## 戦略的創造研究推進事業 発展研究(SORST)

## 研究終了報告書

### 研究課題

「ネオシリコンによるナノメカ・情報エレクトロニクス」

研究期間:平成16年11月 1日~ 平成22年 3月31日

# 小田 俊理 (東京工業大学、教授)

#### 1. 研究課題名

ネオシリコンによるナノメカ・情報エレクトロニクス

#### 2. 研究実施の概要

ネオシリコンは粒径 10nm 以下のナノ結晶シリコン量子ドットを集積化した材料である。 本研究の前身である CREST 研究プロジェクトでは、ネオシリコンに特有な単電子トンネル 現象、バリスティック電子伝導、高効率発光現象、高効率電子放出現象など、バルクシリ コンには見られない新機能を明らかにすると共に、ナノ構造に特有なフォノン状態の存在 を理論的に解明し、ナノ構造のメカニカル動作を探求することにより新しい原理の電子デ バイスの可能性があることを見いだした。本 SORST プロジェクトでは、トップダウン微細 加工技術とボトムアップ技術の融合によりナノ構造を制御したネオシリコン技術とMEMS 技 術を融合させた、ナノメカニカル素子の原理検証に焦点を絞り、将来のナノメカ・情報エ レクトロニクスへの展開を図ることを目的とした。

ネオシリコン材料としてはシリコンナノドットの他にデバイス設計の自由度を増やすた めにシリコンナノワイヤも加えることにした。

本研究チームは東工大グループを中心として、英国ケンブリッジ大学がネオシリコン材料の電子輸送特性探索およびシリコンナノワイヤの形成機構解明を担当し、日立グループが素子化技術を担当した。さらに、ナノシリコンの新機能デバイス開拓のパイオニアである農工大越田教授のグループと、日立ケンブリッジ研究所から名古屋大に異動した中里教授のグループは、ナノ構造に特有な電子フォノン相互作用が重要な役割を果たす電子放出デバイスの検討およびナノフォノンの理論研究を担当した。研究期間中には、ケンブリッジ大学のDr Durraniがインペリアルカレッジに講師として赴任し新しく研究室を開設した。また東工大の水田博准教授は、サザンプトン大学教授としてナノエレクトロニクス研究所を率いることになった。東工大の土屋助教もサザンプトン大学講師に栄転した。この結果、本 SORST プロジェクトは世界的なナノメカニカルデバイス研究ネットワークの中核として位置づけられるようになった。

ネオシリコンの構造制御としては、シリコンナノドットの粒径制御、不純物制御、集積 配列制御、シリコンナノワイヤの形成機構解明に取り組んだ。VHF プラズマセルのプラズマ パワーなどを系統的に探索した結果、ナノ結晶の粒径は目標値である 5nm を達成した。プ ラズマ法中にパルスガスを供給する方法により粒径は極めて均一である。ナノ結晶中では 1個の不純物が入っただけで極めて高濃度になるため、バルク半導体のように不純物導入 により電気伝導を制御することは困難と理論的に予測されていたが、ボトムアップ法でナ ノ結晶を成長する際に原料ガスに不純物原子を添加することにより、置換サイトに不純物 を導入して活性化させることが出来ることを磁気共鳴の実験より実証した。

シリコンナノドットの2次元集積配列構造の形成には、ドットの移動自由度が高い液相 状態を利用した。水面で形成した2次元構造を基板上に転写する Langmuir-Blodgett(LB) 膜法を初めてシリコンナノドットに適用して、2次元集積構造の形成に成功した。溶媒中 での粒子同士の凝集を防いで均一分散の溶液を形成するためにはナノドットの表面修飾が 重要であることを発見し、系統的な条件探索実験の結果、1cm 四方の基板全体に渡って均一 な2次元集積配列構造の実現に成功した。さらに均一分散のシリコンナノインクを利用し てディップコーティング法による2次元集積配列構造の形成にも成功した。これらの2次 元配列構造は、サブミクロンレベルのセラミックスや金属ナノ粒子で実験例があるだけで あり、シリコン量子ドットでは初めての実現例である。シリコンナノワイヤの形成は、東 工大およびケンブリッジ大学で、日立中研の協力の下に行われた。分解温度の低いジシラ ンガスを利用して基板温度 350℃でナノワイヤを形成すると、金粒子触媒の凝集が抑えられ て、直径 10nm のナノワイヤの形成に成功した。また、シリコンドットが SiO<sub>2</sub>のチューブ内 に1次元鎖状に並ぶシリコンナノチェインの形成にも成功している。さらに、シリコンナ ノワイヤの形成過程を透過型電子顕微鏡で観察する方法で、ナノワイヤ形成機構の解明に 成功した。

ネオシリコンの電子輸送機構の解明はケンブリッジ大学、インペリアルカレッジおよび 東工大の共同で行われた。3次元、2次元、および1次元構造のネオシリコンに対して特 有な電子輸送現象を解析した。3次元構造では percolation hopping 機構が中心であるが 温度や電界による影響も大きい。2次元構造や1次元構造では単電子トンネル現象が観測 された。但し、残念ながら完全に単層の2次元集積構造では、電流が小さく、電気測定は 出来ていない。トンネル過程を支配する表面酸化膜や表面修飾膜の厚さを更に制御する必 要がある。

本研究の中心的課題であるナノメカニカルデバイスの研究は、東工大・サザンプトン大学 を中心に各グループからの協力を得ながら推進した。ネオシリコンを内包する可動浮遊ゲ ート NEMS メモリデバイスの研究はシミュレーションにより、スイッチングに必要なエネル ギー、スイッチングを観測するためのトランジスタチャネル電流のオン・オフ比、過渡ス イッチング特性の検討による時間応答性、浮遊ゲート長を縮小化した場合のスケーリング 特性について調べた。その結果、100nmまでのスケーリングに対して電流オン・オフ比 10<sup>5</sup> を維持しており、動作電圧は 2.8V、スイッチング時間は 4ns、消費エネルギーは 0.23fJと いう特性を示した。スイッチングの際にメモリ電荷の移動を伴わないことから、他の不揮 発性メモリと比較して著しく低消費エネルギーであり、電荷が空間的に分離されているこ とから、メモリ保持時間も100年レベルの長期保存が期待できることが大きな特徴である。 実験的研究も、基本プロセス技術、電圧印可によるスイッチングの実証などの基盤技術の 確立を進めてきたが、浮遊ゲートメモリデバイスの作製と動作実証は年限内に行うことは 困難と判断した。そこで構造を変形したサスペンデッドゲート・シリコンナノドットメモ リを作製することにした。日立中研が初期プロセスとして MOS デバイスのソース・ドレイ ン構造まで作製した基板を用意し、サザンプトン大に新設されたナノファブリケーション 設備を用いてデバイスの作製を行った。現在電気特性の測定を行っており、年度末までに は結果が出せると期待している。

NEMS 技術と単電子トランジスタ(SET)技術を融合して、SET のチャネルをサスペンデッド 構造とした NEMSET 素子を考案した。NEMSET の設計にあたっては、3次元容量解析と単電子 等価回路解析を組み合わせたシミュレーションを行い、基板側静電容量の量子ドット-基 板間距離依存性を定量的に解析した。素子作製では、東工大の電子線露光技術により、高 濃度ドープした厚さ50nmの SOI 上に、直径 90-150 nm の量子ドットを有するナノブリッジ を形成した。量子ドットを2個有する NEMSET では、それぞれの量子ドットに隣接する2個 の制御ゲートに印加する電圧を掃引することで、結合2重量子ドットの電荷安定状態を反 映したトンネル電流パターンを観測した。さらに、その電荷3重点付近のトンネル電流ピ ーク交差反発(anti-crossing)領域を、極低温で詳細に分析した結果、コヒーレントな単電 子トンネリングによる電流ピークに加えて、複数のサブ電流ピークを観測した。サスペン デッド状態のシリコン薄膜に対する閉じ込めフォノンモードの理論計算を行い、観測され たサブピークのエネルギースペクトルと比較解析を行った結果、これらのサブピークが、 薄膜内閉じ込めフォノンスペクトルのファンホーブ特異点に対応し、単電子との強い相互 作用によるフォノン・アシステッド・トンネリングに起因していることを明らかにした。

原子スケールまで極限微細化されたシリコンナノ構造体内でのフォノン(ナノフォノン) 状態を解明するために、膜厚 3-10 原子層のシリコン超薄膜と、直径<1nm-3nm のナノドッ トに対して、密度汎関数理論(DFT)による第一原理・フォノン精密シミュレーションを行っ た。表面水素終端したシリコン超薄膜においては、表面上に形成された水素ダイマー列に 起因して、フォノンバンドギャップが発生することを初めて見出した。またナノフォノン の特異性が電子輸送現象に与える影響の理論的研究は名古屋大でも行った。

NEMS-SET ロジックデバイスのシミュレーションによる検討により、超高感度電荷検出機

能のため背景電荷の影響を受け実用化が困難とされてきた SET デバイスに対して、可動ゲート SET 構造により電流振幅だけではなくクーロン振動周期を物理量として扱うデバイス 回路を提案した。これは集積化ニューラルネットワークデバイスやパターン認識応用に有 望である。

ネオシリコンを用いた ULSI チップ間弾道電子線インターコネクション素子のプロトタ イプ試作と原理検証に関する研究は、農工大と名古屋大で推進した。ネオシリコンに特有 な弾道電子放出は、真空中だけでなく、大気中、液体中でも動作する。そのため、チップ 間インターコネクションだけでなく、幅広い応用の可能性がある。真空中では電子放出の 高指向性と面放出性を生かすため、細線パターン化した電子放出部をそなえたエミッタを 作製すると、マスク内蔵型並列EB露光の電子源として機能することが期待される。溶液 中では水素発生などを誘起する活性電極動作が考えられる。このように従来では全く考え られなかった分野への応用が展開される。名古屋大では電子線センサ回路を MOS 製造プ ロセスのみで形成した。電子線センサは、電子顕微鏡等の計測機器や宇宙物理・医療機器 への応用が期待でき、また、多くの分子は特異的な化学反応に伴って電子を放出しており、 生体分子・機能分子と組み合わせることにより、従来では不可能であったセンサや新機能 デバイスが可能となる。このことから、チップ間通信の応用のみにとどまらず、次世代半 導体集積回路の基盤形成と半導体集積回路の新しい応用分野の開拓という大きな展開が期 待できる。

ネオシリコンを用いたポストCMOS素子応用を探索する日立中研では、初めナノエレクトロメカニカルスイッチを利用した新原理トランジスタの検討を行い、LB 膜法による粒子配列や金粒子コロイドの合成を行い、シリコンナノワイヤの形成にも有力な貢献をしたが、この方法の展開として検討したモット・トランジスタの実現は極めて困難であることが判明した。そこでネオシリコンの薄膜トランジスタ応用の予備研究として、厚さ 5nm という極薄酸化膜をチャネル材料とする薄膜トランジスタを完全自己整合プロセスで作製し、1.5V の電池で動作することを実証した。

また、ナノシリコンのもう一つの機能である発光現象を利用して、シリコン超薄膜発光 素子を作製した。シリコンナノ構造は量子閉じ込め効果によって発光する事は農工大や東 工大の研究で良く知られていたが、シリコンナノ粒子構造では活性層となるシリコンナノ 構造の周囲が二酸化シリコン絶縁膜で覆われていたため、二酸化シリコンの膜厚を薄くし て直接トンネル電流によってキャリアを注入する必要があった。日立グループでは、極薄 シリコンを直接電極に接続する事で、シリコンナノ構造に直接キャリアを注入可能な平面 構造を有するシリコン発光ダイオードを提案した。この素子は通常のシリコンプロセスに よって作製する事ができ、赤外領域での電流注入発光が観測された。シリコンを用いれば 光を受光する事は容易にできるため,この素子を用いてオンチップ光配線の実証実験にも 成功した。しかし、高効率な光電変換や高速変調のためには、単なる自然放出光では不十 分でレーザ発振させる事が望ましい。しかし、原理的にそのような事が可能であるかどう かすら明確でない。そこで、本研究では、シリコンレーザの実現に向けた次のステップと して、極薄シリコン構造で光学利得が存在するかどうかを確かめる事とした。そのため、 CMOS プロセスで作製したシリコン発光素子に対して、光閉じ込めの強い導波路をナノメカ ニカルプロセスで作製した。試作評価及び第一原理計算の結果、試作した共鳴共振器型極 薄シリコン発光ダイオードにおいて、光学利得が観測され、極薄シリコンにおいて理論的 にも実験的にも光学利得が存在する事が判明した。この結果は、近い将来に実現が期待さ れているシリコンフォトニクス分野において、光と電子の融合を促す基本素子として大変 有望である。

3. 研究構想

● 研究の目標

既実施事業(CREST)にて得られたネオシリコン構造制御・機能制御・素子応用技術を更 に発展・融合させて、ネオシリコンによるナノメカ・情報エレクトロニクスの新分野展開 を図る。具体的な研究目標としては研究開始時に以下の3項目を設定した。

- 1. シリコンナノドット配列技術、ボトムアップ&トップダウン融合技術を含むネオシリコ ン集積化技術の確立
- 2. ネオシリコン集積構造を伝導層とする素子の伝導メカニズム解析とエレクトロメカニ カル動作原理探索およびネオシリコン NEMS 融合デバイスの動作実証
- 3. ネオシリコンを用いた ULSI チップ間弾道電子線インターコネクション素子のプロト タイプ試作と原理検証

研究提案時には4番目の目標として、「マルチナノゲート電極構造による量子情報処理素 子への展開可能性検討」が入っていたが、本研究の主軸であるナノメカニカルデバイスと は関連性が少ないので、研究実施時には目標から削除した。

研究計画と進め方の概要

上記の目標を達成するためのタスクを以下に示す。

#### タスク1:ネオシリコン集積化技術の開発

既に実現されている溶液を利用したnc-Si高密度化技術を ベースとして、シリコンナノワイヤも含めたボトムアップ形 成によるナノ構造体を従来のトップダウン技術で加工され たナノ構造に融合させ、革新的な「ネオシリコン集積化技術」 を確立する。ナノ粒子の配列方法として知られる Langmuir-Blodgett(LB)膜法(図 3-1)を nc-Si ドットに初め て適用し、2次元配列技術の作製を試みる。また、自己整合 的に配列パターンを形成する有機分子テンプレートを用い た配列方法も検討し、nc-Si ドットに最適な手法を確立する。 また、SOI(Silicon on Insulator)基板上に電子ビームリソグ ラフィにより加工したナノスケールの電極にnc-Si ドットを 集積化する技術をnc-Si ドット分散液とマイクロ流体技術を 利用して確立する。材料・構造を変化させた時の量子効果に 対する基礎的な知見を得る事は量子効果素子を作成する上 で重要であるので、従来のシリコンナノ粒子に加えて、シリ



図3-1 LB膜法の概念図

コン以外の材料を利用したナノ粒子やナノワイヤなどの新規な構造についても検討する。2 次元配列構造作製技術の確立は大面積薄膜の形成につながり、マクロエレクトロニクスへ のネオシリコンの応用の道が開ける。一方でナノ電極との集積化技術はナノエレクトロニ クスの発展を促す鍵となる技術である。

これらの研究を推進する中で、とくに技術的なポイントは nc-Si ドット粒子をいかに様々 な溶液中に分散させられるかという点であり、その実現にはドットの表面修飾技術の確立 が不可欠であるということが分かってきた。とくに、有機分子や生体分子のテンプレート を利用するためには有機溶媒は不向きであり、水溶液の作製技術が要求されている。さら なる配列制御技術を確立するため、このタスクの中でとくに注力するするテーマとして「表 面修飾技術を用いた nc-Si ナノ粒子分散溶液作製方法の開発」を提案する。また、新たな 応用展開の議論の中で、室温堆積可能で溶液分散にも適応できるネオシリコンは近年注目 されているフレキシブルエレクトロニクスに非常に適合するというアイデアが生まれた。 そこで本研究の新たな展開目標として、「ネオシリコンフレキシブルトランジスタの検討」 を設定する。 **タスク 2**: ネオシリコン集積構造を伝導層とする素子の伝導メカニズム解析とエレクト ロメカニカル動作原理探索およびネオシリコン NEMS 融合デバイスの動作実証

ネオシリコンドット集積構造を構成する nc-Si ドットの粒径の大小、密度の高低、及び 配列の精度の度合いに応じて変化する伝導メカニズムを実験的に検証し、明らかにする。 すでにネオシリコンドット集積構造を伝導する電子の弾道化現象については報告し、ネオ シリコン層におけるフォノン束縛とフォノンストップバンドの形成による電子・フォノン 相互作用の低減が生じていることを示してきたが、本事業ではこの理論を発展させ、ネオ シリコン集積構造中での「ナノフォノン」状態を様々な手法で明らかにし、さらにナノフ ォノン-電子間相互作用の計算により、ナノ構造特有のフォノン状態が電子伝導に及ぼす影 響を理論的に追究する。ネオシリコン集積構造におけるエレクトロメカニカル動作原理探 索については、1 次元配列させた細線をブリッジ化した構造をチャネルにもち、サイドゲ

ートを有するトランジスタを作製し、直流、交流の ゲート電圧を印加することによりチャネルの変位 とネオシリコンドット間距離をメカニカル (静的・ 動的) に制御することで、トランジスタの金属-絶 縁体転移型動作など新規な素子動作原理の可能性 を探る(図 3-2)。さらに 2 次元、3 次元に集積化し た構造の伝導についても機械的動作が可能な素子 を作製し、機械的変位が伝導特性に及ぼす影響を明 らかにする。既にネオシリコンとエレクトロメカニ カル動作原理を融合した素子として、高速動作と不 揮発性を兼ね備えた NEMS メモリ素子を提案した (図 3-3)。本事業では、この提案をさらに発展させ、 実デバイスの作製とメモリ動作のデモンストレー ションを目指す。特性予測のためのシミュレーショ ンに関しては、有限要素法による解析をさらに発展 させ、機械的特性解析、静電特性解析とドリフト拡 散モデルによるデバイス動作解析を組み合わせた 連成解析を行うことで、より現実に近いモデルを目 指す。作製プロセスに関しては、NEMS 構造体形 成技術と nc-Si ドット形成技術、および Si デバイ スプロセスを駆使し、動作の核となる2層ブリッジ



図3-2 ネオシリコンエレクトロメカニカル スイッチの模式図



図3-3 ネオシリコンNEMSメモリ

構造体の作製、および MOSFET との集積化を行い、作製した素子の La Va 特性におけるしきい値シフトの観測によりメモリ動作を確認する。書込消去電圧、書換速度、読出速度、保持時間、書換耐性といった不揮発性メモリにおいて重要なパラメータの測定を行い、シミュレーション結果と比較検討の上、高度不揮発性メモリとしての実用可能性を判断する。

**タスク 3**: ネオシリコンを用いた ULSI チップ間弾道電子線インターコネクション素子の プロトタイプ試作と原理検証

ネオシリコンドットの弾道電子放出機能を利用して、 ULSI チップ間の電子線入力・出力を用いたインターコ ネクション技術を検討する(図 3-4)。電子線インタコネク ト技術は、従来の点間配線から面間配線への転換を可能 とし、従来シリコン ULSI プロセス技術との整合性を保 ちながら、深刻化する配線数増大の課題を克服する可能 性がある。また、リプログラマブル・デジタルシグナルプ ロセッサ(DSP)やセルラニューラルネットワーク等の新 ULSI デバイスの創出に発展する可能性も秘めている。



技術課題としては、弾道電子エミッタの動作電圧の低減、 図3-4 ネオシリコン弾道電子インタコネクト素子 エミッション特性の安定化・信頼性向上などが存在するが、上記タスク3 での弾道電子伝 導・放出の制御技術と平行して検討を進めることで、ネオシリコン層およびデバイス構造 の最適化を図る。

研究推進の過程でネオシリコン弾道電子放出素子は常圧下でも電子放出が起こることが 見出された。そこで本プロジェクトでは「常圧動作ネオシリコン弾道電子放出素子の動作 特性向上」を新たな展開目標として掲げる。

研究を推進する過程で、図 3-2 の金属・絶縁体転移型動作によるナノメカニカル素子の作 製は大変困難で、年限内に成果を出すことは難しいと判断した。そこで、ネオシリコンフ レキシブルトランジスタの検討および NEMS 共振器を有するシリコン超薄膜発光素子の 検討を行うことにした。

