



反射型レーザー走査顕微鏡

大出 孝博

レーザーテック(株)技術部 〒223 横浜市港北区綱島東 4-10-4

(1989年5月10日受理)

Reflection Type Laser Scanning Microscope

Takahiro ODE

Engineering Division, Lasertec Co., Inc.,
4-10-4, Tsunashimahigashi Kohoku-ku, Yokohama 223

1. はじめに

レーザー技術の発展と、産業分野でのマイクロセンシングに対するニーズの高まりが相乗して、レーザー光を顕微分野での光源に使用したレーザー顕微鏡の開発が近年盛んである。一般にレーザー顕微鏡と呼ばれるものには、その構成方法や使用目的によって種々のバリエーションが考えられ、そのいずれもが従来の顕微鏡にはない多くの特長をもっている。

本稿ではこのうちレーザー走査型顕微鏡、とりわけ近年普及の度合いが著しい反射型レーザー走査顕微鏡を中心に解説を試み、また光プロービング顕微鏡の一例としてOBIC顕微鏡についても述べることにする。

2. 走査光学系

顕微分野での走査光学系はSheppardらによって図1に示すように3種類に分類されている¹⁾。これらの構成はいずれも反射型レーザー走査顕微鏡の光学系として適用できるものである。

反射型光学系においてType Ia, IbおよびIIの特長を列挙すると、Type Iaの場合、通常の顕微鏡と比較して、

- ・光電変換した電気出力を得られる。
- ・試料を走査することで任意の領域を撮像できる。
- ・照明光に単色性の良いレーザー光を使用するので対物レンズの色収差は問題とならなくなる。

という特長が発生する。Type Ibは、これに加えて、

- ・撮像領域だけを効率的に照明するので像のコントラ

ストが改善される。

- ・照明光を集束限界まで集束させるので、照明にレーザー光のようなコヒーレンスの高い光源を用いてもスペックルノイズは問題とならない。
- ・撮像信号のソースを反射光からではなく、試料の光効果を検出したものにするので、光効果を可視化できる(光プロービング顕微鏡)。

などの特長が生じる。Type IIの光学系は、Minsky²⁾および、Davidovits³⁾などにより考案されたものであり、Type Ia, Ibと比べてもさらに

- ・面内分解能が約4割以上向上する⁴⁾。
- ・ピンホールが不要散乱光をカットするために非常に高いコントラストを得られる。
- ・奥行方向分解能も非常に高いものとなる⁵⁻⁸⁾。
- ・得られる画像は、オプチカルセクションングされたものになる^{9,10)}。

などの特長が加わることになる。

3. 走査法

Type I, IIあるいは透過型、反射型を問わず走査光学系の場合には試料上の観察点を何らかの型で走査する必要がある。この走査には、

- a. 光束を固定して試料を走査する。
- b. 試料を固定して光束を走査する。

という二つの方法があり¹¹⁾、それぞれステージ走査型、光束走査型などと呼ばれている。この二つの走査法を比較すると、ステージ走査型は、光学系の設計において軸上収差だけを補正すれば良いので、赤外域や真空紫外域

