiyo, T. Yogo, M. Ishii, K. Yamanaka, T. Matsuno, K. Onozawa, and T. Yamaguchi, "A MOS Image Sensor with Microlenses Built by Sub-Wavelength Patterning," Dig. Tech. Pap. IEEE Int. Solid State Circuits Conf., 2007.
- [12] K. Onozawa, K. Toshikiyo, T. Yogo, M. Ishii, K. Yamanaka, T. Matsuno, D. Ueda, "A MOS image sensor with a digital-microlens," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 55, no. 4, pp. 986-991, 2008.
- [13] M. Mori, Y. Sakata, M. Usuda, S. Yamahira, S. Kasuga, Y. Hirose, Y. Kato, and T. Tanaka, "6.6 A 1280x720 Single-Photon-Detecting Image Sensor with 100dB Dynamic Range Using a Sensitivity-Boosting Technique," Dig. Tech. Pap. IEEE Int. Solid State Circuits Conf., 2016.
- [14] S. Koyama, Y. Inaba, M. Kasano, and T. Murata: "A Day and Night Vision MOS Imager With Robust Photonic-Crystal-Based RGB-and-IR" Transactions on Electron Devices, IEEE, vol. 55, no. 3, pp.754-759, 2008.
- [15] Microsoft, "Xbox 360® Kinect™ センサー取扱説明書," p. 3, 2011.

第4章 広い色温度の照明に対応する昼夜兼用撮像素子

3章では、 TiO_2 と SiO_2 の中心波長 λ_0 の4分の1の光学厚の薄膜で構成される周期的な多層フィルタと、透過色を選択するため中心波長 λ_0 の4分の1の光学厚とは異なる厚みの欠陥層からなる1次元フォトニック結晶を応用した色フィルタを搭載したRGB+IR撮像素子に関する研究について述べた。本章では、3章で述べた撮像素子では対応できない広い色温度の照明課題を解決するために、フォトニックカラーフィルタの性能を向上させる設計概念と、そのフィルタを実装した撮像素子の研究成果について述べる。前章の撮像素子では、近赤外成分を差分することで信号のダイナミックレンジ(Dynamic Range : DR)と信号ノイズ比(Signal to Noise Ratio : SNR)が大幅に小さくなり劣化するが、本章で述べる研究では、多層膜フィルタに新たに2層の欠陥層を用いる手法を導入することで可視光の帯域を広げ信号量を増加させることに取り組んだ。さらに、近赤外光の帯域を狭くし差分による劣化を防ぐための近赤外規格化フィルタを導入しノイズの低減を実現した。その結果、SNRとDRの信号劣化は2300Kから6500Kまでの広い色温度の照明下であっても改善する効果を示すことを確認した。

4-1 緒言

可視光と近赤外光を同時に撮像できるカメラ用の昼夜兼用撮像素子は、ネットワークカメラや監視カメラ、車載カメラ、ゲームカメラなど様々な用途で応用できる。前章で RGB+IR 画素構成の撮像素子の研究に関して述べたように [1-3]、1次元のフォトニックカラーフィルタ(Photonic Color Filter : PCF)技術は、昼夜兼用の撮像素子を実現するにあたり重要な役割を担う。PCF は高屈折率材料と低屈折材料を周期的に交互に配置した透明な膜を多層で構成し、光が伝搬しない禁止波長帯を生成する。さらに異なる膜厚の欠陥層をその周期構造を崩すような多層膜の中に設定することで、透過帯域 R+IR、G+IR、B+IR、IR がバンドギャップの中に導入できる[4]。IR 画素で得られる IR 信号を可視光画素に含まれる共通の IR 帯域を減算することで、日中の撮像は実現できる。夜間のシーンは単純に全画素の IR 成分を使い撮像できる。この技術を用いて、カメラの部品である機械的に配置と除去を動作させる IR カットフィルタが不要になる。この結果、連続的な監視が必要なカメラでシーンの切り替えがシームレスに出来るようになる。それに対し、このシステムの大きな欠点はダイナミックレンジ(Dynamic Range : DR)と SN 比率(Signal to Noise Ratio : SNR)の低下である。それは信号量を本質的に縮小してしまう減算処理に基づいているからである。これは実用上早朝か夕方の低色温度の照明の場合に問題となる。夕方では DR と SNR の低下は 5dB 発生するのに対し、昼間の晴天時 6500K の環境下では 2dB 程度と小さい。

本章では、前章で研究した撮像素子の応用範囲を広げるため、様々な環境光でも使用できるような PCF を搭載した撮像素子を開発した。信号劣化は差分処理のため各画素の IR 成分と信号成分との比率で決まるが、IR 成分は IR 透過帯域幅の関数でもある。新たな PCF は可視光と近赤外光の透過帯域両方で進化した。ひとつ目は各可視光画素の可視光成分を増やすために PCF に 2 層の欠陥層を導入した。これにより可視の透過帯域は約 2 倍に広がり光量は 6dB 増加する。ふたつ目は、共通の IR 成分を減らすために、層数を増加させた。帯域は約半分

に設定した。このように、新しい PCF は劇的に RGB のカラー画像の SNR と DR を向上させた。SNR と DR の劣化は低い色温度でも 2dB にまで低減できた。高色温度の照明下ではわずか 1dB であった。最後に、昼間から夜間までの広い色温度の照明でも高い SNR と DR の撮像画像を試作した撮像素子でデモンストレーションした。

4-2 節では、本章での屋外で用いる場合の環境光の変化の大きさが撮像素子に与える影響を説明する。4-3 節では、PCF の可視光の帯域を広げ近赤外光の帯域を狭くする新たな設計概念を説明する。さらに、SNR と DR が異論度の関数として詳細に試算した。4-4 節では、SNR と DR の性能試算とともに色再現の画像の実験結果を示す。4-5 節で研究開発した撮像素子の用途や応用に関して短く考え方を述べ、4-6 節で本章の研究成果をまとめる。

4-2 変化する環境光の色温度と差分処理の課題

屋外で用いる監視カメラでは、環境光の影響が画像の色に与える影響が大きい。例えば、夕方の夕日の色は橙色であるが、日中では白色に近い光の色である。

図 4-1 では、異なる色温度の波長毎の光強度の計算結果を示している。各色温度はプランクの公式で定義される黒体から放射される電磁波のエネルギー密度の波長分布を色温度が 2000K から 7000K まで 1000K 毎にそれぞれの最大エネルギー密度で規格化したグラフを示している[9]。この図から環境光の色温度が変化すれば、最大エネルギー強度の光の波長も変わることが確認できる。

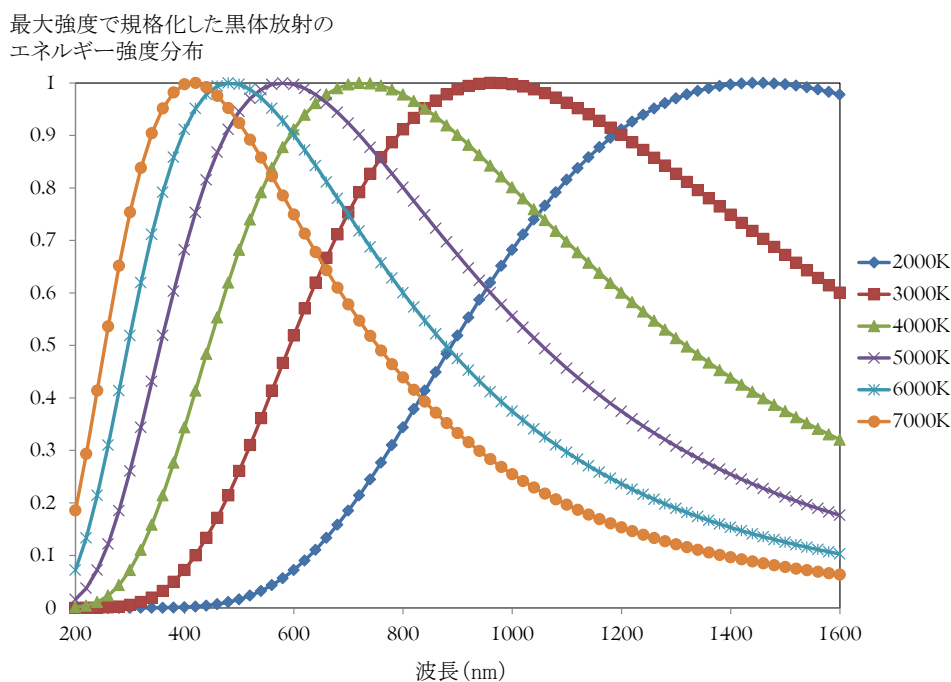


図 4-1 色温度により光強度が最大化する波長が異なり、色温度 2000K から 7000K までの黒体放射の計算値を最大光強度で規格化したグラフ。

第 3 章で述べたような近赤外光成分を各色信号から差分する信号処理をする場合の各画素のターゲットの分光特性の形状を図 4-2 に示す。重要な点は共通

の IR 成分の帯域は 4 種類の画素間で完全に一致しているべきであるということである。そうでなければ、差分処理で偽色が発生する(図 4-3)。そのような偽色は特に IR の反射率の高い植物や花、木綿の衣服などで発生し、夕方などの低い色温度の照明下の環境で発生する(図 4-4)。

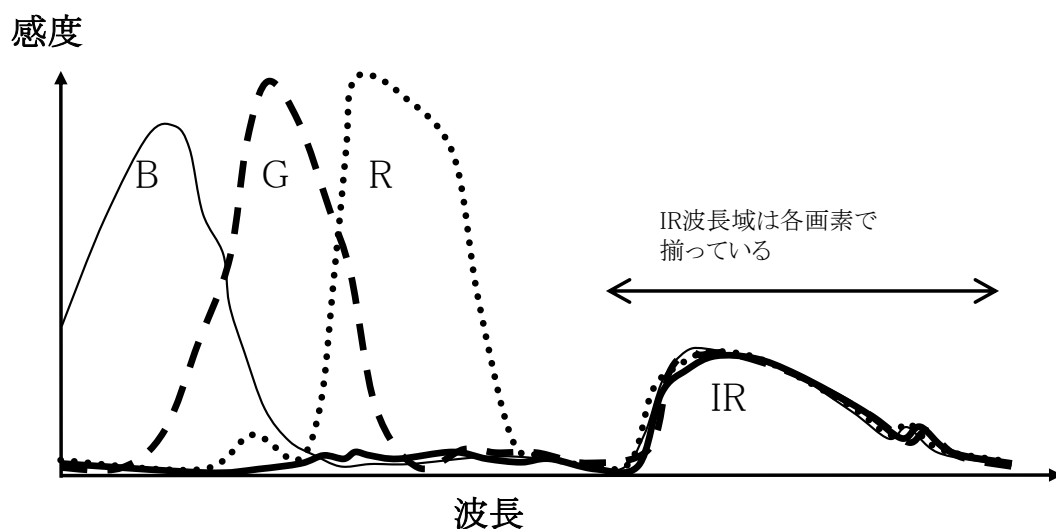


図 4-2 様々な色温度の照明下となる昼夜であっても使用できる撮像素子のターゲットとする分光特性。近赤外の透過波長を全画素で一致させることで近赤外成分の差分を正確に行うことができる。[10]

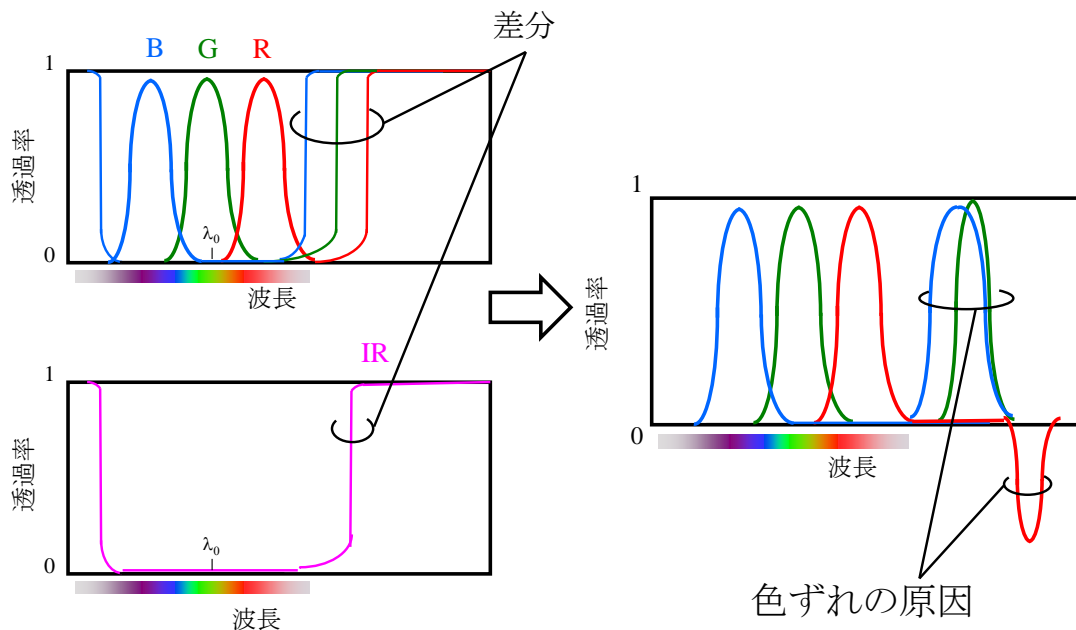


図 4-3 バンド端が不揃いであることにより、差分処理を行う場合、偽色が発生するメカニズムを示す。

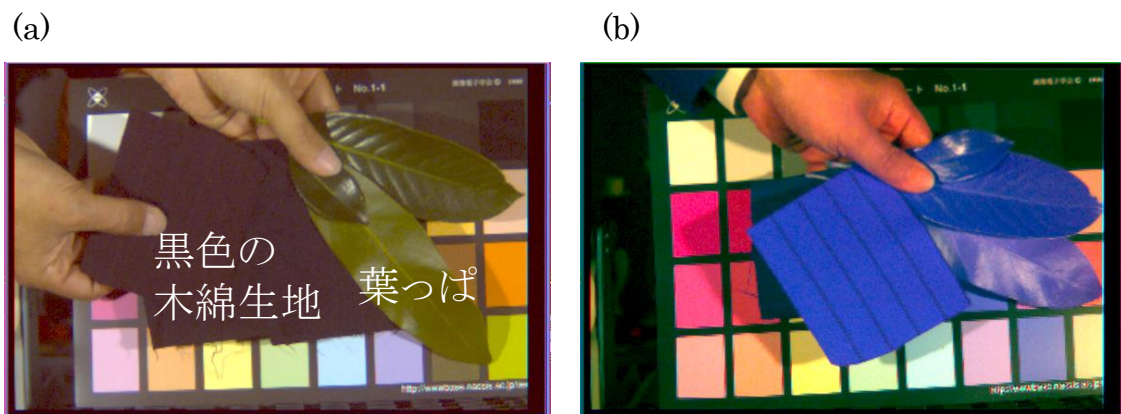


図 4-4 近赤外領域で反射率の高い被写体で発生する偽色の問題。(a)蛍光灯照明下で近赤外光領域の透過帯の端の波長がずれた RGB+IR 撮像素子を用いて撮像した画像に対して、近赤外差分処理を実施した画像と(b)白熱電球の照明下で近赤外成分を差分処理した画像。葉っぱや木綿生地で色が化けてしまっていることを確認できる。

4-3 可視領域の広帯域下と近赤外領域の狭帯域化を実現する

フォトリソグラフィカラーフィルタの設計

4-3-1 波長設計

前章では 1 次元フォトリソグラフィ結晶で実装した単板カラーフィルタに関して研究成果を説明した[5]。この方法では、フィルタのコアの構造は 2 つの異なる屈折率材料の薄膜をペアに周期的に多層で繰り返し、そのペア層の周期と異なる「欠陥」層を挿入することであった。この技術は光の透過を阻止するバンドギャップを生成し、同時に、欠陥層により各画素の透過帯域を生成する[5]。基本的な方法はうまく生成したファブリ・ペロー干渉フィルタの設計手法を起源としている[6,7]。しかし、このカラーフィルタは 2 つの追加の分光特性を持つ。

