

令和元年9月10日現在

機関番号：83401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14376

研究課題名(和文)強磁場によるエレクトロマイグレーションの抑制

研究課題名(英文)Suppression of electromigration under high magnetic field

研究代表者

中嶋 英雄(Nakajima, Hideo)

公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター

・所長

研究者番号：30134042

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：エレクトロマイグレーションは直流電界下における原子の輸送現象である。磁場を電界と直交方向に印加することによって生じるローレンツ力により原子の移動を抑制させることが期待される。本研究では10テスラの強磁場下でアルミニウム薄膜のエレクトロマイグレーションを生じさせ、アルミニウム原子や空孔の移動に伴うヒロックやボイドの生成の有無を調べることを目的とした。その結果、10テスラの強磁場下で $1.8 \times 10^4$  sのエレクトロマイグレーションによってアルミニウム中にヒロックやボイドの生成は観察できなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

集積回路デバイスの金属配線の長時間使用によってしばしば断線事故が起こる。これはエレクトロマイグレーションによるものであり、直流電界により空孔の移動が一方向に生じ空孔が集積してボイドが形成されることに起因している。これを解決するための根本的な対策は未だ見出されていない。このエレクトロマイグレーションを抑制するために強磁場を印加してローレンツ力により電流の曲がりを生じさせ空孔の移動を阻止することができればエレクトロマイグレーションによる断線事故を大幅に低減させることができる。本研究は学術的のみならず、産業界に及ぼす意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：Electromigration is a phenomenon of atomic transport under an electric field (direct current). Lorentz force can be produced by applying a magnetic field in the direction perpendicular to an electric field, which is expected to suppress the atomic movement due to electromigration. The purpose of the present work is to investigate whether hillocks and voids are formed in electromigration in aluminum thin films under the magnetic field. The present result shows that neither hillocks nor voids were observed in the electromigration for  $1.8 \times 10^4$  s under 10 tesla.

研究分野：材料工学

キーワード：エレクトロマイグレーション アルミニウム 薄膜 強磁場 拡散 電界 ボイド ヒロック

### 1. 研究開始当初の背景

集積回路デバイスの金属配線に大電流を流した場合、その金属配線が断線し素子が不良になってしまうことはよく知られている現象でエレクトロマイグレーションと呼ばれている。VLSI のような微細化、大規模化に伴う重要な故障メカニズムの 1 つである。薄膜におけるエレクトロマイグレーションのメカニズムは次のように説明される。薄膜内に電流が流れると、電流は金属原子に散乱し運動量を与えて Electron wind force を付与する。その結果、金属原子は電子の流れる方向（カソードからアノード方向）に移動していき、カソード側にポイド、アノード側にヒロックやウイスカーを形成する。薄膜における断線故障は、配線内の質量移動に不均一が生じた場合に起こる。この質量移動の不均一は温度、電流密度、あるいは結晶粒界のトリプルポイントのような金属イオンの移動度の不均一が原因で起こることが知られている。これを抑制するために薄膜に合金原子（アルミ薄膜では Si や Cu 添加）を添加して結晶粒界に偏析させる方法などの対策が取られているが、完全な解決には至っていない。この問題を解決するために強磁場を負荷して異常 Hall 効果により電流に曲がりを生じさせ金属原子の移動を阻止することができればエレクトロマイグレーションによる故障を大幅に低減させることができるという着想に至った。つまり、強磁場によってアルミニウム薄膜のエレクトロマイグレーションを阻止させる方法を見出し、これによって集積回路の飛躍的な長寿命化が期待できる。

### 2. 研究の目的

金属薄膜の膜面に垂直に磁場をかけると電流の方向が曲がる、いわゆる Hall 効果が起こる。金属での Hall 効果は半導体に比べてたいへん小さいので、イオン流にかかる力も小さい。しかしながら、金属に Pt などの重い金属を数パーセント加えると、Hall 効果に類似の、電流の曲がりが生じる。それによってイオン流がカソードからアノード方向ではなく、その垂直方向に偏向させられると期待できる。それによってポイド、ヒロックやウイスカーの形成が大幅に抑制されると考えられる。本研究ではアルミニウム薄膜に Pt を添加しエレクトロマイグレーションによるポイド、ヒロックやウイスカーの形成が抑制されるかを詳細に調べ、Hall 効果によるポイド、ヒロックやウイスカーの発生抑制メカニズムの解明を行う。

