光起電流を計るレーザー顕微鏡

大出 孝博*

(1996年7月22日 受理)

A Method for the Measurement of Optical Beam Induced Current
Using Scanning Laser Microscope

Takahiro ODE*

(Received July 22, 1996)

OBIC (Optical Beam Induced Current) microscope is an application of a scanning laser microscope. It enables to visualize a photo conductivity and/or depletion region of p-n junction in a semiconductor material. This paper briefly reviews the principle of photo current measurement, instrumentation, and some applications. Moreover, spectroscopic OBIC image has been investigated with the specially designed OBIC microscope which can switch the excitation wavelength.

Key Words: Laser microscope, OBIC microscope, p-n junction, Optical induced current, Photo conductivity

1. はじめに

レーザー光線を走査光源として利用したレーザー顕微鏡は材料科学や半導体産業の分野において広く普及している。これは共焦点光学系の示す高コントラスト, 高分解能, オプティカルセクションニング等の特性が微小領域の三次元寸法計測に適しているからであろう。これらの応用は試料からの反射光情報をもとにしている。

一方, レーザー顕微鏡の応用には上に述べた反射像観察ではなく, レーザー光を励起光源としたOBIC顕微鏡(Optical Beam Induced Current)も

知られており, こちらの方も半導体産業を中心に普及している。光ビームを用いて半導体試料内部にキャリアを注入しp-n接合の状態を観察するという手法は古くから興味を持たれてきたのだが¹⁾, 実用化したのはレーザービームの走査技術が確立してきた近年になってからである。

例えばFig. 1に示すようなレーザー顕微鏡は試料の三次元情報を比較的簡単に知る道具として1980年代から普及を始めたが²⁾, この走査メカニズムは光効果という不可視情報を可視化する道具としても有効である。つまり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

* レーザーテック (株) 開発部 (〒223 横浜市港北区綱島東4-10-4)

* Technology Development Division, Lasertec Corporation (4-10-4 Tsunashimahigashi, Kouhoku-ku, Yokohama 223)

Fig. 1 Typical arrangement of scanning laser microscope.

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^{3,4)}。このうち光による内部光電効果(励起電流、光導電性など)を可視化したものがOBIC像である。この場合、試料は特に光半導体に限定されない。光半導体としては作られていない一般のICにおいても、表面には多くのp-n接合部が露出しているの、この露出部分にレーザー光を照射することによってp-n接合部のOBIC像を観察できる。

ところで、p-n接合部観察には電子ビーム励起電流像観察(Electron Beam Induced Current; 以下EBIC)が良く知られていた。EBIC法は電子ビームを用いて半導体を励起し、そのキャリアをp-n接合部の空乏層電界によって捉えることでコントラストの原理としている⁵⁾。レーザー顕微鏡によるOBIC法はEBIC法における電子ビームをレーザービームに置き換えたものと考えれば良いのだが、励起源が異なるので当然その特長も異なってくる。

初期の段階ではOBIC法のEBIC法に対する利点として、真空が不要であるとか走査が容易であるといった点が述べられていた。しかし今日では光波長を制御すれば励起エネルギーを正確に

コントロールできることや、場合によってはOBIC像の方がEBIC像よりも空間分解能が高い、などといった積極的な利点が主張されている⁶⁻⁸⁾。

本稿ではまずOBIC法による光電流計測の原理を簡単に紹介する。次に励起波長を変えることによって光吸収係数の差から光浸透長が異なることを予測し、実際に試作した励起波長可変OBIC顕微鏡によってその差を確認した結果を示す。

2. 光励起キャリア

OBICにも様々な観察モードが存在するが、どの観察モードにおいても光によって励起される過剰キャリアがOBIC電流の要因となっている。過剰キャリアは励起に用いるレーザー光の光子エネルギーが半導体のバンドギャップよりも大きいときに発生する。この過剰キャリアの密度がレーザー光の照射されていない部位のキャリア密度よりも有意差をもって大きければ過剰キャリアによってコントラストを得られる。従って試料に損傷を与えない程度のレーザーエネルギーでOBIC像観測に必要な量の過剰キャリアを発生させることができるかどうかという点についてまず考察してみる必要がある⁹⁾。

