

光ファイバ結合用裏面ガイド穴を有する面発光レーザの開発

Development of a Surface-Emitting Laser with a Backside Guiding Hole for Fiber Coupling

目 次

1. はじめに	3
2. 設計	
2.1 基本構成	5
2.2 デバイス構造	5
3. 試作	
3.1 プロセスフロー	7
3.2 ガイド穴のディップエッチ	8
4. 特性および考察	
4.1 ドライエッチ直後の特性	10
4.2 ディップエッチ後の特性	10
5. まとめ	12
参考文献	18
図 面	15

1. はじめに

面発光レーザとは、基板主面に垂直にレーザ光を出射する半導体レーザであり、東京工業大学の伊賀健一教授によって1977年に提案された。この提案は、半導体レーザの共振器を基板に垂直に形成するというもので、これを東京工業大学・末松安晴教授が「面発光レーザ(surface emitting laser)」と命名した[1]。しかし、その後基板に水平に形成されたレーザからの出力光を反射鏡や回折格子を使って上方に取り出すタイプも面発光レーザと呼ばれるようになり、これらと区別するために現在では伊賀教授の発明したレーザを垂直共振器型(vertical cavity)面発光レーザと呼ぶことが多い。この垂直共振器型面発光レーザは当初InGaAsP/InP系で試作され、1979年に低温パルス発振が確認された[2]。その後も東京工業大学を中心に地道な研究が進められ、1988年にはGaAs系で室温連続動作が実現された[3]。これを契機に他の研究機関も面発光レーザに注目を始めたが、1989年にA T & TのJ. L. Jewellらが活性層にInGaAs/GaAs歪量子井戸を用いることで低閾値発振を達成したことから[4]、開発競争が一気に活発化することとなった[5-7]。

垂直共振器型面発光レーザは、通常の端面発光型の半導体レーザに比べて以下の利点がある[1]。

- 1) モノリシックな共振器形成
- 2) 素子分離前のウエハ単位の検査
- 3) 1 mA以下の極低閾値動作
- 4) 動的単一波長動作
- 5) 狭出射円形ビーム
- 6) 高密度2次元レーザアレイ
- 7) 積層による3次元アレイデバイスの集積化

この内3)~5)は、光ファイバ通信や光ディスクの光源という従来の半導体レーザの応用分野においても、面発光レーザに性能上の優位性があることを示している。用途に応じた発振波長での材料・構造の最適化が行われ、信頼性等の課題がクリアされれば、2)に起因する量産性とあいまって今後これらの応用分野でも面発光レーザが主流になっていく可能性が高い。一方、1), 6), 7)は面発光レーザが集積化に適したレーザであることを示している。これは、面発光レーザが単に高性能の単独発光素子としてだけでなく、光並列処理・光インターコネクションに応用可能な集積光機能素子へと発展する可能性を示唆している。

我々のプロジェクトでは、主に後者の観点から面発光レーザの開発を進めてきた[8, 9]。この開発経過は技術資料[10]~[13]に述べられており、これらの総括と

して技術資料[14]をまとめた。その最後に述べたように、現在開発中の発振波長 $0.98 \mu\text{m}$ の面発光レーザ (SEL) および SEL/HBT を実用化していくのに最適なシステムは並列光インターコネクションであると考えられる。この中でも最も現実的なターゲットはリボンファイバを伝送媒体とする装置間・ボード間光並列バスである。この光並列バスの光源として面発光レーザを用いるためには、チップの性能・信頼性を向上するのみならず、光ファイバとの簡便な光学結合技術を開発することが不可欠である。これは、光並列バス用光源は通信用光源に比べて大幅な低価格化が必要であり、現状の光ファイバモジュールのコストの大半はレーザチップではなくファイバ結合を含めた組立工程に費やされているためである。

面発光レーザに対するファイバ結合を簡便化するために、筆者はチップ裏面にガイド穴を開口した面発光レーザを提案した[15]。本技術資料では、この裏面ガイド穴を有する面発光レーザの試作結果について報告する。ガイド穴は光ファイバの外径とほぼ同じ直径を有し、チップ表面に形成された SEL ポストに対して両面アライナで位置合せされている。このガイド穴に光ファイバ (GI 50/125) を挿入するだけのパッシブアライメントで、発振させたレーザに対するアクティブアライメントに匹敵する結合効率が得られた。ただし、現時点ではガイド穴開口後にレーザからの光出力そのものが低下するという課題がある。これについて検討を加えた結果、ガイド穴の底面荒れによる光の散乱が原因であることが明らかになり、解決の見通しが得られた。

2. 設計

2.1 基本構成

今回試作した裏面ガイド穴を有する面発光レーザの構造を述べる前に、面発光レーザ(SEL)あるいはSEL/HBTを光源とする光インターコネクションにおける基本チップ構成について検討したい。まず、面発光レーザを光源とする場合はリボンファイバを伝送媒体とする装置間・ボード間光並列バスが有望である。この場合、図1(a)に示すようにSELチップをドライバIC上にフリップチップ実装し、SELチップの裏面にリボンファイバを直接結合するという構成が最もシンプルである。この構成は必須部品のみから成り、電気的・光学的接続経路が最短となっている。これを実現するためには、Siチップ上へのSELチップのフリップチップボンディング技術とSELチップ裏面へのファイバ結合技術が必要となる。後者は正に本技術資料で述べようとするものであり、前者については別報で報告する[16]。

一方、SEL/HBTを光源とする場合は、より短距離の光インターコネクションにおいて優位性が発揮されるものと期待される。すなわち、CMOSチップ間の光接続を考えると、CMOSで面発光レーザを直接駆動することは困難と思われるが、SELチップにHBTが集積されていれば図1(b)に示すような構成が可能となる。この場合は、伝送媒体がリボンファイバの並列バスだけではなく、再構成可能な空間光接続とすることも考えられる。ただし、後者の場合には空間光ビームの経路を可変とする光学装置が必要となる。現状このような光学装置は存在しないが、将来的にはマイクロメカニクスを取り込んだマイクロオプティクスによって実現される可能性が高い。また、再構成可能ではないがクロスオーバーの多い複雑な経路の接続を空間光ビームで行うということも考えられる[17]。

2.2 デバイス構造

ファイバ結合用裏面ガイド穴を有する面発光レーザの断面構造を図2に示す。面発光レーザは、発光波長 $0.98\mu\text{m}$ のInGaAs/GaAs単一量子井戸(SQW)がp型およびn型のGaAs/AlAs分布ブラッグ反射器(DBR)に挟まれた通常の構造である。ただし、我々はp型DBRを基板側に配したコモンアノード構造を採用している[12]。また、SELチップはマイクロバンプボンディング(MBB)によってSiサブマウント上に実装されているが、SELチップ側のバンプとするためのポスト(ダミーポスト)をSELポストとは別に形成している[16]。SELポスト上のAu-Ge/Ni電極は配線メタルによってダミーポスト上のカソードに接続されてい

る。また、別のダミーポスト上に形成されたアノードはS Q Wのp-n接合を電氣的に破壊してp型D B Rと接続されている。

裏面ガイド穴はSiO₂をマスクとしてGaAs基板をドライエッチングすることで形成されている。ガイド穴の開口位置は両面アライナを用いてS E Lポストに対してアライメントされている。出射ビームの広がり方を考えると、ガイド穴を深くしてファイバ先端をp型D B Rに近接させた方が結合効率が高くなると考えられるが、実際にはGaAs基板中のビーム広がり角は非常に小さい。ポストの直径が14 μmの面発光レーザでは、GaAs基板中のビーム広がり角は半値全角で1.5°と計算され、基板厚さが350 μmであっても基板裏面でのビーム径は23 μmφになるだけである。一方、空中に出射されてからのビーム広がり角は5.1°であり、ファイバ先端とガイド穴の底面が10 μm離れているとしても、ファイバ先端でのビーム径は24 μmφとなる。従って、マルチモードファイバ(G I 50/125)との結合を考えれば、±10 μm程度のアライメントマージンが確保されることになる。

