

SQUIDによる非接触半導体検査

Non-contact Testing Method for Semiconductors using SQUID

○大坊 真洋*, 菊地 利雄**

*岩手大学工学部, **岩手県工業技術センター

* Faculty of Engineering Iwate University, ** Iwate Industrial Research Institute

キーワード: 超伝導量子干渉素子 (Superconducting Quantum Interference Device),
レーザー (Laser), 半導体 (Semiconductor), 非接触 (Non-contact)

連絡先: 〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5 岩手大学工学部電気電子工学科 大坊真洋,
Tel.: (019)621-6983, Fax.: (019)621-6983, E-mail: daibo@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

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, 感度が高いという長所がありながら, 室温の対象物に対しての空間分解能が数百ミクロン~数ミリ程度と低く, 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 mm 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 μm 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 SQUID 顕微鏡を提案し, 開発を進めてきた¹⁻⁶⁾. ほぼ同時期にドイツの PTB^{7,8)} と NEC^{9,10)} から全く独立に類似の研究が報告されており, 現在でも研究が進められている. SQUID のアプリケーションが SQUID メーカーや研究者により模索されてきたが, レーザーと SQUID の組み合わせにより, 半導体が格好のターゲットとなったといえる. レーザー SQUID 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位置に応じて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きる。レーザ光で励起して、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、p-n接合を有する単結晶シリコンウェハの低濃度側不純物濃度の定量的計測方法、および多結晶太陽電池の結晶粒界の計測について述べる。

2. p-n接合単結晶シリコン

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。

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

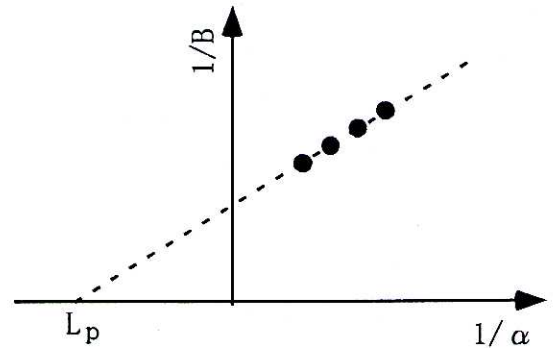


図1 外挿による少数キャリア拡散長 L_p の抽出
 α : 光吸収係数、 B : 磁束密度 ただしフォトンフラックス Φ が一定の場合

ここで、p型またはn型の一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⁺-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、 Φ :フォトンフラックス、 L_p :少数キャリア(正孔)

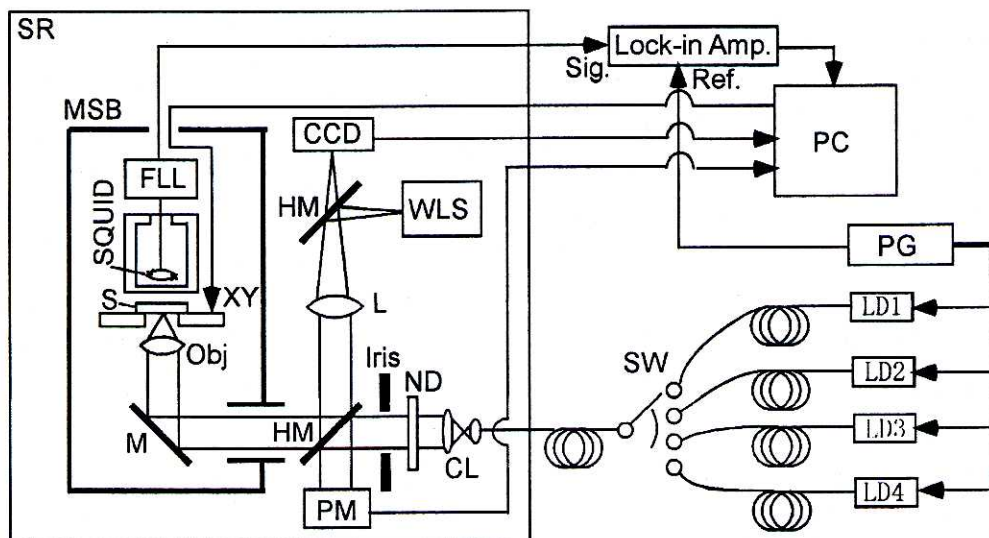


図2 システムブロック図

SR: 電磁シールドルーム、MSB: 磁気シールドボックス、FLL: 磁束ロックループ回路、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

の拡散長, α : 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, フォトンフラックス Φ 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 となることがわかる. シリコンの光吸収係数 α 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.

