

半導体上金属層の表面エレクトロマイグレーション

安 永 均

電気通信大学電気通信学部 〒182 調布市調布ヶ丘 1-5-1

(1988年2月8日 受理)

Surface Electromigration of Metal-Covered Semiconductor

Hitoshi YASUNAGA

Department of Electronic Eng., The University of Electro-Communications
Chofu-shi, Tokyo 182

(Received February 8, 1988)

A new type of surface electromigration of metal covered semiconductors was recently found and investigated by the author's group. The experimental method and some typical results are described in comparison with the conventional electromigration. The specimens used for the observation of this phenomenon are In, Ag, Sb and Sn pads with a thickness of several monolayers evaporated on cleaned Si(111) substrates of 7×7 . The following phenomena were observed by the scanning Auger electron spectroscopy. Movement of the pad toward the cathode occurs with the application of dc current through Si substrate. A characteristic layer with a uniform thickness and structure proper to the transport grows on the cathode side of the pad during the supply of dc current.

1. 緒 言

エレクトロマイグレーション (Electromigration または Electrotransport) は電氣的な力による質量輸送現象である。従来この現象としてよく知られているものは、金属中に大電流を流したとき金属物質が電流と反対または同方向に輸送される現象である^{1,2)}。最近われわれはこれに関連する新しい現象を見出した³⁾。この現象の詳細は後述するが、その概念を Fig. 1 に示す。Si (111) 清浄表面の一部に蒸着した薄い In 膜 (a) が、基板半導体内の直流通電によって電流方向に輸送され (b)、膜の陰極側では、一定の膜厚と構造をもつ金属層が、半導体表面上を浸出成長しながら拡がっていく。これに対し陽極側の端の位置は不動である。この現象もエレクトロマイグレーションと見なすことはできるが、その様態は従来から知られているものと比べて基本的に違っている。その後、われわれは他の多くの金属元素にも類似の輸送現象があることを見出し、これが普遍性の高い現象であることを次第に知るようになった。この新し

い輸送現象は、内容から考えて表面エレクトロマイグレーション (Surface Electromigration) と呼ぶのがふさわしい。以下では従来のエレクトロマイグレーションと区別してこのように呼称する。

本解説は、この表面エレクトロマイグレーションを従来のエレクトロマイグレーションと対比しつつ定性的に説明することを目的としている。これについての定量的実験や理論的解析は今後の研究を待たなければならない。以下では、まず、従来のエレクトロマイグレーションについて概説する。読者に表面エレクトロマイグレーションの特質を認識理解してもらうには、従来のものについてある程度予備知識を必要とする。しかし、わが国には手頃な解説書などが見当たらない。そこで敢えてここに書き加えることにした。次いで実験方法を比較的丁寧に説明する。初めて表面エレクトロマイグレーションを観察しようとするものの指針になることを意図している。続いて、Si (111) 上における In, Ag, Sb, Sn 系の実験結果⁴⁾を紹介する。この4元素は、オージェ感度が高いので観察が容易であり、しかも対照的な応答を示し

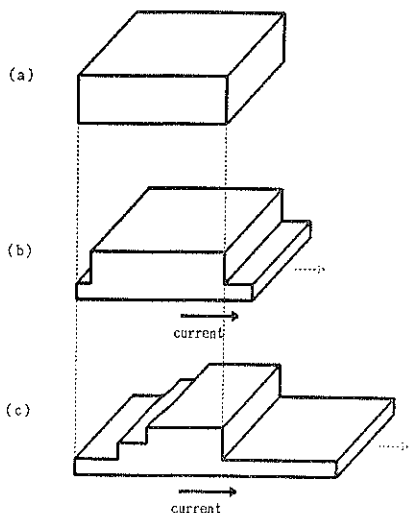


Fig. 1 Schematic diagram of surface electromigration. A pad of In thin film evaporated on clean Si(111) (a) is transported toward cathode with the application of dc current through the substrate (b). On the cathode side of the film a characteristic In layer with a uniform thickness and structure is growing (c). On the anode side the edge of the film remained fixed.

て興味深い。他の金属元素 Be, Al, Ti, Au, Ni などについても調べているが、これらの紹介は別の機会にゆずる。最後に、表面エレクトロマイグレーションによる固有層の形成過程を考察する。

2. 従来のエレクトロマイグレーション

従来、エレクトロマイグレーションといえば、導体に電流密度約 10^4 A/cm^2 以上の直流電流を流したときに起こる母体原子、成分原子あるいは不純物原子の輸送現象を指す。この質量輸送は試料の形態によって二大別される。一つはバルク状導体におけるエレクトロマイグレーションであり、他は薄膜多結晶導体のエレクトロマイグレーションである。

試料形態がバルク状導体、たとえば、通常の針金状導線の場合、これに 10^4 A/cm^2 程度の直流電流を流すと、エレクトロマイグレーションが起り、その様子が観察できるようになる。この際、導線の温度は融点近くに達しているので、これ以上電流を増やすことはできない。この試料形態でのエレクトロマイグレーションを観測する方法の一つは、Fig. 2 示すように、質量輸送による針金直径の変化、あるいは、導線に一定間隔で予め入れておいた刻みの間隔の変化を測定する方法である。針金

