

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 30 日現在

機関番号：14603

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360018

研究課題名(和文) 歪み半導体の表面近傍における歪み量と価電子構造の研究

研究課題名(英文) Strain and valence band structure in the subsurface region of strained semiconductors

研究代表者

武田 さくら (TAKEDA, SAKURA)

奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・助教

研究者番号：30314537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：歪み印加によりキャリア移動度が向上した半導体がMOSFETに利用されている。移動度向上の原因は歪みによるバンド分散変化のためとされているが、実験的に未検証である。本研究では歪み量とバンド有効質量の相関を解明する為、歪み量と価電子バンド分散構造をそれぞれ精密に測定した。2軸引張り歪みSiの表面極近傍の歪み量を低速電子回折とX線回折で精密に測定し、歪み結晶の歪みが最表面まで緩和していないことを明らかにした。機械的に印可した1軸引張り歪みを測定するために超高真空ラマン分光装置を新たに開発し、歪みが局所的に入る様子を明らかにした。角度分解光電子分光で歪みSiのバンド分散が変形することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Strained Si is widely used in modern MOSFET to enhance carrier mobility. Theoretical studies attribute the mechanism of the mobility enhancement to band deformation by strain. We experimentally investigated the relationship between the strain and the band deformation by measuring strain and the band dispersion precisely. In the case of biaxially strained Si on SiGe alloy, we found that the epitaxial strain is retained through the strained Si layer to the very surface by XRD and LEED I-V measurements. For the strain evaluation of uniaxially strained Si by mechanical stress application in UHV, we developed UHV Raman system. Using the system, we found that the mechanically applied uniaxial stress is distributed inhomogeneously in the sample. The band structure of uni- and bi-axial strained Si was investigated by ARPES, and deformation of the band structure was observed.

研究分野：物性物理

キーワード：歪みシリコン ARPES XRD LEED I-V ラマン 1軸歪み 2軸歪み 歪み効果

1. 研究開始当初の背景

歪み印加によりキャリア移動度を向上させた半導体が最先端 MOSFET に利用されている。歪みによるキャリア移動度の変化は、理論的には、歪みによるバンド分散構造の変化によるバンド有効質量変化に起因するとされているが、実験的に未検証である。歪みが結晶のバンド分散に与える影響を調べる必要があった。

2. 研究の目的

1 軸及び 2 軸歪みと結晶の電子バンド分散構造の相関を調べることが目的である。このためには、歪みとバンド分散構造をそれぞれ同一試料に対して精密に測定する必要がある。電子バンド分散の測定には既存の高分解角度分解光電子分光 (HR-ARPES) を用いて可能である。歪みの測定は、構造解析によく用いられる X 線回折法 (XRD) と低速電子回折法 (LEED I-V) が最適である。2 軸引張り歪みの歪み量測定を行う場合、HR-ARPES 測定した試料を超高真空 (UHV) 槽内から大気へ出し、これらの歪み量測定手法を適用させることが可能である。一方、1 軸引張り歪みの場合は、歪み導入は HR-ARPES UHV 槽内で機械的に行う必要があるため、歪み測定は機械的歪み印可時にその場で同時に行う必要がある。この目的には装置の性質上 XRD と LEED I-V は適さない。本研究では、近年大気中でシリコンの歪み量の測定によく用いられるラマン分光に着目し、HR-ARPES UHV 槽内に、「その場ラマン分光装置」を開発し、1 軸引張り歪み試料の歪みを行うこととした。以上をまとめると本研究の目標は以下のようになる。

- ①「その場ラマン分光装置」を開発し、HR-ARPES UHV 槽内で 1 軸引張り歪みを印可した試料の歪み量を明らかにする。
- ②ARPES では表面極近傍の電子状態を測定する。そこで、表面極近傍で緩和などにより歪みが結晶内部の値から変化してないか調べる必要がある。2 軸引張り歪みについて XRD と LEED I-V によって表面近傍の歪みを精密に測定する。
- ③これらの試料のバンド分散構造を ARPES で測定する。

