

FBT 樹脂固定レーザモジュールの開発

Development of FBT Laser Module with Adhesive Bonded Structure

有賀 麻衣子 *
Maiko Ariga

菅谷 俊雄 *
Toshio Sugaya

木村 俊雄 *
Toshio Kimura

秋月 一能 *2
Kazuyoshi Akizuki

中島 康雄 *2
Yasuo Nakajima

新子 谷悦宏 *2
Yoshihiro Arashitani

概要 FBTレーザモジュールにおいて、高性能化と高信頼性化のためにモジュールと部品の小型化を進めてきたところ、自由度の高い設計を可能とするには樹脂接着剤による固定が不可欠となった。しかし、封止パッケージ内に有機樹脂を用いることに関して、アウトガスによる光学部品への成膜が懸念事項として持ち上がった。そこで、高温下で長時間置かれた場合や未硬化樹脂があった場合を想定した分析実験を行って信頼性に影響を与えないことを示し、樹脂接着剤の使用を可能とした。この結果を基に部品の樹脂接着剤固定を採用したFBTレーザモジュールを開発し、消費電力は24%低減、光出力は15%向上の高性能化を実現できた。

1. はじめに

弊社はこれまで、高密度波長分割多重方式 (DWDM) に用いられているフルバンドチューナブル (FBT) 分布帰還型 (DFB) レーザダイオードモジュールを製品化した¹⁾。通信容量の増大が進んでいる中、FBTレーザモジュールの更なる高性能化が課題となっており、特に、低消費電力化と高出力化が重要である。伝送機器の高性能化に伴い必要電力が増加していくのに対して、それを抑えるためにレーザモジュールを含めた搭載される機器に低消費電力化が求められている。またデータ転送レートが高速化するにつれて多段化した変調機が使用されるため、変調機の挿入損失を補償するためにレーザモジュールの高出力化が必要となっている。

それらの要求にこたえるために、従来以上に最適な光・熱設計が必要となっており、これを実現するためには、用いる部品の大きさや部品の素材選定から自由度を高めていくことが重要である。また、現在トランシーバやトランスポンダの小型化が進んでおり、レーザモジュールも更なる小型化が必要となってきたため、部品の小型化は近い将来に必須となる項目である。

これまでのFBTレーザモジュールでは各部品をハンダ付けまたはイットリウム・アルミニウム・ガーネット (YAG) レーザ溶接によって固定してきたため、レンズやエタロン等、主材料がガラスや石英である部品を金属ホルダ中に納めていた。このため、金属ホルダを含めた部品が大型化して配置に制限があり、

光路が非常に長い設計となっていた。そこで設計の自由度を増すための固定方法として、樹脂による部品の固定を検討した。

部品を樹脂接着剤によって直接固定することにより、金属ホルダの必要性がなくなり、部品の小型化が可能となる。さらに、従来のハンダ付けは数種類の半田材を使用し融点の高い順に組立てなければならないが、樹脂接着では組立て順を制限しない。またYAG溶接する場合、部材の金属ホルダに加えて、内部の光学ベンチ (ベース) の素材は金属である必要があったが、樹脂接着では、熱伝導率が高く線膨張係数の小さいセラミックも選択することが可能となる。この非電導性ベース上には、電気線路パターンを描画することが可能となり、内部電気配線の簡略化が図れる。またこのような自由度の高い設計によって、高性能化、高信頼性化やコストに着目した部品選別の可能性も高めることができる。

しかし、上記のような利点にもかかわらず、これまで部品の樹脂接着を半導体レーザモジュール中に用いたことはなかった。半導体レーザモジュールは窒素ガスを満たした封止を行っており、樹脂からのアウトガスがモジュール中に充満して信頼性に影響することが懸念されていたためである。

