

## 論文内容の要旨

博士論文題目 金属吸着 Si 表面に閉じ込められた二次元電子状態

氏名 森田 誠

(論文内容の要旨)

物質の表面では、結晶の周期性が崩れたことにより、または異種原子が吸着したことにより、表面状態のほかにしばしば量子状態が誘起される。半導体表面では、表面と内部の電子状態が異なることによってバンド湾曲が誘起され、二次元電子状態(サブバンド)が形成される。さらに、表面近傍では電荷分布の対称性が破れており、Rashba 型スピン分裂が生じる。森田氏は、これら表面垂直方向ポテンシャルに誘起される電子状態について、角度分解光電子分光の手法で (i) Ga,Pb 吸着 Si(111)反転層中のホールサブバンドと (ii) Bi 薄膜/Si(001)の電子状態およびスピン状態を研究した。

### (i) 角度分解光電子分光による Ga,Pb 吸着 Si(111)反転層中のホールサブバンド

近年用いられている微細化された MOSFET のチャンネル層のキャリア反転層では電子は閉じ込められてサブバンドが形成される。デバイスの高速化を行なうために有効質量を軽くする必要があるが、デバイスをそのまま用いた有効質量の直接的な評価は困難である。半導体基板と表面構造を制御することで、バンド湾曲ポテンシャルに閉じ込められた二次元電子状態 (サブバンド) を形成することが出来、MOSFET のチャンネル層と同じ電子状態を角度分解光電子分光で研究できるようになった。森田氏は、Ga および Pb 吸着 Si(111)表面構造に誘起されたサブバンド形成について研究し、バンド湾曲ポテンシャルの詳細について議論した。

表面構造に誘起されたバンド湾曲量が大きいほどサブバンドのエネルギー準位間隔が大きくなると予想されるが、これまでに報告されている Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -R30°-Pb よりもバンド湾曲量が少ない Si(111) 6.3×6.3 -Ga に誘起されたサブバンドの準位間隔が大きいことが分かった。この結果から、一様に分布したキャリア濃度では説明ができず、新たに、試料作製時の試料加熱

によって Ga が Si 内部に拡散し、ドーパントとして作用することによって深い量子井戸構造ができるというモデルを提案した。

### (ii) Bi 薄膜/Si(001)の電子状態およびスピン状態

Rashba 型スピン分裂は、二次元電子系において空間反転対称性の破れによりスピン縮退が解ける現象として知られ、非磁性体においてもスピン偏極することから、デバイス分野で研究されてきている。表面では結晶の空間反転対称性が破れているため多くの系で生じると考えられている。最近、表面系の Rashba 型スピン分裂が盛んに研究され、Si(111)上に作成した Bi 薄膜の表面状態が Rashba 型スピン分裂であることが報告された。応用の点から重要と考えられる Si(001)を基板に作製した Bi(111)薄膜の表面状態においてもスピン分裂が期待されるため、角度分解光電子分光およびスピン分解角度分解光電子分光を用いて Bi 薄膜/Si(001)の電子状態とスピン状態について調べた。

超高真空中にて Si(001)清浄表面に Bi 原子を室温で蒸着して Bi 薄膜を作製し、RHEED パターンを解析することにより、試料表面はダブルドメインの Bi(111)構造で説明できることを確認した。角度分解光電子分光の結果には複数のバンド分散が見られ、本試料がダブルドメインであることから  $\bar{\Gamma}-\bar{M}$  方向と  $\bar{\Gamma}-\bar{K}$  方向の 2 方向の電子状態を同時に測定していることを考慮すると、Bi 薄膜/Si(111)の電子状態の殆どは Bi(111)/Si(111)と同じであることを明らかにした。一方、 $\bar{\Gamma}-\bar{M}$  方向と  $\bar{\Gamma}-\bar{K}$  方向の中間の方向( $\bar{\Gamma}-\bar{M}$  方向から面内に  $15^\circ$  回転した方向)では縮重した電子状態が測定されると期待していたが、ダブルドメインでは説明できない  $\bar{\Gamma}-\bar{M}$  に類似した電子状態を見出した。スピン分解測定の結果、Bi(111)薄膜/Si(001)のフェルミ面近傍の表面状態がスピン分裂していることを実験的に明らかにした。また、低温でバンドがシフトするという新しいスピンバンドにおける現象を見出した。