3. 研究の方法

1 軸引張り歪み試料はこれまでに開発した UHV 槽内のピエゾ駆動型機械歪み印可機構で試料に 1 軸歪みを機械的に印可することで、作製した。試料の裏面側にピエゾモータに保持された応力印可棒があり、最高 5 nm の精度で前進し、試料を裏面から押すことで試料へ応力を印可することができる。

2 軸引張り歪み試料としては SiGe 混晶上の歪み Si エピタキシャル膜及び、SiGe 混晶上の歪み Si エピタキシャル膜を SiO<sub>2</sub>/Si 上に貼り付けた後、SiGe 混晶を取り除いて作製される strained Silicon on Inrator (sSOI) を用いた。

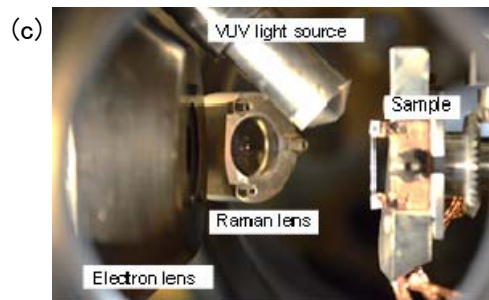
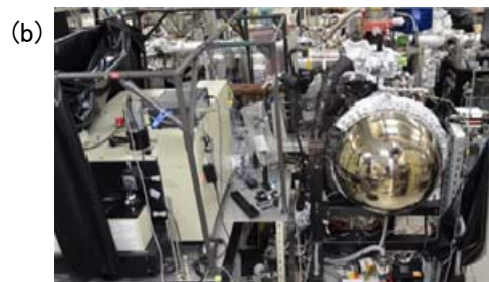
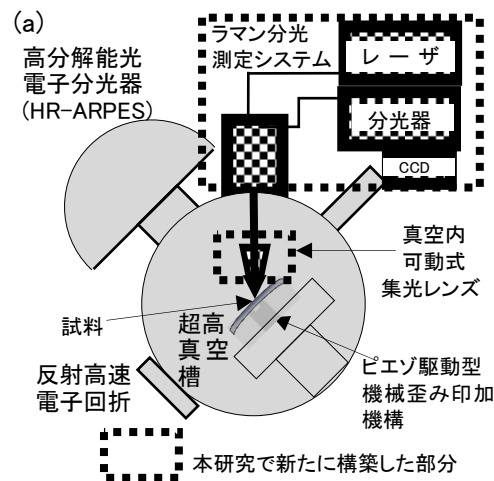


図 1. (a)本研究で開発した UHV 「その場ラマン分光装置」の概略図と(b)その外観写真、及び(c)真空槽内の写真。

「その場ラマン分光装置」では、ラマンピークのシフト量  $\Delta \omega$  [cm<sup>-1</sup>] と歪み量  $\epsilon_{//}$  の間には  $\Delta \omega = k \epsilon_{//}$  という比例関係があることを利用し、 $\Delta \omega$  を測定して  $\epsilon_{//}$  を求める。2 軸歪み Si の場合、比例定数 k は -769 cm<sup>-1</sup> と求められている。これより 0.025% の歪みを検知するには 0.19cm<sup>-1</sup> (24 μeV) のエネルギー分解能でラマン分光を行う必要があることがわかる。本研究では 0.025% の歪みを測定することを目標に装置を構築した。

4. 研究成果

- ①その場ラマン分光装置の開発と歪み測定 [発表論文 1]

図 1 に開発した「その場ラマン分光装置」の概略図と外観写真、UHV 槽内の写真を示す。UHV 槽には蒸着源、反射高速電子回折 (RHEED), ARPES (VG Scienta SES2002), ピ

