

長波長面発光レーザ (VCSEL) モジュール

1.3- μm -Range Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) Module

根角 昌伸*
Yoshinobu Nekado

岩瀬 正幸*
Masayuki Iwase

概要 新しい材料系 GaInNAsSb の長波長 1300 nm 帯面発光レーザ (VCSEL: vertical cavity surface emitting laser) チップを使用した光モジュールの開発を行った。本モジュールは、VCSEL チップが持つポテンシャルを最大限利用し、従来必要であったレンズ、アイソレータ等の部品を無くした構造とした。また、オリジナルな平面実装 (アッセンブリ) と高精度な樹脂成形体パッケージによる無調心組立構造を採用することで組立を容易にし、低コスト及び超小型 (mini-TOSA サイズ) の光モジュールを実現した。得られた特性は、SMファイバとの結合効率がレンズレスで60%以上、光出力 5 dBm 以上であり、アイソレータレスで 2.5 Gbps、20 km の信号伝送を確認した。今後、市場の伸びが期待されている小型トランシーバ (SFF・SFP・XFP 規格など) に適用できる。

1. はじめに

面発光レーザ (VCSEL) チップを使用した光モジュール光源は、データコム用途の短距離マルチモード伝送用として、波長 850 nm のものが既に販売されている。一方、主に通信用途の中・長距離シングルモード伝送用では波長 1300 nm 帯の VCSEL のチップ開発が現在盛んに行われている。

当社はこれまでに中・長距離シングルモード伝送用の FP (Fabry-Perot: ファブリ・ペロー) 型や DFB (distributed feedback: 分布帰還) 型といった端面発光レーザチップを開発し、そのモジュールを商品化してきた^{1)~4)}。

また、VCSEL についてもチップ開発に早期から着手し、長波長 1300 nm 帯シングルモード伝送用として当社独自の新しい材料系、GaInNAsSb を採用してチップの結晶品質向上・特性向上を進めてきた⁵⁾。

ところで現在、アクセス系イーサネットなどの需要拡大傾向の中で、それらに必要な機器 (トランシーバなど) は、より低価格化、小型化が求められ、また標準仕様化が進められている。これはレーザを用いた光モジュール光源でも同様である。例えば、小型トランシーバモジュールの今後の主流と考えられている 2.5 Gbps 伝送の SFF (small form factor)、SFP (small form factor pluggable) トランシーバモジュール、10 Gbps 伝送の XFP (XFPM SA.org 規格) トランシーバモジュールに搭載可能な小型で低価格な光モジュール光源が今後数多く必要になるとされている。

今回、これまで開発してきた長波長 1300 nm 帯の VCSEL チップを用い、小型トランシーバに搭載可能な mini-TOSA サイズのモジュール化開発を行ったので報告する。なお本件の

VCSEL チップ開発およびモジュール化開発は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) より平成 14 年度実用化開発助成を受け実施した。

2. VCSEL の特徴

半導体レーザチップを用いた光モジュール光源は、これまでに FP レーザ、DFB レーザといった端面発光型レーザチップが使用されている。これらは基板面に水平なチップの端面から光出射する。これに対し VCSEL は結晶成膜時に、基板面に対して垂直方向にミラーと活性層を積層成膜して光共振器を作製するため、基板表面から垂直に光出射する。基板の一平面上に光出射面を並べることができるため、光源のマルチチャンネル・アレイ化が容易である。また、端面発光型レーザは基板から 1 個 1 個切り出して検査をする必要があったが、VCSEL では基板の状態で検査が行える。

更に VCSEL は、光ビーム出射形状が円形で、設計によって MFD (モードフィールド径) を光ファイバと同程度の 7~9 μm にすることが可能であるため、モジュール化において光ファイバとの結合効率を高くすることができ、従来必要であったレンズを不要にすることも可能である。また、ファイバ線路からの戻り光に対して強いアイソレータレスが可能といったメリットもある。

