

# レーザー SQUID 顕微鏡の開発と半導体検査への応用

大坊真洋\*・菊地利雄\*\*

## Development of Laser SQUID Microscope and Application for Non-contacting Evaluation of Semiconductor

Masahiro Daibo\*・Toshio Kikuchi\*\*

**Abstract:** We developed laser SQUID microscope that consists of a high temperature superconductor SQUID magnetometer and a laser diodes. SQUID detect photogenerated magnetic signals on semiconductors with an amplitude of several hundred femto-tesla. The relationship between the photogenerated magnetic fields and the wavelengths of the excitation light was investigated and the minority carrier diffusion length was obtained for p-n junction structure. The results were found to be in good agreement with those obtained using the probe contacting method. We also demonstrated grain boundary measurement for poly-crystal silicon. The laser SQUID microscope can enable a truly non-contacting and contamination free test of equipment with a high special resolution, and can enable testers to make quantitative evaluations. The laser SQUID method can be used to take immediate measurements without any required pretreatment. These features make this method very advantageous for monitoring the semiconductor process.

**Keywords:** SQUID, laser, nondestructive testing, semiconductor, carrier diffusion length

### 1. はじめに

#### 1.1 SQUID による計測の現状

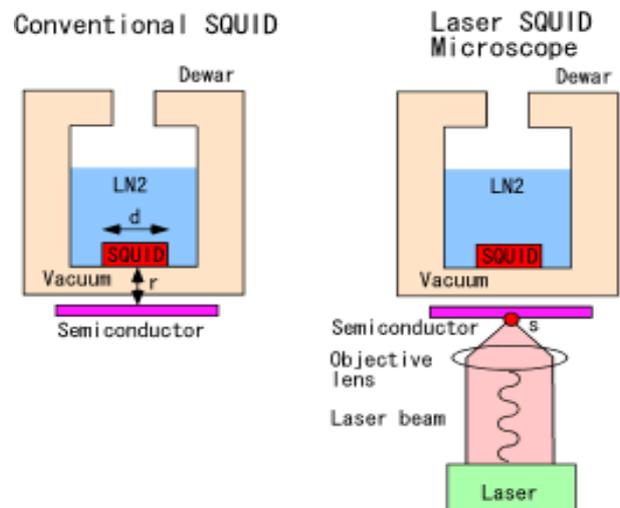
SQUID (Superconducting QUantum Interference Device: 超伝導量子干渉素子) は、現存する磁気センサーの中で最も高い磁気感度 (高温超伝導 SQUID で 100fT 以下) を有するので、微弱な電磁気現象を計測する時には、非常に魅力的なセンサーである。磁気分布は、対象内部の不可視な現象を反映する場合があります。磁気計測は様々な診断や検査に有用である。

微弱で微細な磁場分布を画像化するために SQUID 顕微鏡が開発されており、材料研究や非破壊検査の研究に使用されている。SQUID 顕微鏡には、対象物の置かれる状態 (温度、真空中) によって、構造が異なる 2 種類がある。

一つは、低温で真空中に置かれた対象物を検査対象としたものであり、SQUID と対象物は、ほぼ接触状態まで近接して配置される。冷却された対象物でないとは適用できないが、例えば超伝導材料などの観察には適している。このような SQUID 顕微鏡では、 $10\mu\text{m}$  以下の空間分解能が実現されている。

もう一つは、Fig. 1 のように室温 (高温) で大気中に置かれたものを対象としたものである。対象物と SQUID は真空中により熱的に絶縁されている。室温の対象物を計測しようとした時、高い磁気感度を保ったまま SQUID 顕微鏡の空間分解能を高くすることは困難である。一般に SQUID 顕微鏡の空間分

解能は、SQUID の受感部のサイズ  $d$  か、SQUID と対象物の距離  $r$  の、いずれが大きいかで決まる。空間分解能が高くない主因は、超伝導状態を維持する断熱領域に要する距離である。最近では、サファイヤ窓と伝導冷却を使った薄底の断熱容器が開発され、磁場分布の空間分解能として数十 ~  $100\mu\text{m}$  以下が実現されている。しかしながら、デュア冷却時の熱伸縮や大気圧の影響があるので、SQUID とサファイヤ窓間の距離 (真空断熱距離) を微調整しなければならず、使い勝手はあまり良くない。また、サファイヤ窓と室温対象物を近接させるのも、操作上それほど簡単ではない。空間分解能を向上させるためには  $r$  を小さくすると共に、 $d$  も小さくする必要がある。



**Fig. 1** Comparison between conventional SQUID and Laser SQUID Microscope. The minimum spatial resolution is determined by laser spot size for laser SQUID microscope.

