

## 多波長レーザースクイド顕微鏡による半導体の評価\*

大坊 真洋\*\*、泉田 福典\*\*\*、志子田 有光\*\*\*\*

半導体にレーザー光を照射すると光電流が流れ、磁場が発生する。この光励起磁場をSQUIDで計測する原理のレーザースクイド顕微鏡を開発した。一定光束量の波長の異なる励起光を照射し、その時の発生磁場を計測した。光励起磁場の波長依存性を利用することによって、少数キャリア拡散長を計測する方法を導出した。レーザースクイド顕微鏡は、非侵襲、非接触で半導体の計測ができるので、新しい評価装置となる可能性がある。

キーワード：SQUID、顕微鏡、レーザー

## Evaluation of Semiconductors using Multi-wavelength Laser SQUID Microscope\*

DAIBO Masahiro\*\*, IZUMIDA Fukunori\*\*\* and SHIKODA Arimitsu\*\*\*\*

Photocurrents flow, when the semiconductors are irradiated with a laser beam, and then magnetic fields arise. Photo-induced magnetic fields are measured under the constant photon flux condition in each wavelength. New method for measuring the minority carrier diffusion length is derived by using the wavelength dependence of photo-induced magnetic fields. The laser SQUID microscope has the possibility of becoming a new tool for semiconductors evaluation, because it has features of noninvasive and non-contact.

**key words: SQUID, Microscope, Laser**

### 1 緒 言

SQUID (Superconducting QUantum Interference Device: 超伝導量子干渉素子) は、現存する磁気センサーの中で最も高い磁気感度を有する。この優れた特徴から、SQUIDは脳磁場や心臓磁場の検出などの先端医療への応用が研究されている。医療以外の分野では、近年になって、微小領域の非常に微弱な磁場分布を画像化するSQUID顕微鏡が注目されている。超伝導材料中の磁束の観察やプリント基板の電流分布の計測に応用されている。しかしながら、感度が高いという長所をもってしても、室温の対象物に対する空間分解能は、数百マイクロン~数ミリ程度であり、この短所が、適用できる対象の範囲を著しく制限している。一般に空間分解能は、SQUIDの受感部のサイズか、SQUIDと対象物間の距離の、いずれか大きい方で決まる。低い空間分解能の原因は、断熱に要する距離に主要因がある。超伝導状態を維持するためには、外界と断熱する必要がある。検査対象物が例えば超伝導体のように低温であればSQUIDと対象物を近接して配置できるので問題がない。しかし産業応用

上、最も一般的な対象物は室温状態にあるので、SQUIDを対象物に接近させることができない。典型的な断熱容器の場合には、SQUIDと対象物との距離は数ミリ程度ある。サファイヤ窓と伝導冷却を使った最新型の断熱容器の場合でも500 $\mu$ mが限度である。従来のSQUID顕微鏡では、半導体の検査に使えるようなミクロンレベル分解能は望めない。

そこで、我々はレーザー光で微小領域に磁場の変化を誘発させ、その磁場をSQUIDで計測する原理のレーザースクイド顕微鏡を提案し、開発を進めてきた<sup>1-6)</sup>。ほぼ同時期にPTB<sup>7,8)</sup>とNEC<sup>9,10)</sup>から全く独立に類似の研究が報告され、現在でも研究が進められている。レーザーとSQUIDの組み合わせによって、半導体が、SQUIDの産業的応用の良いターゲットになったといえる。レーザースクイド顕微鏡では、磁気信号の発生・変調領域が、最小の場合、レーザースポットサイズ+拡散長程度に限定できるため、位置情報はレーザースポットの位置でマッピングすればよく、SQUIDの低空間分解能を補うことがで

\* 産業用SQUID応用機器の開発(地域結集型共同研究事業)

\*\* 電子機械部(現在岩手大学工学部電気電子工学科)

\*\*\* 電子機械部、

\*\*\*\* 岩手医科大学教養部(現在東北学院大学工学部物理情報工学科)

きる。レーザー光で励起して、SQUIDで磁場を計測するので、非接触計測であり、対象物の破壊や汚染が一切ないという長所がある。さらに、アクティブ型の計測なので、ノイズ除去が容易となり、簡易な磁気シールドでも計測可能となる。

本論文では、特に対象物としてp-n接合を有する単結晶シリコンウェハを用い、低濃度側の不純物濃度を定量的に計測する方法について述べる。

## 2 実験方法

### 2-1 光照射と磁場のモデリング

p-n接合に光を照射した時の電流 $J_s$ は式(1)で表される。

$$J_s \approx q(1-R)\Phi \left( \frac{L_n}{L_n+1/\alpha} + \frac{L_p}{L_p+1/\alpha} \right) \quad (1)$$