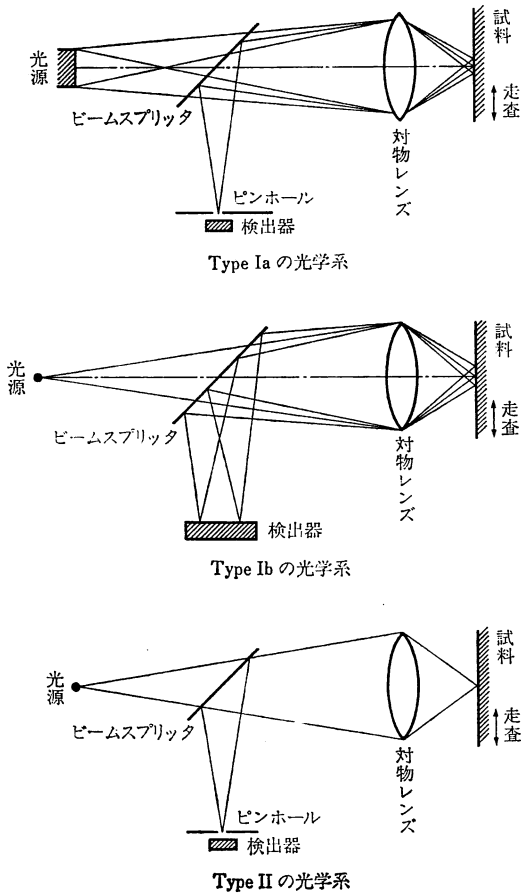


図 1 走査光学系の分類

への拡張性に富んでいるといった利点や、ステージの可動範囲さえ許せば視野をいくらかでも拡大できるという利点もあり、光学的にはステージ走査型が優れている。しかし、質量のあるステージを走査するため走査速度が光束走査型に比べて遅いのが実状である。この速度の遅さは実用上、試料の検索、焦点合せなどに支障をきたすことが多いため、近年のレーザー走査顕微鏡は光束走査型が主流となってきている。

光束走査方式の場合には、対物レンズをスキャナーとして使用するトレパンニング法¹²⁾を除いて、すべて何らかのスキャナーを用いることになる。レーザー走査顕微鏡に使用される可能性のあるスキャナーには、サーボガルバノミラー、共振型ガルバノミラー、AO 偏向素子、ポリゴンミラー、ホログラムスキャナーなどが考えられるが、このなかで現在多用されているのは高速走査の可能な AO 素子¹³⁾、または低速であるが欠点の少ないサーボガルバノミラーである¹⁴⁾。また、主走査と副走査にこれらを組み合わせたものも多い¹⁵⁾。

4. オプティカルセクションング

Type II の反射型レーザー走査顕微鏡の場合、画像の焦点面選択性には傑出した特長がある。それは図 2 に示すように合焦点面からの反射光は受光器前に置かれたピンホールを通過して検出器に到達できるが、非合焦点面からの反射光はピンホールを通過できないので、得られる画像は合焦点面のものだけになる。これは Type II の光学系ではオプティカルセクションングが可能になるということである。この特長は通常の光学顕微鏡には無いものであり、Type II の透過型レーザー走査顕微鏡と比べてもより完璧である。図 3 は Type II の反射型光学系において、試料が Z 方向へ移動したときの検出器からの出力をピンホールの半径をパラメータとしてグラフ化したものである¹⁶⁾。このグラフからわかるように半値幅で 0.5 μm 程度のオプティカルセクションングは容易に実現できる。

また、この特長を利用して各焦点面での画像をフレームメモリ上で積算していくことによって、単一の光学系

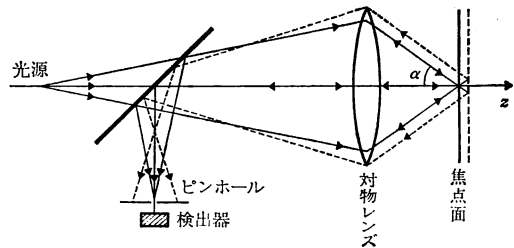


図 2 オプティカルセクションングの原理

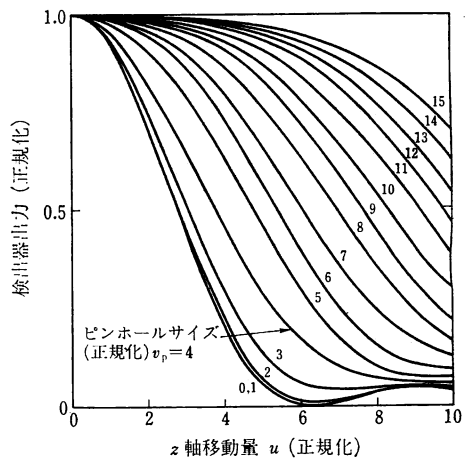
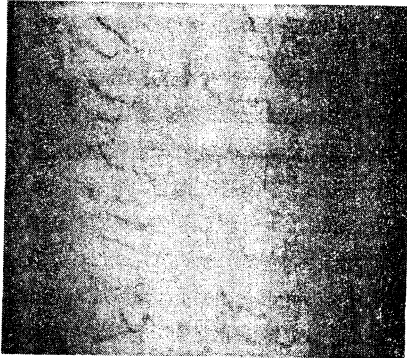
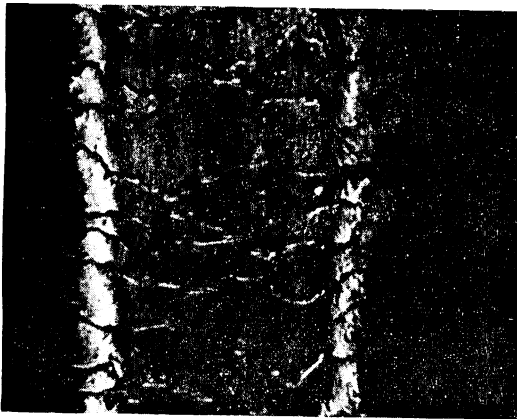