なお, 筆者らによるこれまでの報告⁶⁾では, 発生する磁場が一定となる時のフォトン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フォトンフラックス側を制御の方が安定性が良い. 本報告ではフォトンフラックスを一定とする方法を用いた.

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 $50 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 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. 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, ピエゾ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⁴⁾ 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. 結果

3. 1 p-n 接合での少数キャリア拡散長計測

図3にフォトン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

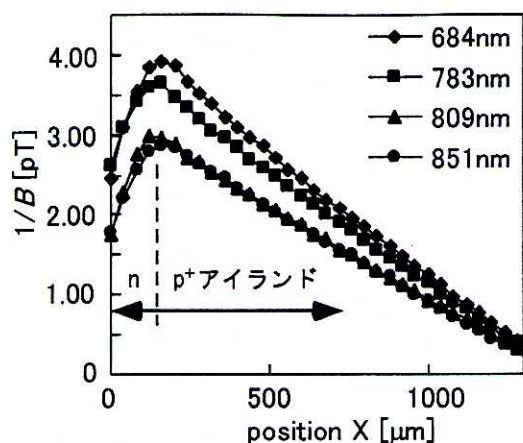


図3 フォトンフラックスを一定とした時の各波長での発生磁場分布

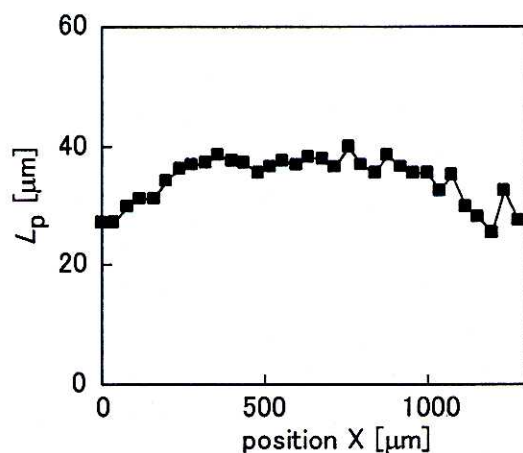


図4 各地点にレーザー照射した時の発生磁場から得られた少数キャリア拡散長

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。p-n接合の深さは $4\mu\text{m}$ であり、少数キャリア拡散長や光進入長よりも浅く、少数キャリアが広い区間で空乏層に到達している。本方法で計測

した結果は、接触式で得られている値 $20\mu\text{m}$ よりも大きい値となった。データを見ると、809nmと851nmがほぼ同じであり、各波長間のノイズフロアの補正など、まだ若干の改良の余地が残っている。また、現状の本システムでは、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である。本実験により、定量的検査を実現するために、多波長励起は有力な手段に成り得ることを示した。