ここで、p型またはn型の方の不純物濃度が他方よりも十分に高い時は、高濃度側での少数キャリアの寿命は短いので、全体への寄与から省略して近似することができる。ここではp型の濃度が高いp<sup>+</sup>/n接合とする。

$$J_s \approx q(1-R)\Phi \left( \frac{L_p}{L_p+1/\alpha} \right) \quad (2)$$

ここで $q$ :素電荷、 $R$ :反射率、 $\Phi$ :光子フラックス、 $L_p$ :少数キャリア(正孔)の拡散長、 $\alpha$ :光吸収係数である。

式(2)で発生する電流がSQUIDの存在する空間に発

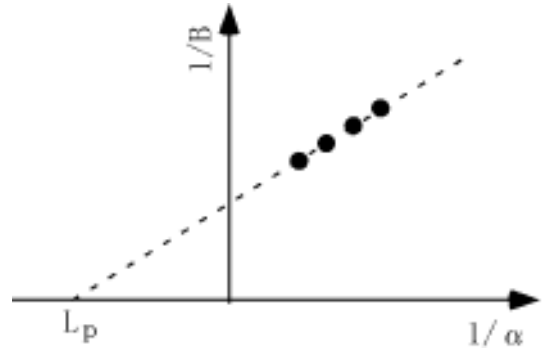


図1 外挿による少数キャリア拡散長 $L_p$ の抽出  
: 光吸収係数、 $B$ : 磁束密度 ただし光子フラックス $\Phi$ が一定の場合

生させる磁束密度 $B$ は、 $C$ を比例定数とし、右辺、左辺のそれぞれ逆数にして式(3)で表すことができる。

$$\frac{1}{B} = \frac{1}{Cq(1-R)\Phi L_p} (L_p + 1/\alpha) \quad (3)$$

反射率 $R$ は波長によって若干の依存性があるが、これは十分に小さいので一定として扱う。よって、光子フラックス $\Phi$ を一定とすると、Y軸を $1/B$ 、X軸を $1/\alpha$ としたグラフは直線になり(図1) X軸の切片が $L_p$ となるのがわかる。シリコンの光吸収係数 $\alpha$ は、波長依存性が高いので、波長を変えることによりX軸の値を変化させてプロットが得られる。

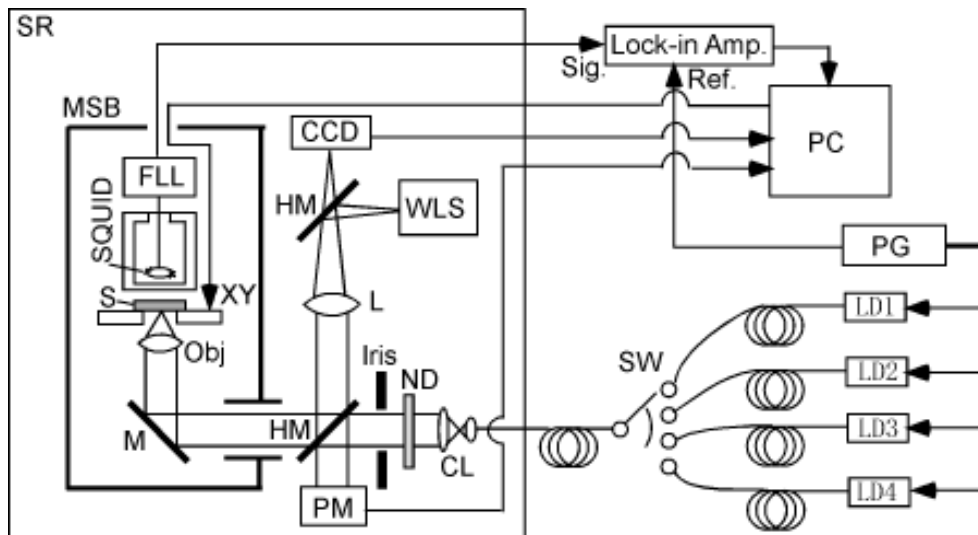


図2 システムブロック図

SR: 電磁シールドルーム、MSB: 磁気シールドボックス、FLL: 磁束ロック回路、S: 半導体試料、SQUID: 超伝導量子干渉素子、XY: セラミックス非磁性ステージ、Obj: 対物レンズ、M: ミラー、HM: 半透明ミラー、PM: 光パワーメータ、L: 凸レンズ、CCD: モノクロ CCD カメラ、WLS: 白色光源、Iris: 絞り、CL: コリメータレンズ、SW: 光路切替、LD1 ~ LD4: 半導体レーザー(波長 684, 783, 809, 851nm)、PG: パルス発生器、Lock-in Amp.: 位相検波器、PC: パーソナルコンピュータ