図 3 Z 軸移動量と検出器出力
 $v_p = (2\pi/\lambda)r \sin \alpha$, $u = (8\pi/\lambda)z \sin^2 \alpha/2$. r : ピンホールの半径, z : Z 軸移動量の絶対値



(A) 通常の光学顕微鏡の画像



(B) レーザー顕微鏡の画像 (1焦点面)



(C) 焦点移動メモリーの結果

図4 人の毛髪 (NA=0.95, 50倍対物)

で容易に立体形状を再構築することができる。この方式は焦点移動メモリーと呼ばれている¹⁷⁾。図4はオプティカルセクションと焦点移動メモリーの実例であり試料は人の毛髪である。ここで同図(A)は通常の光学顕微鏡像であり、同図(B)はオプティカルセクションされた像、同図(C)は焦点移動メモリーによって合成された毛

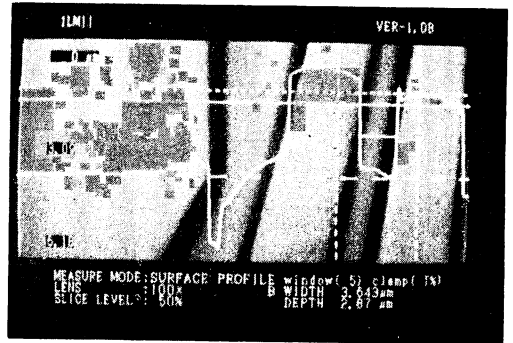


図5 薄膜磁気ヘッドの表面形状測定 (NA=0.95, 100倍対物)

髪の全体像である。

また、オプティカルセクションの応用例として表面形状の定量測定がある。これは試料を Z 軸方向へ移動させながら各画素が最大輝度を示す Z 軸変位量をメモリーに記録するというものである。図5はこの実例であり、薄膜磁気ヘッドのコイル部分を測定しているところである。近年の反射型レーザー走査顕微鏡の普及はこの機能に負うところが多いものと思われる。他の表面形状測定法と比較してこの方式の特長は

- a. 光学測定であるから非接触である。
- b. 横方向分解能も高い。
- c. Z 軸方向のダイナミックレンジが大きい。

などが考えられる。なお、この方式の Z 軸方向の分解能は現在、位相差法を併用しない場合で 10 nm 程度であり、位相差法を併用した場合は 1 nm 程度である。

5. 色 情 報

レーザー走査顕微鏡の色情報には大別して2種類の分類が可能である。一つは照明に用いるレーザー光はモノクロマチックな単一波長のものを使用して、光プロービングした試料からのフォトルミネッセンス光や散乱光を分光して得られる色情報である。また他の一つは照明に用いるレーザー光に複数の波長の異なるレーザーを使用して試料の反射率や透過率、あるいは光に対する反応の波長依存度によって得られる色情報である。もちろん、この二つの情報を複合した応用も考えられるが(たとえば蛍光顕微鏡における物質同定など)基本的にはレーザー走査顕微鏡によって得られる色情報はこの2種類であると考えてよい。ここでは後者について簡単に述べることにする。