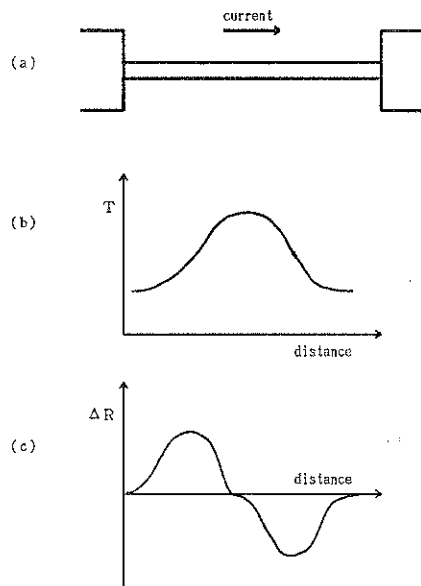


Fig. 2 A method of observing electromigration in bulk materials. (a) A wire specimen. (b) Distribution of temperature T along the wire. (c) Change in diameter of the wire ΔR as a result of electromigration.

の両端は熱の吸い込みに繋がっているため、(b)のように、温度分布は中央が高く両端が低くなる。温度が高いほど原子の移動度は大きいので、質量フラックスは中央部で大きく、両端に近づくにつれて小さくなる。この結果、質量フラックスの発散が生じ、輸送方向が電流方向と逆の場合には、(c)のように、右側は細く（刻みの間隔が狭く）なり、左側では太く（広く）なる。輸送をもっと直接的に観察するには、Fig. 3 のように、位置基準になるマーカー（輸送されない）と被輸送物質の放射

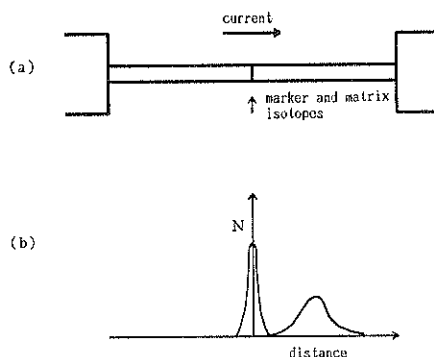


Fig. 3 A direct method of observing electromigration. (a) Radioactive isotopes of matrix and immobile marker are inserted in the specimen. (b) Distribution of the concentration N of matrix and marker isotopes.

性同位元素を左右から導線ではさみ(a), 直流電流を流した後, 各同位元素の導線内での分布(b)を調べればよい。このようなバルク状物質における原子の輸送経路は格子間を通り抜けたり, 格子欠陥を介して格子点をたどったりなど, 一般に, 3次元結晶格子の中にある。このため移動度はきわめて小さい。

エレクトロマイグレーションを引き起す駆動力には, 一般に, 静電力とキャリア風(carrier wind)が寄与すると考えられている。静電力はイオン状態になっている原子に働く外部電界の力である。キャリア風というのは, 電流キャリアが電界から得た運動量を被輸送原子に衝突伝達することによって発生する力である。いわば, キャリアに対する摩擦力の反作用の力である。電流キャリアが電子の場合, 静電力と電子風の向きは反対である。実際の物質輸送が, 多くの場合, 陰極から陽極へ向うことは, 電子風による力が静電力より勝っていることを意味する。

駆動力を定量的に表現するため, 各被輸送原子に働く力 F を,

$$F = qZ^*E \quad (1)$$

と表す。 q は素電荷 ($q > 0$), Z^* は有効電荷数, E は外部電界である。 Z^* は静電力を表す有効電荷数 Z_{el} とキャリア風を表す有効電荷数 Z_{wd} とからなる。

$$Z^* = Z_{el} + Z_{wd} \quad (2)$$

Z_{el} は, キャリアによるスクリーニングと被輸送原子の格子位置に応じて, 0 から原子価までの値をとる。 Z_{wd} は,

$$Z_{wd} = \pm \frac{n\rho_d}{N_d\rho} \quad (3)$$

で与えられる。符号はキャリアが正孔のとき+, 電子のとき-を意味する。 n はキャリア数濃度, N_d は被輸送原子数濃度, ρ は抵抗率, ρ_d は被輸送原子だけが散乱中心となる場合の抵抗率である。

(3)式は以下のようにして導出される。キャリアが衝突から次の衝突までの平均時間 τ の間に電界から得る運動量 Δp は,

$$\Delta p = \pm qE\tau = \pm qE\lambda/v \quad (4)$$

である。ここで λ はキャリアの平均自由行程, v は微視的平均速度である。キャリアは衝突のときこの運動量を被輸送原子に伝達するとすれば, その原子が受ける力は, 単位時間に伝達される運動量の総和,

$$F_{wd} = \pm n\sigma_d v q E \frac{\lambda}{v} = \pm qEn\lambda\sigma_d \quad (5)$$