エゾ駆動圧力印可マニピュレータが備わっている。ラマン分光に用いる半導体励起固体レーザー (532 nm, 120 mW), ミラー類, 及び分光器 (Horiba Jobin Yvon U1000, 回折格子 1800 grooves/mm 2 枚, 焦点距離 1000 mm) は UHV 槽に隣接する除震台の上に設置した。レーザーは view port を通して, UHV 槽内に導入され, 焦点距離 30 mm の平凸レンズを通じて試料に照射される。散乱光は入射光集光と同一のレンズを用いて集められる。集光レンズの立体角はおよそ  $0.174\pi$  (半球の約 9%) である。集光レンズはウォームを用いた直動機構に支持されており, ラマン測定以外のときには view port 近くまで待避させることができる。これにより, 試料への金属蒸着時にレンズが蒸着で汚染されず, またレンズのチャージアップによって RHEED や ARPES の電子の軌

道が曲がることを防げる。試料を保持するピエゾ駆動圧力印可マニピュレータには XY ステージが備わっており, 試料位置の水平面内での調整を  $5\mu\text{m}$  の精度で行うことができる。これが試料位置をラマン用集光レンズのフォーカスポイントに合わせることを可能にしている。

図2は開発した「その場ラマン分光装置」で測定した結果である。まず SiC 上に作成したグラフェンを大気中に置きラマン分光測定を行った (図2 (a))。これまでの報告例と同様のラマンスペクトルが得られたことから, 光学系が正常に測定出来ていると判断した。

超高真空中で加熱した sSOI の RHEED パターンと UHV その場ラマン分光の結果を図2 (b) に示す。sSOI では 2 軸引張り歪み Si 層 (30nm) / SiO<sub>2</sub> 層 (145nm) / Si の積層構造になっている。SiO<sub>2</sub> 層より下の Si の  $\Gamma$  点の光学フォノンに由来するラマンピークが  $519.4\text{ cm}^{-1}$  にメインピークとして出現している。これより低エネルギー側の  $513.5\text{ cm}^{-1}$  に, SiO<sub>2</sub> 層上に 30 nm の厚さで存在する歪み Si のラマンピークが明瞭に現れている。歪み Si の歪み量は, 歪み係数 ( $-769\text{ cm}^{-1}$ ) を用いて, 0.8% と得られた。この測定系での測定深さは前述の通り 500 nm あるものの, 膜厚 30 nm の歪み Si 層からのラマン信号が十分検出可能であることがわかる。

図2 (c) は押し棒をピエゾモータで徐々に前進させ試料に機械的に一軸歪みを印可した状態で試料のたわみ方向に沿って 1mm 毎に UHV ラマン分光を測定した結果である。スペクトル 1~16 は, 図で示す測定点 1 番~16 番である。試料両端 (測定点 1~4, 15, 16) の Si ラマンピークは約  $519\text{ cm}^{-1}$  に位置し, これは歪み印可前の Si ラマンピークとほぼ同じである。試料の中央側の測定点では, ラマンピークは低エネルギー損失側へシフトしており, より大きな引張り歪みがシリコンに印可されていることがわかる。ラマンピークは無歪みの部分も合わせると計 4 グループに分かれている。このことから歪み量が試料内で均一でなく, 局所的に異なることがわかった。この測定で得られた Si ラマンピークの歪みによるシフトを, 一軸引張り歪み Si (111) の応力とラマンシフトの間の比例定数を用いて応力に換算すると, 各地点の一軸引張り応力はラマンシフトの大きなグループから順に, 1.86 GPa, 1.3 GPa, 0.37 GPa, 0.13 GPa と求まった。

これまでに報告されている機械的歪み印可シリコンを用いた実験では試料のたわみは Fig. 5(a) のように均一になるという仮定が用いられていた。しかし本研究の結果から, 歪みと物理量の相関を得るには, 歪みの空間分布を実測する必要があることがわかった。