図6は Type II 反射型カラーレーザー走査顕微鏡の原理図を示す。このような構成の装置から得られるカラ

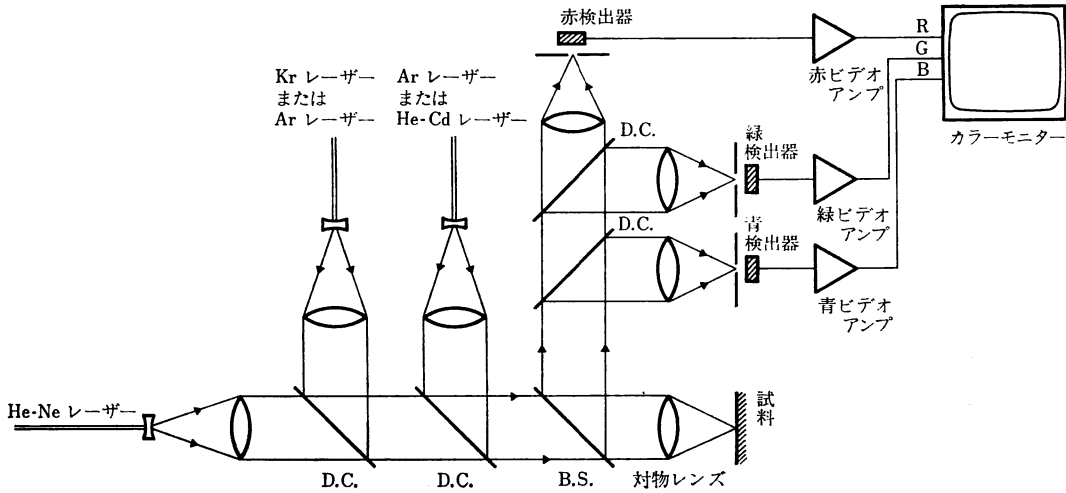


図 6 カラーレーザー走査顕微鏡の原理図

D.C.: ダイクロイックミラー, B.S.: ビームスプリッター

表 1 色濃度による試料の分類

グループ	試料	通常の光学顕微鏡と 差が生じるメカニズム
A ($k > 5$) レーザー顕微鏡で色がきわめて濃く表示されるもの	ガラス上の薄膜 (TFT 液晶 etc.) 金属上の薄膜 (フォトマスク途中工程 etc.) 半導体上の薄膜 (リソグラフィ工程の IC etc.)	レーザー光の優れた可干渉性による
B ($k \approx 2$) レーザー顕微鏡で色が濃く表示されるもの	金属 (元素および, 化合物) 一部の結晶, 油脂 半導体 (元素および, 化合物) セラミック	Type II 光学系により迷光フレアーが皆無であるため
C ($k \approx 0$) レーザー顕微鏡ではほとんど色が表示されないもの	塗料, 繊維 大部分の生物試料	通常の光学顕微鏡ではたとえ反射型でも物質内部からの散乱光 (透過光) で色が見えている

一画像是通常の光学顕微鏡像と比べてみると、試料によっては全く異なった色再現を示すことがある。ここでいう異なった色再現とは、色の飽和度が異なるという意味であって、色相が異なるという意味ではない。もちろん現在では使用できるレーザーの波長に制限があるため色相も多少は異なるが、色の飽和度ほどは極端に異ならない。この色の飽和度が異なる様子を多少定量的に表現するために、通常の光学顕微鏡に3管式カラーカメラを取り付けて光電変換を行ない、RGB 検出器からの出力を NTSC カラーコンポジット信号に合成したときの C (Chroma) 信号とカラーレーザー顕微鏡の C 信号の振幅比を k とすることにする。この k をパラメータとして試

料を分類すると表1のグループに集約されてくる。

表1で示すグループAはすべて反射物の上に薄膜が形成されている試料であり、これにレーザー光の優れた可干渉性が作用してきわめて濃い色が再現されるのは容易に理解できるところである。この特長は薄膜の目視検査工程などに有効であり実用例も数が多い。

グループBは光を透過させない試料群である。このグループは Type II の反射型カラーレーザー走査顕微鏡で観察しても、色情報については通常の光学顕微鏡と比較して極端な差は生じない。