で与えられる。 σ_d は被輸送原子がつくる衝突断面積である。(1), (2), (5)式より,

$$Z_{wd} = \pm n\lambda\sigma_d \quad (6)$$

が得られる。他方, ρ_d および ρ は,

$$\rho_d = \frac{m}{nq^2\tau_d} = \frac{m}{nq^2} N_d\sigma_d v \quad (7)$$

$$\rho = \frac{m}{nq^2\tau} = \frac{m}{nq^2} \frac{v}{\lambda} \quad (8)$$

で与えられる。ここで m はキャリアの質量, τ_d は被輸送原子だけによるキャリアの衝突時間である。(7), (8)両式から,

$$\rho_d/\rho = N_d\sigma_d\lambda \quad (9)$$

である。この関係を(6)式に入れると求める式(3)が導かれる。

電子風の有効電荷数 Z_{wd} を概算してみよう。金属の抵抗率 $\rho = 10^{-8} \Omega\text{m}$, フェルミエネルギー $E_F = 1\text{eV}$, したがって $v = (2E_F/m)^{1/2} = 0.6 \times 10^6 \text{ m/s}$ を採用すると, (8)式から $n\lambda$ が求まり, $\sigma_d = 10^{-20} \text{ m}^2$ として,

$$Z_{wd} \approx -21 \quad (10)$$

が得られる。 Z_{el} は1の程度であるから, 明らかに電子風は静電力に勝る。実際の Z^* はこの程度になっているものが少ない。たとえば, Au, Ag, Al, In の Z^* の実測値として, それぞれ, $-8 \sim -10$, $-21 \sim -8$, $-30 \sim -12$, -12 が報告されている¹⁾。被輸送原子がキャリアから受ける衝突の頻度は, 原子振動1周期当り60回にも達する。したがって運動量伝達による力は, 暗黙に仮定していたように, 連続力と見なしてよいことがわかる。

次に, 試料形態が薄膜多結晶導体のエレクトロマイグレーションについて述べよう。この型のエレクトロマイグレーションは, もともと半導体集積回路における微細なAl薄膜導線の断線や短絡などの原因を探っている過程で見出されたものである。この場合の試料の特徴は, もともと効果的な熱の吸い込みである熱伝導性基板の上に, 結晶粒界をもつ多結晶薄膜導線が密着していることである。このため, 電流密度を 10^7 A/cm^2 までも高められ, しかも温度は融点に達することはない。また, 輸送経路は, 移動度を3次元結晶格子内よりはるかに大きい結晶粒界を通るコースが支配的になる。これらのため, 輸送量は著しく増大し, 独特な巨視的欠陥が配線上に現われる。**Fig. 4** はこれを概念的に示したものである。陽極

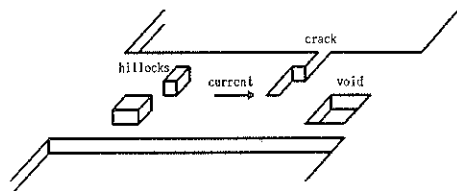


Fig. 4 Failures in thin film conductors caused by electromigration.

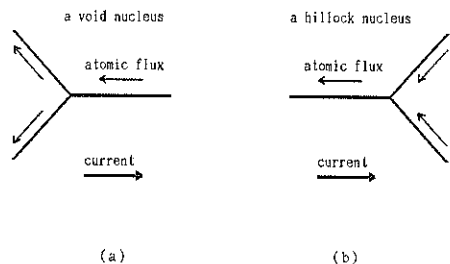


Fig. 5 Triple points at grain boundaries as a void nucleus and a hillock nucleus.

側にヒロック (hillock) と呼ばれる物質の盛り上がり、陰極側にはボイド (void) と呼ばれるくぼみやクラック (割れ目) が発生する。さらに通電を続けると、ヒロックやクラックが成長して導線は断線に至る。また、ヒロックは隣接の配線と短絡を起すこともある。

このような巨視的欠陥が局部的に現われる原因は、まず、Fig. 5 に示すように、原子フラックスが分散あるいは集束する結晶粒界の 3 重点において、フラックスの発散により、それぞれボイドあるいはヒロックの核が形成されるためである。しかし、結晶粒が同じ大きさでそろって並び、温度が一樣であれば、巨視的には均質な輸送のみが起るので、局部的欠陥の発生は考えにくい。これが起こるためには、さらに結晶粒の大きさや配列方位の不均質性、通電時の試料内温度分布などが重要な寄与をする。

このような薄膜導線におけるエレクトロマイグレーションの有効電荷 Z^* は、バルクの場合とほぼ同じ値が報告されている²⁾。したがって、駆動力はバルクでも薄膜でも同じとみなしてよい。原子の移動度 μ ($\equiv$ ドリフト速度/外力) はアインシュタインの関係より

$$\mu = D/kT \quad (11)$$

で与えられる。拡散定数 D は 3 次元結晶格子内と結晶粒界で著しく異なり、薄膜における移動度、速度はバルクのそれらに比べてはるかに大きい。

3. 表面エレクトロマイグレーションの実験方法

3.1 試 料

表面エレクトロマイグレーションを観察、測定するには、その方法に応じた構造の試料を準備しなければならない。われわれは、走査オージェ電子分光法によって観察、測定することを念頭に、Fig. 6 に示す試料をつかった。これは、短冊形の n 形 Si 基板の清浄表面の中央部に微小面積の金属膜を薄く蒸着したものである。

これをつくるには、まず、鏡面研磨した Si(111) ウェハから図に示す寸法と方位の短冊形をガラス切りで

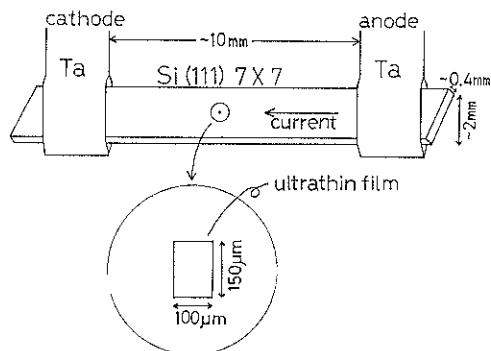


Fig. 6 A specimen used for the observation of surface electromigration.