なお、筆者らによるこれまでの報告<sup>6)</sup>では、発生する磁場が一定となる時の光子フラックスを計測していた。しかし、半導体から発生する磁場よりも、励起エネルギーを供給する光子フラックスを制御する方が安定性が良いことがわかり、光子フラックスを一定とする方法を開発した。

2 - 2 実験装置

次に、製作した装置について図2のシステムブロック図を用いて説明する。SQUID (Tristan Technology 社製) は、高温超伝導体であり液体窒素に浸して冷却するタイプである。SQUIDのノイズレベルは、測定周波数域 (3kHz) で 50 fT / Hz 以下である。レーザーは半導体レーザーであり、波長が 684, 783, 809, 851nm の4種類を用いた。半導体レーザーは、TEクーラーで一定温度に制御されており、出力および波長変動の影響が最小になるようにしている。半導体レーザーは、磁気シールドボックス及び、電磁シールドルームの外に配置し、レーザー光を光ファイバーで試料近傍まで導光することによって、半導体レーザーからのノイズ混入が最小になるようにしている。半導体レーザーは 3 kHz のパルスで直接変調した。変調する理由は、ロックインアンプによって低ノイズ狭帯域検出をするためである。

レーザー照射位置の走査は、試料を移動させて行った。地磁気が存在するので SQUID は移動させることはできない。レーザー焦点と SQUID の相対位置も走査歪を無くするために一定とした方がよい。そのため、試料が非磁性体である場合は、試料を動かして走査した方がよいと考えた。試料を移動させるステージの主構成材料はセラミクスであり、 piezoelectric アクチュエータで駆動して、磁気ノイズが最小になるようにしている。フルストローク (20mm) 量を移動させても、FLL (磁束ロックループ) のロックが外れることが無いことを確認している。データの収集は、ステージの移動が停止してから行うのでステージの駆動系からノイズが混入することはない。

磁気シールド環境<sup>4)</sup> は、厚さ  $t=0.8\text{mm}$  のパーマロイ 2 層と  $t=5\text{mm}$  のアルミニウムから構成される磁気シールドボックスと、 $t=20\text{mm}$  のアルミニウムからなる電磁シールドルームの 2 重構成となっている。

3 実験結果

図3に光子フラックス一定の時の各波長での磁場分布を示す。プレーナー型のダイオード構造 ( $p^+/n$ ) を横方向にスキャンした。縦軸の磁束密度  $B$  は、SQUID の出力をロックインアンプで位相検波した振幅に対応している。 $B$  が最大となる場所  $X=200\mu\text{m}$  付近が  $p$ - $n$  接合の境界であり、その右側が  $p^+$  型アイランドの内部である。左側は基板側である。照射位置によって、電流経路が異なるので磁場の絶対値は異なるが、各波長の相対的な強度にほぼ一定の関係が保たれている。グラフ両端の磁場強度が最小に向かっている場所は、ダイオードの構造が左右対称になる部分である。この場所では、光電流の経路が等方的に対象となるために、磁場がキャンセルされている。