- 新展開から生まれた新たな方向性を含めた目標設定
- 1. ネオシリコン集積化技術の確立
  - ◆ フォーカステーマ「表面修飾技術を用いた nc-Si ナノ粒子分散溶液作製方法の開発」
  - ◆ 展開テーマ「ネオシリコンフレキシブルトランジスタの検討」

2. ネオシリコン集積構造を伝導層とする素子の伝導メカニズム解析とエレクトロメカニ カル動作原理探索およびネオシリコン NEMS 融合デバイスの動作実証

3. ネオシリコンを用いた ULSI チップ間弾道電子線インターコネクション素子のプロトタ イプ試作と原理検証

◆ フォーカステーマ「常圧動作ネオシリコン弾道電子放出素子の動作特性向上」

2007 年 7 月に実施した中間評価の結果では、NEMS メモリデバイスの作製は相当困難 であり、デバイス化に注力していては成果が期待できないのではないかとのご指摘を受け た。そこで、ネオシリコン内包浮遊ゲート型デバイスについては、シミュレーションによ り、動的特性や、スケーリングした場合の特性の変化などの基礎的知見を確立することに 注力し、デバイスの作製は構造を簡略化した宙吊りゲート構造デバイスに変更することに した。これには、サザンプトン大学、日立製作所グループとの連携による国際産学共同研 究を推進した。

● サブグループ毎の役割分担

ネオシリコン構造作製・機能探索グループ(東工大)
 表面修飾技術を用いた nc-Si ナノ粒子の分散溶液の作製(タスク 1)
 nc-Si ナノ粒子配列制御集積化プロセスの開発(タスク 1)
 ナノエレクトロメカニカル動作可能なネオシリコン伝導デバイスの作製(タスク 2)
 NEMSメモリ素子の作製と特性予測シミュレーション、動作実証(タスク 2)

② 微細領域電気特性評価グループ (ケンブリッジ大)

シリコンナノワイヤ、ナノチェインの成長機構の解明(タスク1) ネオシリコンドット集積構造伝導層の伝導メカニズム解析(タスク2) ナノエレクトロメカニカル動作可能なネオシリコン伝導デバイスの電気特性評価(タスク 2)

③ 弾道電子輸送の ULSI 応用検討グループ(名大)
 ネオシリコン集積構造中のナノフォノンと弾道電子の相互作用の理論計算(タスク 2)
 ULSI チップ電子線インターコネクション素子の構造設計と試作(タスク 3)

④ 弾道電子放出の機構解析・応用探索グループ(東京農工大) 常圧動作ネオシリコン弾道電子エミッタの動作電圧の低減、特性向上(タスク3)

⑤ ポスト CMOS 素子応用検討グループ(日立製作所)

金属ナノ粒子、シリコンナノワイヤ配列技術開発(タスク1) ネオシリコンフレキシブルトランジスタの検討(タスク1)

4. 研究実施内容

4.1 ネオシリコン構造作製・機能探索グループ(東工大サブグループ)

(1) 実施の内容

4.1.1 ネオシリコンの粒径制御・不純物制御・高集 積配列技術

VHF プラズマセル中でシランガスを分解する方法 でナノ結晶シリコン(以下 nc-Si)を形成した。(図 4-1)シランプラズマ中の水素ガスパルス、またはア ルゴンプラズマ中のシランガスパルスを導入する方 法により核形成と結晶成長時間を分離制御して粒径 の均一な nc-Si を形成した。プラズマパワー条件を 詳細に検討することにより、図 4-2 に示すように、 粒径 5nm の nc-Si を実現できた。プラズマパワーが 増大するとシランガスの分解により生成させるラジ カル種の分布に変化が生じて、粒径の小さいナノ結 晶を形成した。同時に堆積速度は減少した。

ナノ結晶中への不純物ドーピングは、結 晶の純化作用、深い不純物準位の形成など により、バルクの場合ほど自明ではない。 nc-Si 形成過程で、シランガス中にフォス フィンガスを微量添加する事により、、 nc-Si 表面の酸化膜形成速度が増加するこ と、および、ミュンヘン工科大学 M. Stutzmann 教授との共同研究により、磁気 共鳴の超微細構造分裂幅から、リンが nc-Si 中のシリコン原子を置換しているこ とを明らかにした。(図 4-3)

新しいネオシリコンのコンセプトとして、nc-Si ドットと Si ナノワイヤを組み合わせた構造の作 製を提唱しているが、Si ナノワイヤについても、 LPCVD 法によるボトムアップ形成を試みた。従 来用いられている SiH4 ガスよりも分解温度の低 い Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub> ガスを成長に用いることにより、従来よ りも低温での Si ナノワイヤの成長に成功した(図 4-4)。Si ナノワイヤに加えて Ge ナノワイヤも低温で形

成できることを明らかにして、表面 を窒素ラジカルで処理することによ り水溶性で不安定な酸化膜形成を 防止できることが分かった。

ネオシリコン集積化技術開発 に関しては、液体中のコロイド粒 子の配列方法として知られるラ





図 4-2 種々のパワーで作製したナノ結晶シリ コンの TEM 像



図 4-3 リンをドープした nc-Si の位 相シフト EDMR スペクトル。



図 4-4 低温形成した直径 10nm の Si ナノワイヤ

ングミュア・ブロジェット(LB)膜法をこの系に世界で初めて適用した。パルスガス VHF プラズマ プロセス技術を用いて気相合成した nc-Si ドットを堆積した基板を、シランカップリング 剤の1つである HMDS(ヘキサメチルジシラザン)と溶媒であるクロロホルムの混合液に入 れて超音波処理することにより、表面修飾された nc-Si ドットの分散溶液が作製される。 この方法は試行錯誤の結果見出したオリジナルな方法である。この分散溶液を水面上に展 開し、LB 膜法を適用したところ、図 4-5 に示すような nc-Si ドットの 2 次元高密度配列構 造の作製に成功した。

さらに nc-Si ドットの凝集を防いで完全に分散したナノシリコンインクを作製するため、 ゼータ電位や溶液中粒径分布の測定を行いながらシランカップリング剤の表面修飾条件を最適 化して、LB 膜法による nc-Si 2次元集積配列構造をこれまでの 5μm 四方から 10mm 四方の基 板全面へと飛躍的に大面積化を実現した。

LB 膜法では、水面に浮かべた展開膜を転写する基板の表面状態に制約があり、多重積

層集積配列構造の作製は容易ではない。そこ で、ディップコーティング法による2次元集 積構造の作製を試みた。溶媒が蒸発する際の 横毛管力を利用する方法であるが、基板引き 上げ速度を調節して、実効的な蒸発速度を制 御できる特徴がある。この方法もサブミクロ ンレベルの大きさのポリスチレン粒子などで 実施例があるが、10nm レベルのシリコン粒 子に適用した例はない。横方向に膜厚のムラ であるストライプ構造を形成する問題は縦方 向に凹凸パターンを設けることにより解決で きた。(図 4-6)

4.1.2 ネオシリコン材料の電子輸送特 性

ネオシリコン材料の電子輸送特性に ついては、ケンブリッジ大学およびイン ペリアルカレッジとの共同研究で、種々 の電極構造により表面酸化 nc-Si 集積 3次元構造の温度依存性、電圧依存性 を測定したほか、2次元薄膜、1次元ナ ノワイヤ、ナノチェイン構造に特有な振 る舞いを明らかにした。

また、ボトムアップ形成の Si ナノ



図 4-5 LB 膜法により作製した nc-Si 2 次元集積配列構造



図 4-6 凹凸パターン上にディップコーティング 形成した nc-Si ドット

ワイヤに関しては、ケンブリッジ大から提供された試料の電気伝導特性評価をおこなった。 表面に SiO2を形成した Si 基板上にあらかじめ金属マーカーを配置しておき、その基板上 に Si ナノワイヤ分散溶液を滴下する。乾燥後、走査型電子顕微鏡により位置確認を行い、 そのデータに基づいて、電子ビームリソグラフィにより Si ナノワイヤを挟んだ形のギャッ プ約 nm の Au 電極を作製した。このデバイスにおいては室温でバックゲート変調に伴う ソースドレイン電流の振動が観測されており、このナノワイヤに存在するくびれ構造に起 因しているものと考えている。

4.1.3 NEMS メモリデバイス

図 3-3 に示す NEMS メモリ素子実現に向け、3 次元有限要素法解析をベースにデバイス 性能の予測を行なった。解析には、実際の作製行程で FG に加わるストレスを考慮したモ デルを用いた。まずデバイススケーリングの可能性について、FG の長さ L、幅 W、厚さ T、初期変位(非荷重時の変位) $Z_0$ を変えながら静的非線形解析による荷重シミュレーショ ンを行ったところ、スイッチングに必要な力  $P_S$ は、 $P_S \propto L^{-4}TZ_0^3$ となることがわかった。

これは L, W, T, Z を同じ比率で縮小すれば  $P_S$  は変わら ないことを意味する。スイッチング速度については、 非線形過渡応答解析により FG に荷重を与えたときの 変位の時間応答を調べ、長さの短縮によりスイッチン グ速度は速くなり、双安定点間の移動であるため力の 大きさにも影響されることを見出した。次に、力学的 解析と静電界解析を組み合わせた 3 次元有限要素シミ ュレーションを用い、ゲート印加電圧による FG の電 気的スイッチング動作の高精度解析を行った。 FG の平 衡時の変位量、素子の空隙部の調整により、数十 V で あったスイッチング電圧を ON/OFF 可能条件を満たし たままで 10V 以下にまで下げられることがわかった。 また、力学的解析、静電界解析にデバイスのドリフト 拡散解析の3 つの要素を組み合わせた連成解析計算技 術を開発し、設計したデバイスに対して、フローティ ングゲートの変位によりチャネルの電流電圧特性にど の程度のヒステリシスがあらわれるかの見積もりが可 能になった。 梁の長さ 1.5 μm から 50nm までスケーリ ングする際に上下の空隙も最適化すると、図 4-7 に示 すように、動作電圧をスケーリングできることが分か った。また、スイッチング過渡特性のシミュレーショ ンを行い、ゲート長 250nm ではスイッチング速度 15ns, エネルギー消費は 0.2fJ が得られた。(図 4-8) このように、NEMS メモリは、スイッチングに伴う電 荷移動がないので、超低消費電力であり、メモリ保持 時間も100年単位の長時間記録が見込まれるところに 最大の特徴がある。この定量化により素子アレイの設 計が可能となったため、この NEMS メモリデバイス をアレイ化したときのセル選択の方法についても検 討を行った。

NEMSメモリ素子作製に関しては、まずその心臓部 である2層ブリッジ構造体の作製を試みた。Si 基板上 に、SiO<sub>2</sub>/Si/SiO<sub>2</sub>/Si/SiO<sub>2</sub>/Cr となるような積層構造を 作製し、アレイ型のパターニングの後、CF4 ガスを用 いた異方性、等方性の2種類のエッチングを組み合わ せることにより、アレイ中央部のSi層をアンダーカッ トし、Cr コントロールゲートが空隙を挟んでFG とな る曲がり梁構造の上に重なっている2層のブリッジ構 造体を作製した。長さ1mm×幅0.5mm×厚さ50nm

の FG では、ほとんどの試料 が上に凸であったが、まれに 下に凸の構造も観測された。 この自然に形成される曲がり 梁構造は、酸化の際に酸化膜 内に内包されるストレスが、 支持している Si をアンダー カットすることで開放される ためであると考えられる。ま た、同様のプロセスにより、 内部に nc-Si ドットを内包し



図 4-7 縮小化に対する梁変位と 電流のゲート電圧依存性



図 4-8 スイッチングに伴うエネ ルギー変化



図 4-9 Si ナノドットを内包し た浮遊ゲートの作製



図 4-10 金属曲がり梁に(a) 36V 印可、(b) 37V 印可した時の SEM 写真

た FG 構造の作製にも成功した(図 4-9)。また、双安定性を担うブリッジ構造体の電気機械 的な動作を実証するため、曲がり梁の上に電界印加用の金属ゲート電極が接している 1 層 ブリッジ構造を作製し、ゲート基板間にある大きさの電圧をかけた後、SEM で観測すると いう実験を繰り返し行なった。図 4-10(a)は 36 V 印加後の観察結果、(b)は 37 V 印加後の 結果であり、電圧印加により上に凸から下に凸に変化する曲がり梁の様子を直接観測する ことに成功した。

4.1.4 ナノメカニカルゲート単電子トランジスタ (SET-NEMS)

また、Si ナノメカ・情報エレクトロニクスの実現にむけ、注目すべきもう1つのデバイス は、メカニカルに可動なゲートをもつデバイスである。本研究では、ナノメカニカルゲー ト MOSFET(MOS-NEMS)、およびナノメカニカルゲート単電子トランジスタ (SET-NEMS)に注目し、3次元デザインシミュレータと SPICE 回路シミュレータを組み 合わせた動作解析を行った。まず NEMS ゲートを含むデバイスの構造設計を行い、3次元 計算により NEMS ゲートに特徴的な Pull-in 電圧を見積もる。この Pull-in 現象が従来の MOSFET や SET にはない機能を MOS-NEMS、SET-NEMS に与えることになる。

MOS-NEMS の  $I_{a}V_{g}$ 特性の計 算結果には、MOSFET の理論 限界を超える非常に明瞭な電流 のスイッチングが観測された。 また、SET-NEMSにおいては、 Pull-in の有無により、SET に おけるクーロン振動の振幅と周 期を変調できることが分かった (図 4-11)。単電子デバイスは背 景電荷の影響を受けるため、特 性の変動が大きく集積回路応用 に問題があったが、振動の周期 を物理量として扱う場合には、



固定電荷の影響を受けない。この原理を応用して、極少数の SET-NEMS の集積化により、 多機能ニューロンセルやパターン認識回路を構築できることを明らかにした。

(2)得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

ネオシリコンの構造制御に関しては大きな進展があった。ナノ結晶シリコンの粒径はプ ラズマ条件の最適化により目標の 5nm を達成した。不純物制御に関しても、磁気共鳴の測 定からナノ結晶シリコン中の Si 原子を置換して活性化されることが分かった。高集積2次 元配列膜の作製に関しては、ナノ結晶シリコンの表面修飾技術を系統的に検討し凝集を防 いだナノ結晶シリコン分散溶液(ナノシリコンインク)を作製し、LB 膜法により、1cm 平 方の基板全面に渡って2次元膜の作製に成功した。大型の LB 膜装置があれば、大面積基板 への2次元集積膜の形成も可能である。さらに多層高集積膜の形成を目指して、ディップ コーティング法を検討し、微細凹凸構造を設けることにより2次元膜が不均一になる問題 を解決した。

微粒子の高集積配列技術に関しては、サブミクロンレベルの分子による研究やナノスケ ールの金属粒子に関する研究は多いが、10nm レベルのシリコン量子ドットに関する研究は 世界的に類例がない。シリコンインクを用いてシリコン集積回路をフレキシブル基板上に 形成する研究は、北陸先端科学技術大学院大学の下田達也教授のグループで行われている が、量子効果を発現するナノシリコンではない。また、Kovioというシリコンバレーのベン チャー会社が Printed silicon という商品を開発したと発表したが詳細は不明である。最 近ミネソタ大学の、Uwe R. Kortshagen のグループが、プラズマで形成したシリコンナノ粒 子を有機溶媒で捕集する方法で silicon ink を作製したと報告している。 量子効果を発現するシリコン量子ドットを 印刷技術で形成できれば、その効果は大変大き い。単電子素子、バリスティック伝導素子、発 光素子、電子放出素子、高効率太陽電池など多 くの応用分野に展開可能である。印刷方法とし ては、LB 膜法、ディップコーティング法の他 に、Dip-Pen Nanolithography 法も期待できる。 (図 4-12)

NEMS メモリデバイスのシミュレーションに よる検討は、スケーリングの可能性やスイッチ ング特性も含めて解析を進めた。その結果、酸 化シリコン中にナノ結晶シリコンを包含する 現在の構造では、フローティングゲート長が 100nm までは電流オン・オフ比 10<sup>5</sup>を維持して おり、動作電圧は 2.8V、スイッチング時間は 4ns、消費エネルギーは 0.23fJ という特性を示 した。スイッチングの際にメモリ電荷の移動を



図 4-12 ナノシリコンインク印刷技術

伴わないことから、他の不揮発性メモリと比較して著しく低消費エネルギーであり、電荷 が空間的に分離されていることから、メモリ保持時間も 100 年レベルの長期保存が期待で きることが大きな特徴である。実験的研究も、基本プロセス技術、電圧印可によるスイッ チングの実証などを進めてきたが、フローティングゲートメモリの作製には至らなかった。 構造を変形したサスペンデッドゲート・シリコンナノドットメモリをサザンプトン大で継 続することにした。

NEMS-SET ロジックデバイスのシミュレーションによる検討により、超高感度電荷検出機能のため背景電荷の影響を受け実用化が困難とされてきた SET デバイスに対して、可動ゲート SET 構造により電流振幅だけではなくクーロン振動周期を物理量として扱うデバイス回路を提案した。これは集積化ニューラルネットワークデバイスやパターン認識応用に有望である。

4.2 ネオシリコン構造作製・機能探索グループ(サザンプトン大サブグループ)

(1)実施の内容

4.2.1 サスペンデッドゲート・シリコンナノドットメモリ (SGSNM) の提案と動作検証

NEMS メモリのバリエーションとして、新たにサスペンデッドゲート(SG)を有するシリ コンナノドットメモリ(SGSNM)を提案した。SGSNMの構造と、その書込・消去動作の 原理を図 4-13 に示す。リードアウトとして用いる MOSFET のチャネル上に、下部絶縁膜 を介してフローティングゲート(FG)となるシリコンナノドット(SND)が配置されている。 トップゲートはサスペンデッドゲート(SG)構造となっており、SGと SNDの間には、エ アギャップと薄い上部絶縁膜が存在する。SGSNMでは、書込動作において、SG に負のプ ル・イン電圧より低い負電圧を印加し、SG が上部絶縁膜にプル・インした状態で、電子を SG から FG ヘトンネル注入する。一方、消去動作においては、SG に正のプル・イン電圧 より大きな電圧を印加し、プル・イン状態で電子を FG から SG に引き抜く。この書込・ 消去動作の繰り返しにより上部絶縁膜が劣化したとしても、保持状態において SG がプル・ アウトしているため、エアギャップが SG - FG 間のリーク電流をシャットアウトする。



図 4-13(a) SGSNM のデバイス構造模式図。(b) SGSNM の書込・消去動作。

SGSNMの設計・解析手法として、SG プル・イン/アウト動作によるゲート容量変化の3次元解析と、SG-FG 間のトンネル電流解析、および読み出し MOSFET モデルを 含めた等価回路解析を組み合わせたハイブリッドシミュレータを構築した。図 4-14(a) のハイブリッド等価回路モデルでは、SG のプル・イン/プル・アウト特性を、SG - 基 板間の可変容量 Csg と、上部絶縁膜を介したトンネル電流を可変トンネル抵抗 Rrによ り表しており、それらを記述するコンパクトモデルを SPICE シミュレータに組み込ん だ。



図 4-14 (a) SGSNM セルの等価回路モデル。(b) ハイブリッド回路シミュレーションによ るゲート長 SGSNM セルの書込・消去・読出信号波形。

このシミュレーション技術を用いて SGSNM の書込・消去動作を解析した結果、SG 長 1.0 mm、トンネル酸化膜厚 7 nm の素子に対して、メモリノードの充放電時間  $t_s$ ~1.7 ns を得た(図 4-14(b))。この結果と、別途 3 次元有限要素解析から見積もった SG の機械 的プル・イン動作に要する時間  $t_{pull-in}$ ~0.8 ns から、SGSNM の書込・消去総時間は  $t_s$  +  $t_{pull-in}$ ~2.5 ns と現在のフラッシュメモリに比べて約 3 桁短いことを見出した。素子作製 においては、ソース・ドレイン領域まで形成された標準 MOSFET 基板(日立中研グル ープ提供)上に、サザンプトン大 Southampton Nanofabrication Centre の MEMS プロ セスで SG を形成する(図 4-15)ことで、SGSNM プロトタイプを試作することに成功



図 4-15 SGSNM セルの試作プロセスフロー図。

4.2.2 サスペンデッド量子ドットにおける電子・フォノン相互作用の解明

NEMS 技術と単電子トランジスタ(SET)技術を融合して、SET のチャネルをサスペンデ ッド構造とした NEMSET 素子(図 4-16(a))を考案した。NEMSET では、帯電島とな る量子ドットが宙に浮いた構造となるため、従来の SET と比較して、①帯電島-基板 間の自己容量 C<sub>sub</sub>の低減(図 4-16(b))、②チャネル全表面からの酸化による電子島の 実効寸法縮小、など様々な利点がある。NEMSET の設計にあたっては、3次元容量解 析と単電子等価回路解析を組み合わせたシミュレーションを行い、C<sub>sub</sub>の量子ドット-基板間距離依存性を定量的に解析した。