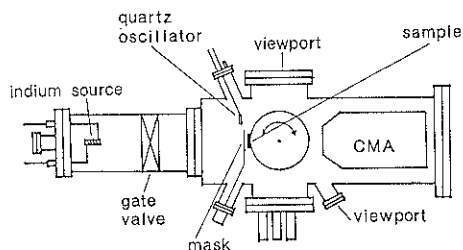


Fig. 7 UHV system for the observation of surface electromigration by scanning AES.

切り出し、Ta 板で両端をよく接触するようにして保持する。これを 3 直交方向微動、水平面内回転可能な試料台に取り付け、Fig. 7 の超高真空装置に挿入する。ここではベキング排気により 6×10^{-8} Pa 以下の圧力の真空を達成する。この後、この真空内で、基板表面の清浄化、金属膜の蒸着、表面エレクトロマイグレーションのための通電と観察の繰り返しなどを行う。途中試料を外気にさらすようなことは一切しない。

Si 基板表面を清浄化するには、保持用 Ta 板を電極として、通電加熱 $1100 \sim 1200^\circ\text{C}$ 、数 10 秒～数分間を行う。半導体の抵抗の温度係数は負であるため、通電加熱には、通常、定電流源を用いる。より簡便には、試料と直列に誘導性負荷、たとえば、スライダックを可変自己インダクタンスとして接続し、それにライン電圧 ac 100 V を直接印加してインダクタンスを調整する。これでも安定な加熱ができる。このような加熱により、自然酸化膜、炭素などが表面から除去され、 7×7 構造の清浄表面が得られる。

続く蒸着では、基板の微小面積にだけ膜をつくるため、既製の Ni メッシュの網目 ($100 \times 150 \mu\text{m}^2$) 一つを残し他をすべてふさいだものをマスクとして用いた。蒸着膜のエッジを鋭くするため、マスクは試料面 1 mm 以内に接近させ、他方、蒸着源と基板間の距離を長くとり

400 mm とした。さらに、蒸着源の蒸発部の拡がりをしてできるだけ小さくした。蒸着時の基板温度は室温である。質量膜厚は 6 MHz 水晶振動子の発振周波数の変化から求めた。蒸着速度は $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 単原子層/秒である。単原子層 (ML) は基板表面原子数面濃度を基準にした蒸着原子数面濃度の割合であり、Si (111) 面上では 1 ML は 7.8×10^{14} 原子/cm² に相当する。

3.2 観察測定法

上記試料における輸送過程を観察するのに用いた方法は走査オージェ電子分光法である。この方法は固有エネルギーのオージェ電子の存否から指定元素の2次元分布及びその強度から 0 ～数 ML の範囲の膜厚分布を分析することができる。他方、表面エレクトロマイグレーションは数 ML の蒸着膜が輸送により拡がりながら次第に薄くなっていく現象であるから、この過程を観察するのに走査オージェ電子分光法ほど最適なものはない。また、われわれの用いた分光器の空間分解能は 1 μm 程度であるが、実際の輸送距離は 10～100 μm 、あるいはそれ以上に及ぶので、この点からも本観察法はほぼ満足できるものである。

実際に観察を実行するには、まずはじめに蒸着場所を、2次電子像を頼りに探し出し、分光器の前の正しい位置にセットしなければならない。以後、観察測定が終了するまでこの位置を動かさないよう固定する。次に蒸着したままの膜に対してオージェピーク高の線分析あるいは面分析を行う。線分析の走査方向は、輸送を行わずのために流す電流の方向と同じにする。われわれの装置では、オージェ感度が一様な走査の範囲は約 400 μm であった。これが最初の蒸着面積の上限を決める。

続いて表面エレクトロマイグレーションを行わせる。このためには、基板の清浄化に用いた Ta 電極を使って、基板 Si に直流電流を蒸着金属に応じて $1 \sim 10^3$ mA 供給する。これに伴って基板の温度は $10 \sim 10^3$ °C の範囲に上昇する。このため直流電流の大きさと基板の温度を独立に変えるのは困難である。大きい交流電流によって基板の温度を設定し、小さい直流電流を重ねれば、小さい範囲で直流電流は温度にほとんど影響を与えず変えられるが、実際には、交流による表面エレクトロマイグレーションの影響が大きいので直流の効果が不明になる。傍熱型の加熱法にも諸種の困難が伴うまいといっている。表面エレクトロマイグレーションの輸送過程を観察するには、輸送の途中、通電を一時的に止め、膜厚分布を測定する。これを必要に応じて繰り返せばよい。

オージェピーク高の走査信号は、直接オシロスコープ上で観察することもできるが、走査に伴う雑音が少なくないので、パーソナルコンピュータを用いてデータをため

込み、処理などを行った方が信頼性の高い結果を得ることができる。とくに、オージェ感度の低い元素に対しては、これが有効であり、不可欠とさえいえる。

3.3 出現条件

表面エレクトロマイグレーションが起るためには、基板表面の清浄さと平坦さが不可欠である。上に述べた通り試料を準備しても、この現象がまったくあるいは不十分にしか起らないことがあるが、その主要な原因は上の二つの条件のうち少くとも一つが満たされないためである。

