

特集 超小型レーザスキャニングモジュールにおける高精度実装*

Ultra-small Laser Scanning Module Using Extremely Accurate Alignment Technology

吉原 晋二

Shinji YOSHIHARA

大原 淳士

Junji OHARA

安部 克則

Katsunori ABE

竹内 幸裕

Yukihiko TAKEUCHI

川原 伸章

Nobuaki KAWAHARA

We report that an ultra-small laser scanning module of the millimeter size was realized. This laser scanning module consists of a silicon substrate, a laser diode array with a multi-emitter, and microprisms. The microprism measures $180\ \mu\text{m}$ wide, $100\ \mu\text{m}$ high, and $80\ \mu\text{m}$ thick. The smaller the optical elements used, the more precise the alignment accuracy required. The microprisms and alignment pins for the laser diode array are fabricated on the same silicon substrate using MEMS technology. Then the laser diode array is attached to the silicon substrate by setting it with the alignment pins. The alignment accuracy was $\pm 2.8\ \mu\text{m}$ for the interval between the laser diode array and microprisms. The rotational angle accuracy of each axis was within ± 0.3 degrees. This high alignment accuracy has been achieved without cameras

Key words : Laser Scanning Module, Electronic Scanning, Micro-prism, Laser Diode, Alignment Pin, High Accuracy Alignment

1. はじめに

現在、レーザ光を走査するレーザスキャニングモジュールは、レーザプリンタ、バーコードリーダおよび車間距離センサとしてレーザレーダ^{1) 2)}等に適用されている。モジュールは主に、レーザ光を射出するレーザダイオードと、レーザ光を走査するスキャン機構を持つシステムで構成される。

レーザプリンタ、バーコードリーダでは、レーザ光を高速回転したポリゴンミラーで反射することで、レーザ光を走査する。この走査で、高精度かつ高速な印刷や、小さくパターン化したバーコード記号の読み取りを行う。また、レーザレーダではバンパーに組み込み、前方を走行する車輻にレーザ光を照射し、反射光が受光部に戻る時間を計測することで車間距離を算出する。これにより車間距離を一定に保つようシステムが車速制御を行う。

これらの用途に対して、超小型で信頼性に優れた超小型レーザスキャンモジュールが要求されている。

レーザ光を走査するモジュールは、レーザ射出部とスキャン機構部から構成される。スキャン方法は、ポリゴンミラーを回転させ、ミラーにレーザ光を照射する方法が一般的である。この方法ではポリゴンミラーが数cm角と大きく、またポリゴンミラーを回転させるためのモータ駆動部を含めるとスキャン機構部は大型化する。超小型化するにはスキャン機構部を見直す

必要がある。

スキャン機構部を超小型化するために、ミラーやレンズを小型化する方法がある。例えば、MEMS技術を用いて作製したマイクロミラー³⁾や揺動式レンズ⁴⁾がある。半導体製造工程で形成できるため、小型化かつ量産性に優れる。しかしながら、スキャン機構部を含めたレーザスキャニングシステムとして超小型化を考えると、特に部品の位置決めが課題となる。2mm角程度の小さなマイクロミラーに、レーザ光を照射するためには、マイクロミラーに対してレーザダイオードを高精度に位置決めする必要がある。部品の高精度位置決めは通常フリップチップボンダによって行う。マイクロミラーが形成されたチップと、レーザダイオードのチップとを、搭載するための基板上に、アライメントマークを用いて高精度に位置決めする。しかし、各チップと搭載基板に形成するアライメントマークの加工精度やフリップチップボンダのマウント精度によって搭載精度は低くなり、それを許容するために、レンズ等の部品を増す、あるいは部品形状を大きくしたりする。結果としてレーザスキャニングモジュールの超小型化は困難となる。

そこで本報では、走査方法と実装方法を見直し、ミリメートルサイズの超小型レーザスキャニングモジュールを製作した。そのモジュールと製造方法について述べる。

* (社)電気学会の了解を得て、電気学会論文誌E Vol. 129, No. 12, 2009「超小型レーザスキャニングモジュールにおける高精度実装」より、一部加筆して転載