そこで、樹脂接着を採用したFBTレーザモジュールの設計製作と、樹脂の影響に特に注視して信頼性検証実験を行った。

2. FBT 樹脂固定レーザモジュール

2.1. FBT 樹脂固定レーザモジュールの設計

FBT樹脂固定レーザモジュールを図1に示す。パッケージは業界で標準になっているバタフライパッケージである。LD光はコリメートレンズによって平行光に変換され、ビームスプリッタ (BS) で波長ロッカーとメインビームに分岐される。反射戻り光のLDへの結合を防止するためにアイソレータも使用

* 研究開発本部ファイテルフォトンクス研究所 半導体デバイス開発部

*2 研究開発本部ファイテルフォトンクス研究所 電子・通信材料研究部

する。波長ロッカーにはパワーモニタ用と波長モニタ用のフォトディテクタ (PD) と 50GHz 周期のエタロンが搭載されている。

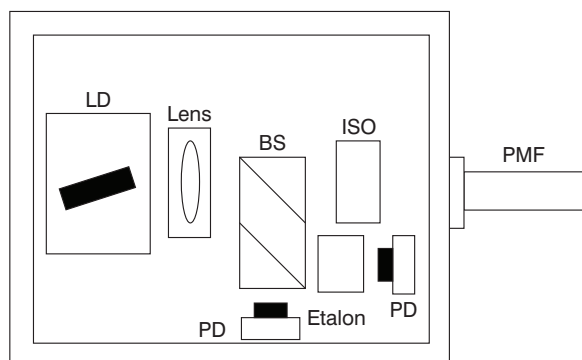


図1 FBT 樹脂固定レーザモジュール
FBT laser module with adhesive bonded structure.

2.2. 樹脂選定

紫外線 (ultraviolet; UV) 硬化樹脂を使用すると、位置精度の厳しいレンズ等光学部品を調芯した状態で固定できる。ただし、UV 硬化だけでは部品下の樹脂が部品の影によって完全に硬化できない場合があるので、UV 硬化と熱硬化とのハイブリッド硬化の樹脂を採用した。調芯直後に UV 硬化によって位置固定を行い、その後熱硬化によって完全硬化を行う。この加熱では UV 硬化後のアニールだけではなく、熱だけでも硬化できる必要がある。

主成分としては接着強度が高い、接着強度のバラツキが小さい、熱や光などによって接着強度が低下しない、硬化収縮率が小さい、及び硬化後アウトガスが少ないという条件を満たすものとしてエポキシ樹脂が知られている²⁾。これに対して、アクリル系樹脂はエポキシ樹脂よりも硬化収縮率が大きく、接着強度も低い場合が多いことが知られており、シリコン系樹脂は、加熱によって低分子量成分のアウトガスが発生しやすいことが知られている。これらのことより、封止パッケージ内の精密光学接着剤としては、エポキシ樹脂が優れており、本製品においてもエポキシ樹脂を採用することとした。

2.3. コリメートレンズ

コリメートレンズは、従来は YAG 溶接のために金属ホルダに納められていたが、今回は樹脂接着剤によって固定するため、金属ホルダを廃止している。レンズの形状は縦型に置くのが容易な設置平面のある形状にするのが望ましく、今回は最も単純な形状の、外形が四角柱型に整形されたレンズを用いることとし、ビーム径とビーム集光距離などの特性より、表面が 1 mm 角、奥行きが 0.6 mm 以下の小型レンズを採用した。

接着剤には線膨張係数の調整のため、無機フィラーが充填されている。エポキシの線膨張係数が 100 ~ 150 ppm/K であるのに対して、固定対象の部品の材料である石英の線膨張係数は 0.5 ~ 0.6 ppm/K、アルミナは 6.5 ~ 7.5 ppm/K、窒化アルミは 4 ~ 5 ppm/K であるため、微細シリカや微細タルクなどの無機フィラーを充填して線膨張係数を小さく調整した。

