



|              |   |
|--------------|---|
| Title        | 化合物半導体表面吸着構造の軟X線定在波解析   |
| Author(s)    | 杉山, 宗弘  |
| Citation     | 大阪大学, 1997, 博士論文  |
| Version Type |   |
| URL          | <a href="https://hdl.handle.net/11094/40472">https://hdl.handle.net/11094/40472</a>   |
| rights       |   |
| Note         | 著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、<a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">大阪大学の博士論文について</a>をご参照ください。 |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

|               |  |
|---------------|--|
| 氏 名           | すぎやまむねひろ<br>杉 山 宗 弘  |
| 博士の専攻分野の名称    | 博 士 (工 学)  |
| 学 位 記 番 号     | 第 1 2 8 7 0 号  |
| 学 位 授 与 年 月 日 | 平 成 9 年 3 月 18 日   |
| 学 位 授 与 の 要 件 | 学位規則第 4 条第 2 項該当   |
| 学 位 論 文 名     | 化合物半導体表面吸着構造の軟 X 線定在波解析  |
| 論 文 審 査 委 員   | (主査)<br>教 授 梅野 正隆<br>(副査)<br>教 授 柳田 祥三    教 授 青野 正和    教 授 白藤 純嗣 |

## 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、高エネルギー物理学研究所放射光実験施設の放射光軟 X 線ビームラインにおいて行った化合物半導体表面吸着構造の軟 X 線定在波解析に関する研究をまとめたもので、9 章によって構成されている。

第 1 章では、本研究の背景として、化合物半導体表面、界面制御における異種原子の吸着挙動を把握することの意義と、軽元素吸着構造の解析法としての軟 X 線定在波法の有効性について述べている。

第 2 章では、X 線定在波法の原理と得られる構造情報がどのようなものかを概説し、解析に用いる理論計算の概要を述べている。軟 X 線を用いた X 線定在波測定においては、ブラッグ反射の半値幅が広がることを理論的に指摘し、実験におけるアライメントが大幅に簡略化されることを示している。また、第 3 周期軽元素の吸収端エネルギーは軟 X 線領域にあるため、これら軽元素が吸着した表面の構造解析には軟 X 線利用が適していることを示している。

第 3 章では、高エネルギー物理学研究所放射光実験施設の放射光軟 X 線ビームラインの概要を述べ、そこで単色平行な軟 X 線放射光を用いて軟 X 線定在波測定を行うために開発した装置の概要と性能を示している。

第 4 章では、硫黄処理 GaAs (001) 表面における硫黄原子吸着サイトを角度走査法の軟 X 線定在波測定により解析している。軟 X 線をプローブとして用いることによって単原子層オーダーの硫黄原子に対しても十分な強度の二次放射線収量が得られている。解析の結果、Ga 終端面に対して硫黄原子がブリッジ状に結合した構造となっていることを明らかにしている。さらに、得られた構造モデルと報告されている理論計算結果が定量的に一致することを示している。

第 5 章では、硫黄処理した GaAs (111) A 表面と B 表面における硫黄原子吸着サイトが異なることを実験的に明らかにし、理論計算結果と対比させている。さらに、MBE 成長させた SrF<sub>2</sub> 薄膜に埋められた硫黄原子層の乱れを定量的に解析し、軽元素の界面挿入層の解析においても軟 X 線定在波法が有効な解析手段であることを示している。

第 6 章では、MBE 結晶成長装置を用いて作製した Sb 終端 GaAs (001)-(2×4) 表面構造の解析結果を述べている。Sb ダイマー結合距離は 2.95 Å と決定され、報告されている Sb/Si (001) 表面や Sb/Ge (001) 表面におけるそれとほぼ同じであることを明らかにしている。

第 7 章では、MBE 結晶成長装置を用いて作製した GaAs (001)-(2×4) 清浄表面に Si を単原子層以下吸着させた

試料に対して背面反射 X 線定在波解析を適用し、Si 原子は複数のサイトに吸着していることを示している。

第 8 章では、化学結合状態を識別できる手法として二つの方法を提案し、その有効性を検証している。光電子分光 X 線定在波法を  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$  溶液処理して加熱する前の GaAs (001) 表面に適用したところ、S—Ga 結合状態の硫黄原子が規則配列化していることと S—As 結合状態の硫黄原子がアモルファス状に分布していることが明らかとなった。一方、吸収端 X 線定在波法を酸化させた S/GaAs(111)B 表面に適用し、酸化された硫黄原子は無秩序になっており、酸化されていない硫黄原子についても周りの Ga 原子が酸化されることに起因して乱れることが示されている。