表面エレクトロマイグレーションは基板表面の汚れに敏感である。たとえば、酸化膜で覆われた Si 基板、あるいは清浄化を行わない Si 基板の上では、この現象はまったく起らない。また、オージェ電子分光法で辛うじて検出できるわずかの汚れによっても、基板面上への固有層の成長拡がりは阻止される。したがって、観測時間 2 時間余の間、基板表面の清浄さが維持できるようきれいな真空をつくるのが基本的な重要である。このためには真空容器全体をオープンに入れ、至るところ同時に同じ温度でベーキングすることが望ましい。容器の小部分といえどもベーキングが不十分であれば、そこが汚染ガスの源になることがある。また、蒸着時に予め清浄化しておいた基板表面が汚されないよう配慮することが必要である。蒸着源からのアウトガスをできるだけ少なくするため、ベーキング直後あるいはそれ以前に予めガス出しを行ったり、蒸着源を小さくして消費電力を少なくするのがよい。

基板表面に段差の大きいステップがあると、そこで輸送は阻止される。これを生じないようにするには、基板面の方向をできるだけ結晶面方位に近づける必要のあることはいうまでもないが、清浄化のための加熱時間をいわずに永くしないこと、また、試料の保持を堅固にし過ぎないことにも注意を払う必要がある。高温と基板内の応力はステップの発生など基板の変形を助長するからである。

4. 表面エレクトロマイグレーションの実験結果

4.1 In

われわれが表面エレクトロマイグレーションをはじめて観察した系は Si (111) 7×7 上における In 膜である。その結果の一例を Fig. 8 と 9 に示す。Fig. 8(a) 下段は、4 ML In 膜の蒸着直後におけるオージェマップである。In MNN 遷移 404 eV オージェピーク高に応じた輝度のオシロスコープ像である。上段は、膜の中央部横方向での線分析オシロスコープ像である。縦軸はオー

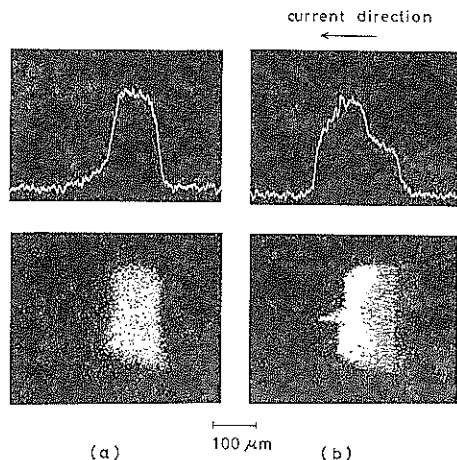


Fig. 8 Auger line analyses and Auger maps of 4ML In pad (a) before and (b) after the application of dc current of 100 mA for 5 minutes.

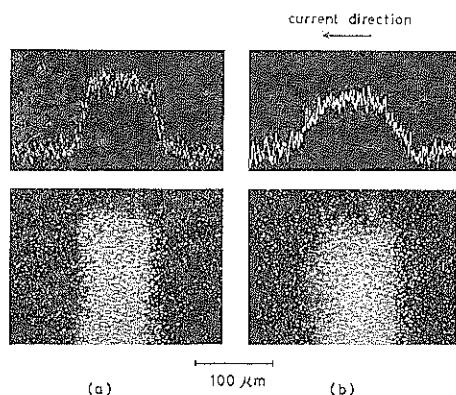


Fig. 9 Auger line analyses and Auger maps of 0.5ML In pad (a) before and (b) after the application of dc current of 100 mA for 4 minutes.

ジェピーク高，横軸は位置座標を表す。これに直流電流 100 mA を 5 分間基板内に矢印方向へ流すと，対応する結果は (b) のようになった。この通電で基板温度は 250 °C に上昇した。(a)，(b) ともに基板上の同一場所を見ている。したがって，In 膜の右端は固定されたままであるが，左端が電流と同じ方向へ動いていることがわかる。電流に垂直な方向へはほとんど動いていない。なお，(b) 下段の In 領域左端突出部は，線分析のため電子ビームを繰り返し走査したところで，電子ビームによっても輸送が行われることを示している。この後の実験では，ビーム電流を 0.1 μA 程度に落とし，走査回数を抑えてこのような電子ビームによる輸送が起らないようにした。Fig. 9 は 0.5 ML In 膜に対して同様な観