ただし、フィラーサイズが大きい場合、部品の傾きの原因になることが予想される。フィラーでレンズが最も傾く最悪条件

はフィラーがレンズの奥行き方向の中心に挟まる場合である。採用したコリメートレンズの許容あおり角は実験の結果、2度であることがわかった。したがって、レンズ奥行きを A とすると、許容フィラーサイズは $x = \frac{A}{2} \sin 2^\circ$ となる。この関係を図2に示す。レンズ奥行きが 0.6 mm 以下のレンズに用いるため、フィラーサイズは 10 μm 以下に決めた。

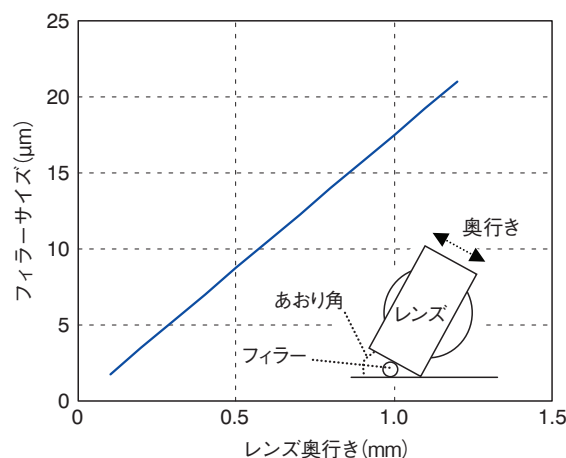


図2 レンズ奥行きと許容フィラーサイズ
Allowable filler size to lens length.

2.4. ビームスプリッター

波長ロッカーはエタロンとパワーモニタ用の PD と波長フィルタとしてのエタロンを通った光を検出するための PD で構成されている。今回、樹脂接着を採用することによって金属ホルダを廃止し、アイソレータ、エタロン、ビームスプリッターの小型化が可能となったため、光学系を見直し、出来る限り短い光路長になるように設計した。

ビームスプリッターは平行な 2 面の分岐面を備えている 3 分岐スプリッターとした。このことによって、メインビームと分岐ビームが必ず平行に分岐され、その間隔は主にビームスプリッターの部品精度によることになり、ビームスプリッターの固定時の要求位置精度を粗くできる。例えば、ビームスプリッターが傾いて置かれた場合でも、ビーム角度は変化しない。したがって角度ずれ耐性は非常に高いと言える。ビームスプリッター形状と分岐ビームを図3に示す。このように、角度ずれと位置ずれに対して、非常に歩留まりが高く長期信頼性も高い波長ロッカーを構成することができた。

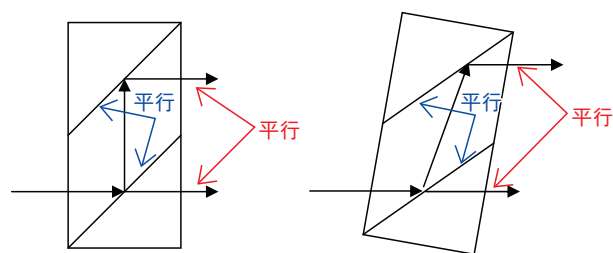


図3 ビームスプリッター形状と分岐ビーム
Beam splitter shape and parallelism of split beam.

3. 樹脂接着条件とその評価

3.1. 樹脂硬化条件

使用する樹脂のUVと熱の硬化条件をそれぞれ示差走査熱量測定法 (differential scanning calorimetry ; DSC) によって確認した。ここでDSCとは、UV照射若しくは走査加熱時に、試料と基準試料との温度差を測定することによって、試料の発熱または吸熱を測定し、樹脂の硬化などの反応を観測する方法である。さらに硬化後、樹脂をもう一度UV照射/加熱昇温したとき、樹脂が再度発熱しなければ初回の条件で硬化が完了し、硬化条件が十分であったことも確認が出来る。

まずUVでの仮固定条件を決定するために、照射強度を30, 60, 100, 200 mW/cm²の4条件でのUV-DSCを測定し、結果を図4に示す。例えば100 mW/cm²にした場合、26秒の照射でUV硬化は完了するということが分かった。各照度と発熱完了時間を表1にまとめた。本製品では、バラツキも考慮して、100 mW/cm² × 30秒照射をUV硬化条件とした。