グループCは多少とも光を透過する試料群である。この試料群は Type II の反射型カラーレーザー走査顕微

鏡で観察すると多くの場合モノクロマチックである。この理由は、グループCの試料群は物質内部の組織には色があるが、反射面（空気との境界面）に色は存在していないからである。

紙を例にとって説明すると、紙の繊維自身は表面反射率が数%のオーダーであるのに、マクロに見れば紙の反射率は数十%のオーダーに達する。つまり紙から反射してくる光の大部分は紙の繊維内部を透過した光が散乱して返ってくると考えることができる。そして紙の色はこの繊維内部での吸収によるところが支配的なのである¹⁸⁾。ところが、Type IIの光学系では紙の繊維内部から返ってきた、色情報をもつ光は検出器前のピンホールを通過できない。したがってType IIの反射型カラーレーザー走査顕微鏡で紙を観察すると、赤い紙も、青い紙も皆同じモノクロマチックに見える。同様の理由で、白い紙も黒い紙も同じ明るさに表示される。このことはType IIの反射光学系が厳密に表面反射光だけをpick-upしているという証左でもある。

以上、Type IIの反射型カラーレーザー走査顕微鏡について述べたが、Type Iの場合はグループAの試料群については通常の光学顕微鏡に近い。またType IIでも透過型であれば紙や生物組織の色をかなり忠実に再現することが実験的に確かめられている。

6. OBIC

レーザー光を走査して、試料の光に対する反応を何らかの形で検出し、これを走査に同期したタイミングでCRTなどに表示すると、さまざまな光効果を可視化することができる。このうち光による内部光電効果（励起電流、光導電性など）を可視化したものはOBIC (optical beam induced current または contrast) 像と呼ばれ、主に半導体素子の評価、解析に利用されている¹⁹⁾。

このOBIC像による半導体素子の評価法は現在下記の3種類の方法が実用化されている。

- 試料を非動作状態または静的な動作状態に置き、ジャンクション不良を発見したり、光起電力の面内分布を調べる²⁰⁾。
- 試料を静的な動作状態にして、印加電圧を変化させてC-MOS素子のラッチアップ箇所を特定したり、空乏層の拡大過程を観測する²¹⁾。
- 試料を動作状態にして、論理動作を行なわせ、IC内部の論理回路が正しく動作しているかを確認する^{22, 23)}。

