

氏名	松山 英也
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第 8864 号
学位授与年月日	平成 30 年 11 月 30 日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	

### 低温長時間でのストレスマイグレーション故障の検証

主査	筑波大学教授	博士(工学)	大野裕三
副査	筑波大学教授	工学博士	上殿明良
副査	筑波大学准教授	工学博士	谷本久典
副査	筑波大学准教授	博士(工学)	蓮沼隆
副査	筑波大学特命教授	工学博士	山部紀久夫

### 論文の要旨

審査対象論文は、最先端半導体集積回路におけるストレスマイグレーション Cu 配線故障に関する問題に、劣化機構解明の観点から、低温の室温長時間放置試料に対する評価・解析に基づき、検証および劣化モデルを提案したものである。第 1 章での序論に続き、第 2 章で本研究の目的を述べている。さらに、第 3 章では、加速試験温度領域での試験結果、第 4 章では室温長時間放置試料の物理的評価についての実験結果をまとめ、モデル構築へとつなげている。第 5 章では、研究結果に基づき、高信頼化に向けた対策を議論している。

第 1 章では、IoT あるいは AI といった応用技術のすさまじい発展に伴い、それを実現する半導体集積回路の高密度化・高信頼化が必須であり、特に配線では、エレクトロマイグレーションとストレスマイグレーションによる故障を解決することに注力されている実情を、いくつかの報告例を参考に論じている。

第 2 章では、ストレスマイグレーション故障の統計的特長および提案されているモデルを紹介するとともに、それらのモデルにおいて、検証が不足し、更なる高信頼化に向けて、検証しておくべき点を指摘し、研究目的を示している。

第 3 章では、Cu のストレスマイグレーション故障がそのプロセスや配線周辺構造などに大きく、試験結果が左右されることから、長期信頼性試験と連携するように、加速試験試料を同様のプロセス・構造を用いて作成している。試験そのものは、実デバイスと同様に、配線の電氣的に抵抗変化から故障を定義し、多数の試験結果の統計処理による信頼性評価結果を示し、故障箇所の走査型電子顕微鏡による観察結果を紹介し、故障は上下の配線をつなぐ VIA コンタクト下のボイド(空隙)の発生によるものであることを明らかにしている。配線幅が太くなることにより、Cu 配線中の粒界の三重点でのボイドがもっとも耐性が無く、

続いて粒界のボイド、粒内ボイドの順で信頼性が高まり、電氣的な寿命試験の結果がばらつきやすいことを説明している。さらに、VIA 径と同等の細い配線では、VIA 下でも配線端とほぼ接していることから、粒界より配線端部を介した Cu 原子もしくは空格子点の移動という唯一の要因に支配されており、寿命が長く、唯一の劣化機構となり、そのバラツキが小さくなることを説明している。

第4章では、第3章と同レベルの製造プロセス技術を用いているが、ストレス評価や走査型電子顕微鏡観察や計算機シミュレーションとの比較ができるように構造を単純化し、室温で12年間ほど放置した試料を評価していることを述べている。ストレス解析では、種々の配線幅を用いた試料をX線回折法により、配線の長手方向、幅方向、厚さ方向のストレス成分を示している。結果、室温長時間放置前後ともに応力は、配線が太いほど幅あるいは長手方向のストレスが大きくなること、Cu配線とCap-SiC膜との熱膨張係数差がストレスの主因となっていること、応力測定結果が算出されたCu配線内ひずみの変化がボイド発生により緩和されていることを示し、さらに定量的にはボイド体積と緩和ひずみ量からの体積収縮量の見積もり結果が発生したボイドの体積見積もりとオーダー的に一致することを明らかにしている。また、配線端部での応力が大きくなることも示している。また、加速試験時に発生したVIA下ボイドの体積との対応関係を明らかにしている。さらに、これらの室温長時間放置試料によって明らかにされた応力あるいはその分布評価の結果によって、加速試験のボイド観察結果と室温長時間放置試験のストレス緩和評価との対応関係を実証することに成功している。つまり、従来、推測の域から抜け出せなかった応力緩和とボイド発生との関連を実験的に証明したと述べている。また、この結論は、測定困難な応力分布を計算機シミュレーションすることにより、Cu配線中のCu原子あるいは空格子点の移動に対する応力分布の影響を論じることを可能とし、それを用いることでボイドの成り立ち機構の根拠としている。

第5章では、本研究の結果として、今後の更なる高信頼化に対する対策の、工学的な方向性を示して、まとめとしている。

## 審 査 の 要 旨

[批評]

本論文では、加速試験と低温長時間試験における故障解析と、配線応力解析および応力シミュレーションを融合させている。また、主にCap膜とCu配線の熱膨張係数差に起因する引っ張り応力あるいは応力勾配が、原子空孔の移動(拡散)を加速することに因り、ボイド発生を加速するという推測を実験的に明らかにしたものである。また、空格子点の密度解析から、配線の高信頼化の道筋を明らかにしている。

本論文では、加速温度領域での信頼性試験および切断原因としてVIA下に現れるボイド(空隙、Cu配線中の原子空孔の集積したもの)の観察を行い、従来から報告されている寿命分布は配線幅が太いほど短く、そのバラツキが大きくなることが、太い配線幅ではボイドと粒界の關係に依存していること、細い配線幅では配線端部を介したCuあるいは空格子点の拡散によることを説明することに成功している。

本論文では、VIAの無いストレートの、種々の幅をもつCu配線の、室温放置前後のX線回折法による応力解析が可能な試料を用いることで、配線の長さと同幅方向の内在ストレスが配線幅とともに大きくなることを明らかにし、配線の寿命試験の結果との対応を示すことに成功している。

本学位論文の中心的な成果として、ストレート配線内のボイドの位置および大きさ等を多数のSEM(走査型電子顕微鏡)観察から、配線体積に対する全ボイドの総体積を算出し、VIAコンタクトがある加速試

験のボイド体積との比較を行い、両者の明確な相関を得ている。結果として、ボイド発生による応力緩和が、加速試験における信頼性劣化をもたらすことを検証したこととしている。このことは、別途求められた配線および絶縁膜等の関連物質の物性を用いた Cu 配線の内在応力の配線幅依存性の三次元計算機シミュレーションの有効性を示している。そして、配線応力にもっとも大きく影響する要因が、Cap-SiC 膜であることを算出している。このことは、直接測定・評価することが困難な応力分布を計算機シミュレーションでできることに実験的背景を提供したことになり、今後のボイド発生抑制技術を開発していく上で、大きく貢献したといえることができる。

#### 〔最終試験結果〕

平成 30 年 10 月 11 日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

#### 〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。