The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	高密度マイクロ波水素プラズマを用いたシリコンウエハ高機能化プロセスの開発
Author(s)	野村, 俊光
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/96043
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　　野　村　俊　光　　）	
論文題名	高密度マイクロ波水素プラズマを用いたシリコンウエハ高機能化プロセスの開発

論文内容の要旨

シリコン（Si）ならびにその酸化膜や窒化膜は、集積回路（IC）、受光素子、光導波路をはじめとする多くの光・電子デバイスに広く用いられている。これらSi系材料を用いたデバイスの製造には、基材となるSiウエハが必須であり、用いるウエハの機能がデバイス性能に大きな影響を与える。これまで、Si系材料の加工には、機械的もしくは化学的な方法が種々提案され実用に供されてきた。しかしながら、従来の機械的加工法、ウェット化学加工法、さらにはプラズマを用いた物理化学加工法は、洗練された技術であるものの、材料表面への欠陥導入、危険/環境負荷の大きな化成品、高価な高真空装置等、持続可能な発展を目指す上で課題が多い。したがって、従来法に代わるSi系材料加工法の開発が求められている。

本論文では、無毒、低環境負荷な水素をプラズマプロセスガスとして利用したSiウエハ高機能化プロセスを開発することで、従来法に付随する課題の克服を目指した。

第1章では、目的とするSiデバイスに関係する従来加工技術をレビューし、その技術課題をまとめるとともに、本研究の目的を述べた。ここでは、効率的な低温水素プラズマプロセスの実現のため、水素雰囲気の高圧力化と放電ギャップが狭ギャップ化された高圧狭ギャップ水素プラズマを採用することの根拠を述べた。

第2章では、次世代型三次元積層ICに向けSiウエハの高速薄化加工を検討した。プロセスパラメータの調整により、従来報告されている低圧水素プラズマの約40倍となる10-20 μm/minのSiエッチングレートを達成した。また、本加工法は、機械的研削直後のウエハの加工変質層や残留応力の除去にも適用可能であることを示した。最後にSiウエハの走査加工を行い、加工面積の拡大が可能なこと、ならびにウエハの破損無く厚さ10 μm以下のウエハが作製可能なことを実証した。

第3章では、薄化ウエハに金属汚染耐性を付与するため、水素誘起欠陥からなる極薄ゲッタリング層の形成を検討した。その結果、350℃以下の低い試料温度と高い投入電力の両立が極薄ゲッタリング層形成に必要なことを明らかにし、パルス変調プラズマの利用を提案した。これにより、厚さ410 nm以下の高密度欠陥層の形成に成功し、得られた極薄欠陥層は、銅に対して優れたゲッタリング性能を発揮することを実証した。

第4章では、光無反射Si表面の創成を目指し、水素プラズマによるSiナノコーン構造形成機構の解明とプロセス条件の確立を試みた。その結果、高いプラズマ密度（$>3 \times 10^{18}$ m^{-3}）によりシース厚さがイオンの平均自由行程と同程度（数十μm）となること、H_2分子に比べ重いイオン（H_3^+）が生成されることにより比較的異方性を持ったイオンが基板表面に入射可能になっていること、ならびに酸素と窒素を極微量同時添加することでナノコーン形成に適切な酸窒化膜マスクが形成されることの三要素が、中圧域の水素プラズマによるナノコーン形成を可能にしていることを明らかにした。また、水素プラズマに0.25%以下の微量酸素を添加すると、原子状水素密度が増加する現象を見出した。得られた知見に基づき加工パラメータを最適化することで、380-830 nmの広い波長範囲で0.5%以下の非常に低い光反射率を呈するSi表面の作製に成功した。

第5章では、Si酸化膜/窒化膜の高速除去・成形技術の開発に向け、これら膜の高速エッチング条件の検討、および両者のエッチング特性の比較を行った。その結果、酸化膜に対して940 nm/mim、窒化膜に対して240 nm/minのエッチングレートが得られ、従来の低圧水素プラズマでのエッチングレートを大きく上回る値を達成した。また、窒化膜のエッチングは、窒素原子ではなく、Si原子の水素化に律速されることを示した。

第6章では、本研究を総括した。

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名	（野村俊光　　）	
論文審査担当者	（職）	氏　名
	主 査　　准教授	大参　宏昌
	副 査　　教授	有馬　健太
	副 査　　教授	荻　博次
	副 査　　教授	桑原　裕司
	副 査　　教授	森川　良忠
	副 査　　教授	山内　和人
	副 査　　教授	山村　和也
	副 査　　教授	渡部　平司
	副 査　　准教授	垣内　弘章