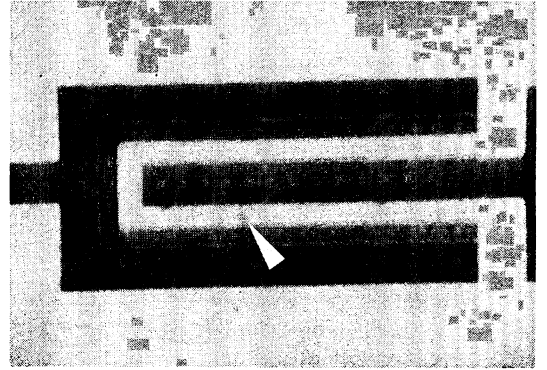


図7 OBIC法により発見された微小リーク箇所

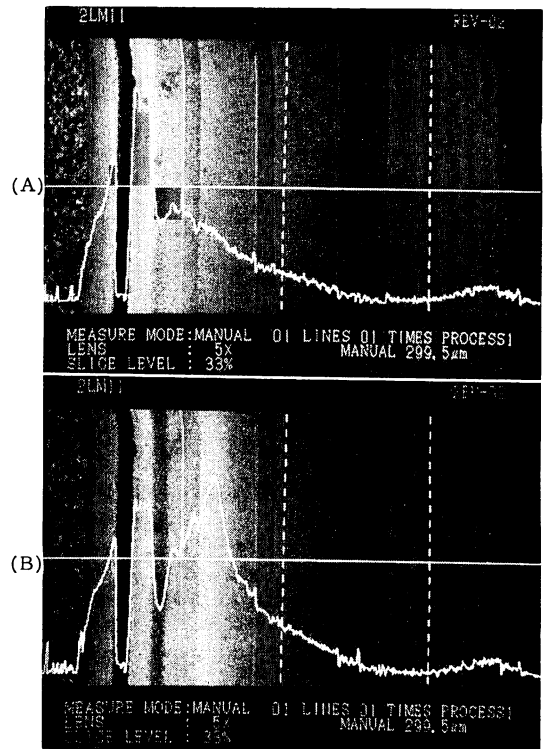


図8 印加電圧による空乏層の広がり
(A) 逆電圧 200 V, (B) 逆電圧 400 V

上記の分類でa, cは主に半導体素子の不良解析過程で用いられており、bは設計段階でのデザインルールの確立に用いられることが多い。図7はaの実例であり半導体素子の微小リーク箇所を発見している。図8(A), (B)はbの実例であり高圧トランジスタの空乏層が印加電圧とともに変化している様子をとらえている。ジャンクションのある半導体素子の場合OBIC発生メカニズムはレーザー光によって励起されたホットキャリアがジ

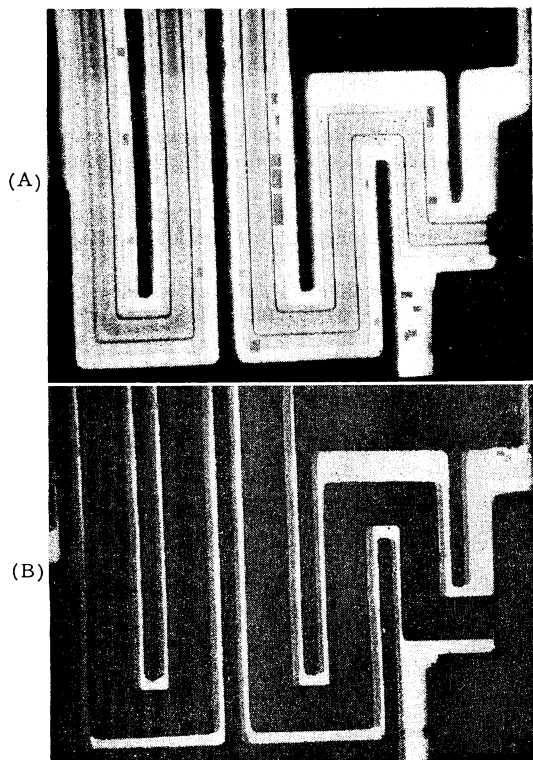


図9 レーザー光による OBIC 像の差
(A) He-Ne レーザー (633 nm),
(B) Ar レーザー (488 nm)

ジャンクション部の空乏層電界によってとらえられて光電流として検知されるので、このような空乏層の広がりを見ることが可能になる。

OBIC に使用する光源は半導体のバンドギャップを越える波長であれば（シリコンの場合、波長 $1.1 \mu\text{m}$ 以下）よいが、半導体は波長によって光の吸収係数が異なるため観察しようとするジャンクションの深さによって波長を選択すると便利である。とくに C-MOS のようにジャンクションが上下方向へ層構造をなしている場合には、長波長レーザーで深部まで観察した後、短波長レーザーで表層部のみを再観察するといった工夫がなされている。図9 (A), (B) は接合型 FET のドレインゲート間の OBIC 像であり、使用するレーザー光の波長によって OBIC 像が異なる様子を示している。

なお、OBIC 像の解像力は照射レーザーの集束スポット径、ホットキャリアの拡散長、レーザー光の浸透長、検出アンプの時定数、IC の場合は試料内部の応答時間、等数多くの要因が複合しているので、反射光の解像力は簡単ではない。一般的に単純なデバイスならば $1 \mu\text{m}$ 以下の分解能は得られることが経験的に確かめられてい

