

準静電界センシングによる LSI 内部構造の評価

眞田 克^{1*} 伊藤 誠吾²

(受領日：2013 年 4 月 30 日)

¹高知工科大学 システム工学群
〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185

²こなか電子工房 技術グループ
〒503-0807 岐阜県大垣市今宿 6 丁目 52-16 312 号室

*E-mail: sanada.masaru@kochi-tech.ac.jp

要約：準静電界は磁界を含まない電界の一種であり物質の廻りに広く分布する。この準静電界は無バイアス状態での測定が可能となり、伝搬しないため反射や回折を伴わないという特徴があるため、精度良く観測できる。我々は既存の OBIC 装置に NEPS(Nano Electrostatic field Probe Sensor)と呼ぶ準静電界検出センサーを取り付けることで準静電界画像の取得を行い、LSI の内部状態を評価した。その結果、LSI の well 不純物の識別や配線ボイドなど基板の評価が可能であることが判明した。目標とする結晶欠陥の識別や欠陥に欠陥分布のマッピングへの適用に対して今回明らかになった問題点を改良することで実現を図る。

1. はじめに

レーザを用いた LSI(Large Scale Integrated circuit) の故障解析手法には OBIC(Optical Beam Induced Current: 光ビーム誘起電流)法¹⁾、LSQUID (Laser Superconducting Quantum Interference Devices : 走査レーザ SQUID 顕微鏡)法¹⁾、OBIRCH (Optical Beam Induced Resistance Change: レーザビーム加熱抵抗変動)法¹⁾、LTEM(Laser Terahertz Emission Microscope: レーザテラヘルツ放射顕微鏡)法¹⁾、LVP(Laser Voltage Probing: レーザボルテージプロビング)法¹⁾などがある。これらが検出する物理情報は OBIC 法は励起したキャリアによる光電流であり、LSQUID は OBIC による光電流に伴い発生する磁界であり、OBIRCH は加熱による変化する抵抗値であり、LTEM は励起光によるドリフト電流からの放射電界であり、LVP は内部電界に応じた反射光の強度変化による電位である。今回、我々は NEPS(Nano Electrostatic field Probe Sensor) 法²⁾³⁾⁴⁾と呼ぶ、レーザを電子デバイスに照射することで形成したダイポールから発生する電磁波の 1 種である磁界を伴わない電界を用いた評価を検討した。この電界は準静電界(Quasi-static Electron Field: QEF)と呼ばれる。QEF は無バイアス状態での測定が可能となり、反射や回折がないため、精度良く物質の内部状態を

検証できる特徴をもつ。さらに、電界検出のためのセンサーからの信号像とレーザ照射位置像の組み合わせで容易に QEF 像を取得できるといった特徴をもつ。

本文は 2 章にて NEPS 法と類似の OBIC 法との比較で NEPS 法の概要を述べたのち、3 章にて QEF の説明とそのセンシングの仕方について、4 章にて励起されるキャリア量を概算を示す。5 章にて半導体及び LSI に対して行った評価・解析に関して述べ、6 章にてまとめを行う。その中でこの方法が真価を発揮するであろう結晶構造の評価について述べる。

2. OBIC 法との比較

NEPS 法は OBIC 法と比較すると判りやすい。OBIC 法は図 1 に示すように、Si にエネルギーギャップ以上のエネルギーを照射することで励起させた電子(e)－正孔(h)対が電界に応じて中性領域を介して配線から外部へ流れ出る光電流(I_{ph})を評価することで故障箇所を特定する方法である。OBIC 法に類似した方法に図 2 に示すように SCOBIC (Single Contact Optical Beam Induced Current: 一端子接続 OBIC)法¹⁾と呼ぶ GND 端子を開放にした状態で I_{ph} をモニターする方式がある。GND 端子を開放にすることで検出する I_{ph} は OBIC 発生経路の制限が緩和され、より多くの情報が得られる特徴を有

する。そして、共に空乏層に特化した画像の取得となる。この I_{ph} は空乏層中に発生した電流をモニターする。

NEPS 法は図 3 に示すように無バイアス状態でレーザを走査させながら照射することで拡散層全体の評価を行う手法である。この原理はレーザ照射により形成されるダイポールから発生する電磁波中の一種である QEF のみをセンサーを介して電流に変換しモニターすることにある。