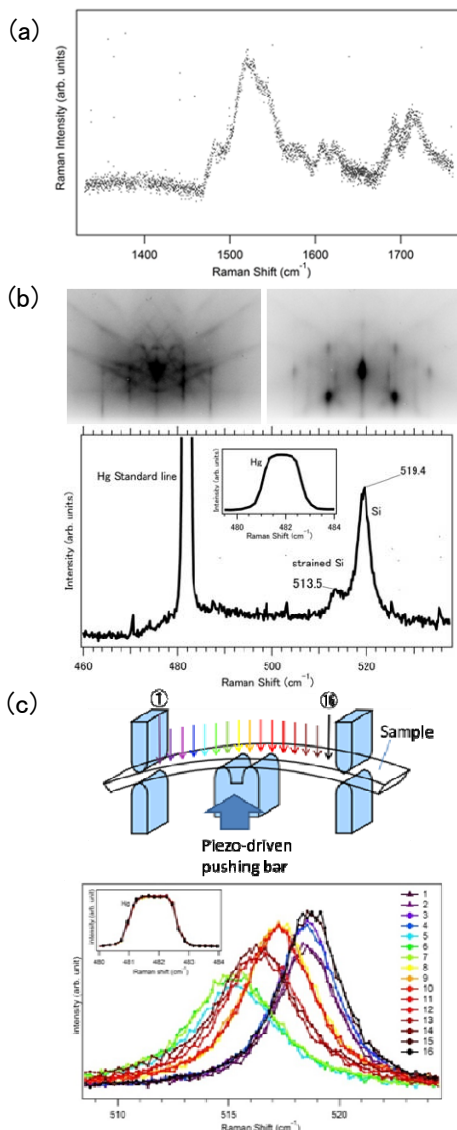


図2. 本研究で開発した「その場ラマン分光装置」で得られた (a) グラフェン (b) 2 軸引張り歪み Si (sSOI), 及び (c) 1 軸引張り歪み Si のラマン分光 [発表論文 1]。

②XRD と LEED IV を用いた 2 軸引張り歪みの



## 精密測定[発表論文 4]

2 軸引張り歪みの印可された sSOI と Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> について、XRD と LEED I-V によって面直方向の格子定数を精密に調べた。Si/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> (x=0.1, 0.2, 0.3) の結果を図 3 に示す。試料はウェット処理にて水素終端化後、超高真空中で 750°C で加熱された。XRD の測定結果より、歪み Si 層が下地と整合していること、及び加熱による格子定数の変化がないことがわかった。また LEED I-V の結果から、表面から 9 層の範囲で歪みが Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> の格子定数から期待される通りに入っていることが明らかになった。これは表面敏感な、LEED I-V 法を用いて初めて明らかになったことである。

### ③ARPES によるバンド分散構造の測定

2 軸引張り歪み試料 (Si/SiGe, sSOI) 及び一軸引張り歪み試料 (Si (111)) について ARPES を用いてバンド分散構造測定を行った。Si/SiGe 試料についてはこれまでに理論計算で求められているバンド分散とは定量的に異なった結果が得られた。歪みの表面緩和と

よるという可能性が当初考えられたが、上述の LEED I-V による表面近傍の歪み量の測定結果より、その可能性はないことがわかった。一軸引張り歪み試料については歪みの印可によってバンドが変形する様子が見られた。

以上、本研究では歪みとバンド分散の相関を調べるために、その場ラマン分光の開発と XRD と LEED I-V による表面近傍の歪み量の精密測定、及び歪み結晶のバンド分散測定を行った。機械的歪み印可とその場ラマン分光を超高真空中で行うシステムは世界初の試みであったが、開発は成功し、成果が出るころまで研究期間内に到達した。今後は、このシステムを用いてシリコンのみならず、様々な結晶について歪み効果を測定して行くことが可能である。表面極近傍の歪み測定はこれまで例がなかったが、本研究において XRD と LEED I-V によって明瞭に表面領域の歪みを測定によって明らかにすることが出来た。これまで表面科学分野で重要な測定手法の一つである LEED I-V が歪み結晶分野の解析に用いられたことはなかったが、本研究をきっかけに LEED I-V の重要性が歪み結晶分野において認知されると考えられる。

