

# シリコンマイクロレンズの開発

前野 仁典  
小谷 恭子

佐々木 浩紀  
関川 亮

志村 大輔  
高森 毅

上川 真弘

インターネットの普及とブロードバンド化により、ネットワークのトラフィック量が増加の一途をたどっている中、光通信も長距離幹線系から都市内を結ぶメトロネットワークや加入者系のFTTHなど、中・短距離に広がり始めている。メトロネットワークなどで光信号を送受信するための光モジュールは、中継装置の設置スペースや設備投資の削減のため、小型化と低価格化への要求がますます高くなっている。

光モジュールの小型化と低価格化には、使用する部品の小型化、低価格化と部品実装の簡略化が必要とされる。シリコンマイクロレンズは、シリコン微細加工技術で作る超小型のレンズで、表面実装技術を用いてV溝基板上に自動実装可能となるため、光モジュールの光学系を小さくするとともに実装コストを大幅に削減可能である。この報告では、シリコンマイクロレンズの特徴と製造方法、光学的な特性を示し、シリコンマイクロレンズを使用した光モジュールについて紹介する。

## シリコンマイクロレンズの特徴

シリコンマイクロレンズの外形を写真1に示す。中央の円筒部分の同心円状に見える部分がレンズで、円筒部から左右に張り出したパー状の部分はレンズ実装用の取り扱部である。レンズ部の直径は125  $\mu\text{m}$ 、パーの長さは500  $\mu\text{m}$ 、厚さは100  $\mu\text{m}$ である。

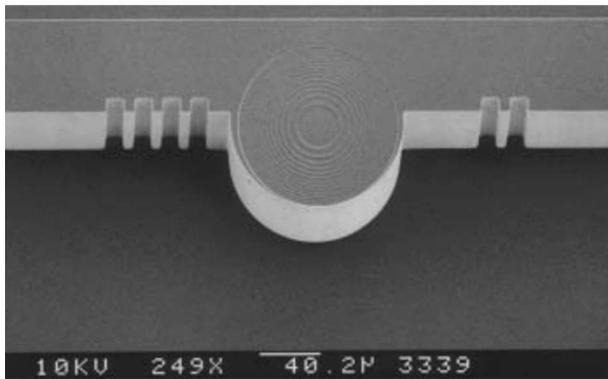


写真1 シリコンマイクロレンズの外形形状

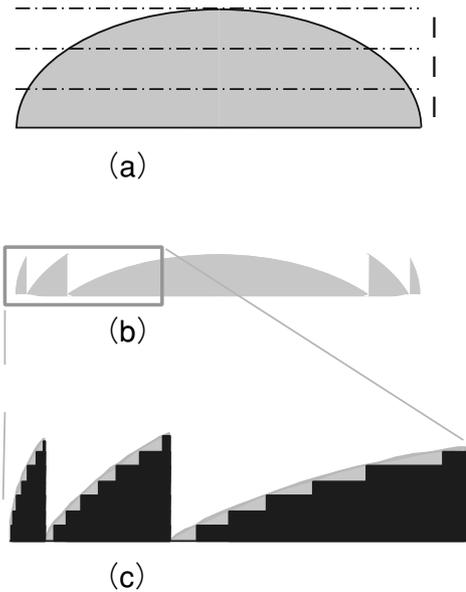


図1 回折光学素子の原理

シリコンマイクロレンズのレンズ部には回折光学素子を採用した。回折光学素子とは通常の屈折型レンズ（図1 (a)）を光軸方向に関して一定の厚さで輪切りにしたフレネルレンズ（図1 (b)）である。特に、輪切りにする厚さを、光の1波長分の位相遅れに相当するように設定したものが、回折光学素子である。図1 (c) に示すように、レンズ曲面を階段形状で近似したものが、回折光学素子の一般的な形態としてよく知られている。

