

光誘起電流による半導体/金属界面の真実接触面の評価の基礎研究*

小竹茂夫^{*1}, 桜田 寛^{*2}
鈴木泰之^{*1}, 妹尾允史^{*1}Photo-Induced Current between Semiconductor
and Metal through Real Contact AreaShigeo KOTAKE, Hiroshi SAKURADA,
Yasuyuki SUZUKI and Masafumi SENOO

Real contact area between semiconductor and metal is studied by measuring photo induced current (PIC), which is stimulated by laser at the semiconductor surface. Transmittance of PIC from semiconductor to metal interface is discussed. PIC increases proportionally with the increase of normal force between the solids, which implies adhesion like phenomena at the interface. Since PIC is strongly depended on the position of the incidence of light, PIC images, which were obtained with scanning of laser, express the distributions of the real contact area. PIC can be a new method to estimate the interface properties.

Key Words: Tribology, Friction, Contact Problem, Photo Induced Current, Adhesion Theory, Transmittance of Interface Current, Tunneling Effect, Real Contact Image

1. 序 論

固体界面の真実接触面は、乾燥摩擦や熱伝達などの物理的性質と密接に関わっており、これらの現象を理解する上で極めて重要である。従来、接触電気抵抗⁽¹⁾や接触面顕微鏡⁽²⁾⁽³⁾、超音波の透過率⁽⁴⁾などの手法により、真実接触面積(A_{rc})の評価が試みられ、凝着理論を裏付ける結果が得られてきた。しかし、真実接触/非接触といった二値化された描像は、現実の界面を正確に表現するものではなく⁽⁵⁾、また、電気抵抗や反射率などの物理量は複雑で、必ずしも A_{rc} にのみ依存しない事から、界面現象の機構についての議論は難しい。

今回、我々は、接触させた半導体/金属の半導体面にバンドギャップよりも高いエネルギーをもつレーザー光を照射し、伝導バンドに励起された電子による光誘起電流(Photo Induced Current: PIC)⁽⁶⁾の測定を行った。本手法では、励起される電子数と接触面を流れる電子数から、固体界面における電流の透過率(界面電流透過率)を評価することができた。また、PICの測定は、絶縁層を含んだ界面にも有効であることから、現実の固体界面の解析に有用であった。さらに、PICは、照射位置依存性が大きいから、半導体/金属界面の真実接触面の分布を評価することができた。本研究では、半

導体/金属間の接触状態によるPICの変化から、固体間の界面の変化と界面電流透過率の関係について考察した。

2. 装置および実験方法

2.1 装置 作製した装置の概略図を図1に示す。半導体には、長さ50mm四方、0.4mm厚のnおよびp型Siウェハ―とこれと同形の硝子板上に蒸着した1 μ m厚のGe膜を用いた。金属には、機械研磨により先端を尖らせたNi針、もしくはエメリー紙により表面研磨を施したNi板(長さ:11mm, 幅:13mm, 厚さ:1mm, σ_{RMS} :70nm)を使用し、これを半導体に接触させた。次に、XYZステージに固定した半導体レーザー(波長:630nm, 出力:20mW)からの光を接触面とは反対側の半導体裏面に照射させた(以下の実験におけるレーザーの照射面は、同様である)。この際、10 μ m間隔で照射位置を走査させた。また、対物レンズ(焦点距離:16mm, 倍率:10)により、レーザーの照射径を約5 μ mとした。光照射により発生する電流を微小電流アンプにより電圧に増幅し、A/Dコンバーターを介してコンピューターに記録した。

2.2 実験方法

2.2.1 接触圧による接触電気抵抗と光誘起電流の変化 半導体に接触させたNi針について、マイクロメータによる微小変位により、接触圧を変化させた状態で、接触電気抵抗(R_c)とPICの測定を行った。この際、

