

京都大学	博士 (工学)	氏名	張 文磊
論文題目	Mechanical Reliability Enhancement of Single Crystal Silicon Microstructures by Means of Diamond Like Carbon Film Coating (ダイヤモンドライクカーボン膜の全面被覆による単結晶シリコン微細構造の機械的信頼性向上)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、単結晶シリコンのマイクロ構造に関する新しい機械的信頼性向上法としてプラズマ化学気相堆積 (プラズマ CVD) 法によるダイヤモンドライクカーボン (DLC) 膜の全面被覆法を提案し、引張強度、ねじり強度の測定によりこれを検証し、そのメカニズムを考察した結果をまとめたものであって、5章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、本研究の背景及び目的について述べている。</p> <p>第2章は Tensile Properties of Silicon Microstructures Fully Coated with PECVD DLC Film と題して、自立した膜厚 5 μm の単結晶シリコンの真直梁構造に対して上下、側面に均一に DLC を成膜する手法と被覆前後の梁構造の強度評価を目的とした薄膜引張試験手法の開発について述べている。Silicon on Insulator(SOI)ウエハを用い、半導体微細加工プロセスを用いて厚さ 5 μm のデバイス層に引張試験片などのマイクロ構造を作製した。機械的信頼性向上を目的としてこの微細な構造を DLC 膜で被覆するためには、成膜時に発生する高い圧縮残留応力による構造の変形、膜の剥離が課題であることを認識し、プラズマ CVD 装置内で試料を自公転させることにより、構造の上面、下面から同時に成膜する手法を提案、実施した結果、構造を破壊することなく均一に被覆できることを見出した。提案手法を用いて異なるバイアス電圧 (200V~600V) で膜厚 150nm 程度の DLC を成膜した幅 5μm、長さ 120μm の単結晶シリコン引張試験片を作製した。引張強度測定のために静電チャック方式の薄膜引張試験装置を製作し、試験を実施した。その結果、引張強度評価が可能であること、被覆前の引張強度に対して DLC 被覆によって強度が向上したこと、を示している。</p> <p>第3章は Effect of Bias Voltage on Tensile Properties of DLC Coated Silicon Microstructures と題して、前章で提案した DLC 被覆法による単結晶シリコンマイクロ構造の信頼性構造手法について、梁構造 (幅 5 μm、厚さ 5 μm) の引張特性に及ぼす DLC 成膜時のプラズマ CVD 基板バイアス電圧の影響を評価し、さらに、DLC 膜の物性、力学特性との関係を議論した結果について述べている。単結晶シリコン引張試験片の平均引張強度は被覆前の 1.86 GPa に対して 2.11~2.86 GPa と向上した。また、バイアス電圧を高くすると引張強度は向上し、400 V 以上で飽和すること、強度のばらつきはバイアス電圧増加によって低減することも示している。さらに、この結果を顕微ラマン分光および昇温脱離ガス分析による DLC 膜の構造・組成分析結果、および反り測定、ナノインデンテーションによって測定した DLC 膜の機械特性 (内部応力、破壊靱性) 測定結果を基に考察し、バイアス電圧増加により sp³ 結合の増加、sp² 結合と水素含有量の減少を残留応力の増大、DLC 膜の破壊靱性向上と関連づけて、信頼性向上すなわち強度向上とそのばらつき低減のメカニズムを議論している。</p> <p>第4章は Torsional Properties of Silicon Mirror Resonator Microstructures Fully Coated</p>			

with PECVD DLC Film と題して、単結晶シリコンねじり梁型振動子構造を有する振動型ミラーの共振破壊試験方法の開発、これを用いて DLC 被覆前後の単結晶シリコン梁のねじり強度を測定し、さらに第 3 章で示した引張強度や DLC 膜の破壊靱性、膜物性との比較から、ねじり振動子の信頼性向上の検討を行った結果を述べている。振動子は SOI ウェハを用いて作製し、幅、厚みが $9\ \mu\text{m}$ の 2 本の単結晶シリコン梁で $1\ \text{mm}$ 角のミラー部を支えている。引張試験片と同様なプロセスで作製した単結晶シリコンのねじり梁に膜厚約 $300\ \text{nm}$ の DLC 膜を第 2 章と同じプラズマ CVD 法で成膜した。振動型ミラーを積層圧電素子の上に設置し垂直方向変位を与え、ねじりモードで共振振動させる共振破壊試験を実施した。ミラー角度振幅を緩やかに増大させ破断に至った瞬間に梁表面に印加される最大せん断応力をねじり強度として評価した。ねじり強度は被覆前の $2.93\ \text{GPa}$ から $3.39\sim 3.81\ \text{GPa}$ と向上した。バイアス電圧を高くすると強度の向上とばらつき低下が観察され、引張強度のバイアス電圧依存性と一致する傾向が得られた。これらの実験結果を第 3 章で示した DLC 膜の破壊靱性、膜物性の実験結果と比較して議論している。

第 5 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

氏名	張文磊
----	-----

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、微小電気機械システム(MEMS)における基本的な機械構造である断面寸法がマイクロメートルオーダーの単結晶シリコン梁について、その機械的信頼性を向上させることを目的として、梁構造の全面にプラズマ化学気相成長(プラズマ CVD)を用いてダイヤモンドライクカーボン(DLC)膜を被覆する手法を開発し、引張モード、ねじりモードにおける強度評価と DLC 膜の膜物性から機械的信頼性向上のメカニズムを研究した成果についてまとめたものである。得られた主な成果は次のとおりである。

まず、Silicon-on-insulator(SOI)ウエハのデバイス層から作製した単結晶シリコンのマイクロ構造(幅、厚みとも数 μm)の全面(上下面、側面)に DLC 膜を均一に成膜する手法を検討した。プラズマ CVD 装置に製作済みの自立構造の試験片を設置し、成膜中に真空槽内で試験片を自公転させることでこれを実現した。従来の研究では DLC を表面に成膜したシリコンをエッチングして構造を作製していたため、膜の内部応力によって構造が反り、界面に亀裂が観察されたが、全面被覆によってこの問題を解決した。

また、提案手法で DLC を全面被覆したシリコン梁構造を試験部とした断面が $5\mu\text{m}$ 角の単軸引張試験片を、静電チャック法の薄膜引張試験装置で試験した。平均引張強度は成膜時のバイアス電圧に依存し、被覆前に対して 15~30%向上し、ばらつきも低減した。これらの改善機構を明らかにするために DLC 膜の組成分析、表面粗さ計測、機械特性評価を行い、バイアス電圧による膜組成変化、構造表面の平滑化、圧縮内部応力増加が寄与していることを示した。

さらに、断面が $9\mu\text{m}$ 角の梁構造を支持梁としたねじり振動子を作製し、圧電素子での外部加振を用いた共振振動状態でのねじり試験による強度評価を行った。引張強度とほぼ一致する 18~28%の強度向上とばらつき低減を確認し、単結晶シリコン構造の信頼性向上に DLC 全面被覆が有効であり、各種デバイスの性能向上に応用可能であることを明らかにした。

以上、本論文は単結晶シリコンで作製される各種センサ・アクチュエータの信頼性向上という課題に対して、プラズマ CVD DLC 膜による全面被覆法を提案し、これにより引張、ねじりモードでの信頼性が顕著に向上することを示すと共に、信頼性向上機構を明らかにしたものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成30年11月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、(平成31年7月22日までの間)当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。