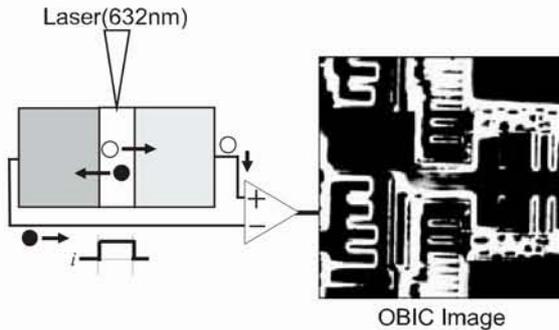


Fig.1. Illustration of OBIC technology

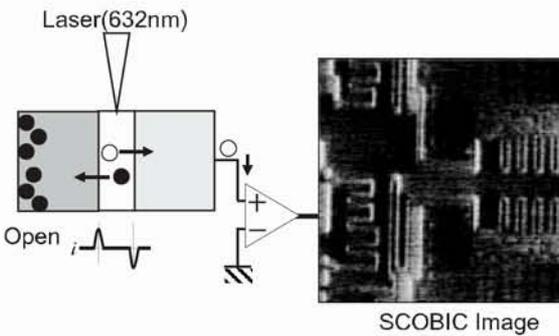


Fig.2. Illustration of SCOBIC technology

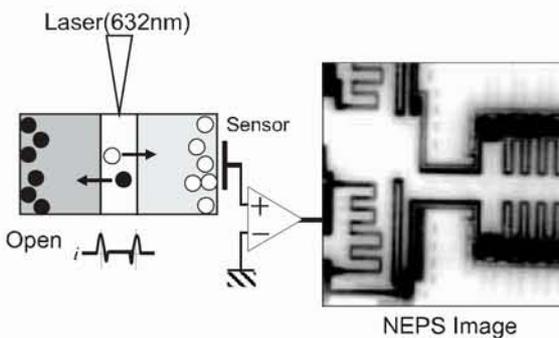


Fig.3. Illustration of NEPS technology

以上、これらの方式は一方は e-h 対からの微小な光電流(I_{ph})を他方は QEF の電流変換による微小電流をモニターする類似性を有するため、NEPS 法は既存の OBIC 装置に機能をつくり込むことでシステム化を行うことができる所以である。

3. 準静電界(QEF)とは

本章ではまず準静電界(QEF)とは何か? について説明した後、QEF のセンシング方法に関してセンサーと OBIC 装置に組み込んだシステムについて述べる。

3-1 準静電界(QEF)とは

電荷は静止していると静電界しか発生しないが、電荷が移動すると電界に加えて磁界が発生する。レーザを LSI 内部に照射したときがまさにそうで、発生したダイポールは振動を繰り返しながら電磁波を発生する。図 4 は簡易的に示すダイポールによってもたらされる電磁波の極座標表示である。ここで l はダイポールの距離であり、 r は任意点 P のダイポール間の距離であり、 θ はダイポール方向に対する P 点との角度である。

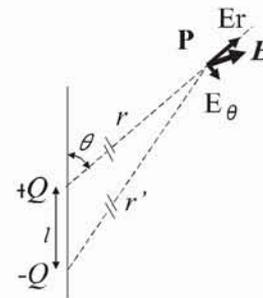


Fig.4. Explanation of electric field brought by dipole

ダイポールの振動による電荷 Q を電荷を q とした波動として式(1)のように表示する。ここで $\omega=2\pi\nu$, $k=\lambda/2\pi$ である。

$$Q = qe^{j(\omega t - kr)} \quad (1)$$

その結果、P 点における電界 E の極座標表示 E_r, E_θ は各々式(2)、式(3)のように表示できる。算出法の詳細は Appendix を参照のこと。

$$E_\theta = \frac{ql \sin \theta}{4\pi\epsilon r^3} \left\{ 1 + jkr + (jkr)^2 \right\} e^{j(\omega t - kr)} \quad (2)$$

$$E_r = \frac{ql \cos \theta}{2\pi\epsilon r^3} \left\{ 1 + jkr \right\} e^{j(\omega t - kr)} \quad (3)$$