3. 試作

3.1 プロセスフロー

図2に示した構造を試作するためのプロセスフローを図3に示す。以下図面の順番にプロセス条件等を述べる。

図3(a):

- ・ GaAs基板上に p型 DBR、SQW、n型 DBRを順次MBE成長する(層構造・エピ条件は[14]参照)。
- ・ エッチングマスク兼電極となる Au-Ge/Ni(Ni:50Å, AuGe:1300Å, Ni:400Å, Au:1000Å, Ni:1800Å, Au3000Å, Ni:2300Å)を蒸着・リフトオフする。
- ・ n型 DBRを Cl₂系ガス(Cl₂:2sccm, CF₄:10sccm, Ar:10sccm, 圧力:15mTorr)でドライエッチ(Power:500W, 基板温度27℃, 時間:50-60分)し、SELポストおよびダミーポストを形成する。

図3(b):

- ・ SiN(2000Å)を堆積し、CF₄ドライエッチでSELポストおよびアノードポスト上に開口を形成する。
- ・ Ti/Au(Ti:1000Å, Au:5000Å)を蒸着・リフトオフし、配線パターンを形成する。

図3(c):

- ・ GaAs基板裏面に SiO₂(6000Å)を蒸着する。
- ・ 両面アライナ(ユニオン光学製双対物両面マスクアライメントスコープREM-4)で基板表面のアライメントキーに位置合せしてホトリソグラフィを行う。この際基板表面にもレジストを塗布し、この後のSiO₂ウェットエッチングで表面側がダメージを受けないようにする。この手順を以下に示す。

- | | |
|-----------------|---------------------------------------|
| 1) 水洗 | 10分 |
| 2) 乾燥(リソトドライヤー) | 5分 |
| 3) 乾燥ベーク | 140℃, 30分 |
| 4) OAP塗布(表面) | 4,000rpm |
| 5) レジスト塗布(表面) | AZ4620A:ソルナ=4:1(3μm) 4,000rpm |
| 6) 表面ベーク | 90℃, 15分 ←裏面にレジスト塗布する際に
基板が貼付くのを防ぐ |
| 7) OAP塗布(裏面) | 4,000rpm |
| 8) レジスト塗布(裏面) | AZ4620A:ソルナ=4:1(3μm) 4,000rpm |
| 9) プリベーク | 90℃, 15分 |
| 10) アライメント・露光 | 100秒 |

- | | | |
|-------------------------|----------------------------|-----|
| 11) 現像 | H ₂ O:MF312=1:1 | 15分 |
| 12) リンス | H ₂ O | 60秒 |
| 13) O ₂ プラズマ | 30W, | 3分 |
| 14) ポストベーク | 140℃, | 20分 |

- ・バッファHF(HF:NH₄F=1:10)でSiO₂をウェットエッチする。
- ・GaAs基板をCl₂ガス(Cl₂:5sccm, 圧力:15mTorr)でドライエッチ(Power:500W, 基板温度27℃, 時間:7分30秒)し、ガイド穴を開口する。

図3(d):

- ・基板をスクライブし、1mm□のチップに分割する。
- ・Ti/Pd/Au配線パターンを有するSiサブマウントに紫外線硬化樹脂を滴下し、ツールで吸着したSELチップを位置せする。

図3(e):

- ・SELチップをSiサブマウントに圧着し、樹脂を紫外線硬化する。

この後、Siサブマウントを28ピンのセラミックパッケージにダイボンンドし、最後にSiサブマウントとパッケージの間をワイヤボンンドする。この状態の実体顕微鏡写真を図4に示す。SELチップの表面には5×5アレイの面発光レーザが110μmピッチで形成されており、25個のレーザに対して独立に電気配線が施されている。一方、SELチップの裏面には3×3アレイで9個のガイド穴が形成されている。ガイド穴は120μmφ, 130μmφ, 140μmφの3種であるが、いずれにしても110μmピッチよりも大きいので、レーザ1個おきにガイド穴を形成した。すなわち、各ガイド穴同士の間にはガイド穴を有しない面発光レーザが存在する。また、ガイド穴の大きさを3種類にしたのは、プロセス時のサイドエッチ量が不明であったためであるが、この後のファイバ結合実験では130μmφのガイド穴を用いた。

3.2 ガイド穴のディップエッチ

前節で述べたドライエッチ条件で裏面ガイド穴を開口したところ、ガイド穴の中に残渣が残り、底面が荒れるという問題が発生した。図5(a)はドライエッチ直後のガイド穴の状態を示す顕微鏡写真であり、(b)はαステップで測定した断面形状である。断面形状からエッチング深さは10μm程度であることが分かるが、顕微鏡写真ではエッチング底面が黒っぽく見える。これは、細かい凹凸が生じているためである。また、穴の中心部以外の凹凸パターンがぼやけて見えるのは、残渣に覆われているためである。これらの凹凸および残渣は、面発光レーザの出力光を散乱・遮光するので望ましくないことは言うまでもない。

この状況を改善するために、 H_2SO_4 系エッチャント ($H_2SO_4:H_2O_2:H_2O=1:8:1$)でディップエッチすることを検討した。図6および図7は、10秒間および1分間ディップエッチした後の状態である。全エッチング深さは前者で $13\mu m$ 、後者で $20\mu m$ となっており、ディップエッチによってかなりのエッチングが追加されている。追加エッチング量がディップ時間に比例しないのは、ドライエッチ後の底面近傍がダメージによってエッチングされやすくなっているためではないかと考えられる。底面をエッチングしていくにしたがって、顕微鏡では白っぽく見えるようになり、凹凸の周期が大きくなっていく。ただし、1分ディップした図7の状態では、異方性エッチングのためにガイド穴の形状が真円から歪んでしまっている。裏面ガイド穴を通した面発光レーザからの光出力は、このディップエッチによって改善されるが、その結果は4.2節で述べる。

4. 特性および考察

4.1 ドライエッチ直後の特性

図4に示したパッケージ実装後のSELチップに対して、ファイバ結合実験を行った。パッケージを6軸ステージ上に垂直に固定し、水平方向から3軸ステージにクリップした光ファイバ(GI50/125)心線を近付けた。ファイバはチップに垂直に接近させるので、実体顕微鏡で斜め45°の方向からチップ裏面とファイバ先端を同時に観察した。この状態でファイバ先端の位置を微調整し、裏面ガイド穴にファイバを挿入した。3×3アレイの中心のガイド穴にファイバを挿入した状態を図8に示す。斜め45°から観察しているので元々コントラストは悪いが、この写真は実体顕微鏡の接眼レンズにCCDカメラを取付けて撮影したのでより鮮明さが欠けている。肉眼ではファイバの位置合せには何等支障の無い像が観察可能である。

上記の方法でガイド穴にファイバを挿入した場合(パッシブアライメント)のファイバへの結合効率を図9に示す。図9には、レーザ発振させた状態でファイバ先端を接近させて、ファイバからの光出力が最大となるように位置合せした場合(アクティブアライメント)の結合効率も示している。前者はレーザ発振状態での平均結合効率が33%であり、後者の38%に対して遜色はない。ただし、これらの結合効率の分母となるガイド穴からの光出力は、ガイド穴を明けない場合の1/10に低下している。これは、3.2節で述べた残渣による遮光と底面荒れによる散乱の結果である。これを改善するために、ディップエッチをした場合の結合特性は次節で述べる。