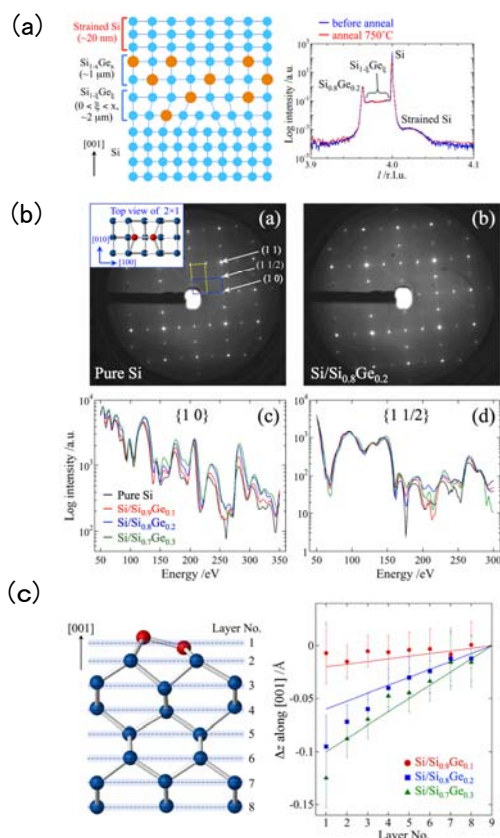


図4. 2軸引張り歪みSi (Si/SiGe) の表面近傍での歪み量の決定 [発表論文 4]。(a) Si/SiGe 積層構造と加熱前後での XRD 測定結果。(b) LEED I-V の結果。(c) LEED I-V より得られた表面近傍における面直格子定数。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

1. 歪み結晶の歪み量と電子バンド分散の同時測定を目指した UHV ラマン分光の開発: 武田さくら, 久米田晴香, 前田昂平, 桃野浩樹, 中尾敏臣, 竹内克行, アルトニアン, 坂田智裕, 大門寛 表面科学査読有り (2015)
2. Unusual energy separation of subbands in Si(111) p-channels induced by In adsorption  
Nur Idayu Ayob, Sakura N. Takeda, Tomohiro Sakata, Masaaki Yoshikawa, Makoto Morita, Hiroshi Daimon  
Japanese Journal of Applied Physics **54** 065702 (2015). 査読有り  
DOI:10.7567/JJAP.54.065702
3. Structure determination of the clean (001) surface of strained Si on Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>  
Tetsuroh Shirasawa, Sakura Nishino Takeda, Toshio Takahashi  
Applied Physics Letters **106** 061604 (2015). 査読有り  
DOI:10.1063/1.4908249
4. Effect of the Flash Annealing on the Impurity Distribution and the Electronic Structure in the Inversion Layer  
Tomohiro Sakata, Sakura N. Takeda, Makoto Morita, Nur Idayu Ayob, Hiroki Tabata, Hironori Matsuoka, Hiroshi

Daimon  
e-Journal of Surface Science and  
Nanotechnology 13 75-78 (2015). 査  
読有り  
DOI:10.1380/ejsnt.2015.75