レーザー光における時間あたりのフォトン発生量は次式によって表される。

$$\text{Energy per second} / \text{Energy per photon} = E / hn \quad (1)$$

ここで E はレーザーパワーであり、 h はプランク定数、 n はレーザー光の振動数である。

上式より1mWのHe-Neレーザー光の場合、毎秒 3.2×10^{15} のフォトンが発生していることになる。しかしこれらのフォトンとは全てが試料に到達できる訳ではなく大部分は途中の光学系によって失われてしまう。そこで途中の光学系による伝達効率を a とすることによって半導体内部で発生するキャリア対の数 N は

$$N = 3.2 a \times 10^{15} \quad (2)$$

が導かれる(量子効率100%とした)。ここで

キャリアの平均寿命を T_{av} 、キャリア対の生成されている部分の体積を V とすると、過剰キャリア密度 Dn は

$$Dn = (N \times T_{av}) / V \quad (3)$$

によって表される。キャリア対の生成されている部分の体積はレーザービームの半導体内部における減衰と生成したキャリア対の拡散長等によって決定される。内部で生成したキャリア対の挙動はモンテカルロ法によるシミュレーション等が知られているが^{8,10-13)}、ここではレーザービームが半導体内部へ円柱状に浸透するものと近似して考える。この場合円柱底辺の径は集束レーザービーム径にキャリアの拡散長を足したものであり、またその高さは吸収によって決定される浸透長に拡散長を足したものと考えることができる。

ここでレーザービームのスポット径及び拡散長をそれぞれ1mmとし、浸透長を3mm、ライフタイムを 2×10^{-6} secとすると¹⁴⁾、

$$Dn = 2 \times 10^{20} \text{cm}^{-3} \quad (4)$$

が導かれる。 a の値を 10^{-1} とすると

Fig. 2 Carrier generation by incident laser beam.

$$Dn \sim 2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3} \quad (5)$$

となり、平衡状態にある半導体のキャリア密度 $1.45 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ に対して十分な有意差をもって大きいといえる¹⁵⁾。以上の試算によって半導体試料に損傷を与えない程度のレーザー光(1mW)で光励起電流の検出が可能であることが分かった。

3. 観察モード

3.1 接合部のない半導体の場合

半導体に照射された光により励起されたキャリア対は、ある時間の間結晶内を動き回った後再結合する。このとき、Fig. 2に示すように外部から電圧を加えてエネルギーバンドを傾斜させてやると、その傾斜に沿って電子と正孔が移動して光電流が流れる。レーザー顕微鏡ではこれを用いて光伝導度の面内分布を観察することができる¹⁶⁾。

3.2 接合部のある半導体の場合

p-n接合のエネルギー帯構造は、Fig. 3(a)に示すように空乏層のところのバンドは傾斜している。この空乏層の近くにバンドギャップ E_g 以上のエネルギーをもった光が照射されると、キャリア対が発生し、電子は空乏層部の傾斜に沿ってn型領域へ、正孔はp型領域へと移動していく。

3.2.1 電界を加えない観察

このとき、外部回路を短絡しておくと、Fig. 3(a)に示すように光の量に比例する光電流 I_{sc} が外部回路に流れる。これはよく知られた光起電力効果そのものであり、OBIC顕微鏡ではこれも観察することができる。この応用はダイオード等の不良解析に応用されている¹⁷⁻¹⁹⁾。

3.2.2 電界を加えた観察

p-n接合が逆バイアスされている場合はFig. 3(b)のように空乏層の電界強度が高くなっている。従って光によって励起されたキャリア対は再結合を待たず空乏層電界に捉えられるので応

Fig. 3 The band states of p-n junction under several conditions.

答も早く励起電流も多くなる。順バイアスの場合にはこれと全く逆でありFig. 3(c)のように空乏層電界が弱いので励起電流は少ない。したがって動作中のICを観察して得られるOBIC像は、半導体表面に露出しているp-n接合のうち逆バイアスされているp-n接合部分に対してコントラストがついていると考えられる。このような原理でICの論理動作に伴って内部トランジスタのバイアス状態がOBIC像によって観察できる。これはバイポーラ、MOSいずれにも共通している。

4. 検出回路

OBIC検出回路の初段には電圧検出型と電流検

出型とが考えられる。このうち一般的によく用いられるのは電流検出型である。Fig. 3(d)に示すようにp-n接合が開放状態の場合には、光励起された電子はn型領域に、正孔はp領域に蓄積し、n型領域に負、p型領域に正の空間電荷が形成される。その結果n領域のフェルミ準位がp領域よりも上にもち上がり、両者のフェルミ準位に eV_{oc} の差が生じる。光励起によって発生するキャリア対の数は光量に比例するから、光量を大きくしていくと V_{oc} も大きくなっていく。光量をさらに増大していくと、ついにはp型の伝導バンドの下端とn型のそれが一致してしまい、障壁部分の傾斜がなくなってしまう。光励起により発生したキャリア対は、エネルギーバンドの傾斜がなくなってしまったので移動することができなくなる。つまり光量が増大していくと、あるところで開放端光電圧は飽和してしまい、それ以上では光量に無関係に飽和してしまう。このモデルによると、開放端光電圧の最大値は、p-n接合の拡散電位差 V_D になることが予想される。Fig. 4はシリコンp-n接合の開放端光電圧 V_{oc} と短絡光電流 I_{sc} の光量との関係を実測した例であり、上記の事情がよく現れている。

入力インピーダンスの高い増幅器(電圧増幅器)が接続されている場合にはこのように過剰

Fig. 4 Photo voltage and photo current as a function of the incident light.

