

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360023

研究課題名(和文) ドーパントイオン照射によるナノスケール表面改質素過程のリアルタイムSTM観察

研究課題名(英文) Real-Time Scanning Tunneling Microscopy of Nano-Scale Surface Modification by Dopant Ion Irradiation

研究代表者

大泊 巖 (OHDOMARI IWAO)

早稲田大学・理工学術院・名誉教授

研究者番号：30063720

研究成果の概要(和文)：

ナノスケール半導体デバイス中のドーパントの原子論的挙動を解明するため、イオン照射によるシリコン(Si)表面の改質素過程をリアルタイムに観察するシステムを開発した。熱処理や不活性処理されたSi表面におけるイオン照射誘起構造の核形成・消長過程を捉えることに成功した。また、三次元的構造の極微細なトランジスタの電気伝導機構の解明に関する研究を、実験および計算の両面から実施した。

研究成果の概要(英文)：

A scanning tunneling microscope system has been developed to observe in real-time the surface modification induced by ion irradiation for the purpose of understanding atomistic behaviors of implanted dopant atoms in nano-scale semiconductor devices. We have succeeded in imaging the formation and annihilation processes of ion-induced structures on thermally treated and passivated silicon surfaces. Basic studies have also been performed experimentally and by using computer simulations on electronic conduction mechanisms in future nano-scale three-dimensional devices.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2009年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2010年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、薄膜・表面界面物性

キーワード：ナノ構造物性、ナノ表面・界面、ナノ構造作製、ナノ計測、ナノ物性制御

科学研究費補助金研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

イオン注入法は、Si 基板中の決められた領域に、任意のイオン種を、正確な濃度で添加できるため、半導体素子の微細化を押し進める大きな原動力ともなり、Si 半導体集積回路製造のキーテクノロジーとしての地位を確立してきた。しかし、半導体素子の微細化が進み、素子の最小加工寸法が 10 nm にまで達しようとしている今日では、ドーパント分布の制御で要求される精度を達成することは、現在のイオン注入技術をもってしても困難になってきている。最先端の極微細 MOS トランジスタでは、高い電流駆動力の確保と短チャネル効果抑制のため、ソース/ドレインのエクステンション領域のドーパント分布を、数 nm の精度で制御しなければならない。数 nm と言えば、これはドーパント原子の平均間隔と同程度のスケールである。離散的な点としてのドーパントの位置バラツキが、高集積化を阻む要因の 1 つとして、今、我々の前に大きく立ちはだかっている。

イオン注入の精度を高める技術の究極の例として、イオンの個数と位置を一つずつ制御しながら注入するシングルイオン注入法などが研究されているが、イオン注入の照準精度をいくら高めても、入射されたドーパントが運動エネルギーを失う過程で起こる基板内部での散乱は本質的に避けられない。また、注入したドーパントを格子位置に置換して、ドナーやアクセプタとして活性化させるための熱処理過程でも、拡散が起こる。加えて、酸化膜との界面近傍の浅い位置に注入されたドーパント原子は、界面に吸い寄せられるように偏析して機能を失うことが知られている。現在検討が盛んな三次元デバイスに至っては、ドーパント偏析を誘発する界面がデバイス構造を取り巻いているため、そこでのドーパント原子の拡散挙動は更に複雑になる。このように、イオン注入によるドーパント分布を制御するためには、注入後のドーパント原子の拡散を制御することが一段と重要となる。しかし、注入後のドーパント原子の振る舞いを調べることは極めて困難であり、未だ不明な点が多い。

これに関し、研究代表者らはこれまで、注入されたイオンが基板に及ぼす影響を原子論的スケールで解明するための研究を進めてきた。800°C の高温まで観察できる高温走査トンネル顕微鏡 (STM) と、イオン銃とを組み合わせ、イオンが照射されている基板の表面をリアルタイムで、原子分解能で観察できる装置を、世界に先駆けて開発した。これまでに、希ガスのアルゴン (Ar) や、基板と同じシリコン (Si) のイオン照射のリアルタイム STM 観察を行い、イオン照射痕の出現と、その後の熱処理による照射痕の形状変化から、

基板内部で起こる空孔や格子間原子の生成、およびそれらの拡散挙動に関する知見を獲得してきた。この装置で、実デバイスで用いられるリン (P) などのドーパントイオンを注入できるようになれば、最先端デバイスで要求されているドーパント分布制御に関して、重要な技術的指針が得られると期待される。