3. 2 多結晶シリコンの結晶粒界の計測

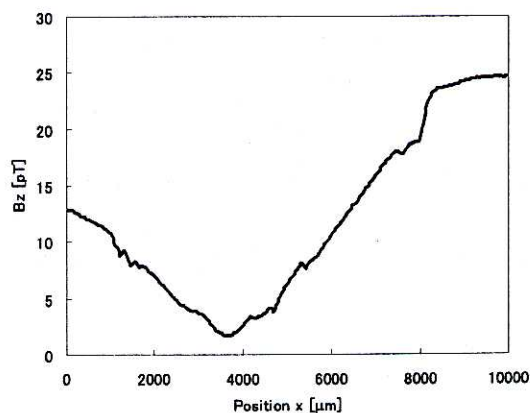


図5 表面にp-n接合を有するキャスト多結晶シリコンの磁場分布

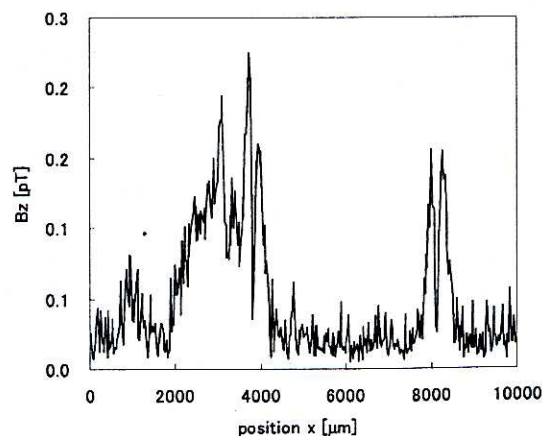


図6 p-n接合の無いキャスト多結晶シリコンの磁場分布

次に、図5に太陽電池用の多結晶シリコンを測定した結果を示す。この試料はキャスト法で製作したものであり、結晶粒のサイズはmmオーダーである。n型基板($N_D=10^{17}$)の表面にp型を形成している。大域的な磁場分布に微分的な磁場変化が認められる。この不連続となっている部分が結晶粒界と考えられる。図6には、表面のp型層が無い別試料の磁場分布を示す。信号強度はp型層がある場合と比較して100分の1程度に減少している。これは人工的に設けたp-n接合が無いために、光電流の駆動源となる空乏層の内部電界が存在しないからである。しかし、多結晶試料が故に結晶粒界では、内部電界や再結合中心が存在し、レーザー照射点からキャリアが等方的に広がらない。そのため、光電流による磁場がキャンセルされず、局所的に磁場変化を生じる。一般的に低不純物濃度のn型シリコンは、接触式で計測しようとしたときにオーミックコンタクトを得るところが困難といった問題がある。そのため、接触式では高濃度層を設ける工程が不可欠であるが、本方法では非接触であるので濃度に依存する前処理等は一切不要である。この点も本方法のメリットである。

4 おわりに

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。少数キャリア拡散長を定量的に評価する目処がたった。また、多結晶シリコンも測定し、電氣的に活性な結晶粒界を検出できた。今後、従来法との相関を調べるために、多様な濃度や構造のサンプルの測定が必要である。ベクトル化や薄肉デュアーを採用すれば、さらに精度やS/N

を向上できるだろう。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 (LSI, 低温ポリシリコン TFT 等) の製造プロセスの途中での検査に好都合である。検査汚染が無いので、検査後に製造ラインに復帰でき、スクラップウェハーが排出されない。本システムは、SQUIDの産業応用を実現する上でも、また半導体産業の効率化にとっても有益と思われる。

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 教授に感謝いたします。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。

参考文献

- 1) 大坊真洋, 小高正, 志子田有光: レーザー励起スクイッド顕微鏡の提案, 2000年秋季第61回応用物理学会学術講演会予稿集, 3p-ZM-14, 210 (2000)
- 2) 大坊真洋, 小高正, 志子田有光: レーザー励起SQUID顕微鏡の開発, 計測自動制御学会第17回センシングフォーラム資料, 227/232 (2000)
- 3) 大坊真洋, 小高正, 志子田有光: レーザー・スクイッド顕微鏡による磁場の画像化, 電気学会センサ・マイクロマシン部門平成12年度総合研究会, PHS-00-28, 65/70 (2000)
- 4) 大坊真洋, 泉田福典, 小高正, 志子田有光: レーザースクイッド顕微鏡による半導体の評価, 岩手県工業技術センター報告, 8, 13/16 (2001)
- 5) Masahiro Daibo, Tadashi Kotaka and Arimitsu Shikoda: Photo-induced Magnetic Field Imaging of p-n Junction using Laser SQUID Microscope, Physica C, 357-360, 1483/1487 (2001)
- 6) Masahiro Daibo, Arimitsu Shikoda and Masahito Yoshizawa: Non-contact Evaluation of Semiconductors using a Laser SQUID Microscope, Physica C (in press)
- 7) J. Beyer, H. Mats, D. Drung and Th. Schurig: Magnetic detection of photogenerated currents in semiconductor wafers using superconducting quantum interference devices, Applied Physics Letters 74-19, 2863/3109 (1999)
- 8) T. Schurig, J. Beyer, D. Drung, F. Ludwig, A. Ludge and H. Riemann: NDE of Semiconductor Samples and Photovoltaic Devices with High Spatial Resolution Utilizing SQUID Photoscanning, IEICE Trans. Electron. E85-C, 665/669 (2002)
- 9) 二川清, 井上彰二: レーザビームとSQUID磁束計を組み合わせた新しい非破壊・非接触チップ検査・解析技術—走査レーザーSQUID顕微鏡—, 電子情報通信学会集積回路研究会資料, 大阪大学 (2000)
- 10) K. Nikawa: Laser-SQUID Microscopy as a Novel Tool for Inspection, Monitoring and Analysis of LSI-Chip-Defects: Nondestructive and Non-electrical-contact Technique, IEICE Trans. Electron. E85-C, 746/751 (2002)