Fig. 5 Schematic diagram of an OBIC amplifier.

キャリアの掃け口がなくなるのでリニアリティーおよび周波数応答が著しく劣化する。したがってOBIC検出回路の初段にはほとんど例外無く電流検出器が用いられている。このことは他の光電流検出回路と非常によく類似している。

ICを動作させながらその内部の状態を観察するためには、被観察ICに規定の電源電圧を加える必要がある。この場合には電流検出回路の入力をFig. 5の様に被測定ICの接地端子へ接続することが多い。Fig. 5では電流検出回路と被測定ICとの結合は完全に直結されている。このような構成ではIC本来の動作電流も電流検出回路に流入するので、これを光励起電流と識別するために光の照射されていない期間の動作電流をコンデンサCに蓄えておき、光電流を測定するタイミングで動作電流分を差し引くという工夫がなされている。

なお、電流検出回路の入力が接地端子へ接続されているのは、IC内部の電流変化が最も不偏的に収集できるからであって、特定の部位だけを観察したいときなどは他の入出力端子を使用したりすることもある。マイクロマンピュレーターなどを使用して特定の配線パターンへ

プロービングすることもよく行なわれている。

5. 励起波長によるOBIC像の変化

OBIC光源に要求される条件はその波長が半導体のエネルギーギャップを越えることである(シリコンの場合、波長1.1mm以下)。したがって自然光でもOBIC像を得ることはできる²⁰⁾。しかし、微小スポットに効率良くパワーを集中できるという意味で今日のOBIC顕微鏡は例外なくレーザー光を使用したレーザー顕微鏡である。またレーザーの種類も量子化効率の良さや浸透長が適当であるといった理由でHe-Neレーザー(波長633nm)が多用されている。ところが半導体はFig. 6のように波長によって光の吸収係数が異なるため²¹⁾、励起波長を切り替えることによって光の浸透長が変わりp-n接合部の深さ方向の情報が得られることが予測される。

Fig. 6によれば波長633nm(1.96eV)に対するシリコンの吸収係数は約 $3.88 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ であり、波長488nm(2.54eV)に対する吸収係数は約 $1.46 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ で

Fig. 6 Absorption constants of semiconductor materials as a function of photon energy of incident light.

— : 300°K
 — — — : 77°K

ある。この吸収係数 a の意味するところは

$$I = I_0 \propto e^{-ad} \quad (6)$$

(I_0 : 透過前の光強度, I : 透過後の光強度, d : 物質の厚さ)

であるから²²⁾, 入射光が e^{-1} に減衰する厚さはそれぞれの波長について,

$$d(\lambda/e) = 2.58\mu\text{m} \quad (\lambda = 633\text{nm}) \quad (7)$$

$$d(\lambda/e) = 0.69\mu\text{m} \quad (\lambda = 488\text{nm}) \quad (8)$$

となる。これをシリコンに対する光浸透長とすれば、丁度p-n接合部の空乏層電界深さと同程度であるから、深さ方向情報を得られる可能性がある。

そこで我々はFig. 7に示すような実験装置を製作し2種類の励起波長に対する半導体素子のOBIC像の差異を観察した。Fig. 中He-Neレーザーは波長633nmであり, Arレーザーは波長488nmである。主走査用偏向器には音響光学偏向素子(AO素子)を用い周期15.73kHz, キャリア周波数60~110MHzでドライブした。AO素子を高速走査させることによって発生する非点収差は $f = 887\text{mm}$ のシリンドリカルレンズをAO素子直後に配置することによって補正した。副走査にはサーボガルバノミラーを用い周期60Hzにてドライブした。試料には接合型FET(2SK72)を用い, ドレイン=ゲート間のOBIC像を観察した。OBIC電流検出回路はFig. 5と同様の構成とした。

実験結果はFig. 8(a),(b)に示すが, 使用するレーザー光の波長によってOBIC像が異なることが確認

できた。すなわちFig. 8(a)は励起光源がHe-Neレーザー(浸透長 $2.58\mu\text{m}$)なので空乏層の深部に至るまでOBIC像を観察できている。Fig. 8(b)は照明光源をArレーザー(浸透長 $0.69\mu\text{m}$)としたため空乏層電界のうち表面部に露出している部分のみがOBIC像として現れている。この観察結果から2SK72の空乏層電界深さは(両端部を除いて) $0.69\mu\text{m}$ よりは深く, $2.58\mu\text{m}$ よりは浅いことが分かった。

このようにOBIC顕微鏡において励起波長を切

Fig. 8 The change of OBIC images. The excitation wavelength are: (a) 633nm, (b) 488nm.