### 3. 研究の方法

既存の超電導マグネットを用いた強磁場発生装置のボア内に、真空チェンバーを設置した。そのチェンバーには白金抵抗式の電気炉を取り付け、補助加熱用ヒーターを設置した。多くの薄膜のエレクトロマイグレーション実験では薄膜に直接通電を行なうために、局所的なジュール熱が発生し、急峻な温度勾配が薄膜に生じる。そのことによってエレクトロマイグレーションによる効果以外に、熱勾配が駆動力になる原子移動（熱拡散、サーマルマイグレーションと呼ばれる）や熱ひずみによるストレスマイグレーションも発生して現象を複雑化させている。そのために補助加熱用ヒーターを設置した。その装置の外観を図 1 に示した。

チェンバー内には薄膜を取り付ける試料ホルダーに電流接続端子、熱電対接続端子を取り付けた。図 2 には超電導マグネットの中心部分に試料を取り付けるための試料ホルダー

を示した。



図 1 超電導マグネット内に設置されたエレクトロマイグレーション実験装置

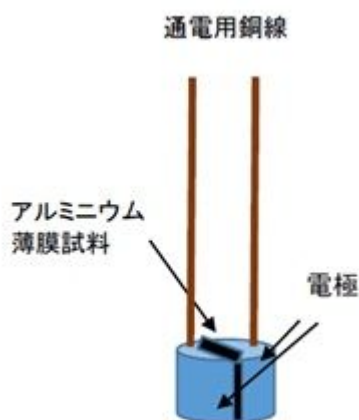


図 2 エレクトロマイグレーション試料ホルダーおよびアルミニウム薄膜試料モデル図

図 3 はエレクトロマイグレーション電極部の試料ホルダーとアルミニウム薄膜試料の外観写真である。試料には  $0.1\ \mu\text{m}$  厚さのアルミニウム薄膜を既存の蒸着薄膜作製装置を用いて作製した。基板にはパイレックスガラスを用いた。所定のサイズに切断した後、試料ホルダーに取り付け電流端子、熱電対を取り付けた。



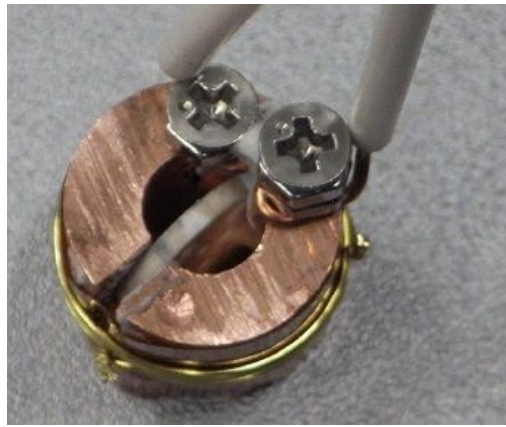


図3 試料ホルダーおよび試料の外観

#### 4. 研究成果

ローレンツ力により原子の移動を抑制させるために、磁場を電界と直交方向に印加した。本研究では10テスラの強磁場下でアルミニウム薄膜のエレクトロマイグレーションを生じさせ、アルミニウム原子や空孔の移動に伴うヒロックやボイドの生成の有無を光学顕微鏡および走査電子顕微鏡によって調べた。電流密度は  $2.5 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup> であった。その結果、10テスラの強磁場下で  $1.8 \times 10^4$  s のエレクトロマイグレーションによってアルミニウム中にヒロックやボイドの生成は観察できなかった。

強磁場発生装置(超電導マグネット)の制御装置の関係で、安定化された定常強磁場発生の時間的制約があり、これより長時間のエレクトロマイグレーション実験ができなかった。今後、定常強磁場の安定化制御装置を設置して、より長時間の運転が可能な状態でエレクトロマイグレーションの実験を遂行していく予定である。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

中嶋 英雄 (NAKAJIMA, Hideo)

(公財)若狭湾エネルギー研究センター・所長

研究者番号: 30134042

##### (2)研究分担者

安永 和史 (YASUNAGA, Kazufumi)

(公財)若狭湾エネルギー研究センター・

研究開発部・主任研究員

研究者番号: 20404064

(3)研究分担者

鈴木 耕拓 (SUZUKI, Koutaku)  
(公財)若狭湾エネルギー研究センター・  
研究開発部・主査研究員  
研究者番号: 40705612

(4)研究分担者

前川 禎通 (MAEKAWA, Sadamichi)  
(国研)理化学研究所・創発物性科学研究センター・特別顧問  
研究者番号: 60005973

(5)研究分担者

石神 龍哉 (ISHIGAMI, Ryoya)  
(公財)若狭湾エネルギー研究センター・  
研究開発部・主任研究員  
研究者番号: 10359242