素子作製では、電子線直接描画により、高濃度ドープした厚さ50nmのSOI上に、直径90-150 nmの量子ドットを有するナノブリッジを形成した。量子ドットを2個有するNEMSET(図 4-17(a))では、それぞれの量子ドットに隣接する2個の制御ゲートに印加する電圧をスイー プすることで、結合2重量子ドットの電荷安定状態を反映したトンネル電流パターンを観測し た。さらに、その電荷3重点付近のトンネル電流ピーク交差反発(anti-crossing)領域(図 4-17(b))を、極低温で詳細に分析した結果、コヒーレントな単電子トンネリングによる電流ピー クに加えて、複数のサブ電流ピークを観測した(図 4-17(c))。サスペンデッド状態のシリコン 薄膜に対する閉じ込めフォノンモードの理論計算を行い、観測されたサブピークのエネルギー スペクトルと比較解析を行った結果、これらのサブピークが、薄膜内閉じ込めフォノンスペクトル のファンホーブ特異点に対応し、単電子との強い相互作用によるフォノン・アシステッド・トンネ リングに起因していることを明らかにした。



図 4-17 (a) SDQDSET の SEM 写真、(b) 電荷3重点付近でのトンネル電流のゲート電圧1・ゲート電圧2依存性、および(c)トンネル電流の微細構造解析((b) 図の点線矢印に沿った線でのプロット)

4.2.3 原子スケールシリコンナノ構造におけるナノフォノン状態の解明

原子スケールまで極限微細化されたシリコンナノ構造体内でのフォノン(ナノフォノン)状態を 解明するために、 膜厚 3 - 10 シリコン原子層のシリコン超薄膜と、 直径 < 1 nm - 3 nm の ナノ ドットに対して、密度汎関数理論(DFT)による第一原理・フォノン精密シミュレーションを 行った。電子状態計算には LCAO 基底に基づく DFT シミュレータ SIESTA を、またフ オノンの解析には第一原理・力定数法に基づく VIBRA を使用し、これを東工大のグリ ッドコンピュータ TSUBAME で並列化することで大規模並列計算を実行した。表面水 素終端したシリコン超薄膜においては、表面上に形成された水素ダイマー列に起因して、 フォノンバンドギャップが発生することを初めて見出した(図 4-18)。薄膜の厚みが偶 数原子層か奇数原子層かに依って、2つの表面上の水素ダイマー列の相互関係は垂直か 平行かに2分されるが、それに起因してフォノンバンドギャップの形成方向も、薄膜面 内の[1-10]方向のみ(偶数層)、あるいは(1-10)と(110)の両方向(奇数層)に区分さ れることがわかった。また、表面水素終端した極微シリコンナノドットでは、ドット粒 径の減少とともに、①低エネルギー領域の音響フォノン状態密度の急激な増加、②最大 フォノンエネルギーの低下、が観測され、表面原子によるソフト振動モードの影響が顕 著となることを明らかにした。これらの結果は、シリコンナノ・超構造におけるナノフ オノン特性を利用することで、'Beyond CMOS'領域での新たなサーマルマネジメント やエネルギー転送制御等の技術を開拓できる可能性を示唆している。



図 4-18 第一原理・フォノンシミュレーション法の模式図(上図)と、5原 子層厚シリコン超薄膜のフォノン分散関係(下図)。緑の帯で示した領 域がフォノンバンドギャップ。

(2)得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

NEMS をシリコンデバイスの内部に組み込むことによって、従来の電子デバイスでは実現 困難な素子特性や機能を探索しようとする研究は、ごく最近急速に発展している。表 4-1 はマイクロスケールでの NEMS・MOS ハイブリッド素子を纏めたものであるが、その代表 例は、MOSFET のゲート電極を可動構造としたサスペンデッドゲート FET(SGFET)であ り、MOSFET の理論限界を越えるスイッチングトランジスタとして研究が進められている。 スイッチ応用以外にも、不揮発性メモリや、超高感度センサ応用に向けた様々な素子原理 が提案されているが、高速・不揮発性の NEMS メモリに関しては、本研究課題から生まれ た2種類のメモリ素子がその中核に位置付けられている。本研究においては、マイクロス ケールの素子構造を中心に解析・実験を進めたが、ナノスケールに微細化を進めることに より、NEMS 動作速度の向上など、更なる機能向上が期待される。その一方で、NEMS 構 造の表面状態が、湿度・酸素濃度や有機化合物による汚染などに大きく左右されるため、 素子周りの環境を制御するためのナノスケールパッケージング技術が必須となる。また、 ファンデルワールス力やカシミア効果などの原子スケールの吸着力の影響が大きくなると、 理想的なスケーリング則からの逸脱が深刻な問題となると考えられ、微視的な対策が重要 となる。これらは NEMS 融合素子全般の大きな課題である一方、ナノ ICT デバイス研究・ 開発における新たな技術潮流を創り出す大きな可能性を秘めている。さらに、本研究にお いてナノ・アトムスケールのシリコン NEMS 構造に対して得られた物理的知見は、今後 の'Beyond CMOS'領域でのシリコンナノエレクトロニクス研究・開発におけるナノフォノ

ンエンジニアリングの重要性と可能性を明らかにした。特にシリコン超薄膜や極微ドット に対して第一原理計算から解明したフォノンバンドギャップの形成やフォノン量子化の現 象は、現在の ITRS で最重要課題の一つとして掲げられているナノ集積システムのサーマ ルマネジメント・エネルギー転送技術に対する原子スケールからのアプローチとして今後 の発展が多いに期待できる。



表 4-1 NEM-MOS ハイブリッド・マイクロデバイスの分類とその特徴

#### 4.3 ケンブリッジ・インペリアルグループ

4-3-1. Conduction in 3-D'bulk' films of size-controlled Si nanocrystals

The macroscopic conduction process in 3-D 'bulk' films of Si nanocrystals with controlled nanocrystal size and separation (Fig. 4-19) varies strongly as a function of temperature. The films were prepared by prepared by plasma decomposition of SiH<sub>4</sub> at Tokyo Institute of Technology (TIT). From 300 K to ~200 K, conduction occurs through space charge limited current (SCLC) in the presence of an exponential distribution of trapping states. The trap density is found to be similar to the nanocrystal number density, suggesting that nanocrystals trap single, or at most a few carriers. From ~200 K to ~30 K, the conductivity follows a  $\ln(\sigma) \propto 1/T^{1/2}$  dependence, attributable to a percolation hopping conductance mechanism.



Fig. 4-19. SEM image of Si nanocrystal film. Inset shows the measurement structure.

*I-V* measurements were performed using Al/Si nanocrystal film/*p*-Si/Al 'mesa' structures (Fig. 4-19, inset), with current flow vertically through the film. Devices with contact areas from 35  $\mu$ m × 35  $\mu$ m to 200  $\mu$ m × 200  $\mu$ m were defined by electron-beam lithography and reactive ion etching. The films were 300 nm-thick, with 8 nm ± 1 nm diameter nanocrystals (Fig. 4-19), covered by thin (~1–2 nm) SiO<sub>2</sub> shells. The nanocrystal number

density  $N_{nc} \sim 1.2 \times 10^{18}$  /cm<sup>3</sup>. Figure 4-20(a) shows the forward bias *I-V* characteristics of a 35 µm × 35 µm diode, from 300 K – 40 K, on a log-log plot. The inset shows the characteristics at 300 K on a linear scale. The characteristics are diode-like, due to rectifying contacts at the Al back contact, and/or at the *p*-Si substrate-Si nanocrystal interface. For applied voltage above ~1 V and from 300 K to ~200 K, the data lie along straight lines, corresponding to a  $I \propto V^m$  dependence. For this temperature range,



Fig. 4-20. (a)  $\log(I)$ - $\log(V)$  characteristics of a 300 nm thick Si nanocrystal film, from 300 K – 40 K. (b) I- $V^m$  fits to data, with cross-over point  $V_c$ .

*m* increases from 1.8 – 4. This leads to convergence of the *I-V* characteristics, towards a 'cross-over' point  $V_c$ . Below 200 K, the curves do not converge to  $V_c$ . Arrhenius plots of  $\sigma$  show that above ~180 K, transport is thermally activated across potential barriers, with activation energy ~200 meV. Below 180 K, the data can be fitted to a  $\ln(\sigma) \propto T^{1/2}$  dependence.

The characteristics from 300 K - 200 K are explained using a SCLC model with an exponential density of traps. Free carriers (holes) are injected from the substrate into transport states in the valence band in the nanocrystals. An exponential distribution of hole traps above these states reduces the number of free carriers. The total number of carriers available for transport varies with temperature and applied voltage. Assuming constant mobility, an exponential trap distribution, and a free carrier concentration much less than the trapped carrier concentration, the SCLC density follows a J-V<sup>m</sup> dependence. Here  $m = 1 + (T_t/T)$ , where T is the temperature and  $T_t$  is the 'characteristic temperature'.  $T_t$  is a measure of the characteristic energy  $E_t = k_B T_t$  of the trap distribution. Figure 4-20(b) shows I-V<sup>m</sup> fits to the data, at 280 K, 240 K and 200 K. The data converges to the cross-over point  $V_c$  and the slopes give the exponent m. The values of m give  $T_t = 1670$  K and  $E_t = 0.14$  eV. The cross-over point is given by  $V_c = (eN_t d^2)/(2\varepsilon_s \varepsilon_0)$ , where  $N_t$  is the trap density and d is the film thickness. Using  $V_c = 17$  V from our data, we find  $N_t = 2.3 \times 10^{17}$  cm<sup>-3</sup>. This value is very similar to the nanocrystal density  $N_{nc} \sim 1.2 \times 10^{18}$  cm<sup>-3</sup>, implying that only a few carriers are trapped per nanocrystal. Single-electron effects or the existence of only a few trapping states in the nanocrystal/SiO<sub>2</sub> shell may limit the number of carriers trapped per nanocrystal. Our experimental values of  $T_t$ and  $N_t$  are very different from amorphous Si, but are comparable to CdSe nanocrystals of similar size.

We consider now the temperature range ~200 K - 35 K. Here. the thermal energy is insufficient to ionise carriers from traps into the transport states. Conduction then occurs by hopping. Figure 4-21(a) shows  $\ln(\sigma)$  vs.  $1/T^{1/2}$  plots at 4, 6 and 8 V, from 200 - 35 K. Here, the data follows straight lines, implying that  $\sigma \propto \exp\left[-\left(T_0/T\right)^{\frac{1}{2}}\right]$ where  $T_0$  is a constant of the material. This behaviour. also observed in



Fig. 4-21. (a)  $\ln(\sigma)$  vs.  $1/T^{1/2}$  plot at fields (1) F =  $1.3 \times 10^5$  V/cm (2)  $2 \times 10^5$  V/cm (3)  $2.7 \times 10^5$  V/cm, from 200 - 35 K (b)  $\ln(\sigma)$  vs.  $F^{1/2}$  plot at various T.

metal-insulator nanocomposite films and in other semiconductor materials, may be explained by the percolation hopping transport model of Šimánek or by Efros and Shklovskii variable range hopping (ES-VRH). The percolation hopping model considers thermally activated carrier tunnelling where the activation energy  $E_a$  for hopping is caused by the energy difference between the first electron level  $E_1$  on neighbouring nanocrystals.  $E_1$  is the sum of the single-electron charging and quantum-confinement energies. Variation in the nanocrystal separation and diameter leads to

variation in  $E_1$  and therefore in  $E_a$ . As the resistance between nanocrystals varies strongly with  $E_a$ , the nanocrystal film may be modelled as a random resistor network described by percolation conductance. This gives  $T_0 = (2P_c s_{\max} E_{a,\max})/(k_B \alpha)$ , where  $P_c$  is the percolation threshold,  $s_{\max}$  is the maximum particle separation,  $E_{a,\max}$  is the maximum activation energy, and  $\alpha$  is the carrier wave function decay length in the SiO<sub>2</sub> shells. We find  $T_0 \approx 1.15 \times 10^4$  K for our data, in good agreement with the experimental value,  $T_0 = 1.23 \times 10^4$  K. In contrast, the ES-VRH model does not agree very well with our data, with  $T_0$  much greater than the experimental value and a very low maximum temperature for hopping ~5 K. Our results are similar to percolation hopping transport in Ge nanocrystals of similar size.

The electric field dependence of hopping conduction through the nanocrystal films has also been characterised in detail. We find that the hopping conductivity  $\sigma$  follows a  $\ln(\sigma) \propto F^{1/2}$  dependence for  $F \ge 1 \times 10^5$  V/cm. Figure 4-21(b) shows the field dependence, as the temperature varies from 40 – 160 K in 20 K steps. We demonstrate that *both* the temperature and field dependence can be described by a single equation, using the concept of 'effective temperature'. This considers the influence of *T* and *F* on the hopping conductivity using a single quantity,  $T_{eff}(T,F) = \left[T^{\beta} + (AF)^{\beta}\right]^{1/\beta}$ . Here, the factor *AF* has units of temperature, and  $\beta$  is a constant. Furthermore, *A* is proportional to the hopping length. Hence, with  $\beta=1/2$  and AF << T, we show that  $\sigma \propto \exp\left[-(T_0/T)^{\frac{1}{2}} + (F/F_0)^{\frac{1}{2}}\right]$ , describing our observed data.

#### 4-3-2. Current percolation and single-electron effects in 2-D nanocrystalline Si thin films

We investigated single-electron transport through a 2-D multi-island system formed by a nanocrystalline Si (nc-Si) thin film. The measurements were used to identify, at 4.2 K, the

location of single-electron charging islands within a 100  $nm \times 100 nm$  film area. The film, prepared by low-pressure CVD, was 40 nm thick and heavily-doped *n*-type. The grains were  $\sim 10 - 30$  nm in size, separated by ~1 nm thick grain boundaries. Novel, cross-shaped, single-electron transistors (SETs) were fabricated in the film, where four terminals connected to a ~100 nm central region containing  $\sim 10$  grains. Four side gates controlled the



Fig. 4-22. (a) Cross-SET in nanocrystalline Si. (b) Grey-scale image of current in terminal 4 at 4.2 K, with gates 3 and 4, and gates 1 and 2, operated in common.

device current. Figure 4-22(a) shows an SEM image of the device. Single electron oscillations were measured in each of the four terminals, as a function of the gate voltages. A typical measurement is shown in Fig. 4-22(b), where gates 1 and 2, and gates 3 and 4, are connected in pairs, the current is measured in terminal 4 (grounded), with 3 mV applied to the other terminals. The single-electron oscillations form patterns consisting of lines across the plots, which can be used as 'fingerprints' of specific combinations of charging islands. The patterns were associated with electrostatic coupling between quantum dots formed by the grains. Coherent electron coupling effects were also possible. An analysis of the patterns was used to identify the number and location of charging grains. Four charging grains and six bi-directional percolation paths existed in the device. The results illustrated transitions in single-electron conduction from single island to 2-D, multiple island systems.

#### 4-3-3. Room temperature single-electron effects in 1-D Si nanochains

We demonstrate single-electron devices using single Si nanochains. Very strong single-electron effects are observed at room temperature, raising the possibility of practical applications. The nanochains, prepared by thermal evaporation of SiO solid sources (Sec. 4), consist of 1-D arrays of ~10 nm diameter Si nanocrystals, separated by SiO<sub>2</sub> regions. Figure 4-23(a) shows a TEM image of the nanochains as synthesised. The nanocrystal marked 'A' has a diameter of 12 nm. We fabricated SETs on single nanochains using Ti/Al contacts and electron-beam lithography. This involved

dispersion of the nanochain material in IPA, spin coating of the nanochains on SiO<sub>2</sub>-on-Si substrates, location of a single nanochain by SEM, and fabrication of Ti/Al contacts by electron-beam lithography. Figure 4-23(b) shows an SEM image of a device. Figure 4-24(a) shows multiple step Coulomb staircase characteristics at 300 K, from a device with a 180 nm nanochain. Here, the drain, source, and back-gate currents  $I_D$ ,  $I_S$ , and  $I_G$  are plotted vs. the drain-source voltage  $V_{DS}$ . Figure 4-24(b) shows  $I_D$  on a log scale.

Our nanochains form multiple-tunnel junctions (MTJs), with single-electron charging in the nanocrystals. The characteristics of Fig. 4-24, with strong steps varying in width and height, and a low threshold voltage  $V_T \approx 0.35$  V, may be explained using the stray capacitance  $C_0$  caused by nanocrystal–substrate coupling. Figure 4-25(a) shows the

circuit model. Single-electron Monte Carlo simulation may be used to fit the data. With the number of islands N = 8, we find C = 0.12 aF, and  $C_0 = 0.1$  aF. The tunnel resistances  $R_n$  vary within 50% of a mean value of 8.2 GΩ. The single-electron charging energy of a nanocrystal is very high,  $\sim 0.32 \text{ eV}$ ,  $\sim 12k_BT$  at 300 K. As  $C_0/C$  increases,  $V_T$ reduces (Fig. 4-25(b)). Furthermore, removing a single  $C_0$  element within the MTJ creates the observed variation in step height (Fig. 4-25(c)), due to a 'bottleneck' in the MTJ associated with an increased local charging energy.

We also demonstrate a fabrication



Fig. 4-23. (a) TEM image of Si nanochains. (b) Single Si nanochain SET.



Fig. 4-24. Si nanochain SET *I-V* characteristics at 300K (a) linear scale and (b) log-linear scale.



Fig. 4-25. (a) Nanochain MTJ model. (b) Effect of varying  $C_0/C$  (c) Effect of removing one  $C_0$  element.

process for Si nanopillars, of interest for electron emission, electro- and photo-luminescent devices. Arrays of nanopillars were fabricated in nanocrystalline silicon, forming a 1-D Si nanocrystal system. Here, a 'natural lithography' technique using colloidal Au particles as mask for reactive-ion etching was used to fabricate nanopillars ~100 nm high and ~30 nm in diameter.

#### 4-3-4. Si nanochain growth mechanisms

We investigated the preparation of Si nanochains using metal-free thermal evaporation of SiO powders. The nanochains consist of 1-D arrays of Si nanocrystals  $\sim 10$  nm in diameter, separated by narrower SiO<sub>2</sub> 'necks' (Fig. 4-23(a)). Yields up to several milligrams are obtained, higher than is

easily possible with metal catalyst assisted CVD. Furthermore, the metal-free nature of the process leads to uncontaminated nanochains, consisting of only Si and SiO<sub>2</sub>. It is also possible to control the nanochain morphology by adjusting the growth parameters, and to obtain concentrated and stable dispersions of nanowires in solvents.

Si nanochains were synthesised by thermal evaporation of a SiO powder solid source at 1400°C in a quartz tube furnace. Ar gas carried the vapour through the tube. Nanochains/nanowires were synthesised in a cooler part of the furnace at 900 – 950°C. Depending on the growth conditions, 50% - 90% of the material formed nanochains. Figure 4-23(a) shows a TEM image of nanochains grown at a pressure of 400 mbar. In different nanochains, the nanocrystal diameter varied from <10 nm to ~30 nm, and the separation from ~15 nm – 40 nm. A thin SiO<sub>2</sub> shell, ~1 – 3 nm thick, covered the nanocrystals.

The number of nanocrystals in a nanochain depended on the length of the SiO<sub>2</sub> 'necks' in-between. It was possible to control this with the ambient pressure during growth. As the pressure was increased from 400 - 800 mbar, Si nanowires and nanochains of different morphologies were deposited. At 400 mbar, in different nanochains, the length of the SiO<sub>2</sub> necks varied from ~20 nm to several hundred nanometres. In contrast, at 800 mbar, the majority of the material consists of uniform Si nanowires, with very few nanochains. At 800 mbar, the SiO<sub>2</sub> necks in the nanochains were only a few nanometres long. At intermediate pressures, intermediate values of neck length predominated.