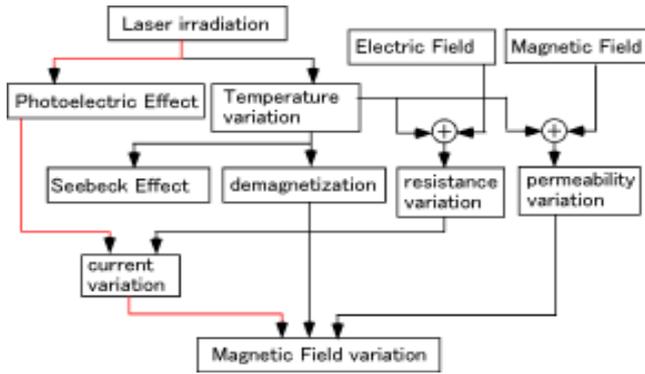
\* 岩手大学工学部電気電子工学科 盛岡市上田 4-3-5

\*\* 岩手県工業技術センター

\* Electrical and Electronic Engineering Department, Faculty of Engineering, Iwate University.

\*\* Electronics and Mechanics Division, Iwate Industrial Research Institute.

(Received January 29, 2003)

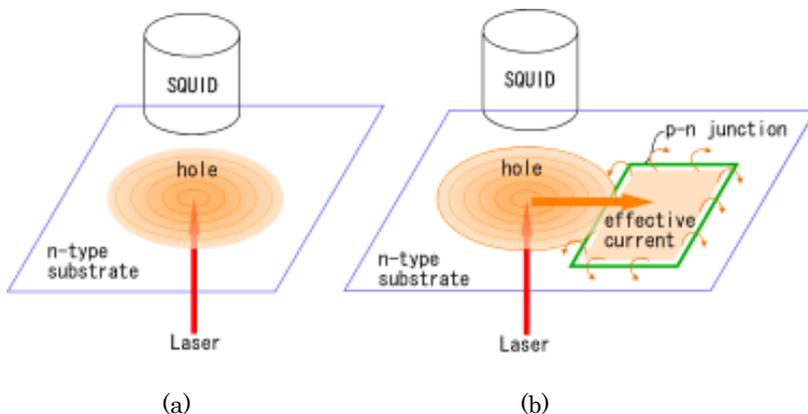


**Fig. 2** Possible mechanism of photo induced magnetic field. The red traced route is demonstrated in this paper.

る。しかしながら、 $d$ を小さくすると磁気感度が低下してしまいSQUIDの長所が失われてしまう。そのため、 $d$ が大きいままで空間分解能を向上させる方法が必要である。産業分野でSQUIDを応用する場合、ほとんどの対象物は室温で大気中の置かれた状態にあると予想される。室温の対象物に対して空間分解能が低いという短所（他に、冷却および磁気シールドの必要性が加わる）が、SQUID顕微鏡を適用できる対象範囲を制限している一因となっている。半導体の検査に使えるようなマイクロ・メートルレベルの分解能まで改善するには、なんらかのブレークスルーが必要と考えられる。

### 1.2 レーザーとSQUIDの組合せ

そこで、我々はFig. 1(b)のように、レーザー光照射により微小領域に磁場の变化を誘発させ、その磁場をSQUIDで高感度に計測する原理のレーザー-SQUID顕微鏡の開発を進めてきた<sup>1-5)</sup>。レーザー照射により、磁場が変化するような特性を持った対象物でなければならないという制限はあるが、レーザー光のスポットサイズ $s$ は容易にマイクロメートルオーダーにできるので、これにより空間分解能を大幅に改善することができる。空間分解能は光の集光性を利用して向上させ、SQUIDのサイズ $d$ は大きいままで高感度を維持するのがコンセ



**Fig. 3** Magnetic field caused by photo-generated excess carriers. (a) without internal electric field such as p-n junction or inhomogeneous impurity distribution or grain boundary, (b) with p-n junction.

プトである。レーザー光はSQUIDと非常に相性が良い。なぜなら信号を誘発させる励起信号としているレーザー光そのものは、SQUIDが検出する低周波の磁場を発生しない。そのためSQUIDのような超高感度のセンサーであってもS/N比が高い状態で測定が可能となる。

Fig. 2に、レーザーを対象物に照射して、磁場が誘発されると考えられる幾つかのメカニズムをまとめた。大きく分類すると、熱を介在しないものと、介在するものとに分けられる。半導体のような光電効果を有し、光から直接的に電流（磁場）を発生できるもの（同図で赤線で示した経路）は、前者である。本論文で述べるのは、この部分に限定するが、熱を介在する方法では多様な応用（例えばレーザーアニール、溶接の計測制御など）がありえる。

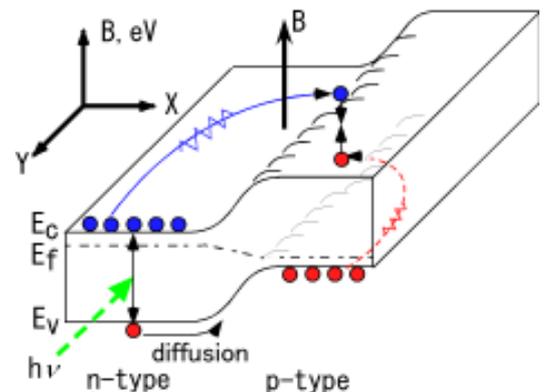
さて、レーザーとSQUIDの組合せによる研究は、我々を含めて3つの機関で独立に進められている。PTBのSchurig<sup>6,7)</sup>らの発表が最初である。NECの二川<sup>8,9,10)</sup>らのグループでは、LSIの配線検査にこれを応用する研究を進めており、レーザーとSQUIDの組み合わせによって、半導体が、SQUIDの産業的応用のターゲットになりつつある。