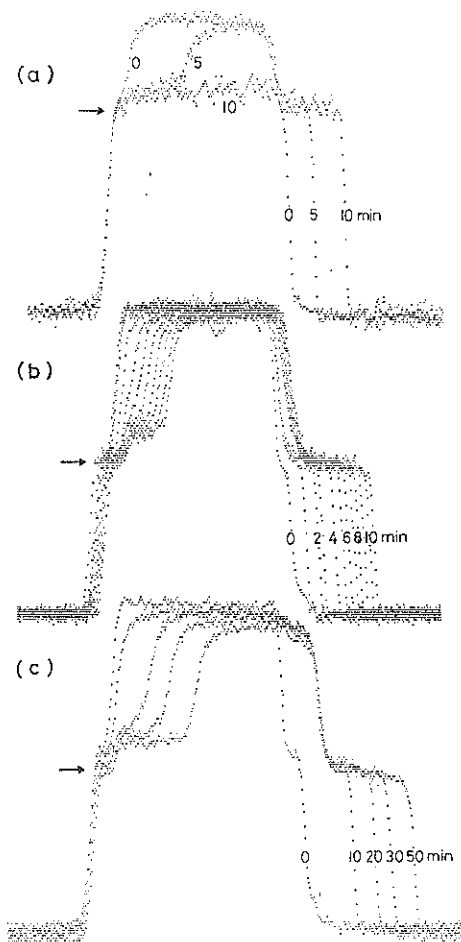


Fig. 10 Changes in shape of In pad of the different thickness with time (indicated by numerals in minutes) following the application of dc current are represented by Auger line analyses. The current was directed from left to right. The deposited region was approximately 100 μm wide. (a) 2 ML, 6 mA (70°C); (b) 3 ML, 8 mA (80°C); (c) 4 ML, 6 mA (70°C).

察を行った結果である。ここでは拡散によると思われる拡がりが見られるが，4 ML におけるような顕著な輸送はない。

以上は表面エレクトロマイグレーションと呼ばれる新しい型の輸送現象が約 1 ML 以上の膜厚の In/Si(111) に見られることを示したものである。

次に，この輸送過程を調べた結果の典型例を Fig. 10 に示す。各オージェ線分析曲線は，数回の走査結果をため込んだものである。Fig. 8 と 9 の 1 回走査の結果と比べて，SN 比が改善されているのがわかる。(a) は 1.5 ML の輸送過程を示している。直流電流 6 mA (70

℃) の通電によって、陰極側の薄膜端から Si 清浄表面上へ、ほぼ一定の膜厚の In 層が侵出成長している。同時に、陽極側では、In の一部が消失して、前方に成長している層とはほぼ同じ膜厚の層が残っている。このエッジは不動である。膜厚が 3 ML (b), 4 ML (c) および観察を行った最高膜厚 20 ML の場合にも、ほぼ同様な過程が起きている。とくに、電流方向に侵出成長していく層の膜厚は、はじめの蒸着膜厚によらず一定であることは注目値する。この膜厚は約 1 ML である。この膜厚がこの系で特別の意味をもっていることは、蒸着直後の線分析曲線に肩となって現われていることからもうかがえる。この膜厚に相当するオージェピーク高の位置を図中矢印で示した。前方に進む固有層の成長速度は、(a) ではほぼ一定であるが、(b), (c) では次第に遅くなる。

表面エレクトロマイグレーションによって新しく形成される層の構造を低速電子線回折 LEED で調べてみると、表面エレクトロマイグレーション固有成長層は 4×1 構造になっていることがわかった。

4.2 Ag

Si(111) 7×7 上 Ag の試料を、In の場合と同じ形状、同程度の寸法でつくり、表面エレクトロマイグレーション過程を観察した。その結果を Fig. 11 に示す。これは 4 ML Ag 薄膜に直流電流 100 mA (200℃) を流したときの輸送過程である。オージェ線分析からみた第 1 の特徴は、蒸着位置におけるオージェピーク高が、蒸着直後の高い値から、最初の通電によって急激に減少していることである。輸送は、In の場合と同様、電流と同じ向きに Si 清浄表面上をほぼ一定膜厚の Ag 層が侵出成長しながら拡がっていく。速度ははじめ速いが

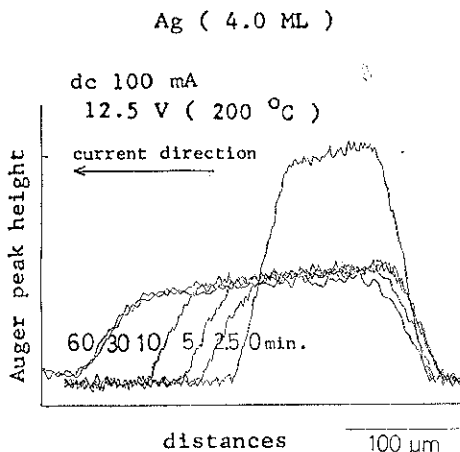


Fig. 11 Changes in Auger line analyses of 4 ML Ag pad with time of supply of dc current.

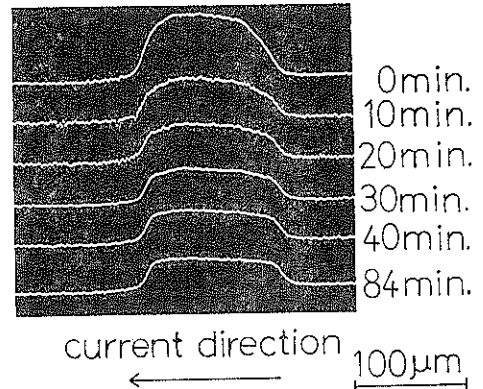


Fig. 12 Auger line analyses of 4 ML Sb pad.