4-3-5. FETs using Si nanowires created by electroless chemical etching

We have fabricated dual-gate FETs using Si nanowires prepared using metal induced oxidation and wet etching of a Si wafer. The process demonstrates an alternative to CVD or lithographic fabrication of nanowires. Large numbers of SiNWs are formed (Fig. 4-26(a)). The nanowires vary in diameter from 40 -300 nm, with very large aspect ratio  $\sim$ 3000. Ti<sub>x</sub>Si<sub>y</sub> contacts are fabricated on single, selected, nanowires. An aluminium top-gate, combined with a back-gate, forms a dual-gate transistor (Fig. 4-26(b)). In an *n*-channel device with nanowire diameter ~70 nm, the output characteristics show current saturation,



Fig. 4-26. (a) Si nanowires using metal induced oxidation and wet etching (b) Si nanowire FET. (c) Dual gate output characteristics.  $V_{lg}$ : top-gate voltage,  $V_{bg}$ : back gate voltage.

with maximum current ~100 nA. A drain-source threshold voltage exists for current flow, controlled by the gate voltage, and assists in device turn-off. The on/off current ratio is ~3000, and the sub-threshold swing is ~780 mV/decade.

4.4 弾道電子輸送のULSI応用検討(名大グループ)

(1) 実施の内容

ネオシリコンから、直進性の良いバリスティック電子を、低電圧で放出することができる。そのメカニズムを理解するため、ナノワイヤに閉じ込められた電子・フォノン輸送の 理論解析を進めた。また、電子線を応用するには、電子線を検出するデバイスが必要にな る。電子線センサ MOS 集積回路を新たに開発し、実験的に電子線が検出できることを示し た。

4-4-1 シリコンナノワイヤにおける電子・変調音響フォノン相互作用と輸送現象



図 4-27 自立シリコンナノワイヤにおける閉じ こめフォノン基準モード 3 種類の分散関係と振 動の様子。上から shear, dilatational, flexural モード。

ネオシリコンでの音響フォノン状態を計 算する第一段階として、真空中に自立した無 限に長い円筒形シリコンナノワイヤ内にお ける音響フォノン状態を計算した。計算では シリコンを連続体として近似し、弾性特性 $\lambda$ ,  $\mu$  の Navier 方程式の基準モードを求めた。 フォノン振動 u を基準モードの線形結合で 表して Navier 方程式に代入することにより、 様々な基準モード(定在波)を厳密に求める ことができる。基準モードは図 4-27 に示さ れた 3 種類に分類され、それぞれ shear モー ド、dilatational モード、そして flexural モードと呼ばれる。

電子との相互作用はフォノン振動による 局所的体積変化を通して現れるが、shear モードではそのような局所体積変化が生じな いため、電子フォノン相互作用研究において は dilatational 及び flexural モードの音響 フォノンと電子の相互作用が重要になる。

バルクフォノンを用いた電子・音響フォノン相互作用の定式方法は古くから確立しており、現在のデバイスモデリングでの基礎となっている。しかしながら上記のような変調された音響フォノンと電子の相互作用では新たな定式化が必要となる。基本的には変形

ポテンシャル散乱機構による遷移確率をFermi 黄金律により計算する。結果だけを示すと、 閉じ込め状態(m, n)にある電子が軸方向波数 k<sub>z</sub> において変調音響フォノンにより単位時間 あたりに散乱される回数は下記により与えられる:

$$rac{1}{ au_{mn}(k_x)} = \sum_{m',n'} rac{D_{
m ac}^2 k_{
m B} T_{
m L}}{\hbar^2 
ho} \int_{-\infty}^0 I_{mn,m'n'}(q_x) \ \delta(E'_{
m total} - E_{
m total}) dk'_x$$

ただし  $D_{ac}$  は変形ポテンシャル係数、 $\rho$  はチャネル材料の質量体積密度、 $E_{total}$ ,  $E_{total}$ , t は 散乱前後の電子エネルギー、その他定数は標準的なものを表す。ここで  $I_{mn, m', n'}$  ( $q_z$ ) は形 状因子とよばれる量で、電子と音響フォノンの結合の強さを表す。形状因子はバルクフォ ノンを用いた時、電子閉じ込め波動関数  $\phi$  を用いて

$$I_{mn,m'n';\text{bulk}} = \int_0^{2\pi} \int_0^a \left| \varphi_{m'n'}(r,\theta) \right|^2 \left| \varphi_{mn}(r,\theta) \right|^2 r dr d\theta$$

により与えられ、変調音響フォノンを用いた時には

$$I_{mn,m'n'}(q_z) = rac{L_z
ho}{v_l^2}\sum_m \omega_{\pm q_l}^2 \Big| ig\langle m'n' ig| A_l J_{m_p}(q_l r) e^{im_p heta} ig| mn ig
angle \Big|^2$$

により与えられる。ただし vi は縦波音速、La は仮想的なワイヤ長、そして関数 J は Bessel 関数を表す。これにより変調音響フォノンとバルクフォノンの違いが形状因子に集約されるため、差異を議論する上で非常に有用である。

以上の定式化により、形状因子を詳細に調査することでナノワイヤ内での電子・変調音響フォノン相互作用に関する解析が用足りる事がわかった。そこで、この形状因子のチャネル材料依存性、ワイヤ径依存性、電子の始状態・終状態依存性、などについて詳細な調査を行った。図 4-28 (a)に異なるワイヤ材料について計算した基底準位内散乱に対する形状因子を示す。材料によって形状因子の増分は異なるが、 $q_z = 0$ における増分で規格化すると図 4-28 (b)に示すようにどの材料も同じ曲線を描く事がわかった。また、 $q_z = 0$ における形状因子の増分を材料定数の比 $\lambda/\mu$ の関数として図示すると図 4-29 が得られた。図において、

実線は*α / (2 + 3λ / μ) (α = 1.906)*という式で 書き表すことができる.この事実は、音響フ オノン変調効果の材料間の差異を論ずる上 で、ζ=1/(2+3λ/μ)が良い指標となること を示唆している。この*C*に関する普遍性は基 底準位内散乱に限らず、任意の準位内及び準 位間散乱について認められる。図 4-30 にいく つかの散乱について<u>ぐ</u>で規格化した形状因子 を示す。電子状態によって曲線の形状は変化 このこに関する普遍性により、材料を変えた 場合の音響フォノン変調効果の増減を容易 に見積もることができ、これらの形状因子曲 線を解析式で表現できれば複雑かつ時間を 要する電子散乱レートの計算を大幅に簡略 化することが可能となる。

以上の理論的基盤に基づいて、音響フォノ ン散乱レートの電子エネルギー依存性及び 移動度のワイヤ半径依存性を計算した。図 4-31に示されているように、変調音響フォノ ンを用いて計算されたものは、バルクフォノ ンを用いて計算されたものに比べて散乱レ ートが大きく移動度が小さいことがわかる。 これは形状因子の増加に起因するものであ り、ワイヤ径が小さいほどより顕著に表れる。 以上の計算をさらに現実のネオシリコン系 に近づけるため、シリコンナノワイヤ周辺を 絶縁膜で包んだ時の計算を行った。絶縁膜の 厚みはワイヤ径に比べて十分大きければ絶 縁膜外径での境界条件の影響が無視できる ことがわかったため、計算ではそのような条 件を用いた。図 4-32 は様々な異なる材料に より囲まれたシリコンナノワイヤにおける 変調音響フォノン散乱律速移動度を比較し ており、シリコンナノワイヤ周辺が真空、 SO<sub>2</sub>,HfO<sub>2</sub>となる順で移動度が低いことがわ かる。これはシリコンを包み込む材料の Acoustic impedance Zにより説明でき、シ リコンに比べて小さな Z を持つ材料で囲む ことにより移動度が減少することがわかっ た。

#### 4-4-2 電子線センサ CMOS 集積回路





図 **4-29** *q<sub>z</sub>*=0における基底準位内散乱に対する形 状因子の増分比



び移動度のワイヤ径依存性

ネオシリコンからの電子を検出する高密度センサ CMOS 集積回路を検討した。広い応用を 図るには、標準 CMOS 集積回路のみを用い、特殊なプロセスを付加しないことが必要である。 そこで、電子線の照射部分は、CMOS プロセスのメタル層(A1)を利用する方式とし、高感度 に電子線を検出する方式を検討した。



図 4-32 様々な異なる材料により囲まれたシリコンナノ ワイヤにおける変調音響フォノン散乱律速移動度

も、面積を小さくして多くのセルをもつアレイと することも可能である。

図 4-34 に示すのが実際の回路図である。この 回路は受けた電荷をクロック周期ごとに  $C_2 \sim$ 転送する。SW<sub>1</sub>は  $C_1$ から  $C_2 \sim$ 電荷転送、SW<sub>2</sub>は  $C_2$ の電荷リセットのためのスイッチである。赤 の破線で囲んだ部分は、チップ内で仮想的な電 子線電流を生成する電流源である。これは電子 線を当てずに回路動作を検証するためのもの であり、最終的には取り外す。Non-overlapping Clock Generator は、 $V_{CLK}$ の8倍の周期の互い に重なり合わない二つのパルスを生成する。チ ップは Motorola 1.2um プロセスを用いて製作 した。図 4-35 は製作した回路の顕微鏡写真で ある。

電子線には SEM の入射電子を利用した。 EBIC 測定用ホールダに測定回路を組み込んだパッケージを乗せ(図4-36)、ホール ダのバネ端子とつながる SEM 外部の端子から電圧をかけて回路を動作させる。電子線 検出実験の結果を図4-37 に示す。この図は SEM のエミッション電流(電子銃から放出 される電子電流)と検出される電流の関係 ① 電荷転送方式

捕獲電子電荷量 Q と電極キャパシタ C により検出電圧は Q/C で与えられるが、 Q,C いずれも電極面積に比例するため、 検出電圧を大きくすることが不可能 である。そこで、 $C_1$  で電子線を受け、  $C_2$ へ電荷を転送し、 $C_2$ にかかる電圧を 検出する図 4-33 の方式を考案した。 この方法の利点は  $C_2$ の値によって出 力電圧の大きさが決まるため、 $C_1$ の面 積は自由に決めることができる点で ある。従って検出部の面積を大きくし て広範囲の微小な電流を集めること



図 4-33 検出回路概念図





を示したものである。エミッション電流はチップに当たるまでに絞られるので、実際チッ プに当たるプローブ電流はかなり小さくなっている。エミッション電流と出力に比例関係 が確認できた。

③ ソース・ドレイン・フォロワ方式

電子線センサにおいて、電極の寄生キャパシタンスにより検出効率が著しく低下する。こ れを解消する方法として、電極電圧(ゲート電圧)にソース・ドレイン・ウエル電圧を追 従させるソース・ドレイン・フォロワ回路を検討 した。従来、電気化学計測で用いられている回路 はディスクリートのオペアンプにより構成され ているため、専有面積・消費電力が大きく、その ままオンチップ回路として用いるのは非効率で ある。そこで、新しい回路(CMOS source-drain follower)を考案し、同一テクノロジーの従来回 路と比較して、面積 1/30、消費電力 10 万分の 1、 特性ばらつきの影響 1/50、温度変化 1/300 を実 現した。これをアレイ状に配置したチップを試作 し、(図 4-38) 光合成タンパク質により光子から 変換した微弱な電子線を用いて電子線検 出実験を行い、2次元像を得ることに成功 した。

(2)得られた研究成果の状況及び今後期 待される効果

①シリコンナノワイヤにおける電子・変調 音響フォノン相互作用と輸送現象

1. ナノワイヤ構造における変調音響フォ ノンと電子の相互作用に関する効率的な 定式化手法を開発した。

2. 形状因子の材料・ワイヤ径に関する普 遍性を発見した。

3. 変調音響フォノン律速移動度のワイヤ 半径依存性を示した。

4. ワイヤとそれを取り囲む材料の Acoustic impedance を比較するこ とで移動度の増加・減少を予測す る事が可能であることを示した。

今後はより実際のデバイスに近い 形でのシミュレーションへと拡張 する事により、実デバイスでの性 能を音響フォノンエンジニアリン グの観点から予測・制御すること が可能になると考えられる。

② 電子線センサ CMOS 集積回路

1.標準 CMOS プロセスのみを用い、 メタル層を利用した検出法の考案 一度光子に変換するなど複雑な



図 4-36 ホールダ写真

SEMのエミッション電流一検出電流特性



図 4-37 電子線検出結果



図 4-38 CMOS source-drain follower による、光合成 タンパク質からの微弱電子線検出実験

プロセスを経ることなく標準 CMOS プロセスのみで製造可能であるため、安定に安く作製 することができる。また、検出だけでなく信号処理を1チップですることも可能でり、ア レイ化に向いている。

2. 出力回路の考案・設計

本研究で考案した電荷転送方式は電子線照射部と信号読み出し部を分離することができるため、双方の影響を受けないような構成になっている。このことから、精度をより高

めることや、検出部分の面積を自由に決めることができる。

また、本研究で考案した CMOS source-drain follower はトランジスタのゲートに付く寄 生キャパシタンスをキャンセルできるため検出信号の精度を著しく向上させるせること ができ、単電子の検出も可能である。

3. 電子線検出の実証

1、2 で述べたような方式に基づく電子線検出の研究はほとんど行われておらず、実際に 電子線を検出でき、充分な精度を出せたことは画期的である。

電子線センサは、当初ネオシリコンからのバリスティック電子を用いたチップ間通信を目 標としたが、より大きな応用を目指して、電子線センサとしての基礎的なところに重点を 置いた。電子線センサは、電子顕微鏡等の計測機器や宇宙物理・医療機器への応用が期待 できる。また、多くの分子は特定の反応に伴って電子を放出しており、生体分子・機能分 子と組み合わせることにより、これまででは不可能であったセンサや新機能デバイスが可 能となる。

4.5 ネオシリコンの発光・弾道電子物性グループ (農工大)

(1) 実施の内容

4-5-1 光物性および光電特性

① の高効率・高安定化

量子サイズナノシリコンの可視PLの高効率化と安定化に対して、HWAに基づく表面 酸化処理がきわめて有効であることを見いだし、PLの外部量子効率を23%にまで向上で きることを示した。また電子スピン共鳴による微細構造解析により、ナノドット表面の非 発光再結合欠陥の低減が発光効率向上に本質的な役割を果たしていることを明らかにした。

②発光波長のチューニング

HWAの条件(水蒸気圧力:1~4 MPa、温度:約 250℃,時間:2~3h)を変化する ことにより、PL発光波長を赤色だけでなく青色帯にまで短波長化することができた。こ

の結果を発展させ、HWAを急速熱酸化 (RTO)と適切な条件で組み合わせて試 料を作製したところ、赤色成分のない青 色単独の発光強度が増大し、空気中の長 期安定性も著しく向上した。

また、この方法で得られた青色発光は 秒オーダーの寿命を有する燐光性を示 すことが見いだされた。短パルスUVレ ーザで励起した後の寿命が低温では 10 秒以上に及ぶ。そのデータとして、発光 強度減衰の温度依存性を図 4-39 に示す。 RTOなどの酸化処理による青色発光 はこれまでにも報告例はあるが、寿命は ナノ〜マイクロ秒と速く、強度および安 定性も低い。そのため、発光はナノドッ トそのものではなく、ナノ構造界面の欠 陥に起因するとされてきた。

観測された遅い青色燐光は、従来の青 色発光とは明確に異なっており、バンド



図 4-39 各温度における青色帯燐光強度(ピーク 波長:450nm)の減衰曲線. 低温では寿命が 10 s 以上に達する.

間遷移からは説明できない。HWAとRTOにより作製された試料は粒径が1nm程度の極微細のナノ結晶シリコンと酸化膜のネットワークからなり、エネルギー帯構造が失われて、

分子的な離散準位が関与した緩和過程が現れたと考えられる。これはスケーリングの先に あるナノシリコンの光物性を象徴的に示す結果ともいえよう。

分子的なエネルギー準位の形成をさらに裏付ける事実として、青色燐光スペクトルは複数のピークからなり、各ピーク波長における燐光強度が同一の曲線にしたがって減衰していくことが判明している。

青色燐光を応用する基礎実験として、光エネルギーの内部伝達がナノシリコン系で成立 するかどうかを検証した。HWAによって赤色発光を増強した試料、青色発光の試料のそ れぞれに色素分子を電気化学的に導入して発光特性を解析し、励起光の偏光メモリなどに よって試料内部におけるエネルギー伝達の有無を検証した。

その結果、いずれの試料においても、ホストのナノシリコンから光子エネルギーの一部 が色素分子に伝達され発光を増強すること、種類の異なる色素分子を導入した場合は多重 のエネルギー伝達が生じていることを確認した。特に、青色燐光性試料での結果は、ナノ シリコンホストの分子的な準位から色素分子へのエネルギー伝達を検出したという点で意 義が大きい。

#### ③3次元ナノシリコン周期構造の作製

ナノシリコンを形成するウエットプロセスとして、磁界印加の下で陽極酸化を行う方法 を提案し、シリコンナノ周期構造の構造均一性が改善できることを実験的に確認した。こ れにより、基板からのホール供給方向を規制することで陽極酸化の制御性がさらに高まる ことが示された。またこの手法は3次元ナノ周期構造作製にも適用できることがわかった。

④EL素子への展開

PLに有効であるHWAをEL素子の作製に適用した。高品質の酸化膜の形成によりナ ノシリコンドット界面のトラップが抑制され、ナノドットへのトンネル注入が促進される 結果、EL発光効率が増大すると同時に、動作の長期安定性が著しく向上することが確認 された。これにより、ELの外部量子効率がPLの最高効率(23%)と同程度まで向上できる 見通しが得られた。

#### ⑤光電特性の解析

ナノシリコンのバンドギャップ可変性は、発光だけでなく、波長選択形の光電変換への 道も拓く。その検討として、ナノシリコン層を受光部とするダイオードの光導電特性を測 定したところ、先に確認した可視域感度に加えて、電界効果による光キャリアの雪崩増倍 現象を新たに見いだした。ナノシリコン系の光電機能におけるホットエレクトロンの関与 を示唆する重要なデータが得られたといえる。

4-5-2 弾道電子エミッタ

#### 弾道電子生成・放出の機構解析

構造制御したポーラスシリコン層を電子ドリフト層としたダイオードにおいて見いだし た弾道電子放出はナノシリコン層での電子加速に基づいており、最大の特長は放出電子の エネルギーの高さと可変性にある。放出電子エネルギー分布の形状は高エネルギー側にピ ークをもつ弾道性に特有のもので、従来の冷電子源における熱平衡のマックスウエル分布 とは全く異なる。

たとえば印加電圧15Vにおいて、本電子源の放出電子の平均エネルギーは数eVにま で達する。また、素子印加電圧の増大とともにピークエネルギーは高エネルギー側にシフ トしていく。このような特異な電子放出の実験的解析を行い、ナノシリコンドット層にお ける弾道電子生成がナノシリコンドット間の多重トンネル走行に起因することが明確にな った。

#### ②応用探索

本素子の特長は、電子ビーム応用を種々の媒質に拡大する。すなわち、放出電子の高エ

ネルギー性は、物理的な励起源に加えて、化学的には還元作用としての応用可能性を示唆 する。具体例として、真空中では2次元パターン情報の並列転写、気体中では分子の内部 励起、溶液中では水素発生などを誘起する活性電極動作が考えられる。

それぞれについて検討した結果を以下に述べる。電子エミッタの多様な応用可能性が、 真空だけでなく、大気圧気体、さらには水溶液においても明らかになった。中でも水溶液 での電子源動作は、従来の電子源では全く考えられなかった利用形態である。

#### -真空中:

電子の面放出性と指向性に着目し、2次元パターン情報を一括して露光することも試みた。実験では、表面電極上にレジストプロセスで間隔 30nm,幅 30nm の電子放出窓パタ ーンを作製した.レジスト塗布した Si ウエハをターゲットとした露光・現像の結果、約 30nm 幅のライン&スペースを確認することができた.本エミッタは、シリコンナノドッ ト間の多重トンネルによる電子加速効果を内蔵しており,放出時の電子の速度と方向が揃 っている。そのため,低加速電圧・平行磁界という単純な電子光学系の下でもナノメート ルレベルの解像度で1:1の一括転写を実現することができる.

他方、ディンプル構造のMISエミッタを微細アレイ化した素子でも、ナノ構造制御によって弾道電子放出が効率的に得られるに至り、超高感度撮像のプローブ特性を実用レベルにまで向上できた。これらの結果は、並列的情報伝送に対しても有用な知見を与えると思われる.