材質はLSI製造に使用されるものと同様のシリコンの単結晶基板である。シリコン基板は光通信に使用される光の波長領域（1.3  $\mu\text{m}$ 、1.55  $\mu\text{m}$ など）では透明であり、ガラスよりも大きな屈折率を持つ。シリコンをレンズ基材として使用することで、既存のLSI製造技術を用いて容易にサブミクロン精度の微細加工が可能である。以上2点の特徴から、レンズの大きさや焦点距離を自由に設計、作製することができ、低価格で大量生産可能なレンズを提供することができる。

光モジュールは、LD (laser diode) から出た光をファ

イバに結合させて通信を行うために使用するデバイスであり、LDとファイバの間には光を効率良く結合するために、直径数mm程度レンズを挿入している。通常の光モジュールでは、レンズの焦点距離や大きさ、実装の制約により2~3cm程度の長さである。シリコンマイクロレンズの直径は通常のレンズの1/10以下であることと、回折光学素子を採用したことで、焦点距離を従来よりも大幅に短くすることが可能である。したがって、素子の小型化と焦点距離の短縮により、光モジュールの長さを通常の1/2程度に短くすることが可能となっている。

### シリコンマイクロレンズのコンセプト

シリコンマイクロレンズのコンセプトを図2に示した光モジュールの構成<sup>1) 2)</sup>を基に説明する。レンズの円筒部分は光ファイバの外形と同じ125 $\mu\text{m}\phi$ に加工されているため、V溝にレンズとファイバを配置するだけで、それぞれの光軸が一致し、最適な結合状態を得ることができる。LDは精密な表面実装装置によりレンズとファイバの光軸に沿うように配置されている。

従来の光モジュールの作製では、LDとレンズ、ファイバとの位置合わせをLDを光らせながらレンズとファイバを微動して行っていたため、モジュールの製造に長時間要していた。ここで示したコンセプトにより、光モジュールの部品点数を削減すると共に、製造時間を数十秒程度に短縮することが可能となる。

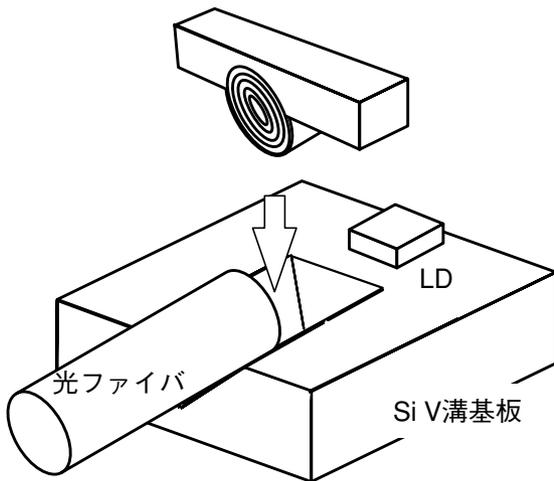


図2 シリコンマイクロレンズを用いた光モジュールのコンセプト

### シリコンマイクロレンズの作製

レンズ面の作製には、通常のLSI製造で使用されるフォトリソグラフィとエッチング技術を用いる。製造工程の一例を図3に示す<sup>3)</sup>。まず最初に、2段の階段を形成する