* 原稿受付 1998年6月29日。

^{*1} 正員, 三重大学工学部(☎514-8507 津市上浜町1515)。^{*2} 三重大学大学院。

E-mail: kotake@mach.mie-u.ac.jp

光は照射せず、試料間に10mVの電圧を付加した。また、同時に、針の接触点直下にレーザを照射することによりPICを測定した。

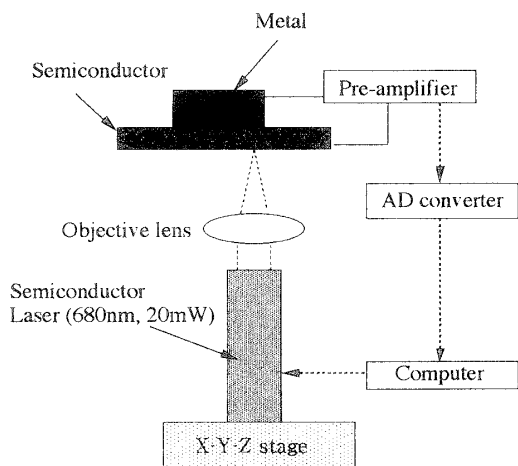


Fig.1 Schematic figure of PIC measurement system.

2.2.2 入射光の強度と半導体の厚さによるPICの変化 NDフィルターにより、入射光の強度を、100%、25%、5%、0%と変化させた状態で、PICの測定を行った。この際、試料および照射点は動かさず、接触状態は変化させなかった。これにより、光の強度によるPIC量の変化について考察した。次に、研磨により板厚(d)を50~450 μm と変化させたSiウェハにNi針1本を接触させ、これに照射位置が接触点の真下を通るように10 μm 間隔でレーザを走査させ、PICを測定した。得られたPICのピーク強度から半値幅(Γ_h : 半値幅の半分)を求め、板厚による Γ_h の変化について考察した。

2.2.3 光誘起電流の距離依存性 1本および2本のNi針を半導体に接触させたまま、照射位置が接触点の真下を通るように、10 μm 間隔でレーザを走査させた。その際、2本の針の間隔を0.5~0.8mmの範囲で変化させ、複数の接触点におけるPICの照射位置の影響について考察した。

2.2.4 真実接触領域の分布の評価 Ni板を半導体ウェハ上に置き、さらに、その上にのせた分銅により接触圧を10~50kPaの範囲で変化させた。この際、レーザを500 μm 四方で走査させ、PICの2次元像(PIC像)を測定した。

3. 実験結果

3.1 接触電気抵抗と光誘起電流の関係 Siウェハに対するNi針の接触圧を次第に増加させた場合、

R_c は、 $10^9 \Omega$ オーダーから、次第に減少する傾向を示した。またある圧力以上で急激な低下が観察された(以下、この点を臨界圧と呼ぶ)。初期の圧力における R_c は、その大きさから、Si上の酸化膜を通しての通電であると考えられる。臨界圧以上での R_c の急激な低下は、臨界圧以上における接触点での酸化膜の割れによる、金属と半導体の直接接触であると推測された(7)。

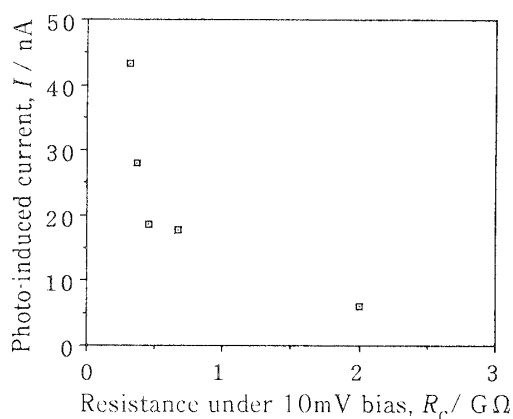


Fig.2 Relation between contact resistance and PIC between Ni needle and Si (p) plate with contact pressure change.

