走査型カラーレーザー顕微鏡*

大出孝博**

Scanning Color Laser Microscope / Takahiro ODE

Key words confocal, optical sectioning, pin hole, stage scan, beam scan, servo galvano mirror, acoustic optical deflector, three-dimensional reconstruction, optical beam induced current

1. はじめに

レーザー光線を走査して顕微鏡光源とするいわゆるレーザー走査顕微鏡は、近年発達の間合が著しい¹⁾²⁾。レーザー走査顕微鏡には大別して2種類の応用が考えられる。その1つは反射光をもとにして試料の観察測定を行うものであり、他の1つはレーザーを蛍光励起光として用い、主に生物標本からの蛍光を観察するものである。とりわけ、我が国では前者の応用分野が早くから確立し、レーザー走査顕微鏡の工業的応用に関しては世界の最先端に位置しているといっても過言ではない。ここではレーザー走査顕微鏡の原理と工業的応用および、3波長レーザー光を照明光源とした走査型カラーレーザー顕微鏡について述べることにする。

2. 走査光学系

レーザー顕微鏡の走査光学系は図1に示すように、Type 1及びType 2の2種類に分類される³⁾。Type 1の特長を列挙すると、

- ・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。
- ・撮像領域だけを効果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ベックルノイズは問題とならない。

- ・映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こで、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 2の光学系は共焦点型とも呼ばれその特長はType 1に加えさらに、
- ・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)~7)}。

Type 1

Type 2 (共焦点点)

図1 走査顕微鏡の光学系 Type 1, Type 2 (共焦点点型)

* 原稿受付 平成3年5月7日

** レーザーテック(株) (横浜市港北区綱島東4-10-4)

・得られる画像は、オプティカルセクションングされたものになる⁸⁾⁹⁾。
 などの特長が加わることになる。

3. 走査法

Type 1, 2 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形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2つの方法があり¹⁰⁾、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2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。しかしステージを機械的に走査するため走査速度が光束走査型に比べて遅いのを実状である。この速度の遅さは実用上試料の検索、焦点合わせなどに支障をきたすことが多いため近年のレーザ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スキャナには、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などが考えられる。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¹¹⁾、又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¹²⁾。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¹³⁾。

4. オプティカルセクションング

Type 2 (以下、共焦点型) のレーザ走査顕微鏡の場合、画像の焦点面選択性には傑出した特長がある。それは図1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検出器からは出力されない。従って、得られる画像は合焦点面のものだけになる。これは共焦点型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。図2は共焦点型光学系において、試料がZ方向へ移動した時の検出器からの出力を実測したものである¹⁴⁾。このグラフから分かるように反射光の場合には鋭い半値幅特性が得られ、表面形状測定等に利用できることが分かる。

また、この特長を利用して各焦点面での画像をコン

図2 半導体試料からの蛍光および反射光に対する共焦点光学系のZ軸応答

図3 共焦点光学系の出力をもとに計算機により三次元情報を再生した例

ピュータ処理することによって、立体形状を再構築することができる¹⁵⁾。図3はこの実例であり、半導体集積回路の表面形状パターンである。図中に示されるコンタクトホールは、直径1 μmであり、この方式が面内方向にも高い分解能を示すことが分かる。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

レーザ顕微鏡は波長の異なる3色のレーザ光を照明光源に用いることでカラーのレーザ顕微鏡に機能を拡張できる(図4)。このカラーレーザ顕微鏡(共焦点

図4 カラーレーザ走査顕微鏡の原理図

型)で得られる色情報は多くの場合物体の表面色そのものであり、物体内部からの色情報を含まない。例外的に反射物体の上に薄膜で微細構造が形成されている場合は、レーザ光の可干渉性によって極めて濃い色相が観察される。この場合の色情報は薄膜の膜厚情報を強く反映したものになっているので、薄膜の目視検査に有効である。図5は半導体試料のフォトレジストパターンを3色のレーザ光で観察した場合の各色別に得られる画像である。

6. OBIC

レーザ光を走査して、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。このうち現在実用化が進んでいるのは、光による内部光電効果(励起電流、光導電性など)を可視化したものであり、一般には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¹⁶⁾。

このOBIC像による半導体素子の評価法は現在下記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¹⁶⁾。
- 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¹⁷⁾。
- 試料を動作状態にして、論理動作を行わせ、IC内部の論理回路が正しく動作しているかを確

He-Ne (633nm)

Ar (515nm)

Ar (488nm)

図5 半導体試料をカラーレーザ走査顕微鏡で観察した場合の各波長別画像

図6 OBIC法によって発見された半導体試料の微小リーク箇所(矢印)

認する^{18)~20)}。

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6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。

OBIC像の解像力は照射レーザーの集束スポット径,フォ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よりも一層複雑である。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

レーザー走査顕微鏡が際立った特長を示すのは,共焦点型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,比較的容易に共焦点型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使われるようになってきた。この共焦点型光学系の特長を一口で表すならば「厳密に物の表面を見る顕微鏡」といえよう。フレアの影響が全く無い画像や,画像処理によって焦点深度が極めて深くなった画像は,新しい顕微鏡分野を開拓しつつあると言っても良い。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。

文 献

- 1) 大出孝博: 反射型レーザー走査顕微鏡, 光学, 18 (1989) 392.
- 2) 大出孝博: レーザー走査顕微鏡の開発, 日経サイエンス, 20, 10 (1990) 42.
- 3) T. Wilson and C. Sheppard: Theory and Practice of Scanning Optical Microscopy, Academic Press, London, (1984).
- 4) C. J. R. Sheppard and A. Choudhury: Imageformation in the Scanning Microscope, Opt. Acta, 24, (1977) 1051.
- 5) C. J. R. Sheppard and T. Wilson: Depth of Field in the Scanning Microscope, Opt. Lett., 3, (1978) 115.
- 6) D. K. Hamilton, T. Wilson and C. J. R. Sheppard: Experimental Observations of the Depthdescription Properties of Scanning Microscopes, Opt. Lett., 6, (1981) 625.
- 7) 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.
- 8) 藤田哲也: 脚光あびるレーザースキャン蛍光顕微鏡, パリティ, 2 (1987) 56.
- 9) 大出孝博: 走査型カラーレーザー顕微鏡, O plus E, 99 (1988) 79.
- 10) 藤井陽一, 尾崎政男: レーザー顕微鏡, 光学, 17 (1988) 230.
- 11) 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.
- 12) V. Wilke: Laser Scanning in Microscopy, Proc. SPIE 396, (1983) 164.
- 13) A. Draaijer and P. M. Houpt: A Real-time Confocal Laser Scanning Microscope, Proc. SPIE, 809, (1987) 85.
- 14) J. W. Bowron, S. Damaskinos and A. E. Dixon: A New Spectrally Resolved Confocal Scanning Laser Microscope, Scanning, 13, Supplement I, (1991).
- 15) T. Wilson: Three-dimensional Imaging in Confocal Systems, J. Microsc., 153, (1989) 161.
- 16) C. J. R. Sheppard: Scanning Optical Microscope, Electron. Power, Feb. (1980) 166.
- 17) 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.
- 18) R. Muller: Scanning Laser Microscope for Inspection of Microelectronic Devices, Siemens Forsch., 13, 1, (1984) 9.
- 19) M. Nagase: A Device Analysis System based on Laser Scanning Techniques, Microelectron. Reliab., 20, (1980) 717.
- 20) 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 (1986) 155.