

表面原子の流れ制御による溶融微細加工法の研究

Formation of Silicon Protrusions via Surface Melting and Solidification Under Applied Tensile Stress

H29助自80

代表研究者 西村 高志 鈴鹿工業高等専門学校 電気電子工学科 講師
*Takashi Nishimura Lecturer, Department of Electrical and Electronic,
National College of Technology, Suzuka College*

We modified the surface structure and composition of Si(111) by heating it to 1300 °C in ultrahigh vacuum under an external tensile stress of ~1 GPa, applied by pressing on the sample's center. This process produced two protrusions, each ~100 μm high, to the left and right of the sample's center. Scanning Auger electron spectroscopy revealed Fe, Cr, Ni, and C impurities at the top of one protrusion, and C at the top of the other. These impurities likely diffused into the protrusions' tops during heating, and segregated to the local surface during cooling when the protrusions formed. We discuss the formation mechanism in terms of non-uniform surface temperature, electromigration, piezoresistivity, freezing-point depression due to surface alloying with the impurities, and volume expansion during solidification from surface melting. This study gives a new perspective on controlling surface structure and composition using heat and stress to induce self-assembly.

研究目的

近年、高度情報化社会に対応するために新たな電子デバイス作成技術が模索されており、集積化技術では極端紫外光(EUV)リソグラフィ技術や積層型三次元IC(3D-IC)技術の開発が主流となっており活発に研究開発が進められている。一方、多品種少量生産が求められる特定用途半導体ではより低コストで効率的な電子デバイスの製作技術が求められている。今後、さらにこれらの技術を発展させるためには基盤技術として革新的なシリコンウェハ加工技術やウェハ表面での微細構造形成技術の研究開発が重要であり自己組織化技術などを応用した研究が行われている。

本研究ではこれまで微細加工技術では避け

られてきた表面溶融現象を利用した表面加工技術の開発を行った。表面を溶融すると一般に表面自由エネルギーを減少させるために球状になるが、本研究では溶融-凝固の過程を制御して鋭い構造を持つ表面微細構造の形成を行った。また形成した微細構造の組成分析と結晶方位分析を行って形成過程を検討した。

概要

現在、IoTや人工知能を実社会へ実装するために情報処理技術の高速化・大容量化が求められている。その基盤技術として電子デバイス製作に向けたシリコンウェハ大面積微細構造のスケールダウンと加工スループットの高度化が求められており、新たな微細加工法の研究開発が活発に行われている。これまで材料の融点以

下で原子拡散やエッチングなどの現象を利用し薄膜形成や微細加工を行っていた。一方、表面が溶融し融液となると表面が荒れて均一性が失われることが多く、微細構造形成では避けられてきた。表面溶融シリコンは一般的に表面自由エネルギーを最小にするために球状に近づこうとする。本研究では表面溶融シリコンが凝固する際、強い対流作用や異種金属導入による凝固点制御により凝固過程を制御して表面微細構造を形成する新規加工法に関して研究を行った。

本研究のような表面溶融状態を利用した半導体表面における特異構造の形成に関して近年、幾つかの報告がある。例えば、(1) レーザー・電子線による半導体表面の局所加熱：Si半導体表面にレーザーを局所的に照射すると、1 μ sec程度の時間で急加熱・急冷却が起こり、表面が膨張・対流し、鋭い突起構造が形成される (J. Eizenkop: J. Appl. Phys, 2008)。申請者も電子線による研究で先端局率半径がナノオーダーの極めて鋭い突起構造が形成できる現象を発見した (西村高志, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 2015年)。(2) 脱濡れ現象による金属薄膜からのナノ粒子形成：金属薄膜をレーザー等で加熱処理すると溶融した薄膜が安定化する際、金属ナノ粒子が形成でき、半導体表面へそれらを固定することができる (S. J. Henley, Phys. Rev. B, 2005)。申請者はこの方法を応用して半導体表面の銅ナノ配線をPdで被覆する技術を開発した (西村高志, 富取正彦: 第64回応用物理学会春季学術講演会, 2017年)。

以上の先行研究に着想を得て、本研究では表面原子が高温エレクトロマイグレーションで移送される際に、物理刺激を加え、突起・溝・平坦面などの多様な表面構造へと自己組織的に再構築されること、条件を探れば、その形成位置や組成を制御できる可能性があることを着想した。本研究では積極的に溶融現象を利

用した新しい表面加工方法の確立を目指した。

本研究ではまず専用の超高真空装置の開発を行った。溶融シリコンは極めて反応性が高いため大気中またはガス雰囲気では残留酸素や炭化物と反応してシリコンカーバイド等になり制御が困難である。そこで超高真空下でシリコンウェハを通電加熱でき、さらに表面応力や高電界場を印加できる機構の開発を行った。超高真空を作るためにイオンポンプとターボ分子ポンプからなる真空排気系を構築し、さらにチタンサブリーメーションポンプも設置することで真空度低下時に素早く超高真空 (10^{-11} Torr) へ戻せる構成とした。ロードロック室は油拡散ポンプを主ポンプとして 10^{-7} Torrまで排気できる構成とした。

シリコンウェハ通電加熱時にウェハ表面へ引張り応力を印加するために専用のサンプルホルダーの開発を行った。ホルダーにはアルミナ製のプランジャーがタングステンバネで加圧されており、プランジャー先端部は短冊状のシリコンウェハ背面に接触しウェハを加圧する。タングステンバネのバネ定数は 0.2 N/nと 1.5 N/mの二種類を使って加圧した。

実験では $0.7 \times 8 \times 0.3$ mmの短冊状シリコンウェハをn-type Si (111)で抵抗率 $2-4 \Omega$ cmのウェハより切り出しアセトンの超音波洗浄を10分間行なった。その後、オゾンクリーニングを3時間行ないウェハ表面の有機物の除去を行った。このウェハを超高真空下へ搬送し、直流通電加熱により 600°C まで加熱し脱ガスを行った。この際の真空度は $<1 \times 10^{-9}$ Torrで行った。さらに 1000°C で数秒間加熱することで表面の酸化膜の除去を行った。次に、ウェハ表面へTi原子を微量蒸着するため、Tiフィラメントを加熱した。蒸着したTiはオージェ電子分光法で蒸着量を推定した。その後、 1300°C で1秒間加熱しウェハ表面を溶融させ強いエレクトロマイグレーションで対流を形成した。ウェハへ印加し

た引張り応力はウェハのたわみ量より計算した。

1300℃の加熱により表面近傍のSiが溶融し、さらにエレクトロマイグレーションによる対流作用で流され低温部分へ運ばれた。その溶融Siは低温部で凝固し突起状の構造を形成した。突起構造をオージェ電子分光法とFIB-SEMによる断面構造解析を行った結果、突起先端部にはシリサイド結晶が堆積しており、さらにEBSDの結晶方位分析では突起が単結晶構造をしていることが分かった。

－以下割愛－