①可視領域の透過帯域より広い。②全画素の IR の透過帯域がより狭い。

図 4-5 (a)に設計したフィルタ構造を、図 4-5 (b)には試作した撮像素子の SEM による断面写真を示す。①の仕様を実現するにあたり、「2 層の欠陥層」による設計アプローチを用いた。可視の透過帯域は 2 つの個別の欠陥層で形成される。オリジナルの透過帯域を効果的に広げるメカニズムはオリジナルの透過帯域のレベルを分離することである。本フィルタのカップリング層は低屈折率材料の 1/4 波長層のみで構成している。一方、従来型のフィルタはカップリング層に加えて少なくとも 2 つの単純なスタックが用いられている[6]。

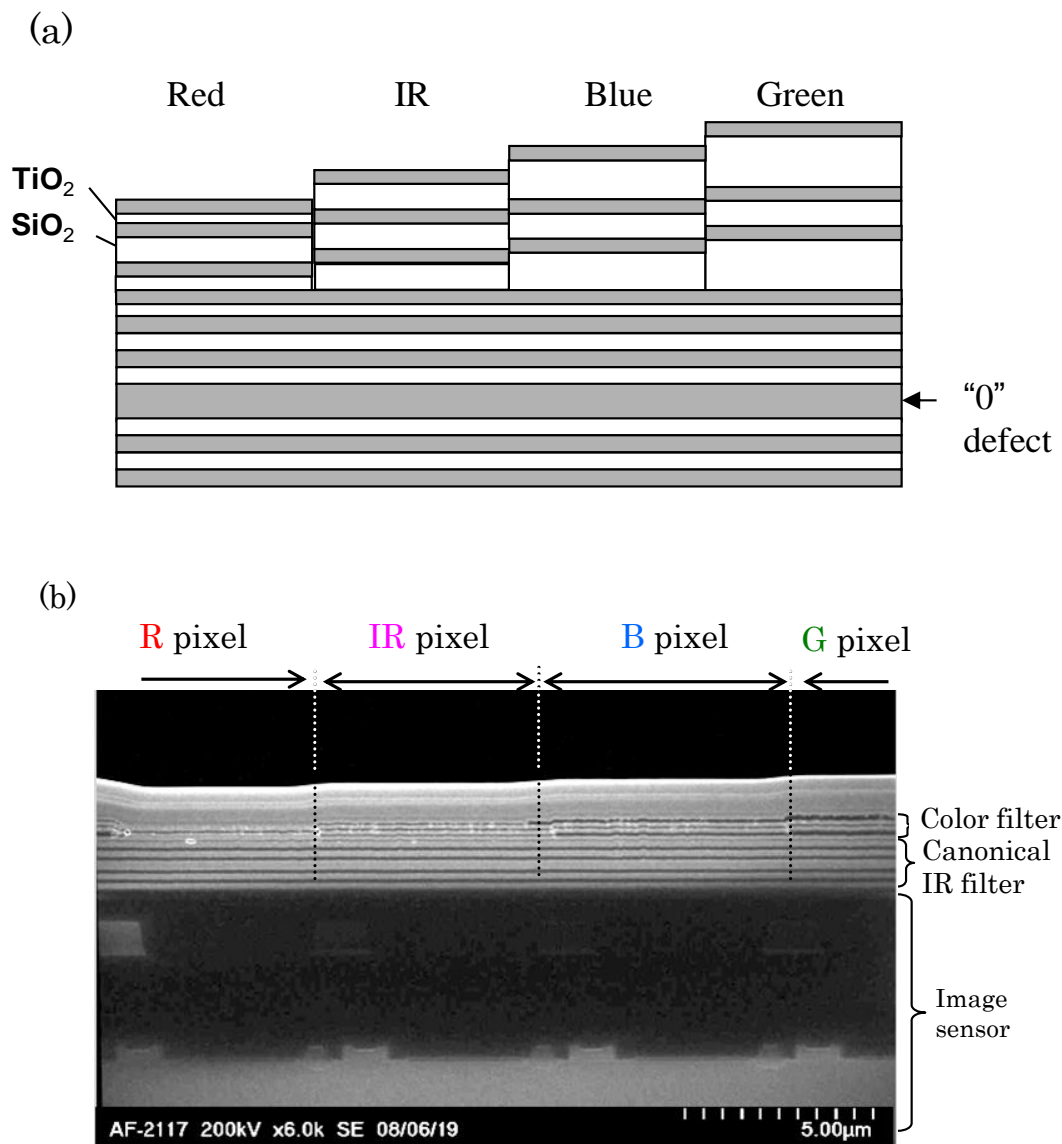


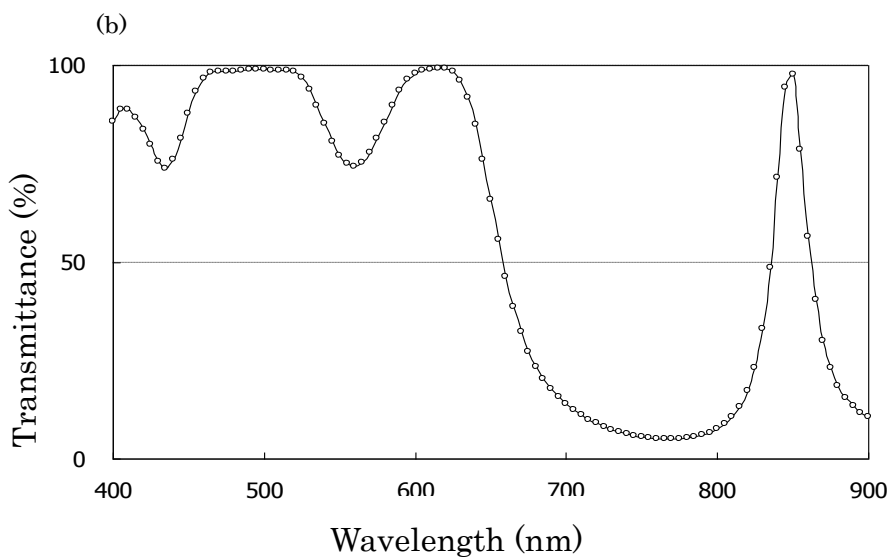
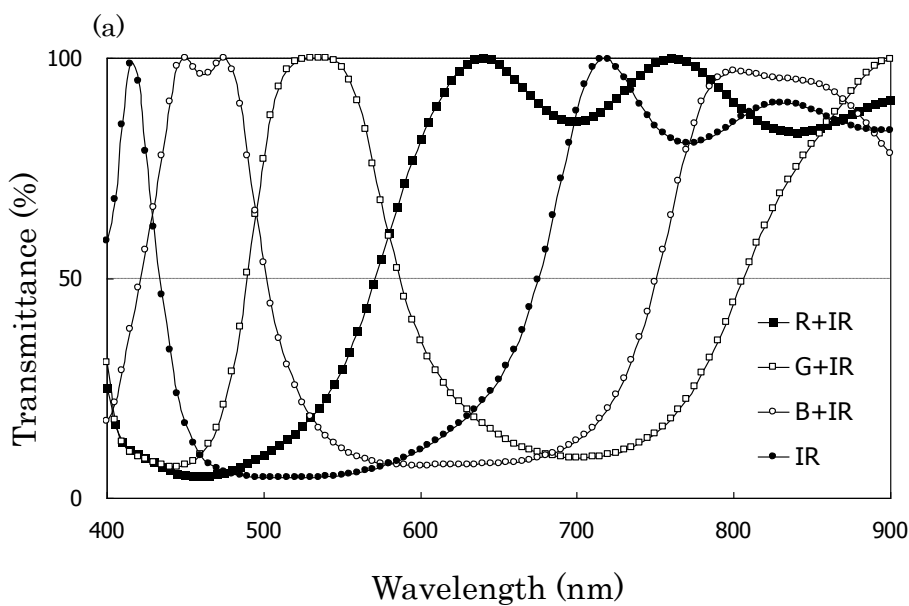
図 4-5 (a) 特性を向上する PCF の基本構造、(b) 試作した撮像素子の画素断面の SEM 画像を示す。なお、PCF の仕様は表 1 に示している。[10]

本構成のフィルタは層数を劇的に少なくしている。各色で 6 層である。層数が少ないため、製造工程も簡易にでき撮像素子への応用が可能になる。図 4-5 (a) の構造でシミュレーションした各色の分光特性を図 4-6 (a) に示す。

上で述べた仕様を満たすために、可視域の透過帯域と近赤外域の狭透過帯域を満たす IR 正規化フィルタを導入した。図 4-6 (b) にその分光特性を示す。IR

正規化フィルタは図 4-5 (a)に示すように新しいフィルタで下部に位置して構成される。この正規化フィルタは図の矢印で示している「0」の厚みの1層の欠陥層で構成したフォトニックカラーフィルタである。このようなオリジナルの可視域フィルタに異なる PCF を加える設計手法は2つの離れた透過帯域を2つの欠陥層で形成することが不可能であるためである。

図 4-6 (a)と図 4-6 (b)を組み合わせた各色の分光特性は図 4-6 (c)に示される。



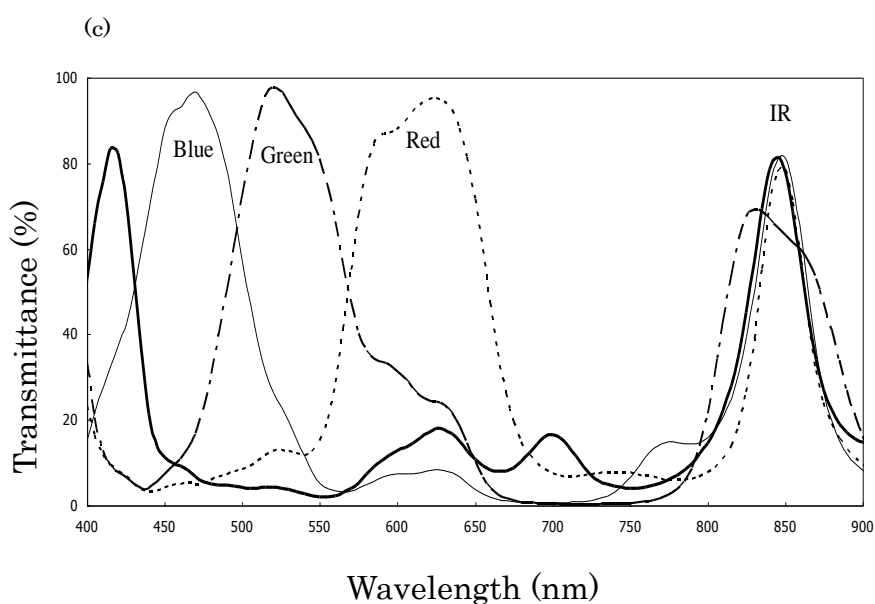


図 4-6 (a) 全画素の色分離するフィルタの透過帯域の分光特性を示す。(b) 可視域を透過し近赤外を狭帯域化する機能を実現するフィルタを示す。(c) (a)と(b)を重ねることで実現する積層フィルタの分光プロファイルを示す。[10]

4-3-2 信号ノイズ比とダイナミックレンジの試算

機械的に抜き差しする IR カットフィルタによる IR 除去方法の IR 成分と比べ、信号ノイズ比(SNR)とダイナミックレンジ(DR)は劣化する。その理由は雑音量を減算することで信号の DR が減少し、同時に、雑音量比率が増加するためである。そのため、下記に本フィルタの上記の 2 つの SNR と DR を単純なモデルに基づいて試算した。信号成分は黒体放射を前提に、雑音成分は光ショットノイズを前提にしている。光ショットノイズは光量の平方根で定義される。図 4-7 では、各可視フィルタでの SNR と DR を計算する基本手順を示している。

まず、可視光のノイズ成分の振幅(N_{VIS})と近赤外のノイズ成分の振幅(N_{IR})は下記の式(4-1)と式(4-2)のようにそれぞれ表現できる。

$$N_{VIS} = \sqrt{S_{VIS}} \quad (4-1)$$

$$N_{IR} = \sqrt{S_{IR}} \quad (4-2)$$

ここで、 S_{VIS} と S_{IR} はそれぞれ可視光成分と近赤外光成分の信号量である。信号のノイズ振幅は近赤外成分の減算前には式(4-3)のようになる。

$$N_{p1} = \sqrt{S_{VIS} + S_{IR}} \quad (4-3)$$

一般的に信号成分が別の信号成分を差分する場合、ノイズ量は加算される。そのため、IR成分を差分した後、ノイズ総量は式(4-4)のように増加する。

$$N_{p2} = \sqrt{N_{p1}^2 + N_{IR}^2} = \sqrt{(S_{VIS} + S_{IR}) + S_{IR}} \quad (4-4)$$

その結果、SNRは差分後に式(4-5)のようになる。

$$SNR = \frac{S_{VIS}}{N_{p2}} = \frac{S_{VIS}}{\sqrt{(S_{VIS} + S_{IR}) + S_{IR}}} \quad (4-5)$$

黒体放射を仮定する信号項を代入し、色温度に対する各色の SNR を試算し、赤信号、緑信号、青信号に対応する結果をそれぞれ図 4-8 (a)、図 4-8 (b)、図 4-8 (c) に示す。色温度が低下すると S_{IR} は増加するため、一般的に SNR は色温度の低下とともに減少する。また、 SNR の低下は緑信号や赤信号よりも波長が短く、さらにシリコンの感度が低下する短波長側の青信号でより深刻になる。新たに設計したフィルタは赤信号、緑信号、青信号の全てで改善し、色温度 2800K のとき、それぞれ 3.2 dB、4.2 dB、8.0 dB 改善した。この改善は各色の帯域を広げ、近赤外光の透過帯域を狭くすることを同時に実現した本設計方法による結果である。

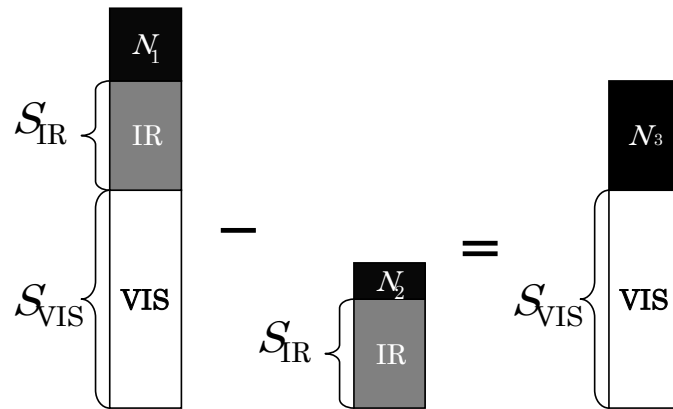
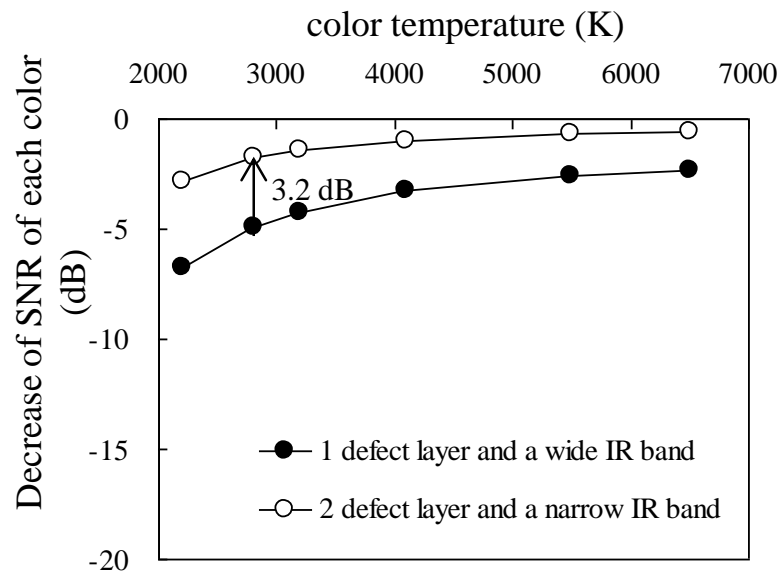


図 4-7 SNR の計算の基本概念図を示す。信号差分をするとノイズ成分 N_3 は N_1 、 N_2 より大きくなる。[10]

(a)