レーザー-SQUID顕微鏡を半導体に応用した場合、次のような特徴が挙げられる。

- 磁場を発生する電流の生成領域が、レーザースポットサイズ+拡散長程度に限定できるため、レーザースポットの位置でマッピングすれば走査型顕微鏡としての画像が得られ、SQUIDの低空間分解能を補うことができる。
- 光で励起して、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。
- 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。

### 1.3 半導体からの磁場発生

半導体にバンドギャップ以上のフォトンエネルギーを有するレーザー光を照射すると、電子および正孔が生成される。Fig. 3(a)のように半導体が一均一で、内部電界（例えばp-n接合、不純物濃度のゆらぎ、結晶粒界等）が存在しなければ、少



**Fig. 4** Band diagram of p-n junction and magnetic field under the photo illumination.

数キャリア（例えばn型半導体中の正孔）は、拡散によって等方的に広がる。この場合、磁場は互いにキャンセルされる。もし Fig. 3(b)のように少数キャリアの拡散長以内に内部電界が存在すると、空乏層へ到達した少数キャリアは電界で加速され反対の型の領域に広がる。そのため、電流の分布が等方的でなくなり、磁場がキャンセルされず外部に発現する。

この状態をエネルギーバンド図にするとFig. 4のようになる。測定サンプルは電氣的にどこにも接続されていないので、電流は外部に流出することができない。空乏層の電界に捕らわれてp型領域に入った正孔はp型領域に蓄積する。このとき、p-n接合と平行に弱い電界が生じる。多数キャリアの蓄積によって、p-n接合が順バイアスされ、正孔は、n型領域に再注入される。注入された正孔は、電子と再結合することによって、電流が閉ループとなる。結果的には反時計回りの電流が還流し、特定の方向（表示の都合上、電子のエネルギー軸と磁場の軸を重ね合わせている）に磁場が発生する。

これまでの我々が報告したのものには、磁気シールドの無い条件で、高温超伝導SQUIDグラジオメータ（差動型コイル）を用い、p-n接合の画像化を行った報告がある<sup>4)</sup>。さらに、磁気シールド中でSQUIDマグネトメータを用い、異なる2波長のレーザー光で光電流を発生させ、一定磁場を発生する時の光束量を計測して、少数キャリアの拡散長を見積もった報告がある<sup>5)</sup>。本論文では、単結晶シリコンサンプルに対し、レーザー光を4波長に拡張して、少数キャリア拡散長を定量的に計測した結果について述べる。さらに多結晶シリコンの結晶粒界における磁場分布計測結果についても報告する。

## 2. 光電流磁場とキャリア拡散長の抽出

p-n接合に光を照射した時の電流 $J$ は式(1)で表される<sup>11)</sup>。

$$J = q(1-R)\phi \exp(-\alpha d) \left( \frac{L_p}{L_p + 1/\alpha} + \frac{L_n}{L_n + 1/\alpha} \right) \quad (1)$$

ここで、p型またはn型の一方向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型の濃度が高くp層の厚みが薄いp-n接合とする。

$$J = q(1-R)\phi \exp(-\alpha d) \frac{L_p}{L_p + 1/\alpha} \quad (2)$$

ここで $q$ :素電荷、 $R$ :反射率、 $\phi$ :フォトンフラックス、 $L_p$ :少数キャリア（正孔）の拡散長、 $\alpha$ :光吸収係数、 $d$ :空乏層厚さである。

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、 $C$ を比例係数として $B=CJ$ で表される。そして右辺、左辺のそれぞれ逆数にすると式(3)の関係となる。

$$\frac{1}{B} = C_0 (L_p + 1/\alpha) \quad (3)$$

但し、 $C_0 = 1/C(q(1-R)\phi L_p \exp(-\alpha d))$ であり、 $C_0$ を一定とする

ために、 $\exp(-\alpha d)$ に応じて $\phi$ を調整する。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。式(3)は、Y軸を $1/B$ 、X軸を $1/\alpha$ とすると、直線状のグラフになり、X軸の切片の符号を反対にした値が $L_p$ となることがわかる。シリコンの光吸収係数 $\alpha$ は、波長依存性があるので、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。

