

### 3. 各テーマの成果詳細

#### 3.4.2 マイクロ走査型顕微鏡の研究開発の開発

##### (1) 研究概要

光マイクロマシニング技術を用いて作製可能な積層タイプのマイクロ走査型顕微鏡デバイスの提案とその提案したデバイスを助成事業者も含むファンダリー企業で試作することにより、実用化に必要な光MEMS製造技術のレベルの把握と技術レベルの向上を図った。

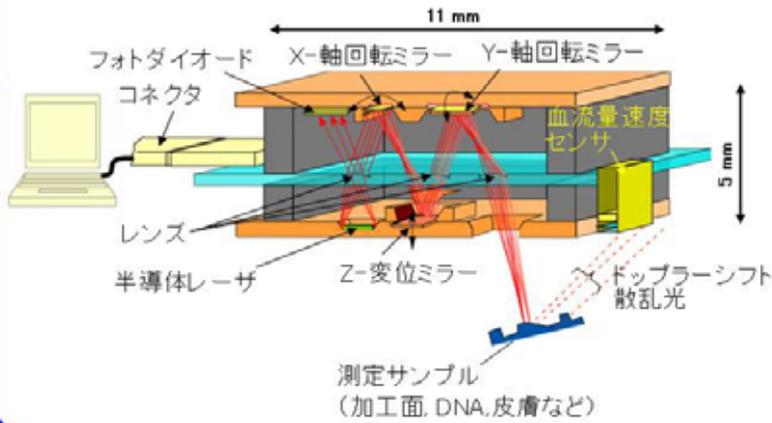
具体的には、半導体レーザ、フォトダイオードチップマイクロミラー（回転ミラー2個、変位ミラー1個）、グレーマスクレンズガラスを内蔵し、レーザの戻り光を利用したマイクロ走査型顕微鏡を光MEMS技術、表面実装により実現をめざした。当初は内蔵予定であったマイクロ回転角／変位センサは内蔵することを断念したものの内蔵可能な条件で変位センサの実現を目指した。また画像などの信号を計算機へ無線伝送についても見送り、USB接続で実現することにした。試作を短時間に終わらせないといけないこと、ファウンドリ企業にとって他の技術的検討課題が多く時間的、費用的に余裕がないことが主な理由である。

##### (2) 成果詳細

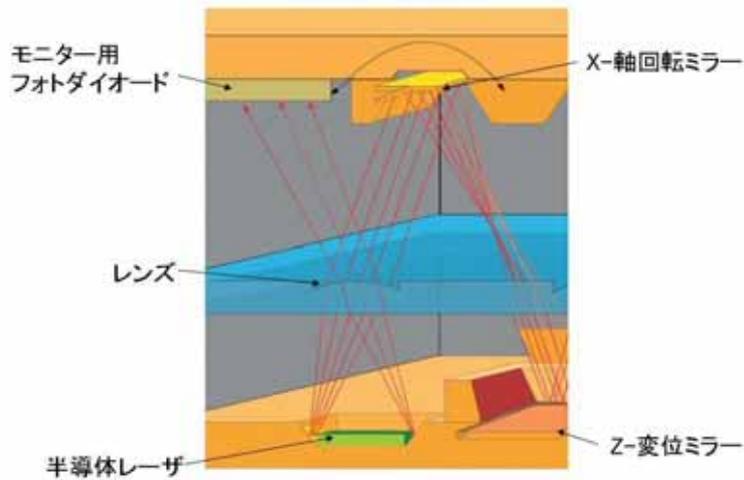
###### ① 全体構想の検討

基本設計のコンセプト（図1参照）：

- ・半導レーザから出射した光ビームがサンプルにて反射してきた光ビームを再び半導体レーザの出射口に戻る光、いわゆる戻り光を用いる前例のない原理に基づく方法で画像信号を検出する。
- ・従来のマイクロ走査型顕微鏡は、マイクロミラーの共振周波数などをモニタリングするデバイスを内蔵していないが、本デバイスでは内蔵させ、フィードバックすることにより安定した画像信号検出を行う。
- ・市販の大型走査型顕微鏡はサンプルを上下させるが、本デバイスはサンプルを上下させずに、光学系で等価的に上下させる。
- ・従来のマイクロ走査型顕微鏡は、半導体レーザならびにフォトダイオードのチップを内蔵していないが、高精度の実装技術を用いて光素子を装置内に内蔵させ超小型を実現する。
- ・3次元的位置決めは極力避け、表面実装に基づく2次元実装を行い、可能ならパッシブアライメントする。各機能デバイスを積層することにより実現する。機能デバイス：a) x軸回転マイクロミラー、z軸変位ミラー基板ならびに駆動電極パターンを形成した基板との複合基板、b) バイナリレンズを形成した、パイレックスガラス基板、c) y軸回転マイクロミラー基板ならびに駆動電極パターンを形成した基板との複合基板、d) 半導体レーザチップ、フォトダイオードチップを高精度ボンディングした基板、e) ギャップ調整用基板 [2枚]
- ・今回は内蔵は行わないが、内蔵可能なミラー回転角ならびに変位測定可能な変位・回転角センサを試作する。



(a) 光マイクロマシニング技術で作製可能な積層タイプのマイクロ走査型顕微鏡



(b) 半導体レーザ部分の拡大図

図1 試作デバイス概要

②MEMS部の設計, 製作

MEMSの設計、製作については、以下の項目を行った。

1) シリコン基板ファブリケーション (ミラー、電極配線など形成)

ICP (Ion Coupled Plasma) によるドライエッチングで作製したマイクロミラー (X軸回り回転ミラー及びY軸周り回転ミラー: 図2 - (a) 図参照、Z軸変位ミラー: 図2 - (b) 図参照)、異方性エッチングで作製したLDを取り付けるキャビティ形成基板を図2 (b) に示す。ダイシング前のシリコン基板を図3に示す。

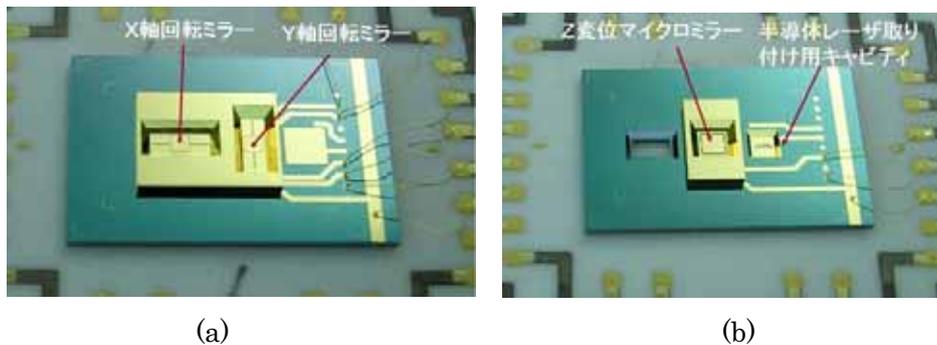


図2 シリコン基板のミラー部 (ミラー、電極配線など形成)