2. 研究の目的

STM 探針が走査している領域に照準を合わせてイオンビームを照射する、研究代表者らの独自技術を発展させ、ドーパントイオン照射による Si 表面のナノスケール改質素過程を、原子スケールの分解能で、リアルタイムに観察するシステムを開発する。

具体的には、STM 探針の走査領域に“非破壊”でビームを照準する技術を開発し、ドーパントイオン固有の電子状態を“浮き彫り”にするための Si 表面不活性化ができるシステムを構築する。これらの要素技術を確認し、イオン照射痕の挙動、および、浅い表面下層で停止したイオンの拡散挙動の、“その場” STM 観察を実現する。更に本研究では、平坦な Si 基板試料だけでなく、ナノワイヤなどの三次元デバイスを想定した試料を作製し、ナノ構造中の不純物拡散機構の解明を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、ドーパントイオン注入による Si 表面のナノスケール改質素過程を、原子スケールの分解能で、リアルタイムに観察するシステムを開発するため、以下の研究方法を用いた。

(1) STM 探針の走査領域に、試料非破壊でドーパント原子のビームを照準するシステムの開発

STM 観察前には、試料と STM 探針が熱平衡状態になるまで待機を要する。この場合、P を含む液体金属イオン源のように、ビーム状態が不安定な場合、この作業の間にイオン源の状態が変化し、ビーム光軸や電流量が変化してしまう。そこで、STM 観察の準備が完了したのちに、ビームを STM 探針先端領域に、試料を破壊することなく、短時間で照準するためのシステムが必要となる。

そこで、STM 探針を試料表面に近付けたまま、試料にビームを照射することなく、照準を合わせるための可動式仮標的を作製する。この機構を、ビーム照射領域を可視化するための吸収電流の二次元マッピング像と合わせることで、ビーム照準システムを構築する。

(2) イオン照射過程のリアルタイム観察の方法

注入ドーパントイオンによる表面改質素過程を観察するためには、研究代表者らが独自に開発した、走査型トンネル顕微鏡 (STM) とイオン銃の複合装置を用いる。この装置では、イオンが照射されている試料表面を、リアルタイムに、原子分解能で観察することができる。イオン照射前と後で同一領域を観察することが可能で、さらに、高温での観察にも対応しているため、イオン照射後の熱処理過程における結晶回復やイオンの拡散・核形成などの素過程を直接追うことができる特長を有する。

(3) Si 表面不活性化の方法

ドーパントによる表面電子状態の変化を浮き彫りにするために必要な Si 表面の不活性化は、真空雰囲気中での水素終端により行う。このために、水素ガスを試料観察室に供給するためのガス導入機構と、導入された分子状水素を熱分解により原子状にするためのクラッキング機構を、既存装置に組み込む (図1)。試料片が 1 mm×7 mm と小さいため、ガス導入実験で必要とされる水素の量はごく微量で十分である。ガス導入後、2-3 時間程度で STM 観察に必要な超高真空環境に復帰できるよう、水素ガス分圧を 10^{-4} Pa 程度に抑えるための真空排気系を備える。クラッキングは、従来手法と同じくタングステン製ファイラメントへの通電加熱により行う。

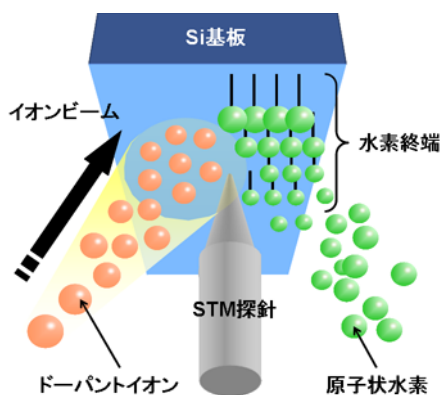


図1 本研究で構築する、イオン注入過程のリアルタイム観察システムの模式図。イオン注入、水素終端、および STM 観察までをすべてその場で行う。

また、研究を実際に進めていく過程で、STM 観察試料のための三次元形状試料の作製条件を詰めるナノプロセスの技術向上によって、ナノスケールのトランジスタの研究に発展したものがある。これは、Si ナノワイヤトランジスタに関する成果であり、本研究の当初の目的にはなかったが、Si 半導体技術動向の変化に対応して、メッセージ性の高い研究成果に繋がった。その研究に関する方法を以下に示す。