次第に遅くなる。この膜厚はオージェピーク高から約 1 ML と推定できる。これは最初の通電によって減少したピーク高とほぼ等しい。また、侵出成長層の LEED パターンは $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 構造を示し、蒸着位置での通電後の構造も同じであった。陽極側では、はじめのオージェピーク高の減少以外大きな変化はない。より高い温度では、ここで、膜厚の減少と新しい構造の出現が観察されるが、詳細は省略する。

4.3 Sb

Sb は蒸気圧が比較的高いため、真空中で温度をあまり高くすることはできない。このため輸送を行わせる電流は高々 15 mA (130℃) しか供給できなかった。この電流では、Fig. 12 に示すように、Sb は Si(111) 上でほとんど動いていない。

4.4 Sn

Sn は上記 3 元素とは違った振舞をする。4 ML Sn/Si(111) の直流電流 50 mA (170℃) による輸送過程を Fig. 13 に示す。In, Ag に比べて輸送は速いが、陰極側に成長する層は、オージェマップ(a)に見られるように、不均質である。この結果はたまたまのものではない。再現性よく図のような不均質構造が現われる。他方、電流が少ないとき、たとえば 10 mA (110℃) では、いくら長時間流しても蒸着膜はまったく動かない。

5. 考 察

以上の結果に基づき、表面エレクトロマイグレーションの特徴を整理し、従来のものと比較対照してみると Table 1 のようになる。ここで際立った対照の一つは、輸送方向が逆になっていることである。従来のエレクトロマイグレーションで輸送が電流の向きと反対に行われるのは、2 章で説明したように、駆動力が主に電子風によっているためである。これに対し表面エレクトロマイグレーションでは輸送が電流方向へ起きているから、2

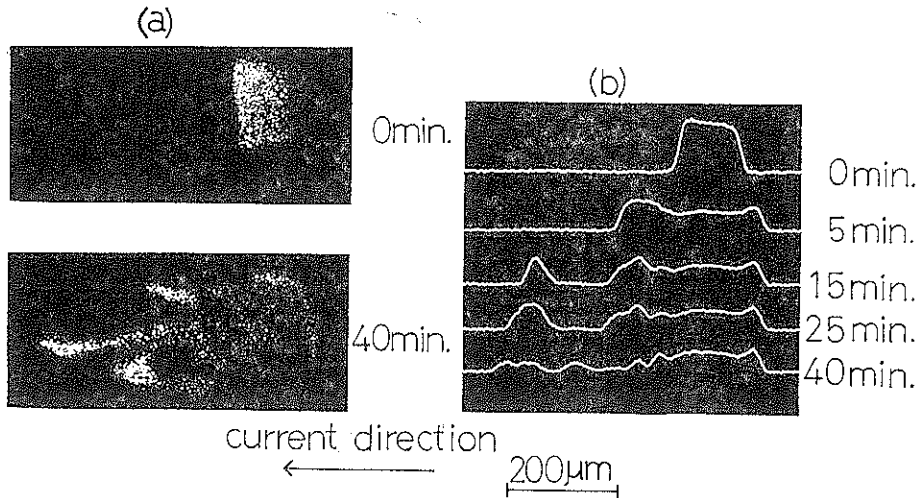


Fig. 13 Auger maps (a) and line analyses (b) of 4 ML Sn pad.

章に従うなら駆動力は静電力かまたは正孔風である。現段階では、いずれが支配的であるか、または第3の力によるかなど不明である。今後究明されるべき課題の一つである。

Table 1 でもう一つ特筆すべき対照は、輸送の結果現われる試料の形態変化である。従来のエレクトロマイグレーションは、薄膜に対してポイド、クラックなどを発生して最終的には断線に至らしめるように、試料に対し破壊的に振舞うが、表面エレクトロマイグレーションは、固有の金属層を形成成長させる働きがあり、試料に対して建設的寄与をする。

表面エレクトロマイグレーションはどのような原子的過程によって建設的な寄与をするのであろうか。以下、上述の実験結果とこれまでに明らかにされている Si 上薄膜成長初期過程の知見に基づいて推量してみよう。まず、Ag が表面エレクトロマイグレーションによってどのような形態変化を起しているか、これを Fig. 14 に示そう。Ag は蒸着直後一様なアモルファス状(a)であるが、通電に伴う温度上昇によって、1 ML の層とその上に点状の島(b)とに分かれる。島がこの層上で占める面積は小さいので、オージェ信号にはこの島はほとん

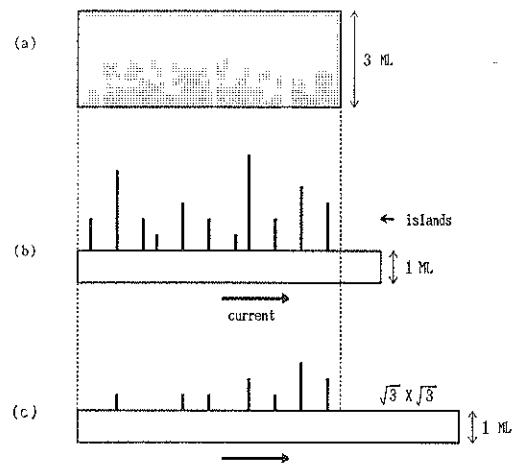


Fig. 14 Atomic processes in the surface electro-migration of 3 ML Ag.

ど寄与しない。これが Fig. 11 における急激な信号の減少の原因である。熱平衡状態では層上で固相(島)と気相(層上孤立原子)が相平衡にある。蒸気圧は固相の体積が小さいほど大きい。いまの場合、島はきわめて小さいと考えられるので層上孤立原子は多い。このように

Table 1 Comparison of the surface electromigration with the conventional one.