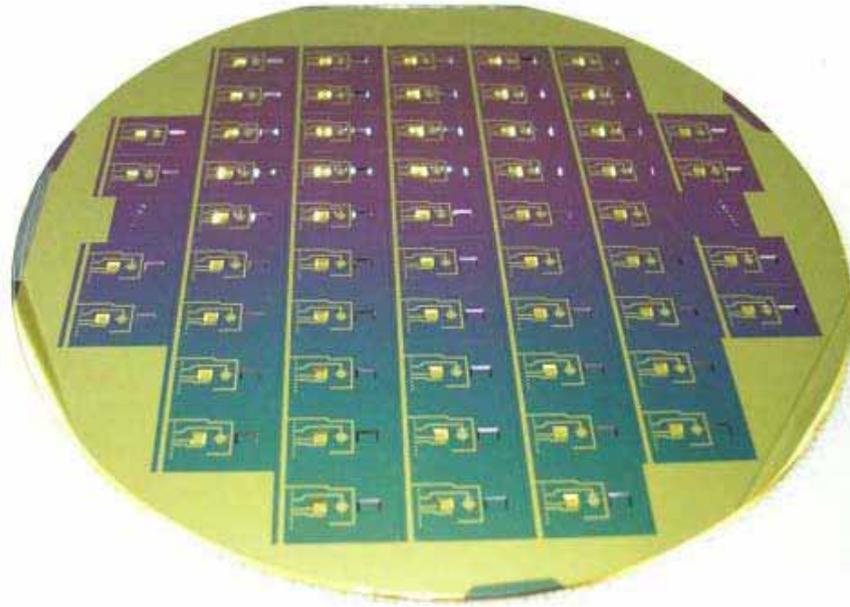


図3 ミラーチップ載置及びダイシング前のシリコン基板

## 2) レンズガラス設計

### バイナリレンズ

低効率バイナリレンズでは、他次元の回折光が悪さをするため、高効率レンズの実現が不可欠である。高効率レンズをバイナリレンズで実現するために、4レベルのバイナリレンズにする必要があることを明らかにした。4レベルで80%の高効率を得る見通しを得た。ただし、最小パターンは0.75ミクロンと微細パターンのフォトリソグラフィ技術が必要である。図4はバイナリレンズを用いたときの光学系を示す。

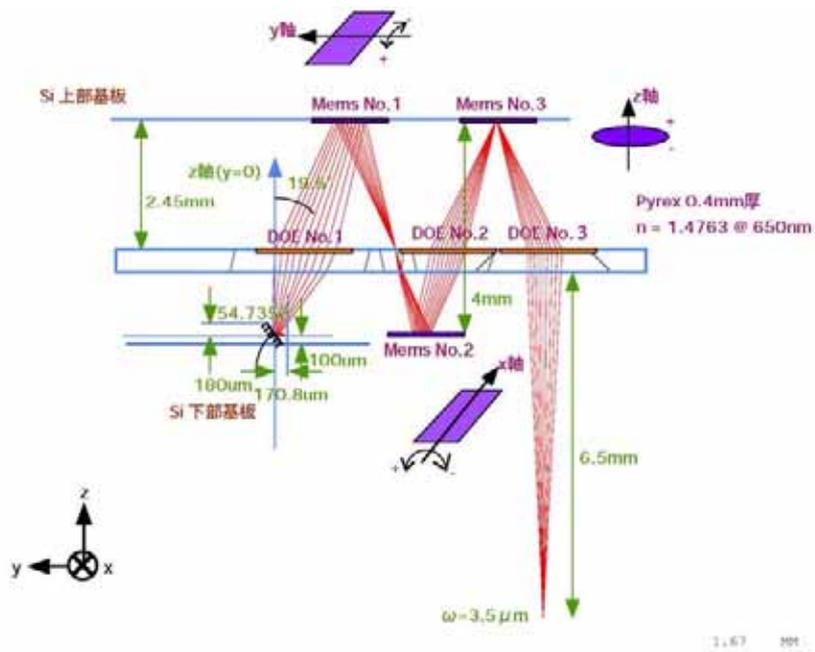


図4 バイナリレンズを用いた光学系

### 屈折率型レンズ

バイナリレンズと違い他次回折光の影響がないことからマイクロシニング技術で作製可能な屈折型のグレーマスクレンズを作製した。図5に屈折率型レンズを用いたときの光学系を示す。レンズガラス材にはシリコンと熱膨張率の近いピアレックスを用いた。

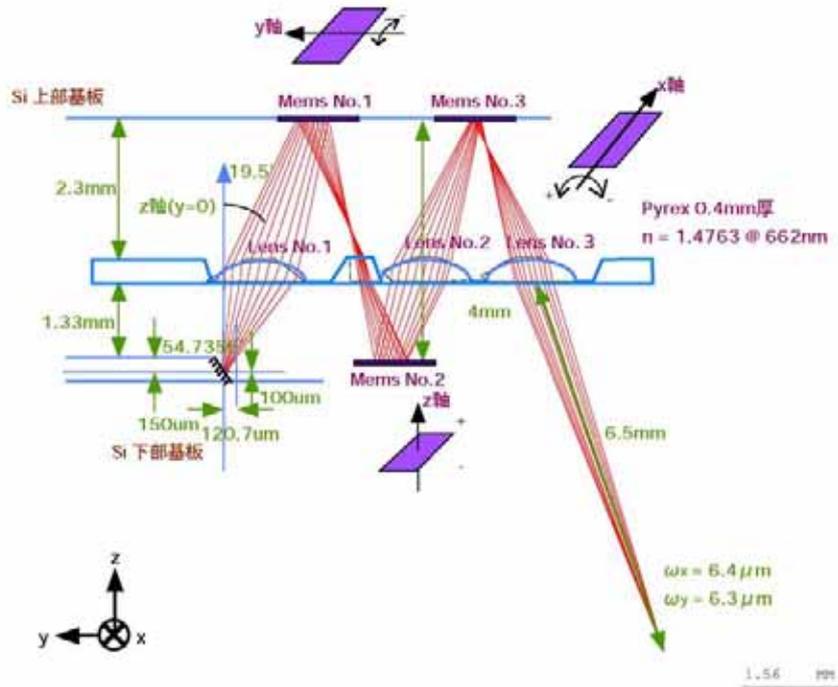


図5 屈折率型レンズを用いた光学系

### 3) レンズ加工

#### バイナリレンズ

図6に、フォトリソ技術で作製したバイナリレンズを示す。



図6 フォトリソ技術で作製したバイナリレンズ

ピアレックスガラス基板の上面に3個のレンズをフォトリソグラフィ技術で作製した(図7)。レンズは径1mm以下、深さ(Sagという)120ミクロン程度である。ピアレックスガラスを100ミクロン程度の深さのドライエッチングすることだけでも大変な上に、形状を制御して非球面レンズを作製するのは世界でも初めてである。