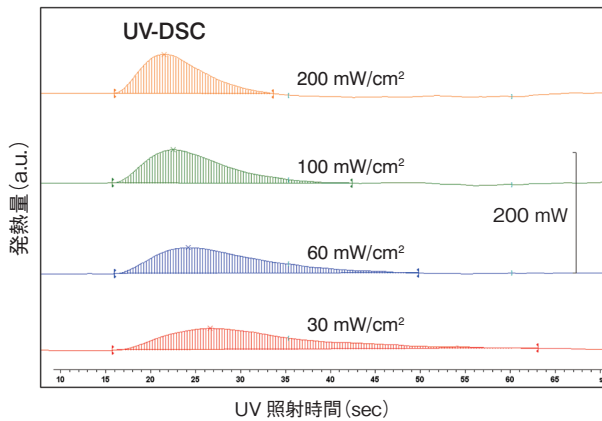


図4 UV-DSCによるUV照射条件と発熱量
UV-DSC measured UV cure condition and heat value per unit weight.

表1 各照射強度での発熱完了時間
Time of heat generation completed in each irradiation intensity.

照射強度 (mW/cm ²)	30	60	100	200
時間 (sec)	47	34	26	17

次に熱硬化条件について、樹脂を何度まで加熱すれば硬化現象が発生するかを明らかにするために、昇温した場合の樹脂の発熱挙動を測定した。UV硬化した樹脂を130℃で10分、30分、60分加熱後、DSC測定を25～200℃で行った。図5に示したように、加熱時間によって発熱温度が上がっていくことが分かった。130℃ 30分の硬化条件では発熱は140℃以上、60分の硬化条件では、発熱は150℃以上である。これは加熱時間が不十分な場合、高温側で反応する成分が残っていることを示しているが、LDモジュールの製造工程・使用条件下では、樹脂が硬化後に150℃以上に加熱されることはないため、130℃ 60分の硬化条件であれば十分であると考えて良い。

同じように、140℃、150℃についても硬化時間を変化させて

測定を行い、単位発熱量を示した(図6)。140℃では10分程度、150℃では10分以下で硬化が完了することが分かった。

これより、熱硬化条件は130℃では60分以上、140℃では10分以上が適当である。

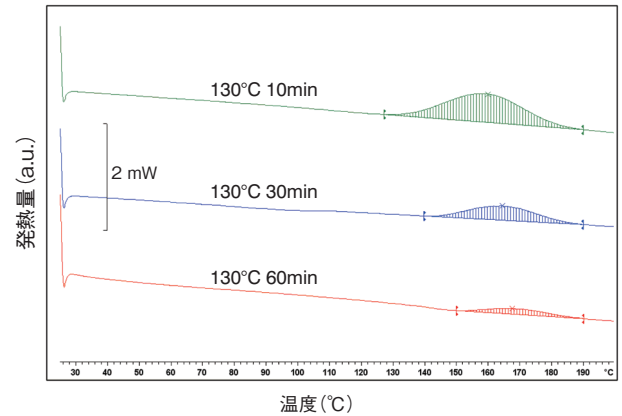


図5 130℃硬化樹脂の発熱量
DSC measured 130℃ cure condition.

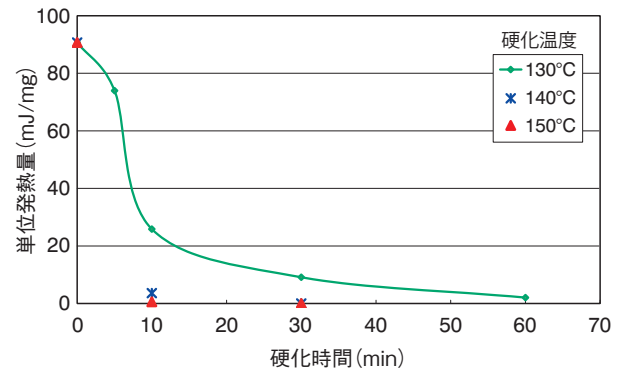


図6 熱硬化条件と単位発熱量
DSC measured thermal cure schedule and heat value per unit weight.