よって VCSEL チップを用いた光モジュール光源は、端面発光レーザチップを用いた従来のものに比べ低コスト化が図れる。

3. 開発目標

VCSEL モジュールの開発開始時、以下の目標を立てた。

DFB レーザモジュールと同等の特性でそれに置き換え可能であり、

* 研究開発本部 ファイタルフォトニクス研究所

- ①VCSELの特徴を活かし、レンズレス、アイソレータレスとする。
 - ②SFF, SFPトランシーバモジュールに搭載可能な mini-TOSA サイズとする (外径4 mm以下)。
 - ③2.5 Gbps伝送のSONET/SDH規格OC-48/STM-16 S16.1を満足する。
 - ④高額部材の排除、及び安価で容易な組立方法を検討し、DFBレーザモジュール作製コストの1/3を実現する。
- ③の規格は、具体的には表1に示すもの (SHD規格) である。S16.1が伝送距離15 km, L16.1が伝送距離40 kmの規格である。目標としては当然、長距離伝送できるL16.1であるが、同時に高出力化が必要でVCSELチップの光パワーに大きく依存する。よってモジュールとしてはレンズレスでの結合効率を60%以上と高く設定したうえで、まずS16.1を達成することを目標とした。

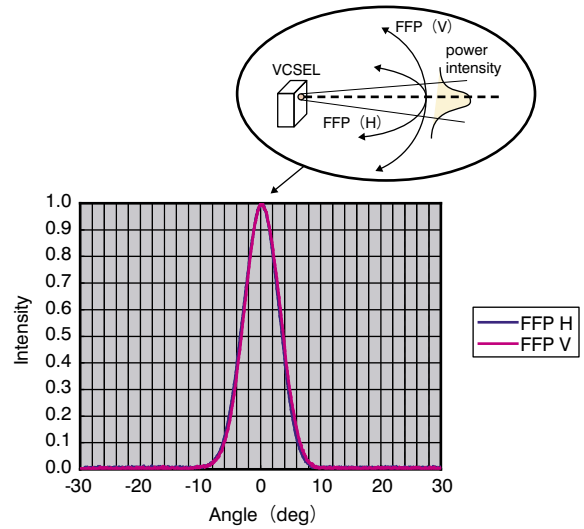


図1 VCSELのFFP
FFP of VCSEL.

4. 基礎検討

4.1 VCSELと光ファイバの光結合について

4.1.1 VCSELのFFP

図1に開発した1300 nm帯VCSELチップの代表的なFFP (far field pattern: 遠視野像) を示す。

従来の端面発光型レーザのMFDは、設計にもよるが一般的に1~3 μm程度の楕円形状である。しかし、VCSELのFFP発光分布は円形状であり、図1の例では、バイアス電流6.0 mA (バイアス2.3 V) の時、半値全角は9.8°, 1/e²の時の角度は11.7°であり、MFDは8.0 μmである。シングルモード光ファイバのMFD ~ 9.0 μmに近いので、MFDが小さい端面発光レーザに比べ高い光結合が得られる。つまりVCSELのスポットサイズが光ファイバのMFDに近いほど、光ファイバとの光結合損

表1 トランシーバの通信規格 (SDH, ITU-T G.957)
Parameters specified for ITU-T G.957 optical interface.

| Digital signal Nominal bit rate | bit/s | STM-16 2.488G | |
|---|-------|---------------|-------------|
| Application code | | S-16.1 | L-16.1 |
| Distance | km | 15 | 40 |
| Operating wavelength range | nm | 1260 - 1360 | 1280 - 1335 |
| Transmitter at reference point S | | | |
| Source type | SLM | SLM | SLM |
| Spectral characteristics | | | |
| -maximum RMS width | nm | — | — |
| -maximum -20dB width | nm | 1 | 1 |
| -minimum side mode suppression ratio | dB | 30 | 30 |
| Mean launched power | | | |
| -maximum | dBm | 0 | 3 |
| -minimum | dBm | - 5 | - 2 |
| Minimum extinction ratio | dB | 8.2 | 8.2 |
| Optical path between S and R | | | |
| Attenuation range | dB | 0-12 | 10-24 |
| Maximum dispersion | ps/nm | NA | NA |
| Minimum optical return loss of cable plant at S, including any connectors | dB | 24 | 24 |
| Maximum discrete reflectance between S and R | dB | - 27 | - 27 |
| Receiver at reference point R | | | |
| Minimum sensitivity | dBm | - 18 | - 27 |
| Minimum overload | dBm | 0 | - 9 |
| Maximum optical path penalty | dB | 1 | 1 |
| Maximum reflectance of receiver, measured at R | dB | - 27 | - 27 |

失が小さくなるので、端面発光型レーザーモジュールで必要であったレンズが不要になる。

また、図2にVCSELと光ファイバをバットジョイントに光結合させた場合の結合トランス分布を示す。VCSELと光ファイバのMFDが同心円状であることから、結合トランス分布は同心円の峰状となる。