図2に、接触圧の増加に伴う R_c と、同じ状態で光照射によって得られたPICの関係を示す。臨界圧以下において、PICは R_c と反比例の傾向を示すことから、PICは真実接触面の電気伝導に比例する物理量を与えられた。光照射によりPICが急激に増加したことから、電流の大半は、光励起された電子からなることが分かる。絶縁層の破壊に伴う R_c の急激な減少に対応するPICの変化については、測定電流の範囲がアンプの限界を越え、飽和してしまったために確認できなかった。

3.2 光誘起電流の入射光強度依存性 PICは、入射光の強度に比例して減少を示した。一般に励起光の光子数に比例して、伝導バンドに励起される電子数も減少すること(6)、また、拡散後の励起電子数は、照射点からの距離の関数であること(4.1節)から、半導体の接触界面に到達する励起電子の数も、光量に比例することが予想される。光量によるPICの変化から、PICは界面に存在する電子の数に比例すると推測された。

3.3 光誘起電流の照射位置依存性 PICは、照射点が接触点の真下にある時の値を最大に、周囲に離れるに従って急激に減少した。Ge薄膜における $\Gamma_h=20 \mu\text{m}$ 、50 μm 厚のSiにおける $\Gamma_h=100 \mu\text{m}$ であり、Ge薄膜の方が、より鋭い分解能を持つことが分かった。

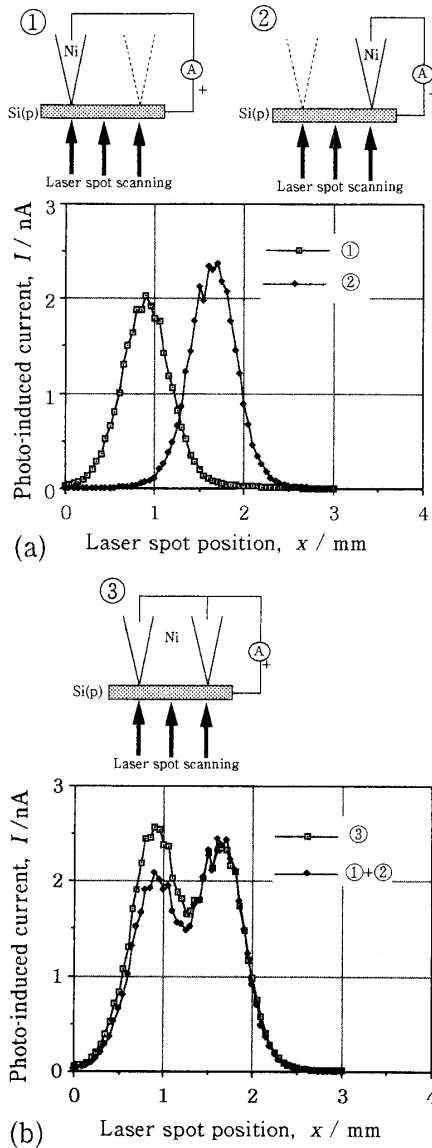


Fig.3 Linear profile of PIC between Si(p) plate and (a) one Ni needle, (b) two Ni needles with scanning the incident laser.

次に、図3に、(a)それぞれ1本のNi針を接触させた場合および、(b)2本のNi針を同時に接触させた場合におけるPICの照射位置における変化を示す。2本の針からのPICは、各接触点からのPICの和で表され、またPICによる2点の分解能は、半値幅(2 Γ_h)程度であった。左側のピークにおけるデータへのずれは、Ni針の接触状態を変化させたために発生したものと考えられた。PICの強度が、照射位置に大きく依存することから、PIC像による固体界面の真実接触分布の評価が期待された。

3.4 半導体の厚さによる半値半幅の変化とPIC像による接触点分布の評価 SiとNi針との間の Γ_h の半導体の厚さによる変化を図4に示す。 Γ_h は、半導

体が厚くなるとともに増加した。数回の測定によって得られた標準偏差から、エラーバーを推定した。十分に薄い半導体を用いることにより、より高い分解能が期待された。

次に、図5(a)~(d)に、接触圧を変化させた際のGe薄膜/Ni板間の接触界面におけるPIC像を示す。荷重による接触圧の増大に伴って、PIC像におけるピーク数および強度の増加が観察された。

