

清浄及びH<sub>2</sub>S処理したGaP(001),InP(001)InAs(001)  
表面の構造と電子状態の研究

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学大学院電子科学研究科 公開日: 2008-04-11 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 下村, 勝 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10297/1587">http://hdl.handle.net/10297/1587</a>

氏名・(本籍)	下 村 勝 (静岡県)
学位の種類	博 士 (工 学)
学位記番号	工博甲第 144 号
学位授与の日付	平成 9 年 3 月 22 日
学位授与の要件	学位規程第 5 条第 1 項該当
研究科・専攻の名称	電子科学研究科 電子材料科学
学位論文題目	清浄及びH <sub>2</sub> S処理したGaP(001),InP(001) InAs(001)表面の構造と電子状態の研究

論文審査委員	(委員長)		
	教授	田 部 道 晴	教授 福 田 安 生
	教授	福 家 俊 郎	教授 中 村 高 遠
	助教授	伊ヶ崎 泰 宏	

## 論 文 内 容 の 要 旨

ガリウムヒ素(GaAs)やインジウムリン(InP)などのⅢ-V族化合物半導体は、電子移動が大きいことや再結合発光の高率が高いといった特徴があり、高電子移動トランジスタ(HEMT)などの超高速電子素子や、半導体レーザーなどの光デバイス素子として利用するための研究が行われている。そして、このようなデバイスを極限まで高密度化するためには、原子レベルでの制御が不可欠である。しかし、未だ原子レベルでの表面構造については不明な点が多い。また、清浄表面では表面準位のためフェルミ準位のピンニングが生じ、デバイス本来の特性が阻害される。これを防ぐために、硫黄によるパッシベーションが研究されている。現在では、硫黄処理の方法として多硫化アンモニウムや硫化ナトリウムなどの硫化溶液処理が主体であるが、これに比べてH<sub>2</sub>Sを用いた硫化処理は、真空中で一貫して作業を行うことができる点や、炭素などの汚れの影響がないなどの点で優位なため注目されている。しかしながらその表面構造や電子状態は不明な点が多い。

そこで本研究では、GaP(001)、InP(001)、InAs(001)の、イオンスパッタと加熱(ion bombardment and annealing: IBA)処理によって清浄化されたカチオン安定表面、及びそのH<sub>2</sub>S処理表面において、走査トンネル顕微鏡(STM)、低速電子線回析(LEED)、反射高速電子線回析(RHEED)、オージェ電子分光(AES)、光電子分光(PES)、高分解能電子エネルギー損失分光(HREELS)を用いて、その構造について研究し、またPESや逆光電子分光(IPES)により、H<sub>2</sub>S処理前後の占有及び非占有電子状態の変化について研究し、以下のことを明らかにした。

1. GaP(001)-(4×2) 清浄表面のSTM観察により、 $[110]$ 方向の4倍の周期構造がおよそ2原子層分の凹凸からなっており、3層目のガリウムが表面に露出していることがわかった。よって2Ga-dimer 2missing-row-dimerモデルを提案した。

2. H<sub>2</sub>S処理したGaP(001)表面は、LEED、STMにおいて(1×2)の周期構造が観察された。またIPESにより、清浄表面に観察されていたバンドギャップ内のガリウムのダングリングボンドによる状態が、硫黄が吸着した後に大幅に減少することがわかった。これは硫黄によるパッシベーションの効果を直接観察した初めての結果である。

3. InP(001)-(4×2) 清浄表面をSTMにより観察し、初めて原子分解能のイメージを得た。非占有状態を表す試料電圧が+1.5Vの像と、占有電子状態を表す試料電圧が-1.5Vの像を組み合わせることにより、その表面構造を解析した結果、InP(001)-(4×2)表面は $[110]$ 方向に非対称な(4×2)ユニットセルをもつことがわかった。このような結果は他のⅢ-V族化合物半導体の(001)表面においても報告がなく、既存のモデルでは説明できない。そこで、これらの結果を説明できる、第1層目にイリジウムとリンの結合を持つ構造モデルを新たに提案した。

4. H<sub>2</sub>S処理したInP(001)表面では、硫黄の吸着量により、異なった構造が観察された。まず硫黄の吸着量が0.5MLの場合には、STM、LEED、RHEEDにより(1×2)構造が観察され、硫黄がインジウム層の上にブリッジ状に結合し、 $[110]$ 方向に1原子つつ欠損した構造であると考えられる。吸着量が1.0MLの場合には、XPSから硫黄の結合状態が2種類あることがわかり、ブリッジ状の硫黄とサブレイヤーに入り込んだ硫黄があると考えられる。すなわち0.5ML分の硫黄がブリッジ状にイリジウムと結合し、残りの0.5ML分がサブレイヤーに入り込んだモデルを提案した。PES、IPESより、表面準位の減少は明白であり、さらにステップ密度の減少や酸素に対する安定性の増加など、デバイス作製を考慮した場合、H<sub>2</sub>S処理には多大な効果があることが分かった。