4.2 ディップエッチ後の特性

図10は裏面ガイド穴を通した光出力が、 H_2SO_4 系エッチャントによるディップエッチで改善される様子を示したものである。パラメータに示した座標はSELポストの5×5アレイ中の位置を示しており、(1,1),(3,1),(3,3)の3個が裏面ガイド穴を通した光出力である。それ以外はガイド穴の開口されていない場所であり、出力光パワーはエッチング時間に依存せずほぼ一定である。これは、ディップエッチがレーザの特性そのものには影響を与えないことを示しており、裏面ガイド穴を通した光出力が改善されるのは、ディップエッチによってガイド穴の底面荒れの周期が大きくなり、光の散乱が低減されるためであると判断される。

ディップエッチによるファイバとの結合特性の変化を図11に示す。図11は

ディップエッチ前後およびガイド穴のない場所からの光出力を比較したものである。全方位は10mm²のSiディテクタを近接させて散乱光を含めた全光出力をモニターしており、30°はディテクタを18.6mm離して全角30°の範囲で受光したパワーである。また、AAとPAはアクティブアライメントとパッシブアライメントのファイバ出力である。ディップ前の出力を裏面ガイド穴がない場所からの出力と比較して、全方位の出力が低下しているのは残渣による遮光の効果である。また、30°とAAで低下の比率が大きいのは、底面荒れによる散乱の効果である。AAとPAであまり差が見られないのは4.1節でも述べた通りであり、パッシブアライメントの有効性を示している。遮光および散乱による光出力の低下は、いずれもディップエッチによって改善されている。

図12は30°/全方位の比率とAA/30°の比率の相関関係を示している。上記の通りこれらの比率は何れも散乱の大小に依存していると考えられるが、両者に明確な相関があることがこれを裏付けている。30°/全方位の比率とAA/30°の比率は、裏面ガイド穴がない場合でも60%程度に留まっているが、これは基板裏面が最初から鏡面ではないためである。今回の試作は、通常のGaAs基板を用いたためにこのような結果となったが、今後裏面も鏡面研磨した基板を用いれば両者は100%に近づくものと考えられる。さらに、ガイド穴のエッチング条件(ドライおよびウエット)を最適化して残渣および底面荒れが残らないようにすれば、ガイド穴を通した場合の光出力の低下も無くなると期待される。

5. まとめ

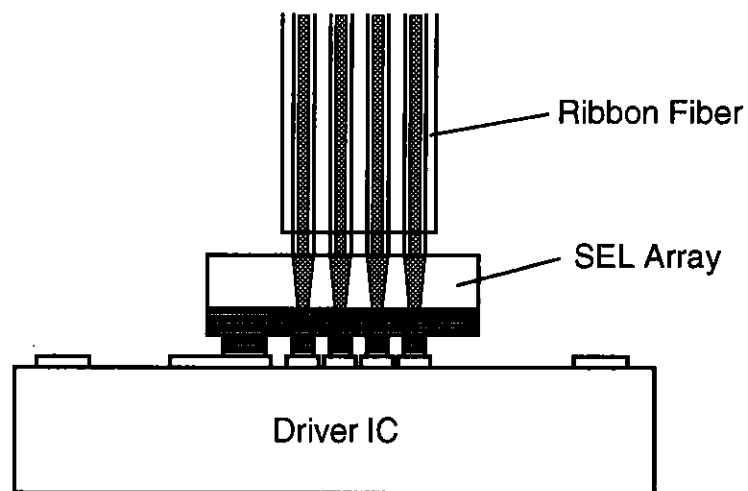
現在開発中の発振波長 $0.98\ \mu\text{m}$ の面発光レーザを実用化する上で、最も現実的なターゲットはリボンファイバを伝送媒体とする装置間・ボード間光並列バスである。この光並列バスの光源として面発光レーザを用いるためには、チップの性能・信頼性を向上するのみならず、光ファイバとの簡便な光学結合技術を開発することが不可欠である。面発光レーザに対するファイバ結合を簡便化するために、チップ裏面にガイド穴を開口した面発光レーザを試作した。ガイド穴は光ファイバ(GI50/125)の心線外径($125\ \mu\text{m}\phi$)とほぼ同じ $130\ \mu\text{m}$ の直径を有し、チップ表面に形成されたSELポストに対して両面アライナで位置合せされている。このガイド穴に光ファイバを挿入するだけのパッシブアライメントで、発振させたレーザに対するアクティブアライメントに匹敵する結合効率33%が得られた。ただし、現時点ではガイド穴開口後にレーザからの光出力そのものが1/10程度まで低下するという課題がある。これについて検討を加えた結果、ガイド穴の底面荒れによる光の散乱が原因であることが明らかになり、今後裏面も鏡面研磨した基板を用い、ガイド穴のエッチング条件を最適化すれば、この問題も解決されるとものと期待される。

参考文献

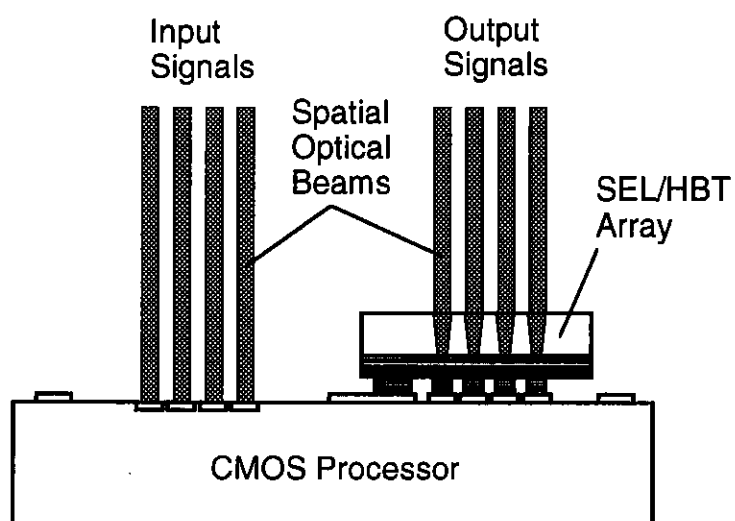
- [1] 伊賀, 小山: 「面発光半導体レーザ」, 応用物理, 60巻, pp. 2-13 (1991).
- [2] H. Soda, K. Iga, C. Kitahara, and Y. Suematsu: "GaInAsP/InP surface emitting injection lasers," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 18, pp. 2329-2330 (1979).
- [3] F. Koyama, S. Kinoshita, and K. Iga: "Room temperature CW operation of GaAs vertical cavity surface emitting laser," Trans. IEICE, vol. E71, pp. 1089-1090 (1988).
- [4] J.L. Jewell, A. Scherer, S.L. McCall, Y.H. Lee, S. Walker, J.P. Harbison, L.T. Florez: "Low-threshold electrically pumped vertical-cavity surface-emitting microlasers," Electron. Lett., vol. 25, pp. 1123-1124 (1989).
- [5] R.S. Geels, S.W. Corzine, J.W. Scott, D.B. Young, and L.A. Coldren: "Low threshold planarized vertical-cavity surface-emitting lasers," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 2, pp. 234-236 (1990).
- [6] T. Numai, M. Sugimoto, I. Ogura, H. Kosaka, and K. Kasahara: "Current versus light-output characteristics with no definite threshold in pnpn vertical to surface transmission electro-photonic devices with a vertical cavity," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 30, pp. L602-L604 (1991).
- [7] P. Zhou, J. Cheng, C.F. Schaus, S.Z. Sun, C. Hains, K. Zheng, E. Armour, W. Hsin, D.R. Myers, and G.A. Vawter: "Cascadable, latching photonic switch with high optical gain by the monolithic integration of a vertical-cavity surface-emitting laser and a pn-pn photothyristor," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 3, pp. 1009-1012 (1991)
- [8] H. Adachi, Y. Kobayashi, T. Chino, and K. Matsuda: "A surface emitting laser with a common-anode configuration for application to the photonic parallel memory," in Tech. Dig. SSDM'93 (Chiba, 1993), pp. 1029-1031.
- [9] T. Chino, Y. Kobayashi, H. Adachi, and K. Matsuda: "An 8 X 8 array of surface emitting lasers with heterojunction bipolar transistors integrated on them," in Tech. Dig. IEDM'93 (Washington, DC, 1993), pp. 921-923.
- [10] 足立, 松田, 知野: 「高ドーブP型GaAs/AlAsヘテロ接合のエネルギーバンド

構造の計算」, 登録技術資料, SRC-SO-92K-004 (1992).

