

論文内容の要旨

博士論文題目

Atomic Structure and Magnetic Properties of Si(111)-Fe System Grown by Solid Phase Epitaxy

(SPE 成長させた Si(111)-Fe 系の構造と磁気特性)

氏 名 服部 梓

(論文内容の要旨)

表面磁性の本質的な理解のためには、磁性薄膜のマクロな磁氣的性質とミクロなスピン状態、薄膜の成長形態と結晶構造の解明を超高真空中で試みる必要がある。しかしながら表面の構造、磁氣的性質を併せた評価を行っている研究は殆どないのが現状である。その最も大きな原因は、試料を作製し評価する超高真空装置がない点にある。そこで本論文では、超高真空中で試料を作製し、その場で構造と磁気特性を評価できる装置の立ち上げ・評価を行った。評価には膜厚の増加に伴い構造と磁気特性が変化する系として、よく研究され再現性が確認されている Cu(001)-Fe を用いた。また、二次元表示型光電子分光装置の改良作業の一環として、Cu(001)-Fe を用いて立体原子顕微鏡測定を行った。

立ち上げた装置を用いて、磁性薄膜として一般的である Fe を半導体基板上 Si(111)に蒸着して色々な Fe シリサイドを作製し、その構造と磁気特性について系統的かつ多角的に研究を行い、構造と磁気特性の相関及び磁気特性の起源を明らかにした。Fe シリサイドは SPE 法(低温で Fe を蒸着後アニール)で膜厚: Θ_{Fe} 、アニール温度: T_a を変化させ作製した。作製した試料は超高真空中 40 K で、構造は RHEED で磁気特性は SMOKE を用いて評価し、その後、幾つかの相については STM、XRD、TEM、VSM、SQUID を用いて評価した。

得られた構造・磁気特性をまとめ、SPE 成長させた Si(111)-Fe の磁気構造相図を完成させた。各相の構造・磁気特性の結果について下記に簡単にまとめる。

(1) $\Theta_{\text{Fe}} < 0.5$ nm の蒸着直後では、面垂直方向に磁化容易軸をもつ強磁性の Fe(111) が形成される。

(2) 1×1 、 2×2 、 $c(8 \times 4)$ 相 ($\Theta_{\text{Fe}} = 0.15 - 0.5$ nm, $T_a = 200 - 600^\circ\text{C}$) ではバルクでは準安定な

CsCl 構造をもつ c-FeSi(111)が成長しており、40 K で $[1-10]_{\text{Si}}$ 方向に磁化容易軸を持つ強磁性であることを明らかにした。第一原理計算(共同研究)などから、この強磁性の起源は c-FeSi(111)と Si(111)の界面の B5 構造にある、界面強磁性であることを明らかにした。

(3) $v3 \times v3$ (ϵ -FeSi) ($\Theta_{\text{Fe}}=0.25-0.5$ nm, $T_a=400-700^\circ\text{C}$)は単相では形成されないが、SMOKE 測定はバルクと同じく常磁性であることを示唆する結果である。

(4) $3D-2 \times 2$ (α -FeSi₂) ($\Theta_{\text{Fe}}=0.15-0.5$ nm, $T_a=600-800^\circ\text{C}$)はバルクでは高温で安定な相であるが、Si(111)の表面上では形成され、バルクと同じく常磁性である。

(5)高膜厚側($\Theta_{\text{Fe}} > 3.0$ nm)の蒸着直後に形成される bcc-Fe(111)相は、強磁性で磁化容易軸はバルクと同じく面内方向である。

(6)bcc-Fe(111)相を 300°C 付近でアニールすると、室温でも強磁性をもつ多結晶相が形成されることを明らかにした。XRD 測定から、この多結晶相は β -FeSi₂ と Fe₃Si から形成されており、強磁性の起源が Fe₃Si 成分にあることを明らかにした。

(7) $\Theta_{\text{Fe}}=3.0-10.0$ nm, $T_a=500-600^\circ\text{C}$ の条件では、 β -FeSi₂(101)が表面に形成される。SMOKE、VSM 測定の結果からこの相が室温でも強磁性を持つことを明らかにした。断面 TEM 測定から、 β -FeSi₂ 相と Si(111)の界面に強磁性の Fe₃Si 多結晶相が形成されることを明らかにし、 β -FeSi₂(101)/Fe₃Si/Si(111)の強磁性ヘテロ構造であることを発見した。

(論文審査結果の要旨)

