

氏 名	くに 国	や 谷	けい 啓	いち 一
授 与 学 位	工	学	博	士
学位授与年月日	昭和 59 年 7 月 11 日			
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項			
最 終 学 歴	昭和 37 年 3 月 東北大学工学部金属工学科卒業			
学位論文題目	シリコン半導体支持電極用銅－炭素繊維複合材料に 関する研究			
論文審査委員	東北大学教授 和泉 修		東北大学教授 須藤 一 東北大学教授 本間 基文	

## 論 文 内 容 要 旨

### (1) 本研究の動機と目的

現在の電力用シリコン半導体素子はシリコンペレットの上下にタングステンあるいはモリブデン電極，更にその上下部に銅ポストが配置され，セラミックスを介して封止されたいわゆるフラットパッケージ構造になっている。直接シリコンペレットと銅を接続すると，銅とシリコンの熱膨張係数差が大きいため，素子組立中あるいは使用中に熱応力が発生し，シリコンペレットが破壊してしまう。そこで，シリコンに比較的近い特性を持つタングステンあるいはモリブデンを間において熱応力の発生を阻止している。

しかしながら，タングステンやモリブデンにはいくつかの問題がある。すなわち，(1)これらの熱膨張係数はシリコンの熱膨張係数に一致しない，(2)電気及び熱伝導率がそれ程大きくない，(3)パワーモジュールなどに用いる場合，アルミナ板の熱膨張係数に合致しない，(4)製造に高温を要すると共に戦略物資であるため，世界情勢によって価格の変動が大きい，などである。そこで，これらに代わる新材料の出現が望まれていた。

熱膨張と熱及び電気伝導特性を同時に満足する材料は一般には存在しない。例えば，銅は電気及び熱伝導率は大きい，熱膨張係数はシリコンの 5 倍程度と大きく，他方，インバー合金は熱膨張係数は小さいが，熱伝導率は銅の  $1/40$  になり，非常に悪い。

そこで，異質の特性を持つ材料を組み合わせた複合材料に着目し，銅のすぐれた導電性，熱伝導

性と炭素繊維の熱膨張係数が負で小さいという両素材の特性を併せ持つ銅-炭素繊維複合材料(Cu-C繊維複合材料)を開発することにした。

繊維複合材料は繊維の配向方法により異方性が出てくる。シリコン半導体素子に適用するためには、少なくともシリコンペレットに接する面での等方性いわゆる二次元等方性が必要である。等方性が得られない場合、シリコンペレットに局部的に割れが発生する。等方性を得るために一般的には、短かく切断した繊維をランダムに配向する方法が採られている。他方、シリコン半導体素子は組立時にはんだ付作業により673 K程度の高温にさらされる。しかしながら、このようなランダム配向材は、573 K以上の高温にさらされると熱応力により異常膨張してしまうことが判明した。この対策として、Ti、Zrなどの炭化物生成元素の添加など種々検討したが、電気及び熱伝導率が小さくなる欠点が出てきた。

そこで、長繊維を用いた二次元等方材を検討した。二次元等方材は水平方向すなわちシリコンペレットに接する面では等方的でかつ熱膨張を小さくし、それと直角な方向に対しては熱膨張を大きくすることができる。したがって、二次元等方材は材料の厚さ方向、すなわちシリコンペレットに接する面と直角方向に熱応力を開放することができる。それ故、二次元等方材に発生する熱応力は三次元等方材の場合より小さいと考えられる。このような二次元等方性を得るために、炭素繊維配向として渦巻状、二方向状及び網状配向を選んだ。

本論文は、これらCu-C繊維複合材料の開発に関する研究をまとめたものである。

## (2) 本論文の構成

本論文は大別して、Cu-C繊維複合材料の製造法、諸特性及びシリコン半導体素子への適用検討結果から成っている。

### 〔製造方法〕

製造方法の内容は、繊維の銅めっき法、繊維配向法、直接通電式ホットプレス法及びホットプレス後の熱処理法の一貫製造プロセスから成る。

繊維の銅めっき法では、前処理としての繊維集束剤除去のための焼成処理条件を明らかにすると共に、ジェット噴流により繊維束中の各単繊維に均一にめっきされる連続電気銅めっき法を開発した。

繊維配向法として、二方向配向材は銅めっき炭素繊維を糸巻状治具に等間隔に巻きつけた後、切断してプリプレグシートを作製、網状配向材は自動織機を用いて織り密度：10本/25 mmの織布を作製した。特に配向の難しい渦巻状配向に関しては、繊維間隔を制御できる端末機構付自動繊維配向装置を開発した。

ホットプレスでは、通常一般に用いられている高周波誘導加熱式に代わる新しい方式として、試料に直接電流を流しジュール熱による自己発熱を利用した直接通電加熱式ホットプレス法を開発した。これにより、従来に比べ1/4の時間でホットプレスできるようになった。また、プレス後の加工及び熱歪除去として、室温～473 Kの加熱サイクル処理を見出した。