- [11] 小林, 足立, 知野, 松田: 「垂直共振器型面発光レーザの作製における分子線エピタキシャル成長」, 登録技術資料, SRC-SO-92S-052 (1993).
- [12] 足立, 知野, 小林, 松田: 「アノード接地型垂直共振器面発光レーザの試作」登録技術資料, SRC-SO-92S-053 (1993).
- [13] 知野, 小林, 松田: 「面発光レーザ/ヘテロ接合バイポーラトランジスタ集積素子の開発(1)」, 登録技術資料, SRC-SO-93K-026 (1993).
- [14] 松田, 小林, 足立, 知野: 「垂直共振器型面発光レーザの開発」, 登録技術資料, SRC-SO-93S-019 (1994).
- [15] 松田: 特願平5-20993 (1993).
- [16] 知野, 小林, 松田, 吉田: 「面発光レーザのマイクロバンプボンディングを用いた実装法の検討」, 技術資料登録予定.
- [17] 松田: 特願平5-337767 (1993).



(a)



(b)

図1 装置間～チップ間光インターコネクションにおけるチップ構成の提案：
 (a) 装置間・ボード間接続で面発光レーザ(SEL)アレイをドライバIC
 上に実装、(b) チップ間接続でSEL/HBTアレイをCMOS上に実装

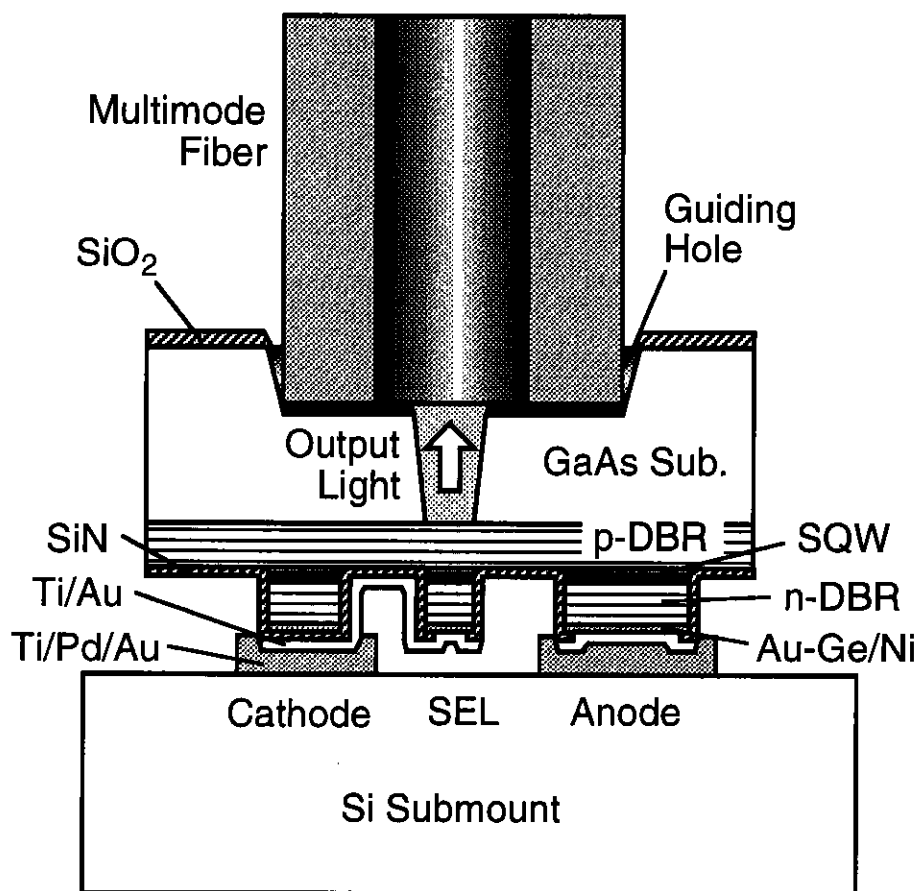


図2 ファイバ結合用裏面ガイド穴を有するコモンアノード面発光レーザの構造と実装状態を示す断面図（アノード電極はSQWのp-n接合を電氣的に破壊することでp-DBRに接続されている）