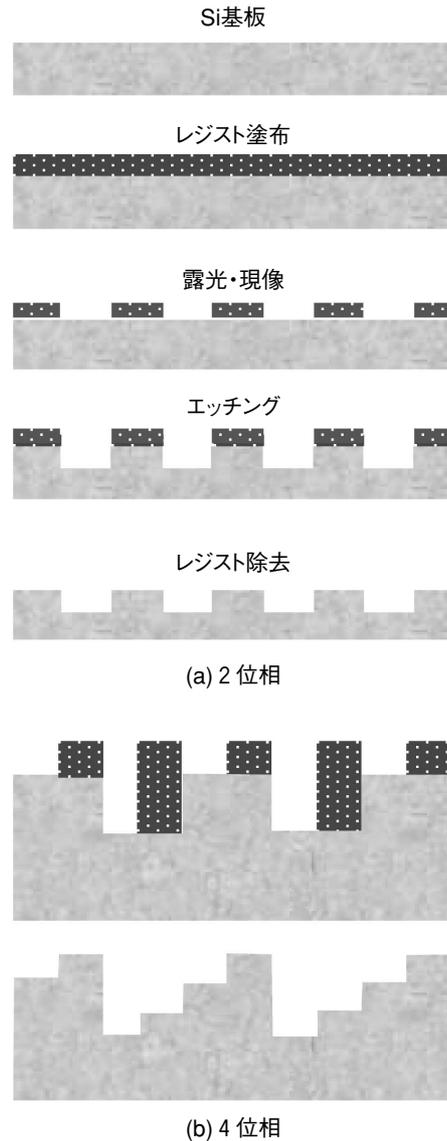
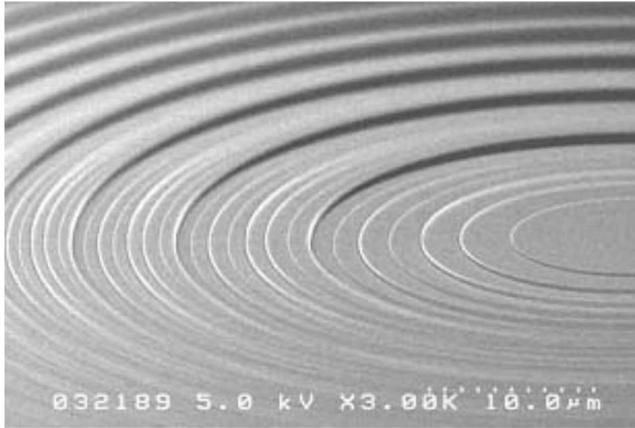
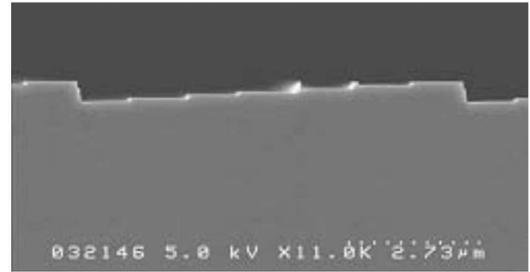


図3 回折光学素子の作製方法

ためのレジストパターンを形成する(図3(a))。このレジストをエッチングマスクとしてドライエッチングを行い、2段の階段形状を形成する(図3(b))。次に4段の階段を形成するためのレジストパターンを形成し、前述のようにエッチングを行い4段の階段形状の作製が完了する。このようなフォトリソグラフィとエッチングを数回繰り返すことで7段あるいは8段の階段で近似された回折光学素子が作製される。写真2はこのような方法で作製した7段の階段で構成された7位相シリコンマイクロレンズのレンズ部のSEM像である。写真2(a)はレンズ中心部の表面形状で、7段の階段を1周期として同心円状に広がっていることがわかる。写真2(b)は階段の断面形状で、1段の深さが約75nm、1段の幅が約1.1 $\mu\text{m}$ の部分を観察



(a)



(b)

写真2 7位相シリコンマイクロレンズ

した例である。1段の深さと幅は設計値との誤差が5%以内に作製されており、ほぼ設計通りの性能を示すことが予想される。

レンズ部の作製後、シリコンマイクロレンズの外形作製を行う。レンズのエッチング側壁の垂直性や平坦性、円筒部の加工精度などは、V溝への配置精度に大きく影響するため、サブミクロンの加工精度が必要となる。最近のMEMS作製技術の進歩により、高精度でシリコンを深くエッチングする手法が知られるようになってきた。

このようなシリコンディープエッチングの手法では、側壁の保護膜形成とシリコンエッチングを交互に行い、エッチング時のサイドエッチを低く抑さえ、垂直で平坦な側壁でエッチングを可能としている。この手法により、数十μmから数百μm程度のシリコンの深いエッチングが

可能となっている。

写真3はこの方法で作製したシリコンのエッチング側壁の形状を電子顕微鏡で観察した結果で、スカロップと呼ばれる凹凸が観察されるが、実用上十分な平坦性と垂直性が得られていることがわかる。