次に、UV硬化が不十分だった場合を想定して、加熱のみでの樹脂硬化状態を知るため、UV硬化を行っていない樹脂のDSC測定を行った。その結果、発熱が観測されてUVでの仮固定なしでも硬化現象が起こっていることが確認できた。同じサンプルをもう1度DSC測定したところ、発熱が観測できなかったため加熱のみで十分に硬化が完了することが分かった。DSC測定結果を図7に示す。このことにより、影などがあってUVが当たらない部分があった場合でも、加熱だけで硬化できることが分かった。

以上のようにDSCによる分析を用い、樹脂硬化条件を決定した。

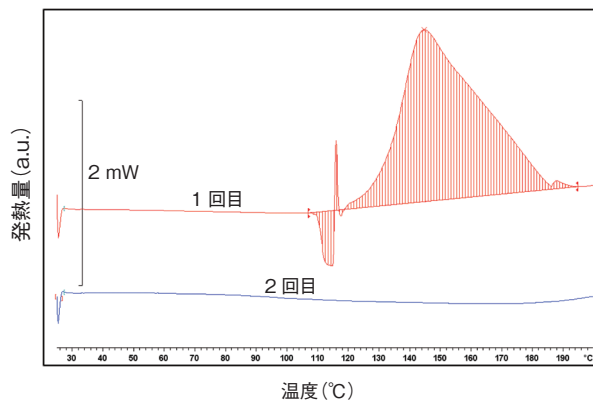


図7 UV 硬化なし熱硬化樹脂の発熱曲線
DSC measured thermal cure condition without UV cure.

3.2. アウトガス分析

封止パッケージ内に樹脂を用いることでこれまで最も懸念されていたのがアウトガスである。パッケージ封止後に、環境温度変化やレーザ光の照射によって硬化樹脂からガスが発生し、そのガスがレーザ端面に悪影響を与えてレーザの寿命を低下させる、またはガスが固化して光学部品面に何らかの膜が生成して光学特性が変化するなどの懸念事項が持ち上がっていた。そこで、硬化後樹脂からのアウトガス分析を行った。

硬化樹脂を一定量ガラスバイアル瓶に封止し85℃で2000時間放置した。ヘッドスペースーガスクロマトグラフ質量分析装置 (HS-GC/MS) によってこのバイアル瓶内のガス分析を行った。分析項目は、発生ガスの種類とその量である。ガス量については質量分析計にて検出したクロマトグラムからトルエン (Toluene) 換算によって半定量値を算出した。FBTレーザモジュールはTelcordia規格によって-40～85℃での信頼性が十分であることを示す必要があるが、樹脂のアウトガスは温度上昇にしたがって多くなるため、最も高い保証温度である85℃放置を分析条件として採用した。

分析した結果、2000時間でのアウトガス量は0.2～0.3 ppmと微量であり、500～1000時間でバイアル瓶内のガス量はほぼ飽和していた。これより、樹脂中の一部成分が微量のアウトガスを発生するが、比較的短時間でガスの発生も停止して長期にわたり出続けるというものではないと言える。

また、アウトガス成分は有機物で、腐食性及び成膜性成分は含まれていなかった。その成分と原料との比較から、アウトガス成分は樹脂の各原料の溶剤、硬化剤の分解残渣であることが分かった。

3.3. LD光照射による影響

LD光照射によって樹脂上で化学変化が発生し、樹脂の変質またはアウトガス発生の可能性が懸念される。そこで、樹脂の長波長帯の吸光度を測定し、その吸光度スペクトルを図8に示す。