図8にグレーマスクで作製した屈折率型レンズ形状の設計値と実際の加工形状のプロファイルを示す。グレーマスクを用いて形成したレジストの厚さ分布も示している。



(a) レンズガラス (b) レンズ部分の拡大写真

図7 パイレックスガラス基板上面に作製した3つのグレーマスクレンズ

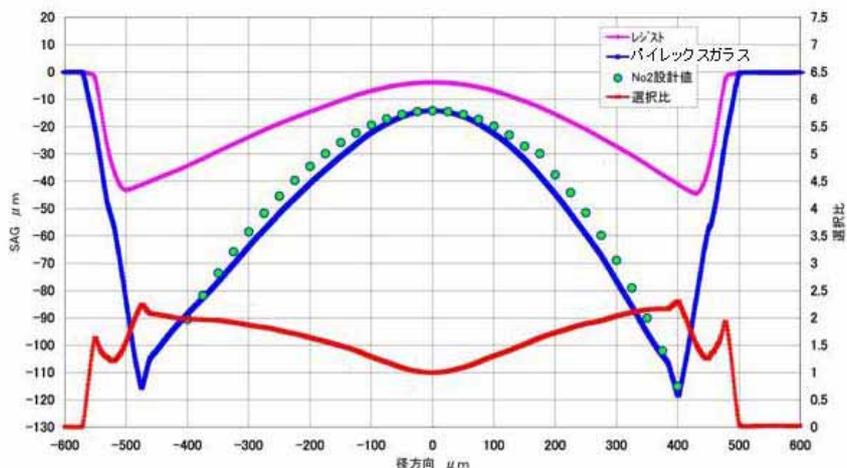
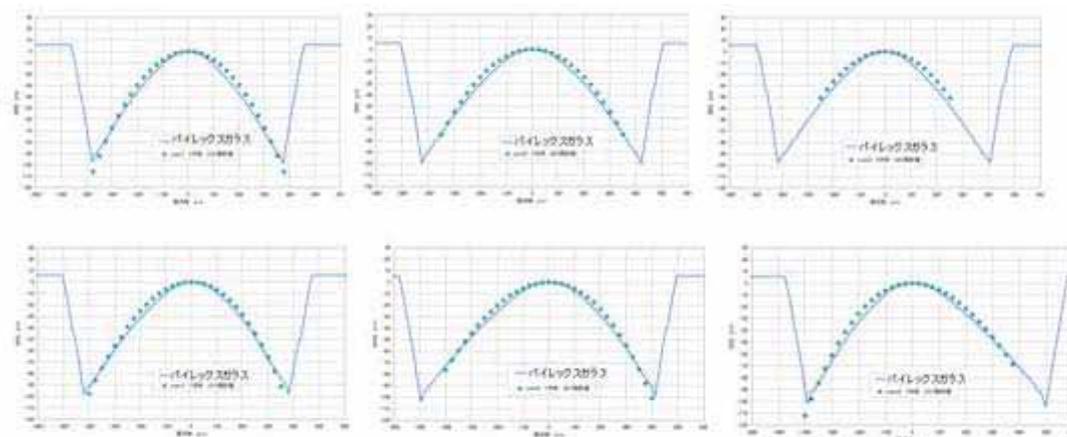


図8 グレーマスクレンズ加工データ

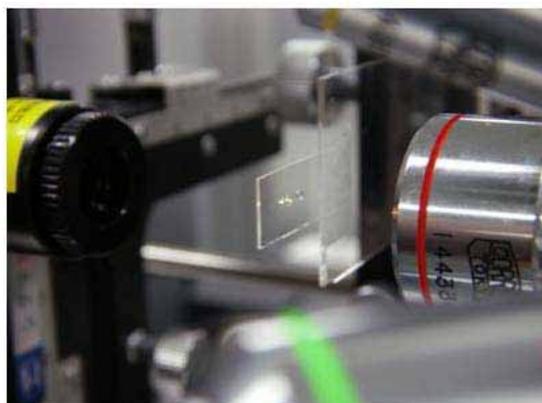
図9に、設計値と実際のレンズ比較結果を示す。



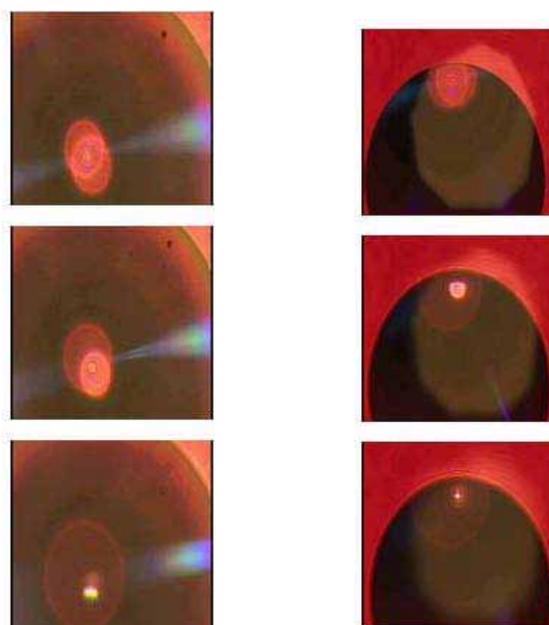
(a) レンズ1 (b) レンズ2 (c) レンズ3

図9 X方向とY方向に走査したときの設計値と実際のレンズ形状誤差

図10にグレーマスクレンズの集光状結果を示す。図10(a)に集光状態の観察方法を示す。ガラス板の上にフォトリソグラフィ技術(グレーマスクレンズ)で作製した小さいレンズでありながらも良好な結像状態が得られた。集光特性の改善は、レンズ設計値と製作値との誤差を改善するマスクの作製と露光条件の最適化を試行錯誤で行う。



(a) 平行光（コリメート光）を左から照射させグレーマスクレンズを通過した後の集光状態を右の顕微鏡で観察



(b) レンズにコリメート光を照射し、レンズ表面から離していったときの結像状態

図 10 グレーマスクレンズによる集光状態

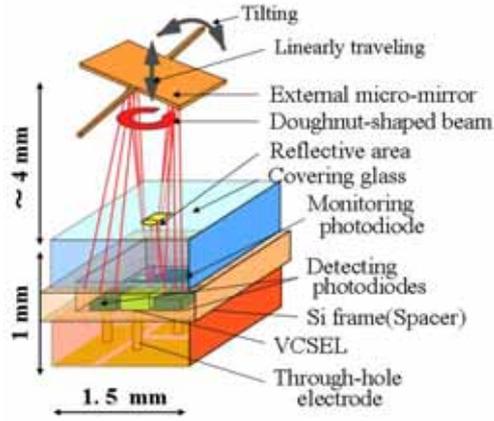
#### 4) 光学素子（LD・PD）実装

アクティブアライメントで光学軸調整を行うために、ボンディング精度を数ミクロンまで許容したために、これまでの光通信関連業務で実績のある業者であれば問題なくボンディングが可能であった。なお、半導体レーザにはDVDで実績のある最大出力40mW、波長0.65ミクロンのベアチップ（EUDYNA製FLD6A3TK）を用いた。