シリコンマイクロレンズの外形とレンズの位置関係を写真4に示す。レンズと円筒部の中心位置精度は0.2～0.3μm程度の誤差で、円筒部の直径も0.5μm程度の誤差で作製されている。

なお、ここで示した7位相シリコンマイクロレンズはSiSC MEMSファウンドリチームの協力により、SiSC試作ラインで作製した。

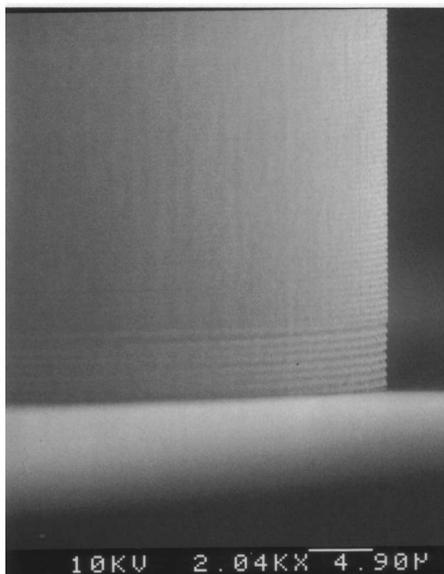


写真3 シリコンディープエッチングの側壁形状

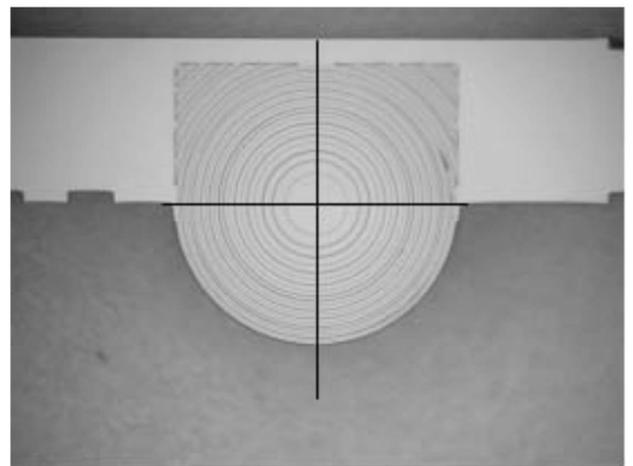


写真4 レンズ配置精度

### 光モジュールの作製

前項で示した製造誤差程度で作製したシリコンマイクロレンズを用いて光モジュールを作製する場合、LD-ファイバ間の結合効率をシミュレーションした結果は52%程

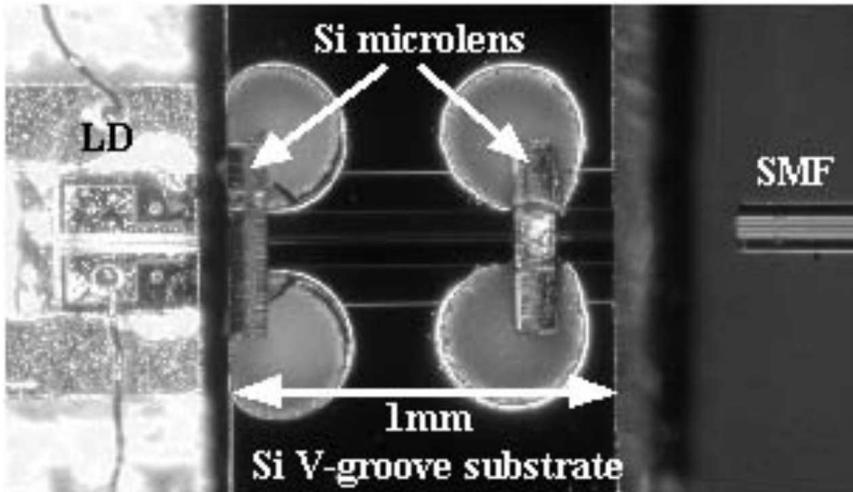


写真5 結合効率測定用サブマウント

度となる。部品配置誤差を考慮したモンテカルロシミュレーションによると、80%以上のモジュールが結合効率36%以上で作製可能であるという結果が得られている。

実際に作製したシリコンマイクロレンズを用いて性能確認を行った。1×2mm□のV溝基板状にLD用レンズとファイバ用レンズの2枚を実装、接着剤により固定し、レンズのみが搭載されたサブモジュールを作製し、写真5に示す構成で結合効率を測定した。図の中央部分にレンズを2枚搭載したサブモジュール、左にLD、右にファイバが配置され、LDから出た光がファイバに結合する構成となっている。結合効率は45%であり、前述のシミュレーション結果とほぼ一致している。メトロ系ネットワーク用光モジュールでは、結合効率は35%前後必要であることが知られており、今回作製した光モジュールでは、十

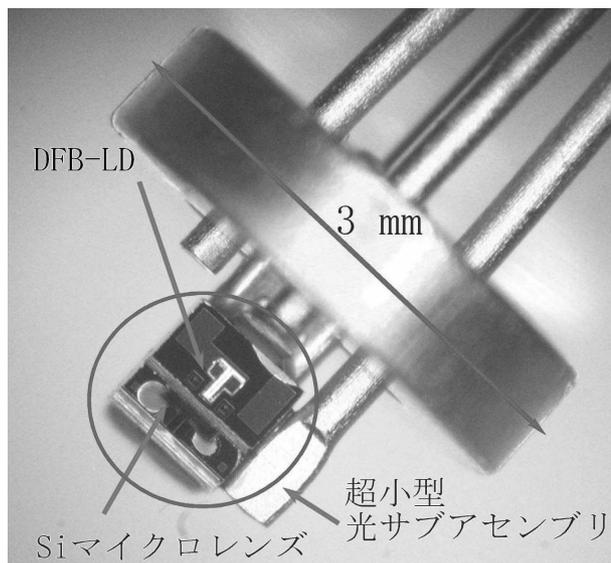


写真6 TO-CANパッケージに搭載した超小型サブマウント

分な特性を示すことを確認した。