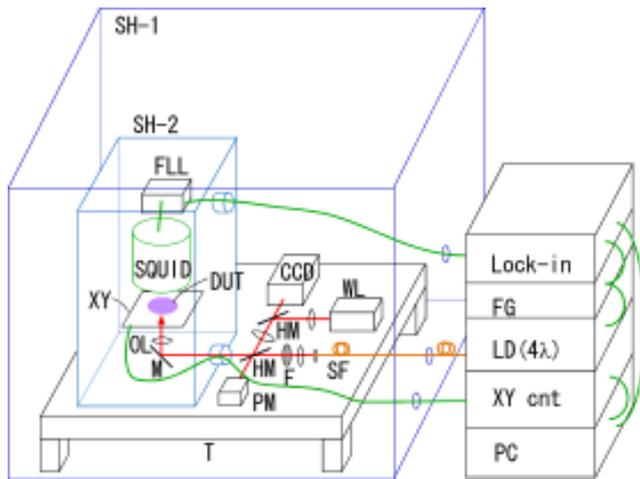
## 3. 実験

製作したレーザーSQUID顕微鏡装置についてFig. 5のシステムブロック図と、Photo 1およびPhoto 2を用いて説明する。半導体レーザーLDには、波長 $\lambda$ が684, 783, 809, 851nmの4種類を用いた。半導体レーザーは、ペルチェ素子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。試料に照射されるレーザー光のパワーは各波長共2mW程度である。半導体レーザーは、磁気シールドボックスSH-2及び、電磁シールドルームSH-1の外に配置し、レーザー光をシングルモード光ファイバーSF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。半導体レーザーをデューティー比50%、周波数3kHzで直接変調した状態で、レーザー光を遮光板で遮った時のノイズレベルは、検波帯域幅0.25Hzの条件で、170fT/Hz<sup>(1/2)</sup>であった。レーザー光を変調することにより、ロックインアンプ(Lock-in)を用いて低ノイズで狭帯域検出し、微弱信号を検出した。レーザーの駆動電流を変化させて光束量を制御すると、ノイズレベルも若干変化するので、光束量はNDフィルターFで光学的に調整した。光ファイバーの先端に接続したコリメータレンズでレーザー光を平行光に調整し、倍率50倍、N.A. 0.8の対物レンズOLで試料表面に集光した。スポットサイズは20 $\mu$ mが得られている。光学部は所謂、倒立顕微鏡の構成となっており、ピント調整や試料表面の光学観察は、CCDカメラで随時行うことができる。

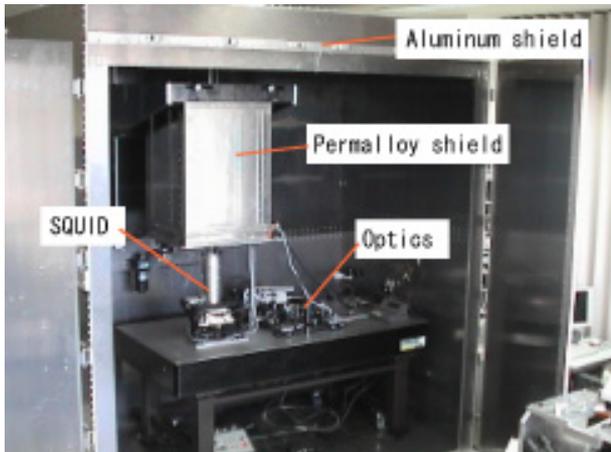
レーザー照射位置の走査は、試料を移動させて行った。試料を移動させるステージ（京セラ製）の主構成材料はセラミクスであり、 piezoelectricアクチュエータで駆動して、磁気ノイズが最小になるようにしている。フルストローク（20mm）量を移動させても、FLL（磁束ロックループ）のロックが外れることはない。サーボ制御により0.2 $\mu$ mの位置合わせ精度を実現している。

SQUID(Tristan Technology社製)は、高温超伝導体(YBCO)であり液体窒素に浸して冷却するタイプである。SQUIDとレーザースポット間の距離は、約10.2mmであり、SQUIDのサイズは8mmである。磁気感度のある方向 $B_z$ は、試料に対して垂直な方向である。

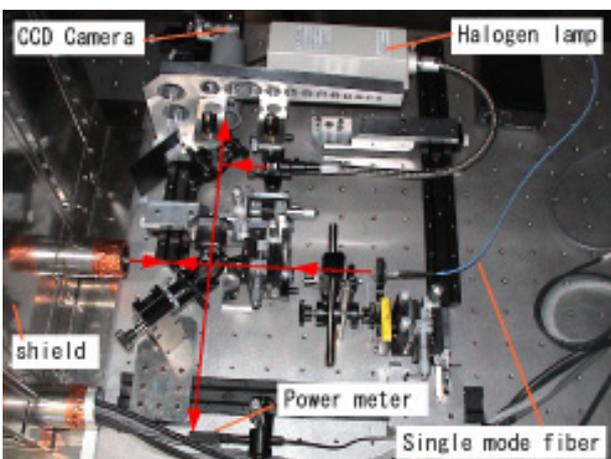
磁気シールド環境は、厚さ $t=0.8$ mmのパーマロイ2層と $t=5$ mmのアルミニウムから構成される磁気シールドボックスSH-2(シールド率-20dB@150Hz)と、厚さ $t=20$ mmのアルミニウム製の電磁シールドルームSH-1の2重構成となっている。アルミニウムだけでも、厚みが20mmもあると、比較的低周波までシールド効果がある。アクティブ計測の場合、ロックが外れない限り、信号検出が可能なので、生体計測のような厳重