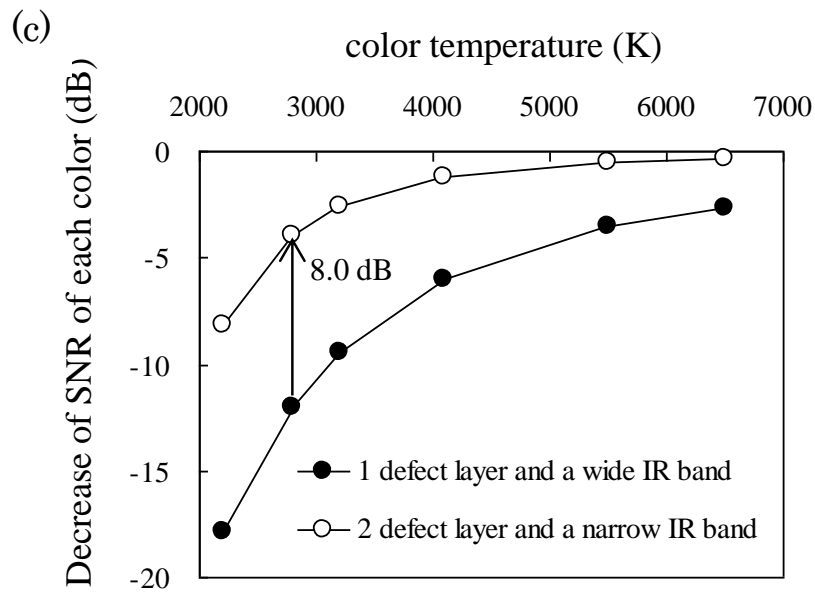
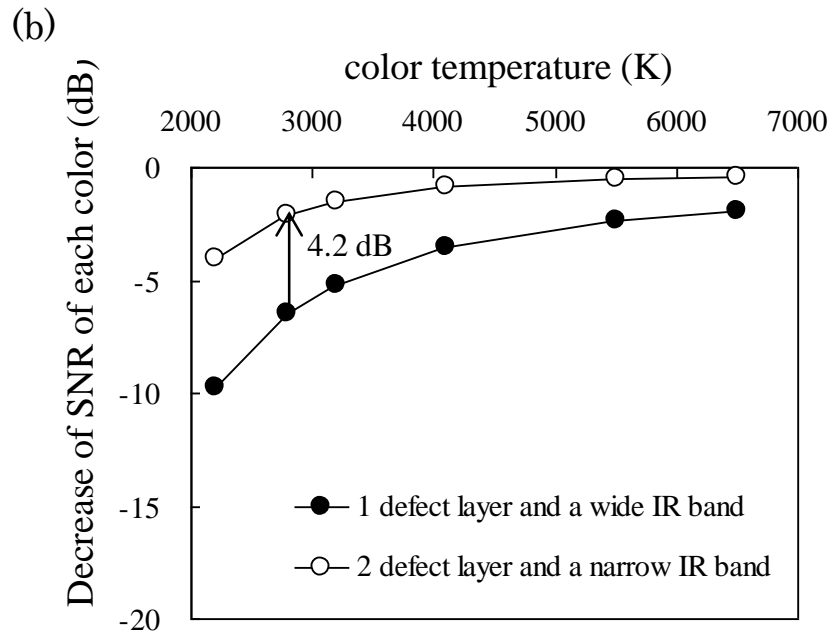


図 4-8 従来の1つの欠陥層のフィルタと2つの欠陥層でかつ近赤外の透過帯を狭帯域化したフィルタでそれぞれSNRを計算し、(a) 赤画素、(b) 緑画素、(c) 青画素に関して、そのSNRを色温度に対してプロットした。すべてのカラー画素で、2つの欠陥層、近赤外の狭帯域化によりSNRが向上していることを確認できる。[10]

4-4 実験結果

新たに設計した PCF の単板カラーフィルタを CMOS 撮像素子の上に $0.35\mu\text{m}$ の CMOS プロセスで製造、試作した。セルサイズは $5.6\mu\text{m}^2$ で画素数はパノラマ VGA(750(水平)x 500(垂直))の 37.5 万画素である。試作した撮像素子の代表的なパラメータは表 4-1 にまとめた。

表 4-1 本研究で試作した MOS センサの仕様一覧[10]

	Pixel size	5.6 μm x 5.6 μm
Photonic color filter	Pixel color	Red, Green, Blue, Near Infrared
	Principle	Photonic Crystal
	Material	TiO ₂ , SiO ₂
	Layers	7
	Thickness of defect SiO ₂ layer	45 nm (Red), 185 nm (Green), 140 nm (Blue), 90 nm (Near Infrared)
	Thickness of SiO ₂ layer	91 nm
	Thickness of TiO ₂ layer	52 nm
	Color lifetime	> 200,000 hours
	Heat resistance	> 300 °C
IR canonical filter	Layers	10
	Thickness of defect SiO ₂ layer	0 nm
	Thickness of SiO ₂ layer	146 nm
	Thickness of TiO ₂ layer	84 nm
Dynamic range of nighttime imaging		65 dB
The number of pixels		750 (H) x 500 (V)
Saturation signal of a photodiode		45,000 electrons
Dynamic range of daytime imaging @6500K		63 dB
Dynamic range of nighttime imaging		65 dB
Frame rate		30 fps
Power supply voltage		3.3 V

上記のことを確認するため、昼間の撮像実験として異なる色温度の照明下でカラーでの撮像実験を実施した。図 4-9 に結果を示す。図 4-9 (a)、図 4-9 (b)、図 4-9 (c)、図 4-9 (d)はそれぞれ色温度が 6500K、4150K、2850K、2300K の照明下で撮像した時の撮像結果である。

本試作撮像素子と提案した信号処理を実施した撮像画像に関して、すべての色再現が問題なく示されている。葉っぱの緑色は実用上強調されている。葉っぱの近赤外領域での反射率は可視域に対して相対的に高いため、近赤外成分の差分が不十分であると色が正しく再現できなくなる。例えばピンク色や青色の葉っぱとして色再現されてしまう。IR カットフィルタを用いない場合の従来の撮像素子で容易に発生する課題である。

他のポイントとして、ボードの右側に貼り付けた木綿の布の被写体の黒色の再現である。中心に位置する小さいカラーチャートの上にすべての画像で黒い布が示されている。前述したが、木綿の布は近赤外の光の反射率が大きいため、近赤外の信号成分を適切に差分できない場合は偽色となって色再現されてしまう。

参考として、同じ被写体で近赤外光の LED を照射して撮像した近赤外画像を図 4-9 (e)に示す。波長とシーンへの光量は 850nm で $200\mu\text{W}/\text{cm}^2$ である。繰り返すと、植物の葉っぱとボードの上部に配置された木綿の布切れは近赤外領域の反射率が非常に高いため非常に明るく撮像されている。つまり、どのような被写体、どのような照明下であっても、すなわち、近赤外領域で反射率の高い被写体であっても、色温度の低い照明下であっても、正しく色再現できる撮像素子と色処理をデモンストレーションできていると結論付けることができる。それは可視域の広域化と近赤外領域の狭帯域化を両立したオンチップのカラーフィルタであり、近赤外領域の帯域がすべての色で同じであるため実現できた。

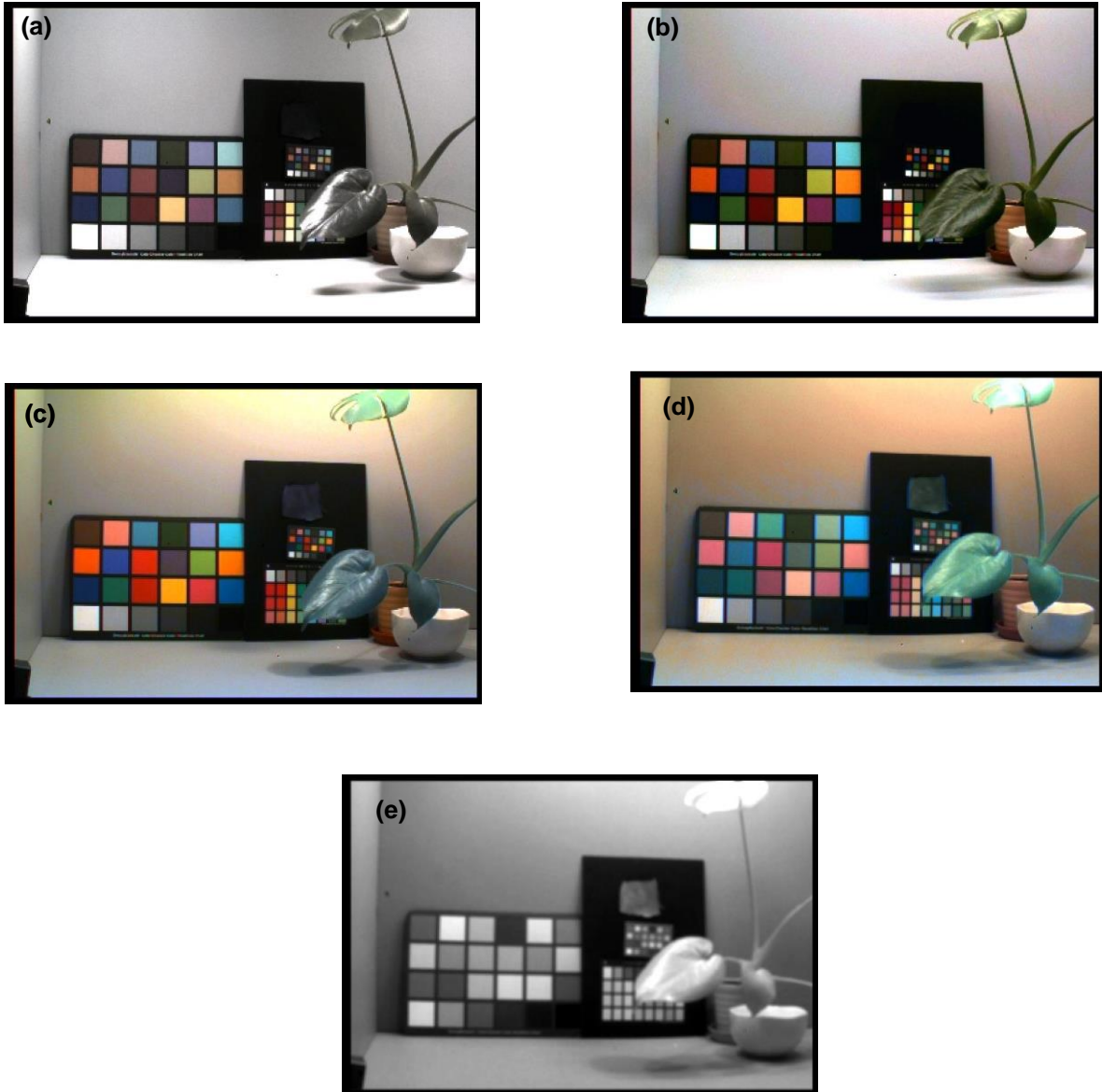


図 4-9 異なる色温度で撮像し近赤外成分を差分して得られたカラー画像を示す。それぞれ色温度は(a) 6500K、 (b) 4150K、 (c) 2850K、 (d) 2300K である。(e) 近赤外光を照射した場合の画像である。近赤外照明は波長が 850nm で光量が $200 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ である。[10]

4-5 考察

前節では、新しいカラーフィルタの分光特性の最適化設計の結果を示した。全色のフィルタで近赤外領域の同一化が実現されなければ、低色温度の照明下では偽色の発生を免れない。すでに述べたが、照明の色温度が低いほど、照明のなかに占める相対的な近赤外のエネルギーが高い。すなわち、可視光の成分と近赤外の成分が大きく混じり合う。近赤外のすべての感度をすべての画素から得ることで近赤外光の減少は近赤外線画像を見る用途において、実用上問題ない。車載用途で夜間の人を見る用途では、IR 透過帯域の幅と IR 感度のトレードオフは慎重に考える必要がある。しかし、面発光レーザなど波長シフトが小さく、発光波長幅 1nm 程度に小さい光源を用い、さらに、近赤外光の透過帯域を狭くすることで、SNR、DR を上げることも可能である。このように発光光源の進化に合わせるなど、設計自由度の高いフォトニックカラーフィルタにより、新しい撮像素子を実現できる可能性が高い。

4-6 結言

広い波長域の可視域フィルタと狭い波長域の近赤外フィルタを撮像素子上に単板フィルタで実装し、昼ではカラー撮像を夜は近赤外光撮像をメカニカルなIRカットフィルタを用いることなく実現した。各色フィルタの近赤外の透過帯域の波長がお互い一致していることで昼のカラー撮像で様々な色温度であっても、どのような被写体に対しても偽色なしで色再現できた。1次元のフォトニックカラーフィルタの設計手法の柔軟性により、このような結果を得られた。このような昼夜兼用の撮像素子は車載用途、監視用途で重要な役割を担うと信じる。

参考文献

- [1] D. Kooß, F. Bellotti, C. Bellotti, and L. Andreone, “EDEL – Enhanced Driver’s Perception in Poor Visibility,” Proc. Progress in Automobile Lighting (PAL) Symp. 2003, Darmstadt, Germany, Sep. 2003.
- [2] A. Broggi, R.I. Fedriga, A. Tagliati, T. Graf, and M. Meinecke, “Pedestrian Detection on a Moving Vehicle: an Investigation about Near Infra-Red Images,” Proc. Intelligent Vehicles Symp., IEEE, pp. 431-436, Jun. 2006.
- [3] J. Dong, J. Ge, and Y. Luo, “Nighttime Pedestrian Detection with Near Infrared using Cascaded Classifiers,” Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing 2007, vol. 6, no. VI, pp. 185-188, Sep. 2007.
- [4] S. Koyama, Y. Inaba, M. Kasano, and T. Murata, “A Day and Night Vision MOS Imager With Robust Photonic-Crystal-Based RGB-and-IR,” IEEE Trans. Electron Devices, vol.55, no.3 pp. 754-759, Mar. 2008.
- [5] Y. Inaba, M. Kasano, K. Tanaka, and T. Yamaguchi, “Degradation-free MOS image sensor with photonic crystal color filter,” IEEE Electron Device Lett., vol.27, no.6 pp. 457-459, Jun. 2006.
- [6] A. Yariv, and P. Yeh, “Photonics, Optical Electronics in Modern Communications, Sixth Edition,” Oxford University Press, pp. 539-601, 2006.
- [7] H. A. Macleod, “Thin-Film Optical Filters,” Third Ed., Institute of Physics Publishing, pp.293-300, 2001.
- [8] L. Jiang, F. Tian, L. Ee Shen, S. Wu, S. Yao, Z. Lu, and L. Xu, “Perceptual-based fusion of IR and visual images for human detection,” Proc. of 2004 Int. Symp. Intelligent Multimedia, Video and Speech Processing, pp. 514-517, Oct. 2004.
- [9] M. Planck, “Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum,” Verhandl. Deut. Phys. Ges., vol. 2, pp. 237–245, 1900.

- [10] S. Koyama, K. Tanaka, M. Muguruma, M. Usuda, K. Fujiwara, T. Matsuno, Y. Hirose and Y. Shimada: “A day and night MOS imager spectrally adjusted for a wide range of color temperatures” Proc. SPIE 7249, Sensors, Cameras, and Systems for Industrial/Scientific Applications X, 72490S, 2009.