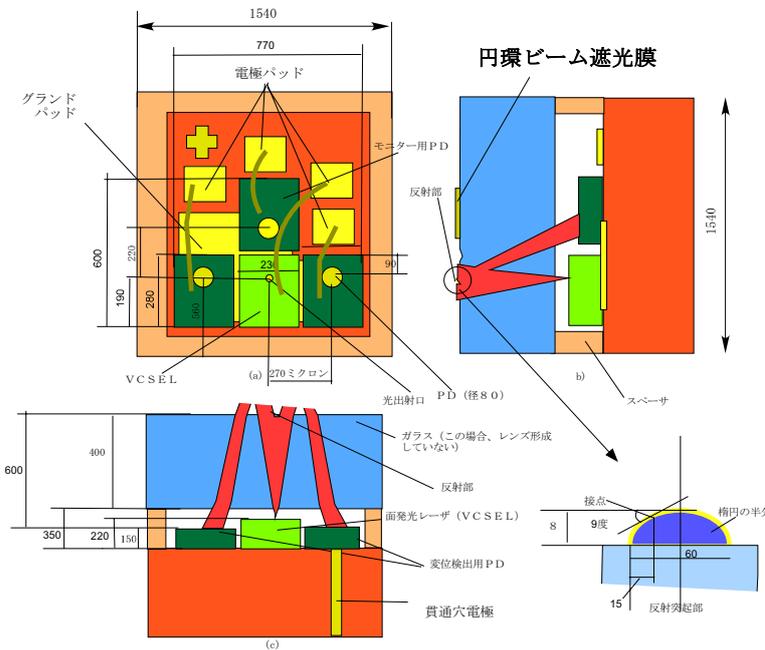
#### 5) 回転角／変位センサ

VCSEL（面発光レーザ）から出射し拡散した光ビームを用いた変位センサを開発した。マクロ走査型顕微鏡のマイクロミラーのリニアモーション（変位）と回転角を測定するセンサである。もちろん走査型顕微鏡に限らず他の光MEMSのミラーの挙動を測定することが可能である。

図11に、この変位センサの模式図を示す。



(a) 面発光レーザならびにフォトダイオードから構成される簡単構造の超小型回転角／変位センサの模式図

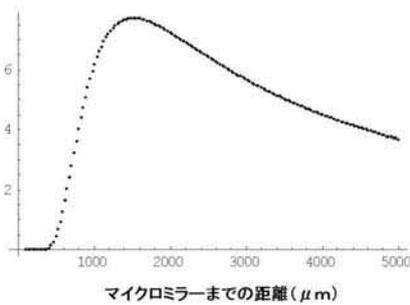


(b) 構成と寸法

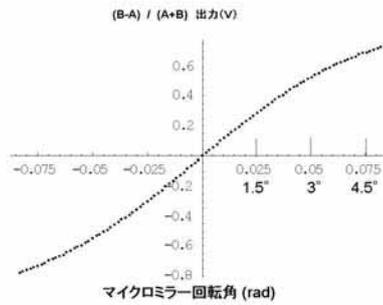
図11 マイクロミラーのリニアモーションと回転角を測定可能、走査型顕微鏡に内蔵可能な超小型変位センサ。

図 12 にリニアモーションならびにミラーの回転角とセンサ信号との関係を示す計算例を示す。

(A+B)出力(V)



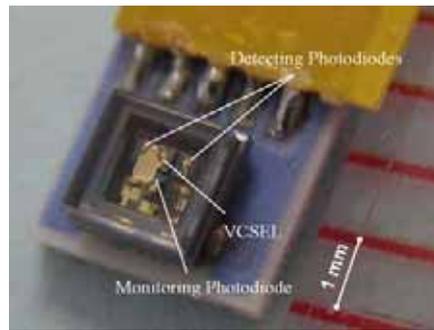
(a)



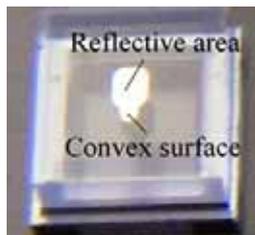
(b)

図 12 デバイスに内蔵予定の小型回転角／変位センサ概要と特性(フォトダイオード上でのビーム形状を1次元で計算。(a)ミラー変位(z方向)とフォトダイオード信号変化、(b)ミラー回転角とフォトダイオード信号変化。A、BはフォトダイオードA、Bの出力。

試作した変位センサの外観写真を図 13 に示す。センサとマイクロミラー間のギャップを変えて測定した変位—センサ信号曲線を図 14 に示す。直線部分が測定可能領域である。前領域の直線部の傾きは後領域よりも急峻であるために高精度測定が可能である。分解能は直線部の線の太さ NFWHM (半値全幅) をその直線勾配 G の傾き角  $\theta$  の正弦  $\sin \theta$  で割った値、すなわち  $NFWHM/\sin \theta$  で与えられる。測定精度は測定範囲によって変わる。測定範囲を狭くするとその精度は  $NFWHM/\sin \theta$  値に近づく。前領域での測定範囲を 0.3mm にしたとき 20nm の分解能が得られ、後領域では 1.8 mm の測定範囲で、30 nm の精度が得られた。電気ノイズの低減化などを図ることによってさらなる分解能の向上は可能である。



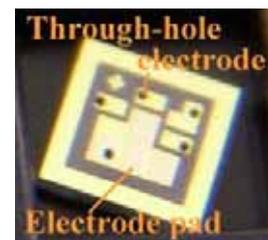
(a)



(b)

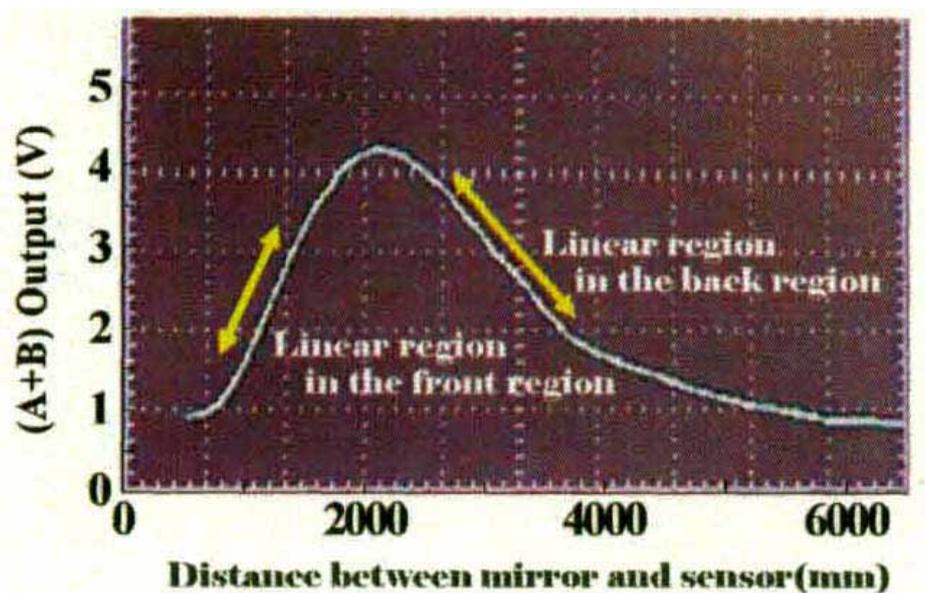


(c)