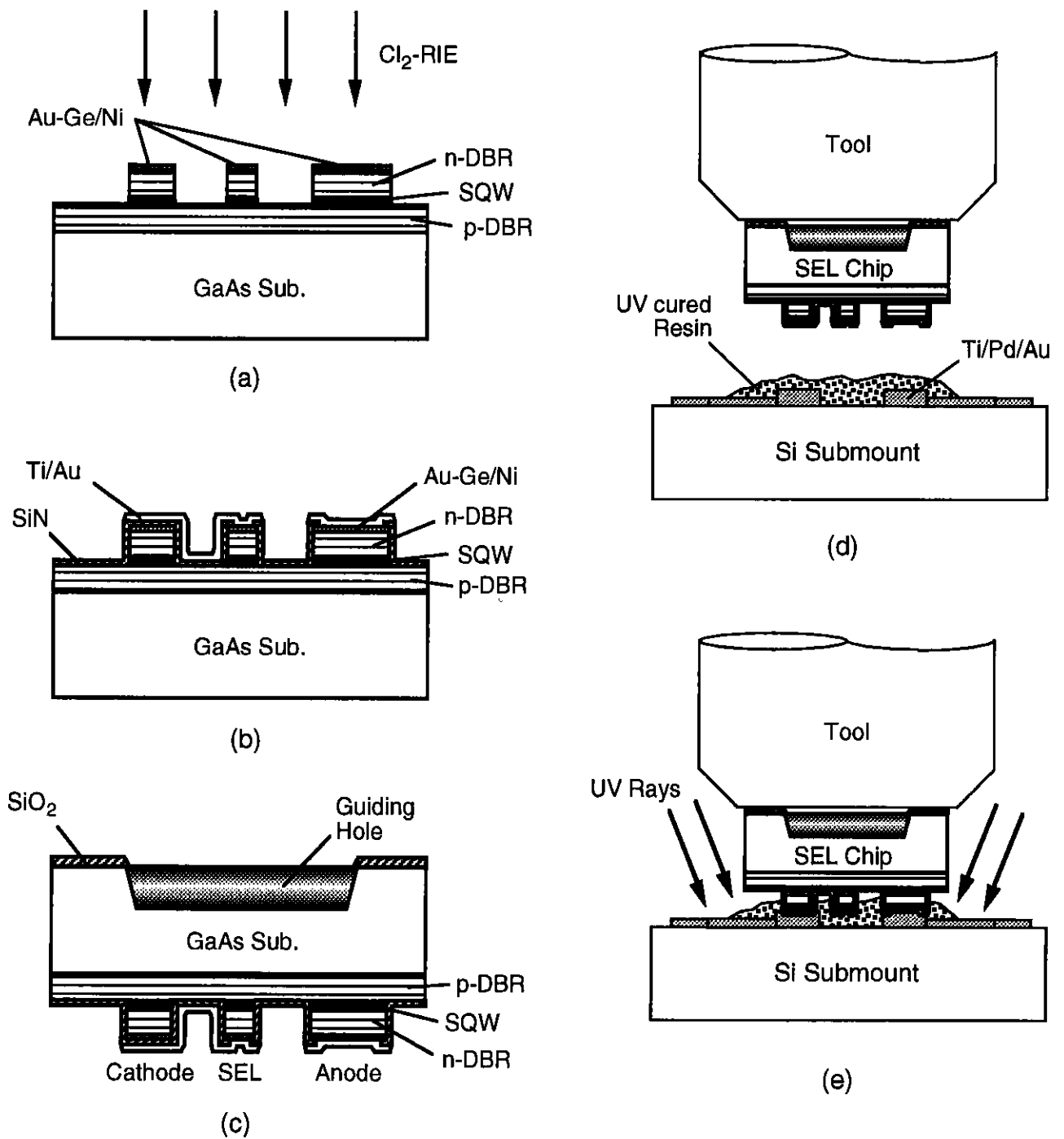


図3 ファイバ結合用裏面ガイド穴を有する面発光レーザの作製・実装工程：(a) SELポストおよびダミーポストの形成、(b) 表面メタル配線、(c) 裏面ガイド穴の開口、(d) MBB実装時のチップ位置アライメント、(e) 樹脂の紫外線硬化によるチップの固定

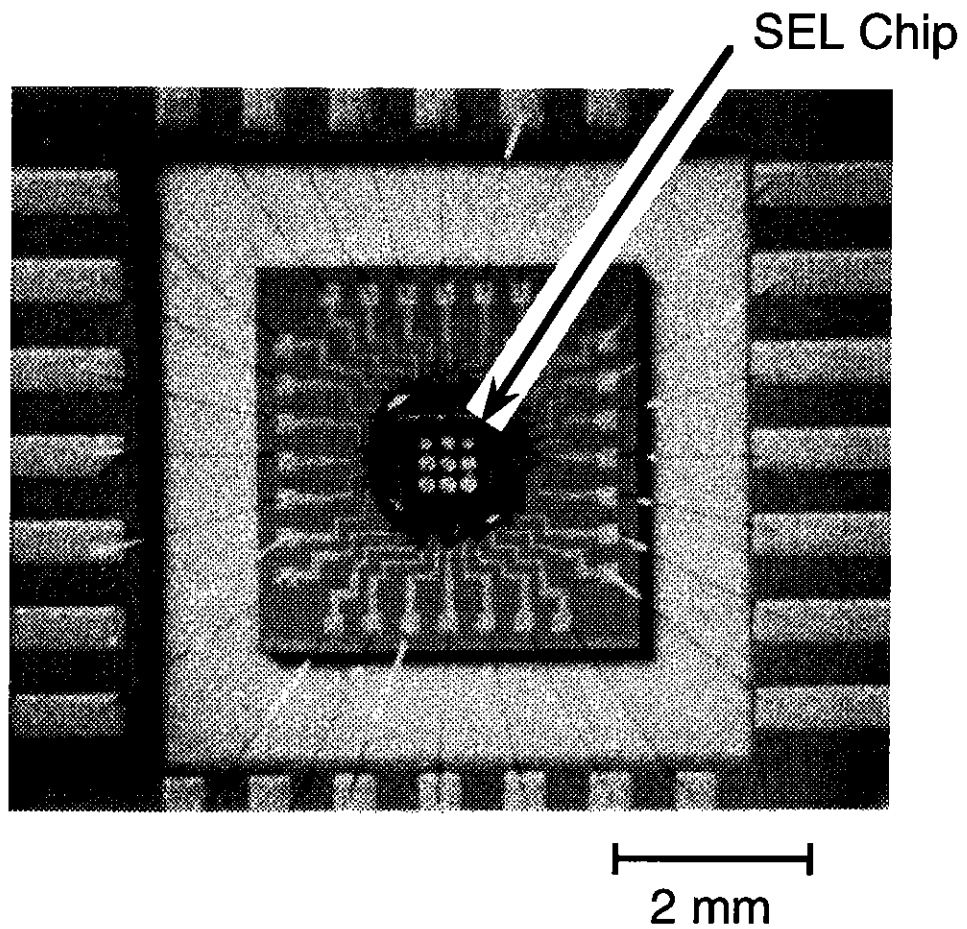
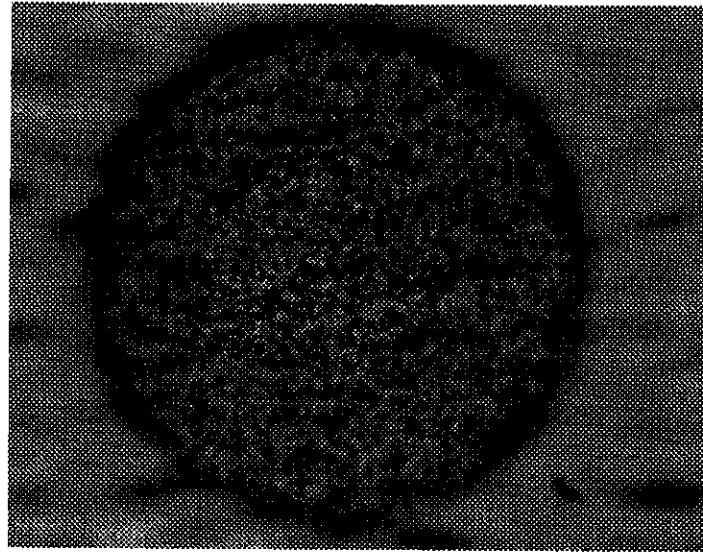


図4 9個の裏面ガイド穴を有する面発光レーザーチップをSiサブマウント上にMBB実装し、さらにサブマウントをセラミックパッケージにダイボンドしてワイヤボンドを施した後の実体顕微鏡写真

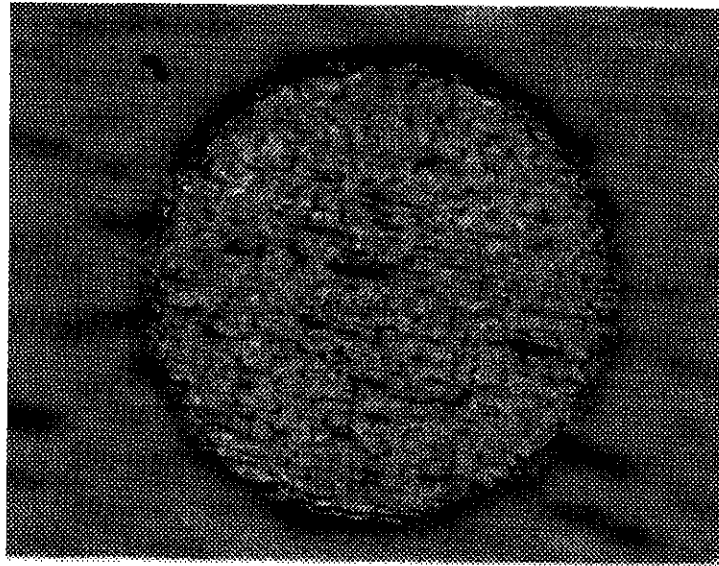


(a)