波長900～2000 nmでの吸光度を測定したところ、最大値は1551 nmで0.5%であり、ほとんどが透過してしまい、化学変化や発熱などが起きる可能性は非常に低いと思われる。

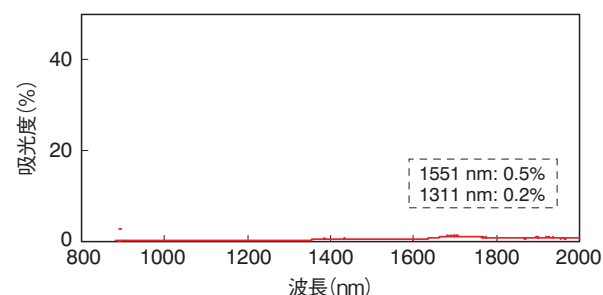


図8 樹脂の吸光度スペクトル
IR absorbance spectrum of adhesive.

逆に、LDからの光に紫外線が含まれている可能性も考えられる。そこで、LD光の短波長のスペクトル測定を行い、スペクトルを図9に示す。

樹脂のUV硬化波長は360 nm前後であるが、LD光の360 nm前後は測定限界以下の値であり、ピークなども特に観測されなかった。したがって、LD光によって樹脂に影響を与える可能性は非常に低いと言える。

3.4. 樹脂アウトガスのモジュール特性への影響

3.2項でアウトガス分析結果を示したが、パッケージ内で実際に樹脂が影響を与えるかどうか実験によって確認した。実際に使用する樹脂を未硬化の状態でパッケージ内に10倍量滴下して封止したモジュールの信頼性試験を行った。この実験で気化しなかった樹脂の原料の溶剤、硬化剤の残渣が非常に多い場

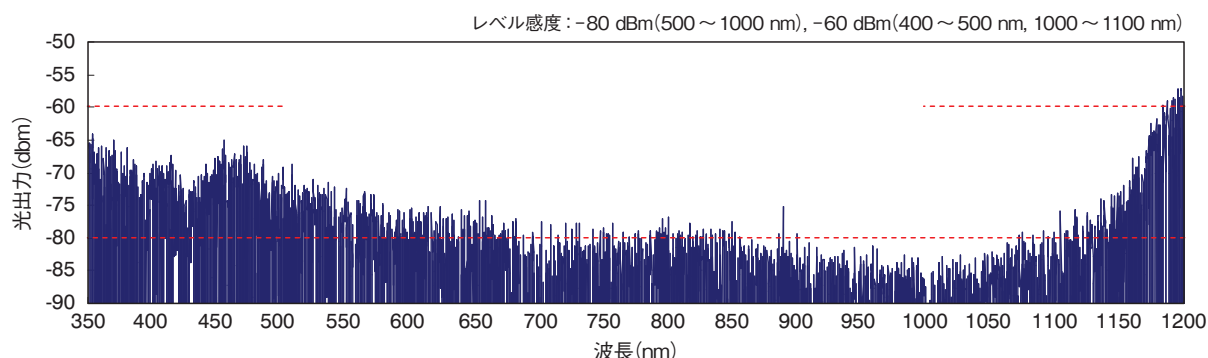


図9 LDのUVスペクトル
UV spectrum of FBT laser light.

合の信頼性に対する影響を検証できる。これは、アウトガス成分が原料の溶剤と硬化剤の残渣によるものであることが分かったことから行った試験である。

使用樹脂を塗布し未硬化のまま封止後、130℃ 1時間加熱し、封止パッケージ内で硬化した。パッケージ内に未硬化樹脂からのアウトガスと硬化時のアウトガスが充満し、このガスがLD端面に悪影響を与えて寿命を低下させてしまうことや、硬化時の温度130℃よりも冷却されることによってガスが液化または固化されて光学部品表面に付着して特性を低下させるかどうかを検証できる。