第5章 オンチップ微小光学素子による入射角度毎に光線

分離する撮像素子

本章では、単眼レンズで立体撮像可能な多眼撮像素子について述べる。多眼撮像素子とは、被写体からの光が撮像レンズで集光されてカメラ内の撮像素子面に集光されるが、その被写体からの光が通過する撮像レンズの開口位置に応じて、別々の情報として撮像する撮像素子をいう。分離する光情報が開口の右側と左側の 2 つであれば、単眼レンズでありながらステレオカメラに応用できる。さらに分離する数を増やせば、ライトフィールドを撮像するカメラにも応用できる。

光の入射方向により光を振り分けるビームスプリッタと 100nm 幅で 800nm の高さのパターン状に設計した人工形状のマイクロレンズ（メタマイクロレンズ）を撮像素子の内部に搭載することで光学損失が少ない多眼撮像素子を実現した。光学フォーマットが 1/3 インチ、画素セルサイズが $2.75\mu\text{m}$ の 210 万画素の多眼撮像素子を開発した。その撮像素子を用いデモカメラでは、隣り合った 2 画素でそれぞれの画素に入るべき光がお互いの画素に混じり合ってしまうクロストークの光学損失を押さえ込み、二眼撮像素子では 6%、四眼撮像素子では 7%となった。

また、応用として開口部を通過する位置を水平方向に複数分割した 1 次元のライトフィールド画像から 2 枚を選択すると、単眼レンズで選択的に視点間距離を変えて立体視が実現できる。加えて、複数のライトフィールド画像を加算する比率を変えることで、基線長はカメラレンズのアパーチャの範囲内で可変可能である。この技術を用いることで、電気的に選択的、または、立体感を制御できるので、立体視酔の影響の低減に応用できることを提案する。

5-1 緒言

一般的に従来のステレオカメラは 2 眼レンズと 2 つの撮像素子で構成されている[1-3]。レンズ間距離である基線長を変えることでステレオカメラの用途は広がる。基線長が数 cm 以下の狭いステレオカメラは数十センチ以内の物体を立体的に見ることに適している。例えば、内視鏡や立体顕微鏡といった用途が代表例である。しかし、2 眼 2 撮像素子の構成は 2 つのレンズ位置がずれると正しく立体像撮像ができないため、精密なレンズ間の位置調整が必要である。また 2 つの撮像素子間の感度差があると 2 つのカメラ間で感度補正を行う必要もある[4,5]。また、医療用途の内視鏡を用いた手術で用いる場合、長時間立体映像を見ることで従来の 2 次元映像よりも映像酔いを生じてしまうこともある [6]。このような課題を解決するために、単眼レンズと一つの撮像素子で構成され、同時に、基線長距離を調整できるステレオカメラがあれば望ましい。

これまでに提案されている単眼レンズのステレオカメラの方式は主に 3 種類ある。1 つ目の方式は 2 次元画像を信号処理で解析し、推定で左右の画像を生成する方法である。この方式では、2 次元画像を分析することで被写体を認識し、被写体の大きさを学習データから推定し物体までの距離を推定する方法である。しかし、被写体のエッジの色が背景の色と類似していた場合、物体と背景の信号量差が小さいため、物体を認識することが難しくなる。結果的に、物体までの距離を推定できない場合がある[7]。例えばピンク色をした体内でピンク色のポリープを検出するようなシーンがそのような場合である[8]。

単眼レンズでのステレオカメラの 2 つ目の方式は、外部の光学素子を用い、光学的に左右の画像を区別して撮像する方式である。被写体と背景が類似の色であっても外部光学素子を用いれば、物理的に異なる視点から確実に左右の視点の画像を得ることができる。この外部光学素子を用いる方式の一つがメインレンズの前に鏡を配置する方式がある[9-11]。複数の鏡で左右の像を作成し撮像素子の異なる領域で左右の像をそれぞれ撮像する。しかし、鏡を用いる方式はカメラのサイズを大きくしてしまう問題がある。

3 つ目の方式はライトフィールドカメラを用いる方式である[12,13]。ライトフィールドとは自由空間の全光線ベクトルの集合体を意味し、このライトフィールドを撮像するカメラをライトフィールドカメラという。この空間上の光線を追跡し計算することで、レンズ開口サイズの範囲内で異なる視点のステレオ画像を得ることができる[14,15]。このライトフィールドカメラはマイクロレンズアレイが実装されたプレートをレンズと撮像素子の間に実装することで実現できる[12,13]。この光学系とカメラサイズは従来の 2D 画像を撮像するカメラと同じである。しかし、レンズプレートの配置には数マイクロメートルの画素以下のアライメント精度が必要である。加えて、カメラに振動や衝撃などが加わった場合、マイクロレンズプレートの位置がずれ、再度位置調整するなどの修理が必要になる。

そのような光学系の位置調整を不要にするためには、外部光学素子は高精度に半導体素子に固定されるべきである。画素への入射角度に応じて撮像素子の感度が異なる技術が提案されている[16]。回折効果をもつグレーティングを周期的に撮像素子の最表面に配置することが特徴である。グレーティングの光学系は半導体プロセスによって製造されるため画素サイズ以下の高精度にアライメントできる。そのため、そのオンチップの光学系の位置は外部の衝撃や振動に対してもずれることがない。しかし、その回折格子は金属層で形成されており、光が反射され、クロストークが 50%もあるなど光学的損失が大きい。

このような課題を解決するために、光学損失の少なく、かつ、カメラレンズの開口径の範囲内で水平方向に視点の異なる画像を複数種類撮像可能な多眼のステレオ撮像素子の設計技術を研究し、その成果を本章で述べる。複数列にまたがるビームスプリッタと層内にパターン形成した人工的な形状のメタマイクロレンズの協調設計により実現した。ビームスプリッタではカメラレンズの開口からの光線を入射角度に応じて分離する。メタマイクロレンズでは光学ロスを抑えながら、入射角度に応じて分離された光を光電変換素子に集光する。結果的にこの撮像素子を用いたカメラは 1 次元のライトフィールドカメラを撮像することが可能になる。開口のサイズ内で異なる視点の画像を取得できるので、

その中で 2 枚の画像を適切に選択することで最適な基線長のステレオ画像を出力できる。

まず、5-2 節でライトフィールドカメラの光学系を定義し、基線長可変のステレオカメラに向け 1 次元ライトフィールドカメラ用光学系と撮像素子の構成について説明する。5-3 節では、この 1 次元ライトフィールドカメラ専用の撮像素子を実現するためのオンチップ光学素子を提案する。5-4 節ではその撮像素子を用いて、視点カメラレンズ開口サイズ内で有限の視点画像から任意の視点の画像を生成するための信号処理を説明する。これによりレンズ間距離を物理的に変更することなく可変の基線長を設定できる。5-5 節では実際にデモンストレーションとして、二眼撮像素子と四眼撮像素子を設計、試作し、その特性を測定した結果を示す。5-6 節で試作した撮像素子を用いて、ステレオ撮像と視点変換動作と特性を示す。5-7 節では多眼方式が進化する際の技術方向性を議論し、5-8 節で本章のまとめをする。

5-2 単眼レンズを用いた多眼ステレオカメラの撮像システム

本節では、カメラレンズからの入射光を入射角度の水平成分に応じて光を分離する多眼撮像素子とその撮像システムを説明する。これまでに報告されているライトフィールドカメラと同様に[12,13]、本章の撮像素子を用いたカメラは1個のカメラレンズだけを用いる。撮像できる視点間距離の基線長がカメラレンズの開口サイズ以内で設定できる。開発した単レンズを使用する多眼カメラシステムは、カメラレンズの開口サイズの範囲内で基線長を任意の長さに設定できるように開口内で水平方向に異なる視点の画像を撮像できる。

カメラレンズは撮像素子の画素に開口を通過して被写体からの光線を集光する。入射光の角度範囲は大きい開口の時は広い。従来の2D撮像素子の入射角度範囲は高感度のために、より広角であるべきである。一方、本章で研究した撮像素子の入射角度特性は異なる。図5-1 (a)に示すように、カメラ光学系では開口サイズ内で複数の視点の画像を得ることを想定する。そのため、図5-1 (b)に示すように、開発した単眼撮像素子は水平N画素が水平方向の入射角度で異なる入射角度特性をもつ必要がある。ここでNは2以上の整数である。各画素の入射角度範囲は従来の2D撮像素子の角度範囲より狭いが、各画素で最大感度となる入射角度では感度は従来2D撮像素子よりN倍高い。そのため、各画素の角度方向の積算感度は従来撮像素子と同等である。

カラー撮像のためには、色フィルタの配列は図5-1 (c)に示すように、ベイヤー配列を元に水平方向に分割する数だけ1番目の入射角度からN番目の入射角度の光を分離する単位で同色を並べた配列とした。そのため、どの角度の信号を選択するかのみを設定すればよい。出力画素信号は一般的な3Dディスプレイのフォーマットに配置する。

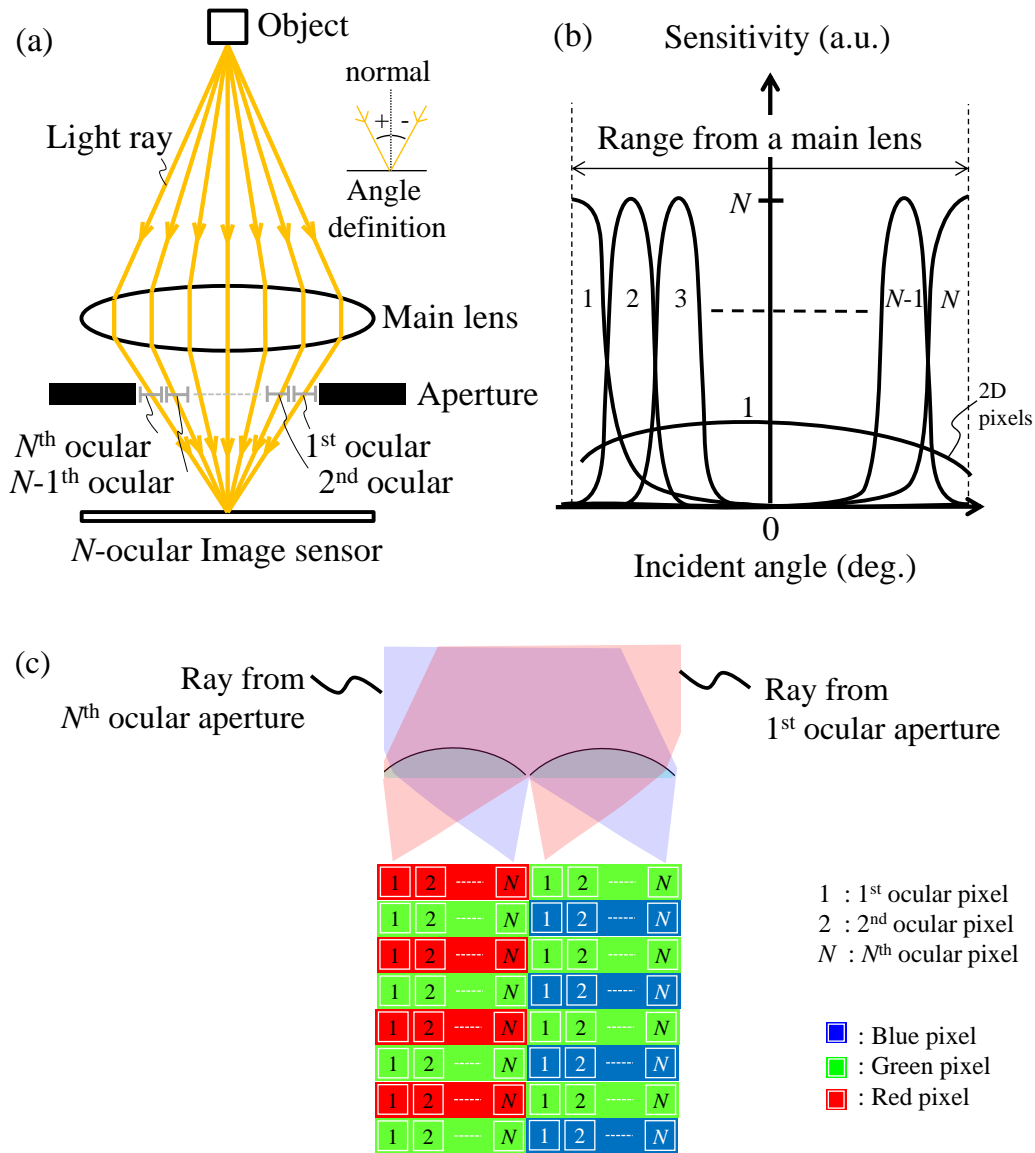


図 5-1 単眼レンズを用いた多眼ステレオカメラの光学システムを示す。(a) カメラの光学系と光線、(b) 提案する多眼撮像素子の入射角度に対する感度特性、(c) カラーフィルタの配置例を示す。多眼画素単位 (Multi-ocular pixel unit) で水平方向にカメラレンズからの光を N 分割に振り分ける。[20]

5-3 多眼撮像素子用のオンチップ微小光学素子

5-3-1 オンチップビームスプリッタと層内マイクロレンズの協調設計

前節で述べた撮像素子へ入射する光の水平方向の角度成分によって光を振り分けることが可能な多眼撮像素子用の微小光学素子について本節で提案する。特に、入射光が対応するフォトダイオードに光学的に小さな損失で光を分離できるように光線を分離するビームスプリッタと層内に配置するマイクロレンズを協調設計した。

ビームスプリットレンズを撮像素子の上面に載せた概念図である上方図と、撮像素子断面図でビームスプリットレンズがある角度からの光線を特定のフォトダイオードに集光している概念図を、それぞれ図 5-2 (a) と 図 5-2 (b) に示す。水平方向の入射角度に応じて光を分離し、垂直方向の入射角度は変化させないため、撮像レンズの開口範囲内で水平方向だけ異なる複数の視点画像を得ることができる。全入射角の光を角度ごとに分離し、それぞれの角度に対応するフォトダイオードに集光する概念図を図 5-2 (b) に示している。ビームスプリッタの焦点距離 f_{BS} は副光線の端が多眼画素の端、すなわち、第 1 眼画素か第 N 眼画素に集光するような制約条件を満たすように設定される。また、ビームスプリッタのレンズ曲率と層間膜の厚みはビームスプリッタの幅が画素サイズと多眼数の積であることを考慮して決定する。

撮像素子への入射角度に応じてビームスプリッタで分離された光線は図 5-2(b) の下に示されるフォトダイオードに向かって集光される。表面照射型の撮像素子の場合、画素内の金属配線で反射されるため、光の損失が大きい。また迷光になり分離特性が劣化する。特に、カメラレンズからの主光線は撮像領域の中心部と端部でことなり、端部へ向かうほど斜めに入射する。そのため、端部では光の集光効率が低下する。一方、裏面照射型撮像素子の場合、層内レンズが無ければ赤色などの長い波長の光の斜めの入射光はターゲットのフォトダイオードだけでなく、隣接画素の基盤の深くに到達してしまい、やはり分離特

