

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**、小高 正***

志子田 有光****

収束したレーザービームによって誘発される磁場を画像化する原理のレーザー SQUID 顕微鏡を製作した。我々のシステムは半導体レーザー、高温超伝導 SQUID マグネトメータ、 piezo 駆動による非磁性セラミクス XY ステージ、ロックインアンプ、ビデオシステム、二重磁気シールド (厚アルミ + パーマロイ) から構成される。厚さ 20mm のアルミ磁気シールド中でマグネトメータが動作可能であった。パーマロイを追加することによる効果は、150Hz で -20dB であった。単結晶シリコンの p-n 接合部の端部で最大の光磁場 B_z (2pT) が計測された。このシステムでは、最小分解能はレーザーのスポットサイズで決定されるので、従来の SQUID 顕微鏡よりも大幅に高い空間分解能で、室温の半導体試料を計測できる。レーザー SQUID 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：スクイド顕微鏡、レーザー、磁気画像

Evaluation of Semiconductors using Laser SQUID Microscope*

DAIBO Masahiro**, IZUMIDA Fukunori**, KOTAKA Tadashi***

and SHIKODA Arimitsu****

We have constructed a laser SQUID microscope for imaging photo-induced magnetic fields by focused laser beam. Our system consists of the following components, a laser diode, a HTS SQUID magnetometer, a piezo driving non-magnetic ceramics x-y stage, a lock-in amplifier, a video system and double layer (thick aluminum + permalloy) magnetic shielding. The magnetometer was able to operate in aluminum magnetic shielding of the thickness of 20mm. By adding the permalloy, -20dB shielding effect was obtained at 150Hz. Maximum photo-magnetic field (B_z) of 2pT was detected at the edge of p-n junction of the single crystal silicon. In this system, the semiconductors at room temperature can be measured in spatial resolution which is drastically higher than the conventional SQUID microscope, because the minimum spatial resolution is determined by the spot size of the laser. The laser SQUID microscope has the possibility of becoming a new tool for evaluation, because it offers noninvasive and non-contact access to semiconductors.

key words: SQUID Microscope, Laser, Magnetic Image

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は最も高感度であり、特に 100pT 以下の計測では優位性が高い。近年、高温超伝導 (HTS) 材料による SQUID の開発が進み、高価な液体ヘリウムによる冷却から脱して、安価な液体窒素による冷却で SQUID を運転することが可能となった。運転コストの問題が解決したため、産業分野でも応用が可能な時期になっている。さて、SQUID と対象物を相対的に走査して、対象物の微弱な磁場分布を計測する SQUID 顕微鏡は、いくつかの興味深い成果をあげている。たとえば集積回路の短絡電流、強磁性材料の可塑性変形領域、厚いアルミ板中のクラック、超伝導体にトラップされた磁束量子などの可視化に活用されている。多くの場合において、磁場の空間分解能は重要である。しかし従来の SQUID 顕微鏡には、空間分解能が低いといった問題があった。一般的に SQUID 顕微鏡の空間分解

能は、SQUID の検出コイル径か、検出コイルと試料の距離のどちらか大きい方で決まる。特に検出コイルと試料の距離を小さくするのは断熱の都合上難しい。Nagaishi らは、室温の試料用向けに、サファイヤ窓を利用して検出コイルと試料までの距離が 1mm の HTS-SQUID 顕微鏡ヘッドの製作に成功している¹⁾。さらなる改良によって数百ミクロン程度まで減少させることが期待できる。しかし 100 μm 以下にすることは、製作上困難であり、また試料と顕微鏡ヘッドを 100 μm 以下に近づけることは取扱上も容易ではない。

そこで我々は、空間分解能を向上させるために、集光したレーザービームを励起信号として用いる方法を提案してきた。その原理は、フォトンエネルギーがバンドギャップよりも大きなレーザー光を半導体に照射すると、電子正孔対が生成され、その光電流が発生する磁場を SQUID で計測するものである。空間分解能は主にレーザースポットのサイズで決まるのでミクロンレベルまで可能

* アクティブセンシングによる高度非破壊センシング (第二報) (公設試共同研究推進事業)

** 電子機械部、*** (株)アオバサイエンス、**** 岩手医科大学教養部

となる。

レーザー SQUID 顕微鏡のコンセプトは独国 PTB の Bayer らが最初である(1999)²⁾。彼らはシールドリングファクターが 10^6 の磁気シールド環境のもとで、2チャンネル低温超伝導 SQUID マグネトメータで Czochralski ウェハールにおける不純物の不均一性を測定している。また、NEC の二川らは LSI の不良解析を目的として HTS-SQUID を用いたレーザー SQUID 顕微鏡を開発している(2000)³⁾。そのシステムは真空中で3層磁気シールドの環境で動作する。