5. Lattice distortion of porous Si by Li  
absorption using two-dimensional  
photoelectron diffraction  
El Said A. Nouh, Sakura N. Takeda,  
Fumihiko Matsui, Ken Hattori,  
Tomohiro Sakata, Naoyuki Maejima,  
Hirosuke Matsui, Hiroyuki Matsuda,  
Tomohiro Matsushita, László Tóth,  
Makoto Morita, Satoshi Kitagawa, Ryo  
Ishii, Masayoshi Fujita, Kaoru Yasuda,  
Hirosuke Daimon  
Journal of Materials Science 49, 35-42  
(2014). 査読有り  
DOI:10.1007/s10853-013-7799-2
6. System to measure accurate  
temperature dependence of electric  
conductivity down to 20 K in ultrahigh  
vacuum  
C Sakai, S N Takeda, H Daimon  
The Review of Scientific Instruments  
84, 075103- (2013). 査読有り  
DOI:10.1063/1.4812336

[学会発表] (計 27 件) (主たる発表)

1. 「バンド分散への歪み効果」測定システ  
ムにおける UHV 高分解能ラマン分光の開  
発, 武田 さくら, 久米田 晴香, 前田 昂  
平, 桃野 浩樹, 竹内 克行, 中尾 敏臣,  
Ang Artoni K. R., 坂田 智裕, 大門 寛  
第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東  
海大学湘南キャンパス, 平塚市, 神奈川,  
2015 年 3 月 12 日
2. 角度分解光電子分光 (APRES) を用いた Bi  
吸着 Ge(001) 表面のバンド分散構造, 入  
江 広一郎, 武田 さくら, 坂田 智裕,  
Artoni Kevin Roquero Ang, 竹内 克行,  
中尾 敏臣, 桃野 浩樹, 前田 昂平, 大門  
寛, ゲートスタック研究会, ポスター,  
東レ総合研修センター, 三島市, 静岡,  
2015 年 1 月 30 日
3. 高分解能 In situ ラマン分光の開発, 武  
田 さくら, 久米田晴香, 前田昂平, 桃野  
浩樹, 竹内克行, 中尾敏臣, Artoni K. R.  
Ang, 坂田智裕, 大門寛, 表面界面スペク  
トロスコピー, 関西セミナーハウス, 京  
都, 2014 年 12 月 6 日
4. 歪み結晶の歪み量と電子バンド分散構造  
の同時測定を目指した In situ ラマン分  
光の開発, 武田 さくら, 久米田晴香, 前  
田昂平, 桃野浩樹, 中尾敏臣, 竹内克行,  
アルトニアン, 坂田智裕, 大門寛, 表面  
科学会, くにびきメッセ, 松江市, 島根,  
2014 年 11 月 7 日
5. Bi 吸着 SiC(0001) 上のグラフェンの表面  
超構造と電子状態の観測, 竹内克行, 武

田 さくら, 中尾敏臣, 前田昂平, 桃野浩  
樹, 坂田智裕, ケビンアルトニー, 大門  
寛, 表面科学会, くにびきメッセ, 松江  
市, 島根, 2014 年 11 月 6 日