性を劣化させてしまう。特に、多眼画素ユニットの端の画素では混色にもなってしまうことが課題である。

この分離特性の劣化、撮像領域の端部での集光効率低下や混色の課題を解決するために、層内レンズによって分離された光線をそれぞれの目標画素に集光することを検討した。

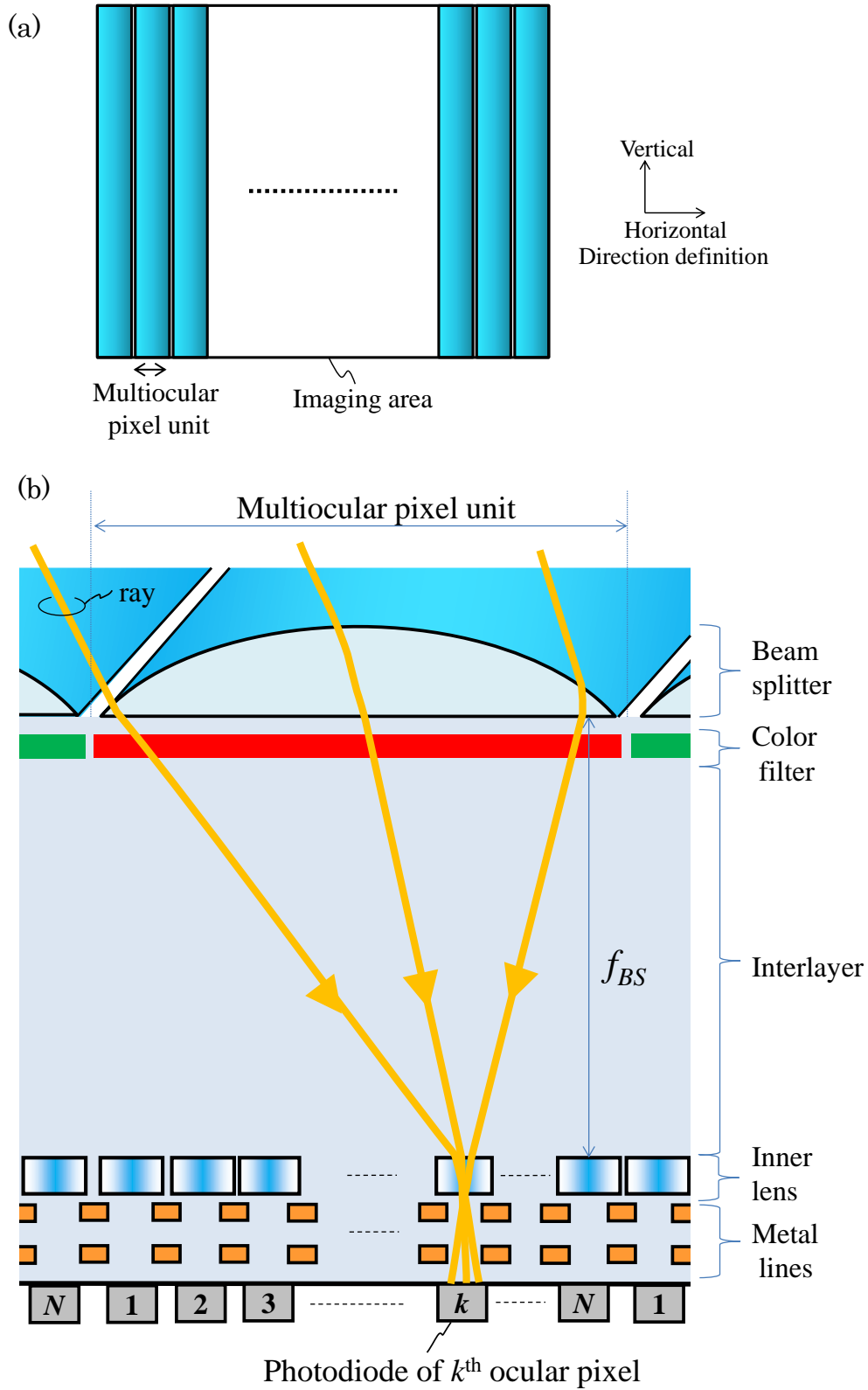


図 5-2 (a) 多眼撮像素子の上面図、(b) 多眼撮像素子の画素の断面と光線がフォトダイオードに集光される模式図を示す。[20]

5-3-2 層内メタマイクロレンズ

オンチップのビームスプリッタで分離された光のフォトダイオードへのそれぞれの入射角度は異なる。図 5-3 (a)はビームスプリッタから層内レンズへ光が入射し層内レンズがフォトダイオードへ集光する理想のレンズを示している。層内レンズへの入射光の入射角度は正の角度(図 5-3 (b))から垂直角度(図 5-3 (c))、

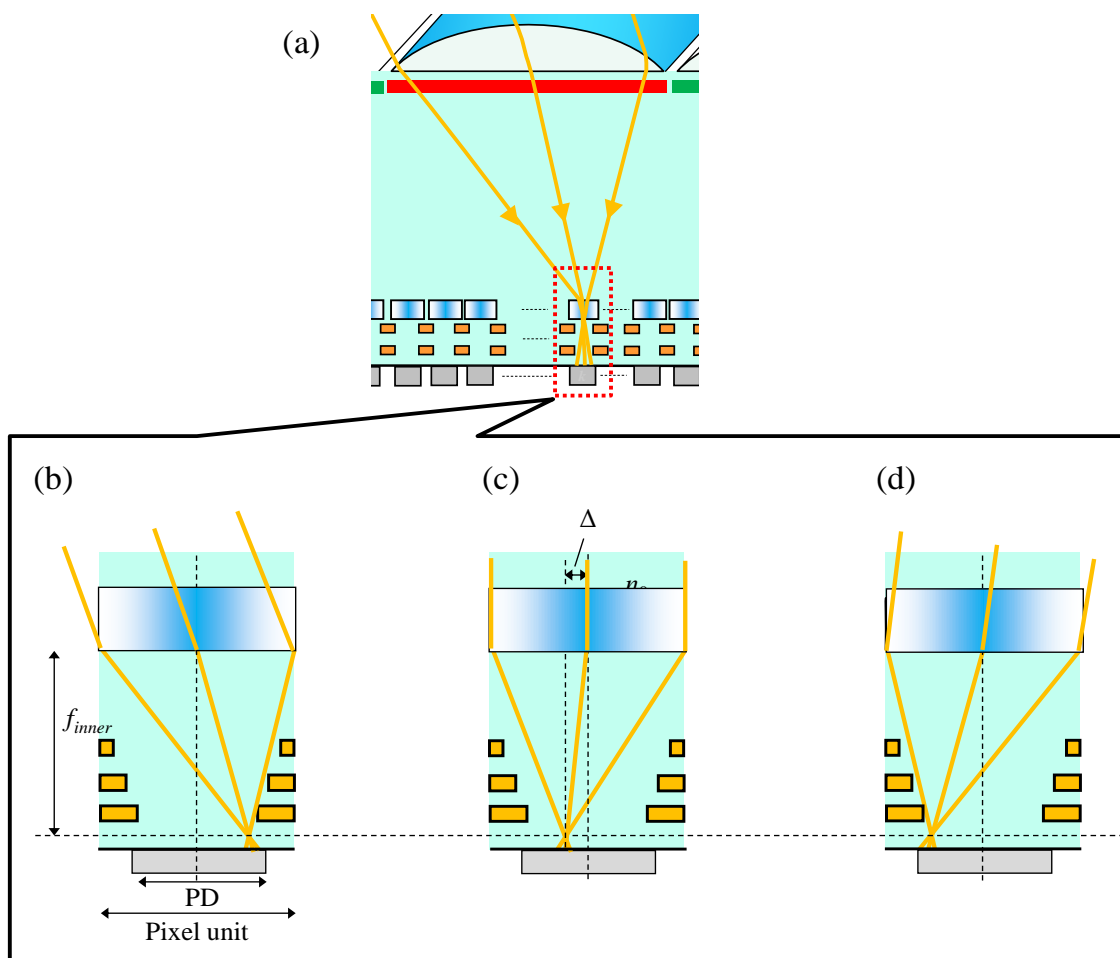


図 5-3 光をフォトダイオード(PD)に集光する理想的な層内レンズを示す。(a) 撮像素子の部分断面図と光線の概略図 (図 5-2 の縮小図)。ビームスプリッタから層内レンズへの光の入射角度が(b) 正の場合、(c) 垂直の場合、(d) 負の場合をそれぞれ示す。

負の角度(図 5-3 (d))までの範囲である。入射角度と範囲は多眼画素ユニットの中の画素の位置によって変わる。加えて、それぞれの入射角度は撮像領域の画素のアドレスによっても変わる。それゆえ、層内レンズの形状は画素毎に最適に設計すべきである。全画素の形状はパターン設計したマスクによって半導体プロセスで製造できる。そのパターン設計はいくつかのパラメータを用いてプログラミングによって設計した。下記にその設計手順を示す。

ビームスプリッタからの光をフォトダイオードに集光する層内レンズの焦点距離 f_{inner} は撮像素子の膜厚や配線メタルの層数などのデバイス構造で制約を受けると同時に、ビームスプリッタからの入射角度によっても制限を受ける。

そのような制約で決まる焦点距離を用いて、層内レンズは入射光をそれぞれのフォトダイオードへ集光し、さらに、画素中心からのシフト距離 Δ を下記の式で決める。

$$\Delta = -\frac{n_o}{n_i} \cdot f_{inner} \cdot \sin \theta \quad (5-1)$$

ここで n_i 、 n_o はそれぞれ層内レンズの母材の屈折率と母材の間に埋められる材料の屈折率であり、 θ は画素への主光線の入射角度である。この式では、 θ は画素のアドレス毎に異なるため、理想の Δ は画素毎に変化すべきである。仮に f_{inner} がデバイス構造で制約を受けても、 Δ はフォトダイオードへ光を集光するために変化させることで対応できる。

従来のマイクロレンズはドット形状のポリマーを熱で溶かして球面形状にするか、ドライエッチで形状制御するかを撮像領域全面で適用するため、マイクロレンズの形状は撮像領域全域で同じである。そのためレンズ形状を画素毎に最適に形成できない。人工的なパターン形成したマイクロレンズ（メタマイクロレンズ）により画素毎にオンチップレンズの設計を行う方式が報告されている[18,19]。本章では、多眼撮像素子を実現するため、画素毎に層内に人工的なパターン形成するマイクロレンズ技術について報告する。

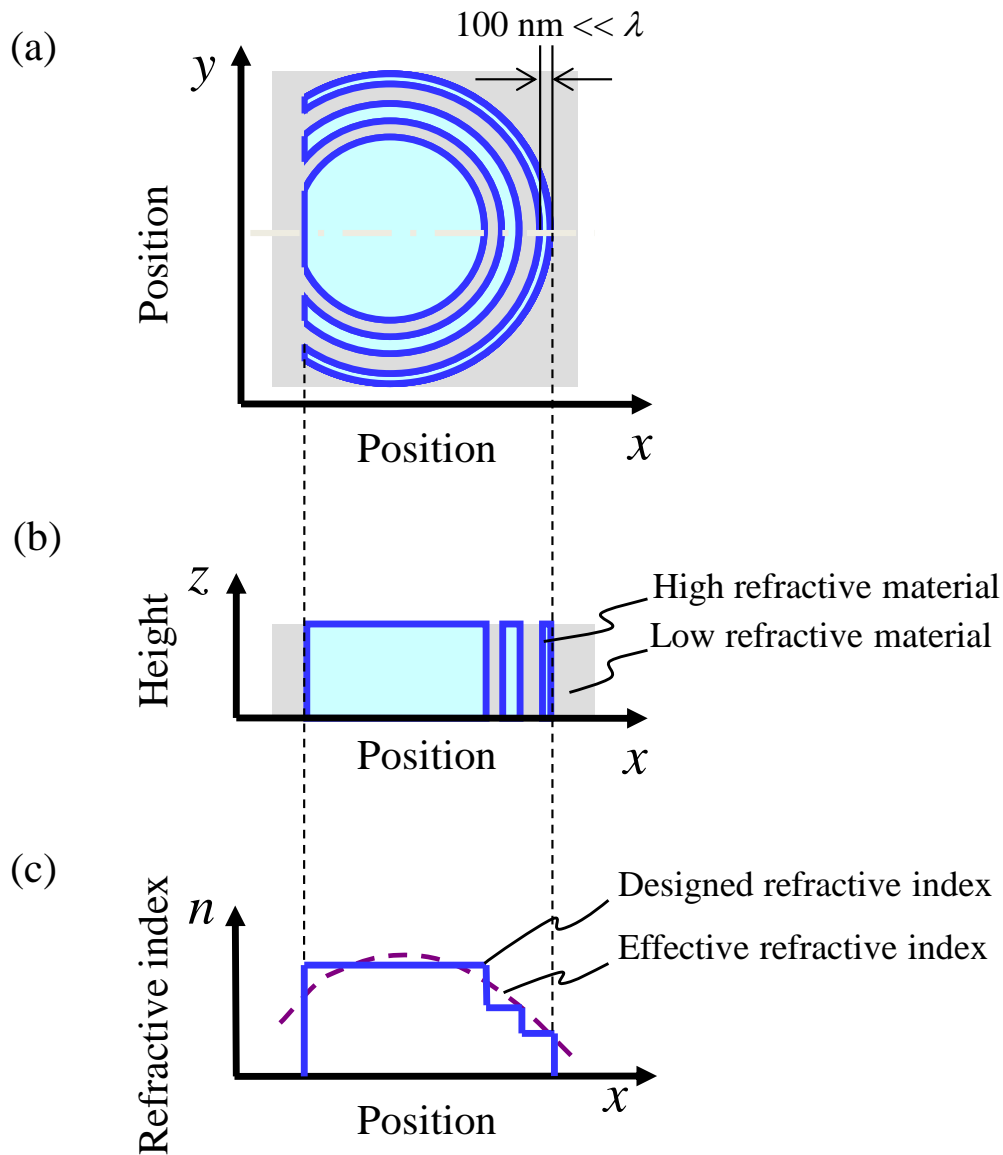


図 5-4 iDML のレンズプロファイルの概念図を示す。(a)上面図、(b)断面図、(c) 屈折率分布である。[20]

図 5-4 (a) と図 5-4 (b)に、画素毎に設計可能な層内に配置する人工的に形状設計したマイクロレンズ（層内メタマイクロレンズ）の上方図と断面図を示す。高屈折率材料の小さい構造物を低屈折材料の中に配置している。その小さな構造物のパターン形成によって、画素毎に異なるレンズ形状が実現できる。それぞれの屈折率要素の大きさが光の波長以下になると、レンズの実効屈折率分布は透過し屈折する光にとって図 5-4 (c)の点線の曲線で示すように連続的な値に

なる。このような離散的なパターンは 100nm の線幅と間隔で製造できる半導体プロセスとフォトマスク設計によって実現できる。この層内の人工的なマイクロレンズは高屈折率の構造物のパターンが有るか無いかの、デジタル値の 0、1 で表現できるため、層内デジタルマイクロレンズ(inner Digital Micro Lens : iDML)と名付けた。高屈折率材料として窒化シリコン(SiN)、低屈折率材料としてアクリルを選択し、それぞれ屈折率が n_{SiN} で 2.0、 n_{acrylic} で 1.4 とである。この材料はプロセスで加工容易性から選択した。

多眼撮像素子の場合、先の図 5-3 で示したように、ビームスプリッタから iDML への主光線のそれぞれの入射角度は異なる。例えば、第一眼画素への主光線の入射角度は正であるが、一方、第 N 眼画素への主光線の入射角度は負である。それゆえ、多眼画素ユニットの中で iDML の屈折率分布は図 5-5 に示すように、画素毎に最適に変えるべきである。iDML を形成するための半導体のパターンマスクとデバイス構造はカメラレンズ、画素アドレス、層内レンズの焦点距離、層内レンズの屈折率、層間膜厚の屈折率をパラメータとして設計する。

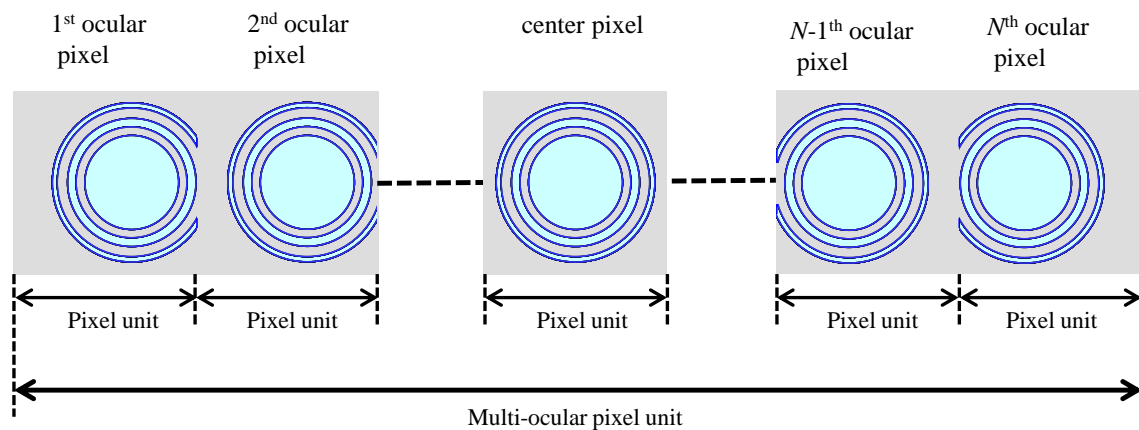


図 5-5 多眼画素ユニットの中の iDML の上面図。[20]

5-4 ステレオビジョン用の多眼信号処理

図 5-6 に示すように、多眼撮像素子を用いたカメラは複数のステレオモードでの撮像が可能である。例えば、第一眼画素と第 N 眼画素がそれぞれ左目画素と右画素として選択された場合、右目と左目の間の基線長はこの光学系では最も広い。また、第 N/2 眼画素と第 N/2+1 眼画素がそれぞれ左目と右目の画素として選択された場合は基線長が最も狭くなる。

Operation mode	3D with a wide baseline	3D with a narrow baseline
Aperture region which each ocular ray pass through.		
Processed pixels. P: a column for processed pixels		