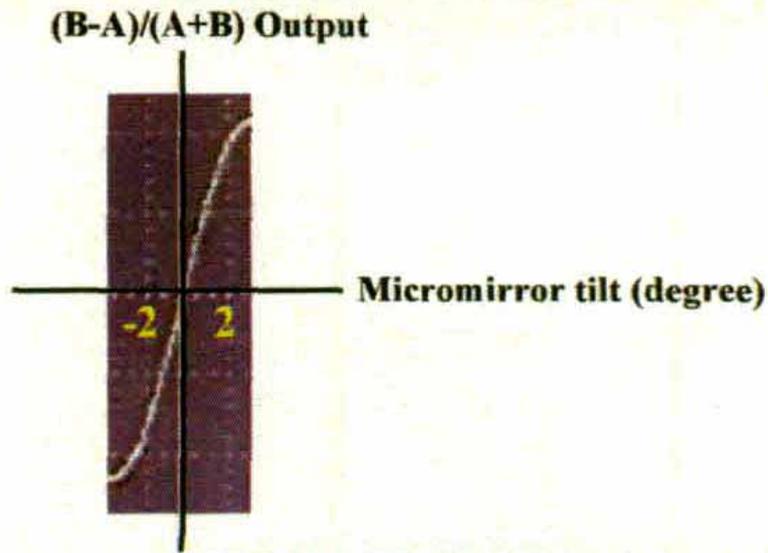


(d)

図 13 (a) パッケージされた変位センサ (完成品) . (b)シリコン枠にボンディングされたガラスカバー (c)後でダイシングしてシリコン枠チップに分割されるシリコン枠基板 (d) VCSEL チップやフォトダイオードチップがボンディングされる貫通穴電極付きシリコンベース基板



(a) センサとマイクロミラーのギャップを変えて測定した変位—センサ信号曲線



(b)ミラー回転角による2つのフォトダイオード信号の差との関係

図 14 試作した変位センサの測定結果（直線部分：測定範囲）

図 15 に従来の三角測法を用いた変位装置と本開発装置との比較結果を示す。測定範囲や精度は同程度であるものの、装置体積比が3万分の1と非常に小さい。センサチップサイズは1.5mm×1.5mm×1mmで、マイクロ走査型顕微鏡などのMEMSに十分内蔵できるサイズである。コストもPDを基板上に作製することによりPDのボンディング作業コストが省ける。



	既存製品	開発製品
測定距離	2 mm	1.8 mm
測定精度	20 nm	30 nm

図 15 従来装置との性能比較

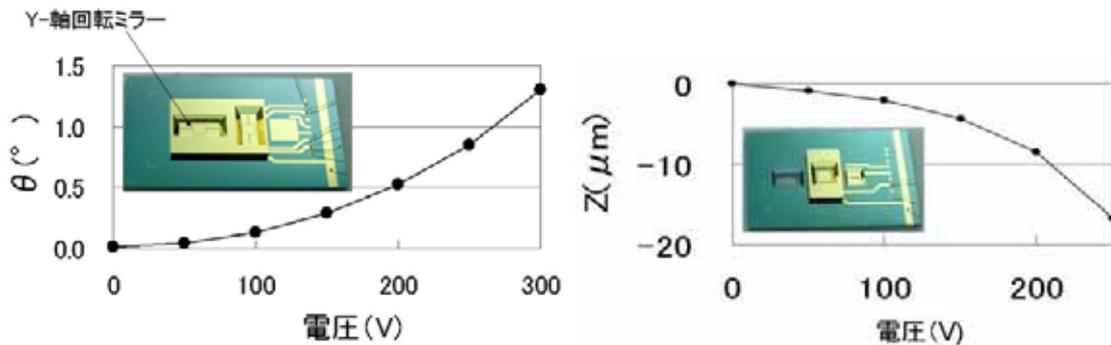
#### 5) 信号処理回路部の検討

信号処理回路部については、MEMS部の駆動、信号処理回路を検討するとともに、画像信号を計算機への伝送回路も検討した。

6) LD 駆動回路、PD 増幅回路、ミラー駆動回路、画像処理回路、フィードバック制御などの処理回路

これらの回路はマイクロ走査型顕微鏡外で接続することから、既存の大型の回路を組み合わせることにより実現可能なため研究的課題は全くなかった。

図 16 に試作したマイクロミラー特性を示す。



(a) X軸回転ミラー

(b) Z変位ミラー

図 16 マイクロミラーの電圧と回転並びに変位特性

### ③全体組み立て、評価

MEMS 部と信号処理回路部を実装して、特性評価を行う。

#### 1) 組み立て調整

光学系はアセンブリ精度が重要であることから、まずはレンズガラスとミラー基板との位置決め目安を与えるためにレンズガラスにマークを形成した。レンズガラスの概略を図 17 に示す。