論文審査の結果の要旨

現在、種々の光・電子デバイスの多くは、シリコン（Si）ウエハを基板として利用し製造されており、Si ウエハは欠くことのできない基盤材料となっている。製造されるデバイスの性能は、Si ウエハに予め付与された機能に依存する場合が多くあるため、その機能付与技術が益々重要となっている。一方、持続可能な開発目標の達成にむけ、半導体製造プロセスにおいても環境負荷の低減が求められている。この様な背景から、本論文では、光・電子デバイスの高性能化に向け、廉価・無毒な水素ガスをベースガスとする比較的低温かつ高密度な中圧域の狭ギャップマイクロ波プラズマを利用した低環境負荷型の Si ウエハ高機能化プロセスを提案している。具体的には、情報処理用電子デバイスの高密度実装と高速動作を可能にする（I）Si ウエハの超薄化プロセス、高密度 3D 実装される極薄チップの長寿命化と高信頼性を実現する（II）Si ウエハの金属汚染に対する耐性化プロセス、太陽電池やイメージセンサーの光電子デバイスの高性能化に寄与する（III）Si ウエハの光無反射化プロセス、さらには Si 上のデバイス/マスク用絶縁膜の任意成形を実現する（IV）Si ウエハ上の窒化膜・酸化膜の除去・成形プロセスの開発に関する全四項目の取り組みをまとめている。以下に本論文で述べられている主たる研究結果を要約する。

第 1 章は、序論であり、現行の Si ウエハ製造プロセス、Si および Si 酸化膜/窒化膜の一般的な加工法、さらには現在までに報告されている水素プラズマを用いた Si ウエハの加工事例について、それらを要約し技術課題を抽出した上で、本研究の意義をまとめている。

第 2 章は、次世代三次元 LSI 用極薄 Si ウエハの作製に向け、高密度水素プラズマによる Si の高速薄化加工について、種々のプロセスパラメータが Si エッチング特性に与える影響を調査、解明している。その結果、従来の低圧水素プラズマに比べて 40 倍となる 20 μm/min の高いエッチングレートを達成するとともに、無歪み・無欠陥な Si 薄化が可能なこと、熱応力等による Si 基板の破損を生じることなく厚さ 10 μm の極薄化が可能なこと、さらには加工面積の拡張に向け基板走査が有効であることを実証している。

第 3 章は、薄化 Si ウエハに利用する金属ゲッタリング層の形成を目的として、高密度水素プラズマによる極薄欠陥層の形成プロセスとその原理についてまとめている。種々のプロセスパラメータが欠陥生成挙動に与える影響を系統的に検討し、低い試料温度と大きな投入電力を両立するパルス変調プラズマを提案・採用することで、厚さ 410 nm 以下の高密度欠陥層の形成を実現している。また、得られた水素プラズマ誘起極薄欠陥層は、集積回路の主要な汚染元素である銅に対し、優れたゲッタリング性能があることを実証している。

第 4 章は、中圧域の高密度水素プラズマにより Si 表面上に形成されるナノコーン構造を利用し、光無反射 Si 表面を創成することを目指し、その形成機構の解明とプロセス条件の確立に向けた取り組みをまとめている。具体的には、高密度プラズマの生成により気相中イオンの平均自由行程よりも薄いプラズマシースが形成されることで、平均自由

行程が短くなる数 kPa から数十 kPa の高圧雰囲気にも拘わらず Si 表面への異方性のイオン入射が生じ、これがナノコーン構造の形成に重要なことを明らかにしている。また、高密度水素プラズマでの光無反射表面の創成には、イオンの異方性入射の他に、加工水素雰囲気中に空気を極微量添加することで Si 表面に酸窒化膜を形成することが重要であることを見出し、従来の酸素のみで実現されるフッ素系 RIE におけるナノコーン形成機構とは異なる表面反応モデルを提唱している。また、以上の検討を踏まえ、380-830 nm の広い波長範囲で光反射率が 0.5%以下を示す極めて低い Si 表面の創成に成功している。

第 5 章は、Si ウエハ表面の清浄化や導波路形成等への応用を目指し、高密度水素プラズマによる Si 酸化膜/窒化膜の高速エッチング条件の検討と、それぞれの膜のエッチング特性を系統的に比較し、得られた知見をまとめている。とりわけ、酸化膜・窒化膜の水素プラズマに対するエッチング特性を系統的に比較検討した先行研究はなく、先駆的な学術的知見を提供している。具体的には、Si 酸化膜と窒化膜のエッチングレートとして、940 nm/min ならびに 240 nm/min を達成するとともに、窒化膜の水素プラズマエッチングでは、N 原子の水素化エッチングではなく、Si 原子の水素化エッチングが律速過程となっていること、さらには一般的なフッ素系プラズマの報告例とは対照的に Si 窒化膜のエッチングレートは Si 酸化膜に比べて小さいことを見出している。

以上の通り、本論文は、廉価・無毒な水素を用いた低環境負荷な Si 系材料加工法を新たに提案・実証し、その機構を明らかにしており、光・電子産業およびプラズマ材料科学における発展に寄与することが期待される。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。