



Title	半導体再構成表面における電子励起誘起原子過程の研究
Author(s)	稲見, 栄一
Citation	大阪大学, 2009, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/57478
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、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

【175】

氏 名	稲見栄一 <small>いな み えい いち</small>
博士の専攻分野の名称	博士（工 学）
学 位 記 番 号	第 2 3 3 0 4 号
学 位 授 与 年 月 日	平 成 21 年 7 月 21 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	半導体再構成表面における電子励起誘起原子過程の研究
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 谷村 克己 (副査) 教 授 西嶋 茂宏 教 授 栗津 邦男

論文内容の要旨

共有性半導体表面は、結晶内部と異なる対称性、構造、電子状態を有する擬二次元的物質相を構成する。ここでは、電子系の励起が直接的な原因となって表面原子の結合切断が発生し、構造変化が誘起される。この現象の機構解明は、基礎学術的に重要であるばかりでなく、原子の結合切断、選択吸着などを素過程とする新規ナノ構造創製手法の基礎を提供してナノテクノロジーの更なる進展に資するとともに、光触媒物質・ナノ光電子素子など機能性表面の劣化現象解明への指針を与えるなど、重要な工学的意義を有する。本論文は、半導体表面における励起誘起原子過程の機構解明を目的とした研究成果をまとめたものである。以下に各章の要旨を示す。

第1章では、序論として、研究対象とする半導体表面の基礎物性、及び光誘起原子過程に関する過去の研究成果と未解決の課題を体系的に整理し、本研究の位置づけを行った。

第2章では、本研究で用いた実験装置のうち、特に、超高真空走査型トンネル顕微鏡(UHV-STM)とナノ秒、フェムト秒レーザーシステムの特徴をまとめ、更に、試料作成方法の詳細について記した。

第3章では、過去に提唱された半導体表面上の励起誘起結合切断モデル(2正孔局在機構)を、その適応限界を打破して、非平衡高密度励起価電子系で取扱い、結合切断を統一的に記述可能な理論を構築した。そして、この拡張理論によって、過去の典型的な実験結果を定量的に解析できる事を示した。

第4章では、代表的なSi再構成表面であるSi(111)-(2×1)表面に対する光誘起構造変化の研究成果のうち、結晶価電子系励起を誘起した結果を体系的に記す。励起によって表面固有サイトを占めるSi原子の局所的な結合切断が発生する事を実証し、その効率が励起強度に非線形的に依存する事を見出した。この結合切断過程は、第3章で示した2正孔局在機構の拡張理論によって、定量的に記述された。

第5章では、Si(111)-(2×1)表面固有の光学遷移を選択的に励起した場合の表面構造変化の結果を述べる。赤外フェムト秒レーザー励起による表面光学遷移によって、表面原子の局所的結合切断が発生する事を実証し、表面サイトへの2正孔局在が結合切断の基礎過程である事を、直接的に示した。

第6章では、III-V族化合物半導体表面における光誘起構造変化の結果を述べる。STMによる表面構造変化の直接観察によって、形成される欠陥形態が試料のフェルミレベルに応じて大きく異なる事を明らかにし、結合切断に対する正孔の重要性が半導体表面に一般的である事を示した。

第7章では、InP(110)-(1×1)表面を対象とし、STM探針先端からの電子注入、正孔注入の条件下での表面構造変化の結果を述べる。正孔注入によってのみ表面原子の結合切断が発生する事を見出し、結合切断を誘起する励起種が正孔である事を実証した。

第8章では、Si(111)-(2×1)、InP(110)-(1×1)、Si(111)-(7×7)、及びSi(001)-(2×1)表面での光誘起結合切断の質的な相連点を、表面固有の構造、電子的性質に基づき議論した。そして、励起誘起結合切断機構を2正孔局在理論に立脚し、統一的に説明できる事を示した。

第9章では、各章で得られた結論をまとめ、本論文で得られた成果を総括した。

論文審査の結果の要旨

共有性半導体表面は、結晶内部と異なる対称性、構造、電子状態を有する擬二次元的物質相を構成する。そこでは、光や電子線照射によって、電子系の励起が直接的な原因となって表面原子の結合切断が発生し、表面構造変化が誘起される。この励起誘起構造不安定性現象の機構解明は、基礎学術的に重要であるばかりでなく、原子レベルでのナノパターンニングや新規ナノ構造創製手法の基礎を提供してナノテクノロジーの更なる進展に資するとともに、光触媒物質・ナノ光電子素子など機能性表面の劣化現象解明への指針を与えるなど、多くの重要な工学的意義を有する。

本論文は、シリコンおよび III-V 族化合物半導体表面における励起誘起原子過程の機構解明を目的とした研究成果をまとめたものである。各表面で発生する一見個別に見える現象を統一的に理解するために、過去の研究成果を体系的に総括し、統一的描像を可能にするために必須な知見を、超高真空走査型トンネル顕微鏡(UHV-STM)とナノ秒、フ

ェムト秒レーザーを駆使して獲得するとともに、過去に提唱された理論的モデルを、より広い条件下で適応可能にするための理論的な展開を行って、電子励起誘起原子過程の統一的理解を達成している。

まず、今まで研究の全く行われていないSi(111)-(2x1)表面の重要性に着目し、結晶価電子系と表面電子系を選択的に励起して、その結果発生する表面構造変化の特徴が同一であることを明らかにしている。この結果は、表面原子サイトへの励起の局在が、結合切断をもたらす主要因であることを示している。それとともに、結合切断効率が励起強度に非線形的に依存する事実を確認してさらに一般化し、現象の一大特徴を解明している。

次に、電子系励起で発生する、電子、正孔、励起子のうち、いずれがバンド切断を誘起するか、という重要な問題を、エネルギーギャップ中に固有な表面状態が存在しない III-V 族半導体表面に着目して研究し、光誘起で発生する構造変化形態のフェルミ準位依存性を発見して、結合切断を誘起する励起種が、価電子系正孔であることを疑問の余地なく実証している。

以上の、半導体再構成表面で発生する正孔局在による非線形性現象を、2正孔局在の概念を用いて統一的に記述するため、初期に提案された平衡条件下での理論を、非平衡高密度励起価電子系における定式化へと拡張し、過去に明らかにされている実験結果のみならず、新たに得た実験結果を定量的かつ統一的に記述可能であることを示している。

更に、以上の知見に立脚し、半導体再構成表面を、空間を限定したSTMチップからのトンネル電流によって励起し、表面価電子系への正孔注入によってのみ表面原子の局所的バンド切断が発生する事、を発見して、2正孔局在機構を直接的に実証するとともに、トンネル正孔注入によって、半導体表面に対して、原子レベルでの直描パターンニングが可能であることを示し、将来の表面ナノ構造プロセスへの大きな展開可能性を示している。

以上のように、本論文は、工学的にも基礎学術的にも極めて重要な、半導体再構成表面に対する電子励起誘起原子過程を実験的理論的に研究し、多くの新規かつ重要な知見を明らかにしている。また、発表した論文は全て、Physical Review 誌など当該分野で権威ある国際学術誌であり、研究の質の高さも十分に評価できる。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。