第 9 章では、本研究で得られた結果を総括している。

## 論文審査の結果の要旨

化合物半導体は、その発光機能、および高速、高周波応答性能を生かし、デバイス材料としてすでに実用化されているばかりでなく、超薄膜における量子サイズ効果やトンネル効果を積極的に利用した新しい機能を持つデバイスを作る試みにも活発に応用されている。これらを工業的に実現するためには、原子レベルの視点でデバイス作製プロセスを制御する必要性から、化合物半導体表面における原子の吸着・脱離反応のみならず、吸着に誘起される表面構造の変化や吸着原子の内部拡散までを包含した種々の現象が解明されることが望まれている。本研究は、半導体ヘテロ接合界面形成、ドーピング、パッシベーション、エッチング等の化合物半導体基盤技術の開発において、その挙動の解明が望まれる Al, Si, P, S, Cl 等の第 3 周期軽元素の化合物半導体表面への吸着構造を解析できる手法として、軟 X 線定在波法の有効性を示したもので、その主な成果は以下の通りである。

- (1) 第 3 周期軽元素の吸収端エネルギーは軟 X 線領域にあるため、これら軽元素が吸着した表面の構造解析には軟 X 線利用が適していることを指摘している。また、X 線定在波測定において、従来よりもエネルギーが低い軟 X 線を用いることによってブラッグ反射の半値幅が広がることを理論的に指摘し、実験におけるアライメントが大幅に簡略化されることを実験的に示している。
- (2) \* 高エネルギー物理学研究所放射光実験施設の放射光軟 X 線ビームラインで単色平行な放射光の軟 X 線を用いて軟 X 線定在波測定を行うために、超高真空ゴニオメータを装備した装置を開発している。
- (3) 硫黄処理 GaAs(001), (111) A, (111) B 表面における硫黄原子吸着サイトを角度走査軟 X 線定在波解析した結果、Ga 終端面に対して硫黄原子がブリッジ状に結合した構造となっていることが明らかとなった。さらに、得られた構造モデルと報告されている理論計算結果が、定量的に一致することを示している。
- (4) MBE 結晶成長装置を用いて作製した Sb 終端 GaAs(001) — (2×4) 表面構造の解析を背面反射法で行い、最表面の Sb ダイマーの結合距離を決定している。これにより、報告されている Sb/Si(001) 表面や Sb/Ge(001) 表面におけるそれとほぼ同じであることを明らかにしている。
- (5) MBE 結晶成長装置を用いて作製した GaAs(001) — (2×4) 清浄表面に Si を単原子層以下吸着させた試料に対して背面反射 X 線定在波解析を適用し、Si 原子が複数のサイトに吸着していることを明らかにしている。
- (6) 化学結合状態を識別できる手法として二つの方法をはじめて提案し、その有効性を検証している。光電子分光 X 線定在波法を、 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$  溶液処理して加熱する前の GaAs(001) 表面に適用し、S—Ga 結合状態の硫黄原子が規則配列化していることと S—As 結合状態の硫黄原子がアモルファス状に分布していることを明らかにしている。また、吸収端 X 線定在波法を酸化させた S/GaAs(111) B 表面に適用し、化学結合状態が異なる同種原子についても配列の仕方を定量的に見積もることが可能であることを示している。

以上のように、本論文は、放射光の軟 X 線を用いた X 線定在波法を、化合物半導体表面への軽元素吸着構造の解析に実際に適用し、信頼性のある構造解析技術として確立している。また、化学結合状態を識別しながら構造解析が行える二つの手法を新たに提案し、これまで構造解析が困難であったような系に対しても適用しており、応用物理学ならびに表面物理学の発展に寄与するところが大きい。よって本論文は、博士論文として価値あるものと認める。