図 5-6 ステレオビジョンのための複数の動作モードを示す。選択する画素列を変更することで、基線長が変わるため、立体感が変わる。[20]

さらに、水平に配置した N 種類の多眼画素を持つ多眼撮像素子の別の用途として、以下の式に従い、カメラレンズの開口サイズ内で任意の入射角度の像を生成できる。

$$I_p(x, y) = \sum_{k=1}^n a_k \cdot I_k(x, y) \quad (5-2)$$

ここで、 x, y はそれぞれ水平、垂直の多眼画素ユニットのアドレスであり、 $I_k(x,$

y)は k 番目のアドレス (x,y) での画素出力値、 a_k は k 番目の画素出力にかかる係数である。 $I_p(x,y)$ はアドレス (x,y) での任意の入射角度を設定し、計算された画素出力である。入射角度に対する感度特性を用い、各係数 a_k を決める。例えば、入射角度 θ_p で画素の感度 f_p を計算する場合、各画素の感度特性 f_k と各画素の平均入射角度 θ_k の関係を図 5-7 に示す。 k は 1 から N までの整数であり、多眼画素ユニットの画素数を表している。 f_p の角度範囲は f_k と f_{k+1} の角度範囲より広いが、入射角度 θ は f_k と f_{k+1} の間にシフトし補間された角度を表す。

以下は任意の入射角度の画像を計算する手順である。最初に、ターゲットの角度を決定する。次に、そのターゲット角度を包含する 2 つの画素への入射角度を選択する。この 2 つの入射角度を用いて係数を決定する。例えば、 N が 4 で、 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 がそれぞれ -7.5° 、 -2.5° 、 $+2.5^\circ$ 、 $+7.5^\circ$ で、 θ_p を $+5^\circ$ とする場合、 a_1 と a_2 は 0 と設定し、 a_3 と a_4 を 0.5 と設定する。そうすることで、係数を変えることで、カメラシステムは θ_1 から θ_N の角度範囲の任意の画像を提供できる。

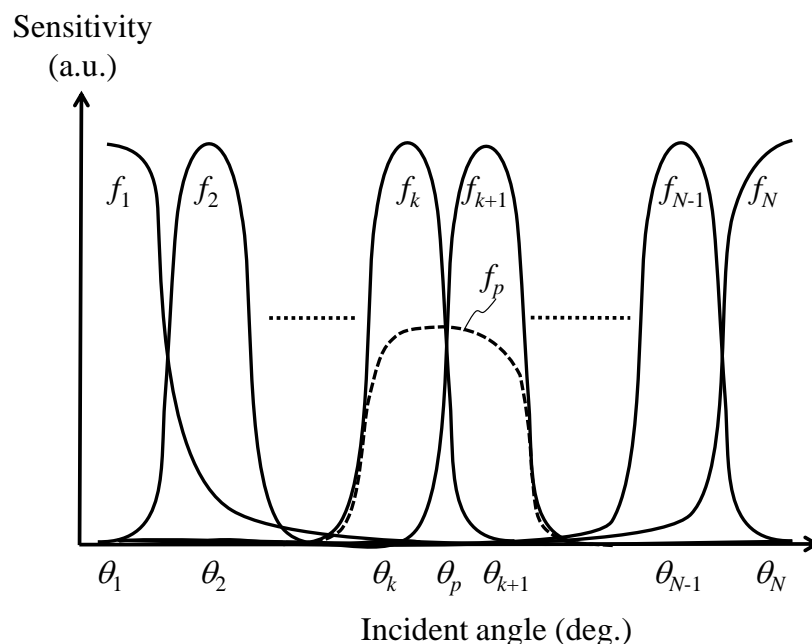


図 5-7 画素の感度 k 番目画素値 f_k と $k+1$ 番目の画素値 f_{k+1} を用いて生成した仮想的な画素値 f_p の感度曲線を示す。[20]

5-5 デバイス特性

5-5-1 試作実験

デモンストレーションとして、撮像領域の光学サイズが 1/3 インチ、画素 1 辺サイズを $2.75\mu\text{m}$ で画素数 210 万の多眼撮像素子を設計し試作した。図 5-8 (a) と図 5-8 (b) はそれぞれ、二眼撮像素子と四眼撮像素子の多眼画素ユニットの断面 SEM (Scanning Electron Microscope) 画像を示している。ビームスプリッタは多眼撮像素子の最表面に実装されている。従来の 2 次元画像を撮像するためのマイクロレンズと比べ、複数行にまたがって配置するビームスプリッタのレンズは大きく厚い。そういった厚い層を積層するため、粘度の高い不均一な厚膜をコーティングするのではなく、粘度の低いアクリルの薄膜を複数回に分けて積層した。加熱によりレンズ形状を制御する方法では、台形形状の厚膜レンズになってしまい入射角度に応じた角度分離特性が劣化する。台形ではなく分離特性が劣化しない曲面を積層した厚いアクリルをエッチバックすることにより実現した。ビームスプリッタの下に変形ベイヤー配列の顔料フィルタがあり、その下にアクリルの層間膜がある。層間膜の膜厚は二眼撮像素子と四眼撮像素子のそれぞれで $5\mu\text{m}$ 、 $11.5\mu\text{m}$ である。層間膜の下に、iDML があり、一番下に CMOS 回路が配置されている。iDML は高屈折率材料として SiN を用い、線幅と線間隔は最小で 100nm であり、高さは 800nm である。従来の SiO_2 で作成されたメタマイクロレンズ(DML)と比べ[16, 17]、SiN で作製された iDML はイオンミリングエッチングでは低選択性のため、 800nm の高さのレンズを製造できない。それゆえ、高い選択比を実現できる反応性イオンエッチングにより異方性形状の iDML を集積した。 100nm 幅の iDML の溝に低屈折率材料を埋めるために、低粘度のアクリル材料によりコーティングした。その結果、高いアスペクト比 8 の iDML を気泡なしに実現できた。

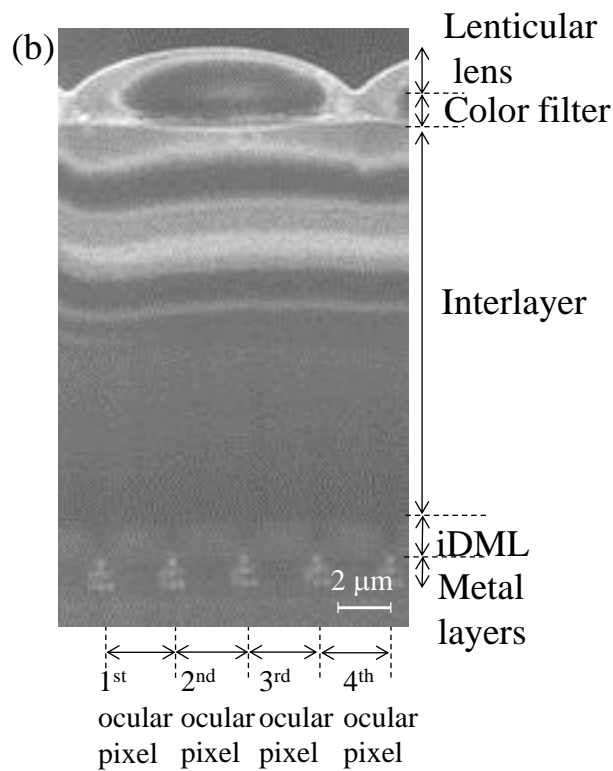
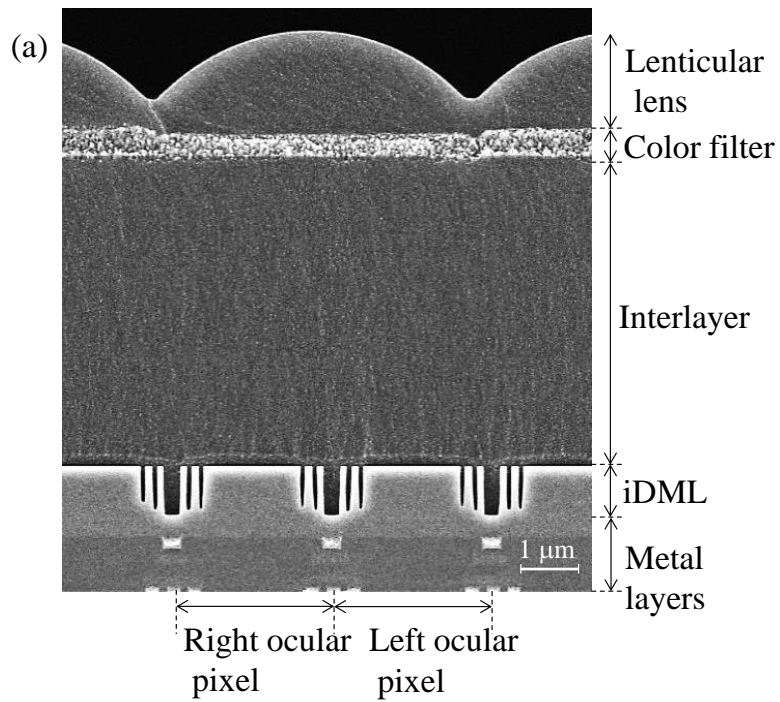


図 5-8 試作した撮像素子の断面構造の SEM 画像を示す。(a) 二眼撮像素子と (b) 四眼撮像素子。それぞれ最上部からビームスプリッタレンズ、カラーフィルタ、層間膜、iDML、金属配線、半導体回路と配置されている。[20]

5-5-2 光学特性

図 5-9 (a)に試作した二眼撮像素子の光学特性を示す。左目画素(L-pixel)と右目画素(R-pixel)への入射角度特性は 0° を中心に分離できている。お互いの画素に混じる3Dクロストークは実用上十分小さく問題のない6.3%であった。また、従来の2D撮像素子と比べ、 15° の感度は2倍あり、設計通り損失なくiDMLが光を集光していることを示している。

図 5-9 (b)には四眼撮像素子の光学特性を示している。それぞれの光線は4種類の特性の画素に分離できている。3Dクロストークも実用上問題のないレベルの7.7%であった。従来の2D撮像素子の感度と比較し、各画素のピーク感度をもつ角度で感度比は3.8倍と十分効率の高い集光特性を確認できた。

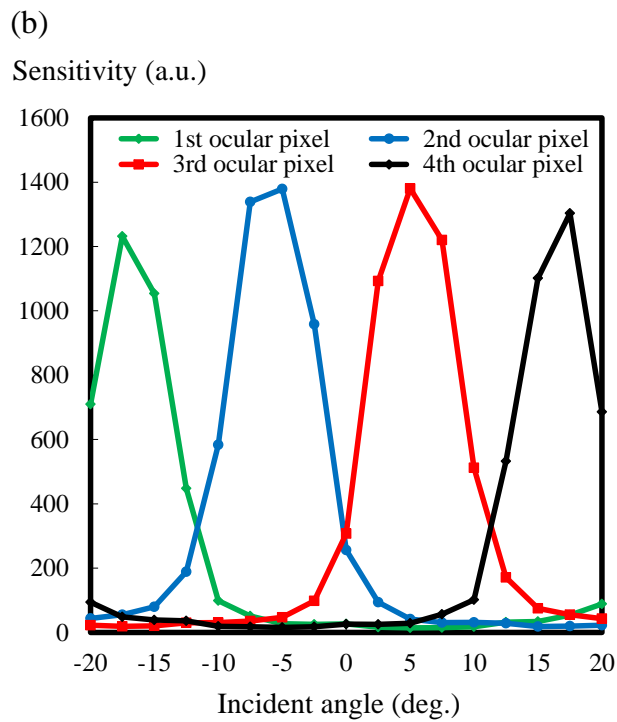
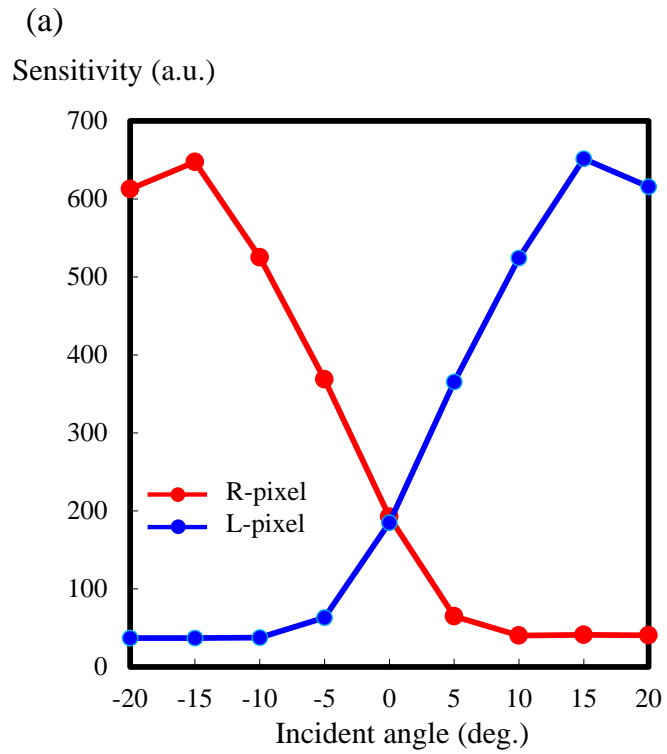


図 5-9 試作した撮像素子の入射角度に対する実測感度を示す。(a) 二眼撮像素子と (b) 四眼撮像素子の結果。[20]

5-6 実験

5-6-1 立体視の実証

図 5-10 は試作した二眼撮像素子を用いた 3D カラー撮像例を示している。用いたレンズは焦点距離 6mm、開口サイズ F#1.4 である。被写体としてカメラから 50 cm、60 cm、70 cm の距離に 3 つの人形を置いた。立体撮像実験から良好な結果を得た。水平端の輝度は中心輝度比 95% となり、撮像領域全体の輝度のシェーディングが中心と画像水平端に比べて劣化が少ない。また、被写体の位置に応じて明確な位置ずれを確認できる。例えば、被写体 1 と被写体 3 の位置は左右の画像で逆方向に位置しており、位置ずれの画素数は 6 画素と 4 画素である。一方、被写体 2 は左右画像で同じ位置に位置している。それゆえ、この左右の画像を 3D モニタに送ると立体像を見ることが可能である。

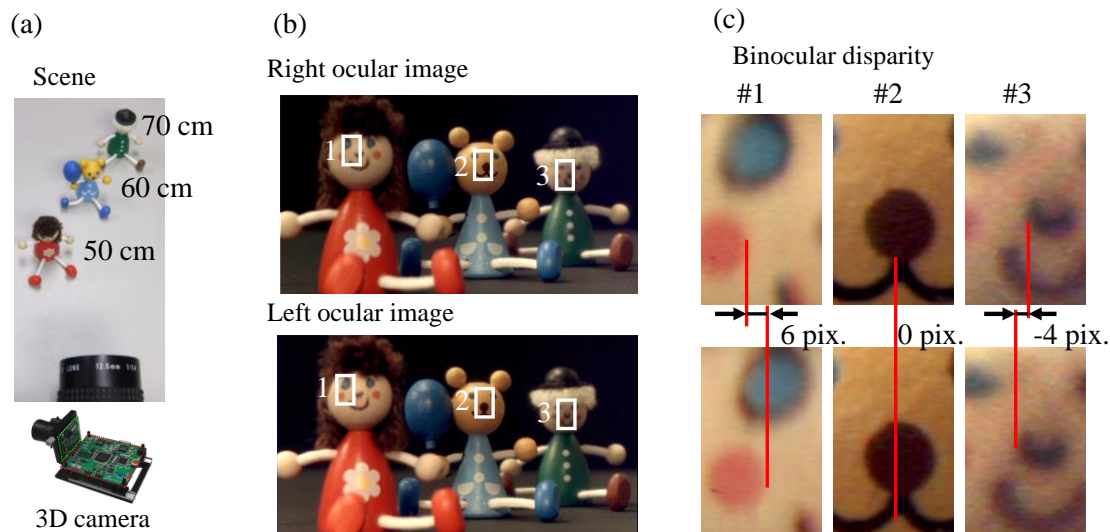


図 5-10 ステレオ画像のデモンストレーション。(a) 撮像シーン：被写体は 50cm、60cm、70cm の位置にそれぞれ人形を配置し、試作した二眼撮像素子を用いたカメラで撮像した。(b) 右眼と左目に相当する撮像画像。(c) 各人形の顔部での拡大画像。画素ずれ量がそれぞれ 6 画素、0 画素、-4 画素となっている。[20]