### 〔諸特性〕

半導体素子に適用するために必要な Cu-C 繊維複合材料の熱膨張，ヤング率，ポアソン比，熱伝導及び導電特性を明らかにした。

熱膨張特性については，最初に炭素繊維を短かく切断し銅マトリックス中にランダム配向した材料の 573 K 以上で発生する異常膨張現象，並びに Ti，Zr などの炭化物生成元素による異常膨張阻止効果について述べた。次いで，その結果選択した異常膨張の生じない長繊維を用いた二次元等方材（渦巻状，二方向状及び網状配向材）の熱膨張特性に及ぼす繊維の種類，配向及び含有量の影響について述べた。それと同時に複合則による計算値と実験値の比較を行ない，複合則より実験データを説明できることを論じた。

ヤング率及びポアソン比については，これらの特性に及ぼす繊維の種類，含有量及び配向の影響について述べると共に複合則による計算から，二方向配向材と網状配向材のヤング率測定値の差が説明できることを証明した。

熱伝導及び導電特性については，これらの特性に及ぼす繊維の種類，含有量及び配向の影響について述べると共に複合則による計算から，網状配向材の熱伝導率及び導電率についても推定できることを証明した。なお，Cu-C 繊維複合材料の熱伝導特性には異方性があるため，半導体素子に組込んだ場合の実効的な熱伝導率は，繊維直角方向のものに比べかなり違うことが予想された。そこで，パワートランジスタを例にとりあげて一般の均質材料と比較計算し，均質材相当熱伝導率を提案した。

#### [ 半導体素子への適用検討 ]

表面に炭素繊維が露出しているとシリコンペレットとのはんだ付が不可能なので，Cu-C 繊維複合材料表面への銅-ニッケル二層めっき法を開発した。また Cu-C 繊維複合材料は銅と炭素繊維という異質の材料の組み合わせのため，素子に組込んだ場合，長時間の使用に耐え得るかどうか懸念された。そこで，Cu-C 繊維複合材料単体の高温放置試験及び温度サイクル試験を実施し，長期安定性を確認した。

以上の研究結果を基にして，Cu-C 繊維複合材料支持電極を搭載したシリコン半導体素子を世界で最初に試作して，各種信頼性評価試験を実施し，Cu-C 繊維複合材料の実用化を図った。半導体素子は大別すると，大容量素子及び小中容量素子に分類できる。大容量素子は Cu-C/Si/Cu-C の構造をとり，Cu-C 繊維複合材料としては渦巻状配向材を採用した。適用素子例としては， $\phi 30$  mm レジンモールド型ダイオード及びボタンダイオードを試作した。小中容量素子は Si/Cu-C/Cu 及び Si/Cu-C/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cu (Cu-C) の構造をとる。前者適用素子例として汎用ダイオード及びパワートランジスタを試作した。後者は，多数のシリコンペレットが搭載されたモジュールに多く使用されている。後者適用素子例としては，パワーモジュール及び I C イグニタを試作した。なお，小中容量素子には網状または二方向配向材を採用した。これら試作素子の各種信頼性評価試験の結果，熱抵抗，信頼性ともに優れていることが半明し，Cu-C 繊維複合材料の半導体素子への適用性が証明された。

## 審査結果の要旨

現在の電力用シリコン半導体素子はシリコンペレットと銅ポストとの熱膨張係数の差による破損を防ぐため、その間にタングステンあるいはモリブデンを介在させた積層構造となっているが、これらの熱膨張係数とシリコンのそれとはなお隔りがあり、また熱及び電気伝導性が低下することなど問題が多い。著者は銅の優れた電気・熱の伝導性と、炭素繊維の負の熱膨張係数に着目し、両者の特性を併せ持つ銅-炭素繊維複合材料を半導体支持電極用として開発することを試み、実用化に成功した。本論文はその研究経緯を集成したもので、全編7章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章は本複合材料の製造プロセスに関するものである。先ず炭素繊維に銅メッキするための連続電気銅メッキ法と、繊維間隔を制御出来る端末機構付自動繊維配向装置を開発し、続いて従来の高周波誘導加熱方式に代わる高能率の直接通電加熱式の新しいホットプレス法を開発した。さらにプレス後の加工及び熱歪除去として、室温～200℃の熱サイクル処理を考案している。これらは本複合材料製造プロセスにおける重要な成果である。

第3章では熱膨張係数の等方性を得るために炭素繊維の配向を検討した結果について述べている。短繊維のランダム配向材では界面剥離による異常膨張を生じるが、長繊維を渦巻状、二方向状及び網状の二次元的に配向させた複合材料では半導体に接する面で等方的に熱膨張を減少させ、直角方向に熱応力を解放し得ることが判明した。これらの特性を複合則から説明している。

第4章では上記二次元配向材のヤング率、ポアソン比などの機械的性質について繊維の種類、含有量、配向の影響を調べ、複合則を適用出来ることを示している。

第5章では熱及び電気の伝導性について述べている。複合材料の伝熱特性には異方性があるため、半導体素子に組込んだ場合の伝熱特性を有限要素法を用いて評価した。その結果に基づき本複合材料の伝熱特性を一般の等方性材料と比較し計算している。本複合材料を適用した半導体素子では、モリブデンを使用した現用品より熱抵抗が小さいことが明らかにされた。

第6章では半導体素子への適用を検討した結果について述べている。複合材料自体の長期安定性を高温放置試験及び温度サイクル試験で確認したのち、各種半導体素子に実装して信頼性評価試験を行い、熱抵抗、信頼性ともに優れていることを実証している。

第7章は総括である。

以上要するに本論文は、半導体支持電極に銅-炭素繊維複合材料を適用する途を開拓したもので、金属工学の発展に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。