表面磁性の本質的な理解のためには、磁性薄膜のマクロな磁気的性質とミクロなスピン状態、薄膜の成長形態と結晶構造の解明を超高真空中で試みる必要があるが、これらを総合的に行っている研究は殆どなかった。そこで本論文では、(1) 超高真空中で試料を作製し、その場で構造と磁気特性を評価できる装置の立ち上げ・評価、(2) 立ち上げた装置を用いて、磁性薄膜として一般的である Fe を半導体基板 Si (111) 上に蒸着して SPE 法 (低温で Fe を蒸着後アニール) で色々な Fe シリサイドを作製し、その構造は RHEED で磁気特性は SMOKE を用いて評価し、その後、幾つかの相については STM、XRD、TEM、VSM、SQUID を用いて系統的かつ多角的に研究を行った。その結果、構造と磁気特性の相関及び磁気特性の起源について、以下のような優れた成果を得た。

(1) 超高真空中で構造と磁気特性を評価できる装置の立ち上げ・評価

評価には膜厚の増加に伴い構造と磁気特性が変化する系として、よく研究され再現性が確認されている Cu (001)-Fe を用い、再現性を確認した。また、二次元表示型光電子分光装置の改良作業の一環として、Cu (001)-Fe を用いて立体原子顕微鏡測定を行い、磁性と立体的な構造の関係を解析した。

(2) 半導体基板 Si (111) 上の種々の Fe シリサイドの構造と磁気特性について、立ち上げた装置を用いた系統的かつ多角的な研究

得られた構造・磁気特性をまとめ、SPE 成長させた Si (111)-Fe の磁気構造相図を完成させた。各相の構造・磁気特性について下記のような成果が得られた。

(1) $\Theta_{Fe} < 0.5$ nm の蒸着直後では、面垂直方向に磁化容易軸をもつ強磁性の Fe (111) が形成される。

(2) $1 \times 1, 2 \times 2, c(8 \times 4)$ 相 ($\Theta_{Fe} = 0.15 - 0.5$ nm, $T_a = 200 - 600^\circ\text{C}$) ではバルクでは準安定な CsCl 構造をもつ c-FeSi (111) が成長しており、40 K で $[1-10]$ Si 方向に磁化容易軸を持つ強磁性であることを明らかにした。第一原理計算 (共同研究) などから、この強磁性の起源は c-FeSi (111) と Si (111) の界面の B5 構造にある、界面強磁性であることを明らかにした。

(3) $\sqrt{3} \times \sqrt{3} (\epsilon\text{-FeSi})$ ($\Theta_{Fe} = 0.25 - 0.5$ nm, $T_a = 400 - 700^\circ\text{C}$) は単相では形成されないが、SMOKE 測定はバルクと同じく常磁性であることを示唆する結果を得た。

(4) $3D-2 \times 2 (\alpha\text{-FeSi}_2)$ ($\Theta_{Fe} = 0.15 - 0.5$ nm, $T_a = 600 - 800^\circ\text{C}$) はバルクでは 900°C 以上の高温で安定な相であるが、Si (111) の表面上ではこの温度でも形成され、バルクと同じく常磁性

であった。

(5) 高膜厚側 ($\Theta_{\text{Fe}} > 3.0$ nm) の蒸着直後に形成される bcc-Fe (111) 相は、強磁性で、磁化容易軸はバルクと同じく面内方向である。

(6) bcc-Fe (111) 相を 300℃ 付近でアニールすると、室温でも強磁性をもつ多結晶相が形成されることを明らかにした。XRD 測定から、この多結晶相は β -FeSi₂ と Fe₃Si から形成されており、強磁性の起源が Fe₃Si 成分にあることを明らかにした。

(7) $\Theta_{\text{Fe}} = 3.0 - 10.0$ nm, Ta = 500 - 600℃ の条件では、 β -FeSi₂ (101) が表面に形成される。SMOKE、VSM 測定の結果からこの相が室温でも強磁性を持つことを明らかにした。断面 TEM 測定から、 β -FeSi₂ 相と Si (111) の界面に強磁性の Fe₃Si 多結晶相が形成されることを明らかにし、 β -FeSi₂ (101) / Fe₃Si / Si (111) の強磁性ヘテロ構造であることを発見した。

以上のように、本論文は従来未知であった Si 基板上の様々な Fe シリサイドの構造と磁性について初めて系統的かつ多角的に研究して相図にまとめることに成功したものである。その過程で、Si 上の強磁性相をいくつか発見している。特に、1×1、2×2、c(8×4) 相での界面強磁性相と、 β -FeSi₂ (101) / Fe₃Si / Si (111) の強磁性ヘテロ構造は、原子レベルで規定された今回の研究で初めて明らかになったものである。このような半導体上の強磁性相について原子レベルの研究を行ったことは、基礎科学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。