↑ Quasi-static electric field
 ↑ Induction electric field

以上、式(2)、式(3)から判るようにダイポールの振動による電磁波は 3 種類の電界で構成されることが判る。

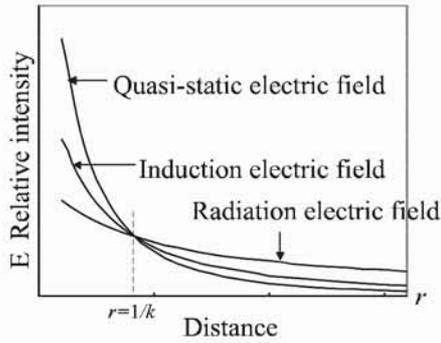


Fig.5. Graf of dominant electric field(E) relative to distance(r)

図5はダイポールからの距離 r に対して優位となる3種類の電界 E の関係を示すグラフである。図5から明らかなように放射線源から遠方に位置する $r \gg 1/k$ では放射電界と呼ぶ磁界を伴う電界が支配的となる。そして r 値が放射線源の近傍へ近づくにつれて放射電界の影響度が減少し誘導電界と呼ぶ電界になり、 $r < 1/k$ になると磁界の影響が無視できる準静電界(QEF)となる。

3-2. 準静電界のセンシング

センシングはNEPS(Nano Electrostatic field Probe Sensing)*センサーを用いた。

*NEPSはこなか電子工場の商標である。

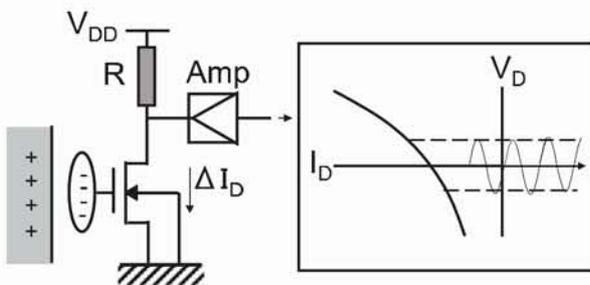
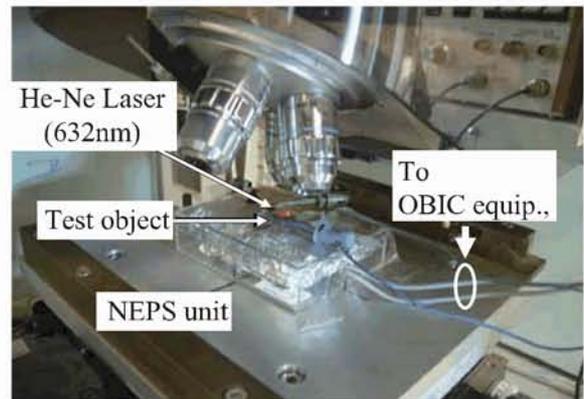


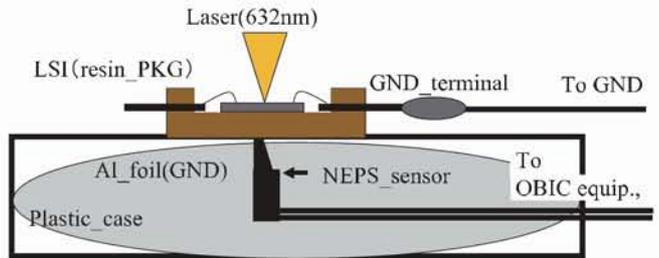
Fig.6. Electric field sensing mechanism by using NEPS sensor

QEFのセンシングによる信号は図6に示すようにQEFが検出できる距離にMOSFET(Depletionタイプ)のゲート電極を近づけることでこの電極に誘起されるキャリアによりソース・ドレイン間を流れる電流(ΔI_D)である。その増減によりQEF状態を識別できる。 ΔI_D は電源とFETドレイン間に挿入された抵抗 R に流れることにより検出される電圧値($\Delta I_D R$)に変換され、増幅器を介して取り出される。安定した計測のためにはセンサの時定数 τ_S は検査対象物の時定数 τ_T とすると $\tau_S < \tau_T$ でなければならない。