**Fig. 5** Diagram of a multi-wavelength laser SQUID microscope. LD: laser diode, SF: single mode fiber, F: neutral density filter, HM: half mirror, M: mirror, PM: optical power meter, WL: halogen lamp, OL: objective lens, XY: ceramic X-Y stage, XY cnt.: XY stage controller, FG: function generator, DUT: silicon wafer, FLL: Flux Locked Loop, CCD: Charge-Coupled Device camera, PC: Personal Computer, SH-1: electromagnetically shielded room (aluminum), SH-2: magnetically shielded box (double layer permalloy).



**Photo 1** Overview of experimental setup.



**Photo 2** Optical part setup.

なシールドは不要であり、このような簡易シールドでも十分である。

## 4. 結果

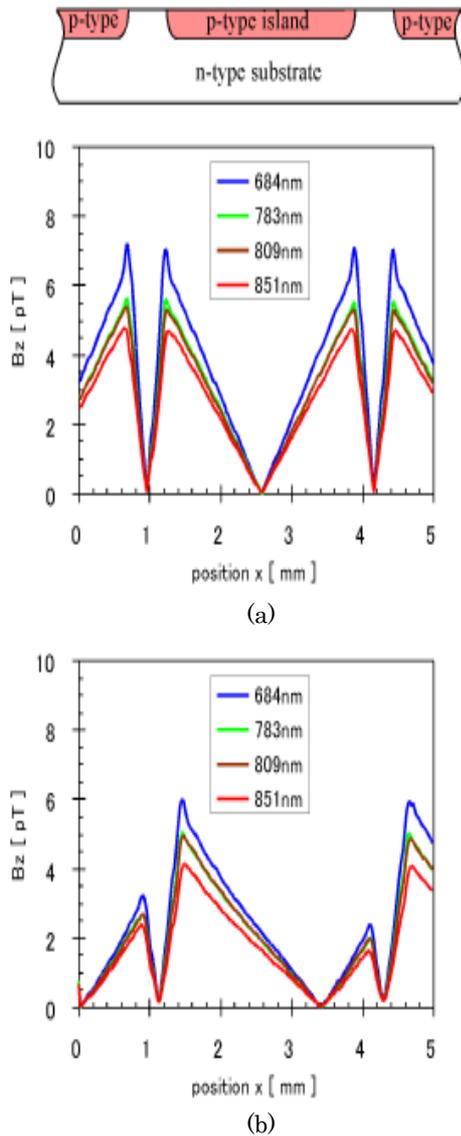
### 4.1 p-n接合を有する単結晶シリコン

Fig. 6にp-n接合を有する単結晶シリコン試料の磁場分布の波長依存性を示す。レーザー照射位置を $20\mu\text{m}$ 毎に移動させて1波長あたり250サンプル点を測定した。試料は、プレーナー型のダイオード構造( $p^+/n$ )であり、 $p$ 型アイランドが周期的に配置されたものである。この一つのアイランドを横切るように直線的にスキャンした。Fig.6(a)は、sample-1であり $n$ 型の不純物濃度が $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ である。Fig.6 (b)はsample-2であり、 $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ である。 $p$ 型アイランドの不純物濃度はいずれのサンプルも $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ であり、接合深さは $4\mu\text{m}$ である。空乏層厚さ $d$ は、SRP(Spreading Resistance Profiling method)の測定結果により、 $1\mu\text{m}$ と仮定した。縦軸の磁束密度 $B_z$ 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。 $B_z$ が極大となる場所(図中で4箇所)がp-n接合の側壁部である。Fig. 6(a)の磁場分布をみると、 $p$ 型アイランドの両端で磁場が最大となり、中央部で最小となっている。この傾向は全てのサンプルに当てはまった。特に、短波長側の $684\text{nm}$ の磁場分布(青線)には、p-n接合の側壁部で鋭いピークが現れた。

Fig.6(a)では左右ほぼ対称となっている典型的な磁場分布を示したが、Fig.6(b)のように左右が非対称となるチップも数割の割合で存在する。このようなチップは、チップ内の何らかの要因(例えば、不純物濃度勾配、拡散電位差など)により、電流分布が非対称になっていると思われる。単純な接触式の計測ではチップ全体の平均値しか測定できないので、このようなチップ内の分布に関する情報は、従来の測定方法では得られない。本レーザー SQUID 法ならば、同一アイランド内部の分布も計測できることが分る。