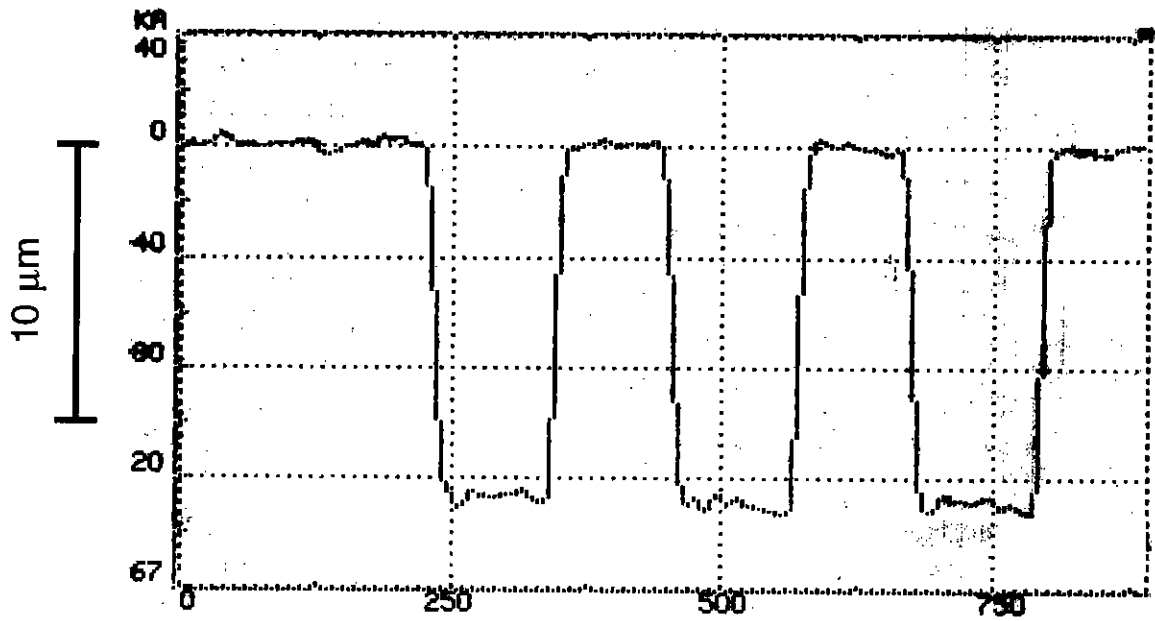


(b)

図5 ドライエッチ直後のファイバ結合用裏面ガイド穴の (a) 顕微鏡写真と (b) α ステップによって測定した断面形状 (3個のガイド穴に渡って測定している)

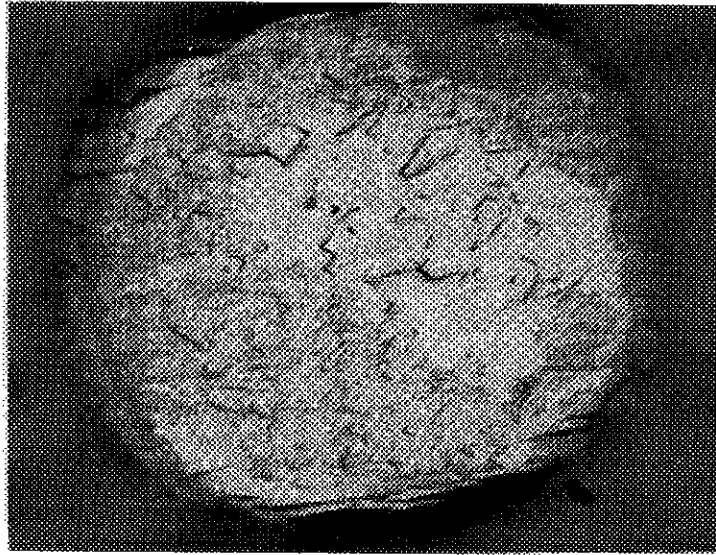


(a)

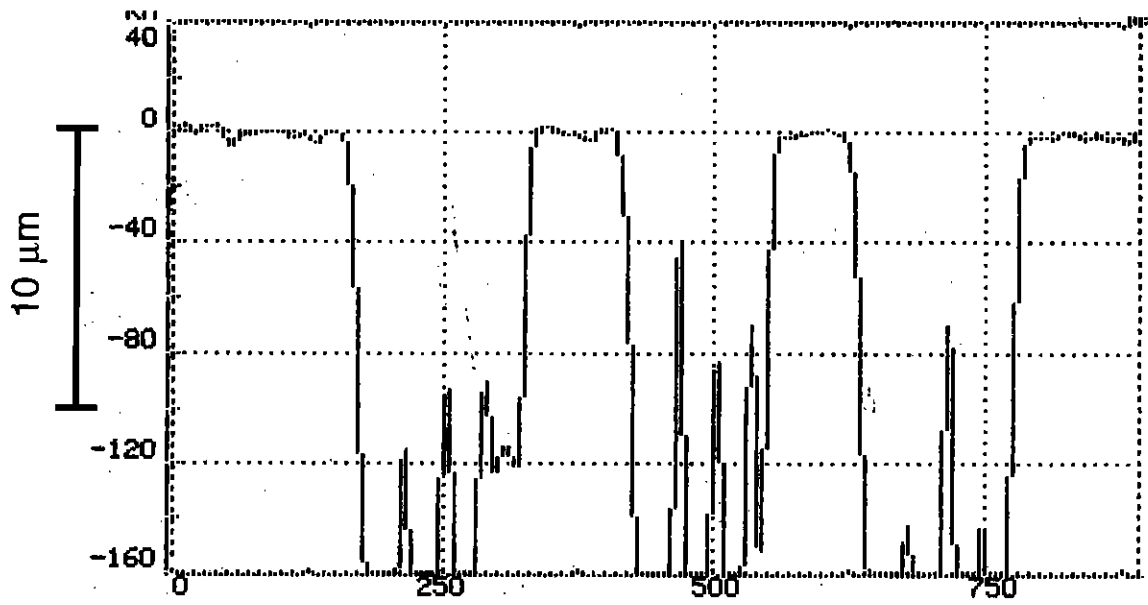


(b)

図6 H_2SO_4 系で10秒間ディップエッチした後のファイバ結合用表面ガイド穴の
(a)顕微鏡写真と(b) α ステップによって測定した断面形状(3個のガイド
穴に渡って測定している)



(a)



(b)

図7 H_2SO_4 系で1分間ディップエッチした後のファイバ結合用裏面ガイド穴の
 (a)顕微鏡写真と(b) α ステップによって測定した断面形状(3個のガイド
 穴に渡って測定している)