これらの Si 上で見出された新奇な量子状態やスピン偏極した電子状態は、物理的に重要であるだけでなく、高速な半導体デバイスや次世代のスピントロンクスデバイスの作製に寄与すると期待される。

(論文審査結果の要旨)

本論文は、半導体表面のバンド湾曲に誘起される二次元電子状態(サブバンド)、および、表面における空間対称性の破れに起因する Rashba 型スピン分裂について、角度分解光電子分光の手法で電子状態およびスピン状態について研究したものである。

#### (i) 角度分解光電子分光による Ga,Pb 吸着 Si(111)反転層中のホールサブバンド

近年用いられている微細化された MOSFET のチャネル層のキャリア反転層では電子は閉じ込められてサブバンドが形成される。デバイスの高速化を行なうために有効質量を軽くする必要があるが、デバイスをそのまま用いた有効質量の直接的な評価は困難である。半導体基板と表面構造を制御することで、バンド湾曲ポテンシャルに閉じ込められた二次元電子状態 (サブバンド) を形成することが出来、MOSFET のチャネル層と同じ電子状態を角度分解光電子分光で研究できるようになった。森田氏は、Ga および Pb 吸着 Si(111)表面構造に誘起されたサブバンド形成について研究し、バンド湾曲ポテンシャルの詳細について議論した。

表面構造に誘起されたバンド湾曲量が大きいほどサブバンドのエネルギー準位間隔が大きくなると予想されるが、これまでに報告されている Si(111)- $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -R30°-Pb よりもバンド湾曲量が少ない Si(111) 6.3×6.3 -Ga に誘起されたサブバンドの準位間隔が大きいことが分かった。この結果から、一様に分布したキャリア濃度では説明ができず、新たに、試料作製時の試料加熱によって Ga が Si 内部に拡散し、ドーパントとして作用することによって深い量子井戸構造ができるというモデルを提案した。

#### (ii) Bi 薄膜/Si(001)の電子状態およびスピン状態

Rashba 型スピン分裂は、二次元電子系において空間反転対称性の破れによりスピン縮退が解ける現象として知られ、非磁性体においてもスピン偏極することから、デバイス分野で研究されてきている。表面では結晶の空間反転対称性が破れているため多くの系で生じると考えられている。最近、表面系の Rashba 型スピン分裂が盛んに研究され、Si(111)上に作成した Bi 薄膜の表面状態が

Rashba 型スピン分裂であることが報告された。応用の点から重要と考えられる Si(001)を基板に作製した Bi(111)薄膜の表面状態においてもスピン分裂が期待されるため、角度分解光電子分光およびスピン分解角度分解光電子分光を用いて Bi 薄膜/Si(001)の電子状態とスピン状態について調べた。

超高真空中にて Si(001)清浄表面に Bi 原子を室温で蒸着して Bi 薄膜を作製し、RHEED パターンを解析することにより、試料表面はダブルドメインの Bi(111)構造で説明できることを確認した。角度分解光電子分光の結果には複数のバンド分散が見られ、本試料がダブルドメインであることから  $\bar{\Gamma}-\bar{M}$  方向と  $\bar{\Gamma}-\bar{K}$  方向の 2 方向の電子状態を同時に測定していることを考慮すると、Bi 薄膜/Si(111)の電子状態の殆どは Bi(111)/Si(111)と同じであることを明らかにした。一方、 $\bar{\Gamma}-\bar{M}$  方向と  $\bar{\Gamma}-\bar{K}$  方向の中間の方向( $\bar{\Gamma}-\bar{M}$  方向から面内に  $15^\circ$  回転した方向)では縮重した電子状態が測定されると期待していたが、ダブルドメインでは説明できない  $\bar{\Gamma}-\bar{M}$  に類似した電子状態を見出した。スピン分解測定の結果、Bi(111)薄膜/Si(001)のフェルミ面近傍の表面状態がスピン分裂していることを実験的に明らかにした。また、低温でバンドがシフトするという新しいスピンバンドにおける現象を見出した。

これらの成果から、表面状態を制御することにより、新奇な量子状態やスピン偏極した電子状態を作製しうる可能性を示し、半導体デバイスの性能向上や新たなスピndevice開発に道を拓いた。

以上のように本論文では、半導体表面における量子状態やスピン状態について、新しい可能性を示しており、学術的価値ならびに工学的価値は高い。よって審査委員一同は、本論文は博士（理学）論文として価値あるものと認めた。