2. 超小型レーザスキャンングモジュール概要

今回超小型化するために、ポリゴンミラーやマイクロミラーのような機械的なスキャン方式ではなく、プリズムによる屈折を利用した電子スキャン方式を適用した。

Fig. 1はプリズムでレーザ光を走査する超小型レーザスキャンングモジュールの構成図である。レーザダイオードの発光数と同一数の、マイクロプリズムをレーザダイオード直近に設置する。発光部からレーザ光を出射すると、マイクロプリズムの頂角に対応してレーザ光が屈折する。今、中心部のマイクロプリズムを平行平板とし、両側のマイクロプリズムの頂角を順に大きくする。各発光部から順次レーザ光を出射すると、マイクロプリズムのそれぞれの頂角に対応して、レーザ光が角度を変えて屈折し、一方向に走査できる。発光の順序を逆方向にすれば、屈折光は逆方向に走査される。この操作を繰り返せば、屈折光は往復することになり、ポリゴンミラーと同じようなレーザ光走査を行うことが可能となる。

電子スキャン方式にすることで、モータのような機械的な駆動部を排除でき、マイクロミラーより直近にレーザチップを搭載することができる。そのため、複数のマイクロプリズムを小さく、かつ高精度に加工することでモジュールを超小型にすることが可能となる。また可動部が無いために信頼性の大幅向上が可能となる。

今回作製した超小型レーザスキャンングモジュールのサイズは1.6mm×2.0mm×0.6mmで、幅180 μ mのマイクロプリズムが5個ある。作製するための、キーとなる技術はマイクロプリズム形成技術と高精度位置決め技術である。

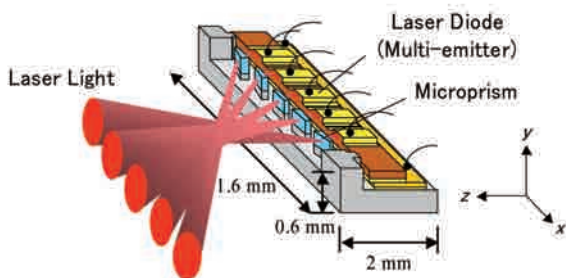


Fig. 1 Schematic Illustration of the Proposed Ultra-small Laser Scanning Module

3. マイクロプリズム形成技術

マイクロプリズムでの電子スキャン方式で重要なことは、複数のマイクロプリズムを一括かつ同時に形成することである。プリズムを一つ一つ加工し、一つ一つ配置しようとする、全プリズムの加工誤差および位置決め誤差を許容すべく、プリズムを大型化する必要がある。プリズムが大型化すれば、プリズム間の距離が拡大する。それに対応してレーザダイオードの発光部間の距離も拡大し、両者のチップサイズが大となる。そこで、複数のマイクロプリズムを一括かつ同時に形成するために、シリコン半導体製造工程を利用したMEMS技術に着目した。MEMS技術の高アスペクト比トレンチエッチング技術と酸化によりマイクロプリズムを形成する。

このマイクロプリズムの形成方法について述べる。マイクロプリズムは、シリコン基板のDRIE (Deep Reactive Etching) のトレンチ加工技術 (Fig. 2)^{5) 6)}と、熱酸化にて形成する。この工程についてFig. 3を