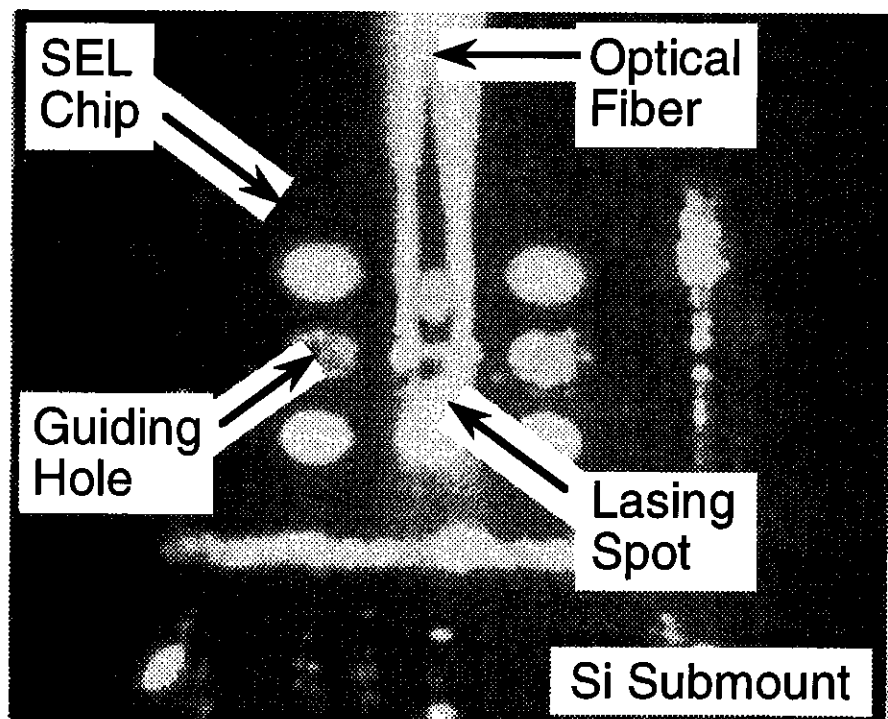


図8 9個の裏面ガイド穴を有する面発光レーザをパッケージに実装し、中心のガイド穴にファイバを挿入した後、レーザ発振させたところ（斜め45°から見た所であるためコントラストが悪い）

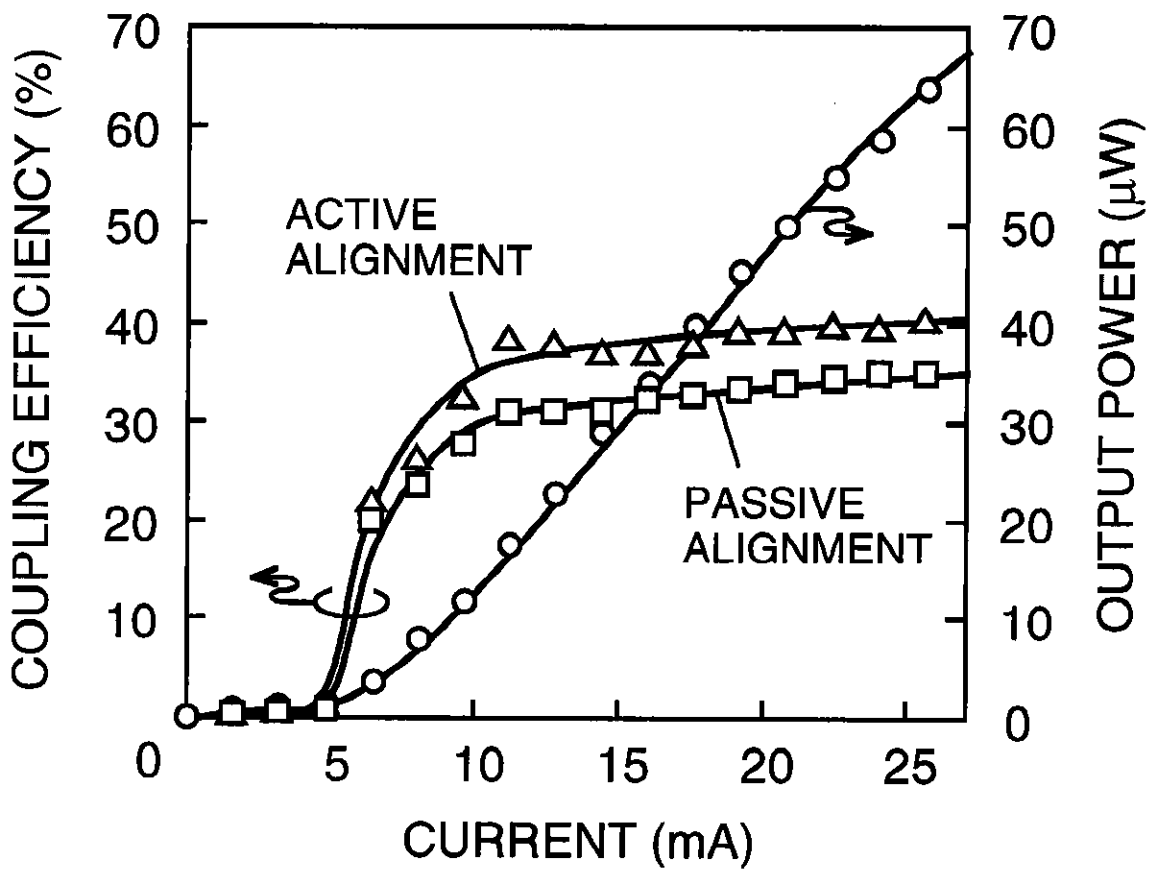


図9 裏面ガイド穴にファイバを挿入した場合(パッシブアライメント)とレーザを発振させた状態での位置合せ(アクティブアライメント)の結合効率の比較 (全光出力を併せて示すが、ガイド穴を開く前の1/10に劣化している)

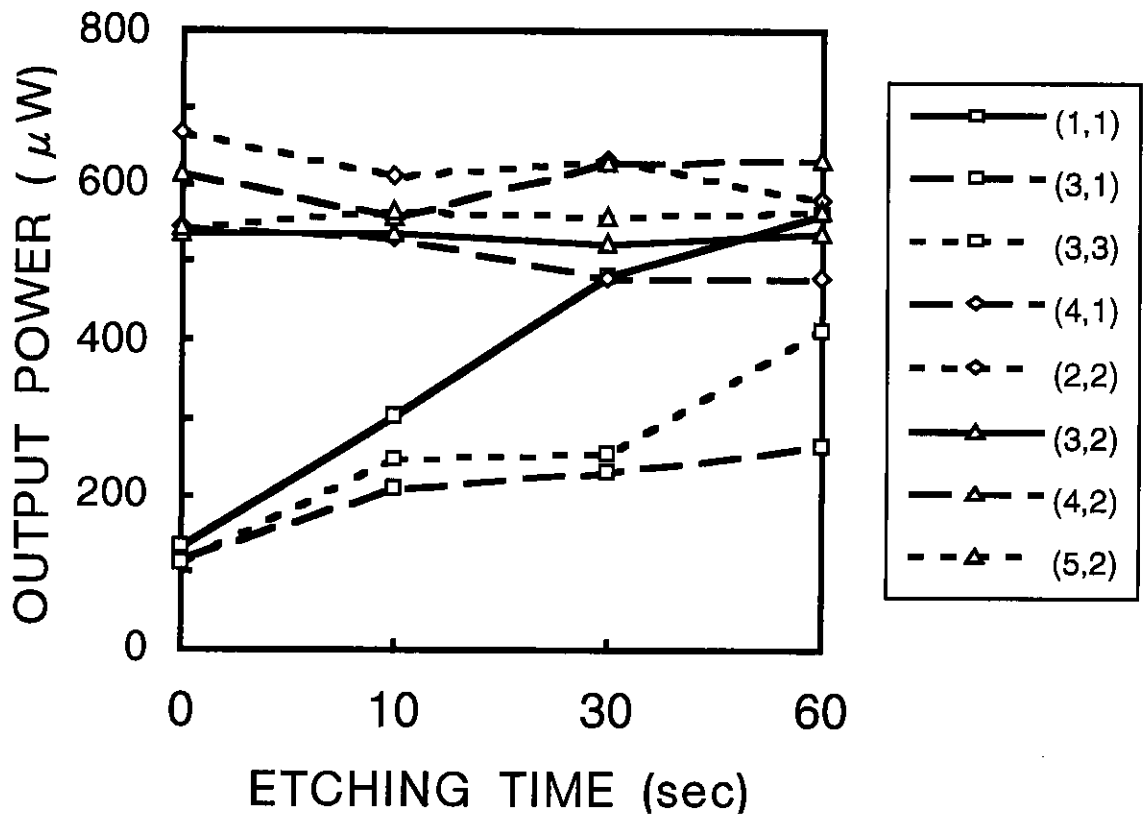


図10 H_2SO_4 系エッチャントによって裏面ガイド穴をディップエッチすることによる光出力の回復：(1,1), (3,1), (3,3) が裏面ガイド穴を通しての光出力、それ以外は裏面ガイド穴を開口していない場所からの出力