一方、本報告の筆者らは、独立にレーザー SQUID 顕微鏡を開発し、HTS-SQUID グラジオメータ(差動型)を使用し、磁気シールドの無い環境で初めて p-n 接合の光磁気分布の画像化に成功している(2000)⁴⁻⁷⁾。本報告は、これまでの報告の続報として、新たに設置した磁気シールド環境のもとで HTS-SQUID マグネトメータを使用して、シリコンダイオードの p-n 接合を非接触評価した結果について報告する。

2 実験方法

2-1 システム構造と各部の動作

図1にレーザー SQUID 顕微鏡のシステムブロック図を示す。各部の動作を順を追って説明する。半導体レーザー LD (波長 = 640nm) からパルス(デューティー比 50%)で直接変調してレーザー光を出力する。パルスはタイミングジェネレータから供給される。レーザー光はビームエキスパンダーでビーム径を 10mm 程度まで拡大し、アイリスでビーム外形を円形に整える。ハーフミラー HM を透過し、45度 に設置されたミラーで垂直直方向へ導光し対物レンズ(倍率 50 倍、NA0.8)に入射される。レーザー光は対物レンズで集光され半導体試料を励起する。試料は非磁性の XY ステージに搭載される。XY ステージ(京セラ製)はアルミナセラミクスと、ベリリウム銅などの材質から構成され、磁気ノイズの小さいピエゾ超音波モーターで駆動される。位置精度 $0.5 \mu\text{m}$ で 20mm の可動範囲がある。

半導体試料にバンドギャップ以上のエネルギーのレーザー光を照射すると光電流が誘発され、その電流によって磁場が発生する。その磁場を SQUID で計測する。SQUID は YBCO 材料による高温超伝導で構成され、デュアー中で液体窒素(77K)で冷却保持されている。SQUID は DC 型であり、検出コイルはマグネトメータ構成である(Tristan Technology 社製)。素子感度は $1.02\text{nT}/\text{}$ である。

SQUID からの信号は FLL(磁束ロックループ)回路で線形化され、ロックインアンプでレーザーのパルス駆動信号を参照信号として位相検波される。ロックインアンプ内で A/D 変換(16bit)されたのちに、データは GPIB を経由して PC でデータ収集される。対象物の一点の計測を終えると、XY ステージを移動させて走査し、磁気分布を得る。