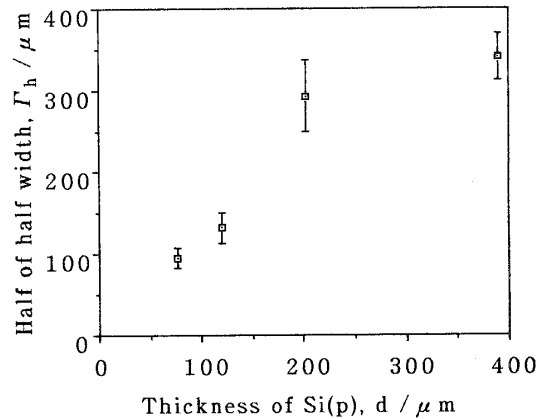


Fig.4 Relation between the thickness of Si(p) plate and half of half width on PIC obtained from the profile.

4. 考察

4.1 半導体内部における光誘起電流の拡散・減衰と接触点の分解能

光励起により伝導バンドに遷移した電子は、途中、ホールとの再結合による減衰を伴いながら、放射状に拡散して接触界面に到達する(6)。照射点から距離 r 離れた位置における励起電子の数(n)は、減衰距離(μ)をパラメータとして、式(1)で表される。

$$n = n_0 / (4 \pi r^2) \exp(-r / \mu) \dots \dots \dots (1)$$

いま、厚さ d_t の半導体の光照射面に照射点 p 、この直上から Δx 離れた半導体の接触界面に接触点 s を考える。二点間の距離($r = (\Delta x^2 + d_t^2)^{1/2}$)は、 Δx に従って増加する。 r 離れた接触点での励起電子数は、式(1)で表されることから、接触点直上のピーク位置に対してPICの半減する距離($r_h = (\Gamma_h^2 + d_t^2)^{1/2}$)は、式(2)に従うことが予想される。

$$r_h = \sqrt{2} d_t \exp[-(r_{1/2} - d_t) / (2\mu)] \dots \dots \dots (2)$$

d_t が十分に厚い場合($d_t \gg \mu$)、拡散よりも減衰による影響が大きくなる事から、(2)式は、次式のように近似され、 Γ_h^2 は d_t の一次式で表される。