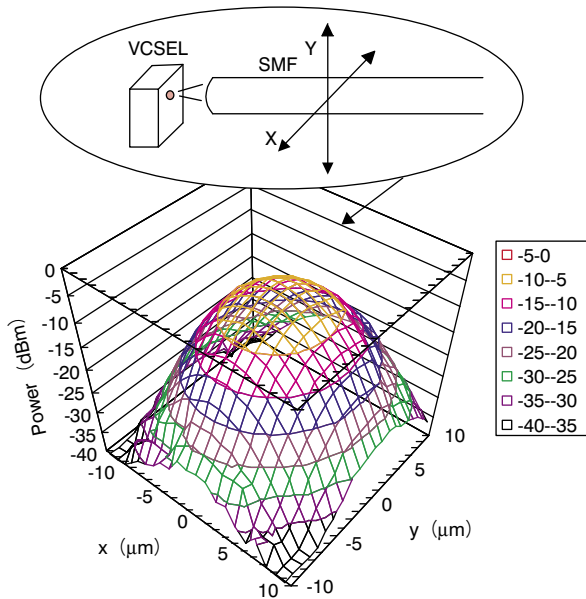


図2 VCSELとシングルモードファイバの結合トランス分布
Coupling tolerance of VCSEL versus single mode fiber.

4.1.2 VCSELと光ファイバの光結合シミュレーション

モジュール設計を行うに当たって、VCSELとシングルモード光ファイバとの光結合効率(光結合損失)の関係を、VCSEL-光ファイバ間の距離と位置ずれ量をパラメータとしてシミュレーションを実施した。位置ずれ量は、モジュールの部品精度や組み立て時の部品実装精度に相当する量である。

条件として、低価格化、モジュールの小型化のため、レンズを用いないでVCSEL光を光ファイバに入射するモデルで検討した。具体的には、①VCSELと光ファイバとが突き合わせに光結合する方法(バットジョイント型光結合モデル)、②VCSELとファイバとが平面的に配置されてファイバ端の反射により光結合する方法(反射結合型光結合モデル)の2つのモデルを検討した。

最初に、図3に前記①のバットジョイント型の光結合モデルを示す。このモデルは、現在の光モジュールで一般的に用いられているモデルであるが、端面発光レーザーを用いる場合は、レーザーチップと光ファイバとの間にレンズを配置することで、およそ60%程度の光結合効率を得ることが可能である。

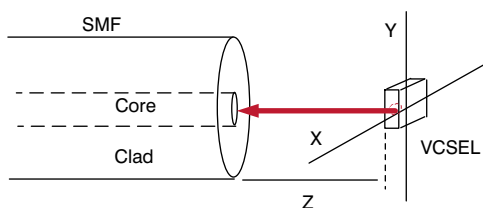


図3 バットジョイント型光結合モデル
Butt-joint coupling model.

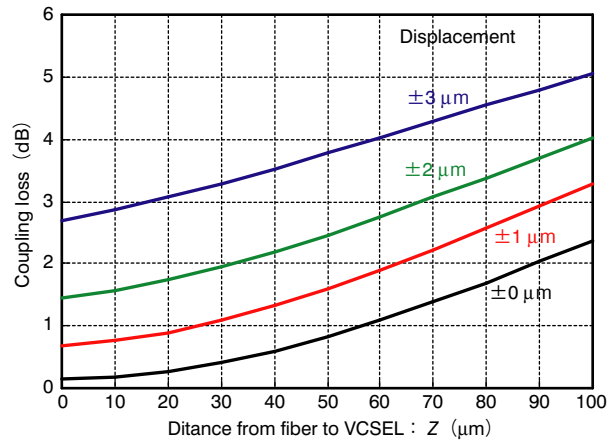


図4 バットジョイント型光結合シミュレーション
Simulation result of butt-joint coupling model.

図4にVCSEL-光ファイバ間にレンズを用いない場合の光結合シミュレーション結果を示す。VCSELのMFDが7.5 μm, 光ファイバのMFDが9.0 μm, VCSELと光ファイバ間に屈折率1.41の樹脂封止材があるものとした時のシミュレーション結果である。VCSELと光ファイバのX, Y面方向の位置ずれ量をパラメータにとり、光結合損失とVCSEL発光面-光ファイバ間距離Zの関係を示した。距離Zが短いほど、また位置ずれ量が小さいほど、高い光結合が得られる。光モジュールを作製する際、例えば距離Zが5~15 μm, 位置ずれ量が±3 μm以下で組み立てできたとすると、光結合効率50~95% (光結合損失0.2~3.0 dB) が得られる。VCSELでは、レンズを用いずに高い光結合効率を得られる可能性がある。

