

氏名	瀬木利夫
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	工博第1890号
学位授与の日付	平成12年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工学研究科電子物性工学専攻
学位論文題目	Nanoscale Observation and Analysis of Damage Formation and Annealing Processes in Ion Beam Interactions with Surfaces (イオン・固体表面相互作用による損傷・回復過程のナノスケール観察と解析)

論文調査委員 (主査) 教授 山田 公 教授 木村健二 助教授 高岡義寛

論文内容の要旨

本論文は、ナノスケールで制御可能なイオンビームプロセスの開発を目的に、その基礎現象として、入射イオンと固体表面との相互作用をSTMを用いて原子レベルで解明し、その成果をまとめたものであり、6章からなっている。

第1章は序論であり、本研究の背景や目的、及びイオン照射やイオンアシスト蒸着の概要と、クラスターイオンビームの特長について述べている。

第2章では、本研究で開発した高温動作可能なSTMと結合した超高真空型クラスターイオンビーム照射装置の概要と特長について述べている。本装置はターゲット部からSTM部まで全て 2×10^{-9} Torr以下の超高真空で繋がれており、イオンを照射した基板を大気にさらすことなくSTM装置へ導入でき、さらに基板加熱による損傷のアニール過程をその場観察することが可能である。

第3章では、Xe単原子イオンをSi(111)基板に照射した時に形成される照射跡、及びそのアニールによる回復過程をSTMを用いて観察し、単原子イオン衝突が基板表面に与える欠陥形状とその回復過程について解析している。具体的には、室温及び高温でのSi(111)清浄表面の連続STM観察を行い、この清浄表面へのイオン照射による欠陥の回復過程のダイナミクスを原子レベルで解析している。まず、室温でXe単原子イオンを衝突させた場合、衝突エネルギー1 keVから5 keVの範囲では衝突エネルギーに関係なく直径約20 Åの表面欠陥が形成されることを明らかにした。また400°Cでアニールを行うと、多数のベークンシーがバルク拡散によって表面に現れ、さらに600°Cでアニールすると、このベークンシーが表面拡散し、ベークンシークラスターを形成することや、ベークンシークラスターはその周囲の原子の移動によって移動・変形することを初めて原子レベルで明らかにした。次に、650°Cでアニールした場合、連続STM観察から格子間Siが表面のベークンシーと再結合することによって表面ベークンシーの数は指数関数的に減少することを示し、700°Cのアニールで表面は完全に回復することを明らかにした。

第4章では、クラスターイオン衝突による損傷の形成メカニズムとそのアニール過程、及び損傷形成を引き起こすための閾クラスターサイズの解明を行っている。具体的には、平均サイズ1000のArクラスター衝突では、クラスターイオン特有の非線形照射効果によって表面にクレーター状の衝突跡が形成されることを明らかにした。また、このクレーターのアニールによる回復過程を原子レベルで初めて実験的に明らかにし、回復過程が従来の単原子イオン照射の場合と異なることを示した。一方、高エネルギーのC₆₀イオン衝突の場合、クラスターの持つエネルギーは表面において全て失われることはなく、クラスターが基板の奥深くまで進入して深さ方向に異方性をもった損傷を形成し、ガスクラスターイオンによるクレーター形成と異なることを明らかにした。また、クラスターサイズ7以下の小さな炭素クラスターイオン照射では衝突跡面積の増加はサイズに比例し、サイズ10付近で衝突跡面積が急激に増大することから、クラスター特有の照射効果を引き起こす閾クラスターサイズは10であることを示した。

第5章では、イオンの薄膜形成、特に島成長に与える照射効果を明らかにするために、Si (111) 表面上にGeの島を形成し、この島にイオンを照射した時の島形状の変化とそのアニール過程を解析している。室温でXe単原子照射した場合、蒸着したGeの原子数に比べ、Xeイオン照射によって形成される欠陥量が多くなったときに島の表面構造が壊されはじめることを明らかにした。Xeイオン照射後、400℃以上のアニールを行うと、島・ステップ共に大きく変化し島とステップが複雑に入り組んだ表面が形成された。この表面の形成過程は3章で示したXeイオン照射によって生成されるベークンシーのアニールによるバルク拡散と表面拡散によるもので、Geの島成長に対してアニールによるベークンシーの挙動が大きな影響を持つことを明らかにした。一方、Geの島に対して室温でクラスターイオン照射を行った場合、クレーター状の衝突跡が形成され、クラスターイオン照射によって多数のGe原子が変位することを示した。このことから、クラスターイオンによる島への照射効果は十分大きく、アニールしない場合でも島成長に対して大きな影響を持つことを明らかにした。

第6章は結論であり、本研究で得られた成果を要約し、今後の課題について述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、単原子イオン及び数千個の原子で構成された巨大粒子集団からなるクラスターイオンが固体表面に衝突したときに形成される損傷とその回復過程のダイナミクスをSTM観察により原子レベルで解析するとともに、薄膜形成におけるイオンの照射効果を明らかにしたもので、得られた主な成果は次の通りである。

1. Xe単原子イオン衝突によってSi (111) 表面に形成される表面欠陥を観察し、単原子イオンと固体原子間の相互作用とそのアニール過程を明らかにした。600℃以下の低温アニールでは空孔と格子間Si原子との拡散定数の違いから表面近傍の空孔のみが表面まで拡散し、それらが表面をマイグレーションし空孔クラスターを形成することを明らかにした。また、600℃における連続STM観察を行い空孔クラスターの移動・変形はその周囲の原子の移動によって影響を受けるダイナミクスを明らかにした。650℃以上の高温アニールでは格子間Si原子と再結合する表面欠陥の回復が主な動的過程であることを明らかにした。

2. クラスターイオン衝突特有の損傷形成メカニズムとそのアニール過程については、クラスターサイズ1000以上の巨大クラスターイオンとSi表面原子との衝突により形成された欠陥をSTM観察し、単原子イオン衝突では起こり得ない多体衝突効果による巨大なクレーター状の衝突跡が形成されることを示した。このような巨大なクラスターイオン衝突では、比較的低い温度でのアニールによりクレーターの周辺領域の損傷部分が比較的容易に回復することを示した。一方、小さなサイズのクラスターイオン衝突の場合には、エネルギー損失が表面近傍のみに留まらず、深さ方向に異方性をもった損傷を形成することを明らかにした。さらに、衝突跡面積や二次イオン放出率、及び損傷生成量を検討した結果、これらがクラスターサイズ10付近で急激に増大すること、クラスター特有の照射効果を引き起こす閾クラスターサイズは約10原子/クラスターであることを明らかにした。

3. 薄膜形成におけるイオン照射効果を詳細に検討し、上記のイオン衝突及びそのアニール過程が密接な関係を持つことを示した。単原子イオン照射では照射後のアニールによるベークンシーの挙動が島成長に対して大きな影響を持つが、クラスターイオン照射では照射による表面変位原子数が十分大きいために、アニールしない場合でも島成長に対して大きな影響を持つことを明らかにした。

上記のように、本研究は、単原子イオンやクラスターイオンの固体表面相互作用における基礎現象や、イオン照射による固体表面の照射損傷およびその回復過程をナノスケールの精度で観察し、従来定性的であったこれらの現象を原子レベルで明らかにしたものであり、学術上、實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12年1月25日、論文内容とそれに関連した試問を行った結果、合格と認めた。