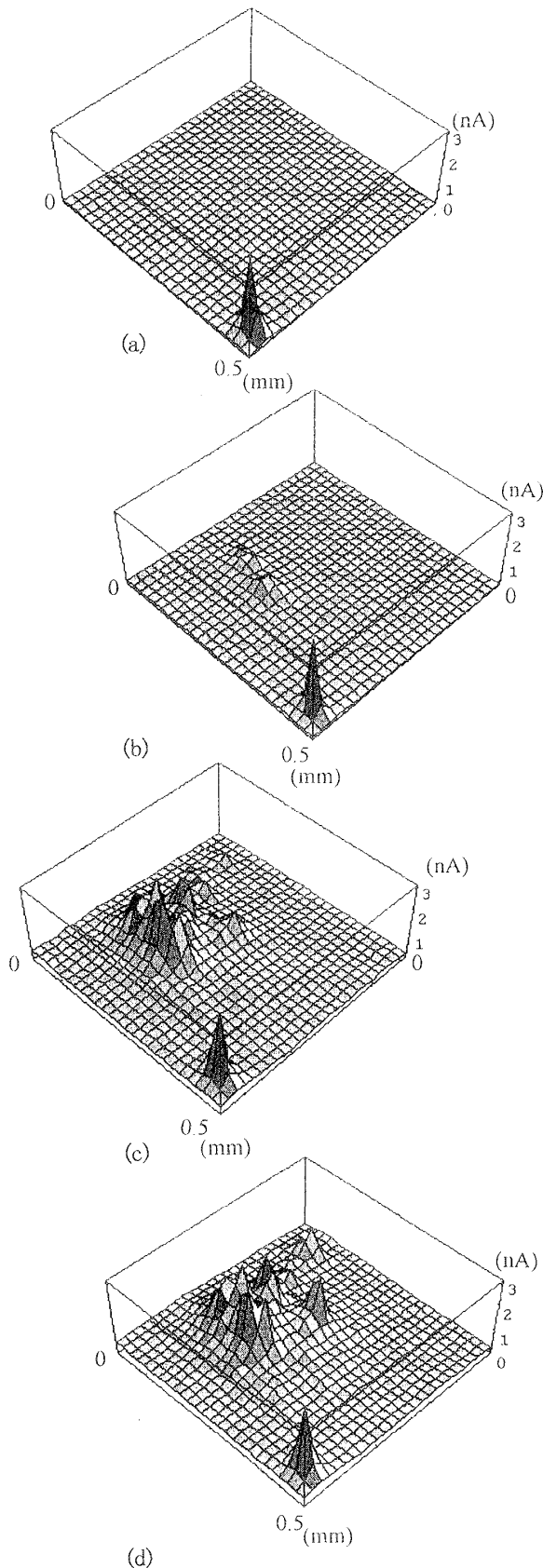


Fig.5 Images of PIC on the interface between Ni and Ge plates under the normal stress; (a)13kPa, (b) 25kPa, (c)38kPa, (d)50kPa.

$\Gamma_h^2 = \mu \ln 2 (\mu \ln 2 + 2d_t) \dots \dots \dots (3)$
 また、 d_t が μ よりも薄い場合 ($d_t \ll \mu$)、拡散が主たる電流密度の変化の要因となり、 Γ_h は d_t に比例する式(4)。

$$\Gamma_h = d_t \dots \dots \dots (4)$$

d_t による Γ_h の変化(図4)が、式(3),(4)と一致することから、半導体内部の光誘起電子の数は、上記で示した拡散・減衰現象に従うことが予測される。 d_t による Γ_h の変化から、Siにおける減衰距離 ($\mu_{Si} = 120 \mu\text{m}$) を得る。この値は、通常のSiにおける再結合寿命 ($\tau = 10^{-3}\text{s}$) と、 10^3V/m 下での励起電子のドリフト速度 ($v_f = 190\text{m/s}$) の積 (0.19m) よりも短く、不純物や欠陥による再結合の影響が考えられる。また μ_{Ge} も、 μ_{Si} とほぼ同様の値を示すと推定された。

4.2 半導体の接触界面に到達する電子数

励起される電子は、吸収された光(反射率を除いた量)の photon 数にほぼ等しいことから、単位時間に照射面から励起した電子数 (n_0) は、 $5.4 \times 10^{16}\text{s}^{-1}$ となる。拡散は全電子数に影響を与えないことから、半導体内部を通過して、接触界面に到達する全励起電子数 (n_s) は、式(5)で表される。

$$n_s = n_0 \exp(-r/\mu) \dots \dots \dots (5)$$

$400 \mu\text{m}$ 厚の Si における n_s は、減衰により、 $n_s = 0.04n_0$ となる。一方、Ge 薄膜の d_t は、 μ_{Ge} よりもはるかに小さいため、 n_s は n_0 とほぼ等しいと考えられた。

4.3 接触圧によるPIC像および平均光誘起電流

の変化 各接触点におけるPICは独立性・可算性および高い空間分解能をもつことから、PIC像は、接触界面の真実接触位置に対応した分布図を表すものと考えられる。接触圧の増加にともない、PIC像は、しきい値以上の強度をもつ面積の広がりやピーク強度の増加が観察された。面積は、主として、真実接触点の数の増加に、ピーク強度は、真実接触面積もしくは接触度の増大に対応すると考えられる。しかし、ピーク強度の増加により周辺の強度も増加する事から、PIC像による接触分布の解析には、更なる工夫が必要となる。また、半導体の厚さを増加させた場合、PICの減少が観察され、励起された電子の減衰・拡散が示唆された。

一方、PIC像における各位置の電流の平均値 (I_{api} : 平均光誘起電流) は、局所的な情報に依存しない全体の接触状態を代表する値を与えることが予想される。図6にGe薄膜/Ni板間における I_{api} の接触圧に対する変化を示す。初期荷重領域 (10kPa未滿) を除いて、接触圧に比例した I_{api} の増加が観察された。この傾向は、接触電気抵抗同様、凝着理論を支持し、 I_{api} から、単位時間に接触界面を透過する電子の平均数 (n_{api}) が求まっ