レーザーの照射位置やレーザー焦点の調整は、半透明ミラー HM で結合されたハロゲンランプによる照明と CCD カメラによって確認しながら行うことができる。

SQUID と XY ステージは内部磁気シールドボックス

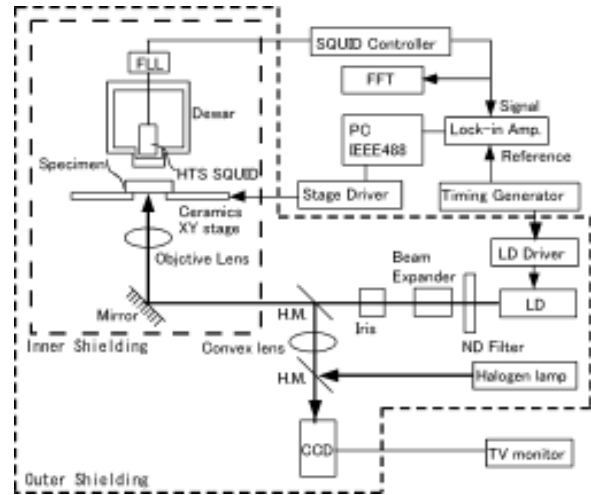


図1 システムブロック図

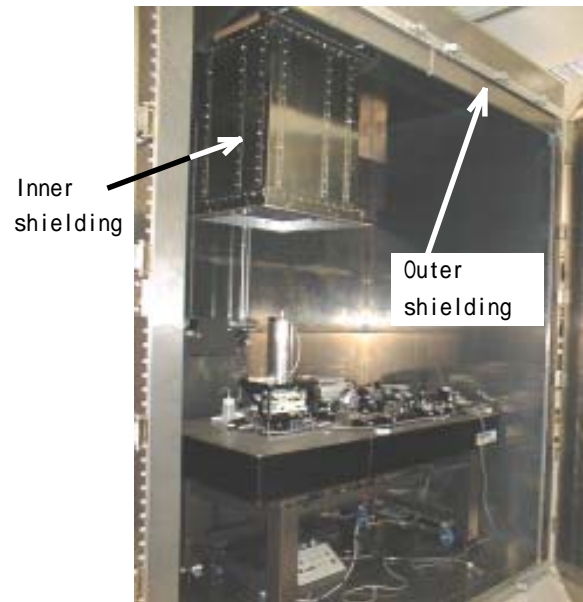


図2 システムの概観

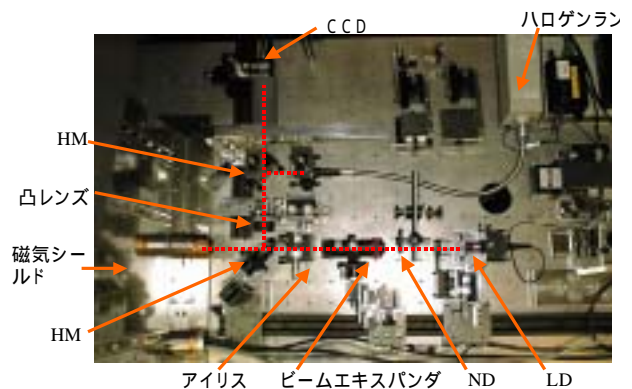


図3 上方からみた光学系のセットアップ

(0.8mm 厚パーマロイ 2 層、5mm 厚アルミ 1 層) で覆われ、低周波成分の磁気シールドが施されている。さらに PC や制御系は、外部磁気シールドルーム(20mm 厚アルミ)の外に配置され、外部から到来する中高周波ノイズを SQUID から遮断している。

図2にシステムの概観を示す。外部磁気シールドルームの扉を開けた状態で撮影した。外形は(W2500, D1500, H2700, t=20mm)であり、内部磁気シールドボックスを上下する機構が内壁に敷設しており、機械的にも頑強である。このルームは光学的な暗室も兼ねている。図2では内部磁気シールドボックスを吊り上げている状態である。内部磁気シールドボックスは、底面が無い長方体でありSQUIDに被せるように降下させて光学定盤に乗せる。その後、外部からの振動を除去するために、上下機構と内部磁気シールドボックスは切り離される。

前回の報告に対して、特に改良した点は、外部磁気シールドルームの新設と光学系である。光学系の振動対策として光学定盤を用いた。位置決め精度の向上のために各光学パーツをレール上に配置し、XYZ等のステージを使って微調整ができるようにした。また、ビームエキスパンダーにより、対物レンズの入射径程度までレーザー光を広げることにより、スポット径を10 μm以下に減少し最小空間分解能を向上させた。

3 結果

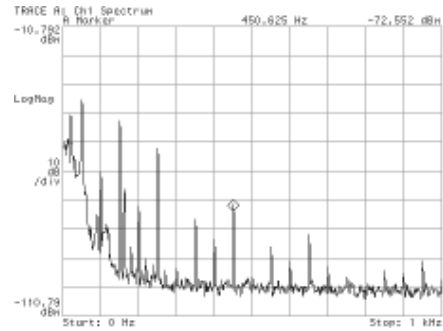
3-1 磁気シールド特性

環境ノイズスペクトルをSQUIDマグネトメータで計測することにより、磁気シールドの遮蔽特性を調べた。図4に測定結果を示す。図4(a)は外部磁気シールドルームのみの特性である。この外部磁気シールドルームは、厚さ20mmのアルミで構成され、渦電流によりシールド効果を発揮する。マグネトメータは外部磁気シールドの外側では大きすぎる外来ノイズにより、まったく動作できなかったが、内側ではFLLが動作し計測が可能であった。この結果は、高価なパーマロイを大量に使用しなくても、厚いアルミで高温超伝導SQUIDマグネトメータが動作可能な磁場環境を実現できることの実証となった。アルミの抵抗率 $\rho = 5.9 \text{ m}\Omega/\text{m}$ で計算すると表皮深さが20mmとなる周波数は $f_c = 374 \text{ Hz}$ となる。SQUIDグラジオメータによる外部磁気シールドの有無によるノイズ比較では350Hzで-15dBのシールド効果が実測された。

