

報告番号	※ 甲 第 11038号
------	--------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 半導体機器ヒートシンク用Cr-Cu材料の高性能化に関する研究

氏 名 寺尾 星明

論 文 内 容 の 要 旨

高出力半導体の周辺機器には半導体から発生する熱を効率良く機器外に逃がす工夫として、ヒートシンクと呼ばれている放熱板あるいは放熱部品が使用されている。ヒートシンクには、半導体と接合するため熱膨張率が低く、かつ熱伝導率が高い材料が要求され、これまで粉末冶金法によるW-Cu材やMo-Cu材が主に使用されてきた。WやMoは高価な材料である上に、地政学的リスクがあることから供給安定性に大きな問題がある。またW-Cu材やMo-Cu材は塑性加工性に劣り、かつ難切削材であることから、ヒートシンク形状に仕上げるまでのプロセスのコストも非常に高く問題となっている。

Crはステンレス鋼、特殊鋼、耐火煉瓦、メッキ、薬品などに使用され、その生産量はW、Moと比較して100倍以上であり、地政学的リスクも少なく安価である。Cr-Cu材とすると、原料が安価で供給安定性がある、という必要条件是満たしている。また、Crは硬度が低いことから、圧延やプレス加工などの塑性加工性や切削加工性に優れる可能性がある。さらに、金属系であることから、ヒートシンク用途に必要なNiメッキが可能であると考えられる。そのため、筆者は従来のヒートシンク材の代替として、世界で初めてCr-Cu材を適用することを発想した。ただ、CrはWやMoと同じ6A族であることから似た性質を有するが、WやMoと比較して熱特性が若干劣っていることから、単純にCuと複合化しただけではヒートシンク用途には熱特性が不足して適用できない。そこで、その熱特性を向上させるため、①熱処理によるCrの2次析出粒の制御、と②圧延によるCr粒組織の制御、および③Cu材とCr-Cu材のクラッド化と圧延の組合せ、の3つの熱特性を向上させる独自の方法を考案した。

本研究は、ヒートシンク用Cr-Cu材料の高性能化に向けて最適プロセス条件を学術的に検証することを目的として、前述の熱特性を向上させる3方法の有用性と最適条件を解明するとともに、ヒートシンクを製造するための技術要素である、塑性加工性やメッキ性などの技術要素についても系統的に影響因子を検討した。以下にその本論文の概要を述べる。

第1章では上記のように、本研究の背景と目的について述べた。ヒートシンク用途には相手材との接合により反りや亀裂などが発生しないよう、熱膨張率を低くする必要があり、その要求される値は相手材の種類と接合温度により異なるが、12×

10^{-6}K^{-1} 以下とする必要がある。また、熱伝導率は高いほど好ましいが、従来のヒートシンク材と同等以上であることが要求されることから、 $150\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 以上が目標となる。多くの用途に使用されている90 mass%W-Cuの熱伝導率は $180\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 程度である。モデル計算では50 mass%Cr-Cu材において、熱伝導率は $175\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ で熱膨張率は $13.5\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$ となる。熱膨張率は上記①と②の方法により低下が可能と考えそこで、50 mass%Cr-Cu材をベースに、熱伝導率を維持して熱膨張率を低下する技術的可能性を検討した。

第2章では、ヒートシンク用に最適なCr粉末の仕様とその粉末によるCr-Cu材の作製方法について検討した。その結果、Cr粉末として、高純度の溶解精錬法の鑄塊を粉砕して-100メッシュに篩った粉末を使用し、溶浸法によりCr-Cu材を作製することを選択した。また、Cr粉末を加圧することなく型に充填することによりCr量を30 mass%から50 mass%程度まで変化させられることを確認した。さらに、Cr粉末の粒度調整を行うことにより任意の配合のCr-Cu材を設計できることが確認できた。

第3章では、残留気孔および有害な介在物のない溶浸体を得るため、水素気流中のCr粉末の焼結方法について検討した。その結果、Cr焼結体中の残留C量および残留O量とともに0.01 mass%以下とすることにより達成できることが確認できた。さらにその溶浸体であれば、プレス加工性およびNiメッキ性も良好であることが確認された。

第4章では、熱処理によるCrの2次析出物の制御による熱膨張率の低下について検討した。その結果、50 mass%Cr-Cu材の溶浸体と圧延材のいずれにも、溶体化状態からの徐冷後の時効熱処理により熱膨張率の低下現象を確認した。また、50 mass%Cr-Cu溶浸後のCu相中には1 mass%程度のCrが固溶しており、市販の1.1 mass%Cr-Cu材においても同様に熱膨張率の低下現象が見られことから、この低下はCrの2次析出現象と関連していることが実証された。2次析出と熱膨張率低下との関係はさらに検討する必要があるものの、Crの整合析出に伴う比較的大きな歪コントラストの形成が影響している可能性が考えられる。