#### -空気・大気圧ガス中:

放出電子の高エネルギー性により、本電子源は空気中や大気圧気体中でも動作する。空 気中では、電子付着によって負イオンが生成する。これを発展させるべく、弾道電子によ って Xe 分子を直接内部励起し電離放電を伴わずに真空紫外光を発生させることを試みた。 実験では、本電子源とアノード電極(Ni板)とを、真空チャンバに接続したガラス管中に 対向して設置した。ガラス管内を真空排気後、Xe を 10 kPa 封入した。

実験の結果、パルス電圧印加下で電子が放出されている間のみ真空紫外光出力が観測され、分光解析から、波長は152nmと170nmにピークをもつことがわかった。Xe分子には8 eV付近に内部励起準位がある。衝突電離エネルギー(13.26eV)以下の電子励起で、エキシマーによる真空紫外発生を伴う内部励起・緩和過程が確認されたといえる。放電フリーの低電力・長寿命の無水銀平面蛍光ランプなどへの展開が期待される。

-溶液中:

n+-Si 基板上に堆積した多結晶 Si 薄膜を用い、素子を作製した。ただし、溶液中動作の 場合は、酸素雰囲気中急速熱酸化の後、高圧水蒸気アニールおよびフォーミングガス(H<sub>2</sub> を 3vol%含む N<sub>2</sub> ガス)アニール、さらに、90℃の有機溶液(1-Decene)中で熱処理し、ナノ シリコンドット表面の Si-H 結合を安定な Si-C 結合に置換する表面終端操作を行う。表面 電極の形成後、電子放出面以外を耐水性ワックスまたは耐酸性材料で被覆した。

実験では溶液として先ず p H=7.0 の純水を選び、電子源動作の効果を調べた。作用電極と してのナノシリコン電子源、Pt 対向電極、参照電極からなる3極系で純水中の電流-電圧 特性をサイクリックボルタモグラムで測定した。そのさいのパラメータは素子に印加する バイアス電圧である。

実験の結果、弾道電子放出が顕著になる印加電圧では、イオン生成によるとみられる導 電性増大が電気分解の起きない電位領域でも明確に現れた。水の酸化還元電位に相当する しきい値の電位で生じる電気分解とは異なる現象が起きていることを示唆する。

イオン電流が増大した領域では、電位がゼロ付近でも素子表面で気泡が発生した。そこ で、対向電極なしに電子源のみを動作させたところ、同様の気泡発生が観測された。そこ で、図 4-40(a)のように電子源素子を水中で単独動作させ、発生する気体をガスクロマトグ ラフによって同定した。ある印加電圧で一定時間、電子を放出させ、液中にセットしたガ ラス管からシリンジで気体を捕集した後、Arガスによって希釈し分析した結果が図 4-40(b) である。比較のため、図中には、希釈ガスのみ(ブランク試料)を分析した結果も示している。 この結果からわかるように水素が明確に検出され、また酸素と窒素のピークの強度比は、 大気成分の値と変わっていない。これらのデータにより、発生気体は水素のみであると結 論できる。

ー般の電極反応は熱平衡電子の授受によって進行し、電極のフェルミ準位と溶液側の酸 化還元電位との相対関係が反応に大きく影響する。これに対し、本電子源では電子がナノ シリコン層で弾道化し、数 e Vの平均エネルギーで溶液へ注入される。"熱い電子"は、化 学的に強い還元力をもつため、界面で  $H_2O$  や  $H^+$ を効率よく還元し、水素を生成する  $(2H_2O+2e^- \rightarrow H_2+2OH^-, 2H^++2e^- \rightarrow H_2)$ 。対向電極なしで進むこの過程は酸素発生の

ような副次的反応を伴わない。

このモデルを支持するさらなる根拠としては、①純水中の水素溶存量が電子源駆動時間 とともに増大していく、②素子へ負の電圧を印加した場合、セルの電流-電圧特性は何ら 変化せず、水素生成も全く見られない、③正の印加電圧をオフすると水素発生は直ちに停 止することから、熱的効果は関与していない、の3点が挙げられる。

水素が単独生成する下では、動作時間とともに *p*H 値はアルカリ性側に増大することが 予想される。実際に、純水、酸性、アルカリ性、生理食塩水において電子源を駆動し、水 素発生に伴う *p*H の変化をモニターしたところ、図 4-40(c)に示すように、全ての溶液にお いて、電子放出時間とともに溶液中の *p*H が増大していく。

溶液は多様であり、水素生成だけでなく、生体液を含む液体の物性・反応制御、物質生成など、電子源の新しい利用形態を可能とする。また対象の溶液としては D<sub>2</sub>O にも適用可能であること、動作時に光照射を行うことによって水素生成レートを増大できることがわかった。

(2)得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

超LSIの微細化が進む中、ナノメートル領域における新機能探索とデバイス応用は重要な課題となっており、内外で活発に研究が行われている。特に量子効果が顕著になる約4nm以下のサイズでは、バルクシリコンの物性が全面的に変化するため、学術・技術の両面でシリコンの新しい可能性が期待できる。

例えば、量子サイズナノシリコンでは、バンド構造およびキャリアの再結合過程はいわ

ゆる間接遷移/直接遷移の範 疇には入らなくなる。結果とし て生じる可視発光性は、シリコ ンフォトニクスの重要項目と して、効率向上、EL素子化、 光集積などをめぐって多くの 研究がなされている。また、物 性変化は電気的・熱的・化学的 特性にも及び、それぞれ新規の 探索的研究が展開されている。

このような状況にあって、本 研究では、量子サイズナノシリ コンの光学的・電気的性質に重 点をおき、可視発光と弾道電子 輸送という特異な効果の発現 機構の究明と制御性の向上を めざした。主な成果は以下の4 点に要約できる。

①ナノ構造に適した低温酸 化アニール技術により、表面終 端が発光の効率に影響する最



図 4-40 (a)ナノシリコン弾道電子源の水溶液中単独動作により発生する気体検出実験.(b)発生試料気体および参照試料のガスクロマトグラフスペクトル.(c)各種溶液中での電子源動作による水素発生に伴うpH値の変化.

大要因であることがつきとめられ、非発光再結合の原因となる表面欠陥を低減することで PL効率が直接遷移型と同程度にまで増大できた。これにより、発光の安定化に大きな指 針が得られ、EL素子の開発も大きく前進した。

②発光の短波長化を目的とした表面酸化処理の組み合わせにより、青色発光だけでなく、 寿命が数秒以上に及ぶ青色燐光効果を見いだした。超微細化によって分子的な性質が観測 されたといえる。また、関連する受光特性についても、光キャリアの増倍現象を観測した。 これらはナノシリコンの応用について重要な示唆を与えるものである。

③前項において導入した表面終端制御プロセスは、ナノシリコンドット界面のトラップ 密度低減という面で電子走行にも良い効果を与えることが実験的解析により明らかになっ た。これにより、ナノシリコン系における弾道電子輸送機構の存在が裏付けられ、弾道電 子放出特性の高効率・高安定化に見通しが得られた。

④ナノシリコン弾道電子源の特長を生かした応用可能性が示された。動作媒質を真空だけでなく大気圧気体さらには溶液にも拡大し、それぞれにおいて有用な現象を見いだした 意義は大きい。中でも、溶液中での動作と還元効果の確認により、電子源応用が従来は全く不可能であった領域に広がった。

これらにより、ナノシリコンの物性解明が進展し、技術的可能性が提示された。いずれ も当該分野の先駆的な知見であり、今後内外で重要となるナノシリコンテクノロジーに寄 与することが期待される。

4.6 "ネオシリコンの応用(ポストCMOS素子応用検討グループ)"(日立)

(1) 実施の内容

我々は、ネオシリコンを応用することによって新物性の創出や新デバイスの創生を目指

して研究を推進している。ネオシリコンの大きさは,数 nm 程度と非常に小さいため,単一電子効果など従来は 極低温でしか観測できなかった現象を室温でも十分に 観測可能である。ネオシリコンのように単一電子効果が おこっているナノ粒子は,いわば,大きな水素原子を人 工的に作製したことに相当するため,人工原子,あるい は,量子ドットなどと呼ばれる。このように新規な物性 が期待できるネオシリコンでは,その大きさや形状など の構造が重要になってくるが,逆に,その構造を形成し ている元々の材料にはよらなくなってくると考えられ



図 4-41 金ナノ粒子の透過型電子顕 微鏡像

る。そこで、本研究では、従来から研究している半導体であるシリコンのナノ粒子に加え て、金属のナノ粒子の検討をはじめた。より具体的には、中心部分に金原子の集合した核 を有し、周囲を有機分子の単層膜で覆った構造を化学的に合成することに成功した。図 4-41 に示すように、この度、合成した金ナノ粒子は直径 3nm を切っている。また、数グラム程 度と大量に合成できるようになったため、ネオシリコンを集積させた際にどのような物性 が生じるかを調べる事ができるようになった。実際、Langmuir-Blodgett 法で金ナノ粒子 の単層膜を形成することによって、電気特性として通常の物質と同じようなオームの法則 に従う事を確認した。これは、人工原子の集まりが人工格子として振舞う事を示唆してい る。自己組織化させた 2 次元 Langmuir-Blodgett 膜の膜質によって、電流・電圧特性が大 きく変化することが判明した.Langmuir-Blodgett 膜に構造欠陥が入っている場合には非線 形になるのに対して、構造欠陥が入っていない場合には線形になることが明らかになった. 従って、構造欠陥が大きな影響を与える事が判明した.

さらに、このように作製した人工格子にヨウ素をドーピングすることによって、電気抵抗が著しく変化するという現象を見出す事にも成功した。電気特性の温度依存性から、ド ーピング前は絶縁体的な状態であったのに対し、ドーピング後は金属的になることが判明 した.いわば、ナノ粒子による人工強相関電子系で、金属・絶縁体転移が観測された事に なる。透過型電子顕微鏡で詳しくしらべたところ、ヨウ素ドーピング後にはナノ粒子の構 造が破壊されて大きな金の塊になっている事が判明した.電気的に制御するためには、ナ ノ粒子構造を破壊することなく、金属・絶縁体転移を実現する必要がある.従って、今後、 ナノ粒子構造が破壊されにくい材料開発を進める必要があることなどの研究指針を得るこ とができた.また、グループ間の連携を強化し、この金ナノ粒子を核としたシリコンナノ ワイヤの形成の検討も行った。

このようにネオシリコンを基板上に集積化させることによって自由に曲げる事が可能な フレキシブルデバイスの実現を目指した.チャネル材料としては,当初,自己組織化させ たナノ粒子列を中心に検討した.金ナノ粒子へのドーピングを中心に基礎的な検討を進め た.ドーピング方法としては,以下のような複数の方式を検討した(i)ヨウ素ドーピング(ii) 仕事関数の異なる複数のナノ粒子からの電荷移動(iii)電気化学ドーピング(iv)ゲート電圧印 加によるキャリア濃度の変調.何れの方法でも,ドーピングを成功させる事は極めて困難 であった.(i)ではヨウ素がナノ粒子を保護している有機膜を破壊する.(ii)のために合成し た銅ナノ粒子は粒径が30nm程度と単電子工かを期待するには大きすぎる.(iii)ではドーピ ングには成功した模様であるがドーピングするとナノ粒子がイオン化し膜がはく離する. (iv)では,ナノ粒子にキャリアが注入しやすいように保護有機膜の厚さを炭素原子3個分に まで薄くしたが,それでもゲート変調は観測されなかった.このように自己組織化ナノ粒 子へのドーピングは非常に困難である事が判明したため,フレキシブル・トランジスタへ の応用として別のアプローチもとる事にした.すなわち,トランジスタ応用にはシリコン

以上に相応しい材料はないとい う視点にもどり,シリコンにフレ キシブル性を取り入れるという アプローチである.具体的には, 通常のシリコンプロセスによっ て100nmスケールのシリコン・ワ イヤを加工し,基板上からはく離 して回収し,溶液にシリコン・ワ イヤを分散させる.実際に試作し て回収に成功した様子を図4-42 に示す.このようなネオシリコン 材料は,溶液プロセスによってデ



#### (a) シリコンプロセスによって 加工されたナノワイヤ(140nm).

(b) 溶液中に分散した シリコン・ナノ・ワイヤ.

図 4-42 シリコンプロセスで形成したシリコンナノワイヤ分散 溶液

バイス化することができるため、フレキシブル・トランジスタ応用に最適である. フレキシブルデバイスの作製は印刷技術などを利用した革新的低コストプロセスの導入 が想定されているが、現在の印刷技術では数10μm程度の合わせ余裕を確保する必要があ

りトランジスタ性能が低い要因のひとつとなっている.そこで、印刷装置の位置合せ精度 によらず自己整合のトランジスタを作製させるためのプロセスを考案した.具体的には、 ゲート電極をレジストでパターニングした後、 レジストを残したまま側壁を陽極酸化し、続けて、ソース・ドレイン電極をレジストのリ フトオフで形成した(図4-43).この工程によって、ソース・ドレイン電極をゲート電極と 原子スケールで自己整合とすることに成功した.これらの電極を用いれば、シリコンナノ ワイヤやシリコンナノ粒子をはじめとするネ オシリコン材料に限らず、多くのフレキシブ ルTFTに適用できる.



チャネル材料としては、新たに5nmという極薄ZnOの適用も検討した.デバイスを試作 したところ、図4-44に示すように明瞭なゲート依存性を出す事に成功しトランジスタ動作 を確認した.極薄膜にする事で、オフ状態のリーク電流を低減する事も出来た.

フレキシブル TFT の更なる高性能化へ向け、極薄の IGZO 膜(図 4-45)を用いた TFT を 試作し,理論限界に迫る 63mV/dec のサブスレッショルド・スロープと TFT としては世界 最高レベルの 1.5V での低電圧動作(図 4-46)を実現した。

また、TFT以外の応用として、ネオシリコンを用いた発光素子の検討も行った。近距 離光配線の抜本的低コスト化やチップ内グローバル配線の光配線化を実現するためのイノ ベーションとして、シリコンフォトニクスに注目が集まっている。例えば、CPUのマルチ コア間の光伝送用途など、光源もチップ内に集積化する場合には、高歩留りかつ低コスト で製造可能なシリコンベースの光源が望ましい。しかし、シリコンは間接遷移型半導体で あるため原理的に発光しにくいという特性があり、肝心の光源には、直接遷移型である化 合物半導体を用いることが検討されている。

日立は、2006年に、厚さ数nmの極薄単結晶シリコンへの電流注入によって、シリコンを LED (light Emitting Diode) として光らせることに成功した.これはナノメートルの微小 領域で起こる量子閉じ込め効果によって電子状態を変化させ、通常は発光しないシリコン を発光するように変えたものである。しかし、LED からの光は自然放出光であり、高速に変 調することができないため、通信用途には波長のそろったコヒーレントなレーザ光を用い るのが望ましい.レーザ発振させるためには、誘導放出で光を増幅させることが必要だが、 極薄シリコンで光学利得が発生するかど

うかは知られていなかった.

そこで本研究では、厚さ約4.4nmの極薄 シリコン素子上に、発光した光を閉じ込め る導波路と分布ブラッグ反射鏡(DBR: Distributed Bragg Reflector)を形成し た共鳴共振器形発光ダイオード構造 (RCLED: Resonant Cavity LED)を作成し た.光が伝搬する導波路のコア材料には窒 化シリコンを用いた。光は、屈折率の大き い材料に広がる傾向があるため、二酸化シ リコンよりも屈折率の大きい窒化シリコ ンに閉じ込められる。ところが、支持基板 のシリコンは窒化シリコンよりも屈折率

が更に大きいため、支持基板を残したまま

では光が基板側に漏れてしまう。そこで,



(ZnO-channel: 5 nm, L=100 um, W=15mm) 図 4-44 Z n Oトランジスタ特性

MEMS プロセスを用いて,支持シリコン基板の一部を局所的に開口して空洞にすることで, 光の閉じ込めを強くすることに成功した. 試作した極薄シリコン RCLED は,全体の厚さ約1 μm で太鼓の膜のように中空に浮いている構造となっている.

この RCLED に電流を流す事によって、導波路端部からの発光現象を確認し、光が分布帰



還型ミラーによって導波路に閉じ込められていることを確認した(図4-47). 発光波長は,約1,000mの赤外領域である. 導波路端部からの発光が強いということは、光が導波路を 伝搬している間に、極薄シリコンからの光学利得によって、光の強度を増幅させている可 能性を示唆している. そこで、導波路端部からの発光を増幅放出成分とし、導波路内部か らの発光を自然放出成分として、それらの発光強度の比を解析した. この比は極薄シリコ ンに流す電流量が大きくなるにつれて増大し、極薄シリコンを使って正の光学利得を出せ ることが判明した.

(2)得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

本研究で開発したフレキシブル・トランジスタは、1.5V 程度の電池でトランジスタを 駆動することが可能となり、フレキシブル素子に応用できる可能性が高まった.今後、移 動度などの特性を更に改善するとともに、信頼性を評価し、実際に素子として応用できる ように研究を進めていく必要がある。また、素子単体レベルの開発だけではなく、回路動 作を実証することや、新たなアプリケーションを考案することも必須である。

極薄シリコン発光ダイオードは、近い将来に実現が期待されているシリコンフォトニク ス分野において、今後,発光効率の改善や動作速度の向上ができれば光と電子の融合を促 す基本素子として使える可能性もある。デバイス物理に立脚した最適設計を行うことによ って,更なる特性の改善が必要である。

5. 類似研究の国内外の研究動向・状況と本研究課題の位置づけ

微粒子の高集積配列技術に関しては、サブミクロンレベルの分子による研究やナノスケールの金属粒子に関する研究は多いが、10nm レベルのシリコン量子ドットに関する研究は 世界的に類例がない。

シリコンナノデバイスと NEMS 構造を融合させることで、従来の電子デバイスでは実 現困難な素子特性や機能を探索しようとする試みは世界的に見てもまだ萌芽状態にあるが、 この数年で急速な発展を遂げている。CMOS と異種技術の融合という観点からとらえれば、 ナノエレクトロニクスの発展に対する、デバイス・材料レベルからの'More than Moore' 的なアプローチの一つとして分類される技術であろう。ごく最近では、シリコンフォトニ ック結晶とフォノニック結晶を融合したオプト・メカニカル素子なども提案されている。 今後、NEMS の更なる微細化が進めば、ナノ可動構造体内において電子・フォノン・スピ ン・フォトンが融合して新たな物理現象が発現してくる可能性もあり、機能素子応用と基 礎物理の両面において今後の展開が大いに期待される領域である。本研究課題はまさにそ の先駆的な位置づけにあり、マイクロ・ナノ・アトムのマルチスケールにおいて、このよ うな融合技術が生み出す様々な新しい物理とデバイス原理を世界に先駆けて明らかにして きた。また研究代表者が長年築き上げてきたボトムアップ・トップダウン融合技術の研究 がバックグランドとなっていることも大きな特徴である。今後のナノスケール Si デバイス 研究に対して、一つの新たな潮流を開拓した極めて独創的な研究であり、科学技術と半導 体産業の両面においてそのインパクトは非常に大きい。 6. 研究実施体制

(1)体制

	ネオシリコン構造作製・機能探索グループ
研究代表者	東京工業大学 量子ナノエレクトロニクス研究センター 小田俊理研究室 サザンプトン大学 水田博研究室
小田俊理	担当 表面修飾技術を用いたnc-Siナノ粒子の分散溶液の作製 nc-Siナノ粒子配列制御集積化プロセスの開発 ナノエレクトロメカニカル動作可能なネオシリコン伝導デバイスの作製 NEMSメモリ素子の作製と特性予測シミュレーション、動作実証
	微細領域電気特性評価グループ
	ケンブリッジ大学 工学部 W. I. Milne研究室 インペリアル カレッジ Zahid Durrani研究室
	担当 ネオシリコンドット集積構造伝導層の伝導メカニズム解析 ナノエレクトロメカニカルネオシリコン伝導デバイスの電気特性評価
	弾道電子輸送のULSI応用検討グループ
	名古屋大学 大学院工学系研究科 中里和郎研究室
	担当 ネオシリコンナノフォノンと弾道電子の相互作用の理論計算 ULSIチップ電子線インターコネクション素子の構造設計と試作
	弾道電子放出の機構解析・応用探索グループ
	東京農工大学 大学院共生科学研究部 — 越田信義研究室
	担当 常圧動作ネオシリコン弾道電子エミッタの特性向上
	ポストCMOS素子応用検討グループ
	株式会社 日立製作所 中央研究所 研究開発本部 ULSI研究部
	   担当   金属ナノ粒子、シリコンナノワイヤ配列技術開発   ネオシリコンフレキシブルトランジスタの検討