図7はQEFセンシングのシステム図であり図7(a)はレーザ顕微鏡に搭載したQEF測定システムの写真、図7(b)はNEPSセンサーユニットの構成図を示す。NEPSユニットはプラスチックケースに搭載され、ケースの開口部の上辺にセンサー先端部がくるように高さを調整してある。センシングはNEPSセンサーの安定化を図るためにレーザ照射面と反対側に設置している。そのため、試験サンプルをユニット上面にセットしたときセンサ先端部がサンプルに最接近するように設定できる。またセンサは外部雑音の影響を防止するためにアルミ箔で覆い、GNDに固定してある。



(a) Measurement system combined with NEPS system



(b) Schematic images of NEPS unit

Fig.7. Illustration of QEF sensing system

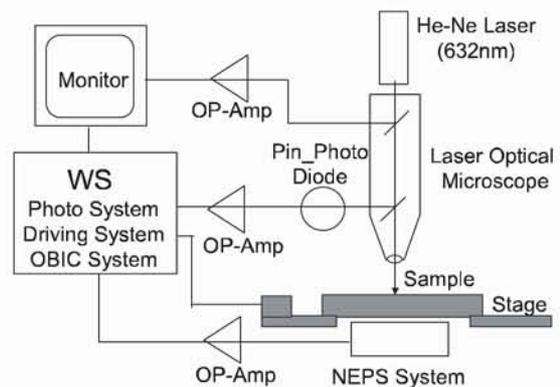


Fig.8. Schematic diagrams of measurement system

QEF 画像取得のために図 8 に示すように OBIC (Optical Beam Induced Current) 計測機能つきレーザ顕微鏡 (He-Ne : $\lambda=632nm$, 日本電子製 DLM-6602E) を用いた。NEPS 信号の増幅手段は OBIC 装置に組み込まれている光電流増幅器を利用した。QEF 像はレーザ顕微鏡を介してレーザをスキャンすることで照射される位置とその照射位置にて検出される電位変動値とのマッピング画像である。

4. レーザ励起によるキャリア量

このシステムにおけるレーザ照射によるキャリア量を検討する。用いたレーザは He-Ne であり、波長 (λ) は $632nm$, 最大レーザパワー (P) は $4mW$ である。照射スポット直径 (r) を $1\mu m$ とおく。

このときの時間あたりのフォトン発生量 (N) は

$$N = P\lambda / hc = 1.27 \times 10^{16} s^{-1} \quad (4)$$

となる。 h はプランク定数, c は光速である。

次にレーザ照射域の体積サイズ (V) を求める。

レーザ照射による Si 基板への浸透長 (d) は図 9 に示す Photon エネルギーに対する吸収係数図⁵⁾ から $\lambda = 632nm$ における吸収係数 α は $3.88 \times 10^3 cm^{-1}$ となり、

$$d = 1 / \alpha = 2.5 \mu m \quad (5)$$

と算出される。

拡散長 l を $1\mu m$, スポット径 s を $1.5\mu m$ とおくとレーザ照射域の体積 V は

$$V = (s/2 + l)^2 \pi d = 1.77 \times 10^{-12} cm^3 \quad (6)$$

となる。

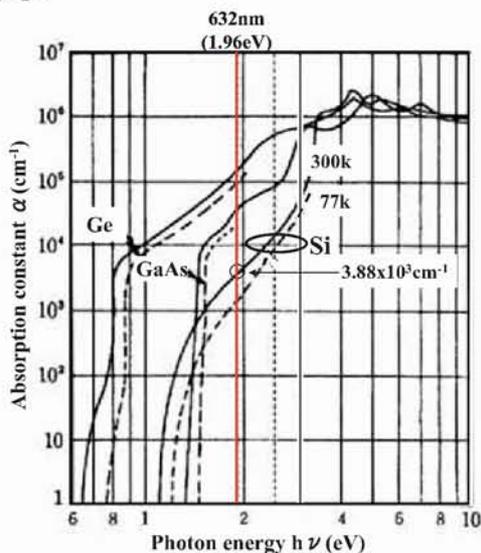


Fig.9. Graph of absorption constant (α) relative to photon energy ($h\nu$)