Fig. 2 Sectional SEM Photograph of the Silicon Substrate after Etching

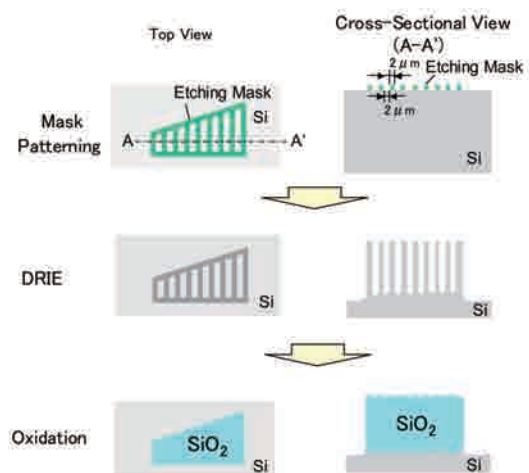


Fig. 3 The Process Steps of Micro-prism Fabrication

用いて説明する。まず、Si (100) 基板表面上にプリズム形状になるようにエッチングマスクを形成する。マスクの内側はシリコンの抜きと残しが交互になるような縞状とする。マスクには厚さは $2\mu\text{m}$ の SiO_2 を用いた。次にDRIEを施すことで、深さ $100\mu\text{m}$ 抜き加工を行う。プリズム形成領域内には薄い壁状の薄膜シリコン(幅 $2\mu\text{m}$)が等間隔で多数形成される。その後、側壁に形成されるスキヤロップによる表面粗さを低減するために、 1150°C で H_2 アニールを施した。そして同温度の酸化雰囲気中にて熱酸化すると、全ての薄い壁状のシリコンは SiO_2 となる。すなわち透明になる。シリコンは酸化により膨張し、間隙(幅約 $2\mu\text{m}$)を埋め、隣り合う SiO_2 が融着し合う。これにより SiO_2 のブロックがプリズム部となる。シリコンの熱酸化による膨張(2.2倍)を前提に、エッチングパターンを設計しておく。エッチングパターンの間隔が最適化されていないと、熱酸化膜間に空気層が介在し、その領域は非融着部となる。この非融着部にレーザー光が入射すると、熱酸化膜と空気層との屈折率差により、回折光を含む出射光となる。また、融着部の屈折率は熱酸化膜と同じであり、屈折率差が生じないため回折光は見られない。

また、マイクロローディング効果により、プリズム形成領域のトレンチエッチング深さは、プリズム外周部と比較して浅くなる。酸化後、プリズムの入射面の有効面積は小さくなるが、プリズムの下にシリコンが残る。このシリコン残し部は、 SiO_2 との熱膨張係数差から生じる熱応力を緩和する台座として機能し、熱応力によるシリコン基板およびプリズム内のクラック発生を抑制する効果がある。

この形成技術の特徴は、半導体製造工程にてマスクによるホットエッチング工程で作るため、複数のマイクロプリズムを互いに高精度に位置決めし、且つプリズムモジュールとして大量にシリコン基板上に形成できる。また、プリズムスキヤンの頂角形成もエッチングマスクパターンの形状で任意に且つ容易に作成できる。

4. 高精度位置決め技術

超小型なマイクロプリズムを形成できたとしても、鉛直かつ水平方向に広がるレーザー光を出射するレーザーダイオードをマイクロプリズムに対して精度よく位置決めしなければならない。マイクロプリズムが小さければ小さいほど位置決め精度は厳しくなる。我々が形成するマイクロプリズムのサイズに対し、回転軸方向

を含めた6軸方向の位置決め精度で、特に重要となるのは光軸(Z軸)方向の精度 $\pm 3\mu\text{m}$ である。

この実現のため、実装の回数を最小とする必要がある。すなわちマイクロプリズムとレーザーダイオードを別の基板にマウントすると、実装回数が2回となり精度が低下する。今回レーザーダイオードをマイクロプリズムを形成したシリコン基板上にマウントした。これにより実装回数は1回となり、位置決め精度が向上する。

そのための技術ポイントは、マイクロプリズムチップへの高精度なアライメントマーク形成である。そこで、マイクロプリズムを形成するときのトレンチエッチングを利用した。マイクロプリズムの形成と同時にアライメントマークを形成することができる。これによりプリズムとアライメントマークは同時に形成され、両者の位置精度はフォトマスクの精度に等しいサブミクロン以下の高精度となる。この3次元アライメントマークをアライメントピンと称す。なお、アライメントピンの側面はトレンチエッチングで加工されるため、極めて垂直である(Fig. 2参照)。そこで、画像を用いて位置合わせするのではなく、このアライメントピンに直接レーザーダイオードチップを突き当てることにした。