次に、図5に後者②の反射結合型の光結合モデルを示す。シングルモード光ファイバを45°斜め研磨してAuもしくは誘電体多層膜フィルタの蒸着によりミラー面を形成し、レンズを用いないでVCSEL光を光ファイバ側面から直接入射させ、ミラー部で光ファイバのコアに光結合させるモデルである。このモデルでは円柱の光ファイバを平面導波路に置き換える場合にも適用できる。VCSELと光ファイバ(導波路)とを平面的に実装するモジュール構造を採用することにより、①のバットジョイント型に比べて組み立てが容易になるメリットがある。

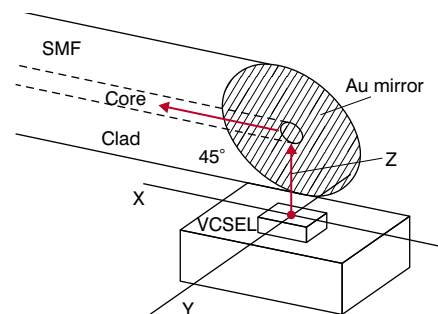


図5 反射結合型光結合モデル
Reflection coupling model.

図6に反射結合型の光結合シミュレーション結果を示す。バットジョイント型と同様に、VCSELのMFDが7.5 μm, 光ファイバのMFDが9.0 μm, VCSELと光ファイバ間に屈折率1.41の樹脂封止材があるものとした時のシミュレーション結果である。光モジュールを作製する際、例えばVCSEL発光面

から光ファイバのコア中心までの距離 Z が $67.5 \sim 77.5 \mu\text{m}$ (光ファイバのクラッド外径からコア中心までの距離が $62.5 \mu\text{m}$, これにVCSEL発光面から光ファイバのクラッド外径までの $5 \sim 15 \mu\text{m}$ を加えた距離), VCSELと光ファイバとのXY面方向の位置ずれ量が $\pm 3 \mu\text{m}$ 以下で組み立てできたとすると, 光結合効率 $48 \sim 74\%$ (光結合損失 $1.3 \sim 3.2 \text{ dB}$)が得られる。反射結合型の場合も, レンズを用いずに高い光結合効率を得られる可能性がある。

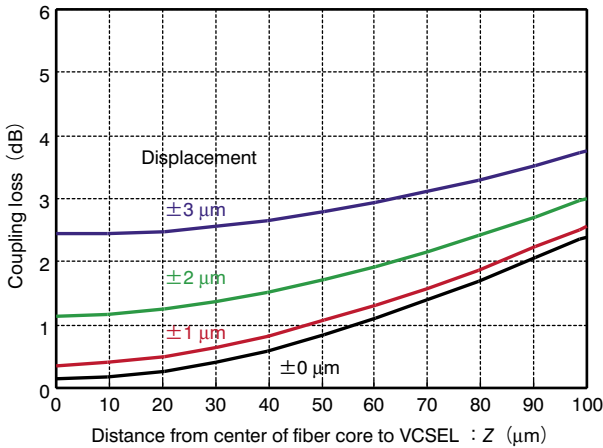


図6 反射結合型光結合シミュレーション
Simulation result of reflection coupling model.

上記の反射結合型の光結合について, 図7にVCSELのMFD依存性のシミュレーション結果を示す。VCSEL発光面から光ファイバのコア中心までの距離 Z は $72.5 \mu\text{m}$ (VCSEL発光面から光ファイバのクラッド外径までの距離 $10 \mu\text{m}$)の時のものである。VCSELのMFDを光ファイバのMFD $\sim 9.0 \mu\text{m}$ に近づけることによって, また位置ずれ量を小さくすることによって光結合効率を上げることが可能である。例えばVCSELのMFDが $8.0 \mu\text{m}$ のものを用い, 位置ずれ量が $\pm 2 \mu\text{m}$ で光モジュールを組み立てることができれば, その時の光結合効率は 62% (光結合損失 2.1 dB)が得られる。

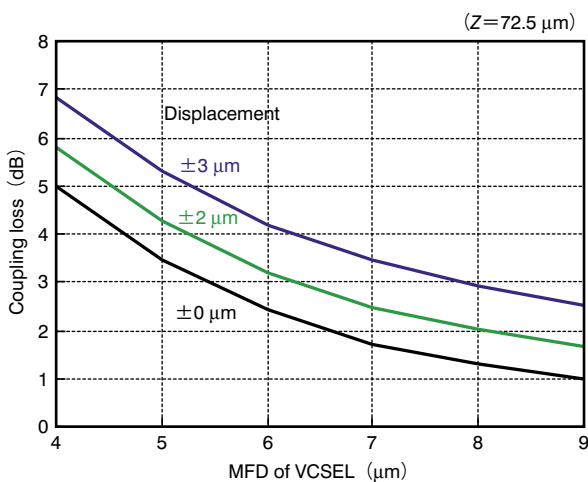


図7 VCSELのMFDと結合損失の関係 (シミュレーション)
MFD dependence of coupling loss (simulation).