また, キャリアの $life_time(v_{av})$ を $1\mu s$, 光路系の伝達効率 (a) を 0.1 とおくと過剰キャリア密度 (D_n) は

$$D_n = N \times v_{av} \times a / V = 7.8 \times 10^{20} cm^{-3} \quad (7)$$

として算出される

以上より, レーザ照射による過剰キャリア密度は真性 Si 半導体のキャリア量 $1.45 \times 10^{10} cm^{-3}$ (at 300k) に対して十分余裕があり, さらに n-well や p-well を構成する不純物量 $10^{18} cm^{-3}$ オーダに対して約 3 桁の余裕があるため以下に示す各種の評価に有効である。

5. 実験

実験は単一半導体への照射による QEF の広がり, LSI を用いた well 層の識別及び故障を作りこんだ LSI の故障個所の特定の可能性を評価した。

5-1 p 型, n 型半導体の評価

抵抗率 $10 \Omega\text{-cm}$ (約 $10^{15} cm^{-3}$) の p 型, n 型半導体の評価を行った。基板に対して任意の位置にレーザを照射し, 過剰キャリアの拡がりを観察した。その結果, 過剰キャリアが周囲に拡散していく過程で少数キャリアの再結合により減衰していく様子を観察できた。図 10 は p 型半導体における電子 e (白) の減衰, 図 11 は n 型半導体における正孔 h (黒) の減衰の様子である。

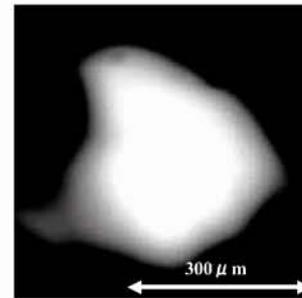


Fig.10. Diffusion images of hole carrier in n-type Si with $10\Omega\text{-cm}$ substrate

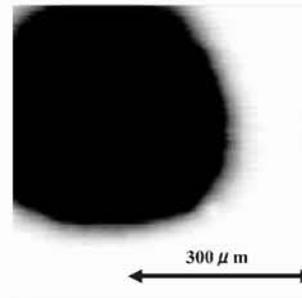
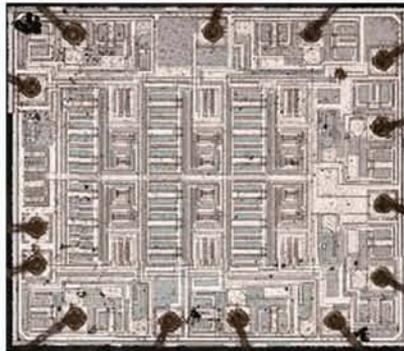


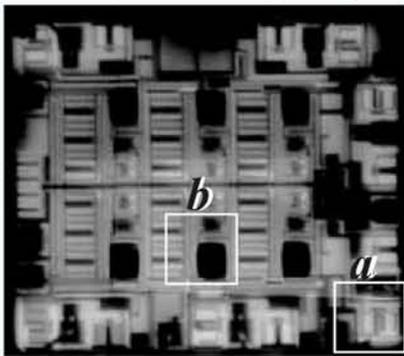
Fig.11. Diffusion images of electron carrier in p-type Si with $10\Omega\text{-cm}$ substrate

5-2 wellタイプの識別

QEFは誘電体に帯電して分布する。LSIを搭載している樹脂の比誘電率(ϵ_r)は3~5程度ある。NEPS法を用いた評価の場合、LSIで発生したe-h対の大部分は樹脂に吸収されその表面に帯電する。この帯電状態を検知することでwellの種類を識別することが可能となる。このことはLSIのレイアウトやパターン異常、well中の結晶欠陥や故障欠陥などの識別を可能にすることを示唆している。