さて、分布を計測できることは良いが、多点の測定には時間を有する。我々の実験では、ステージを移動させてから、ロックインアンプの値が定常的な状態になるまで、およそ2秒程度の時間を必要とする。そこで、レーザーの波長を切り替えて、磁場のレーザー波長依存性を利用する。この効果を利用して、式(3)の関係により少数キャリアの拡散長を算出した。

Fig. 7は不純物濃度が異なる2種類のサンプルの $1/B$ と $1/\alpha$ の関係を図示したものである。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。4つの波長について、それらの関係が直線状になり、そのX切片( $1/\alpha$ 軸)が拡散長を示していることを確認できる。磁場の大きさが異なる4箇所(それぞれのサンプルで4本の直線に対応)は、いずれも一定の拡散長に収束している。すなわち、波長を変化させて測定すれば、p-n接合の空間的な分布を測定しなくても、一点の測定だけで、キャリア拡散長の測定が可能であることがわかる。Fig.8にはこのようにして算出した、全測定点での拡散長分布を示した。波長依存性を使うと、グローバルな磁場分

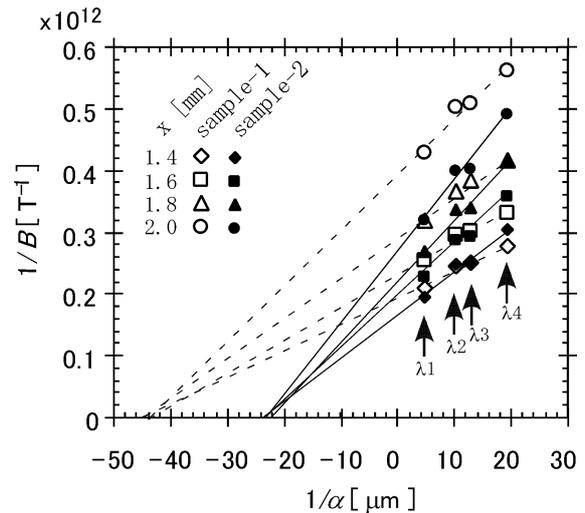


**Fig. 6** Photogenerated magnetic fields as a function of the illumination position for different laser diode wavelengths. (a) sample-1 whose concentration of n-type substrate is  $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , (b) sample-2,  $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ .

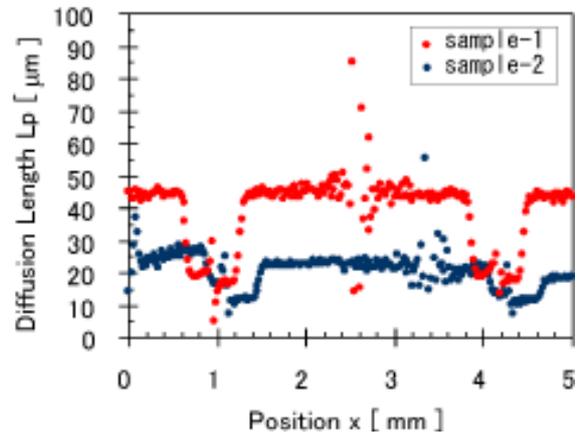
布のシフトに影響されずに、安定に少数キャリア拡散長を抽出できることがわかる。p-n接合が存在するp型アイランド上にレーザーを照射すれば S/Nが極端に悪化する磁場が最小となる領域を除いて、一定の拡散長が得られている。これにより、高速で定量的な計測が可能になる。試料は基板の不純物濃度の異なる2種類であり、不純物濃度の低いSample-1 ( $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ )では長い拡散長 ( $44 \mu\text{m}$ )、不純物濃度の高いSample-2 ( $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ )では短い拡散長 ( $23 \mu\text{m}$ )が得られた。これらの値は、接触式のSRP (Spreading Resistance Profiling) 法で得られた値と良く一致した。

#### 4.2 多結晶シリコン

太陽電池で多用される多結晶シリコンの結晶粒界には内部電界が存在しており、光照射した場合にはp-nと同様に、光電流の駆動源となる。またそれと同時に、キャリアの再結合



**Fig. 7** Plot of  $1/B$  versus  $1/\alpha$ . The intercept with the  $1/\alpha$  axis corresponds to the diffusion length  $L_p$ .  $\lambda_1=684$ ,  $\lambda_2=783$ ,  $\lambda_3=809$ ,  $\lambda_4=851$  [nm].