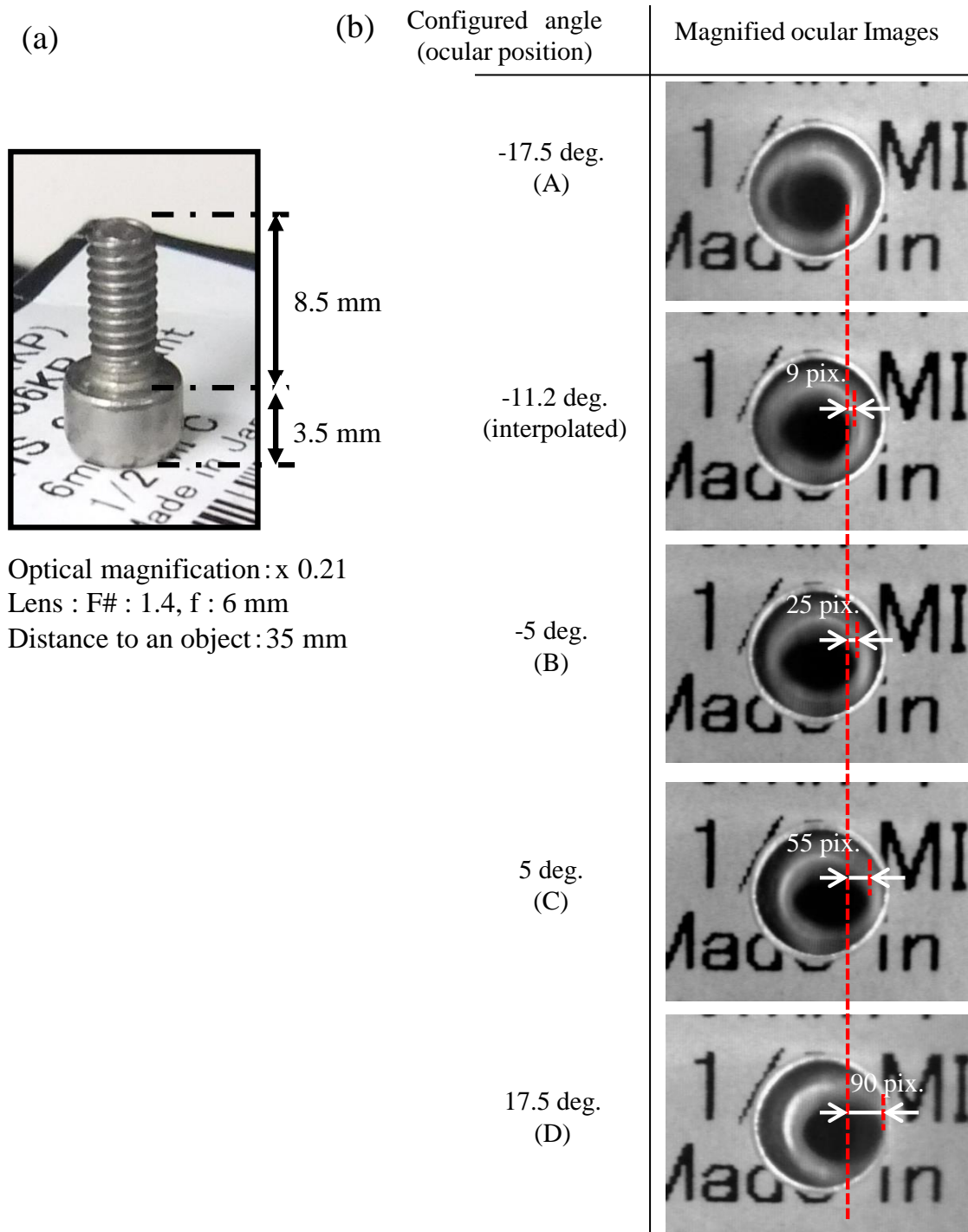


図 5-11 四眼撮像素子を用いた時の撮像画像のデモンストレーション。(a) 被写体 : 12mm の大きさの小さなネジ。(b) 試作した四眼撮像素子を用いたカメラで撮像素子した 4 つの画像 [20]

図 5-11 では、図 5-10 で用いたカメラに四眼撮像素子を適用して撮像した画像をデモンストレーションしている。被写体は高さが 12mm の小さなネジである。カメラとネジの間隔は 35mm である。ネジの先端の画素ずれは第一眼画像を基準に取ると、第二眼画像、第三眼画像、第四眼画像の画素ずれは、それぞれ 25 画素、55 画素、90 画素となった。さらに、画像処理により第一眼画像と第二眼画像の中間の角度の補間画像を生成し画素ずれは 9 画素を得た。この結果から、画素ずれは第一眼画像から第四眼画像の間で連続的に生成することが十分可能であることを確認した。

5-6-2 視差による画素ずれ量の評価

試作した多眼撮像素子で撮像した画像の画素ずれを評価した。図 5-12 に焦点距離からの被写体距離を横軸に画素ずれ量を縦軸に示す。点線は同じカメラレンズを用いた場合の計算値であり、実線が試作した多眼撮像素子を用いたカメラから被写体の距離を変えながら測定した画素ずれ量を示している。被写体として黒背景に白い四角のチャートを用意し、その白い四角の二本の縦の端の水平方向への画素ずれ量の平均値を画素ずれ量として評価した。その結果、計算値と実測値が一致した。四眼撮像素子の画素ずれ量は二眼撮像素子の画素ずれ量の約 1.5 倍大きいことを確認できる。これは二眼撮像素子の画像への平均的な入射角度が約 $\pm 11^\circ$ 、四眼撮像素子の第一眼画像と第四眼画像の平均的な入射角度がそれぞれ -17° 、 $+17^\circ$ であり、その比率が 1.5 であることと一致しており設計と試作が一致していることを示している。また、第二眼画像と第三眼画像を用いることで、二眼撮像素子より 0.6 倍短い基線長のステレオ画像を提供することもできる。実測値と計算値のずれが少しあるが、測定誤差の範囲と考える。

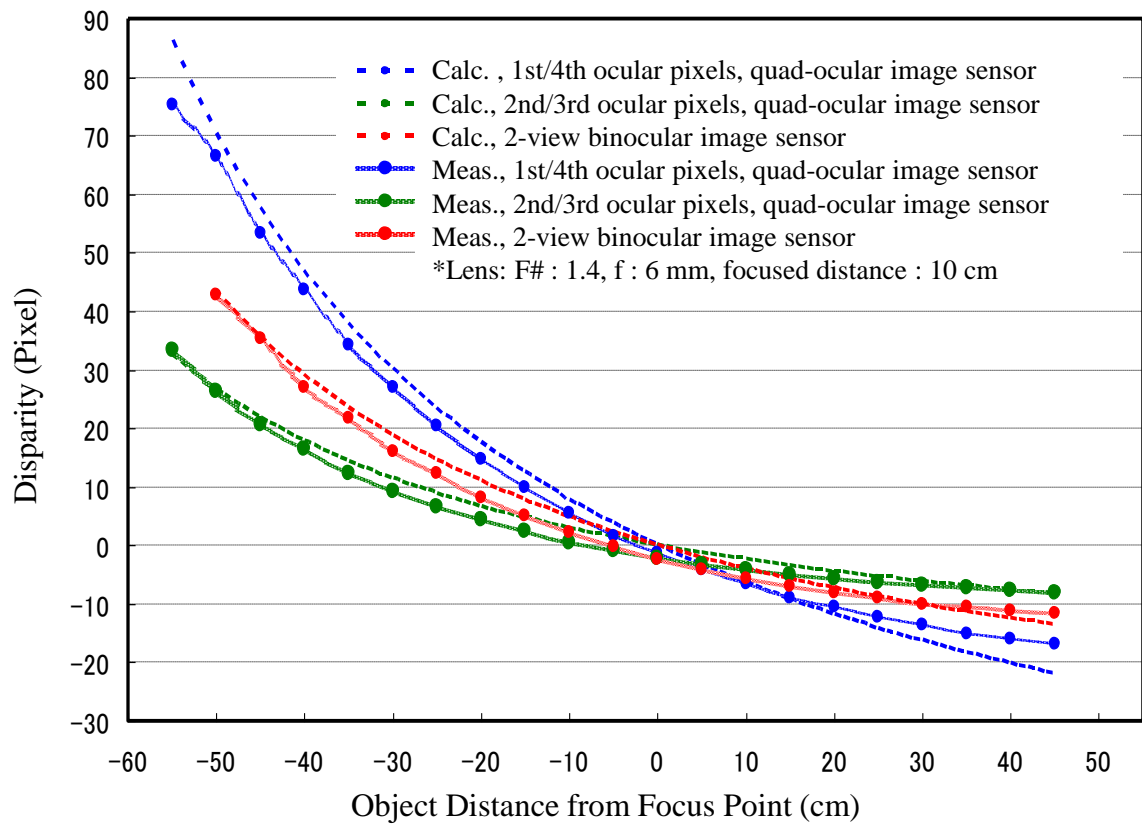


図 5-12 二眼撮像素子と四眼撮像素子を用いた場合での被写体までの距離に対する計算で得られる画素ずれ量と実測で得られる画素ずれ量 [20]

5-7 考察

研究した撮像素子を用いてステレオカメラの基線長を調整するために、5-4 節で示した補間画像による信号処理は有効である。しかし、図 5-7 で示したように補間画像の角度分解能は撮像素子の複眼の数により制限される。より高い角度分解能を得るために、複眼の数を増やすべきである。そのために 2 つのアプローチがあると考えられる。ひとつは画素サイズを小さくすることである。この場合、3D クロストークがこの研究で示されたものより大きくなる。なぜなら、画素サイズが波長以下に近づくためである。このため、波長以下のサイズの画素に完全に分離し、集光するサブ波長集光素子の実現が必須である。もう一つのアプローチはより分厚い層間膜と大きな曲率半径のビームスプリッタを実現することである。一般的に $20\mu\text{m}$ を超える厚い層間膜を半導体ウェハ内の高さばらつきを抑えながら形成することは製造的に難易度が高い。この課題を解決するために、平坦な薄膜を多層に形成することがひとつの解決方法である。そのような厚膜かつ平坦な層間膜を形成するプロセス技術は将来の多眼の撮像素子に適用されるべきである。

5-8 結言

本節では、入射角度に応じて光を分離するオンチップのビームスプリッタと画素に高効率に画素毎に集光させるパターン形成されメタマイクロレンズ(層内デジタルマイクロレンズ:iDML)を組み合わせたマイクロ光学素子を協調設計し試作した多眼撮像素子を外部の光学素子が不要でありながらカメラレンズがひとつでも立体撮像できるカメラに向けて研究した。それにより、基線長を様々な使用者に合わせて最適な長さに設定できる。厚く曲率半径の大きいビームスプリッタは複数の画素列をまたがっており、アクリルの複数回の積層とドライエッチで実現した。SiN を用いた iDML は最小線幅と最小線間隔が 100nm で集積された。一方、その細い溝には低粘度のアクリルでボイドなく埋めることで光学特性がばらつくことなく実現できた。

二種類のステレオカメラ用の撮像素子を設計、試作し撮像結果をデモンストレーションした。ひとつは二眼撮像素子で、もうひとつは四眼撮像素子である。二眼撮像素子は 3D クロストークが 6%、入射角度 15° ではピーク感度を持ち従来の 2D 撮像素子の感度比で 2 倍を実現し、分離特性があり光学損失が少ない二眼撮像素子を実現した。もう一つの四眼撮像素子は 3D クロストークが 7%、2D 撮像素子のピーク感度比 3.8 倍と同様に分離特性と低い光損失を実現した。さらに、各画素が持つ分離特性以上に視点の数を増やすために、信号処理によりカメラレンズの開口範囲内で任意の水平方向の視点の補間画像を生成できる補間式も示した。デモンストレーションとして、四眼撮像素子の画像を用いて補間画像を示し基線長が任意に変えられるステレオカメラに適用できる可能性を示した。任意に基線長を変えることにより、ステレオカメラ特有の 3D 映像酔いに対して、各個人に最適な立体感を提供できることが可能になりより快適に微小物体を立体的に観察できるようになる可能性を示した。

参考文献

- [1] H. Rosas, *Perception and Reality in Stereo Vision: Technological Applications, Advances in Stereo Vision*, InTech, 2011.
- [2] K. L. Kroeker, "Looking beyond stereoscopic 3D's revival," In *Communications of the ACM* **53**(8), pp. 14-16, 2010.
- [3] A. F. Durrani, G. M. Preminger, "Advanced endoscopic imaging: 3-D laparoscopic endoscopy," *Surg. Technol. Int.* III, pp. 141-147, 1994.
- [4] Roger Y. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses," *IEEE J. Robot. Autom.*, vol. 3, no. 4, pp. 323-344, 1987.
- [5] M. Okutomi, and T. Kanade, "A multiple-baseline stereo," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 15, no. 4, pp. 353-363, 1993.
- [6] M. T.M. Lambooi, W. A. IJsselsteijn, and I. Heynderickx, "Visual discomfort and visual fatigue of stereoscopic displays: a review," *J. Imaging Sci. Technol.*, vol. 53, no. 3, pp. 30201-1-30201-14, 2009.
- [7] Q. Wei, "Converting 2D to 3D: A survey," Delft University of Technology, The Netherlands, Project Report, 2005.
- [8] T. Collins, and A. Bartoli, "3D reconstruction in laparoscopy with close-range photometric stereo," *Med. Image Comput. Comput.-Assist. Interv.*, pp. 634-642, 2012.
- [9] A. Goshtasby, and W. A. Gruver, "Design of a single-lens stereo camera system," *Pattern Recognition*, vol. 26, no. 6, pp. 923-937, 1993.
- [10] D. Lee, and I. Kweon, "A novel stereo camera system by a biprism," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 16, no. 5, pp. 528-541, 2000.
- [11] W. Woo, N. Kim, and Y. Iwadate, "Stereo imaging using a camera with stereoscopic adapter," *IEEE Sys. Man. Cybern.*, vol. 2, 2000.
- [12] T. Adelson, and J. Y. A. Wang, "Single lens stereo with a plenoptic camera," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 14, no. 2, pp. 99-106, 1992.

- [13] R. Ng, M. Levoy, M. Bredif, G. Duval, M. Horowitz, and P. Hanrahan, "Light field photography with a hand-held plenoptic camera," *Comput. Sci. Tech. Report 2.11*, 2005.
- [14] M. Hosseini Kamal, B. Heshmat, R. Raskar, P. Vandergheynst, and G. Wetzstein, "Tensor low-rank and sparse light field photography," *Comput. Vis. Image Underst.*, vol. 145, pp. 172–181, 2016.
- [15] R. Ng, "Fourier slice photography," *ACM Trans. Graph.*, vol. 24, no. 3, p. 735, 2005.
- [16] A. Wang, P. Gill, and A. Molnar. "Light field image sensors based on the Talbot effect," *Appl. Opt.*, vol. **48**, no. 31, pp. 5897-5905, 2009.
- [17] S. Koyama, K. Onozawa, K. Tanaka, and Y. Kato, "A 3D vision 2.1 Mpixel image sensor for single-lens camera systems," *Dig. Tech. Pap. IEEE Int. Solid State Circuits Conf.*, 2013.
- [18] K. Toshikiyo, T. Yogo, M. Ishii, K. Yamanaka, T. Matsuno, K. Onozawa, and T. Yamaguchi, "A MOS Image Sensor with Microlenses Built by Sub-Wavelength Patterning," *Dig. Tech. Pap. IEEE Int. Solid State Circuits Conf.*, 2007.
- [19] K. Onozawa, K. Toshikiyo, T. Yogo, M. Ishii, K. Yamanaka, T. Matsuno, D. Ueda, "A MOS image sensor with a digital-microlens," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. **55**, no. 4, pp. 986-991, 2008.
- [20] S. Koyama, K. Onozawa, K. Tanaka, S. Saito, S. M. Kourkouss, and Y. Kato, "Multiocular image sensor with on-chip beam-splitter and inner meta-micro-lens for single-main-lens stereo camera," *Opt. Express*, vol. 24, no. 16, pp. 18035–18048, Aug. 2016.