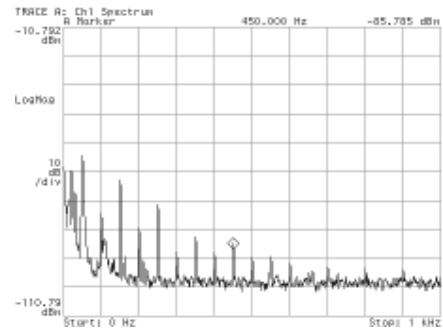
図4(b)は、さらに内部磁気シールドボックスを被せた場合のノイズスペクトルである。内部磁気シールドボックスはパーマロイを使用している。(a)の場合よりも明らかに低周波側のノイズが低減している。(c)は50Hzの高調波成分を(a)と(b)で比較したグラフである。内部磁気シールドボックスにより150, 250Hzで-20dBのシールド効果が確認された。

3-2 半導体サンプルの測定

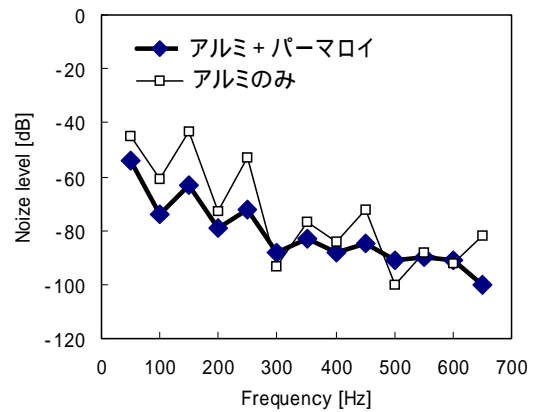
シリコン単結晶ウェハーに設けられたp-n接合をレーザーSQUID顕微鏡で計測した。測定試料の構造を図5に示す(半導体メーカー提供)。n/n+のエピタキシャル基板で、n型エピタキシャル層の不純物濃度 $N_D = 6 \times 10^{14} [\text{cm}^{-3}]$ 、エピタキシャル厚23 ~ 27 [μm]である。この基板にホウ素をイオン打ち込みしてp型ウェルを形成している。p型ウェルの不純物濃度は $N_A = 1 \times 10^{19} [\text{cm}^{-3}]$ であり、接合深さは5 [μm]である。p型ウェルのサイズは2640 × 2640 [μm]で、隣接するp型ウェルとの間隔は560 [μm]



(a)



(b)



(c)

図4 シールドルームのノイズ遮蔽特性

(a) 外部磁気シールドルーム (Al (t = 20mm)、1層) のみ場合、H: 100Hz/div, V: 10dB/div、(b) 外部磁気シールドルームに内部磁気シールドボックス (Al (t = 5mm, 1層) + パーマロイ (t = 0.8mm, 2層)) を加えて2重シールドとした場合、(c) 50Hzの高調波のノイズ強度の比較。