(4) ナノワイヤ型トランジスタの作製・評価の方法

ナノワイヤ型トランジスタを作製し、電気特性を評価する。基板の面方位、チャンネルの寸法、および測定温度など、各種依存性を計測することで、ナノ構造中でのキャリアの散乱要因を考察する。

(5) シミュレーションによるナノワイヤ型トランジスタの動作原理の考察、および、新規デバイスの提案の方法

汎用デバイスシミュレータを用いてナノワイヤ新規トランジスタを考案し、静特性を評価する。どのような構造のナノワイヤが今後も継続してスケールアップできるのかを検証する。

(6) シミュレーションによるナノ構造中のフォノンの振る舞いの予測の方法

実デバイスの極薄酸化膜で覆われたチャンネルを想定し、そのナノ領域中で、電気特性に大きな影響を及ぼすフォノンの減衰過程を分子動力学法により予測する。

4. 研究成果

(1) リアルタイム STM 観察のための試料非破壊型のドーパントイオンビーム照準システムの開発

イオンビーム照射前後の試料表面をその場かつリアルタイムに観察できる研究代表者らの独自の STM 技術を発展させ、リン (P) などのドーパントイオン照射の様子を観察するための試料非破壊型のビーム照準システムを開発した。

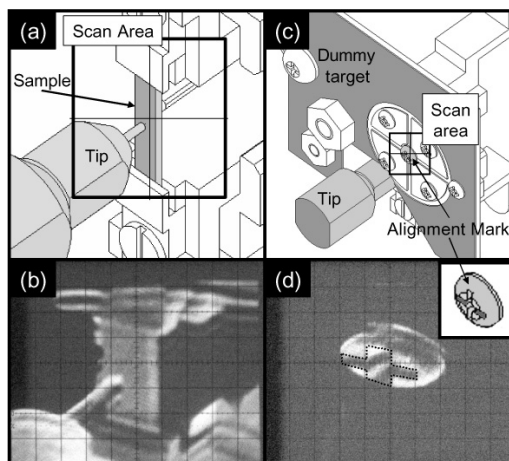


図2 開発した非破壊照準システム。STM 探針および試料の位置関係 (a) と、その実際の吸収電流像 (b)。作製した仮標的機構 (c) とその吸収電流像 (d)。

低輝度、短寿命の P イオン源 (液体金属イオン源型) のビーム照準を可能にするため、

ビーム走査と電流検出によりビーム照射領域を可視化する吸収電流像機構に、新規に開発したビーム照準マークとしての仮標的機構を組み合わせることで、STM 観察の準備をした後にビーム照準調整できるシステムを構築した(図2)。これにより、探針先端や試料表面を破壊することなくビーム照準を合わせることが可能となり、実験効率を飛躍的に高めることに成功した。本システムを用いて、P イオン照射により誘起されるステップの後退や、表面空孔アイランドの形成・消失など、表面形状の構造変化の素過程の観察に、世界で初めて成功した(図3)。

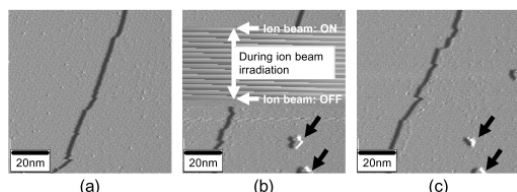


図3 Si(001)-2×1 表面への P イオン照射過程のリアルタイム STM 観察で取得された連続 STM 像。(a)照射前、(b)照射中を含む、(c)照射直後、における表面。試料温度は 500 °C を保持している。図中黒矢印は、イオン照射誘起の表面空孔アイランド。

(2) 不純物イオン照射による Si 表面ナノ改質素過程のリアルタイム STM 観察

開発したビーム照準システムを用いて、Au イオン照射による Si 表面改質素過程をリアルタイム STM 観察した。超高真空雰囲気下での加熱処理により Si(111)-7×7 表面を作製し、基板温度を 500 °C に保持したまま STM 観察を開始した。STM 観察中に、Au イオンを加速エネルギー 3 keV で試料表面に照射し、イオン照射後も観察を継続し、一連の STM 像を取得した。