6. Metal Adsorption Effect on the Band  
Structure of Ge(001) within Subsurface  
Region, T. Sakata, S. N. Takeda, K. Irie and  
H. Daimon, The 7th International  
Symposium on Surface Science, Kunibiki  
Messe, Matsue, Shimane, Japan, 2014 年 11  
月 3 日
7. Measurements of Atomic and Electronic  
structures on 1ML Bi-adsorbed Si(001)  
surface, H. Nakao, S. N. Takeda, K.  
Kitagawa, M. Morita, K. Takeuchi, K.  
Maeda, H. Momono, A.K.R. Ang, T. Sakata  
and H. Daimon, The 7th International  
Symposium on Surface Science, Kunibiki  
Messe, Matsue, Shimane, Japan, 2014 年 11  
月 6 日
8. Surface atomic and electronic structures of  
Ge(001) covered by Bismuth, K. Irie,  
S.N.Takeda, T.Sakata and H. Daimon, The  
7th International Symposium on Surface  
Science, Kunibiki Messe, Matsue, Shimane,  
Japan, 2014 年 11 月 6 日
9. RHEED and ARPES study of Si(110)3x6-Bi ,  
A.K.R. Ang, S. N. Takeda, T. Sakata and H.  
Daimon, The 7th International Symposium  
on Surface Science, Kunibiki Messe, Matsue,  
Shimane, Japan, 2014 年 11 月 6 日
10. Measurement of UHV-Raman spectroscopy  
on strained Si H. Momono, S.N. Takeda, H.  
Kumeda, K. Maeda, K. Takeuchi, H. Nakao,  
A. Kevin. R. Ang, T. Sakata, and H. Daimon,  
The 7th International Symposium on Surface  
Science, Kunibiki Messe, Matsue, Shimane,  
2014 年 11 月 3 日
11. 機械的 1 軸歪みグラフェンの UHV ラマン  
測定, 前田昂平, 武田 さくら, 久米田晴  
香, 桃野浩樹, 中尾敏臣, 竹内克行, 坂  
田智裕, Artoni K. R. Ang, 大門寛, 日  
本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学,  
春日井市, 愛知, 2014 年 9 月 9 日
12. Bi/Si(001) の表面超構造と電子状態の観  
測, 中尾敏臣, 武田 さくら, 北川幸祐,  
森田誠, 竹内克行, 前田昂平, 桃野浩樹,  
Artoni K. R. Ang, 坂田智裕, 大門寛,  
日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学,  
春日井市, 愛知, 2014 年 9 月 9 日
13. UHV ラマンを用いた機械的 1 軸歪み Si の  
歪み分布測定, 桃野浩樹, 武田 さくら,  
久米田晴香, 前田昂平, 竹内克行, 中尾  
敏臣, Artoni K. R. Ang, 坂田智裕, 大  
門寛, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 春  
日井市, 中部大学, 春日井市, 愛知, 2014  
年 9 月 9 日
14. 歪み量測定のための高分解能 In situ ラ  
マン分光の開発, 武田 さくら, 久米田晴  
香, 前田昂平, 桃野浩樹, 竹内克行, 中