レーザーダイオードチップの発光面はへき開によって形成する。へき開方向は結晶方位により決まり、へき開面は平坦性に優れる。このへき開面のうち発光に寄与しない部分をアライメントピンの側面に突き当てて、レーザーダイオードチップを位置決めする。レーザーダイオードチップをアライメントピンに接触したとき、レーザーダイオードチップはマイクロプリズムに対しサブミクロンの精度で位置決めできることになる。なお、回転方向(θ 軸)の位置決め精度も高めるため、アライメントピンは、レーザーダイオードの端部に対応する位置に2箇所形成した。今回の突き当て実装の効果はZ軸方向すなわちレーザーダイオード発光面とプリズムの間隔を決めるものである。

5. 超小型レーザースキヤニングモジュールの形成

Fig. 4に試作したマイクロプリズムとアライメントピンの製作工程イメージを示す。6インチSi (100) ウェハ表面上に、マイクロプリズムおよびアライメントピンを形成する領域に SiO_2 のエッチングマスクを形成する。その後、DRIEを行い、熱酸化して、マイクロプリズム、アライメントピンを同時に形成する。今回

光学設計の仕様からアライメントピンの突き当て側面に対し、 $20\mu\text{m}$ 後退させてプリズムを形成している。

次にレーザダイオードとの接合領域のシリコン基板上にTi/Au膜（ $100\text{nm}/200\text{nm}$ ）を成膜する。そしてダイシングカットによりチップ化し、アライメントピンが形成されたマイクロプリズムチップができる。次にFig. 5に示すように、マイクロプリズムチップ上にレーザダイオードチップをマウントする。レーザダイオードチップの裏面には厚さ $1.5\mu\text{m}$ の80%AuSn膜を蒸着法にて成膜した。まず、マイクロプリズムの高さ中心位置とレーザダイオードの発光部が一致するように、厚さを定めたサブマウント基板と称す台座を準備する。サブマウント基板の表面には厚さ $0.6\mu\text{m}$ のAu膜を成膜し、裏面には厚さ $1.5\mu\text{m}$ の80%AuSn膜を蒸着法にて成膜した。そのサブマウント基板をシリコン基板にAuSn共晶接合する。そして、レーザダイオードチップをアライメントピンの側面に突き当てた後、レーザダイオードチップを下降し、サブマウント基板表面と再度接合温度 330°C でAuSn共晶接合する。以上の工程によって超小型レーザスキャンングモジュールが完成する。

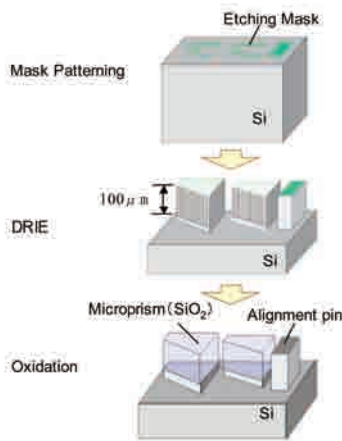


Fig. 4 Simultaneous Fabrication of Micro-prisms and Alignment Pins

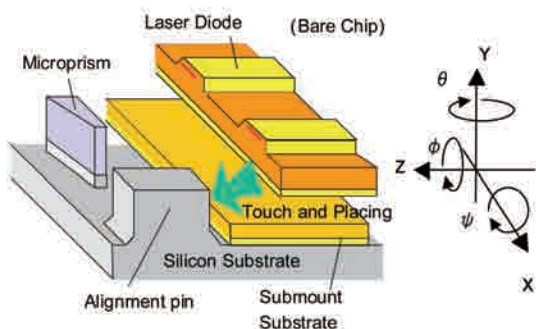


Fig. 5 Alignment Method of Micro-prisms and Laser Diode Chip using Alignment Pins