以上から, VCSELのMFDを $8 \mu\text{m}$ 程度以上, 光ファイバまでの距離を $10 \mu\text{m}$ 程度以下, 位置ずれ量を $\pm 3 \mu\text{m}$ 程度以下にすることによって, バットジョイント型, 反射結合型いずれ

の場合でも, レンズを用いずに従来の端面発光レーザーモジュールと同等以上の光結合効率を得られる可能性のあることが分った。

また反射結合型について考察すると, VCSELから光ファイバのコアまでの距離はクラッドの厚みを考慮する必要があるため, 光結合効率はその分不利になる。しかし, MFDを変えことなくクラッドの厚みを薄くすることができれば, また, VCSELと光ファイバ(導波路)とを平面的に実装するモジュール構造を採用し簡易に組み立てることができれば, 反射結合型の光モジュールを検討する意義は大きい。

4.2 VCSELチップの特性設計

ここでは, VCSELチップに求められる特性について示す。VCSELと光ファイバの光結合効率が 60% (光結合損失 2.2 dB)でモジュール組み立てできるとした時, 目標とする通信規格OC-48/STM-16 (2.5 Gbps , 15 km 伝送)を満足するには, 例えば図8のI-Lシミュレーションのように, VCSELチップのしきい値電流 3 mA , スロープ効率 0.2 W/A として, バイアス電流 10 mA ではシングルモード発振光出力 1.4 mW が必要である。

この時, 光モジュールの電流バイアス点を 7 mA とし, 電流振幅が 5.9 mA (p-p) となるよう変調すると, 光モジュールの消光比は 8.2 dB , 平均光出力は $0.48 \text{ mW} (-3.2 \text{ dBm})$ となり, OC-48/STM-16 (2.5 Gbps , 15 km 伝送)に必要な消光比と平均光出力パワーが得られる。VCSELチップは, これが満足できるよう設計・作製した。

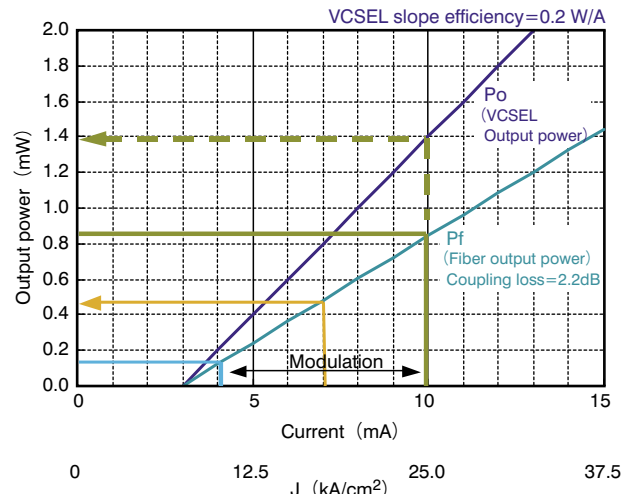


図8 I-Lシミュレーション
I-L simulation result.

4.3 モジュール設計

上記の検討を基にモジュール構造を検討・設計した。前記の開発目標を達成するため, VCSEL発光面から光ファイバまでの距離が $10 \pm 5 \mu\text{m}$ 程度, 位置ずれ量が $\pm 2 \mu\text{m}$ 程度以下であり, 無調心で組み立てできるモジュール構造とした。VCSELと光ファイバの光結合は, 部品を積み木のように重ねて組み立てることができる平面実装のモジュール構造, 反射結合型を選択した。図9に設計したモジュール構造を示す。

パッケージは量産性とコストでメリットのある成型樹脂を用いた。光ファイバはVCSEL発光面から光ファイバのコアまでの距離を短くして光結合効率を稼ぐことができるように, クラッ