イオン照射直後には、表面空孔の二次元的なクラスタである空孔アイランドや、5×2-Au 再構成構造が形成された。これらの構造のサイズは、その後の熱処理過程において徐々に変化した。空孔アイランドは縮小、5×2-Au 構造は拡大する傾向を示した(図4)。

空孔アイランドの縮小は、イオン入射時に基板中に生成された Si 格子間原子が表面に到達し、空孔アイランドを埋める、という描像で説明できる。これは、熱処理による Si 結晶の回復過程であり、Ar イオンなどの希ガスイオン照射の実験においても観察される。

5×2-Au 構造の拡大は、一度基板中に注入された Au が、その後表面に拡散してきていることを意味する。5×2-Au サイズの経時変化から、関与する Au 原子の拡散速度を評価したところ、注入した Au 原子は結晶欠陥とほとんど相互作用せずに移動している可能

性が示唆された。

実験観察困難な表面直下における結晶回復速度や拡散種の挙動に関する情報を得る方法として、本手法の有効性が実証された。

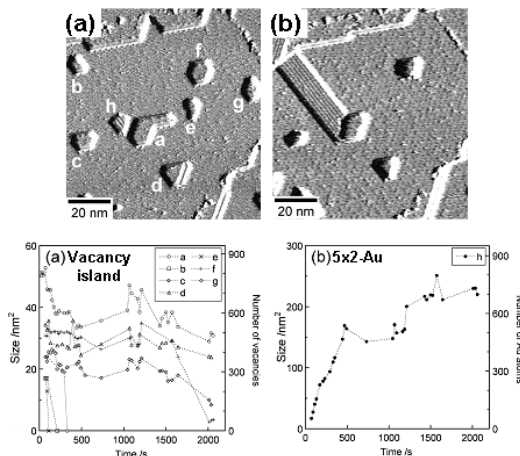


図4 Au イオン照射から、(a) 79 秒後、および(b) 731 秒後、における Si(111)-7×7 表面の STM 像。像中の a-g は空孔アイランドであり時間経過に従い縮小・消失し、h は 5×2-Au 構造であり、時間経過とともに拡大している。

(3) 水素終端 Si 表面への P イオン照射過程のリアルタイム STM 観察

STM-イオン銃複合装置内で Si 表面を水素終端できる機構を組み込んだ。水素終端はフィラメント加熱によるクラッキング方式とし、水素ガス分圧、フィラメント温度、水素ガス暴露時間などの条件を探索したところ、水素終端された Si(001)-2×1 表面の観察に成功した。本システムの構築により、Si 表面へのドーパントイオン照射から、水素終端までの一連の処理が“その場”で可能となった。

この開発したシステムを用いて、水素終端 Si 表面のリアルタイム STM 観察に取り組んだ。Si(001)-2×1:H モノハイドライド表面へ、加速エネルギー 5 keV の P イオンを、総ドーズが $7.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ になるまで間欠的に照射した。それぞれのイオン照射前後における STM 像の差分情報から、イオン照射ごとの変化を厳密に抽出した。

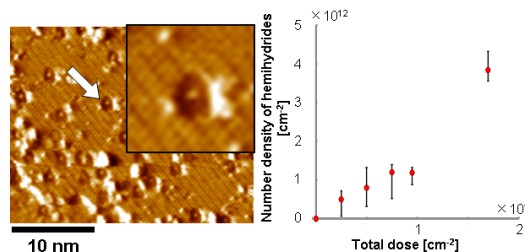


図5 左図は、P イオン照射後の Si(001)-2×1:H 表面の STM 像。挿入図は矢印で示されるヘミハイドライドの拡大図。右図はヘミハイドライドの形成密度照射による表面に誘起される主な構造はヘミハイドライド(Si-Si-H)

であることが分かった(図5)。この構造は、モノヒドライド(H-Si-Si-H)構造を構成する水素原子1個が、入射イオンによりスパッタされて形成される、と考えられる。

(4) ナノワイヤトランジスタの作製

最先端のSi CMOS技術では、平面的超極微加工の限界から脱するために、三次元構造デバイスが模索されている。その典型例としてのナノワイヤトランジスタは、チャンネル周辺がすべて異種物質との界面になるため、その影響がドーパント原子の挙動や電気伝導に及ぼす効果の解明が新たに課題として浮上してきた。このため、ナノワイヤ構造、および酸化誘起歪印加、の二つの技術を採用したナノスケールトランジスタを開発した。ナノワイヤチャンネル領域に周辺酸化膜起因の歪を印加することにより、単位断面積あたりの電流駆動能力が2倍程度まで向上する事を確認した。