6. 実験結果と考察

6.1 アライメントピンによる位置決め

Fig. 6に作製したマイクロプリズムとアライメントピンを示す。5方向に出射するため、中心部のプリズムを平行平板とし、その両側に軸対称で頂角 9° および 17° を持つマイクロプリズムである。中心部のプリズム寸法は、高さ $100\mu\text{m}$ 、幅 $180\mu\text{m}$ 、厚さ $80\mu\text{m}$ である。Fig. 7はアライメントピンによって位置決めしたレーザダイオードチップとマイクロプリズムの平面写真である。位置決め精度が最も厳しい、光軸（Z軸）方向の位置決めは、マイクロプリズムとレーザダイオードチップとの距離が $20\mu\text{m} \pm 2.8\mu\text{m}$ (3σ , $n=5$)と、目標値 $3.0\mu\text{m}$ に対して満足する結果が得られた。これは、プリズムとアライメントピンがフォトリソグラフィの精度（ $\leq 1\mu\text{m}$ ）で形成できたこと、アライメントピンの突き当て面と、レーザダイオードのへき開面が垂直になっているためである。なお、Table 1にすべての軸方向における位置決め精度を示す。いずれも目標を満足する結果を得た。なお、レーザダイオードをアライメントピンに突き当てた後、レーザダイオードチップの突き当て面を確認したが、クラックはなかった。

位置精度 $\pm 2.8\mu\text{m}$ となる理由としては、レーザダイオードをマウントする領域が平坦でないことが挙げられる。この部分はDRIEのエッチング面であるため、

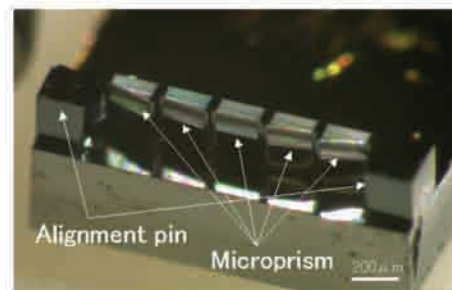


Fig. 6 SEM Photograph of Micro-prisms and Alignment Pins Fabricated Simultaneously

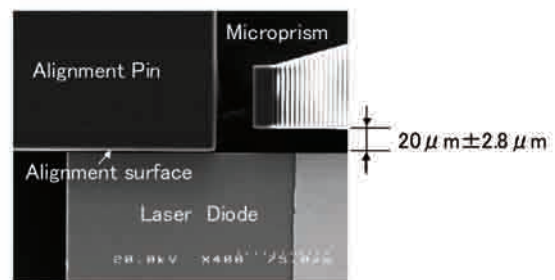


Fig. 7 SEM Photograph of Alignment Pin and Laser Diode after Die Bonding (Close-up of alignment portion)

Table 1 Summary of the Measurement Results of Alignment Accuracy

Axis	Accuracy of position ($3\sigma, n=5$)
X	$\pm 10.0 \mu\text{m}$
Y	$\pm 13.7 \mu\text{m}$
Z	$\pm 2.8 \mu\text{m}$
ϕ	$\pm 0.16^\circ$
ψ	$\pm 0.29^\circ$
θ	$\pm 0.20^\circ$

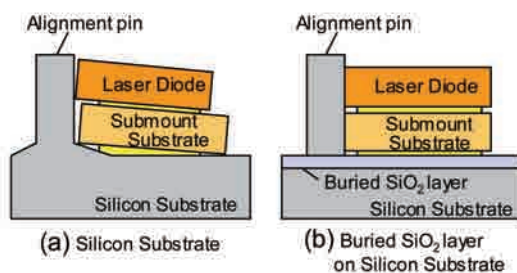


Fig. 8 Comparison Image of the Decline of Laser Diode on (a) Silicon Substrate and (b) Buried SiO₂ Layer