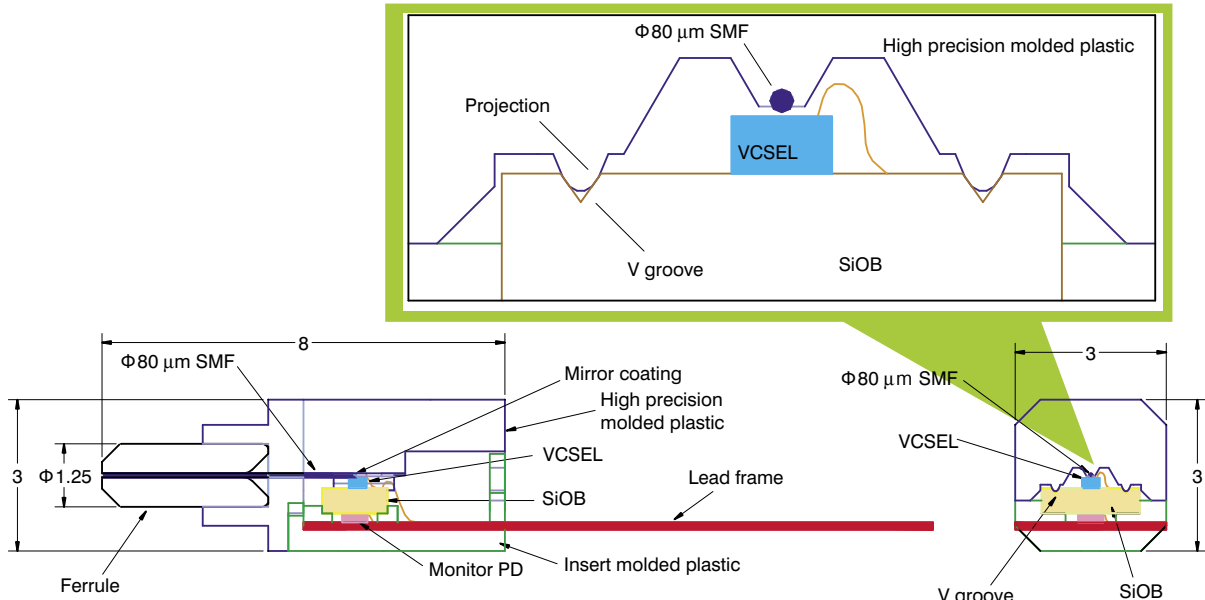


図9 モジュール構造
Schematic view of module.

ド外径80 μm (クラッド外径からコア中心までの距離40 μmの細径品), MFD9.0 μmのものを用いた。VCSEL光が入射する部分は、研磨により45°斜めミラーを形成し、高精度に成型された突起付きの成型樹脂に組み付け、図のようにVCSEL側の光ファイバ側面が現れる窓構造とした。VCSELはSiOB (silicon optical bench) に高精度実装する。VCSELと光ファイバの位置合わせは、SiOBに形成した2本のレール状V溝と、光ファイバ側の高精度に樹脂成型された2本のレール状突起によって、無調心で組み立てできるようにした^{9, 7)}。VCSEL発光面から光ファイバまでの距離は主にVCSELチップの厚さバラツキ、位置ずれ量は主にVCSELとSiOBの実装精度が支配的であり、それぞれ±5 μm, ±2 μm以下程度で作製できるモジュール構造とした。レンズ、及びアイソレータは使用しない。

リードフレーム配線をインサートモールドした下部側の樹脂成型パッケージ、モニタPD、VCSELを実装したSiOB、ファイバを組み付けた上部側の高精度樹脂成型パッケージは、平面上に積み重ねる要領で簡易に組み立てることができる。

5. 試作・評価

以上の基礎検討、モジュール設計を行い、試作を行った。試作品は図10のように、LC接続が可能なLCシェル、フェルルを把持する割りスリーブ、及び上記で設計したVCSELコアモジュールを組み合わせて完成する。サイズはφ4 mm × 12 mm (リード線除く)と非常にコンパクトなmini-TOSAサイズのモジュールである。なお、LCシェルの代わりにMU接続が可能なMUシェルを用いることもできる。

以下に評価結果について示す。図11に室温でのI-L特性を示す。VCSELチップのMFDは8 μm, 中心波長1246 nmのものを使用した。試作したモジュールのしきい値は2.5 mA, シングルモード発振の最大光パワーは電流6.9 mAの時0.51 mWであった。結合効率は光モジュールの目標特性である60%以上が得られた。なお、マルチモード発振域になるとシングルモードファイバとの結合効率が低くなる特徴がみられる。