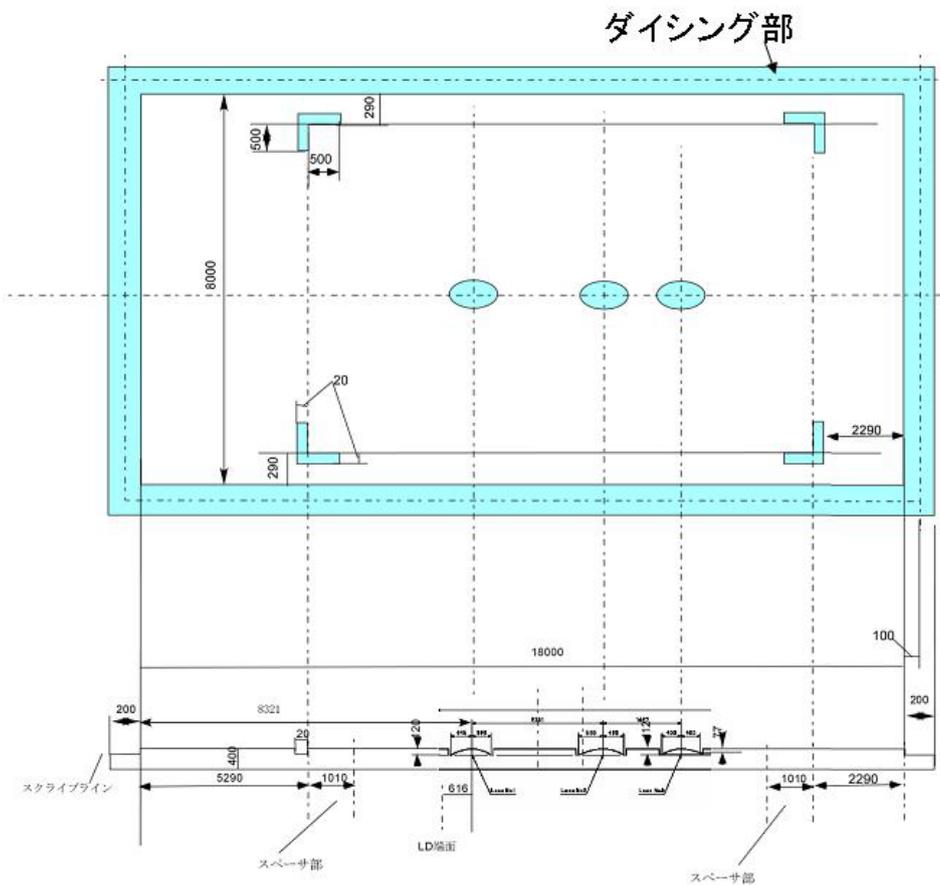


図 17 レンズガラスの概略

組み立て（アSEMBル）後完成したマイクロ走査型顕微鏡を図 18 に示す。

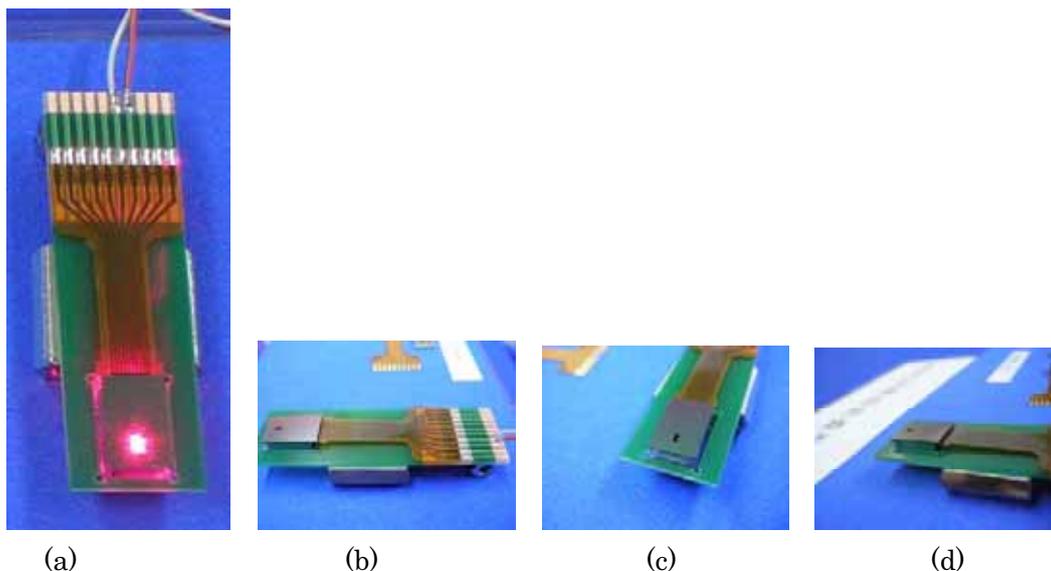


図 18 組み立て（アSEMBル）後のマイクロ走査型顕微鏡 a は実際に半導体レーザを発振。

#### ④血流量センサ

共焦点顕微鏡に付属接続される血流センサの基礎的な評価を行った。散乱信号増幅回路（血流信号増幅回路）と共焦点顕微鏡に使用される LD（EUDYNA 製 FLD6A3TK）を被測定物に照射し、血流センサの散乱信号状態を FFT アナライザ（小野測器：DS-2100）で記録し評価を行った。

実験方法 1：MEMS 共焦点顕微鏡に実装されていない LD を図 19-a に示すように LD ドライバに装着し、且つ共焦点顕微鏡用血流計センサを隣接して位置させレーザー光パワーを 16mW に設定し、測定物からの距離を 3mm に保って散乱信号を測定しパワースペクトラムを記録する。測定物には、ブラウン運動による固有周波数（振動数）をもつラテックス散乱溶液と固有周波数を持たない静止散乱板に当てる。又、指先の組織血流による駆血時と非駆血時のパワースペクトラムを記録する。

実験方法 2：MEMS 共焦点顕微鏡に実装されている LD を使用し図 19-b に示すように共焦点顕微鏡用血流計センサを隣接して位置させレーザー光パワーを最大に設定し、測定物からの距離を 3mm に保って散乱信号を測定しパワースペクトラムを記録する。測定物には、ブラウン運動による固有周波数（振動数）を有するラテックス散乱溶液と固有周波数を持たない静止散乱板に当てる。