プリズムに近づくにつれマイクロローディング効果により、若干ではあるがエッチング深さが浅くなる。このため、レーザダイオードが傾き、アライメントピンとレーザダイオードの接触面に隙間が生じていると推測している。Fig. 8(a)にマイクロローディング効果により傾いたレーザダイオードの概念図を示す。この対策としては、Fig. 8(b)に示すSOI (Silicon on Insulator) 基板の利用が考えられる。DRIE においてSOI基板の埋め込み絶縁膜が露出した時点でもエッチングは、深さ方向に進行するため、アライメントピンおよびプリズム近傍でのエッチング深さは均一になる。よって、レーザダイオードの出射面（へき開面）が傾くことなく、アライメントピンに突き当たるため、Z軸方向の位置決め精度は向上できる。また、アライメントピンの表面では、スキヤロップによる表面荒れで位置決め精度の悪化が懸念されるが、プリズム形成時のH₂アニールで、スキヤロップによる表面荒れが低減できている。表面粗さ (Ra) は、H₂アニール前で87nmであり、アニール後で6.5nmである。この表面粗さが位置決め精度に与える影響は小さい。

6.2 モジュールとレーザ走査結果

Fig. 9は製作した超小型レーザスキャニングモジュールである。モジュールの寸法は1.6mm×2.0mm×0.6mmである。マイクロプリズム上に搭載したレーザダイオードチップは、幅100μmの発光部を5個持つアレイチップである。Fig. 10は発光部1個に対して、パルス駆動させたときのI-L特性である。パルス幅50nsec, 繰り返し周波数1kHz, ピーク電流30Aで、36Wのレーザ光を出力する。

次にレーザ走査を検証した。Fig. 11に実験構成を示す。超小型レーザスキャニングモジュールの発光端面から30cm離れた位置にスクリーンを設置し、スクリーン上に照射されるレーザ光の像を赤外線カメラにて撮影した。ここでレーザダイオードからの、鉛直方向および平行方向の拡がり光をコリメートするため、超小型レーザスキャニングモジュール前にコリメートレンズを設置した。コリメートレンズは出射側にトロイダル面を形成した。

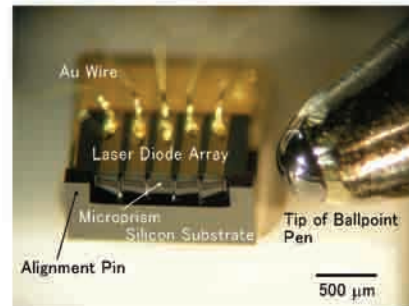


Fig. 9 Fabricated Ultra-small Laser Scanning Module

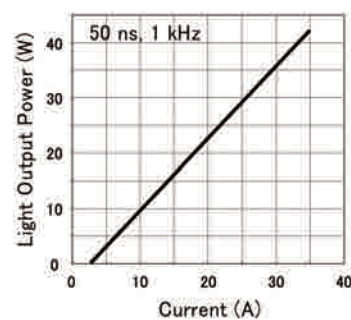


Fig. 10 Light-current Characteristics of a (single-emitter) Laser Diode Device under Pulse Operation

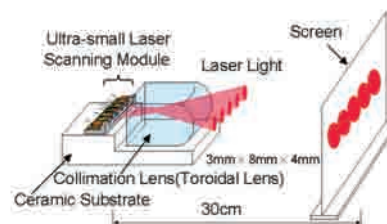


Fig. 11 Experimental Image of Beam Scanning

5個のレーザダイオードの発光部に順次、パルス電流を注入した。Fig. 12はスクリーンの左側より右側へ走査したときのレーザ光の像を上から順に並べている。設計値どおり全角16°で、角度分解能4°にてレーザを走査できることを確認した。なお、この電子スキャン方式ではどの発光部に電流を流すか任意に選択でき、逆方向の走査も、ある角度だけ集中して出射することも可能となる。これは現行のポリゴンミラーではできない機能である。