5. InAs(001)-(4×2) 清掃表面のSTM観察を行い、第1層目及び第3層目にインジウムダイマーを仮定した1In-dimer 3missing-row-dimer構造であることがわかった。

6. H<sub>2</sub>S処理したInAs(001)表面では、(2×1)LEEDパターンが観察された。またIPESにより、フェルミ準位付近の表面準位が減少することがわかった。

Ⅲ-V族化合物半導体における原子レベルでの表面構造解析は、超高密度デバイスの可能性を模索する上で、重要な知見を与える。よって、本研究においてGaP(001)、InP(001)、InAs(001)の清浄表面、及びH<sub>2</sub>S処理表面の原子レベルの構造解析及び電子状態の変化を系統的に調べた意義はきわめて大きい。

## 論文審査結果の要旨

Ⅲ-V族化合物半導体は超高速電子素子や、光デバイス素子に応用されている。このようなデバイスを高密度化するためには、原子レベルでの表面制御が不可欠である。しかし、未だ原子レベルでの表面構造については不明な点が多い。また、清浄表面では表面準位のためフェルミ準位のピンニングが生じ、デバイス性能が阻害される。これを防ぐために、硫黄によるパッシベーションが研究されている。現在、硫化処理の方法として多硫化アンモニウム等の溶液処理が多く用いられているが、 $\text{H}_2\text{S}$ ガスを用いた場合、デバイス作製を真空中で一貫して行うことができるため注目されている。しかしながらその表面構造や電子状態は不明な点が多い。

本論文は、 $\text{GaP}(001)$ 、 $\text{InP}(001)$ 、 $\text{InAs}(001)$ のイオンスパッタと加熱によって清浄化された表面、及びその $\text{H}_2\text{S}$ 処理表面の構造及び電子状態について研究した結果を纏めたものである。

本論文は9章から成り、第1章は序論、第2章は実験方法について述べている。第3章では、 $\text{GaP}(001)$ -( $4\times 2$ )清浄表面は、 $[110]$ 方向の4倍の周期構造がおよそ2原子層分の凹凸からなっており、3層目のガリウムが表面に露出していることを明かにし、 $2\text{Ga}$ ダイマー- $2$ ダイマー欠損表面モデルを提案した。第4章では、 $\text{H}_2\text{S}$ 処理した $\text{GaP}(001)$ 表面は、( $1\times 2$ )の周期構造をとること、また、清浄表面に観察されていたバンドギャップ内のガリウムのダングリングボンドによる電子状態が、硫黄吸着した後に大幅に減少することを見いだした。これは硫黄によるパッシベーションの効果を直接観察した初めての結果である。第5章では、 $\text{InP}(001)$ -( $4\times 2$ )清浄表面をSTM(走査トンネル顕微鏡)により観察し、初めて原子分解能のイメージを得、非占有及び、占有電子状態像から、その表面構造を解析した結果、この表面は $[110]$ 方向に非対称な( $4\times 2$ )ユニットセルをもつことを明らかにした。これと類似の結果は他のⅢ-V族化合物半導体の(001)表面において報告がない。これらの結果を説明できる、第1層目にインジウムとリンの結合を持つ構造モデルを新たに提案した。第6章では、 $\text{H}_2\text{S}$ 処理した $\text{InP}(001)$ 表面は、硫黄の吸着量が $0.5\text{ML}$ (原子層)の場合には、( $1\times 2$ )構造をとり、硫黄がインジウム層の上にブリッジ状に結合し、 $[110]$ 方向に1原子つつ欠損した構造をとること、吸着量が $1.0\text{ML}$ のばあいには、硫黄の結合状態が2種類あることを明らかにした。又、 $\text{H}_2\text{S}$ 処理により、表面準位が大幅に減少することを見いだした。第7章では、 $\text{InAs}(001)$ -( $4\times 2$ )清浄表面のSTM観察を行い、第1層目及び第3層目にインジウムダイマーを仮定した $1\text{In}$ ダイマー- $3$ ダイマー欠損構造モデルを提案した。第8章では、 $\text{H}_2\text{S}$ 処理した $\text{InAs}(001)$ 表面では、( $2\times 1$ )構造をとり、フェルミ準位付近の表面準位が減少することを明らかにした。第9章は結論を述べている。

以上の知見は半導体表面科学へ多大な寄与をするのみならず、Ⅲ-V族化合物半導体の高密度デバイスを設計する上で重要な指針を与える。よって、本論文は博士(工学)を授与するに充分であることを認める。