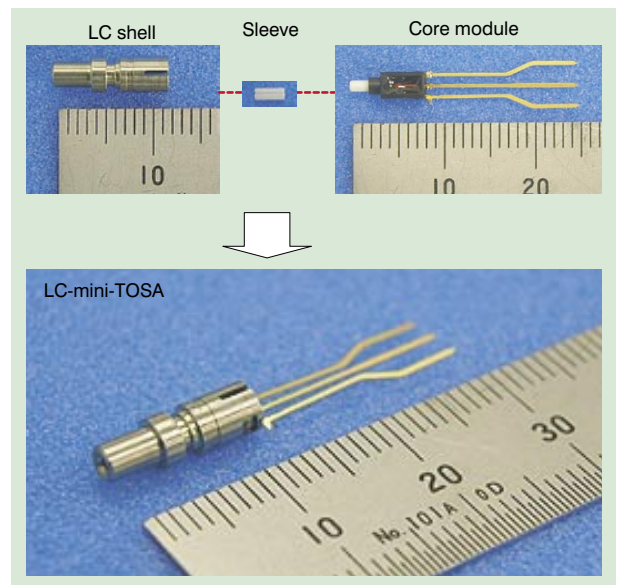


図10 LC-mini-TOSA VCSELモジュール
LC-mini-TOSA VCSEL module.

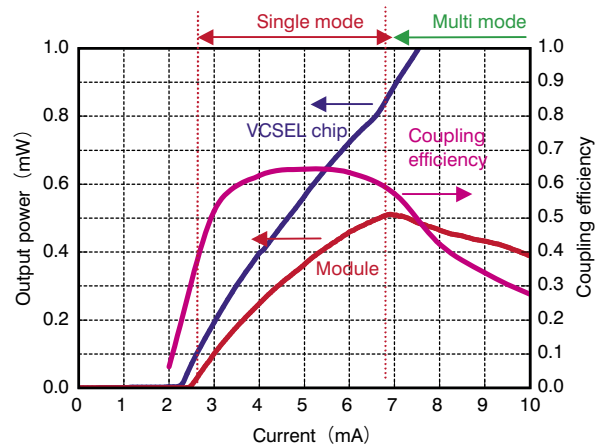


図11 I-L 特性
L-I curve and coupling efficiency of VCSEL module.

図12に室温、電流6 mAの時の発振スペクトラムを示す。中心波長1246 nm, サイドモード抑圧比45 dB以上の良好なシングルモード発振であった。

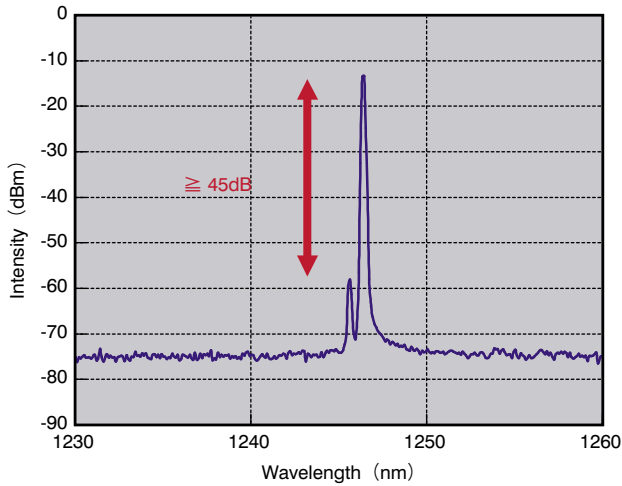
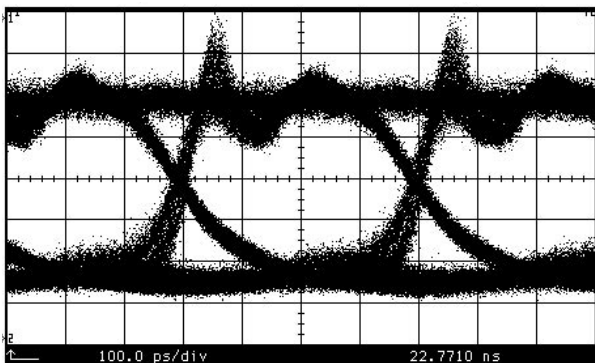
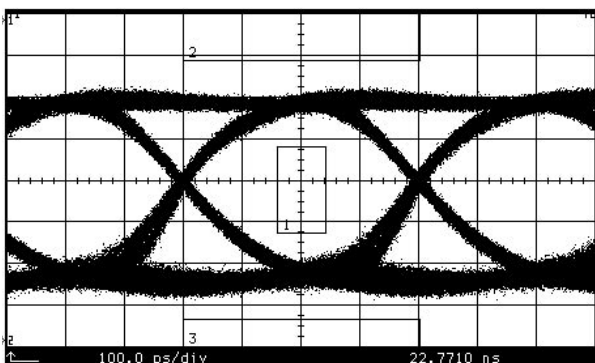


図12 発振スペクトル ($I_f = 6$ mA)
Lasing spectrum at $I_f = 6$ mA.