このアウトガスがパッケージ中に充満しているモジュールを用いて75℃長時間で駆動させるエージング試験を行い、出力変化を図10に示す。2000時間のエージング試験の間、LD出力はほとんど変化がなかった。

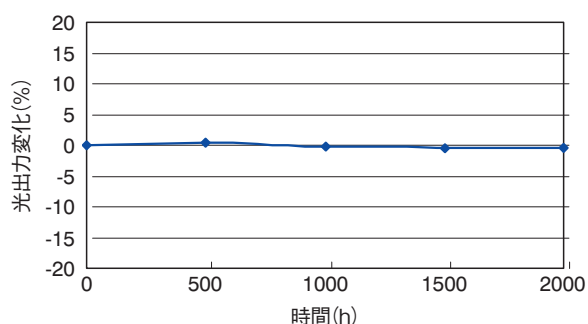


図10 アウトガスのあるFBTモジュールの75℃駆動出力変化
Output power trend in 75°C aging test of outgassed FBT module.

また、2000時間エージング試験後のLD端面の観察を行った。走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察でLD端面に付着物は確認されず、オージェ電子分光測定でも発光部に炭素 (C) 等の元素の集中は見つからなかった。SEM画像とオージェ像を図11に示す。

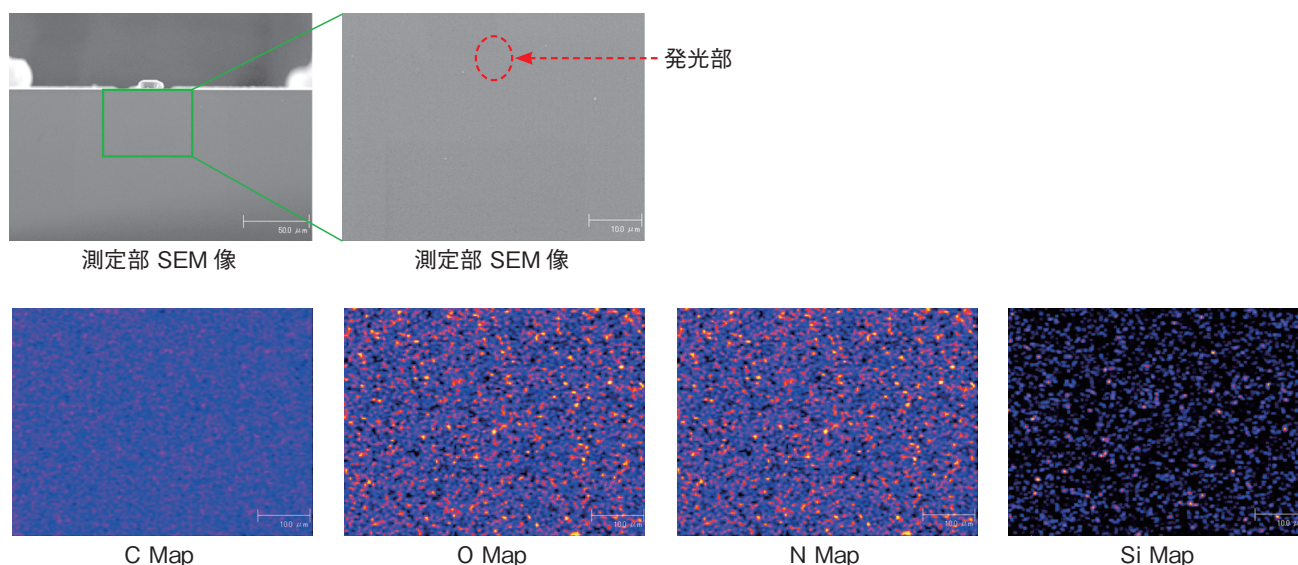


図11 エージング試験後LD端面のSEM写真とオージェマップ
SEM micrographs and Auger maps of aging tested LD.