る。

7. ま と め

反射型レーザー走査顕微鏡が際立った特長を示すのは、Type II の光学系が採用された場合であることが多い。そして反射型の場合、比較的容易に Type II の光学系を構成できるので、近年ではそのシステムが多く実用に供せられるようになってきた。この Type II 光学系の特長を一口で表わすならば「厳密に物の表面を見る顕微鏡」といえよう。フレアーの影響が全く無い画像や、画像処理によって焦点深度がきわめて深くなった画像は、新しい顕微分野を開拓しつつあると言ってもよい。また、OBIC をはじめとする一群の光プロービング顕微鏡もレーザー光の走査、変調技術の発展に伴ってより身近なものになってくるのは間違いないことである。さらに走査型レーザー顕微鏡の出力は光電変換されたものであるから、画像処理装置との接続が容易であることも見逃せない利点である。

今後、このような特長を利用し、光による顕微鏡分野を広げる研究成果が数多く報告されることを期待する。

文 献

- 1) T. Wilson and C. Sheppard: *Theory and Practice of Scanning Optical Microscopy* (Academic Press, London, 1984).
- 2) M. Minsky: "Microscopy apparatus," U.S. Patent No. 3013467 (1961).
- 3) P. Davidovits and M.D. Egger: "Scanning laser microscope," *Nature*, **223** (1969) 831.
- 4) C. J. R. Sheppard and A. Choudhury: "Imageformation in the scanning microscope," *Opt. Acta*, **24** (1977) 1051-1073.
- 5) C. J. R. Sheppard and T. Wilson: "Depth of field in the scanning microscope," *Opt. Lett.*, **3** (1978) 115-117.
- 6) G. J. Brakenhoff, P. Blom and P. Barends: "Confocal scanning light microscopy with high aperture immersion lenses," *J. Microsc.*, **117**, Pt. 2 (1979) 219-232.
- 7) D. K. Hamilton, T. Wilson and C. J. R. Sheppard: "Experimental observations of the depth-discription properties of scanning microscopes," *Opt. Lett.*, **6** (1981) 625-626.
- 8) 中村 収, 河田 聡, 南 茂夫: "コンフォーカル・レーザー走査顕微鏡の三次元結像特性", *応用物理*, **57** (1988) 784-791.
- 9) 藤田 哲也: "脚光あびるレーザー स्कаны 螢光顕微鏡", *パリティ*, **2** (1987) 56.
- 10) 大出 孝博: "走査型カラーレーザー顕微鏡", *O plus E*, **99** (1988) 79-86.
- 11) 藤井 陽一, 尾崎 政男: "レーザー顕微鏡", *光学*, **17** (1988) 230-231.
- 12) D. C. O'Shea: *Elements of Modern Optical Design* (John Wiley & Sons, New York, 1985).

- 13) 鈴木達朗, 堀川嘉明: “生物学的研究を目的とした実時間走査型レーザー顕微鏡の開発”, レーザー研究, 15(1987) 636-646.
- 14) V. Wilke: “Laser scanning in microscopy,” Proc. SPIE, 396 (1983) 164-172.
- 15) A. Draaijer and P.M. Houpt: “A real-time confocal laser scanning microscope,” Proc. SPIE, 809 (1987) 85-88.
- 16) T. Wilson: “Three-dimensional imaging in confocal systems,” J. Microsc., 153, Pt. 2 (1989) 161-169.
- 17) 大頭 仁: “レーザー走査法の医学・生物学への応用”, 光学, 17 (1988) 212-219.
- 18) 蓮沼 宏: 光沢 (コロナ社, 1960) pp. 31-33.
- 19) C.J.R. Sheppard: “Scanning optical microscope,” Electron. Power, Feb. (1980) 166-172.
- 20) A. E. Dixon, S. Damaskinos, B. A. Oliver and R. T. Adsett: “Scanning laser microscope measurements of semiconductor and device properties,” J. Can. Ceram. Soc., 53 (1984) 21-27.
- 21) R. Müller: “Scanning laser microscope for inspection of microelectronic devices,” Siemens Forsch, 13, No. 1 (1984) 9-14.
- 22) M. Nagase: “A device analysis system based on laser scanning techniques,” Microelectron. Reliab., 20 (1980) 717-735.
- 23) 白ヶ沢強, 菅野雅秀, 間野洋治郎, 野依正晴, 石原 健: “レーザービームを用いた VLSI 故障診断システム”, 電子材料, 3月号 (1986) 155-161.