また低温(20K)から室温領域(280K)における電気測定の結果から、ワイヤ断面積で規格化した相互コンダクタンスの最大値 $g_{m,MAX}$ 、およびサブスレッショルド係数(S因子)を解析したところ、ナノワイヤ構造ではフォノン散乱による電流駆動能力の劣化が効果的に抑制されることが判明した(図6)。

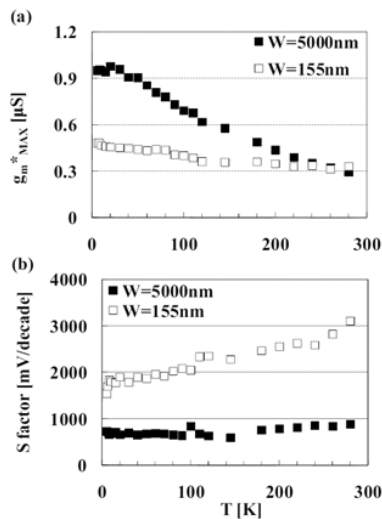


図6 ナノワイヤトランジスタ(ワイヤ幅 W=155, 5000 nm)における規格化した相互コンダクタンス(a)、およびS因子(b)の温度依存性。

(5) シミュレーションによるナノワイヤデバイスの設計・提案

従来のプレーナ構造のCMOSデバイススケールリング限界を克服する一つのアイデアとして、立体的なGate All Around (GAA)構造で、かつショットキー接合を利用したトランジスタ(Schottky Barrier Tunneling FET: SBTFET)を提案した。GAA構造を有するMOSFET

とSBTFETの三次元デバイスシミュレーションを実施し、両者の電気特性を比較した。従来、低いオン電流が欠点だったSBTFETでも、ショットキー障壁幅のゲート制御性がナノワイヤ径の縮小に伴い向上し、同じ構造のMOSFETに匹敵するほどのオン電流向上が見られた(図7)。

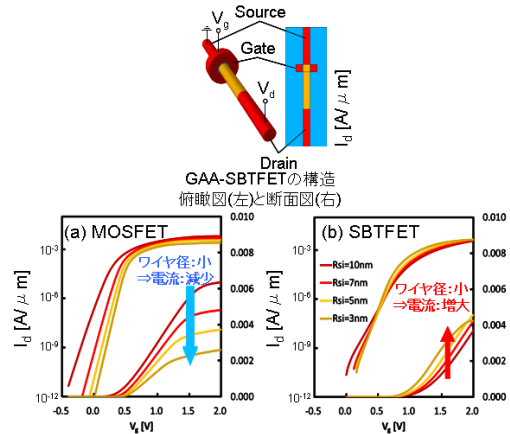


図7 GAA構造のFETの電気特性比較。

(6) ナノ構造中のフォノン挙動の制御指針の獲得

酸化膜で覆われたナノSi中のフォノン緩和過程をシミュレーションし、光学(LO)フォノンの緩和時間が酸化膜厚ではなくSiサイズに依存することを見出した(図8)。大きな比表面積を持つナノデバイスにおいては、界面の存在や歪みによってフォノン-電子散乱も変化する可能性が見出されている。

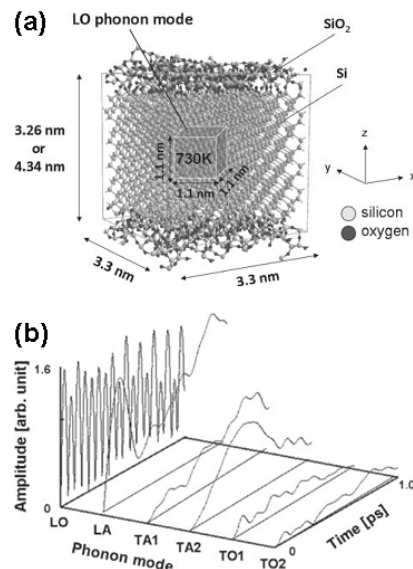


図8 (a)シミュレーションに用いた酸化膜で覆われたSiナノ構造のモデル。(b)酸化膜厚3nmにおける各光学・音響フォノン振幅の時間発展。

(7) 研究成果の総括

ドーパントイオン照射によるナノスケール

ル表面改質素過程のその場観察に関して掲げた当初の四つの目的のうち、三つは、本項(1)-(3)のように達成された。四番目である、表面下層のドーパントの挙動観察は、表面不活性化技術の達成に手間取ったため、予定より遅れている。しかし、原子状水素の生成を効率的に行うシステムの開発はすでに終了しているので、近い将来の目的達成は可能である。

Si ナノワイヤトランジスタの基本構造に関しては、予想を超える発展があり、ナノワイヤ中での伝導機構解明を通じて、近未来のSi CMOS 技術に対して有効な技術的指針を提供することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 17 件)

①T. Zushi, Y. Kamakura, K. Taniguchi, I. Ohdomari, T. Watanabe, "Molecular Dynamics Simulation on Longitudinal Optical Phonon Mode Decay and Heat Transport in a Silicon Nano-Structure Covered with Oxide Films", Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol.50, 2011, 010102(6 pages).

② T. Kamioka, K. Sato, Y. Kazama, I. Ohdomari and T. Watanabe, "Real-Time Scanning Tunneling Microscopy Observation of Si(111) Surface Modified by Au⁺ Ion Irradiation", Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol.49, 2010, 015702(5 pages).

③ A. Seike, H. Takai, I. Tsuchida, I. Ohdomari, T. Watanabe, "Demonstration of transconductance enhancement on (110) and (100) strained-nanowire FETs", Proc. ECS Transactions, 査読有, Vol.25, 2009, pp.427-430.

④ I. Tsuchida, A. Seike, H. Takai, I. Ohdomari, T. Watanabe, "Electron-phonon scattering effect on strained Si nanowire FETs at low temperature", Proc. ECS Transactions, 査読有, Vol.25, 2009, pp.439-443.

⑤M. Hori, T. Shinada, K. Taira, T. Tani, T. Endo, I. Ohdomari, "Performance Enhancement of Semiconductor Devices by Control of Discrete Dopant Distribution", Nanotechnology, 査読有, Vol.20, 2009, 365205 (5 pages).

⑥ T. Kamioka, K. Sato, Y. Kazama, T. Watanabe, I. Ohdomari, "Development of an ion beam alignment system for real-time

scanning tunneling microscope observation of dopant-ion irradiation", Rev. Sci. Instrum., 査読有, Vol.79, 2008, 073707 (4 pages).

その他 11 件

〔学会発表〕(計 82 件)

①渡邊孝信, "招待講演)Si 系トンネル FET のシミュレーション"、電気学会シリコンナノデバイス集積化技術調査専門委員会「急峻サブスレシヨルドデバイスの現状と将来展望」、2010 年 11 月、東京、日本。

②磯野文哉, 神岡武文, 吉田尚弘, 大泊巖, 渡邊孝信, 「水素終端 Si(001)-2×1 表面へのイオン照射過程のその場 STM 観察」、秋季第 71 回応用物理学会学術講演会、2010 年 9 月、長崎、日本。

③T. Kamioka, Y. Kazama, T. Yoshida, I. Ohdomari, T. Watanabe, "Real-time scanning tunneling microscope observation of implanted gold atoms on silicon surface", 10th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-10), Sep. 2009, Granada, Spain.

④ T. Kamioka, K. Sato, Y. Kazama, T. Watanabe, I. Ohdomari, "Real-time STM observation of surface modification with low-energy dopant ion irradiation", 14th International Conference on Solid Films and Surfaces, Jul. 2008, Dublin, Ireland.

⑤I. Ohdomari, "Interface Related Issues in the Next Generation Si CMOS Technology", 14th International Conference on Solid Films and Surfaces, Jul. 2008, Dublin, Ireland.

その他 77 件

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大泊 巖 (OHDOMARI IWAO)

早稲田大学・理工学術院・名誉教授

研究者番号：3 0 0 6 3 7 2 0

(2) 連携研究者

谷井 孝至 (TANII TAKASHI)

早稲田大学・理工学術院・准教授

研究者番号：2 0 3 3 9 7 0 8

渡邊 孝信 (WATANABE TAKANOBU)

早稲田大学・理工学術院・准教授

研究者番号：0 0 3 6 7 1 5 3