た。

4.4 真実接触面積と界面電流透過率の関係

従来の A_{rc} は、与えた垂直抗力(N)と材料の塑性流動圧力(p_m)との比($A_{rc}=N/p_m$)から求められる。半導体/金属界面では、主として塑性変形が、金属側で生じることから、 $H_v=90$ の純Niの p_m は 8.8×10^8 Paであり、よって、 A_{rc} は、単位圧力当たり $1.1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{Pa}$ の面積増加率($\theta_{rc} = \partial A_{rc} / \partial P$)が期待される(P : 垂直圧力)。

一方、 n_{api} と n_s との比は、接触界面における半導体表面から金属表面への電流の平均透過率(平均界面電流透過率: $\gamma_t = n_{api}/n_s$)を与える。図6より、圧力に対する γ_t の傾きから、平均界面電流透過係数($\beta_t = \partial \gamma_t / \partial P$)を定義する。Ge/Ni間の β_t は、 $1.9 \times 10^{-13} \text{ Pa}^{-1}$ となり、 θ_{rc} に比べ、 10^4 ほど小さな値をとることが分かった。

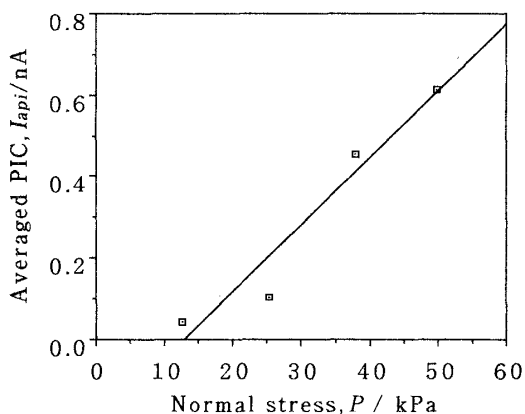


Fig.6 Relation between average of PIC image and PIC and normal stress between Ni and Ge plates.

4.5 界面電流透過率の物理的意味

以下、ショットキー障壁を伴う点接触抵抗および絶縁層におけるトンネル現象としての理解を中心に、接触状態の界面電流透過率への影響について考察する。以下の物理現象に関する接触面積は、真実接触面積に等しいものとする。

4.5.1 半導体/金属界面の点接触抵抗 半導体/金属界面の点接触抵抗(R_p)は、式(6)に示されるように、ショットキー接合によって生じる接合抵抗(R_j)と界面形態に依存する表面抵抗(R_s)に分かれる(8)。

$$R_p = R_j + R_s \dots \dots \dots (6)$$

このうち R_j は、電子の熱励起と拡散の釣り合いとして表される(式(7))。

$$R_j = \alpha k T / (q J A_{rc}) \dots \dots \dots (7)$$

(α : 理想係数(=1), k : ボルツマン定数, T : 絶対温度, q : キャリアの電荷, J : 電流密度)

また R_s は、3つの項からなり、第1項目からそれぞれ、接合面の抵抗分布(R_n)、分散抵抗(R_d)、オーミック抵抗(R_c)に分れる(式(8))。

$$R_s = 1/A_{rc} \int \rho_B(x) dx + \rho_B / 4 \pi r_c + R_c \dots \dots \dots (8)$$

(ρ_B : 半導体の比抵抗, r_c : 接触断面の半径)

直径 $0.1 \mu\text{m}$ の針による接触断面積を仮定すると、電圧 10mV 、電流 1nA の接触点において、 $R_j = 3 \times 10^7 \Omega$ 、 $R_n = 10^5 \Omega$ 、 $R_s = 10^7 \Omega$ となり、 R_p は、 $10^8 \Omega$ 程度と推定される。よって点接触抵抗は、主として、絶縁膜が破壊された状態での抵抗の変化を説明すると考えられる。また R_p の各項は A_{rc} に反比例し、これは接触電気抵抗法による真実接触面積の評価の基礎を与える。一方、接触抵抗の定量的評価は難しく、接触抵抗という概念では、界面電流透過率の変化を説明できない。