(2)メンバー表

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
小田 俊理	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	教授	ネオシリコン試料の作 製、全体の統括	H16.11~H22.3
宇佐美浩一	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	技術専門 職員	ネオシリコン試料の作 製	H16.11~H22.3
黄少云	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	非常勤 研究員	ネオシリコン素子の評 価	H16.11~ H18.9
Mohamed Ali Salem	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生 JST 研究 補助員	ネオシリコン素子の作 製	H16.11~ H17.3
筆宝 大平	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	JST 研究 補助員 非常勤 研究員	ネオシリコン素子の作 製	H16.11~H19.3 H19.4~H22.3
田中 敦之	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生 JST 研究 補助員	ネオシリコン試料の作 製	H16.11~H20.3 H17.4~H20.3
川田 善之	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生 JST 研究 補助員 非常勤 研究員	ネオシリコン素子の作 製	H16.11~H20.3 H17.4~H20.3 H20.4~H21.3
鄭仰東	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコンデバイス の理論計算	H16.11~ H20.3
Akhmadi Surawijaya	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン素子の作 製	H16.11~ H21.3
山端 元音	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン素子の作 製	H16.11~H22.3
東島 賢	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン素子の評 価・解析	H16.11~ H19.3

① ネオシリコン構造作製・機能探索グループ

百々信幸	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン素子の作 製	H16.11~ H18.3
佐藤 大典	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン素子の作 製	H16.11~ H18.3
黒川康良	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン素子の評 価・解析	H16,11~ H17.3
池澤 健太	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン素子の作 製	H16,11~ H17.3
永見 佑	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生 JST 研究 補助員	ネオシリコン素子の評 価・解析	H16.11~H22.3 H19.4~H22.3
小木 純	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生 JST 研究 補助員	ネオシリコン素子の作 製	H16.11~H22.3 H19.4~H22.3
小林 正幸	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン素子の作 製	H17.4~ H19.3
津久井 正人	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン素子の作 製	H17.4~ H19.3
澤井 俊一郎	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン素子の評 価・解析	H18.4~ H20.3
向井 崇	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン素子の作 製	H18.4~ H20.3
松田 真之介	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン素子の作 製	H18.4~ H20.3
稲葉 直樹	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン素子の評 価・解析	H18.4~ H20.3
新倉浩樹	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン試料の作 製	H18.4~ H20.3
古川 亮介	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン試料の作 製	H18.4~ H20.3
---------------------------	--------------------------------------	-----------------------	---------------------	----------------------------
Chuanbo Li	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	学振外国 人特別研 究員	ネオシリコンデバイス の特性評価	H18.4~ H20.8
チョン ヘジョン	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン素子の評 価・解析	H18.4~ H21.3
Saeed Akhtar	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン素子の評 価・解析	H18.4~ H20.12
Manoharan Muruganathan	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン素子の評 価・解析	H18.4~ H20.9
Benjamin Pruvost	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコンデバイス の理論計算	H18.4~ H21.3
Jiumin Wang	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン試料の作 製	H18.10~ H21.9
Xin Zhou	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコンデバイス の特性評価	H18.10~H21.9
柴村 純平	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン素子の評 価・解析	H19.4~ H21.3
増渕和典	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン素子の作 製	H19.4~ H21.3
中峯 嘉文	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生 JST 研究 補助員	ネオシリコン素子の作 製	H18.4~H22.3 H21.4~H22.3
米澤 英徳	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン素子の作 製	H18.4~ H19.3
佐野洋	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	 ネオシリコン試料の作 製	H19.4~ H21.3

Aftab Rafiq	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	学振外国 人特別研 究員	ネオシリコン試料の作 製	H19.10~ H21.3
Chao Yan	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン試料の作 製	H19.10~H22.3
He Liang	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン試料の作 製	H19.10~H21.9
Nanhao Quan	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン試料の作 製	H19.10~ H21.3
Ian C. Robertson	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生 JST 研究 補助員	ネオシリコン試料の作 製	H19.4~H22.3 H21.4~H22.3
内田 建	東京工業大学 大学院 理工学研究科	准教授	ネオシリコン試料の作 製と特性評価	H20.4~H22.3
長浜 陽平	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン試料の作 製	H20.4~H22.3
石川 哲也	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン試料の作 製	H20.4~H22.3
深田 正憲	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン試料の作 製	H20.4~H22.3
小寺 哲夫	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	助教	ネオシリコン試料の作 製と評価	H21.4~H22.3
高橋 網己	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン試料の作 製と評価	H21.4~H22.3
角谷 直哉	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン試料の作 製と評価	H21.4~H22.3
二階堂 広基	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン試料の作 製と評価	H21.4~H22.3

林文城	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン試料の作 製と評価	H21.4~H22.3
Amin Sulthoni	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン試料の作 製と評価	H21.4~H22.3
Jean Laniog-Taru n	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン試料の作 製と評価	H21.4~H22.3
Berrin Pinar Algul	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン試料の作 製と評価	H21.4~H22.3
Marolop Simanullang	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン試料の作 製と評価	H21.4~H22.3
三好省吾	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	大学院生	ネオシリコン試料の作 製と評価	H21.4~H22.3
小島 幸	東京工業大学 量子ナノエレク トロニクス研究 センター	JST 事務 補助員	チーム事務	H16.11~ H18.9

水田博	サザンプトン大 学 (H16.11 ~ H19.3 は東工大)	教授	ナノエレクトロメカニカ ル機能素子全般の開拓と 原子スケールでのナノフ オノン物理の解明	平成 16 年 11 月~ 平成 22 年 3 月
土屋良重	サザンプトン大 学 (H16.11 ~ H20.1 は東工大)	講師	ナノエレクトロメカニカ ルメモリの研究	平成 16 年 11 月~ 平成 22 年 3 月
Mario G-Ramirez	サザンプトン大 学	大学院生	サスペンデッドゲートナ ノドットメモリの設計・作 製・評価	平成 19 年 11 月~ 平成 22 年 3 月
Mohammad A. Ghiass	サザンプトン大 学	大学院生	サスペンデッドドット単 電子トランジスタのシミ ュレーションと評価	平成 20 年 4 月~ 平成 22 年 3 月
吉村 秀雄	<ul><li>サザンプトン大</li><li>学(東京農工大</li><li>ITP 留学生)</li></ul>	大学院生	サスペンデッドゲートナ ノドットメモリのシミュ レーション	平成 20 年 2 月~ 平成 20 年 7 月

### ② 微細領域電気特性評価グループ

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
W. I. Milne	ケンブリッジ大 学工学部	教授	シリコンナノワイヤ試 料・素子の作製	H16.11~H22.3

Z. A. K. Durrani	インペリアル カレッジ	講師	極微細加工、極微領域電 気特性評価	H16.11~H22.3
M. A. Rafiq	ケンブリッジ大 学 キャベンディ ッシュ研究所 (H19.8~H21.8は 東工大)	大学院生	極微細加工、極微領域電 気特性評価	H16.11~H21.8
A. Fluwitt	ケンブリッジ大 学工学部	講師	シリコンナノワイヤ試 料・素子の作製	H19.4~H22.3
A. Tahraoui	ケンブリッジ大 学工学部	助教	シリコンナノワイヤ試 料・素子の作製	H19.4~H21.3
A. Colli	ケンブリッジ大 学工学部	大学院生	シリコンナノワイヤ試 料・素子の作製	H19.4~H21.3
M. Zaremba- Tymieniecki	インペリアル カレッジ	大学院生	極微細加工、極微領域電 気特性評価	H20.10~H22.3
X. Zhu	ケンブリッジ大 学工学部	大学院生	シリコンナノワイヤ試 料・素子の作製	H20.10~H22.3

# ③ <u>弾道電子輸送の ULSI 応用検討グループ</u>

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
中里和郎	名古屋大学大 学院工学研究 科電子情報シ ステム専攻	教授	ネオシリコン系におけ る電子輸送の物理機構 解析および電子線イン ターコネクションの原 理確認と実用化検討	平成16年11月~ 平成22年3月
宇野重康	名古屋大学大 学院工学研究 科電子情報シ ステム専攻	助教	ネオシリコン系におけ る電子輸送の物理機構 解析および電子線イン ターコネクションの原 理確認と実用化検討	平成19年4月~ 平成22年3月
服部淳一	名古屋大学大 学院工学研究 科電子情報シ ステム専攻	大学院生	ネオシリコン系におけ る電子輸送の物理機構 解析	平成19年4月~ 平成22年3月
亀谷祐輔	名古屋大学大 学院工学研究 科電子情報シ ステム専攻	大学院生	ネオシリコン系におけ る電子線インターコネ クションの原理確認	平成20年4月~ 平成22年3月
沼田達宏	名古屋大学大 学院工学研究 科電子情報シ ステム専攻	大学院生	ネオシリコン系におけ る電子輸送の物理機構 解析	平成20年4月~ 平成22年3月

## ④ 弾道電子放出の機構解析・応用探索グループ

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
越田 信義	東京農工大学大学院 工学府	教授	散乱機構,高効率化・低 電圧化,材料プロセスの 検討	H16.11~H22.3
嶋田壽一	(㈱カンタム 14 JST 非常勤技術 アドバイザ	SORST 非常勤技 術 アドバイ ザ	素子化技術	H16.11~H22.3
Bernard Gelloz	東京農工大学大学院 工学府	助教	発光機構解析	H16.11~H22.3
太田敢行	東京農工大学大学院 工学府	博士後期 課程 学生	弾道電子放出	H19.4~H22.3

### ⑤ <u>ポスト CMOS 素子応用検討グループ</u>

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
井戸 立身	(株) 日立製作所	部長	サブテーマの統括	H21.10~
	中央研究所			H21.10
青木 雅博	(株)日立製作所	部長	サブテーマの統括	H20.4~
	中央研究所			H21.9
尾内 享裕	(株)日立製作所	センタ	サブテーマの統括	H16.11~
	中央研究所	長		H20.9
福田 宏	(株)日立製作所	主任研	ナノ粒子形成・製膜	H16.11~
	中央研究所	究員	プロセス	H19.3
新井 唯	(株)日立製作所	主任研	ナノ粒子形成・製膜	H16.11~
	中央研究所	究員	プロセス	H21.10
内山 博幸	(株)日立製作所	主任研	薄膜形成プロセス	H19.4~
	中央研究所	究員	TFT素子作成	H21.10
斎藤 慎一	(株)日立製作所	主任研	TFT素子作成	H16.11~
	中央研究所	究員	電気·光学特性評価	H21.10
久本 大	(株)日立製作所	主任研	TFT素子作成	H20.4~
	中央研究所	究員	電気·光学特性評価	H21.10
河村 哲史	(株)日立製作所	研究員	薄膜形成プロセス	H20.4~

	中央研究所		TFT素子作成	H21.10
若菜 裕紀	(株)日立製作所	研究員	薄膜形成プロセス	H21.4~
	中央研究所		TFT素子作成	H21.10

### 7. 研究期間中の主な活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
平成 16 年	プロジェクトキックオ	東京工業大	10 人	プロジェクトスタートに
12 月 13 日	フ会議	学		際してグループ毎の研究
平成 17 年 8 月 12 日	ネオシリコンチーム会 議	ケンブリッ ジ大学工学 <sup></sup>	13 人	計画を討論 グループ毎の研究進捗状 況と計画を発表・討論
平成 17 年 12 月 12 日	ネオシリコンチーム会 議	東京工業大学	12 人	グループ毎の研究進捗状 況と計画を発表・討論
平成 18 年	ネオシリコンチーム会	東京工業大	12 人	グループ毎の研究進捗状
10 月 27 日	議	学		況と計画を発表・討論
平成 19 年	ネオシリコンチーム会	東京工業大	16 人	グループ毎の研究進捗状
7 月 17 日	議	学		況と計画を発表・討論
平成 20 年	ネオシリコンチーム会	東京工業大	14 人	グループ毎の研究進捗状
7月3日	議	学		況と計画を発表・討論
平成 20 年	ネオシリコンチーム会	東京工業大	16 人	グループ毎の研究進捗状
11 月 7 日	議	学		況と計画を発表・討論
平成 21 年	ネオシリコンチーム会	サザンプト	12 人	グループ毎の研究進捗状
7月 13-14 日	議	ン大学		況と計画を発表・討論
平成 21 年 9月11日	応用物理学会シンポジ ウ ム 「 More than Moore に向けたネオシ リコン材料の新展開」	富山大学	150 人	ネオシリコンプロジェク トの最新の成果を公開し て討論会を開催。
平成 21 年	ネオシリコンチーム会	富山国際会	10 人	グループ毎の研究進捗状
9月 11 日	議	議場		況と計画を発表・討論
平成 22 年 3 月 1 日・2 日	International Symposium on Atom -scale Silicon Hybrid Nanotechnologies for 'More-than-Moore' & 'Beyond CMOS' Era	サザンプト ン大学	100人(現 時点見込 み)	SORST ネオシリコンプロジ ェクトの研究成果をベー スとして、アトムスケール で制御されたシリコン・ハ イブリッドナノテクノロ ジー技術の現在と将来展 開について、世界の第一線 で活躍する研究者を招待 して議論を行った。

(1) ワークショップ・シンポジウム等

(2)招聘した研究者等

特になし

#### 8. 発展研究による主な研究成果

(1) 論文発表(英文論文 120件 邦文論文 6件)

#### 単行本(総説論文)

- 1. S. Oda and D. Ferry eds., Silicon Nanoelectronics, Marcel Dekker (2005)
- S-Y. Huang, H. Mizuta, S. Oda, Nanocrystalline Silicon Memory Devices, Handbook of Semiconductor: Nanostructures and Nanodevices, Edited by A. A. Balandin and K. L. Wang, American Scientific Publishers, 131-194, (2006)
- 3. 越田信義、『ナノ蛍光体の開発と応用』、3章ナノ蛍光体の研究例 1節 Si ナノ蛍光 体(シーエムシー、東京、2007) pp. 127-135.
- 4. 越田信義・B.ジェローズ、ナノクリスタルシリコン発光デバイス、オプトロニクス 311 号, 127-132 (2007/11)
- N. Koshida, Luminescence and related properties of nanocrystalline porous silicon, in Semiconductor Quantum Structures, Vol. III-34, ed. E. Kasper and C. Klingshirn (Springer-Verlag, Berlin, 2007) pp. 121-136.
- 6. 越田信義、太田敢行、Bernard Gelloz、溶液中でも動作する電子源電極の開発と水 素発生、燃料電池 Vol. 7, No. 3 (2008) 88-92.
- 7. 越田信義、ナノ結晶シリコン電子源の新しい応用展開、応用物理 78, 329-332 (2009).
- 8. N. Koshida (Ed.), Device Applications of Silicon Nanocrystals and Nanostructures, A series of Nanostructure Science and Technology (series editor: Dr. D. Lockwood) (Springer, New York, 2009) 348
- H. Mizuta, S. Oda, S. Uno, N. Mori and N. Koshida, "Electron transport in nanocrystalline silicon", *Device Applications of Silicon Nanocrystals and Nanostructures (Nanostructure Science and Technology)*, N. Koshida ed., pp. 197-222, Springer, 2008.
- 10.S. Oda and S-Y Huang, Silicon Nanocrystal Flash Memory, Silicon Nanocrystals: Fundamentals, Synthesis and Applications, Edited by L. Pavesi and R Turan, Wiley VCH, Weinheim, 395-444, (2010)
- 11.Z. A. K. Durrani, Single-electron devices and circuits in silicon, Monograph, 285 pages, Imperial College Press, London (2010).
- 12. 越田信義(監修)、小田俊理、水田博、土屋良重、内田建、斎藤慎一、ナノシリコンの最新技術と応用展開, CMC 出版(2010)

#### 原著論文

- M. A. Salem, H. Mizuta and S. Oda, Y. Fu, and M. Willander: "Atomic force microscope current-imaging study for current density through nanocrystalline silicon dots embedded in SiO2," Jpn. J. Appl. Phys. 44, L88, (2005) DOI: 10.1143/JJAP.44.L88
- Y. D. Zheng, H Mizuta, Y. Tsuchiya, M. Endo, D. Sato and S. Oda: "In situ real-time spectroscopic ellipsometry study of HfO<sub>2</sub> thin films grown by using the pulsed-source MOCVD," J. Appl. Phys. 97, 023527 (2005) DOI:10.1063/1.1827912 (9 PAGES)
- M. Rafiq, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, S. Oda, S. Uno, Z. Durrani and W. Milne, "Charge injection and trapping in silicon nanocrystals", Appl. Phys. Lett. 87, 182101 (2005) DOI:<u>10.1063/1.2119431</u>
- 4. M. A. H. Khalafalla, Z. A. K. Durrani, H. Mizuta, H. Ahmed, S. Oda, Inter-grain coupling effects on Coulomb oscillations in dual-gated nanocrystalline silicon point-contact transistors, Thin Solid Films, 487, 255 – 259 (2005) DOI:10.1016/j.tsf.2005.01.075.
- 5. M. A. Salem, H. Mizuta S. Oda, Y. Fu and M. Willandar, "AFM

current-imaging study for current density through nanocrystalline silicon dots embedded in SiO<sub>2</sub>", Jpn. J. Appl. Phys. 44, L88-L91 (2005) DOI: 10.1143/JJAP.44.L88

- Y. Tsuchiya, T. Nakatsukasa, H. Mizuta, S. Oda, A. Kojima, and N. Koshida: Quasiballistic electron emission from planarized nanocrystalline-Si Cold Cathode, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 832, 189-194 (2005).
- P. Walker, S. Uno and H. Mizuta, "Simulation study of the dependence of submicron polysilicon thin film transistor output characteristics on grain boundary position", Jpn. J. Appl. Phys. 44, 8322 (2005) DOI: 10.1143/JJAP.44.8322
- 8. B. Gelloz and N. Koshida, Mechanism of a remarkable enhancement in the light emission from nanocrystalline porous silicon annealed in high-pressure water vapor, J. Appl. Phys. 98, 123509-15 (2005) DOI:10.1063/1.2147847 (7 *PAGES*).
- T. Ohta, A. Kojima, H. Hirakawa, T. Iwamatsu, and N. Koshida, Operation of nanocrystalline silicon ballistic emitter in low vacuum and atmospheric pressures, J. Vac. Sci. Technol. B 23, 2336-2339 (2005) DOI:10.1116/1.2102928 (4 PAGES).
- A. Kojima and N. Koshida, Ballistic transport mode detected by picosecond time-of-flight measurements for nanocrystalline porous silicon layer, Appl. Phys. Lett. 86, 022102 (2005) DOI:10.1063/1.1848181 (*3 PAGES*).
- 11. B. Gelloz, A. Kojima, and N. Koshida, Highly efficient and stable luminescence of nanocrystalline porous silicon treated by high-pressure water vapor annealing, Appl. Phys. Lett. 87, 031107-3 (2005) DOI:10.1063/1.2001136 (*3 PAGES*).
- B. Gelloz, T. Kanda, T. Uchida, M. Niibe, A. Kojima and N. Koshida: Electroluminescence enhancement assisted with ballistic electron excitation in nanocrystalline silicon diodes, Jpn. J. Appl. Phys, 44, 2676-2679 (2005) DOI: 10.1143/JJAP.44.2676.
- B. Gelloz, H. Sano, R. Boukherroub, D.D.M. Wayner, D.J. Lockwood, and N. Koshida, Stable electroluminescence from passivated nano-crystalline porous silicon using undecylenic acid, phys. stat. sol. (c) 2 No.9, 3273-3277 (2005) DOI: 10.1002/pssc.200461142.
- B. Gelloz, A. Kojima and N. Koshida: Improved optoelectronic characteristics of nanocrystalline porous silicon by high-pressure water vapor annealing, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 832, 141-146 (2005).
- 15. A. Kiuchi, B. Gelloz, A. Kojima, and N. Koshida: Possible operation of periodically layered nanocrystalline porous silicon as an acoustic band crystal device, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 832, 207-212 (2005).
- 16. S Uno, H Mori, K Nakazato, N Koshida, and H Mizuta, Theoretical Investigation of Electron-Phonon Interaction in One-Dimensional Si Quantum Dot Array Interconnected with Silicon Oxide Layers, Phys. Rev. B 72, 035337 (2005) DOI:10.1103/PhysRevB.72.035337
- 17. S Uno, H Mori, K Nakazato, N Koshida, and H Mizuta, Reduction of Acoustic Phonon Deformation Potential in One-Dimensional Array of Si Quantum Dot Interconnected with Tunnel Oxides, J. Applied Phys. Vol. 97, pp. 113506 (1-6), (June 2005) DOI:<u>10.1063/1.1913799</u>
- A Surawijaya, H. Mizuta and S. Oda: "Observation and Analysis of Tunneling Properties of a Single Spherical Nanocrystalline Silicon Quantum Dot," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 87, No. 4B, (2006) pp. 3638-3641 DOI: 10.1143/JJAP.45.3638.
- 19. A. Tanaka, Y. Tsuchiya, K. Usami, H. Mizuta and S. Oda: "High-Density Assembly of Nanocrystalline Silicon Quantum Dots," Current Appl. Phys., Vol.6, No.3, (2006) pp.344-347 DOI:10.1016/J.CAP.2005.11.015.
- 20. M. Khalafalla, H. Mizuta, Z. A.K. Durrani, H. Ahmed and S. Oda:

"Observation of Interdot Coupling Phenomena in Nanocrystalline Silicon Point-Contact Structures," Current Appl. Phys., Vol.6, No.3, (2006) pp. 536-540 DOI:10.1016/J.CAP.2005.11.055.

