

論文内容の要旨

博士論文題目 Iron Silicides Grown by Solid Phase Epitaxy on Si (111) Surface

(Si (111) 表面上の SPE 成長による Fe シリサイドの形成)

氏 名 片岡 恵太

(論文内容の要旨)

Si 基板上に成長する Fe シリサイドは、発光・受光材料、磁性材料など Si デバイステクノロジーと融合可能な新機能材料として注目されており、広く研究されている。しかし、いくつかのバルク相に加え、多くの表面準安定相が様々な条件で成長する複雑なシリサイド形成の全体像は、明確になっていない。また、それらの相の構造、形態、成長機構についても不明瞭な点が多く、Fe シリサイドの形成は表面固相成長の基礎的な研究としても興味深い。本研究では、Si (111) 表面上で固相成長 (Solid Phase Epitaxy: SPE) 法によって形成した Fe シリサイドの原子構造や形態を様々な分析手法を用いて系統的に評価し、これまで明確ではなかった全体像を統一的にまとめた。またいくつかの相では新たな知見が得られた。

Si (111) 7×7 表面に室温で Fe を蒸着し、その後アニールを行った。蒸着量とアニール温度に依存して形成する様々な相について、低速電子回折、反射高速電子回折、走査トンネル顕微鏡により評価を行い、これまでにない詳細で系統的な相図を完成させた。成長条件に依存して、 $\delta 7\times 7$ 、 1×1 (CsCl-type FeSi)、 2×2 、 $c(8\times 4)$ 、three-dimensional 2×2 (α -FeSi₂)、 $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ - 30° 、bcc-Fe、 β -FeSi₂、アモルファス相が形成し、それぞれの相の詳細な形態が明らかになった。特に、 $\delta 7\times 7$ 構造の形成、不均一な形状の bcc-Fe (111) 薄膜におけるファセットの形成、小さな $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ ドメインの傾き、 β -FeSi₂ 島上における長方形の表面周期構造の形成などの知見が新たに得られた。この相図と、得られた形態に関する情報から成長機構について議論を行うことができ、いくつかの知見を得た。また、二次元光電子回折による立体原子像の測定によって、表面準安定シリサイド超薄膜 (1×1 、 2×2) の原子構造解析を行い、これらの局所的な原子配列がこれまでに報告されている CsCl 構造の基本格子で構成されることが直接確認できた。この結果は、化合物超薄膜において初めて立体原子像の測定に成功した例である。

さらに本研究では、複雑なためにこれまでほとんど研究がなされていなかった Fe 原子と Si (111) 7×7 表面の初期反応について、走査トンネル顕微鏡を用いて詳細に研究を行った。室温で蒸着された Fe 原子の反応サイトはいくつかのタイプに分類でき、蒸着された Fe 原子は Si 表面に到達した後、ほとんど拡散せずその場で反応すると考えられる。そのいくつかは 7×7 half-unit 内の 3 つのセンターアダトム間でスイッチすることがわかった。これは、単独の Fe 原子が、レストアダトムと結合し 2 つのセンターアダトムの中間に安定して吸着し、低い障壁を乗り越えて運動していると考えられる。

以上のように初期反応段階に加え、Si (111) 表面上の固相エピタキシャル成長による Fe シリサイドの構造と形態に関する全体像と各相の詳細な成長様式が明らかになった。これらの成果は、結晶成長における基礎的な知見を与えたのみならず、新機能物質の設計に寄与することが期待できる。

氏名	片岡 惠太
----	-------

(論文審査結果の要旨)

走査型トンネル顕微鏡 (STM) に代表される走査型プローブ顕微鏡 (SPM) は、非常に高い空間分解能で表面観察を可能とする顕微鏡であり、プローブと試料間のさまざまな相互作用に基づいて、試料表面の物性計測を可能とした機能的な SPM が開発されてきた。しかし、SPM には元素識別能力がないため、見ている領域の元素分析を行うことは不可能であった。SPM で観察している表面の元素を同定することは、表面物性研究や工学的応用研究において非常に重要であり、必要とされている。本博士論文は、STM 装置で元素分析を可能とする新しい装置を開発することを目的としたものである。具体的には、走査型トンネル顕微鏡 (STM) 装置内で、STM の走査探針から放出される電界放出電子を励起線源としてオージェ電子分光を行う、元素分析機能付き走査型トンネル顕微鏡の開発を目指し、以下のような優れた技術的成果を得た。

LEED-Auger 型 (半球型) の分析器を備えた STM 装置を試作し、それを用いたオージェ電子分光の実験と、その軌道計算シミュレーションを行った。STM 探針からオージェ電子分光に十分なエネルギーを持った電界放出電子を得るためには、それだけ大きな負の電圧を探針に印加する必要があるが、その結果、試料から放出されるオージェ電子が探針によって形成される電界によって試料側へ押し戻され、正確なエネルギーで電子を検出することができず、オージェ電子分光に基づいた元素分析を行うことができないことが明らかになった。つまり、これまで他の研究者が失敗していた原因がこの電界であることを明らかにし、電界を完全に排除し、なおかつ十分なエネルギーを持った電子を放出する特殊な探針の開発が必要であることがわかった。そこで、軌道計算に基づき、シールド電極を備えた特殊探針を作成し、試料近傍の探針による電場の形成を排除することに成功した。このシールド電極を備えた特殊探針と円筒鏡型電子分光器を用い、システムを超高真空装置に接続することにより、原子像を確認した Si (111) 表面に対するオージェ電子分光において、明確な Si のオージェシグナルを精度良く得ることに成功した。

以上のように、本論文は従来不可能であった STM 装置内での元素分析を初めて可能にしたものである。小型装置で原子像観察から元素分析までできる強力な分析器の実現を可能にしたものであり、基礎科学における解析にとって極めて有意義であるのみならず、工学的に非常に広い応用分野を切り開いた価値の高いものである。よって審査員一同は、本論文が博士 (理学) の学位論文として価値のあるものと認め、審査結果を合格とした。