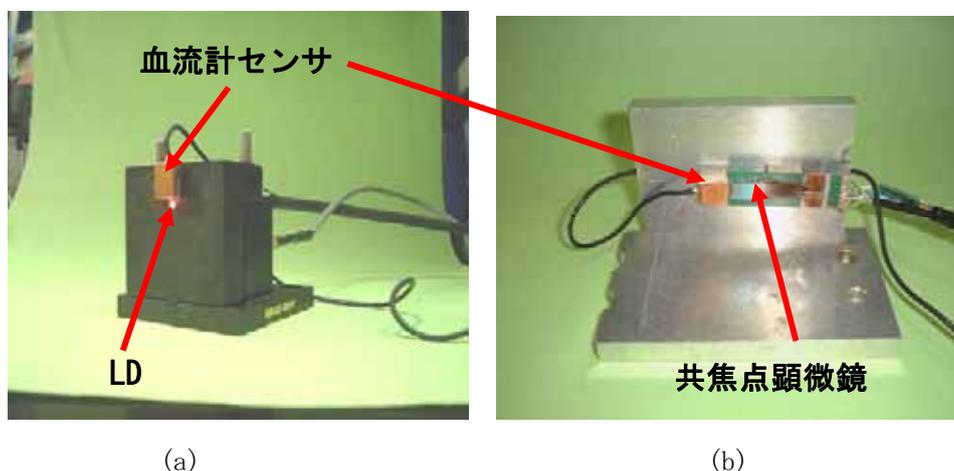


図 19 マイクロ走査型顕微鏡出射光ビーム不使用時(a)と使用時(b)における比較測定

マイクロ走査型顕微鏡に実装されているLDでの測定結果

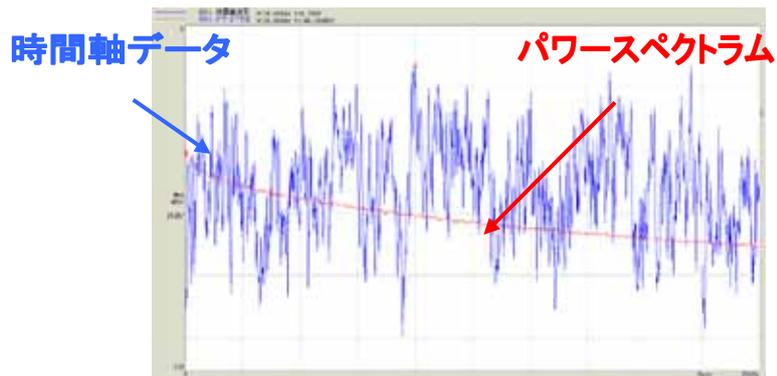


図 20 ラテックス散乱溶液の散乱信号の時間軸データとパワースペクトラム

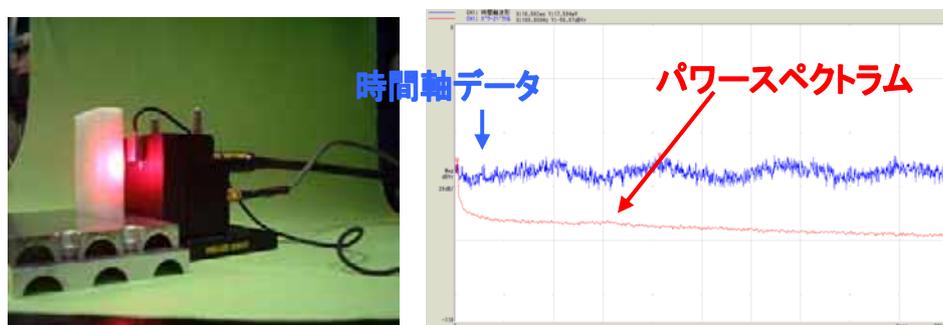


図 21 静止散乱板の散乱信号の時間軸データとパワースペクトラム

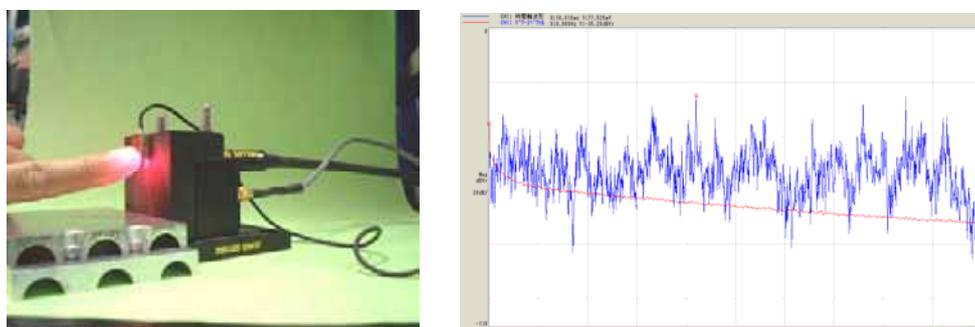


図 22 指先組織血流、非駆決時の散乱信号による時間軸データとパワースペクトラム



図 23 指先組織血流、駆決時の散乱信号による時間軸データとパワースペクトラム

## マイクロ走査型顕微鏡に実装されているLDでの測定結果

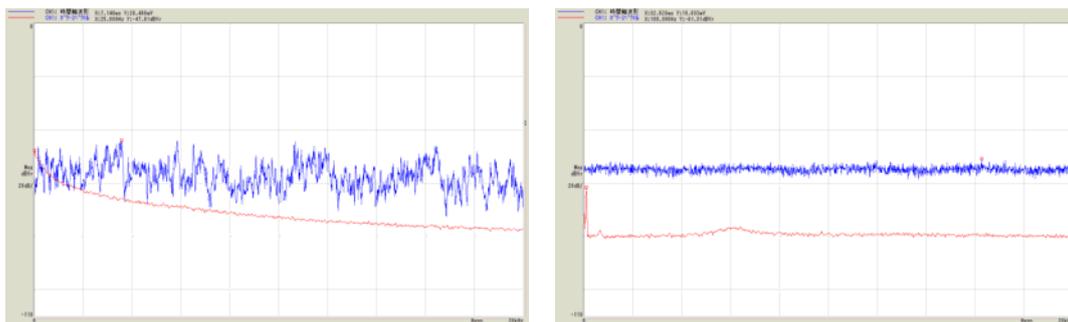


図24 マイクロ走査型顕微鏡を用いた実験結果 (a) ラテックス散乱溶液、(b) 静止散乱板の散乱信号の時間軸データとパワースペクトラム。光源：LD出力  $P_0=10\text{mW}$  共焦点顕微鏡出射パワー： $P_1=1\text{mW}$

用いたDVD用のベアLD（EUDYNA製FLD6A3TK）チップは、血流信号を発生させることが確認され微弱では有るが同様な散乱信号が確認された。但し、共焦点顕微鏡より出力されるレーザー光のアライメントが適切でない為、測定物からの十分な散乱光を得ることが出来ない状態であった。従って、アセンブリの課題が解決されれば血流センサ組込型マイクロ走査型顕微鏡を実現することは可能である。

### ⑤全体特性評価実験

アセンブリ後駆動実験を行った。ビームの動きは観察されるものの光ビームが焦点を形成しなかった（結像しなかった）。図8～10に示すようにレンズ特性は良好な特性を示すものの、アセンブリ後のマイクロ走査型顕微鏡本体から出射される光ビームは図25に示すように結像状態が得られなかった。各部品特性は良好であることから、不良の結像状態となったことはアセンブリに相当の問題があるといえる。

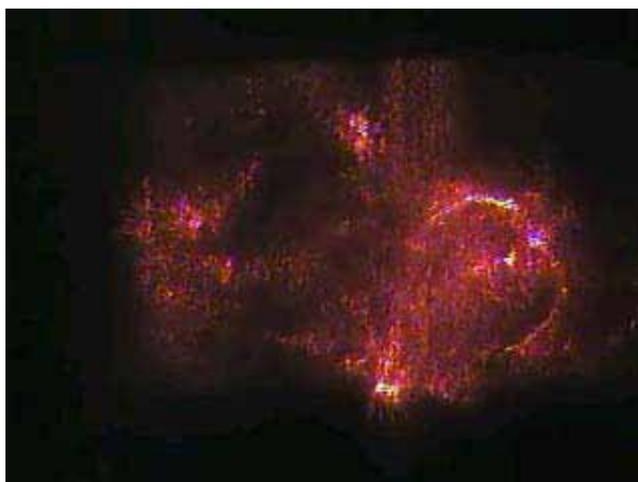


図25 アセンブリ後のマイクロ走査型顕微鏡本体から出射される光ビーム

総合的な評価結果を表1に示す。

表1 デバイス特性並びにファブリケーションの評価結果

評価項目	デバイス特性ならびにファブリケーション工程	結果判定 (○:良い ×:悪い)	
総合的評価	映像の検出走査型顕微鏡	×	
	変位/ミラー回転検出センサ	○	
	血流量検出	×	
デバイス単体での評価	走査型顕微鏡本体	シリコンミラー基板ファブリケーション	○
		LD, PD実装	○
		レンズガラス基板	○
		PD、ミラー駆動回路、制御回路などの電気回路	○
		血流量センサ	○
		個別基板（光学素子）の高精度アSEMBル（組み立て）	×
		サンプル作製	○
	変位センサ	光素子、シリコン枠、シリコンベース、ガラスカバーなどのボンディング	○
		貫通穴電極	○
	血流量センサ	受光部	○