**Fig. 8** Distribution of estimated minority carrier diffusion length.

領域となる場合もあり、不均一な光電流分布となる。結晶粒界は、太陽電池の性能を劣化させており、これを評価することは重要である。通常、結晶粒界は光学的にも観察可能である。しかしながら、全ての結晶粒界が電気的特性を劣化させるのではなく、存在していても電気的には不活性で問題のない場合もある。したがって、電気的な結晶粒界を評価するのが好ましい。Fig. 9に多結晶シリコンサンプルの磁場分布を測定した結果を示す。試料は、p型基板の表面全体にn型を設けた構造となっている。試料外周部で磁場が大きくなるグローバルな磁場分布の中に、局所的に不連続な部分がある。この部分が結晶粒界と考えられる。

### 5. 考察

#### 5.1 開放回路中での光電流と磁場

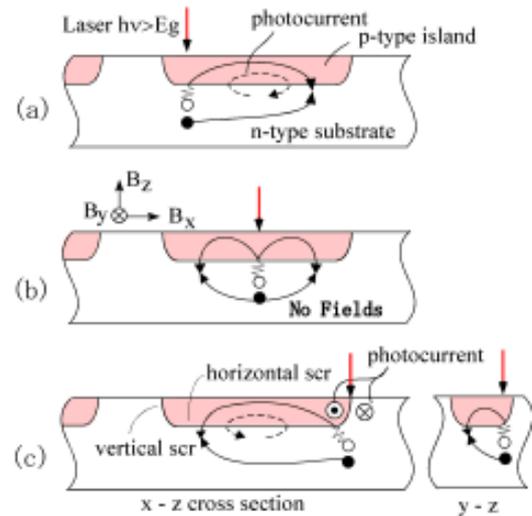
Fig. 10の試料断面図により、サンプル中での光電流と磁場の関係を考察する。例えばFig. 10(a)のように、アイランドの左側にレーザー光を照射した場合を考える。使用したレー



**Fig. 9** Magnetic field distribution of multi-crystal silicon solar cell.

レーザー光のシリコン中での侵入長は $4\mu\text{m}$ 以上あるので、p型アイランド底部のp-n接合まで光が到達している。n型基板中の少数キャリアである正孔のうち、空乏層までの距離が拡散長よりも短い位置にある正孔は、空乏層の内部電界に捕らわれてp型アイランド側へ送り込まれる。p型アイランド側は不純物濃度が高いので、その少数キャリアである電子はすぐに再結合し、磁場発生にはほとんど寄与しない。そしてレーザー光が照射されている部分の、n型基板側はわずかにマイナスに、p型アイランド側はプラスにバイアスされる。その結果、ラテラル方向へバイアスが発生し、それぞれの多数キャリアは、右側にドリフトする。試料は外部に電気的に接続されていないので、キャリアは外に出ることができず、結果的にp-n接合は順方向にバイアスされて、過剰に蓄積した多数キャリアは反対の型の方へ注入される。注入される場所は、接合全体に分布するが、特に拡散電位差が低い部分（不純物濃度差が小さい部分）や、欠陥部があれば、その部分で電流密度が上昇する。そして、再結合が起こり電流の閉ループとなる。この場合、時計回りの電流が発生し、紙面の手前から向こう側へ向かう磁場が発生する。

Fig. 10(b)のようにp型アイランドの中央にレーザー照射した場合には、電流分布が左右対称となり、磁場はキャンセルされて極小となる。



**Fig.10** Direction of the photocurrent corresponding to the photo illumination point. A white circle is hole, and a black circle is electron. (a) left side of p-type island, (b) center, (c) right and far side, just on the vertical scr.

Fig. 10(c)のようにp型アイランドの側壁部にレーザーを照射した場合には、側壁に沿って（紙面に垂直方向へ）電流が流れる経路が生じる。そのため、基板に垂直方向の磁場が発生する。アイランドの側壁部では、側壁に沿って流れる光電流による磁場が、SQUIDの感受方向（基板に垂直方向）と一致するので、この成分が信号に加わり、ピークが現れる。特に短波長側（ $\lambda=684\text{nm}$ ）では、レーザー光の進入長がアイランド深さと同程度になるので、この効果が顕著である。波長が長くなると、アイランドよりも深いところまでレーザー光が進入するので（ $\lambda=851\text{nm}$ の場合約 $20\mu\text{m}$ ）、深いところで発生するキャリアの比率が増え、側壁部での信号ピークが目立たなくなる。また、アイランドの中央部にレーザーを照射した場合には、電流方向が対称となるので、磁場がキャンセルされて極小となる。

位相検波では振幅成分と位相成分が測定できるが、位相成分は磁場の方向を反映している。実験結果ではサンプル中央付近（磁場が極小となる場所）で位相の極性が反転した。電流の方向を推定するには、厳密にはベクトル計測が必要となるが、上記の考察と実験結果は一致している。

**Table 1.** Classification of semiconductor evaluation methods that utilize light or electron beam.

Method	Excitation Energy	Measurement	requirements
Photoconductance Decay	light	conductivity	2 terminal
Short-Circuit Current Decay	light	current	2 terminal
Open-Circuit Voltage Decay	light	current	2 terminal
Electron Beam Induced Current	electron	current	2 terminal, vacuum
Light Beam Induced Current	light	current	2 terminal
Surface Photovoltage	light	voltage, capacitance	1 terminal
Laser SQUID Microscope (our proposal)	light	magnetic field	no terminal