- 21. M. A. Rafiq, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, S. Oda, S. Uno, Z. A. K. Durrani and W. I. Milne: "Hopping conduction in size-controlled Si nanocrystals," J. Appl. Phys., Vol. 100, (2006) 014303 (4 pages) DOI:10.1063/1.2209808.
- O 22. Y. Tsuchiya, K. Takai, N. Momo, T. Nagami, S. Yamaguchi, T. Shimada, H. Mizuta and S. Oda: "Nano-electro-mechanical nonvolatile memory device incorporating nanocrystalline Si dots," J. Appl. Phys., Vol. 100, (2006) 094306 (6 pages) DOI:10.1063/1.2360143.
  - 23. M. A. H. Khalafalla, H. Mizuta, and Z. A. K. Durrani, 'Identifying single-electron charging islands in a two-dimensional network of nanocrystalline silicon grains using Coulomb oscillation fingerprints', Phys. Rev. B 74, 35316 (2006) DOI: 10.1103/PhysRevB.74.035316.
  - 24. B. Gelloz, T. Shibata and N. Koshida, Stable electroluminescence of nanocrystalline silicon device activated by high pressure water vapor annealing, Appl. Phys. Lett. 89, 191103-05 (2006) DOI:10.1063/1.2385206 (*3 PAGES*).
  - 25. N. Negishi, R. Tanaka, T. Nakada, K. Sakemura, Y. Okuda, H. Satoh, A. Watanabe, T. Yoshikawa, K. Ogasawara, M. Nanba, S. Okazaki, K. Tanioka, N. Egami, and N. Koshida, Fabrication of active-matrix high-efficiency electron emission device and its application to high-sensitivity image sensing, J. Vac. Sci. Technol. B 24, 1021-1025 (2006) DOI:10.1116/1.2165667 (5 PAGES).
  - 26. B. Gelloz and N. Koshida, Highly enhanced photoluminescence of as-anodized and electrochemically oxidized nanocrystalline p-type porous silicon treated by high-pressure water vapor annealing, Thin Solid Films 508, 406-409 (2006) <u>DOI:10.1016/J.TSF.2005.07.350</u>.
  - 27. B. Gelloz and N. Koshida, Highly Enhanced Efficiency and Stability of Photoand Electro- Luminescence of Nano-Crystalline Porous Silicon by High-Pressure Water Vapor Annealing, Jpn. J. Appl. Phys. 45, 3462-3465 (2006) DOI: 10.1143/JJAP.45.3462.
  - 28. Y. Kawata, M. Khalafalla, K. Usami, Y. Tsuchiya, H. Mizuta and S. Oda, "Integration of Tunnel-Coupled Double Nanocrystalline Silicon Quantum Dots with a Multiple-Gate Single-Electron Transistor", Jpn. J. Appl. Phys. 46, 4386-4389, (2007) DOI: 10.1143/JJAP.46.4386.
  - S. Oda, S. Y. Huang, M. A. Salem, D. Hippo, and H. Mizuta, "Charge Storage and Electron/Light Emission Properties of Silicon Nanocrystals," Physica E 38, April,59-63, (2007) DOI:10.1016/J.PHYSE.2006.12.049.
  - 30. D. Hippo, K. Urakawa, Y. Kawata, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, N. Koshida, and S. Oda: "New Design Concept and Fabrication Process for Three-Dimensional Silicon Photonic Crystal Structures," Jpn. J. Appl. Phys. 46, 633-637, (2007) DOI: 10.1143/JJAP.46.633.
  - B. Pruvost, H. Mizuta, and S. Oda: "3-D Design and Analysis of Functional NEMS-gate MOSFETs and SETs" IEEE Trans. on Nanotechnology 6, 218-224, (2007) DOI:<u>10.1109/TNANO.2007.891825</u>.
  - 32. T. Nagami, H. Mizuta, N. Momo, Y. Tsuchiya, S. Saito, T. Arai, T. Shimada, and S. Oda: "Three-dimensional numerical analysis of switching properties of high-speed and non-volatile nanoelectromechanical memory," IEEE Trans. on Electron Devices ED-54, No.5, 1132-1139, (2007) DOI: 10.1109/TED.2007.893811.
  - 33. M.A. Rafiq, H. Mizuta, Shigeyasu Uno, and Z.A.K. Durrani, 'Fabrication of vertical nanopillar devices', Microelectronics Eng. 84, 1515 – 1518 (2007). <u>DOI:10.1016/J.MEE.2007.01.274</u>
  - 34. A. Colli, A. Fasoli, P. Beecher, P. Servati, S. Pisana, Y. Fu, A. J. Flewitt, W. I.

Milne, J. Robertson, C. Ducati, S. De Franceschi, S. Hofmann and A. C. Ferrari, "Thermal and chemical vapor deposition of Si nanowires: Shape control, dispersion, and electrical properties", J. Appl. Phys. 102, 34302 (2007) DOI:10.1063/1.2764050 (*13 PAGES*).

- 35. Z.A.K. Durrani and H. Ahmed, Nanosilicon single-electron transistors and memory, in "Nanosilicon", Ed. V. Kumar, Elsevier Press (2007).
- 36. 難波正和他, 1インチ256×192画素アクティブ駆動型HEED冷陰極HARP撮像板、 映像情報メディア学会誌 61, 387-392 (2007) DOI:10.3169/ITEJ.61.387.
- B. Gelloz, T. Shibata, R. Mentek, and N. Koshida, Pronounced Photonic Effects of High-Pressure Water Vapor Annealing on Nanocrystalline Porous Silicon, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 958, L08.02-07 (2007).
- B. Gelloz, Y. Coffinier, B. Salhi, N. Koshida, G. Patriarche, and R. Boukherroub, Synthesis and Optical Properties of Silicon Oxide Nanowires, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 958, L05-10-15 (2007).
- B. Gelloz and N. Koshida, Highly Efficient and Stable Photoluminescence of Nanocrystalline Porous Silicon by Combination of Chemical Modification and Oxidation under High Pressure, Jpn. J. Appl. Phys. 46, 3462-3465 (2007) DOI: 10.1143/JJAP.46.2429.
- 40. B. Gelloz, T. Shibata and N. Koshida, Stabilization of nano-crystalline porous silicon electroluminescence by high pressure water vapor annealing, physica status solidi (a), Vol. 204, 2141-2144 (2007) DOI: 10.1002/pssc.200674406.
- 41. A. Chouket, H. Elhouichet, M. Oueslati, H. Koyama, B. Gelloz, and N. Koshida, Energy transfer in porous-silico/laser-dye composite evidenced by polarization memory of photoluminescence, Appl. Phys. Lett. 91, 211902(3 pages) (2007)DOI:10.1063/1.2814051
- 42. B. Salhi, B. Gelloz, N. Koshida and R. Boukherroub, Synthesis and photoluminescence properties of silicon nanowires treated by high-pressure water vapor annealing, physica status solidi (a), Vol. 204, 1302-1306 (2007) DOI: 10.1002/pssa.200674321.
- 43. T. Ohta, A. Kojima, and N. Koshida1, Emission characteristics of nanocrystalline porous silicon ballistic cold cathode in atmospheric ambience, J. Vac. Sci. Technol. B 25, 524-527 (2007) DOI:10.1116/1.2433949 (4 PAGES).
- 44. N. Koshida, T. Ohta, and B. Gelloz, Operation of nanosilicon ballistic electron emitter in liquid water and hydrogen generation effect, Appl. Phys. Lett. 90, 163505-07 (2007) DOI:10.1063/1.2724890 (3 PAGES).
- 45. N. Negishi, Y. Matsuba, R. Tanaka, T. Nakada, K. Sakemura, Y. Okuda, A. Watanabe, T. Yoshikawa, K. Ogasawara, M. Nanba, S. Okazaki, K. Tanioka, N. Egami, and N. Koshida, Devlopment of a high-resolution active-matrix electron emitter array for application to high-sensitivity image sensing, J. Vac. Sci. Technol. B 25, 661-666 (2007) DOI:10.1116/1.2709896 (5 PAGES).
- 46. K. Nakazato, M. Ohura, and S. Uno, Source-drain follower for monolithically integrated sensor array, Electron. Lett., vol.43, no.23, pp.1255-1257, Nov. 2007)DOI: <u>10.1049/el:20071905</u>
- 47. H. Mizuta and S. Oda, Bottom-up approach to silicon nanoelectronics (Invited paper), Microelectronics Journal 39, 171-176, (2008) DOI : 10.4267/2042/6290.
- Y. Zheng, H. Mizuta and S. Oda, "Theoretical study of nonequilibrium electron transport and charge distribution in a three-site quantum wire", Jpn. J. Appl. Phys. 47, 371-382 (2008) DOI: 10.1143/JJAP.47.371.
- 49. Y. Zheng, H. Mizuta and S. Oda, "Nonequilibrium transport properties for a three-site quantum wire model", Phys. Stat. Sol. (C) 5, pp.56-60, (2008) DOI: 10.1002/pssc.200776562.
- 50. M.A. Rafiq, H. Mizuta, S. Uno, and Z. A. K. Durrani: "Fabrication of vertical nanopillar devices," Microelectronics Eng. 84, 1515-1518, (2008) <u>DOI:10.1016/J.MEE.2007.01.274</u>.

- 51. M.A. Rafiq, Z. A. K. Durrani, H. Mizuta, A. Colli, P. Servati, A. C. Ferrari, W. I. Milne and S. Oda, "Room temperature single electron charging in single silicon nanochains", J. Appl. Phys. 103, 053705 (2008) DOI: 10.1063/1.2887988
  - 52. M. A. Rafiq, Z. A. K. Durrani, H. Mizuta, A. Colli, P. Servati, A. C. Ferrari, W. I. Milne, and S. Oda, Field-dependant hopping conduction in silicon nanocrystal films, Journal of Applied Physics, 104, 123710 (3 pages) (2008) DOI:10.1063/1.3050332
  - 53. M. Manoharan, B. Pruvost, H. Mizuta and S. Oda, "Impact of key circuit parameters on signal-to-noise ratio characteristics for the radio-frequency single electron transistors", IEEE Trans. Nanotechnology 7, 266-272 (2008) DOI:10.1109/TNANO.2007.915020
  - 54. M. Manoharan, Y. Kawata, Y. Tsuchiya, S. Oda and H. Mizuta, "Strongly-coupled multiple-dot characteristics in dual recess structured silicon channel", J. Appl. Phys. 103, 043719 (2008) DOI: <u>10.1063/1.2885343</u>
  - 55. M. Manoharan, Y. Tsuchiya, S. Oda and H. Mizuta, "Stochastic Coulomb blockade in coupled asymmetric silicon dots formed by pattern-dependent oxidation", Appl. Phys. Lett. 92, 092110 (2008) (This paper was selected for March 17, 2008 issue of Virtual Journal of Nanoscale Science and Technology) DOI:10.1063/1.2891063
  - 56. M. Manoharan, S. Oda and H. Mizuta, "Impact of channel constrictions on the formation of multiple tunnel junctions in heavily-doped silicon single electron transistors", Appl. Phys. Lett. 93, 112107 (2008) DOI:<u>10.1063/1.2980028</u>
  - 57. M. Manoharan, Y. Tsuchiya, S. Oda and H. Mizuta, "SOI-based radio-frequency single-electron transistors operating at temperatures above 4.2 K", Nano Lett. 8, 4648-4652 (2008) DOI: 10.1021/nl801992j
  - 58. J. Ogi, Y. Tsuchiya, S. Oda and H. Mizuta, "Single-electron tunnelling via quantum dot cavities built on a silicon suspension nanobridge", Microelectronics Eng. 85, 1410-1412, (2008) DOI:10.1016/J.MEE.2008.01.068.
- 59. A. Tanaka, Y. Tsuchiya, K. Usami, S. Saito, T. Arai, H. Mizuta and S. Oda, "Synthesis of assembled nanocrystalline Si dots film through the Langmuir-Blodgett technique", Jpn. J. Appl. Phys. 47, 3731-3734 (2008) DOI: 10.1143/JJAP.47.3731
  - G. Yamahata, Y. Tsuchiya, S. Oda, Z.A.K. Durrani and H. Mizuta, "Control of electrostatic coupling observed for silicon double quantum dot structures", Jpn. J. Appl. Phys. 47, 4820-4826 (2008) DOI: 10.1143/JJAP.47.4820
  - 61. Y. Kawata, T. Yamaguchi, K. Ishibashi, Y. Tsuchiya, S. Oda and H. Mizuta, "Observation of quantum level spectrum for silicon double single-electron transistors", Appl. Phys. Exp. 1, 051401 (3 pages) (2008) DOI: 10.1143/APEX.1.051401
  - 62. Y. Kawata, Y. Tsuchiya, S. Oda and H. Mizuta, "Study of single-charge polarization on a pair of charge qubits integrated onto silicon double single-electron transistor readout", IEEE Trans. Nanotechnology 7, (2008) DOI: 10.1109/TNANO.2008.2004408
  - 63. H.J. Cheong, A. Tanaka, D. Hippo, K. Usami, Y. Tsuchiya, H. Mizuta and S. Oda, "Visible Electroluminescence from Spherical-shaped Silicon Nanocrystals", Jpn. J. Appl. Phys. 47, 8137-8140 (2008) DOI: 10.1143/JJAP.47.8137
  - 64. D. Hippo, K. Urakawa, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, N. Koshida, and S. Oda, "Formation Mechanism of 100 nm-Scale Periodic-Structures in Silicon Using Magnetic-Field-Assisted Anodization", Jpn. J. Appl. Phys. 47, 7398 – 7402 (2008) DOI: 10.1143/JJAP.47.7398
  - 65. C. B. Li, K. Usami, T. Muraki, H. Mizuta and S. Oda, "The impacts of surface conditions on the vapor-liquid-solid growth of germanium nanowires on Si (100) substrate", Appl. Phys. Lett. 93, 041917 (2008) DOI:10.1063/1.2968201 (3)

PAGES)

- 66. B. Pruvost, H. Mizuta, and S. Oda: "Voltage-limitation-free analytical single-electron transistor model incorporating the effects of spin-degenerate energy states" J. Appl. Phys. 103, 054508 (10 pages), 2008 DOI:10.1063/1.2838491.
- 67. Saeed Akhtar, K. Usami, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, and S. Oda, Vapor-Liquid-Solid Growth of Small- and Uniform-Diameter Silicon Nanowires at Low Temperature from Si2H6, Applied Physics Express, 1 (1),014003 (3 pages) (2008) DOI: 10.1143/APEX.1.014003
- Saeed Akhtar, K. Usami, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, and S. Oda, Size-Dependent Structural Characterization of Silicon Nanowires, Japanese Journal of Applied Physics, 47 (6), 5053-5056 (2008) DOI: 10.1143/JJAP.47.5053
- 69. Saeed Akhtar, A Tanaka, K. Usami, Y. Tsuchiya and S. Oda, Influence of the Crystal Orientation of Substrate on Low Temperature Synthesis of Silicon Nanowires from Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, Thin Solid Films, 517 (1), 317-319 (2008) <u>DOI:10.1016/J.TSF.2008.08.155</u>
- 70. X. Zhou, K. Usami, M. A. Rafiq, H. Mizuta, Y. Tsuchiya, and S. Oda, Influence of nanocrystal size on conduction mechanism across silicon nanocrystals, Journal of Applied Physics, 104, 024518 (4 pages) (2008) DOI: 10.1063/1.2952036
- 71. A Kojima, H. Ohyi, N. Koshida, Sub-30 nm Parallel EB Lithography using Nano-Si Planar Ballistic Electron Emitter, J. Vac. Sci. Technol. B 26(6), 2053-2057 (2008) DOI: 10.1117/12.812933.
- 72. D. Sakai, C. Oshima, T. Ohta, and N. Koshida, Specific spectral features in electron emission from nanocrystalline poly-silicon quasi-ballistic cold cathode detected by an angle-resolved high resolution analyzer, J. Vac. Sci. Technol. B 26 (5), 1782-1786 (2008) DOI:10.1116/1.2975203.
- 73. N. Negishi, T. Sato, Y. Matsuba, R. Tanaka, T. Nakada, K. Sakemura, Y. Okuda, A. Watanabe, T. Yoshikawa, and K. Ogasawara, M. Nanba, S. Okazaki, K. Tanioka, and N. Egami, and N. Koshida, Development of a super-high sensitive image sensor using 640×480 pixel active-matrix high-efficency electrion emission device, J. Vac. Sci. Technol. B 26, 711-715 (2008) DOI:10.1116/1.2894896.
- 74. B. Gelloz, H. Koyama and N. Koshida, Polarization Memory of Blue and Red Luminescence from Nanocrystalline Porous Silicon Treated by High-Pressure Water Vapor Annealing, Thin Solid Films 517, 376–379 (2008) <u>DOI:10.1016/J.TSF.2008.08.092</u>.
- 75. M. Ghulinyan, B. Gelloz, T. Ohta, L. Pavesi, D.J. Lockwood, and N. Koshida, Stabilized porous silicon optical superlattices with controlled surface passivation, Appl. Phys. Lett. 93, 061113-115 (2008) DOI:10.1063/1.2969294 (3 PAGES).
- 76. T. Ohta, B. Gelloz, and N Koshida, Characteristics of nanosilicon ballistic cold cathode in liquids as an active electrode, J. Vac. Sci. Technol. B 26, 716-719 (2008) DOI:<u>10.1109/IVNC.2007.4480938</u>.
- 77. B. Gelloz, M. Sato and N, Koshida, Cavity Effect in Nanocrystalline Porous Silicon Ballistic Lighting Device, Jpn. J. Appl. Phys. 47, 2902-2905 (2008) DOI: 10.1143/JJAP.47.2902.
- 78. Y. Hirano, S. Yamazaki, and N,i Koshida, Improved Photoconduction Effects of Nanometer-Sized Si Dot Multilayers, Jpn. J. Appl. Phys. 47, 3095-3098 (2008) DOI: 10.1143/JJAP.47.3095.
- 79. K. Nakazato, M. Ohura, and S. Uno, "CMOS cascode source-drain follower for monolithically integrated biosensor array", IEICE Trans. Electron., E91-C, No.9, 1505-1515, 2008
- 80. B. Pruvost, K. Uchida, H. Mizuta, and S. Oda, "Design optimization of NEMS

switches for suspended-gate single-electron transistor applications", IEEE Trans. Nanotechnology 8, 174-184 (2009), DOI:10.1109/TNANO.2008.2010453.