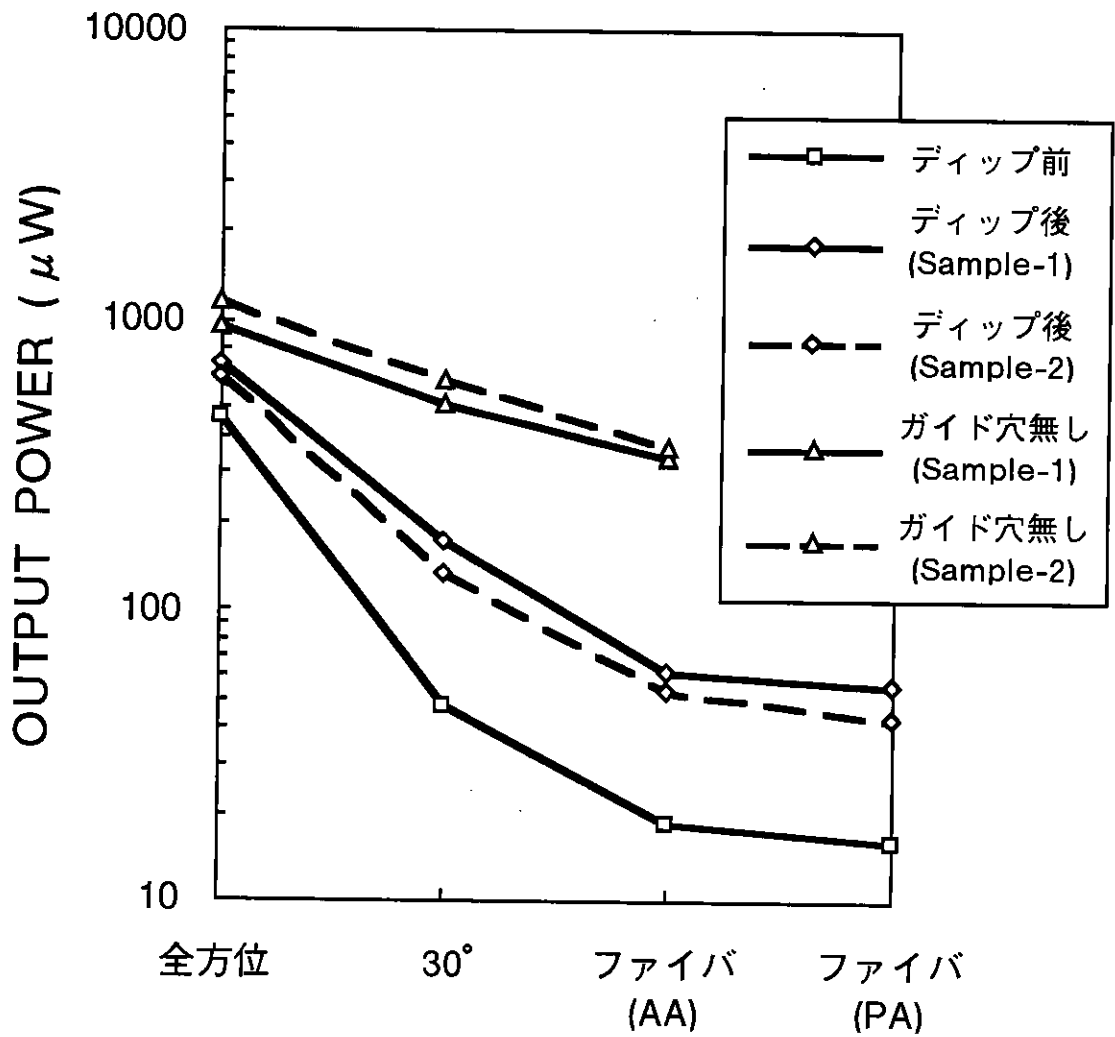


図11. 裏面ガイド穴のディップエッチ前後およびガイド穴のない場所からの光出力比較 (ディップエッチ後およびガイド穴のない場所からの光出力はそれぞれ2サンプルに対して測定) : 全方位は10mm \square のSiディテクタを近接させて測定、30° はディテクタを18.6mm離して全幅30度の範囲で受光、AAはアクティブアライメントのファイバ出力、PAはパッシブアライメントのファイバ出力

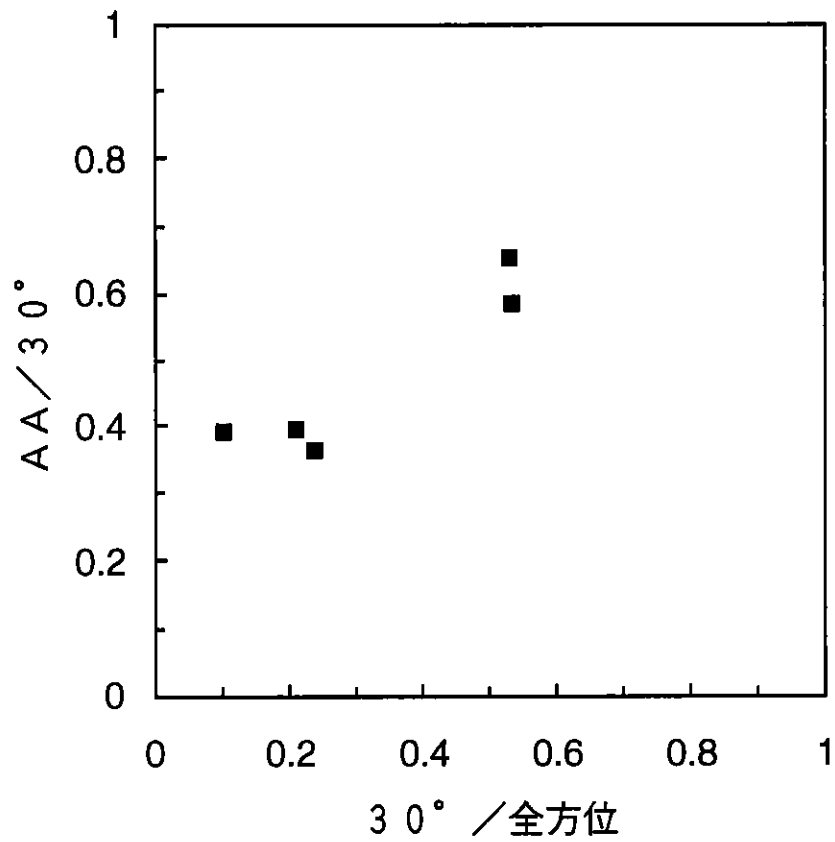


図 1.2 10mm□のSiダイテクタを近接させて測定した光出力に対するダイテク
 タを18.6mm離して全幅30度の範囲で受光した光出力の比率（30° /
 全方位）と、前者に対するアクティブアライメントファイバ出力の比
 率（AA / 30°）の相関関係