4.5.2 光誘起電流とトンネル現象 真実接触界面に酸化膜や真空層からなる絶縁層が存在し、またこれが十分に薄い($< 5\text{nm}$)場合、界面間の電気伝導は、主としてポテンシャル障壁を介してのトンネル現象によると考えられる。接触圧による抵抗値の急激な変化や、PICが励起電子数に比例することなどからも、このことが推察される。

トンネル電流密度(I_t)は、 A_{rc} と単位面積当りのトンネル確率の積で表される(9)(式(9))。

$$I_t = A_{rc} \exp[-k_t d_i] \dots \dots \dots (9)$$

この時 μ_t は、トンネル障壁による電子のしみ出し距離である(式(10))。

$$k_t = 1/\mu_t = \sqrt{(2E_t m_e / h)} \dots \dots \dots (10)$$

(m_e : 電子の質量, $h = h/2\pi$, h : プランク定数, d_i : 絶縁層の厚さ)

これらの式より、接触圧によるPIC増加の原因として、(1) 真実接触面積の増加、(2)ポテンシャル障壁の幅(d_i)の減少、(3)接触させる固体や介在物の仕事関数や電子の状態密度の相違等によるトンネル確率の変化が考えられる。しかし、PICの変化から、これらの要因は明確には分離できない。Siの仕事関数(ϕ)が 5.25eV 、励起光のエネルギー(E_p)が 1.41eV であることから、ポテンシャル障壁の高さ($E_t = \phi - E_p$)は、 3.84eV と推定され、式(10)より、 $\mu_t = 0.1\text{nm}$ となる。真実接触面積が p_m より求められた A_{rc} に等しく、接触圧に対する I_{api} の増加は、主として A_{rc} の増加によると仮定した場合、 $\beta_t / \theta_{rc} (= 1.7 \times 10^{-6} \text{ m}^{-2})$ は、単位面積当りの真実接触面におけるトンネル確率を表す。トンネル確率の計算から、 d_i は、 1.3nm と見積もられ、一般に考えられているSi酸化膜の厚さに等しい。電子論により固体界面の現象を捉えた場合、真実接触面における面積や絶縁層の厚さの区別は重要ではなく、むしろ γ_t の変化をパラメーターとする

必要がある。

4.6 他の接触状態の測定法との比較 表1に、今回提案したPICによる接触界面評価法(PIC法)と接触電気抵抗測定法(CR), 接触顕微鏡(CM)による像観察, 超音波透過率測定法(UT)との比較を示す。PIC法の利点として, 固体間の真実接触点の2次元分布が得られること, 固体間接触を界面電流透過率から評価できること, 介在物や雰囲気に影響されないこと, 接触面垂直方向の分解能が高いこと等が挙げられる。

Table 1 Specific properties of interface evaluation methods between solids.

	PIC	CR	CM	UT
image resolution	$> 10 \mu\text{m}$	-	$> 1 \mu\text{m}$	-
vertical resolution	$< 5\text{nm}$	$< 5\text{nm}$	$< 20\text{nm}$	$< 5\text{nm}$
time resolution	$> 0.1\text{s} \sim 1 \mu\text{s}$	$> 1 \mu\text{s}$	$> 10\text{ms}$	$> 1 \mu\text{s}$
physical property	electron	electron	phonon	phonon
material dependence	semiconductor/metal	metal	glass/metal	-

Methods of photo-induced-current (PIC), contact resistivity (CR), contact microscopy (CM) and ultrasonic transmittance (UT).