- 81. C. Li, K. Usami, G. Yamahata, Y. Tsuchiya, H. Mizuta and S. Oda, "Position-Controllable Ge Nanowires Growth on Patterned Au Catalyst Substrate" *Applied Physics Express* 2, 015004 (2009), DOI: 10.1143/APEX.2.015004.
- 82. D. Hippo, K. Urakawa, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, N. Koshida and S. Oda, "Spontaneous emission control of silicon nanocrystals by silicon three-dimensional photonic crystal structure fabricated by self-aligned two-directional electrochemical etching method", *Materials Chemistry and Physics* 116, 107-111 (2009) DOI:10.1016/J.MATCHEMPHYS.2009.02.051
- 83. T. Nagami, Y. Tsuchiya, S. Saito, T. Arai, T. Shimada, H. Mizuta and S. Oda, "Electro-Mechanical Simulation of Switching Characteristics for Nanoelectromechanical Memory", Jpn. J. Appl. Phys., 48, 114502 (5 pages) (2009) DOI:10.1143/JJAP.48.114502
- 84. G. Yamahata, T. Kodera, H. Mizuta, K. Uchida and S. Oda, "Control of Inter-dot Electrostatic Coupling in an Asymmetric Silicon Double Quantum Dot Operating at 4.5 K", Appl. Phys. Express 2, 095002 (2009) DOI: 10.1143/APEX.2.095002
- 85. C. Li, K. Usami, H. Mizuta and S. Oda, "Vapor-solid-solid radial growth of Ge nanowires" J. Appl. Phys. 106, 046102 (2009) DOI : 10.1063/1.3204471
- 86. G. Yamahata, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, K. Uchida and S. Oda, "Electron transport through silicon serial triple quantum dots", Solid State Electron, 53, 779-785 (2009) DOI:10.1016/j.sse.2009.03.009
- 87. X. Zhou, K. Uchida, H. Mizuta, and S. Oda, Carrier transport by field enhanced thermal detrapping in Si nanocrystals thin films, Journal of Applied Physics, 105, 124518 (5 pages) (2009) DOI:10.1063/1.3151688(5 pages)
- 88. X. Zhou, K. Uchida, H. Mizuta, and S. Oda, Electron transport in surface oxidized Si nanocrystal ensembles with thin film transistor structure, Journal of Applied Physics, 106, 044511 (6 pages) (2009) DOI:10.1063/1.3204669 (6 pages)
- B. Gelloz and N. Koshida, Long-lived blue phosphorescence of oxidized and annealed nanocrystalline silicon, Appl. Phys. Lett. 94, 201903-05 (2009) DOI: <u>10.1063/1.3140570</u>.
- B. Gelloz, R. Mentek and N. Koshida, Specific Blue Light Emission from Nanocrystalline Porous Si Treated by High Pressure Water Vapor Annealing, Jpn. J. Appl. Phys. 48, 04C119-1-5 (2009).
- 91. A. Chouket, B. Gelloz, H. Koyama, H. Elhouichet1, M. Oueslati1, N. Koshida, Effect of high-pressure water-vapor annealing on energy transfer in dye-impregnated porous silicon, J. Luminescence, 129, 1332–1335 (2009) DOI: <u>10.1016/j.jlumin.2009.06.021</u>.
- 92. A. Chouket, H. Elhouichet, H. Koyama, B. Gelloz, M. Oueslati, N. Koshida, Multiple Energy Transfer in Porous Silicon-Rh6G-RhB Nanocomposite Evidenced by Photoluminescence and its Polarization Memory, Thin Solid Films 518, S212–S216 (2009) DOI:10.1016/J.TSF.2009.10.091.
- 93. Y. Hirano, K. Okamoto, S. Yamazaki, and N. Koshida, Avalanche multiplication of photo-carriers in nanometer-sized silicon dot layers, Appl. Phys. Lett. 95, 063109-11 (2009) DOI: 10.1063/1.3205119
- 94. T. Nakada, T. Sato, Y. Matsuba, R. Tanaka, K. Sakemura, N. Negishi, Y. Okuda, A. Watanabe, T. Yoshikawa, K. Ogasawara, M. Nanba, K. Tanioka, N. Egami, and N. Koshida, Enhanced output current density of an active-matrix high-efficiency electron emission device (HEED) array with 13.75 μm pixels, J. Vac. Sci. Technol. B 27, 735-739 (2009) DOI: 10.1116/1.3079653.

- 95. T. Ichihara, T. Hatai, and N. Koshida, Vacuum-ultraviolet light emission from xenon directly excited by ballistic output electrons of nanocrystalline silicon planar cathode, J. Vac. Sci. Technol. B 27, 772-774 (2009) DOI: 10.1116/1.3070655.
- 96. A. Colli, A. Tahraoui, A. Fasoli, J.M.Kivioja, W.I.Milne and A.C. Ferrari, Top-Gated Silicon Nanowire Transistors in a Single Fabrication Step, ACS NANO Volume: 3 Issue: 6 Pages: 1587-1593, (2009) DOI: 10.1021/nn900284b
- 97. Z. A. K. Durrani, M. A. Rafiq, Electronic transport in silicon nanocrystals and nanochains, Microelectronic Engineering, 86, 456 – 466 (2009) DOI:<u>10.1016/j.mee.2009.03.123</u>.
- 98. Y. Suwa and S. Saito, Intrinsic optical gain of ultrathin silicon quantum wells from first-principles calculations, Phys. Rev. B 79, 233308 (2009) DOI: 10.1103/PhysRevB.79.233308.
- 99. S. Saito, Y. Suwa, H. Arimoto, N. Sakuma, D. Hisamoto, H. Uchiyama, J. Yamamoto, T. Sakamizu, T. Mine, S. Kimura, T. Sugawara, and M. Aoki, Stimulated Emission of Near-Infrared Radiation by Current Injection into Silicon (100) Quantum Well, Appl. Phys. Lett. 95, 241101 (2009) DOI: 10.1063/1.3273367 (3 pages).
- 100. K. Nakazato, "Integrated ISFET Sensor Array", Sensors, 9, 8831-8851, 2009 DOI: 10.3390/s91108831
- 101. N. Terasaki, N. Yamamoto, M. Hattori, N. Tanigaki, T. Hiraga, M. Konno, M. Iwai, Y. Inoue, S. Uno, and K. Nakazato, "Photo-sensor based on an FET utilizing a bio-component of photosystem I for use in imaging devices", Langmuir, 25 (19), 11969-11974, (2009) DOI: 10.1021/la901091e
- 102. B. Pruvost, K. Uchida, H. Mizuta, and S. Oda, "Design of New Logic Architectures Utilizing Suspended-gate Single-Electron Transistors", IEEE Trans. Nanotechnology, 504-512(2010) DOI: 10.1109/TNANO.2009.2030502
- 103. J. Ogi, M. A. Ghiass, T. Kodera, Y. Tsuchiya, K. Uchida, S. Oda, and H. Mizuta, Suspended quantum dot fabrication on a heavily-doped silicon nanowire by suppressing unintentional quantum dot formation, Japanese Journal of Applied Physics, 49, 44001-44005(2010) DOI: 10.1143/JJAP.49.044001
  - 104. J. Ogi, T. Ferrus, T. Kodera, Y. Tsuchiya, K. Uchida, S. Oda, and H. Mizuta, Experimental observation of enhanced electron-phonon interaction in suspended Si double quantum dots, Japanese Journal of Applied Physics, 49,45203-45207(2010) DOI: 10.1143/JJAP.49.045203
- 105. T. Nagami, Y. Tsuchiya, K. Uchida, H. Mizuta, and S. Oda, Scaling Analysis of Nanoelectromechanical Memory Devices, Japanese Journal of Applied Physics, 49, 44304-44308(2010) DOI: 10.1143/JJAP.49.044304
  - 106. M. A. G.-Ramirez, Y. Tsuchiya and H. Mizuta, "Hybrid circuit analysis of a suspended-gate silicon nanodot memory (SGSNM) cell", Microelectronics Engineering ,1284-1286(2010) DOI:<u>10.1016/j.mee.2009.10.019</u>
  - 107. H. Mizuta, M.A.G-. Ramirez, Y. Tsuchiya, T. Nagami, S. Sawai, S. Oda and M. Okamoto, "Multi-scale Simulation of Hybrid Silicon Nanoelectromechanical (NEM) Information Systems", in press for Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems 3, 58 61 (2010)
  - 108. B. Gelloz and N. Koshida, Stabilization and operation of porous silicon photonic structures from near-ultraviolet to near-infrared using high-pressure water vapor annealing, Thin Solid Films, 3276-3279 (2010) DOI:10.1016/J.TSF.2009.08.043.
  - 109. N. Mori, H. Minari, S. Uno, H. Mizuta and N. Koshida, "Quasi-ballistic Electron Transport through Silicon Nanocrystals" J.Phys.:Conf.Series,193012008(2010) DOI:10.1088/1742-6596/193/1/012008

- 110. Junichi Hattori, Shigeyasu Uno, Nobuya Mori, and Kazuo Nakazato, "Universality in Electron-modulated-acoustic-phonon Interactions in a Free-standing Semiconductor Nanowire", Mathematical and Computer Modeling, 51, 880-887 (2010) DOI:10.1016/J.MCM.2009.08.022
- 111. Junichi Hattori, Shigeyasu Uno, Nobuya Mori and Kazuo Nakazato "Scaling Consideration and Compact Model of Electron Scattering Enhancement due to Acoustic Phonon Modulation in an Ultrafine Free-Standing Cylindrical Semiconductor Nanowire" J. Appl. Phys. 107,033712 (2010) DOI:10.1063/1.3280007
- 112. Junichi Hattori, Shigeyasu Uno, Nobuya Mori and Kazuo Nakazato "Electron-Modulated-Acoustic-Phonon Interactions in a Coated Silicon Nanowire" Jpn. J. Appl. Phys. to be published (2010) DOI: 10.1143/JJAP.49.04DN09
- 113. H. Matsumoto, J. Tsukada, H. Ozawa, S. Uno, K. Nakazato, N. Terasaki, N. Yamamoto, T. Hiraga, M. Iwai, M. Konno, K. Ito, and Y. Inoue, "Integrated Bio-Imaging Sensor Array with Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Cascode Source-Drain Follower", Jpn. J. Appl. Phys. 04DL01-04DL01-6(2010) DOI: 10.1143/JJAP.49.04DL01
- 114. J. Tsukada, H. Ozawa, S. Uno, K. Nakazato, N. Terasaki, N. Yamamoto, T. Hiraga, M. Iwai, M. Konno, K. Ito, and Y. Inoue, "Photosystem I Bio-Photosensor Integrated with Complementary Meta-Oxide-Semiconductor Source-Drain Follower on a Chip", Jpn. J. Appl. Phys., 49, 01AG04-01AG04-6(2010) DOI: 10.1143/JJAP.49.01AG04

(2)口頭発表

①招待講演

国内 19 件, 海外 66 件

- S. Oda, Nanocrystalline Silicon Quantum Dot Devices, International Symposium on Molecular Nano-Engineering and Its Development into Microsystems, Tokyo, (December 2004).
- 2. S. Oda, Nanocrystalline Silicon Quantum Dot Devices, 6th Workshop and IEEE EDS Mini-colloquia on NAnometer CMOS Technology, Hsinchu, Taiwan, (January, 2005).
- 3. 小田、水田、"シリコン量子ドットデバイス"応用物理学会応用電子物性分科会 研究例会 (2005年5月)
- 4. Z. A. K. Durrani, 'Single-electron devices in silicon', 2005 Silicon Nanoelectronics Workshop, Kyoto, Japan, 12-13 June (2005), invited
- 5. N. Koshida, Photon, electron, and sound emitting devices based on nanosilicon (Invited), Int. Silicon Nanoelectronics Conf., Kyoto, Japan, (June 2005).
- 6. S. Oda, "Formation, Characterization and Applications of NaNo.crystalline Silicon Quantum Dots Prepared by VHF Plasma Processes," (Invited) 4th International Conference on the Physics of Dusty Plasmas, Orleans (FRANCE), (June 2005).
- 7. N. Koshida, Luminescent Properties of Quantum-Sized Nanocrystalline Silicon (Invited), Electronic Materials Symp., Matsuyama, Japan, (July 2005).
- H. Mizuta, "Physics and applications of silicon nanoelectromechanical information devices (Invited Talk)", FIS Conference on Future Integrated Systems, Cambridge, (August 2005).
- A. Tanaka, G.Yamahata, Y.Tsuchiya, K.Usami, H.Mizuta and S.Oda, "Formation of nanocrystalline silicon quantum dot arrays (Invited Talk)", 12<sup>th</sup> International Conference on Composite / Nano Engineering, Tenerife, (August 2005).
- 10. S. Oda: "NeoSilicon: Nanometer scale control of materials in device application," (Invited) Conference on Future Integrated Systems, Cambridge (UK), (Aug. 2005)
- S. Oda, S-Y. Huang, M. A. Salem and H. Mizuta, "Charge storage in silicon nanocrystals and device application", (Invited Talk), 1<sup>st</sup> International Workshop on Semiconductor Nanocrystals, Budapest, (September 2005)
- 12. Z. A. K. Durrani, 'Single-electron transistors, memory and logic in silicon', 2<sup>nd</sup> Open

Workshop on the Fusion of Bio-, Nano- and Semiconductor-technologies, Osaka, Japan, 6-7 October (2005), invited

- S. Oda: "Nanocrystalline Silicon Quantum Dot Devices," (Invited) 9th Workshop and IEEE EDS Mini-colloquia on Nanometer CMOS Technology, Yokohama (JAPAN), 5.3, (Oct. 2005) pp. 126-138.
- 14. S. Oda: "Nanocrystalline Silicon Quantum Dot Devices," (Invited) AUN/SEED-Net Field Wise Seminar, Hanoi (Vietnam), Keynote Presentation, (Nov. 2005) Keynote Presentation.
- 15. S. Oda: "Nanocrystalline Silicon Quantum Dot Devices," (Invited) International Conference on MEMS and Semiconductor Nanotechnology, Kharagpur (INDIA), Keynote Address, (Dec. 2005) Keynote Address.
- 16. H. Mizuta and S. Oda, "Bottom-up approach to silicon nanoelectronics (Invited Talk)", European Nano Systems 2005, Paris, (December 2005).
- 17. S. Oda, H. Mizuta: "Nanocrystalline Silicon Quantum Dot Devices," [Invited] Electrochemical Society, Denver (USA), (May 2006).
- S. Oda, H. Mizuta: "Charge Storage and Electron/Light Emission Properties of Silicon Nanocrystals," E-MRS Spring Meeting, Nice (France), (May 2006).
- S. Oda: "Preparation, characterization and application of nanocrystalline silicon quantum dot devices," [Invited] Rencontres du Vietnam 2006: Nanophysics: from fundamentals to applications, Hanoi (Vietnam), (Aug. 2006).
- 20. N. Koshida, Functions and Device Applications of Quantum-sized Silicon (Invited), Int. Conf. on Solid State Devices and Materials, Yokohama, (2006), pp. 182-183.
- N. Koshida, Luminescence and Related Functions of Nanocrystalline Porous Silicon (Invited), International Conference on Optical and Optoelectronic Properties of Materials and Applications, Darwin, (2006).
- N. Koshida, Functional Properties of Nanosilicon and its Possible Application to Image Devices (Invited), the 13th International Display Workshops, Ohtsu, (2006), pp.1739-1742.
- 23. S. Oda, Y. Tsuchiya and H. Mizuta: NeoSilicon: Novel functional materials with controlled interaction between quantum dots," [Invited] International Topical Workshop "Tera- and Nano-Devices: Physics and Modeling," Aizu (Japan), (Oct. 2006).
- S. Oda, S. Y. Huang, M. A. Salem, D. Hippo, A. Tanaka, Y. Tsuchiya and H. Mizuta: "Nanocrystalline Silicon Quantum Dot Devices," [Invited] 8th International Conference on Solid-State and Integrated-Circuit Technology, Shanghai (China), (Oct. 2006).
- 25. 小田俊理:「ネオSiによる新デバイス」、ワークショップ「オン・シリコンテク ノロジーの新展開 — Si上の新しい世界」、仙台、(2006年10月).
- 26. S. Oda: "Preparation and Applications of Nanocrystalline Silicon Devices," [Invited] IEEE TENCON 2006, (Hong Kong), (Nov. 2006).
- H. Mizuta, Y. Tsuchiya and S. Oda: "Top-down and bottom-up approaches towards silicon nanoelectronics," [Invited] Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices (COMMAD '06), Perth (Australia), (Dec. 2006).
- H. Mizuta and S. Oda, "Physics and applications of Si-based nanoelectromechanical information devices (Plenary Talk)", 3<sup>rd</sup> International Conference on Advanced Materials and Nanotechnology (AMN-3)", p. 334, Wellington, (February 2007).
- 29. S. Oda, Y. Tsuchiya and H. Mizuta: "Nano electromechanical system memory devices," Viennano '07, Vienna (Austria),(Mar.2007).
- 30. 宇野重康、服部淳一、中里和郎、(招待)自立シリコン量子細線における電子フ オノン相互作用、応用物理学会関西支部講演、大阪大学、平成19年3月9日,(2007)
- 31. 小田俊理、シリコンナノクリスタルデバイス、ナノ学会第5回大会、つくば市(May 2007) invited
- 32. S. Oda, State of the Art and the Future of Nanoelectronics, International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI2007), Bandung (June 2007) invited
- S. Oda, Novel photonic and electron devices based on silicon nanocrystals, International Workshop on SEMIconductor NANOstructures 2007, Bad Honnef (June 2007), invited
- 34. N. Koshida and B. Gelloz, Photonic, electronic, and acoustic devices based on

nanocrystalline silicon, Int. Conf. on Optical, Optoelectronic and Photonic Mater. and Applications, London, (July 2007) invited

- 35. H. Mizuta, Y. Tsuchiya and S. Oda, "Functional silicon nanoelectromechanical information processing devices (Invited Talk)", Frontier Process Workshop 2007, pp. 65-86, Tsukuba, (August 2007).
- Oda, NeoSilicon Devices, 22nd International Conference on Amorphous and Nanocrystalline Semiconductors (ICANS 22), Breckenridge (2007.8) invited
- 37. 小田俊理、シリコン量子ドットの作製とデバイス応用、電気化学秋季大会、東京 (September 2007) invited
- N. Koshida and B. Gelloz, Photonic and related device applications of nano-crystalline silicon, SPIE Optics East, Proc. SPIE Vol. 6775, Active and passive Optical Components for Communications VII, Boston, (September 2007) invited
- H. Mizuta, Y. Tsuchiya and S. Oda, "NEMS-based memory devices (Invited Talk)", International Workshop on "Emerging non volatile memories, Munich, (September 2007).
- 40. S. Oda, Nano-silicon for novel quantum dot based electronic and photonic devices, The Electrical and Electronics Engineering Fieldwise Seminar (EEE-FWS) 2007 on Advances in Systems and Information Technology, Bangkok, (December 2007) invited
- 41. S. Oda, Silicon quantum dots: the future of electronics and photonics?, Workshop-cum-Symposium on "Compact Modeling of Advance MOSFET structures and Mixed Mode Applications", Delhi(January 2008) invited
- 42. H. Mizuta, Y. Tsuchiya and S. Oda, "Hybrid silicon nanotechnologies for advanced information processing (Invited Talk)", International Conference on Nano and Microelectronics (ICONAME2008), pp. 41-45, Pondicherry, (January 2008).
- 43. S. Oda, Nano-silicon for novel quantum dot based electronic and photonic devices, WIMNACT 2008, Sikkim, (March 2008) invited
- 44. S. Oda, Silicon quantum dots: the future of electronics and photonics?, 4th Field-Wise Seminar on Nanoelectronics and Nanophotonics, Yangon (March 2008) invited
- 45. N. Koshida, Porous Silicon Technology as a Nanodevice Platform, Int. Conf. On Porous Semiconductors Science and Technology, Mallorca, (March 2008) invited
- 46. S. Oda, Silicon quantum dot devices., 26th International Conference on Microelectronics, Nis, Serbia (May 2008) invited
- 47. N. Koshida and B. Gelloz, Device applications of quantum-sized nanocrystalline silicon, Int. Conf. On Thin Films and Photonic Materials, Argier, (May 2008), invited
- 48. S. Oda, Status and Prospects of Nanoelectronics, Japan-Brazil Memorial Symposium on Science and Technology for the Celebration of 100 years of Japanese Immigration to Brazil, Sao Paulo (June 2008) invited
- 49. N. Koshida and B. Gelloz, Photonic, electronic, and acoustic device applications of nanocrystalline silicon, Int. Conf. on Optoelectronic, Photonic Materials Applications, Edmonton, (July 2008), invited
- 50. S. Oda, Silicon quantum dots: the future of electronics and photonics? Nano Korea 2008, Seoul, (August 2008), invited
- H. Mizuta, Y. Tsuchiya and S. Oda, "Hybrid silicon nanotechnologies for 'More-than-Moore' and 'Beyond-CMOS' domains (Plenary Talk)", 7<sup>th</sup> International Conference on Global Research and Education – Inter-Academia,, pp.19-28, Pecs, (September 2008).
- 52. Z. A. K. Durrani, M. A. Rafiq, Electron transport in silicon nanocrystals and nanochains, Microelectronic Engineering 2008, Athens, Greece, (September 2008), invited
- N. Koshida and B. Gelloz, Photonic, electronic, and acoustic devices based on nanocrystalline silicon, 214th Meeting of The Electrochemical Society, Honolulu, (October 2008), invited
- H-J Cheong, Y. Nakamine, D. Hippo, K. