

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22540332

研究課題名(和文) Si, Ge 表面反転層サブバンド構造の異方性と歪みによる物性制御

研究課題名(英文) Anisotropy of subband structure of Si and Ge surface inversion layers and control of its physical properties by means of strain

研究代表者

稲岡 毅 (Inaoka, Takeshi)

琉球大学・理学部・教授

研究者番号：40184709

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000 円、(間接経費) 990,000 円

研究成果の概要(和文)： Si, Ge のバンド異方性と印加した種々の歪みの方向、伸縮のシナジー効果により、バンド構造が顕著に変化する。Si 価電子帯について、歪みにより誘起されるバルクバンド、表面サブバンドの異方性を解析し、ホール移動度の向上に寄与する歪みを探索した。また、結晶単位胞内の 2 つの原子の相対変位(内部歪み)がバンドに及ぼす顕著な効果を明らかにした。

Ge の間接-直接バンドギャップ転移を起こす 1 軸伸張の方向、2 軸伸張の面方位を見出し、転移が起こる歪み量を評価した。

角度分解光電子分光法で Si 価電子帯を測定し、2 軸伸張により小さい面内ホール有効質量を持つバンドが価電子帯頂上に持ち上がることが分かった。

研究成果の概要(英文)： Band anisotropy of Si and Ge and applied tensile or compressive strain with various orientations cooperate synergistically to change the band structure remarkably. As for the Si valence band, we have investigated the anisotropy of the bulk band or the surface subband induced by strain, and searched for those strain types which contribute to improve hole mobility. Furthermore, we have clarified the conspicuous effect of relative atom displacement of two atoms in the crystal unit cell (internal strain) on the band structure.

We have found the direction of uniaxial tensility and the plane orientation of biaxial tensility which cause the indirect-direct band-gap transition of Ge, and evaluated the strain magnitude where the transition occurs.

Observing the Si valence band by angle-resolved photoemission spectroscopy, we have found that biaxial tensility lifts up the band with a small in-plane hole effective mass to the valence top.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性I

キーワード：Si, Ge バンド 異方性 歪み 表面反転層 表面・界面物性 半導体物性

## 1. 研究開始当初の背景

これまでシリコン(Si)電子デバイスは微細化により高速化などの高性能化が進んできたが、それも限界に近づき、新しいアプローチが模索されている。その1つは歪みを加えて電子構造を変化させることにより、キャリア移動度を向上させ、デバイスの高速化を実現することである。もう1つはSiを、キャリア移動度の向上が期待される別の物質で代替することであり、ゲルマニウム(Ge)が有力候補となっている。歪みを用いるアプローチでは、種々の方向を持つ伸張、圧縮の1軸、2軸歪みから、キャリア移動度を向上させる有利な歪みを検索する必要がある。

最近、Geに伸張歪みを加えることにより、バンド構造が間接バンドギャップから直接バンドギャップへ転移することが理論的に予言された。この転移が起こると、低エネルギー側での光吸収強度が顕著に増大し、太陽電池への応用が期待される有力な材料となる。このように、歪みを加えてバンドギャップを変化させることにより、光吸収帯が制御できる可能性がある。

## 2. 研究の目的

理論的研究では、現代版  $k\cdot p$  法と第一原理計算を相補的に用いて、実験的研究では高分解能角度分解光電子分光法を用いて、Si、Geのバルクバンド、表面サブバンドに及ぼす歪みの効果を解析する。とくに種々の方向を持つ伸張、圧縮の1軸、2軸歪みからキャリア移動度の向上に寄与する有利な歪みを検索する。また、これまであまり考慮されてこなかった内部歪み(結晶単位胞内での2つの原子の相対変位)がバンド構造に及ぼす効果を明らかにする。

伸張歪みによるGeの間接-直接バンドギャップ転移について、内部歪みを含む歪みの効果を解析し、種々の方向の1軸、2軸伸張から転移が起こる歪みを見出し、転移が起こる歪み量を評価する。

## 3. 研究の方法

### (1) 理論的研究

表面価電子サブバンドの計算には、6個の基底を使用する  $k\cdot p$  法による表面電子状態の計算に歪みの効果を組み込む方法を用いた。

Siバルクバンドに及ぼす歪みの効果については、現代版  $k\cdot p$  法と第一原理計算を相補的に用いた。現代版  $k\cdot p$  法は、30個の基底を用い、ブリルアン帯全域で第一原理計算の結果が再現できる簡便な方法である。第一原理計算では、スピン-軌道相互作用を含む擬ポテンシャルを使用する局所密度汎関数法を用いた。

Geのバンドギャップ転移については、スピン-軌道相互作用を含む擬ポテンシャルを使用する混成汎関数法を用いた。混成汎関数法

では、ハートリー-フォック近似の交換項を、勾配近似を併用する局所密度近似の交換項に混合することによって、バンドギャップなどの計算精度が顕著に向上する。

その他、Si表面や量子井戸に形成された低次元電子系の励起については、電子間の交換・相関の効果を考慮するために、局所場補正の理論や時間依存局所密度汎関数法を用いた。

### (2) 実験的研究

Si及びGeの価電子帯のバンド分散の測定には、高分解能角度分解光電子分光(ARPES)法を用いた。試料はSi(001)、Si(111)、Ge(001)及びSiGe上の2軸伸張歪みSi(001)、S01(001)である。超高真空中での加熱によって清浄な表面を作成し、清浄表面や1原子層程度の金属を吸着させた表面についてARPES測定を行った。ARPESの光源にはHeガスをECR放電させて得られる真空紫外光をモノクロメータで分光した光を、また電子分光器には半球静電型アナライザを用いた。2軸伸張半導体中の歪み量はラマン分光を用いて調べた。

## 4. 研究成果

### (1) Si表面反転層サブバンドに及ぼす歪みの効果(研究発表のみ)

$k\cdot p$ 法によるサブバンド計算に歪みの効果を組み込む方法を用いて、Si表面反転層サブバンドに及ぼす歪みの効果を解析した。面内で1軸圧縮歪みを加えると、Si(001)表面では歪みと垂直な方向でのホール有効質量  $m^*$  が低下するのに対し、Si(111)表面では、歪みと平行な方向での  $m^*$  が低下する。これは面方位に依存して歪みの効果が異なることを示す。この  $m^*$  の低下は、ホール移動度の向上に寄与する。

サブバンドの構造は複雑であり、サブバンドに及ぼす歪みの効果を解析するためには、バルクバンドに及ぼす歪みの効果を十分理解することが不可欠であることが分かった。

### (2) 様々な方位の歪みにより誘起されるSi価電子帯の異方性

現代版  $k\cdot p$  法と第一原理計算を相補的に用いて、様々な方位の1軸あるいは2軸歪みにより誘起される価電子帯の異方性を解析した。[100]、[111]、[110]、[11 $\bar{2}$ ]方向の1軸歪み、(001)、(111)、(110)面内の2軸歪みを考えた。2軸歪みについては、垂直応力ゼロの条件のもとでの垂直圧縮を伴う2軸伸張も考察した。

考えたすべての方位に対して、1軸圧縮での歪みと平行な方向、および2軸伸張での歪み面と垂直な方向において、ホール有効質量  $m^*$  が顕著に低下した。[100]、[111]、[110]、[11 $\bar{2}$ ]方向の1%1軸圧縮に対し、ホール有効質量比  $m^*/m_0$  はそれぞれ0.18、0.12、0.13、

0.15 であった。また、(001)、(111)、(110) 面内の 1% 2 軸伸張に対し、 $m^*/m_0$  はそれぞれ 0.17、0.12、0.13 であった。

1 軸圧縮（伸張）に対する  $m^*/m_0$  の角度依存性は、この 1 軸圧縮（伸張）と垂直な面内での 2 軸伸張（圧縮）のそれとほとんど定量的に一致する。このことは 1 軸圧縮（伸張）の効果とこの 1 軸圧縮（伸張）と垂直な面内での 2 軸伸張（圧縮）の効果が同等であることを示す。

垂直応力ゼロのもとでの 2 軸伸張を考え、これに伴う垂直圧縮が価電子帯に及ぼす効果を解析した。この垂直圧縮は  $m^*/m_0$  の角度依存性には影響を及ぼさないが、一番エネルギーの高い第 1 価電子帯と第 2 価電子帯のエネルギー間隔を広げ、 $m^*$  の小さい第 1 価電子帯がより低エネルギー側に伸びるようになる。

### (3) 歪み Si の価電子帯に及ぼす内部歪みの効果

第一原理計算により、結晶単位胞内にある 2 つの原子の相対変位、すなわち内部歪みが歪み Si の価電子帯に及ぼす効果を解析した。考える 1 軸あるいは 2 軸歪みに対し、垂直応力ゼロの条件のもとで、垂直歪みと内部歪みを変えながら全エネルギー最小の原子配置を求めた。低いホール有効質量が得られる [111]（[110]）方向の 1 軸圧縮と (111)（(110)）面内の 2 軸伸張について、垂直歪み無しのこの歪み、一様な垂直歪み、内部歪みを順次印加する 3 段階において、[111]（[110]）方向のバンド分散を調べた。

内部歪みパラメーターが大きくなるにつれて、第 1 価電子帯と第 2 価電子帯のエネルギー間隔が著しく広がり、 $m^*/m_0=0.10-0.11$  の第 1 価電子帯が第 2 価電子帯と交差あるいは混成するまで低エネルギー側に伸びるようになる。これとは対照的に、第 2 価電子帯と第 3 価電子帯のエネルギー間隔は 3 段階を通してあまり変わらない。

で述べた第 1、第 2 価電子帯のエネルギー間隔の顕著な増大は、内部歪みによる単位胞内での結合角の変化と密接に相関する。[111]（[110]）方向での結合が強いバンドのエネルギーを上げる結合角の変化と、(111)（(110)）面内での結合が強いバンド（[111]（[110]）方向での結合が弱いバンド）のエネルギーを下げる結合角の変化の相乗効果により、エネルギー間隔が顕著に増大する。

### (4) 伸張歪みにより誘起される Ge の間接-直接バンドギャップ転移（論文作成中）

混成汎関数法を用い、内部歪みを考慮して、伸張歪みにより誘起される Ge の間接-直接バンドギャップ転移を解析した。転移が起こる歪みを検索し、転移が起こる 1 軸伸張の方向、2 軸伸張の面方位を見出し、転移が起こる歪みを評価した。室温での [001]、[111] 方向 1 軸伸張では、それぞれ歪み量 4.2%、3.7%

で、(001)、(110) 面内 2 軸伸張では、それぞれ歪み量 1.5%、2.3% で転移が起こる。前述の 3.7%、1.5% という値はそれぞれ、先行研究の値 4.2%、2.0% よりも小さく、転移の実現に有利な値である。なお、[110] 方向 1 軸、(111) 面内 2 軸伸張では転移は起こらない。

### (5) SiGe 上に成長した 2 軸伸張歪み Si (001) の価電子帯バンド分散構造と歪み量

ARPES 測定では、2 軸伸張歪みによって価電子帯頂上で面内方向の重い正孔バンドと軽い正孔バンドの縮退が解け、軽い方が 50meV 程度フェルミ準位側にシフトする結果が得られた。ラマン分光でこれらの試料の歪み量を調べた結果、約 1% の伸張歪みが印可されていることが判明した。本研究課題で得られた理論計算の結果と実験結果を比較すると、2 軸伸張歪みにおいて価電子帯頂上の縮退が解け、軽い正孔バンドがフェルミ準位側にシフトする点は定性的に一致した。しかし定量的には、実験で得られた軽い正孔バンドのシフト量 (50meV) は計算結果で得られたシフト量 (100meV) の半分となり定量的な一致は得られなかった。この原因として、実際の試料での表面近傍における歪みが、計算に用いられた理想的な歪みとは異なることが考えられる。この相違点の解明は今後の課題である。(2011 年物理学会武田ら)

### (6) Si (111) のサブバンド分散の面内異方性

ARPES の測定結果から、ホールサブバンドの面内有効質量について、重い正孔の有効質量は [110] 方向のほうが [11 $\bar{2}$ ] 方向より重いことが判明した。この異方性は第一原理計算で得られるバルクバンド分散の異方性と同じであった。このことから、サブバンド分散はバルクバンド分散の性質を受け継いでいると言える(投稿中)。

### (7) Ge (001) 面の価電子帯頂上のバンド分散

Ge (001) の価電子帯頂上近傍のバンド分散を ARPES で測定した結果、通常の 3 本のバルク価電子帯以外に、もう一本のバンドが出現することを見出した。表面構造を変化させても 4 本目のバンドが出現することから、このバンドは表面近傍に局在する表面共鳴状態であると考えられる。また、新たに 4 本目のバンドはバルクバンドと相互作用し、バルクバンドを変形させることを見出した。得られたバンド形状のフィットから、このバンド間相互作用定数を 0.08eV と決定した。(この成果により学生の坂田智裕(当時 D2) が 2014 年 1 月ゲートスタック研究会 服部賞を受賞)(本研究会 坂田ら、および 2014 年 1 月 Symposium on Surface and Nano Science, Sakata ら)

本研究を補強するものとして、Si などの半導体表面や半導体量子井戸に形成された低次元電子系の研究、有機半導体のバンド構造

の研究も行った。

(8) Si 微傾斜表面に形成された金属ワイヤーに生ずる低次元プラズモン

Si (001)微傾斜表面に形成された Dy シリサイドナノワイヤー、および Si (111)微傾斜表面に形成された Pb ナノワイヤー配列に生ずる低次元プラズモンを解析した。時間依存局所密度汎関数法や局所場補正の理論と電子エネルギー損失分光を相補的に用いた。

Dy ワイヤーでは、幅 28Å, 40Å の 2 種類のワイヤーのうち、幅の広い方のみが金属的であり、擬 1 次元プラズモンに寄与することが分かった。Pb ワイヤーでは、Pb の被覆度に依存して、少数のサブバンドで構成される帯状電子系の幅が変化することが分かった。

(9) 狭ギャップ半導体表面に形成されたキャリア蓄積層のサブバンド構造

吸着により n 型 InSb 表面、n 型 InAs 表面に誘起されるキャリア蓄積層のサブバンド構造を解析した。非放物型の伝導帯分散を局所密度汎関数法に組み込む方法を、InSb 表面では走査トンネル分光と、InAs 表面では光電子分光と相補的に用いた。上記の方法により、実験結果を定量的に解析することができた。

(10) 半導体量子井戸に形成された強相関 2 次元伝導電子系のプラズモン

有限温度局所場補正 (交換・相関補正) を用いて、極低密度の強相関 2 次元伝導電子系のプラズモン (PL) を解析した。この補正の有効性、交換-相関ホール大きさ、PL エネルギーの顕著な温度依存性などを論じた。

(11) 有機半導体のバンド構造 (論文作成中)

ファン・デル・ワールズ相互作用を考慮した第一原理計算により、 $\alpha$  型亜鉛フタロシアニン結晶のバンド構造を解析した。格子定数の変化が、有機分子の積層方向のバンド幅に大きな影響を与えることが分かった。

## 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 1 1 件)

(1) T. Inaoka, S. Yanagisawa, and Y. Kadekawa

Internal-strain effect on the valence band of strained silicon and its correlation with the bond angles

Journal of Applied Physics Vol. **115**, 063702 (14 pages), February, 2014

Doi: 10.1063/1.4864217 査読有

(2) T. Inaoka, Y. Sugiyama, and K. Sato  
Exchange-correlation and temperature effects on plasmons in strongly-

correlated two-dimensional electron systems: Finite-temperature local-field-correction theory combined with angle-resolved Raman spectroscopy

Physica Status Solidi B, Vol. **251**, no.5, 980-990, May, 2014

Doi: 10.1002/pssb.201350147 査読有

(3) E. S. A. Nouh, S. N. Takeda, F. Matsui, K. Hattori, T. Sakata, N. Maejima, H. Matsui, H. Matsuda, T. Matsushita, L. Tóth, M. Morita, S. Kitagawa, R. Ishii, M. Fujita, K. Yasuda, and H. Daimon

Lattice distortion of porous Si by Li absorption using two-dimensional photoelectron diffraction

Journal of Materials Science, **49**, 35-42, January, 2014

DOI: 10.1007/s10853-013-7799-2 査読有

(4) C. Sakai, S. N. Takeda, and H. Daimon  
System to measure accurate temperature dependence of electric conductivity down to 20 K in ultrahigh vacuum

Review of Scientific Instruments **84**, 075103 (6 pages), July, 2013

DOI: 10.1063/1.4812336 査読有

(5) T. Inaoka, Y. Kinjyo, S. Yanagisawa, and K. Tomori

Anisotropy of the silicon valence band induced by strain with various orientations

Journal of Applied Physics Vol. **113**, 183718 (13 pages), May, 2013

Doi: 10.1063/1.4804412 査読有

(6) T. Inaoka, Y. Sanuki, and M. Shoji  
Accurate evaluation of subband structure in a carrier accumulation layer at an n-type InAs surface: LDF calculation combined with high-resolution photoelectron spectroscopy

AIP Advances Vol. **2**, 042149 (14 pages), Dec., 2012

Doi: 10.1063/1.4768671 査読有

(7) K. Hashimoto, J. Wiebe, T. Inaoka, Y. Hirayama, R. Wiesendanger, and M. Morgenstern

Real-space mapping of a disordered two-dimensional electron system in the quantum Hall regime

Journal of Physics: Conference Series Vol. **334**, 012008 (6 pages), Dec., 2011

Doi: 10.1088/1742-6596/334/1/012008

査読有

(8) T. Block, C. Tegenkamp, J. Baringhaus, H. Pfnür, and T. Inaoka

Plasmons in Pb nanowire arrays on Si (557):  
Between one and two dimensions  
Physical Review B Vol. **84**, no. 20, 205402  
(8 pages), Nov., 2011  
Doi: 10.1103/PhysRevB.84.205402 査読有

(9) H. Minoda, H. Yazawa, M. Morita, S. N. Takeda, and H. Daimon  
Formation of step-state bands on Si(111)  
3 × 3-Ag vicinal surfaces  
Physical Review B Vol. **83** no. 3 ,  
035419 (7 pages), January, 2011  
Doi: 10.1103/PhysRevB.83.035419 査読有

(10) S. N. Takeda, N. Higashi, and  
H. Daimon  
Effect of surface carrier concentration on  
valence subbands in Si(111) p-type  
inversion layers: Angle-resolved  
photoemission spectroscopy  
Physical Review B Vol. **82**, no. 3, 035318  
(5 pages), July, 2010  
Doi: 10.1103/PhysRevB.82.035318 査読有

(11) E. P. Rugeramigabo, C. Tegenkamp, H.  
Pfnür, T. Inaoka, and T. Nagao  
One-dimensional plasmons in ultrathin  
metallic silicide wires of finite width  
Physical Review B Vol. **81**, no. 16, 165407  
(5 pages), April, 2010  
Doi: 10.1103/PhysRevB.81.165407 査読有

〔学会発表〕(計22件)  
紙面の都合上、一部を挙げる。

(1) 稲岡毅, 古川琢朗, 當間涼, 柳澤将  
伸長歪みによる Ge の間接-直接バンドギャップ  
転移  
日本物理学会 第 69 回年次大会、2014 年 3 月  
28 日、東海大学湘南キャンパス、神奈川県平塚市

(2) 柳澤将, 稲岡毅, 山内邦彦, 小口多美夫,  
濱田幾太郎  
亜鉛フタロシアニン結晶の電子状態の理論  
的研究: 結晶構造・バンド構造に対する分散  
力の影響  
第 61 回応用物理学会春季学術講演会、20  
14 年 3 月 19 日、青山学院大学相模原キャン  
パス、神奈川県相模原市

(3) 坂田智裕、武田さくら、Artoni Kevin  
Roquero Ang, 北川幸祐、久米田晴香、小久  
井一樹、竹内克行、中尾敏臣、桃野浩樹、前  
田昂平、大門寛 [服部賞受賞]  
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  
ゲートスタック研究会 - 材料・プロセス・評  
価の物理 - (第 19 回)、2014 年 1 月 24 日、

ニューウェルシティ湯河原、神奈川県熱海市

(4) T. Sakata, S. N. Takeda, A. K. R. Ang,  
K. Kitagawa, H. Kumeda, K. Kokui, H. Nakao,  
K. Takeuchi, H. Momono, K. Maeda, H. Daimon  
Electronic structure on Pb-adsorbed  
Ge(001)  
Symposium on Surface and Nano Science 2014,  
2014 年 1 月 16 日、新富良野プリンスホテル、  
北海道富良野市

(5) S. N. Takeda, H. Kumeda, K. Maeda, H.  
Momono, K. Takeuchi, H. Nakao, K. Kitagawa,  
T. Sakata, A. K. R. Ang, and H. Daimon  
Raman spectroscopy on uni-axially  
strained silicon  
Symposium on Surface and Nano Science 2014,  
2014 年 1 月 16 日、新富良野プリンスホテル、  
北海道富良野市

(6) 久米田晴香, 武田さくら, 坂田智裕, 北  
川幸祐, 小久井一樹, 竹内克行, 中尾敏臣,  
前田昂平, 桃野浩樹, 大門 寛  
歪み量測定用 UHV ラマン装置の構築  
2013 年真空・表面科学合同講演会、2013 年  
11 月 27 日、つくば国際会議場、つくば市

(7) 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  
超薄膜 Silicon on Insulator(SOI)の表面構  
造と電子状態  
日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 9 月  
27 日、徳島大学、徳島市

(8) 稲岡毅, 柳澤将, 嘉手川千央  
シリコン価電子帯に及ぼす内部歪みの効果  
日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 9 月  
26 日、徳島大学、徳島市

(9) N. I. Ayob, S. N. Takeda, M. Morita,  
T. Sakata, and H. Daimon  
Effect of indium deposition on the hole  
subband of Si(111) surface  
2013 JSAP-MRS Joint Symposia, 2013 年 9 月  
19 日 同志社大学、京都府京田辺市

(10) 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  
歪み印加マニピュレータの開発  
日本物理学会 第 68 回年次大会、2013 年 3  
月 28 日、広島大学、東広島市

(11) 稲岡毅、金城悠希、柳澤将  
シリコンバンド構造の異方性と歪みの効果 II  
日本物理学会 第 68 回年次大会、2013 年 3 月  
27 日、広島大学、東広島市

(12) S. N. Takeda, Y. Ohnishi, Y. Tanaka,

S. Yasui, K. Matsuta, K. Shima, H. Daimon  
[Invited]

Initial stage of metal adsorption on  
Si(111) : Real time monitoring by RHEED  
Symposium on Surface and Nanoscience 2013  
(SSNS'13), January 17, 2013, Zao, Yamagata

(13) S. N. Takeda, H. Tabata, T. Sakata,  
N. I. Ayob, N. Maejima, H. Matsuoka, H.  
Daimon, T. Inaoka, T. Tezuka, T. Katayama,  
and M. Yoshimaru

ARPES measurement of valence band  
structure in strained silicon  
12th International Conference on Electron  
Spectroscopy and Structure (ICESS-12) , 20  
September, 2012, Saint Malo, France

(14) 稲岡毅、田中春奈、柳澤将  
ゲルマニウムバンド構造に及ぼす歪みの効果  
日本物理学会 2012 年秋季大会、2012 年 9 月  
18 日、横浜国立大学、横浜市

(15) 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, and H. Daimon  
Effect of biaxial tensile strain on  
silicon valence band dispersion  
31st International Conference on the  
Physics of Semiconductors (ICPS 2012), 2  
August, 2012, Zurich, Switzerland

(16) 稲岡毅、喜舎場英吾、友利和也  
シリコンの伝導帯、間接バンドギャップに及  
ぼす歪みの効果  
日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年  
9 月 23 日、富山大学、富山市

(17) 松川憲司、稲岡毅  
Si(110) 表面反転層ホールサブバンドの構  
造：歪みの効果  
日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年  
9 月 23 日、富山大学、富山市

(18) 武田さくら、田畑裕貴、坂田智裕、Nur  
Idayu Ayob、有馬健太、澤野憲太郎、稲岡毅、  
手塚勉、片山俊治、吉丸正樹、今村健、大門  
寛  
歪みシリコンの価電子帯分散構造の実験的  
解明  
日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年  
9 月 22 日、富山大学、富山市

(19) 武田さくら、田畑裕貴、坂田智裕、ア  
ヨブヌレイダグ、前島尚行、松岡弘憲、稲岡  
毅、有馬健太、澤野憲太郎、手塚勉、片山俊  
治、吉丸正樹、今村健、大門寛  
シリコンの価電子帯分散構造の 2 軸引っぱ  
り歪みによる変化  
2011 年秋季 第 72 回応用物理学会学術講演会、

2011 年 9 月 1 日、山形大学、山形市

(20) 田畑裕貴、武田さくら、森田誠、松岡  
弘憲、吉丸正樹、大門寛  
高分解能角度分解光電子分光による高不純  
物濃度 Pb/Si(001) のホールサブバンド測定  
日本物理学会 第 66 回年次大会、2011 年  
3 月 - 8 月、当初予定は新潟大学、新潟市、  
震災のため、概要集と資料公開サイト

(21) 武田さくら、山中佑一郎、田畑裕貴、  
松岡弘憲、森田誠、大門寛、吉丸正樹  
Si(110)p 型反転層中のサブバンドの分散構  
造  
日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年  
9 月 23 日、大阪府立大学、堺市

(22) 稲岡毅、松川憲司  
Si(001) 表面反転層ホールサブバンドの構  
造：歪みの効果  
日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年  
9 月 24 日、大阪府立大学、堺市

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕  
ホームページ等  
稲岡・柳澤 表面・界面物性研究室の紹介  
<http://www.phys.u-ryukyu.ac.jp/wiki/>  
で、物理系研究室一覧をクリック

武田 凝縮系物性学研究室の総合サイト  
<http://mswebs.naist.jp/LABs/daimon/index-j.html>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者  
稲岡 毅 (INAOKA TAKESHI)  
琉球大学・理学部・教授  
研究者番号：40184709

(2) 研究分担者  
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

柳澤 将  
琉球大学・理学部・助教  
研究者番号：10403007  
(平成 23 年度から平成 25 年度まで)