(a) Optical microscope images

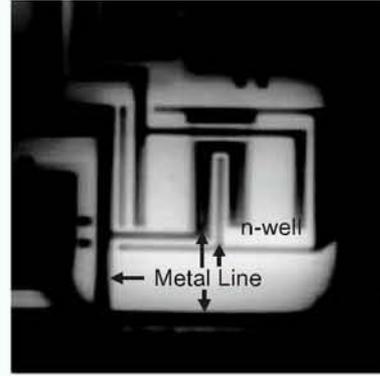


(b) NEPS images

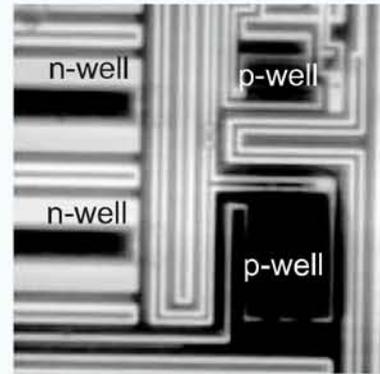
Fig.12. Distinction between p-well(black) and n-well(white)

まず、パッケージを開封したLSIに対してwellの識別を行った。図12はその結果であり、図12(a)にLSI全体の光学顕微鏡像、図12(b)にそのNEPS像を示す。p-wellは黒っぽくn-wellは白っぽく識別できる。なお、金属配線はレーザー光を反射するため白く識別される。

図12(b)に示すNEPS像のa,b点の拡大像を図13に示す。図13(a)に示す箇所aはn-well領域と共にp-substrateが白く見えるがこれは基板をGNDにしているためキャリアが急速に基板に吸収されるためである。図13(b)に示す箇所bはwellのtypeがp-wellは黒、n-wellは白と明確に識別できている。



(a) Magnified NEPS images of a area in Figure 12



(b) Magnified NEPS images of b_area in Figure 12

Fig.13. Magnified NEPS images of specified areas (a & b) in Figure 12

5-3 ボイド

図14は配線上に形成されたボイドを検出した例である。ボイドを介したSi基板に堆積した電界が観察できる。

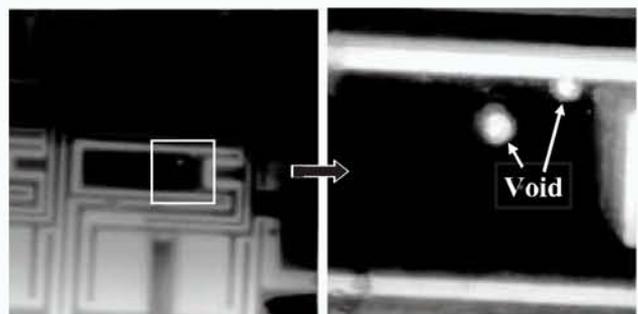
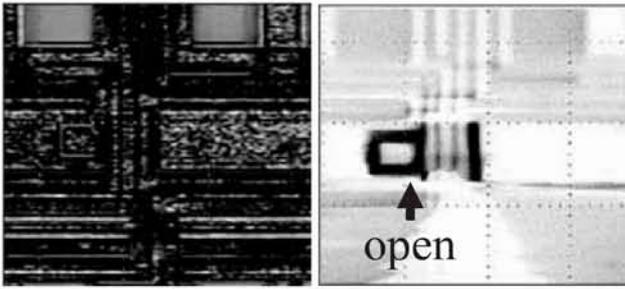


Fig.14. Detection of void portions on Al-Si line

5-4 故障解析

断線故障を作り込んだサンプルへの適用例である。用いたサンプルは市販のLSIを開封しエキシマレーザーを用いて任意の配線を切断したLSIである。その結果、図15に示すように断線箇所を検出できた。図15(a)はレーザー顕微鏡像、図15(b)はNEPS像である。



(a) Laser microscope images (b) NEPS images
Fig.15. Detection of line open fabricated by Excimer laser.

6. まとめ

NEPS(Nano Electrostatic field Probe Sensor) 法はレーザーを電子デバイスに照射することで形成したダイポールから発生する準静電界(QEF)を用いた評価法である。QEFは電磁波の1種である磁界を伴わない電界であり、無バイアス状態での測定が可能である。さらに、反射や回折がないため精度良く物質の内部状態を検証できる特徴をもつ。この技術をまずLSIの評価に適用した。その結果well不純物の識別や配線ボイドなど拡散部の評価が可能であることが判明した。同時に精度上の問題点が明確になった。目標は結晶欠陥の識別や欠陥に欠陥分布のマッピングへの適用であり、この実現に向けて改良し効率化を図る。