## 5.2 他の検査方法との比較

謝 辞

半導体にビーム（光，電子線）を照射して，それに誘発される物理量を計測する方法は，これまで様々な方法が開発されている．Table 1に，レーザー-SQUID法を含めて分類し，比較した．最も多いのは，光を照射して，電流を計測することを原理とする方法である．その場合，試料には電流を計測するために，最低でも2端子の電極を接続する必要がある．Surface Photovoltage法では，静電容量で結合した電極で，光照射による半導体表面の電位変化を計測する．これは一見すると非接触的ではあるが，実際は反対側（裏面）に電極が1つ必要であり，非接触とはいえない．通常，電極を接続するためには，金属や電解質を接触させるなどの方法を用いるが，この場合，表面に微小な傷を残すだけでなく，金属等のイオンによる汚染を引き起こす．そのため，採取による破壊検査となり，現物を検査してラインに戻すようなことは不可能である．半導体ウエハの大口径化（12インチ）に伴い，ウエハ1枚あたりの価値は上昇しており，検査による損失は無視できない．本提案のレーザー-SQUID顕微鏡法では，磁場を計測するので試料に接触させる電極は，一切不要であり，汚染は発生しない．汚染せずに検査することが可能になれば，そのメリットは大きい．

例えばLSIの製造プロセスの途中で，イオン注入やアニールなどの工程毎に電気的特性を確認しながら作業を進めることができる．また，液晶やエレクトロ・ルミネッセンスの平面ディスプレイで使われる薄膜トランジスタ，および太陽電池で使われる多結晶シリコンでは，その結晶粒界によるキャリアのトラップや再結合が，それらの性能を劣化させている．製造工程の途中で，電気的な状態を検査できれば，レーザー・アニリングによって修復することが可能となり，歩留まりが向上するだろう．

また，高抵抗n型シリコンやワイドバンドギャップ半導体では，金属針を接触させるだけでは安定なオーミックコンタクトを得ることが難しい．レーザー-SQUID顕微鏡ならば，試料への電気的な接点が必要であるので，このような試料へも適用可能である．

## 6. まとめ

レーザーと高温超伝導SQUIDを組合わせたレーザー-SQUID顕微鏡を開発し，半導体の非接触評価を行った．多波長のレーザー光を用いることによってp-n接合を有する単結晶シリコンウエハの少数キャリアの拡散長を定量的に評価する方法を示した．さらに，多結晶シリコンの太陽電池セルの結晶粒界を検出できることを示した．本方法では，電気的な接触も，試料表面の前処理も必要としないので，ウエハに汚染やダメージを与えることはない．そのため，半導体（LSI，低温ポリシリコンTFT，ワイドバンドギャップ材料等）を製造プロセスの途中で検査する用途に好都合である．検査汚染が無いので，検査後に製造ラインに復帰でき，採取検査用のダミーウエハが不要で，検査によるスクラップウエハが排出されない．本システムは，半導体産業の効率化にとっても，またSQUIDの産業応用を加速する上でも，有益と思われる．

多結晶シリコンの試料を提供して頂いた奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究所の浦岡行治助教授に感謝いたします．またノイズ低減など実験に協力していただいた（株）島津製作所基盤技術研究所の富田司氏に感謝いたします．

## 参考文献

- 1) 大坊，小高，志子田：レーザー励起スクイド顕微鏡の提案，2000年秋季第61回応用物理学学会学術講演会予稿集，3p-ZM-14，210（2000）
- 2) 大坊，小高，志子田：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，小高，志子田：レーザー・スクイ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) 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）
- 5) Masahiro Daibo, Arimitsu Shikoda and Masahito Yoshizawa: Non-contact Evaluation of Semiconductors using a Laser SQUID Microscope, Physica C, **372-376**, 263/266（2002）
- 6) 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）
- 7) 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）
- 8) 二川，井上：レーザービームと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）
- 9) Kiyoshi Nikawa, and Shoji Inoue, Novel nondestructive and non-electrical-contact failure analysis technique Laser SQUID Microscopy, Proc. IEEE 39th Reliability Physics Symposium, Orlando, Florida, 289/293,（2001）
- 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）
- 11) E. D. Stokes and T. L. Chu, "Diffusion lengths in

solar cells from short-circuit current measurements", Appl. Phys. Lett., **30**-8, 425/426, (1977)

[著者紹介]

**大坊真洋** (正会員)



1999年岩手大学大学院工学研究科博士後期課程電子情報工学専攻修了,1990年新日本無線(株)入社 A/D変換LSIの設計に従事,1994年岩手県工業技術センター入所 X線CT,計算機ホログラフィの研究,2002年岩手大学工学部電気電子工学科講師,2000年度計測自動制御学会技術奨励賞,電子情報通信学会,応用物理学会,IEEEの各会員,工学博士

**菊地利雄**



1988年慶應義塾大学大学院理工学研究科修士課程修了.同年宇宙開発事業団入社.人工衛星搭載電子機器の研究開発に従事.2001年岩手県工業技術センター入所.レーザー-SQUID顕微鏡の開発などに従事.電気学会、日本エネルギー学会会員。