Fig. 7 Experimental set up of an OBIC microscope which can switch the excitation wavelength.

り替えることはp-n接合部の深さ方向情報を得る手がかりになる。また、C-MOSICのようにp-n接合部が多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ことが可能である。更にC-MOSICはOBIC観察をしようとするとし起光そのものがサブスレート付近の寄生トランジスタを励起してしまいラッチアップ現象を誘起することがある。このような場合にはレーザー光源を短波長に切り替えればレーザー光の浸透長が浅くなるためラッチアップ現象を起こしにくくなることが予想される²³⁾。

6. まとめ及び今後の課題

光起電流を計るレーザー顕微鏡としてOBIC顕微鏡について述べた。また励起波長を変化させることで半導体内部の光反応について、その深さ方向の情報が得られることを実例をもって示した。

OBIC顕微鏡はICの内部を空乏層の変化を通して観察する手法として重要であり、不良ICの欠陥解析やC-MOSICのラッチアップ解析などに使用されはじめている。しかしOBIC顕微鏡によるICの観察はまだ研究が緒についたばかりであり未知の事柄も多い。

例えば、OBIC像の面内分解能については励起レーザー光の集束スポット径、レーザー光の浸透長、フォトキャリアの拡散長、p-n接合の電界強度、検出アンプの時定数、半導体試料自身の応答時間、等数多くの要因が複合しているということは分かっているが、では与えられた試料で実際の分解能がどうなるかという実験を待たなくては予測がつきにくい。これなどは今後に残された課題といえるだろう。

また、今回の実験で励起波長を変えるとOBIC像の面内分解能にも変化が観測された。励起波長をパラメータとしたOBIC像の分解能等も今後の課題といえるだろう。

参 考 文 献

- 1) K. L. Ashley and J. R. Biard: IEEE. ED-14 (1967) 429.
- 2) J. C. Dainty (ed.): Current Trends in Optics (Academic Press, London, 1994) Chap. 16 230.
- 3) 大出孝博: 光学 **18** (1989) 392.
- 4) 大出孝博: 日経サイエンス **20** (1990) 42.
- 5) D. B. Holt: *Quantitative Scanning Electron Microscopy* (Academic Press, London, 1974).
- 6) T. Wilson, et al.: Journal of Materials Science, **14** (1979) 961.
- 7) C. J. R. Sheppard: Electronics and Power (1980, Feb.) 166.
- 8) A. E. Dixon et al.: Journal of The Canadian Ceramic Society **53** (1984) 21.
- 9) T. Wilson and C. J. R. Sheppard: *Theory and Practice of Scanning Optical Microscopy* (Academic Press, London, 1984) Chap. 9 179.
- 10) R. Shimizu and T. E. Everhart: OPTIK **36** (1972) 59.
- 11) R. Shimizu et al.: Journal of Applied Physics **46** (1975) 1581.
- 12) T. Wilson and E. M. McCabe: J. Appl. Phys. **59** (1986) 2638.
- 13) P. D. Pester and T. Wilson: Phys. Stat. Sol. (a) **105** (1988) 649.
- 14) P. C. Mathur et al.: J. Appl. Phys. **52** (1981) 3651.
- 15) 応用物理学会編: 応用物理ハンドブック (丸善, 1990) pp.404.
- 16) Birger Drugge and Edvard Nordlander: IEEE Transactions on Electron Devices ED-27 (1980) 2124.
- 17) T. H. Distefano and J. M. Viggiano: IBM. J. Res. Dev. **18** (1974) 94.
- 18) T. H. Distefano and J. J. Cuomo: Appl. Phys. Lett., **30** (1977) 351.
- 19) David V. Lang and Charles H. Henry: Solid. St. Electron **21** (1978) 1519.
- 20) G. Adam: Physica **20** (1954) 1037.
- 21) 応用物理学会編: 応用物理データブック (丸善, 1994) pp.452.
- 22) F. A. Jenkins and H. E. White: *Fundamentals of Optics* (4th ed.) (McGraw-Hill, 1976) pp.458.
- 23) 大出孝博: O plus E, No.99 (1988) 79.