図4は、図3のデータをもとにして、各照射位置での

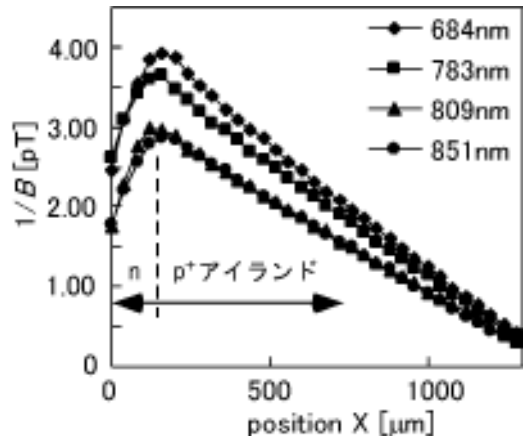


図3 フォトンフラックスを一定とした時の各波長での発生磁場分布

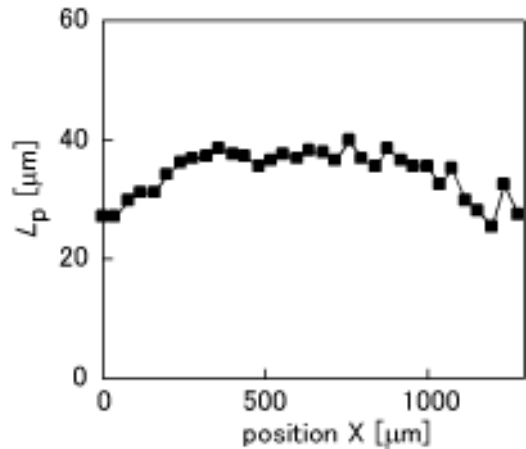


図4 各地点にレーザー照射した時の発生磁場から得られた少数キャリア拡散長

少数キャリア拡散長  $L_p$  を算出した結果である。各波長 (4 波長) の時の  $1/B$  と  $1/\alpha$  を求め、4 点を最小自乗で直線近似して、外挿した  $X$  切片から  $L_p$  を得ている。磁場強度が小さい場所 ( $X$  軸の右側) でのデータのバラツキは、信号強度の低下による  $S/N$  比の悪化によるものである。アイランドの内側で広い区間で一定の値 ( $L_p=37\mu\text{m}$ ) が得られている。これは  $p$ - $n$  接合の深さが  $4\mu\text{m}$  と少数キャリア拡散長や光進入長よりも浅いので、少数キャリアがどこでも空乏層に到達しているからである。本方法で計測した値は、接触式で得られた結果  $20\mu\text{m}$  よりも大きい。前回報告した、照射場所による磁気信号の減衰から求める方法 ( $170\mu\text{m}$ ) よりも妥当な値が得られている。空間的なスキャンよりも、多波長にして計測する方が定量的検査には適していることがわかる。

しかしながら、現状の本システムのチャンネル数は 1 ch であり、試料に対して垂直方向の磁場しか検出できない。電流で計測する場合のように、すべてのキャリアの移動の総和による結果を観察しているとはいえず、検出漏れが発生している。磁場は本来ベクトルデータであるので、今後、チャンネル数を 3 チャンネルに増やし、ベクトル計測ができるように改良していくことが必要と思

われる。

#### 4 結 言

多波長励起ができるレーザー SQUID 顕微鏡を開発した。光励起磁場の波長依存性を利用することによって、少数キャリア拡散長を計測する方法を導出した。p-n 接合を有するシリコン単結晶試料において、波長の異なる励起光を一定のフォトンフラックス量照射して、その時の発生磁場を SQUID で計測した。測定結果は従来の照射場所による発生磁場の減衰を計測する方法よりも改善され、接触式の場合に近づいた。さらに精度を上げるには、今後のベクトル化への改良が必要となるが、本システムは、非接触、無汚染といった長所を有するので、半導体の製造プロセス途中で検査を可能とする。

#### 謝 辞

研究を進めるにあたり有意義なディスカッションをしていただいた岩手大学工学部 吉澤正人 教授に感謝申し上げます。本研究は科学技術振興事業団 岩手県地域結集型共同研究事業「生活・地域への磁気活用技術の開発」の援助を得て行われたことを記して、関係者への謝辞とします。

#### 文 献

- 1) 大坊真洋, 小高正, 志子田有光, 2000 年秋季第 6 1 回応用物理学会学術講演会講演予稿集, **3p-ZM-14**, 210 (2000)
- 2) 大坊真洋, 小高正, 志子田有光, 計測自動制御学会第 17 回センシングフォーラム資料, 227 (2000)
- 3) 大坊真洋, 小高正, 志子田有光, 電気学会センサ・マイクロマシン準部門平成 12 年度総合研究会, **PHS-00-28**, 65 (2000)
- 4) 大坊真洋, 泉田福典, 小高正, 志子田有光, 岩手県工業技術センター研究報告, **8**, 13 (2001)
- 5) M. Daibo, T. Kotaka and A. Shikoda, Physica C, **357-360**, pp.1483-1487, 2001.
- 6) M. Daibo, A. Shikoda and M. Yoshizawa, Physica C (in press)
- 7) J. Beyer, H. Mats, D. Drung and Th. Schurig, Applied Physics Letters **74-19**, 2863 (1999)
- 8) T. Schurig, J. Beyer, D. Drung, F. Ludwig, A. Ludge and H. Riemann, IEICE Trans. Electron. **E85-C**, 665 (2002)
- 9) K. Nikawa and S. Inoue, Technical Report of IEICE, Osaka, **ICD2000-174**, 1 (2000)
- 10) K. Nikawa, IEICE Trans. Electron. **E85-C**, 746 (2002)