

微細加工技術の発展により光の波長程度の微小光学素子を容易に作製できるようになってきました。このため、フォトニック結晶やメタマテリアルなど興味深い新しい光学素子が盛んに研究開発されています。一方、古くから開発されている微小光学素子として、微小なレンズをアレイ化したマイクロレンズが挙げられます。マイクロレンズは、その有用性からイメージセンサーや液晶プロジェクター用の液晶パネルなどさまざまなデバイスで利用されています。これらのデバイスにおいてマイクロレンズの機能は、個々の画素に光を集光させ、光の利用効率を向上させるというシンプルなものです。しかしながら、画素の微細化や周辺の光学系の小型化などに伴い、マイクロレンズにも高度な設計が要求されています。

本稿では、イメージセンサー用のマイクロレンズ技術について紹介したいと思います。この中でイメージセンサーの画素の微細化や周辺の光学系の小型化により、どのようなマイクロレンズが必要になっているかについて説明します。そして最後に、筆者らが開発した新しいタイプのマイクロレンズであるデジタルマイクロレンズ (DML: digital microlens) について紹介させていただきます¹⁾。

携帯電話カメラでより綺麗に写真を撮るために、イメージセンサーの画素数は急激に増加しています。最新の携帯電話では、8メガピクセルのイメージセンサーが搭載されたものも発売されています。このような携帯電話カメラには、イメージセンサーだけでなく、レンズ光学系も含めたカメラ光学系の小型、薄型化が図られています。図1に、このようなカメラ光学系の模式図を示します。まずイメージセンサーですが、シリコン基板上にフォトダイオードが形成され、その上に配線層が形成されます。この配線層は、隣の画素に光が漏れないように、光遮

光層としても機能します。そしてその上に、光をRGBに分離するためのカラーフィルター (本稿の図中では省略させていただいています) とマイクロレンズが形成されています。フォトダイオード上のマイクロレンズはレンズ特有の曲面を形成するため、レジストを加熱・軟化させて球面上にした後にドライエッチングする方法など、独特な作製プロセスが用いられます。

このようなカメラ光学系を薄型化させるためには、対物レンズとイメージセンサーの距離を短くする必要があります。この場合、イメージセンサーの周辺部の画素における光の入射角 (図1の光線B) は、中央部 (図1の光線A) よりも大きくなります。このような周辺部の斜入射に対しても光をフォトダイオードに集光させるため、現在、マイクロレンズのピッチを画素のピッチよりも小さくする、いわゆるシュリンクということが行われています。これは、マイクロレンズの形状を均一に作製するのは比較的容易ですが、イメージセンサーの画素の位置に応じて変化させることが難しいためです。

また、マイクロレンズの集光特性も重要になります。現在、イメージセンサーの画素サイズは $1.75\ \mu\text{m}$ のものが量産化されています。光を効率よくフォトダイオードに入射させるためには、このサイズにおいてレンズ形状を理想曲面に近づける必要があります。一方、光の集光径は、例えば $NA=0.4$ のような高NAのレンズを作製しても、回折限界により $1\ \mu\text{m}$ 程度までしか小さくすることができませ

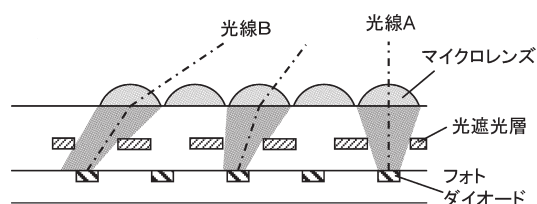


図1 イメージセンサー上のマイクロレンズ。

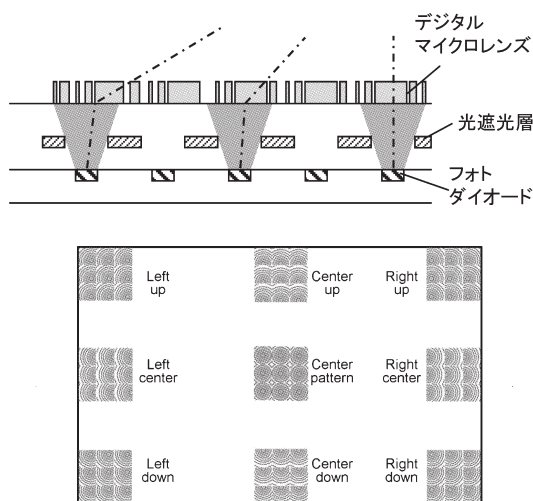


図2 デジタルマイクロレンズ (DML) の概念図。

ん。したがって、異なる入射角に対応した上で、集光径を回折限界まで小さくするマイクロレンズ設計が必要となり、非常に難しいことがわかります。

このようにイメージセンサーの高解像度化に伴いマイクロレンズへの要求が厳しくなっています。一方で、イメージセンサーの画素の微細化技術は、ナノレベルの微小光学素子の作製に利用することもできます。特に可視の光の波長は440~640 nmであるため、サブミクロンの微細構造を用いて進行方向を操ることも検討できます。図2は、微細構造のピッチの粗密により構成するDMLを用いた例を示します。DMLは、ピッチの粗密により画素上の実効屈折率の分布を変え、レンズ効果をもたせる技術です。DMLでは、微細構造のピッチなどを変えることでレンズの特性を容易に設計・作製することができます。さらに、従来のマイクロレンズでは画素ごとにレンズの設計を変えることは難しかったのですが、DMLではフォトリソグラフィーにより屈折率分布を二次元的に自由に設計できます。このため、個々の画素に最適なレンズ設計を行うことができる

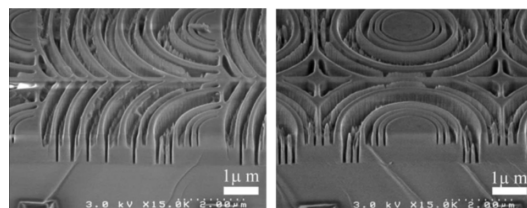


図3 周辺部と中央部におけるDMLのSEM写真。

のです。実際にイメージセンサー上に作製したDMLのSEM写真を図3に示します。従来のマイクロレンズでは45°の入射光に対して30%まで感度が低下してしまいましたが、このDMLでは60%の感度維持が可能となりました。

以上、微小光学素子としてイメージセンサー用のマイクロレンズについて紹介しました。最初に述べたように、マイクロレンズアレイは非常にシンプルな光学素子ですが、多方面へ応用されています。また、レンズ特性を向上させるため、レンズ材料や作製プロセスについてもまだまだ開発が行われています。これらの技術は独特のものも多く非常に興味深いのですが、今回は割愛させていただきました。デジタルマイクロレンズについては、現在の半導体微細フォトリソグラフィーを利用して微小光学素子を作製する技術として紹介させていただきました。今後、半導体微細フォトリソグラフィーを活用した微小光学素子の開発が進むと考えています。本稿が、微小光学素子の開発に従事されている開発グループの何らかの参考になれば幸いです。

(パナソニック(株) 山中一彦)

文 献

- 1) K. Onozawa, K. Toshikiyo, T. Yogo, M. Ishii, K. Yamanaka, T. Matsuno and D. Ueda: "A MOS image sensor with a digital-microlens," IEEE Trans. Electron Dev., **55** (2008) 986-991.