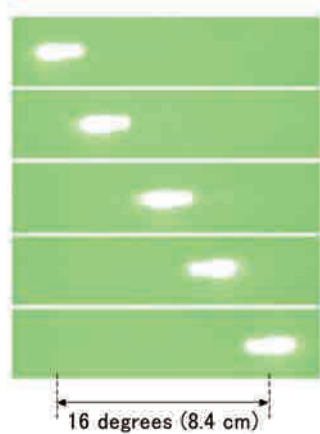


Fig. 12 Images of Beam Scanning
The beam images were irradiated onto a screen 30 cm from the scanner and measured using an IR (infrared) camera.

7. まとめ

レーザスキャンモジュールの超小型化に向け、電子スキャン機構を検討した。MEMS技術のトレンチエッチング技術を応用して形成したマイクロプリズムをスキャン機構に適用し、従来にない電子スキャン方式のレーザスキャンモジュールを作製した。この実現にはマイクロプリズムの形成技術と、LDとマイクロプリズムとの6軸方向での高精度位置決め技術が必須である。トレンチエッチング後、熱酸化して厚いSiO₂のブロックとする形成方法で、マイクロプリズムをウェハレベルで一括形成した。そして、マイクロプリズムと同時にアライメントピンを形成し、その側面にレーザダイオードチップを突き合わせて位置決めする方法により、超小型レーザスキャンモジュールを作製した。今回最も重要なプリズムとレーザダイオードの間隔精度は±2.8 μmであった。モジュールの寸法は1.6mm×0.6mm×2mmである。発光幅100 μmのレーザを順次発光させ、全角16°で、角度分解能4°にてスキャンできることを確認し、電子スキャン動作の検証

を行った。本研究により、半導体製造工程を活用したマイクロ光学素子と、それと同時形成できるアライメントピンを使用した高精度位置決め方法は、レーザダイオードと光導波路との一体化など、超小型化に向けた他の光学素子とのシステム化に向け、今後発展していくであろう。

<参考文献>

- 1) Y. Kimura, N. Matsushita, H. Koto, K. Abe, K. Astumi, "High Power Pulsed Diode Laser for Automotive Scanning Radar Sensor", SPIE Proceedings, Vol.3888, pp.759-766 (2000)
- 2) Astumi, K. Abe, H. Koto, K. Michiyama, "Highly Reliable High Power Diode Laser for Laser Radar Application", SAE 2004-01-1594(2004)
- 3) Arda D.Yalcinkaya, Hakan Urey, "Journal of Microelectromechanical Systems", Vol.15.No4 (2006-8)
- 4) Kazuhiro Takahashi, kunihiko Saruta, "Technical Meeting on Sensors and Micromachines 2004", pp95-99 (2004)
- 5) J. Ohara, K. Kano, and Y. Takeuchi: "A New DEEP REACTIVE ION ETCHING PROCESS BY DUAL SIDEWALL PROTECTION LAYER", Technical digest of MEMS 2000 pp.277-282 (2000)
- 6) J. Ohara, K. Kano, and Y. Takeuchi: "New DRIE Process with Sidewall Protection Layer Formed by O₂ Plasma Irradiation", IEEJ Trans SM, Vol.123, No12, pp.541-547(2003-12)(in Japanese)

<著 者>



吉原 晋二
(よしはら しんじ)
エレクトロニクス研究部
半導体プロセスの要素技術開発
に従事



大原 淳士
(おおはら じゅんじ)
エレクトロニクス研究部
工学博士
半導体プロセスの要素技術開発
に従事



安部 克則
(あべ かつのり)
基礎研究所
半導体デバイスの研究開発に
従事



竹内 幸裕
(たけうち ゆきひろ)
エレクトロニクス研究部
化合物半導体デバイス・結晶
成長, Si半導体センサの研究開
発に従事



川原 伸章
(かわはら のぶあき)
情報通信機器開発部
工学博士
情報通信機器の開発に従事