今回の手法と同様に真実接触面の2次元分布を与える接触顕微鏡法は, エバネッセント光を利用するため接触面垂直方向の分解能⁽¹⁰⁾(真実接触とみなされる固体間垂直方向の距離)は, 位相のずれを利用しても20nm程度と粗い⁽¹¹⁾。そのため現実の摩擦等の現象に寄与しない離れた面も真実接触面として評価する可能性がある。それに対し, PIC法では, 摩擦現象により近い垂直距離($< 5\text{nm}$)における接触面の評価が可能となった。一方, 接触電気抵抗はPICと比例関係にあり, ほぼ等しい物理量を与えると考えられるが, 電流値が小さいことから, 精度は低い。また, 超音波透過率は, 界面の介在物も含めた接触状態を評価することから, より総合的な摩擦現象の評価に適しているが, 固体間の電子の振る舞いの変化を評価するには適さない。

一方, PIC法の欠点として, 面内方向の空間分解能が $10 \mu\text{m}$ 以上と小さいこと, 測定可能な材質の組み合わ

せが(半導体/金属)と限定されることが挙げられる。また真実接触面の分布を得るには, レーザ光を走査させる必要があるため, 短時間における変化を評価するには適さない。一方, ビームを広げたレーザを全面に照射することにより得られる広い面からのPICは, 全体からの接触状態の変化を瞬時に与えるため, 静止摩擦から動摩擦への遷移過程といった時間分解能の高い測定にも適応可能となる。PICを利用した接触状態の評価は, 界面の絶縁体の種類によらないことから, 乾燥摩擦ばかりではなく, 潤滑剤の存在する固体界面の相互作用の評価についても有用であると考えられる。今後, 接触面の形状, 粗さ, 硬さや接触圧とPIC像との関連を含めたさらなる解析が望まれる。

5. 結論

固体接触させた半導体/金属に, 半導体裏側からレーザ光を照射することにより生成するPICを評価する装置を作製した。様々な条件におけるPICの変化と固体間の接触状態との関係について考察し, 以下の結論を得た。

1. 接触圧によるPICの増加は, 半導体/金属界面の真実接触面積の増加やポテンシャル障壁を介してのトンネル確率の変化として説明された。PIC像の平均値(I_{api})が, 接触圧に比例することから, 平均界面電流透過率は, 凝着理論を拡張した形で理解することができた。
2. 各接触点のPICが示す独立性, 可算性および光照射点からの距離依存性は, 光誘起電流の拡散や減衰の効果として説明された。これらの性質から, 照射位置を走査させて得られるPIC像により, 約 $10 \mu\text{m}$ の分解能を持つ半導体/金属界面の真実接触面の分布を評価することができた。
3. 平均界面電流透過係数は, 真実接触面積と見かけの接触面積との比よりも小さく, 真実接触面に約1.4nm程度の絶縁体の存在が推定された。
4. PIC法は, 真実接触面の分布や界面電流透過率をパラメータとした接触界面の状態が議論できるなど, 他の手法と比べても特徴のある手法と考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり, 有意義な議論をいただきました三重大学工学部, 中村裕一氏と実験にご協力いただきました野田昌彦氏に感謝の意を表します。

文献

- (1) Tamai, T, Trans.Inst.Electron.& Commun. Eg. Jp. Sect.E, **68**, 4 (1985) 241-242.
 - (2) 河野彰夫・赤松良信・曾田範宗, 応用物理, **53**, 8 (1984) 733-735.
 - (3) Yamaguchi, K, Uchida, M. and Abraha, P., Surf.Sci., **377-379** (1997) 1015-1018.
 - (4) Krolkowski, J. and Szczeppek, J., Wear, **148**, 3 (1991) 181-195.
 - (5) 木村好次・岡部平八郎, トライボロジー概論, (1988) 29-30, 養賢堂.
 - (6) Sze, S.M., *Physics of Semiconductor Devices*, (1981) 288-292, John Wiley and Sons, New York.
 - (7) Gaworzewski, P, Roos, B., Hoppner, K and Hoppner, W., J.Appl.Phys., **79**, 1 (1996) 129-133.
 - (8) Sze, S.M., *ibid.*, 297-307.
 - (9) エリ ランダウ・イエリフシツ, 量子力学, (1975) 80-83, 東京図書.
 - (10) 河田聡, 光学, **21**, 11 (1992), 766-779.
 - (11) 桜井好正, 機械の研究, **21**, 1 (1969), 12.
-