- 尾敏臣, Artoni K. R. Ang, 坂田智裕, 大門寛, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学, 春日井市, 愛知, 2014 年 9 月 7 日
15. Angle Resolved Photoemission Spectroscopy of Bi/Si(110), Artoni Kevin R. Ang, Sakura N. Takeda, Tomohiro Sakata, Kosuke Kitagawa, Hiroshi Daimon, 30th European Conference on Surface Science (ECOSS 30), Kervansaray Lara Convention Center, Antalya, Turkey, 2014 年 9 月 4 日
  16. 高分解能角度分解光電子分光法による Ge(100) 表面近傍のバンド構造の解明, 坂田智裕, 武田さくら, 小久井一樹, Artoni Kevin Roquero Ang, 竹内克行, 中尾敏臣, 前田昂平, 桃野浩樹, 北川幸祐, 久米田晴香, 大門寛 ゲートスタック研究会—材料・プロセス・評価の物理—(第 19 回), ニューウェルシティ湯河原, 熱海市, 神奈川, 2014 年 1 月 24 日
  17. Silicon on insulator の超薄膜化プロセス, 電子状態測定への試み, 小久井一樹, 武田さくら, 坂田智裕, Artoni Kevin Roquero Ang, 竹内克行, 中尾敏臣, 前田昂平, 桃野浩樹, 北川幸祐, 久米田晴香, 大門寛, 堀田昌宏, 菱谷大輔, 佐野泰久, ゲートスタック研究会—材料・プロセス・評価の物理—(第 19 回), ニューウェルシティ湯河原, 熱海市, 神奈川, 2014 年 1 月 24 日
  18. Raman spectroscopy on Uni-axially Strained Silicon, S. N. Takeda, H. Kumeda, K. Maeda, H. Momono, K. Takeuchi, H. Nakao, K. Kitagawa, T. Sakata, A. K. R. Ang, H. Daimon, Symposium on Surface and Nano Science 2014, New Furano Prince Hotel, Furano, Hokkaido, 2014 年 1 月 16 日
  19. Electronic Structure on Pb-Adsorbed Ge(001), T. Sakata, S. N. Takeda, Artoni Kevin Roquero Ang, K. Kitagawa, H. Kumeda, K. Koku1, H. Nakao, K. Takeuchi, H. Momono, K. Maeda, H. Daimon, Symposium on Surface and Nano Science 2014, New Furano Prince Hotel, Furano, Hokkaido, 2014 年 1 月 14 日
  20. Si (001) 上 Bi 薄膜における表面電子状態の膜厚依存性, 北川幸祐, 武田さくら, 森田誠, 坂田智裕, 久米田晴香, 小久井一樹, 竹内克行, 中尾敏臣, 前田昂平, 桃野浩樹, 大門寛, 関西薄膜・表面物理セミナー, グリーンビレッジ交野, 交野市, 大阪, 2013 年 11 月 30 日
  21. 歪み量測定用 UHV ラマン装置の構築, 久米田晴香, 武田さくら, 坂田智裕, 北川幸祐, 小井一樹, 竹内克行, 中尾敏臣, 前田昂平, 桃野浩樹, 大門寛 2013 年真空・表面科学合同講演会, つくば国際会議場, つくば市, 茨城 2013 年 11 月 27 日
  22. 超薄膜 Silicon on insulator(SOI)の表面構造と電子状態, 小久井一樹, 武田さくら, 坂田智裕, 北川幸祐, 久米田晴香, 大門寛, 日本物理学会秋季大会, 徳島大学, 徳島市, 徳島, 2013 年 9 月 27 日
  23. メタシリコン: 量子化と歪みでどこまで変わるか, 武田さくら, メタ X version 3.0, 奈良先端大, 生駒市, 奈良, 2013 年 8 月 22 日
  24. 量子化と歪みによるシリコン電子状態の変化, 武田さくら, 表面科学の新展開を語る研究会, 鳥取大学, 鳥取市, 2013 年 8 月 10 日
  25. 歪み印加マニピュレータの開発, 武田さくら, 坂田智裕, 山谷寛, Nur Idayu Ayob, 北川幸祐, 小久井一樹, 久米田晴香, 谷川洋平, 大門寛, 日本物理学会 第 68 回年次大会, 広島大学, 東広島市 2013 年 3 月 28 日
  26. APRES measurement of valence band structure in strained silicon, S.N. Takeda, H. Tabata, T. Sakata, N. I. Ayob, N. Maejima, H. Matsuoka, H. Daimon, T. Inaoka, T. Tezuka, T. Katayama, M. Yoshimaru, 12th International Conference on electronic structure and spectroscopy (ICESS-12), Saint Malo, France, 2012 年 9 月 20 日
  27. Effect of Biaxial Tensile Strain on Silicon Valence Band Dispersion, S. N. Takeda, H. Tabata, T. Sakata, N. I. Ayob, N. Maejima, H. Matsuoka, T. Inaoka, K. Arima, T. Tezuka, T. Katayama, M. Yoshimaru, T. Imamura, H. Daimon, International Conference on Semiconductor Physics (ICPS2012), Zurich, Switzerland, 2012 年 8 月 2 日
- [その他]  
ホームページ等  
<https://sites.google.com/site/sntprojects/>
6. 研究組織
    - (1) 研究代表者  
武田さくら (TAKEDA SAKURA)  
奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科 助教  
研究者番号: 30314537
    - (2) 研究分担者  
高橋 敏男 (TAKAHASHI TOSHIO)  
東京大学 物性研究所 教授  
研究者番号: 20107395
    - (3) 連携研究者  
白澤 徹朗 (SHIRASAWA TETSUTOH)  
東京大学 物性研究所 助教  
研究者番号: 30314537