図13に伝送速度2.5 Gbpsのアイパターンを示す。バイアス電流5 mAで平均光出力パワー-3.7 dBm, 消光比8.2 dBの良好なアイパターンが得られた。



Filter (Bessel Thomson) : OFF



Filter (Bessel Thomson) : ON (Mask margin : 1.9 %)

図13 2.5 Gbps アイパターン
2.5 Gbps EYE diagram.

図14に2.5 Gbps, 平均光出力パワー-4.1 dBm, 消光比9.5 dBにおけるBER (bit error rate) 評価を示す。伝送はBack to Back接続, 及び距離20 kmで行った。20k m伝送してもBack to Back接続と同等の特性が得られた。20 km伝送の分散パワーペナルティは0.1 dB以下, 最小受信感度-29 dBmと良好な伝送結果が得られた。

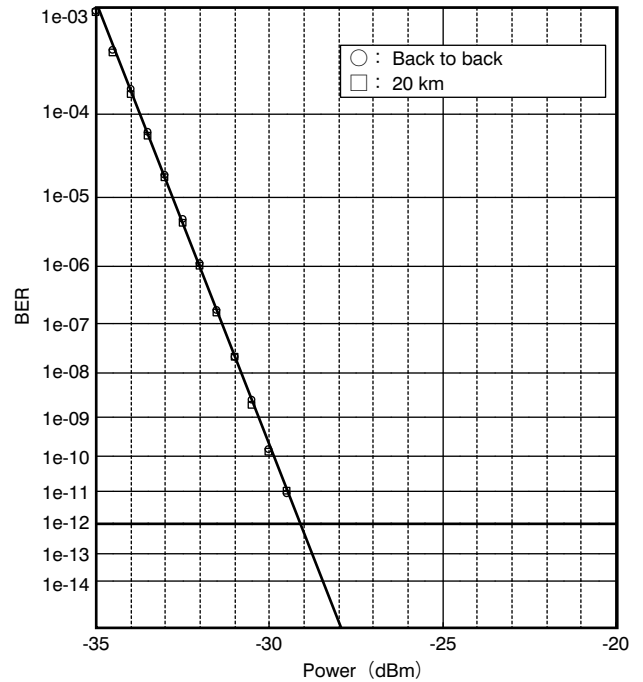


図14 BER特性 (2.5 Gbps)
Measured BER characteristics at 2.5 Gbps.

以上より, 今回用いたチップは規格に対して若干短波長であったが目標である通信規格OC-48/STM-16 (S16.1) 2.5 Gbps伝送に必要な平均出力パワー ($-5.0 \text{ dBm} \leq P \leq 0 \text{ dBm}$)と伝送距離15 kmを満足することを確認した。

6. おわりに

高精度樹脂成形体による無調心結合技術を用いてレンズレス・アイソレータレスによる小型mini-TOSAモジュールを試作した。VCSELとシングルモードファイバ間の光結合効率は60%以上を実現した。また伝送特性は光出力-4.1 dBm, 2.5 Gbps室温動作にて, 20 kmの伝送を実現した。

今後, VCSELチップ特性の向上により, 長波長 (1260 nm以上), 高温 (~85°C)でのシングルモード発振の高出力化を進め, また信頼性の確認を行う。

参考文献

- 1) 清水, ほか: 古河電工時報, 104号, (1999), 48.
- 2) 清水, ほか: 古河電工時報, 108号, (2001), 41.
- 3) 高木, ほか: 古河電工時報, 111号, (2004), 1.
- 4) 那須, ほか: 古河電工時報, 111号, (2004), 6.
- 5) H. Shimizu, et al.: IEEE. J. of Quant. Electron., 9 (2003), 1214.
- 6) M. Iwase, et al.: OECC'2002, 10C1-1 (2002), 134.
- 7) M. Iwase, et al.: IEEE, Transactions on advanced packaging, 24 (2001), 419.