問題点は評価システムの性能に起因するものである。

- ① 低倍率にて共焦点画像が大幅に不鮮明になる。
目標とする拡散部の欠陥の分布形状やマッピングには低倍率の共焦点機能は不可欠である。レーザー光の伝搬路の補正が必要である。
- ② 電界像を取得している間に帯電キャリアが減衰してしまうため画像が不鮮明となる。センサー時定数(τ_s)>被検査サンプルの時定数(τ_T)のためであり、センサー時定数の短縮化と共に、対象となるサンプルのキャリア濃度に対応した時定数の制御が必要である。
- ③ ②に関係するが、現状の max レーザパワーは $4mW$ であり、この値から算出されるキャリア量は $10^{20}cm^{-3}$ 程度と少ない。サンプルの低抵抗化に対して少なくとも10倍の Power Up を図る必要がある。

これらの改善により酸化半導体に存在する酸素欠損の分布とマッピングへの適用することを検討していく。

文献

- 1) LSI テスティングハンドブック,オーム社 LSI テスティング学会, 2008.
OBIC pp.304-307
LSQUID pp.328-331
OBIRCH pp.298-304
LTEM pp.331-334
LVP pp.325-328
SCOBIC p.329
- 2) S. ITO, H.SODEYAMA, K.TAKIGUCHI, "Failure Analysis Method of Using Laser Nano Electrostatic field Probe Sensor (L-NEPS)" ISTFA 2011 International Symposium for Testing and Failure Analysis Venue, pp.387-392, 2011.
- 3) 伊藤誠吾, 滝口清昭, 松本徹 "レーザー微小領域電界センサを用いた故障解析" 第31回 LSI テスティングシンポジウム, pp.231-236, 2011.
- 4) 堤慎一郎, 伊藤誠吾, 眞田克" 準静電界センシングによる LSI 故障個所の検出"平成 24 年度電気関係学会四国支部連合大会 9-10, 2012.
- 5) S. M. Sze "Physic of Semiconductor Devices" John Wiley & Sons, p.42, 1981.

【Appendix】

レーザ照射により生成される交流ダイポールが振動することで電界と磁界が生成され、電磁波として伝搬していく。そして、電磁波は図 A-1 に示すように電界と磁界をポテンシャルで表示することで電磁波の概念がより明確になる。

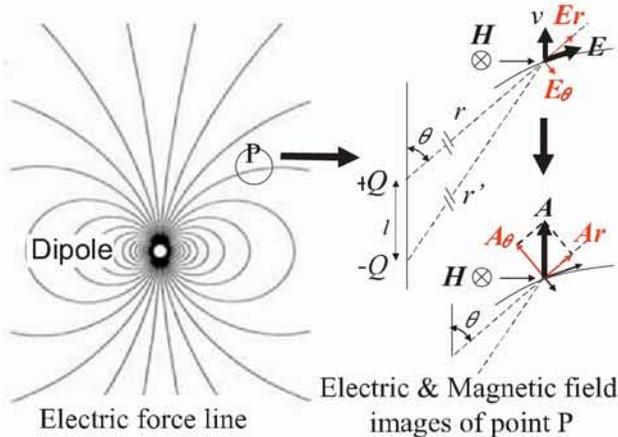


Fig.A-1. Explanation of electric field brought by dipole

図 A-1 にて、ダイポールの距離を l 、任意点 P とダイポール+Q 間及び P とダイポール-Q 間の距離を r 及び r' とする。また $l < r$ の関係がある。P 点 (図 A-1 の右上図) における電界 E は式(A-1)に示すように勾配のスカラーポテンシャル Ψ を用いて

$$\begin{aligned} E &= -\text{grad}\psi \\ \psi &= q/4\pi\epsilon r \end{aligned} \quad (\text{A-1})$$

として表される

変位電流はダイポール方向に流れるため、磁界 H はダイポール方向と垂直に働く。その磁界 H に対して垂直方向 (右ネジ回転方向) にベクトルポテンシャル A が形成される。変位電流のキャリア速度を v とするとベクトルポテンシャル A は式(A-2)に示すように

$$\begin{aligned} H &= \frac{1}{\mu} \text{rot}(A) \\ A &= \mu\epsilon\psi v \end{aligned} \quad (\text{A-2})$$