第6章 結言

6-1 本研究の成果

本研究では、冗長になった画素を多波長撮像や多機能化へ振り分け、撮像素子を高機能化することに取り組んだ。単純に高機能化するのではなく、同時に、カメラを小型化するため、カメラのレンズや光学フィルタなどの光学部品の機能を撮像素子の上に微小な光学系に実装することで高機能化の実現を目指した。研究成果は下記の2点である。

(1) フォトニックカラーフィルタを用いた可視光と近赤外光を同時撮像する撮像素子の提案と昼夜兼用撮像の実証

撮像素子への入射光の情報を増やすため、容易に透過光の波長を設計できるフォトニックカラーフィルタの原理検証と、その応用としての可視光と近赤外光を同時撮像する撮像素子を研究した。さらに、幅広い色温度に対応するため、フォトニックカラーフィルタの可視光の帯域を広げる欠陥層を2つ導入し、さらに可視光と狭帯域の近赤外光を透過する近赤外光規格化フィルタを設計した。その結果、幅広い色温度に対応できるカメラへ応用可能な可視光と近赤外光を同時撮像する撮像素子の可能性を示した。

(2) オンチップレンズ素子を用いた多眼撮像素子の提案と、単眼レンズを用いたカメラへ撮像素子を応用し立体撮像の実証

撮像素子に実装するオンチップの微小光学素子で、高効率に入射光の入射角度に応じて光を分離することを目指し、微小な光学素子を撮像素子上に搭載した多眼撮像素子を提案した。撮像素子の最表面にはカメラレンズからの入射光を入射角度に応じて振り分ける。分離する光情報が開口の右側と左側の2つであれば、単眼レンズでありながらステレオカメラに応用できる。さらに分離する数を増やせば、ライトフィールドを撮像するカメラにも応用できる。本研究

では分離数を 2 と 4 の多眼撮像素子を試作し、2 つ、または、4 つの視点の異なる撮像を行い、立体視を実証した。

6-2 今後の展望

撮像素子は画素の微細化に伴い、多画素化してきた。冗長化した画素に可視光とは異なる様々な情報を取得することで新しい応用が可能になることの一例を本研究で実証した。今後、画素の微細化がさらに進めば、カメラは新しい形へ進化する可能性があると考えられる。画素の微細化が進むことで、同一撮像面積では画素数が増加する。一方、同一画素数で考えると、撮像領域面積が小さくできる。単純に撮像領域を小さくすると、カメラの構成が同一であればレンズを小型化する必要がある。別部品である必然性がなくなり、カメラレンズと撮像素子を一体化するほうが実装の複雑化を避ける意味でも必然となる可能性がある。その場合、カメラが従来とは異なるサイズになるほど小さくなる。一体化すると、カメラの部品点数が劇的に減り、コストが低減できる可能性が高い。価格が下がると、様々な新しい用途での活用が開始し、新しい世の中が実現すると予想する。

毎年 1 兆個以上のセンサをネットワークで相互に接続し、社会問題の解決に活用しようとする「Trillion Sensor Universe」が提唱されている[1]。現在のセンサの個数は 100 億個と推計されており、100 倍の数のセンサが活用されることを意味する。様々なセンサがあるが、カメラは画像を取得する有力なセンサの一つである。このような膨大な数のセンサのネットワーク網を実現するには、様々な課題を乗り越える必要がある。数の普及に影響の最も大きい要因はコストと考える。乱暴に試算すると同等の性能のものが、現在価格の 1/100 になれば、実現に近づく。現在のカメラは 2-2 節で解説したように、光学系の構成部品が多く、それらを組み合わせて実装するためのコストも必要である。例えば、外部光学部品としてのカメラレンズが不要になるチップ型のカメラを実現すれば、コストは大幅に下がる。つまり、 $1\mu\text{m}$ 以下の微細な画素で結像でき、かつオンチップでレンズ実装できれば、チップ型のカメラが実現する可能性がある。そのため、今後は、5 章の研究で示したオンチップレンズの発展によるチップ型カメラの取り組みが多くなる可能性もある。ただし、 $1\mu\text{m}$ 以下の微細画素に結像することは、回折限界などの課題を解決する新技術が必要になる。また、光

学フィルタも撮像素子に組み込まれる必要があり、オンチップフィルタ技術が活用される必要であり、本論文での3章、4章で述べたフォトニックカラーフィルタ技術を応用したオンチップフィルタ技術で解決できる可能性がある。このようにカメラの小型化と、それに基づく低価格により新しいセンサネットワークの世の中への足がかりになり、新たな価値が創出されていくと期待できる。

参考文献

- [1] J. Bryzek, "Roadmap for the trillion sensor universe," Berkeley, CA, 2013.

謝辞

奈良先端科学技術大学院大学へ入学する機会を与えて頂き、また、社会人と学生の両立に温かいご理解を頂きながら、本論文の完遂に多大なるご指導、ご鞭撻を賜りました奈良先端科学技術大学院大学 太田淳教授に厚く御礼申し上げます。本論文を執筆するにあたり、的確なご指導、ご高配を賜りました、浦岡行治教授、大門寛教授、細川陽一郎教授に深く感謝申し上げます。

本研究の機会を与えていただくと共に、多大なるご指導、ご鞭撻を賜りましたパナソニック(株)オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社技術本部センシングソリューション開発センターセンター長 田中毅博士、センシングシステム開発部部長 小田川明弘博士に深く感謝申し上げます。

本研究を始めるにあたって、入社当時から本学への入学のご推薦まで終始温かい激励、ご指導をいただきましたパナソニック液晶ディスプレイ(株)取締役加藤剛久博士に深く感謝申し上げます。

本研究を始める入社以前から御縁が有り、入社以降は、論文執筆、発表の基本からご指導頂きました嶋田恭博博士に深く感謝申し上げます。

本研究の共同研究、論文執筆、発表の基本、研究者としての心得まで、幅広く御指導頂きました廣瀬裕博士に深く感謝申し上げます。

また、フォトニックカラーフィルタ技術、並びにデジタルマイクロレンズ技術を開発するにあたり長期に渡り的確なご指導、叱咤激励いただいた小野澤和利氏、田中圭介博士に深く感謝申し上げます。

また、同じくフォトニックカラーフィルタ技術、並びにデジタルマイクロレンズ技術の共同研究者の藤原和夫氏、松野年伸博士、稲葉雄一博士、笠野真弘氏、薄田学博士、村田隆彦氏、齋藤繁氏に深く感謝申し上げます。

また、上記技術の評価系設計、実験データ解析に深くご支援ご協力頂いた六車充氏、コルコス・M・サヒム氏に深く感謝申し上げます。

最後に、本研究を遂行するにあたり、これまで自分のことより子供のことを優先して考え、見守ってくれてきた両親に感謝します。そして、週末、長期休暇などに、本論文の執筆に集中するために、家族行事に参加できなかったにも

かかわらず、応援・叱咤激励し、最後まで支えてくれた妻の理恵子、毎日応援の言葉をかけてくれた長女の千尋、笑顔で活力を与えてくれた次女の千陽に感謝します。

研究業績一覽

学術論文

1. **S. Koyama**, Y. Inaba, M. Kasano, and T. Murata: “A Day and Night Vision MOS Imager With Robust Photonic-Crystal-Based RGB-and-IR” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 55, no. 3, pp.754-759, 2008
2. **S. Koyama**, K. Tanaka, M. Muguruma, M. Usuda, K. Fujiwara, T. Matsuno, Y. Hirose and Y. Shimada: “A day and night MOS imager spectrally adjusted for a wide range of color temperatures” *Proc. SPIE 7249, Sensors, Cameras, and Systems for Industrial/Scientific Applications X, 72490S* (January 27, 2009)
3. **S. Koyama**, K. Onozawa, K. Tanaka, S. Saito, S. M. Kourkouss, and Y. Kato, “Multiocular image sensor with on-chip beam-splitter and inner meta-micro-lens for single-main-lens stereo camera,” *Opt. Express*, vol. 24, no. 16, pp. 18035–18048, Aug. 2016.

参考論文

1. **S. Koyama**, M. Takayama, and H. Nozawa: "Circuits simulation of switch devices furnished with gain cell combined to FeRAM" *INTEGR. FERROELECTR.* vol. 40, iss. 1-5, pp.113-121, 2001
2. **S. Koyama**, Y. Kato, T. Yamada, and Y. Shimada: “Fast Pulse Driving of Ferroelectric SBT Capacitors in a Nonvolatile Latch” *IEICE trans. Electron*, vol.E89-C, no.9, pp.1368-1372, 2006
3. **S. Koyama**, Y. Kato, T. Yamada, and Y. Shimada: “Improvement in Non-Destructive Readout Reliability of FeRAM with Asymmetrical Programming” *INTEGR. FERROELECTR.* vol. 82, iss.1, pp.81-90, 2006
4. Y. Kato, Y. Kaneko, H. Tanaka, K. Kaibara, **S. Koyama**, K. Isogai, T. Yamada, and Y. Shimada: “Overview and Future Challenge of Ferroelectric Random Access Memory Technologies” *Japanese Journal of Applied Physics* Vol. 46, No.

4B, 2007, pp. 2157–2163

5. M. Takayama, **S. Koyama** and H. Nozawa: “New Approach on Logic Application of Ferroelectric Random Access Memory Technology” Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 41 (2002) pp. 6844–6847, Part 1, No. 11B, Nov.2002

学会発表、講演、著作

1. **S. Koyama**,” フォトニックカラーフィルタ技術による昼夜兼用 MOS イメージセンサ”, 日本光学会講演[招待], 2008
2. **S. Koyama**, K. Onozawa, K. Tanaka, Y. Kato: “A 3D Vision 2.1Mpixel Image Sensor for Single-Lens Camera Systems” 2013 IEEE Int.Solid-State Circuits Conf. (ISSCC) Dig. Tech. Papers, pp.492 -493 2013
3. 香山信三、小野澤和利、田中圭介、加藤剛久：「A 3D vision 2.1Mpixel image sensor for single-lens camera systems」第 148 回次世代入力ビジョンシステム部会定例会.
4. **S. Koyama**, Y. Kato, T. Yamada, and Y. Shimada: “Improvement of Imprint Characteristic using Asymmetric Programming in a NDRO FeRAM” IEICE Electron. Vol.2 72 2003-09-10, Feb. 2003(in Japanese)
5. **S. Koyama**, Y. Inaba, K. Tanaka, M.Kasano, T. Murata, Y. Kato and K. Onozawa: "A day-and-night MOS imager with robust photonic-crystal-based RGB-and-IR integrated color filters" *ITE Tech. Report* 31 No.43 (2007) pp.29-32, IST2007-85 [in Japanese].
6. 香山信三、田中圭介、廣瀬裕：”監視カメラ用昼夜兼用イメージセンサ”, Panasonic technical journal vol.54, no.4, Jan. 2009
7. 香山 信三 加藤 剛久 山田 隆善 嶋田 恭博: “非対称分極書き込みによる非破壊読み出し型強誘電体メモリのインプリント耐性改善” 電子情報通信学会技術研究報告：信学技報 104(134) SDM2004-35. 1-5 2004.6.21.
8. **S. Koyama**, Y. Kato, T. Yamada and Y. Shimada: “IMPROVEMENT IN READOUT RELIABILITY OF A NONDESTRUCTIVE READOUT FeRAM

- BY ASYMMETRICAL PROGRAMMING”, Future of Electron Devices, 2004. International Meeting for, Jul. 2004, pp.125-126,
9. T. Yamada, Y. Kato, S. Koyama, and Y. Shimada, “Long-Term Stabilization of Sense Signals in a Non-Destructive Readout FeRAM by Intentional Modification of the Polarization Hysteresis Curve for Low Voltage Applications”, Extended Abstracts of the 2003 International Conference on Solid State Devices and Materials, Tokyo, 2003, B-1-4 pp. 34-35
 10. 嶋田恭博、内山潔、田中圭介、海原一裕、加藤剛久、山田隆善、香山信三、藤井英治、平野博茂、林慎一郎、那須徹、野間淳史: 「3次元立体構造を有する大容量FeRAMの製造技術の確立」新エネルギー・産業技術総合開発機構 平成14年度課題設定型産業技術開発費助成事業開発成果報告書 平成16年3月.
 11. 西山伸彦, 赤津洋介, 奥寛雅, 北野和俊, 香山信三, 豊田英弘, 廣瀬敏也, 福岡隆: 「光テクノロジーロードマップ報告書 自動車フォトニクス」一般財団法人光産業技術振興協会, 2017.

日本登録特許

1. 野澤 博, 香山 信三, 藤森 敬和, “スイッチマトリックス回路、論理演算回路およびスイッチ回路,” 第3, 553, 554号, 2003.
2. 香山 信三, 加藤 剛久, “論理合成装置、回路設計方法及びプログラム,” 第4, 142, 653号, 2006.
3. 香山 信三, 山田 隆善, 加藤 剛久, “半導体装置,” 第4, 182, 059号, 2006.
4. 香山 信三, 小野澤 和利, “撮像装置,” 第4, 571, 179号, 2009.
5. 村田 隆彦, 山口 琢己, 香山 信三, 春日 繁孝, 山田 隆善, “ノイズ低減回路,” 第4, 794, 387号, 2008.
6. 香山 信三, 村田 隆彦, 吉田 真治, 東條 友昭, 井上 謙一, “可変容量値検出回路およびその駆動方法,” 第4, 813, 997号, 2008.

7. 笠野 真弘, 香山 信三, “固体撮像装置及びカメラ,” 第 5,017,193 号, 2010.
8. 香山 信三, “固体撮像素子及びカメラ,” 第 5,074,106 号, 2008.
9. 香山 信三, 小野澤 和利, 加藤 剛久, “撮像装置および色温度算出方法,” 第 5,432,075 号, 2012.
10. 小野澤 和利, 加藤 剛久, 香山 信三, “撮像装置,” 第 5,485,004 号, 2011.
11. 大竹 悠介, 森 三佳, 香山 信三, 沖野 徹, “固体撮像装置,” 第 5,793,688 号, 2010.
12. 香山 信三, 小野澤 和利, “固体撮像装置,” 第 5,950,128 号, 2013.

米国登録特許

1. Hiroshi Nozawa, Shinzo Koyama, and Yoshikazu Fujimori, "Switch matrix circuit, logical operation circuit, and switch circuit," U.S. Patent No. 6,903,572. 7 June 2005.
2. Hiroshi Nozawa, Shinzo Koyama, Masao Takayama, Yoshikazu Fujimori, "Coding-decoding device and method for conversion of binary sequences," U.S. Patent No. 7,039,847. 2 May 2006.
3. Hiroshi Nozawa, Shinzo Koyama, and Yoshikazu Fujimori, "Switch matrix circuit, logical operation circuit, and switch circuit," U.S. Patent No. 7,218,142. 15 May 2007.
4. Takahiko Murata, Takumi Yamaguchi, Shinzo Koyama, Shigetaka Kasuga, Takayoshi Yamada, "Noise reduction circuit." U.S. Patent No. 7,589,585. 15 Sep. 2009.
5. Kazuhiro Kaibara, Shinzo Koyama, Yoshihisa Kato, "Semiconductor memory and driving method for the same," U.S. Patent No. 7,629,635. 8 Dec. 2009.

6. **Shinzo Koyama**, "Solid-state imaging device and signal processing method," U.S. Patent No. 8,035,710. 11 Oct. 2011.
7. Masahiro Kasano, **Shinzo Koyama**, "Solid-state imaging device and camera," U.S. Patent No. 8,227,883. 24 Jul. 2012.
8. Yusuke Otake, Mitsuyoshi Mori, **Shinzo Kouyama**, Toru Okino, "Solid-state image sensor," U.S. Patent No. 8,243,176. 14 Aug. 2012.
9. **Shinzou Kouyama**, Kazutoshi Onozawa, Yoshihisa Kato, "Imaging apparatus and method of calculating color temperature," U.S. Patent No. 9,148,633. 29 Sep. 2015.
10. **Shinzou Kouyama**, Kazutoshi Onozawa, "Solid-state imaging apparatus," U.S. Patent No. 9,466,626. 11 Oct. 2016.