写真6は既存のTO-CANにシリコンマイクロレンズを使用した例である。CANパッケージ内に小型光サブアセンブリを搭載しレーザモジュールを構成している。この小型サブアセンブリ上にはLDとシリコンマイクロレンズが搭載されている。従来、パッケージの外に別に実装されていたレンズが、シリコンマイクロレンズとLDを搭載した小型サブアセンブリを用いることで、小型パッケージ内に搭載が可能となった。そのため、モジュールの小型化と、部品点数の大幅な削減が可能となった。

### まとめ

シリコンマイクロレンズの開発を行い、このレンズを使用した光モジュールの提案を行った。シリコンマイクロレンズを使用した光モジュールは、メトロ系ネットワークでの使用において十分な性能を示し、小型化と低価格可能であることを示した。

現在、シリコンマイクロレンズのサンプル出荷を開始し、顧客開拓を行っている。◆◆

### 参考文献

- 1) 佐々木浩紀, 他: 光源とシリコンマイクロレンズの高精度実装技術, エレクトロニクス実装学会誌, Vol.5, No.5, pp.466-471, 2002年
- 2) M.Uekawa, et al.: Surface-mountable silicon microlens for low-cost laser modules, IEEE Photonic Technology Letters, Vol.15, No.7, pp.945-947, 2003
- 3) (社) 応用物理学会監修: 回折光学素子入門, 第1版, (株) オプトロニクス社, p.11, 1998年

### ● 筆者紹介

前野仁典: Yoshinori Maeno. 研究開発本部 先端デバイスラボラトリ

佐々木浩紀: Hironori Sasaki. 研究開発本部 シリコンVU

志村大輔: Daisuke Shimura. 研究開発本部 先端デバイスラボラトリ

上川真弘: Masahiro Uekawa. 研究開発本部 シリコンVU

小谷恭子: Kyoko Kotani. 研究開発本部 先端デバイスラボラトリ

関川亮: Ryo Sekikawa. 研究開発本部 先端デバイスラボラトリ

高森毅: Takeshi Takamori. 研究開発本部 シリコンVU