このことより、アウトガスがあった場合でも、LDとモジュール信頼性に大きな影響は与えないことが分かった。

4. FBT 樹脂固定レーザモジュールの特性

FBT 樹脂固定レーザモジュール特性において、これまでのモジュールで課題となっていた消費電力と光出力を示す。

まず、消費電力を図12に示す。例えば10 mWの場合は従来のモジュールで1.92 Wであるのに対して樹脂固定モジュールでは1.54 Wとなり20%低減、40 mWの場合は従来モジュールで2.64 Wであるのに対して2.02 Wとなり24%低減となった。部品の固定に樹脂接着技術を用いることによって部品素材選定の選択肢が広がり、熱伝導率の高い素材の使用を可能にしたことで消費電力低減できたためである。

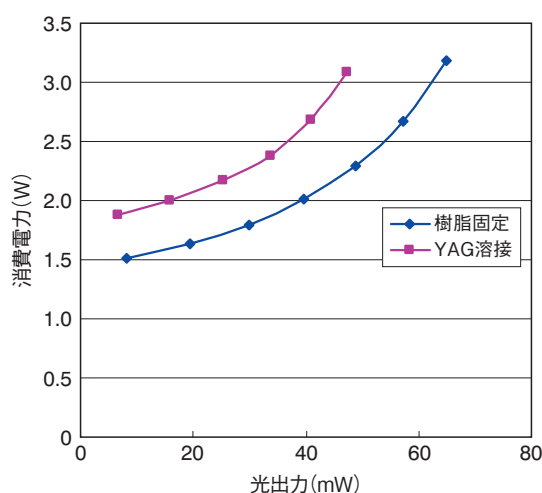


図12 FBT レーザモジュールの消費電力比較
Power consumption of FBT modules.

次に、光出力の測定結果を図13に示す。例えばアンプ電流値が150 mAの場合従来のモジュールが23.3 mWであるのに対して樹脂固定モジュールは25.4 mWで9%向上、アンプ電流値

が300 mAの場合42.8 mWであるのに対して49 mWで15%向上となった。部品の小型化によって結合を最適化した構造にでき、光出力の向上が可能になったためである。

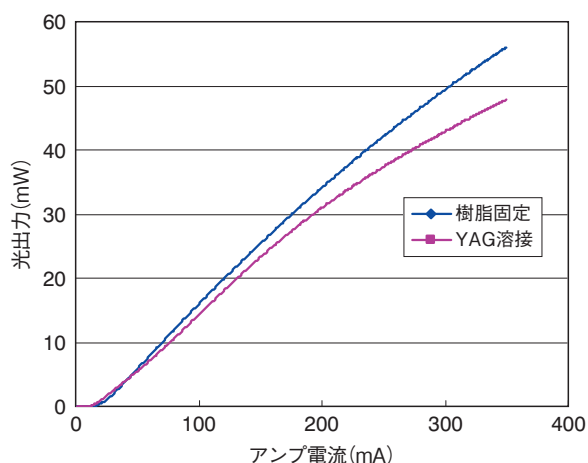


図13 FBT レーザモジュールの電流 - 光出力特性比較
LI characteristics of FBT modules.

樹脂固定を採用することによって、低消費電力、高出力の高性能なFBTモジュールを実現することができた。

5. まとめ

部品の小型化と部品素材選択の自由度向上のため、樹脂接着剤による部品固定を導入したFBTモジュールの開発を行った。

パッケージ内樹脂からの長期アウトガスによるモジュールの信頼性劣化が特に懸念されていたが、分析実験の結果、初期に少量のアウトガスは確認されたが、発生量は短時間で飽和し発生し続けることがないこと、FBTモジュールの長期特性とLD端面に影響は見られないことが分かり、樹脂固定を採用した。樹脂固定を採用したことによって、モジュール設計の自由度が非常に高くなり、モジュール特性を非常に向上でき、消費電力は24%低減、光出力は15%向上となった。

参考文献

- 1) 黒部他, 古河電工時報 **121** (2008), 1-4
- 2) N. Murata et al., J Adhesion, **59** (1996), 39-50