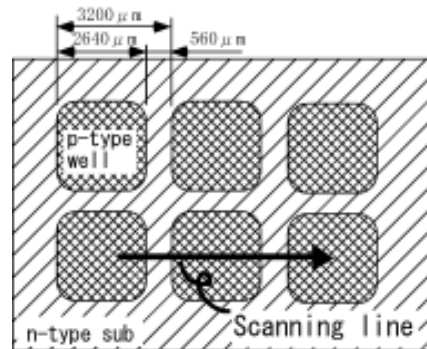


図5 計測したp-n接合セルの構造
太矢印に沿って直線的にスキャンした。

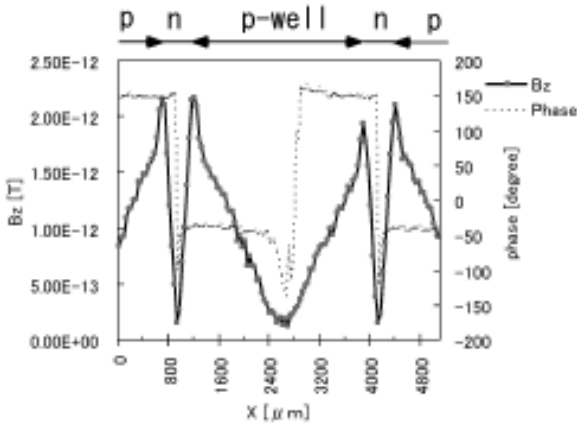


図6 p-n接合から発生した光磁場分布
実線は垂直方向の磁束密度、破線はレーザーと発生磁場の位相差

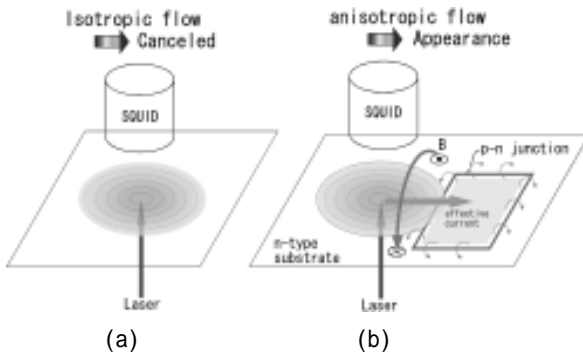


図7 開放回路のp-n接合にレーザーを照射した場合の電流経路の考察 (a)等方的に広がる場合、(b)少数キャリア拡散長内にp-n接合が存在し非等方的になる場合。

である。p型ウェルを横断するようにレーザー照射位置を直線状に移動させて、発生磁束と、レーザーと発生磁束の位相差を測定した。測定結果を図6に示す。走査した照射位置の間隔は40[μm]である。まず、発生磁束Bz(磁束方向は基板に垂直方向)をみると、p-n接合の境界部分で最大の磁束が発生している。これはp-n接合のサイドウォールの存在によりp-n接合の有効面積が広いことと、空乏層の電界によりドリフト電流成分がある為と考えられる。n型領域に向かうにつれて発生磁場が急激に減少しているが、これは少数キャリア(正孔)の再結合による減衰と考えられる。この減衰カーブのピークから磁束が1/eとなる距離は170μmであった。この距離は少数キャリア(正孔)の拡散長と関連があると推定されるが、他の方法で得られた値(20~50μm)よりも大きい値となった。

位相をみると、位相と電流の方向が対応していることがわかる。X軸上でホールが正方向へ流れる時は負位相となっている。

電流経路について図7を用いて考察する。少数キャリアはp-n接合の外側では拡散し、p-n接合に到達すると、ドリフトした後にウェル内に入りp-n接合を弱く順バイアスする。そして再注入が起こり再結合によって過剰キャリアが消滅する。図7(a)の様に対称位置に照射さ

れる場合は、過剰キャリアが等方的に広がり、発生磁束がキャンセルされる。これはp-well中央部でも磁束密度が減少している実験結果と一致する。一方、図7(b)のようにp-n接合の構造に対して左右対称でない位置にレーザーが照射される場合には、空間的に実効的な電流の偏りが生じ、磁束が検出される。

この考察から、正確な定量化のためには、今後、電流のリターンパスによる発生磁束を考慮したモデリングの構築と、磁束のベクトル計測が必要と思われる。

4 結 論

レーザー光を半導体に照射し、誘発される光磁場をSQUIDで計測する原理のレーザーSQUID顕微鏡を製作した。また、外来ノイズを減衰させる磁気シールド環境を構築した。前報告では磁気勾配を計測するグラジオメーターによるシステムであったが、今回磁束を直接計測できるマグネトメータによるシステムを実現した。シリコンのp-n接合から発生する光磁場を計測した結果、p-n接合境界で最大になり、少数キャリアの再結合領域では接合から距離が離れるにつれて急激に減衰すること、ウェル中央部では光電流が等方的になり光磁場がキャンセルされることがわかった。このシステムは開放回路の状態で電流を計測できるので、非接触で再結合電流を評価する装置として有望と考えられる。

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 教授に感謝申し上げます。なお、本研究は中小企業庁地域活性化連携促進事業補助金技術開発研究事業と、一部 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) T. Nagaishi and H. Itozaki, Supercond. Sci. Technol. **12**, 1039 (1999)
- 2) J. Beyer, H. Mats, D. Drung and Th. Schurig, Applied Physics Letters **74-19**, 2863 (1999)
- 3) K. Nikawa and S. Inoue, Technical Report of IEICE, Osaka, **ICD2000-174**, 1 (2000)
- 4) 大坊真洋, 小高正, 志子田有光, 2000年秋季第61回応用物理学学会学術講演会講演予稿集, **3p-ZM-14**, 210 (2000)
- 5) 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)
- 6) 大坊真洋, 小高正, 志子田有光, 電気学会センサ・マイクロマシン部門平成12年度総合研究会, **PHS-00-28**, 65 (2000)
- 7) M. Daibo, T. Kotaka and A. Shikoda, The 13th Int. Symp. on Superconductivity (ISS2000), Tokyo, **EDP-3**, 230 (2000)