第5章では、高Cr配合率Cr-Cu材の塑性加工性の基礎的知見を得るため、50 mass%Cr-Cu溶浸材に対して温度を変化させた引張試験を行った。その結果、299 K-473 Kの温度範囲では、いずれもマクロ的には延性破壊しており、温度が高くなるにしたがい、引張強さ、破断伸びとともに低下した。一方、絞りは破断伸びとは逆に温度の上昇とともに増大する特異な現象が観察された。室温付近においてCr粒は変形せず、マトリックスCu相との相対位置を変化させて再配列することにより、マトリックスCu相の変形に追従して大きな均一変形が可能となり破断伸びが高くなる。しかし、温度が高くなるにつれてマトリックスCu相のひずみ硬化能が低下して、不均一変形、すなわちネッキング開始が早くなり破断伸びが低下すると考えられる。この引張特性はマトリックスCu相に近い市販の0.8 mass%Cr-Cu材の引張特性と定性的に同じであったが、50 mass%Cr-Cu溶浸体では323 Kで大きな破断伸びの低下が生じ、323 Kと353 Kにおいて破断伸びが逆転した。323 Kにおける伸びの大きな低下については現時点では理由は明確ではないが、伸びの逆転については、Cr粒の延性-脆性遷移温度が影響を与えていると考えられる。

第6章では、Cr-Cu材の圧延性と圧延による熱膨張率の低下について検討した。その結果、冷間でも圧延板の製作は可能であるが、圧延板の表面にはNiメッキ性に有害な表面欠陥が観察され、耳われも見られた。333 K以上における温間圧延ではその表面欠陥が減少し、Niメッキ性にも改善が見られた。そして、有限要素法解析により、表面欠陥には圧延により板表面のCrとCuの界面に生じる応力が大きく影響することが定性的に確認された。またこの解析は表面欠陥を低減させる圧延条件の検討に有効であることも確認された。

圧延によって、Cr粒は圧延方向に沿って大きく伸張して扁平化され、板の面内方向の熱膨張率が低下し、同時に板厚方向の熱伝導率も低下した。この要因としては、扁平・伸張されたCr粒がマトリックスCu相の膨張を拘束し、また板厚方向の熱流の障害となるものと考察した。さらに圧下率を大きくするとCr粒が層状に並んだような短繊維状の組織が形成され、板面内方向の熱膨張率はCr粒のアスペクト比50程度で、板厚方向の熱伝導率はアスペクト比100程度で、それぞれ一定の値となった。圧延によって、たとえば50 mass%Cr-Cu圧延材において、圧延面方向の熱膨張率は $10.5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ まで期待通り低下したが、同時に厚さ方向の熱伝導率は $120 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 程度まで低下した。このことは、厚さ方向での放熱を要求されるヒートシンク用途にはマイナスの要因となる。

第7章では、Cr-Cu溶浸体と純Cu材を積層クラッド化し圧延する方法により、板厚方向の熱伝導率の改善について検討した。その結果、Cr-Cu/Cuクラッド圧延材は材料全体の実質のCr配合率が少なくても熱膨張率の顕著な低下はなく、板厚方向と板面方向ともに熱伝導率が $70 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 程度向上した。実質のCr配合率が少なくても低熱膨張率を維持できるメカニズムとしては、Cr粒子が伸張した低熱膨張のCr-Cu圧延材層が、隣接するCu板層の膨張を拘束することで説明できる。熱伝導率では多層に積層してもCr-Cu圧延材層と純Cu板層との界面熱抵抗は無視できるレベルであり、CrとCuの配合比と単純比例関係となった。

第8章では、本論文の成果を総括した。本論文の技術的成果を基に、50 mass%Cr-Cu圧延材（圧下率98.3%）とCr-Cu/Cuクラッド圧延材（26 mass%Cr-Cuに相当）は、半導体機器に多用されているコバール材（Fe-29Ni-17Co合金）の熱膨張率とほぼ同等の値を示した。また、そのCr-Cu/Cuクラッド圧延材の厚さ方向の熱伝導率は $195 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ と90 mass%W-Cu材を上回り、さらに板面方向のそれは、 $285 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ と大きく向上させることに成功した。このように研究開発目標である、熱特性をW-Cu材やMo-Cu材の代替レベルに近づけることに成功した。また、塑性加工性が良好でありヒートシンクの形状に仕上げるまでのプロセスのコスト低減の可能性が確認できた。さらにヒートシンク用途に必須のメッキ性も問題のないことが確認できた。

以上