として表される

この関係はスカラーポテンシャル Ψ に速度 v を掛けたものがベクトルポテンシャル A であることを示している。レーザ照射によるダイポールは交流ダイポールとして運動する。従って、ダイポールの振動はダイポールの電荷量 Q をあらためて電荷量 q とした波動関数として式(A-3)のように置き換える

ことで表示できる。ここで $\omega=2\pi\nu$, $k=\lambda/2\pi$ である。

$$Q = qe^{j(\omega t - kr)} \quad (\text{A-3})$$

従って、スカラーポテンシャル Ψ は式(A-4)に示すように

$$\begin{aligned} \psi &= \frac{Q}{4\pi\epsilon r} + \frac{-Q}{4\pi\epsilon r'} \\ &= \frac{ql \cos(\theta)}{4\pi\epsilon r^2} \{1 + jr\} e^{j(\omega t - kr)} \end{aligned} \quad (\text{A-4})$$

又、ベクトルポテンシャル A は式(A-5)に示すように $qv = \text{rot} A$ の関係を用いて

$$A = j\omega \frac{\mu ql}{4\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (\text{A-5})$$

と表示される。

この極座標 A_r , A_θ は図 A-1 より各々式(A-6)、式(A-7)に示すように

$$A_r = \frac{j\omega\mu ql}{4\pi r} \cos(\theta) e^{j(\omega t - kr)} \quad (\text{A-6})$$

$$A_\theta = -\frac{j\omega\mu ql}{4\pi r} \sin(\theta) e^{j(\omega t - kr)} \quad (\text{A-7})$$

となる。

交流ダイポールより発生する電磁波はポテンシャルを用いて式(A-8)のように表示される。

$$\oint_c E \cdot ds = -j\omega \oint_c A \cdot ds \quad (\text{A-8})$$

ここで $\text{rot}(\text{grad}\Psi) = 0$ の関係を式(A-8)に追加すると

$$E = -\text{grad}\psi - j\omega A \quad (\text{A-9})$$

と表示される。

以上がポテンシャル表示による電磁波の式である。従って、電界 E の極座標表示 E_r , E_θ は各々式(A-10)、式(A-11)のように示される。

$$\begin{aligned} E_r &= -\frac{\partial\psi}{\partial r} - \frac{\partial A}{\partial t} \\ &= \frac{ql \cos\theta}{2\pi\epsilon r^3} \{1 + jkr\} e^{j(\omega t - kr)} \end{aligned} \quad (\text{A-10})$$

$$\begin{aligned} E_\theta &= -\frac{\partial\psi}{\partial(r\theta)} - \frac{\partial A_\theta}{\partial t} \\ &= \frac{ql \sin\theta}{4\pi\epsilon r^3} \{1 + jkr + (jkr)^2\} e^{j(\omega t - kr)} \end{aligned} \quad (\text{A-11})$$

Evaluation of LSI Inner Structure by Using Quasi-static Electrical Field Sensing Technology

Masaru Sanada^{1*} Seigo Ito²

(Received: April 30th, 2013)

¹ School of System Engineering, Kochi University of Technology
185 Miyanokuchi, Tosayamada, Kami city, Kochi 782-8502, JAPAN

² Engineering Group, Konaka Electronics
Softopia Japan Dream core 312, 52-16 Imajuku 6, Ogaki, Gifu 503-0807, JAPAN

* E-mail: sanada.masaru@kochi-tech.ac.jp

Abstract: Quasi-static electrical field, being one of electrical fields which does not bring magnetic field, is distributed widely around devices. This electrical field is possible to measure with non-bias state. Additionally this field does not involve reflection and diffraction phenomenon. These features bring accurate evaluation result. By using measurement system combined QEF sensor* unit with Laser microscope built-in OBIC function, an evaluation of LSI inner state was experimented. The evaluation outcomes were discrimination of substrate impurity type and also detection of void portion on metal line. These results indicated that this technology was suitable way to evaluate diffusion layer and substrate it. Concurrently, a couple of problems caused by measurement system were become clearly. The aim of this technology application is to obtain crystal defect distribution and mapping.

*QEF sensor is named as NEPS (Nano Electrostatic field Probe Sensor).