⑥目的に照らした達成状況（共同研究、再委託研究による成果を含む。）

本プロジェクトは実用化に必要な光MEMS製造技術を開発するとともに、ファンダリーにおいて抽出した課題を解決しながら日本国内のファウンドリーのMEMS製品に対する製造技術の向上を目的とした委託研究である。個々の部品についての達成度は短時間に拘わらず何とか満足できる結果であったものの、個々の部品の組み立てがうまく行かず所望の性能が得られなかった。

また、当初は一企業のファウンドリによる製作を試みたが、到底目標を達成できることはできないと判断し、企業数社の協力体制を立ち上げて試作を行った（表2参照）。試作の走査型顕微鏡は上部マイクロミラーならびにフォトダイオードチップ基板、中央マイクロレンズ基板、下部マイクロミラー並びにレーザチップ実装基板の3つの基板を2箇所間にスペーサを入れてアSEMBルして実現する積層構造にしている。レンズ等の特性は得られていることから、組み立て等における位置合わせ不良のため、所望の出射ビーム形状ならびにフォーカシング特性を得ることができなかった。逆にアSEMBルがうまくいけば映像信号検出ならびに血流量信号検出も実現可能であることいえる。

成功へ導く対策として

- ・各企業が有する技術とそのレベルを予め明確にしておくこと。

・一社で対応不可能な場合には、優れた技術を持った企業数社の連携をスムーズに行える体制を構築しておくこと。

表2 マイクロ走査型顕微鏡作製における役割分担

九大	基本指針 基本仕様 全体評価	回転角／変位センサ 血流センサ素子 (短波、1.3ミクロン波長＊)	
オリンパス		組み立て調整	基板供給、厚みデータ
横河電機	シリコン基板ファブリケーション		LD駆動回路＊ PD増幅回路 ミラー駆動回路 画像処理回路＊ フィードバック制御
沖電気	ガラスレンズ設計 (本体、変位センサ)	LD・PD実装	
サイバーファーム			無線／USB伝送 画像処理回路＊ 血流信号処理回路 (LD駆動回路＊)
アルバック	サンプル作製		

### (3) 成果の意義

- ・本体の製造、特にアセンブリに成功していたら、本成果は市場の拡大或いは市場の創造につながる事が期待できる。従って唯一の問題点である個別基板（光学素子）の高精度アセンブル（組み立て）を解決してさらにブラッシュアップしていくことにより製品化へ展開できる。また、変位センサについては製品化へ展開を図っている。
- ・本体は戻り光を用いた簡単な構造であるためMEMSによる作製が可能でしかもフィードバック制御可能であるため温度等によるミラー特性の変化の影響を削除できる。これほどまで小さい変位センサやパイレックスガラスに形成可能なグレーマスクレンズ作製技術は世になく世界最高水準である。
- ・汎用性のある変位センサについては拡大機構などに組み込むことによりフィードバックしたアクチュエータを実現する。ロボットなどへの応用へ展開を図っている。
- ・投入された予算に見合った成果が得られているか。走査型顕微鏡は個々の部品についての達成度は短時間に拘わらず何とか満足できる結果であったものの、個々の部品の組み立てがうまく行かず所望の性能が得られなかった。

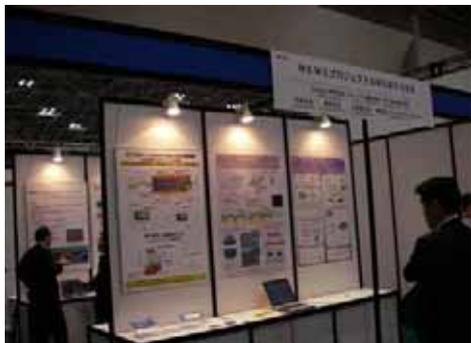
### (4) 特許の取得

提案したマイクロ走査型顕微鏡は、a)積層して構成する、b)積極的に戻り光を利用する、ことによって構造を簡単にしたMEMSに適した構造であるものの、本プロジェクトが本来ファウンドリ企業等のMEMS製造技術の加速化を狙いとしているため特許等の取得は積極的には行っていない。組み立てで失敗に至っているために特許取得を行っていない。一方、変位センサは国内特許出願しており、製品化に向けた展開を実行中である。

(5) 成果の普及

プロジェクト終了後半年の間に、走査型顕微鏡に関して 2 件、変位センサ 1 件、出展した(別図1、別図2参照)。

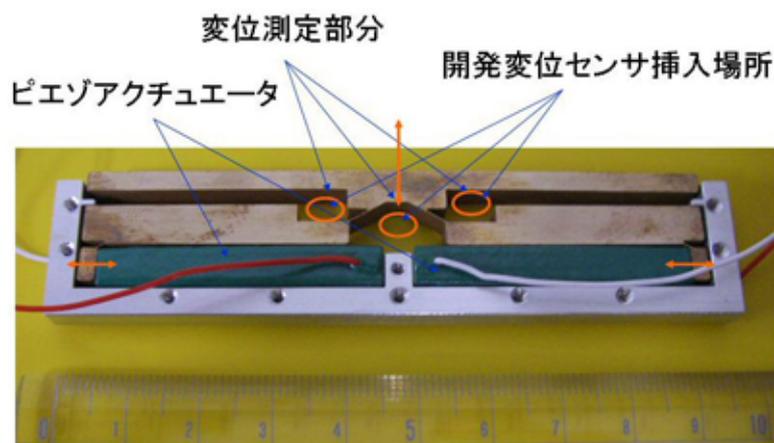
また、IEEE/LEOS 国際会議 1 件講演を行い、英文論文1件投稿した。汎用可能な変位センサの応用として、別図2に示すような拡大機構アクチュエータに内蔵させることも検討している。



別図1 nano tech 2006 展示風景(東京ビッグサイト)



別図2 ビジネスリンク商売繁盛(東京ビッグサイト)



別図3 開発変位センサの内蔵を検討している拡大機構アクチュエータ