Type of electromigration	Specimen	Direction of transport	Driving force	Path	Morphology
Conventional	Bulk	Anode	Electron wind	Lattice	None
	Thin film	Anode	Electron wind	Grain boundaries	Hillocks, Voids
Surface	Ultrathin film on semiconductor	Cathode	?	Surface	A characteristic layer

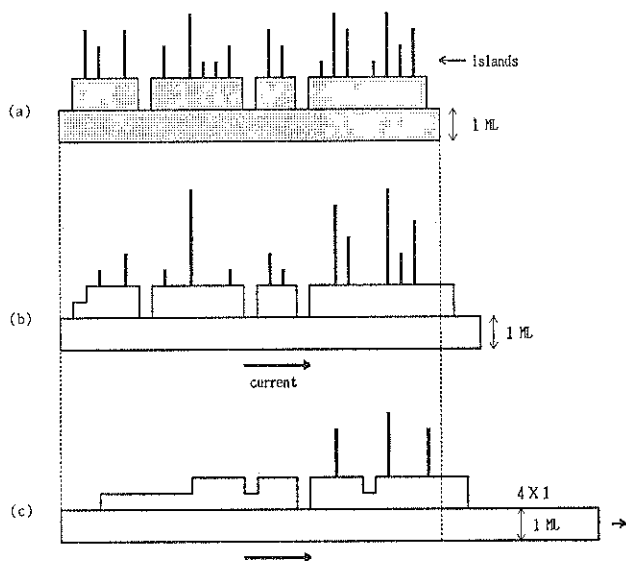


Fig. 15 Atomic processes in the surface electromigration of 3 ML In.

して形成された原子は何らかの駆動力を受け、一部は他の島に再びとり込まれるが、他は島の間隙をぬって層の陰極側エッジに到達する。ここで原子は Si 上清浄表面に敷きつめられ、層の侵出成長に寄与する。このようにして島は全体として次第に減少し新しい層は成長していく(c)。これが Ag の輸送過程の原子的描像である。

In の場合には、膜厚が 2 ML 以上で Fig. 15 に示すように、蒸着直後すでに第 1 層の上に不完全な第 2 層が重なり、その上に島が形成されている。Ag のときと同じように島から第 2 層の上に蒸発(脱離)した原子の一部が輸送または拡散されて陰極側の第 2 層端に来て第 1 層の上に落ち、そこで配列して第 2 層を形成する。同時に第 2 層から第 1 層上に蒸発(脱離)が行われ、一部分は第 1 層右端まで輸送され第 1 層の侵出成長に貢献する。Fig. 10(a)の 1.5 ML では後者のみが見られる。3 ML および 4 ML では、前者、すなわち、第 2 層の右端における成長が通電初期にみられるが、第 1 層の成長の方が速い。

左端では、第 2 層から第 1 層へ蒸発(脱離)が起こり、続いて輸送される。この領域には、左から入ってくる原子がないので次第に第 2 層は失われていく。

Sb では、蒸着直後すでにほぼ layer by layer 構造、すなわち、層が次々と完全に重なった構造になっている。このため輸送を受ける孤立原子は駆動力の及ぶ領域にほとんど存在しない。これが表面エレクトロマイグレーションを示さない理由であろう。

Sn は、バルク状態で 161°C に β - γ 相間の相転移が存在する。直流電流 50 mA (170°C) で激しい輸送が見

られるのに、10 mA (110°C) ではまったく起らないのは、この相転移と密接な関係をもっていると考えられるが、詳細はまだ不明である。

6. 結 語

表面エレクトロマイグレーションは半導体上で金属層が示す新しい表面現象である。これは、学術的には、駆動力は一体何か、基板と金属層がどのような関係にあるときこのような現象は起るか、固有形成層の膜厚、構造、性質はどのようなものか、固有形成層と熱平衡金属層相の関係など、興味深い課題を含み、また、応用への可能性も秘めている。しかし、研究は緒に就いたばかりで、その全貌はベールに包まれている。したがって、本稿では、この現象を広く知ってもらい、今後の研究の発展に資することを期して、表面エレクトロマイグレーションはどのような現象であるかを説明し、その特徴を従来のエレクトロマイグレーションと対比した。また実験方法を丁寧に述べた。本現象への関心が少しでも高められれば望外の幸である。

ここに一端を紹介した表面エレクトロマイグレーションの研究は、主に、電気通信大学電子工学専攻大学院生久保康憲君(現在、東芝大分工場)と迫村茂俊君(日立製作所)が修士論文として行ったものである。両君の貢献を称えたい。

文 献

- 1) H. B. Huntington: "Diffusion in Solids (Recent

- Development)", ed. by A. S. Nowick and J. J. Burton (Academic Press, New York, 1975) Chap. 6.
- 2) F. M. d'Heurle and P. S. Ho: "Thin Films —Interdiffusion and Reactions", ed. by J. M. Poate, K. N. Tu and J. W. Mayer (John Wiley & Sons, 1978) Chap. 8.
- 3) H. Yasunaga, Y. Kubo and N. Okuyama: Jap. J. Appl. Phys. **25**, L 400 (1986).
- 4) H. Yasunaga, S. Sakomura, S. Kobayashi, N. Okuyama and A. Natori: Extended Abst. 18-th Conf. on Solid State Devices and Materials 407 (1986).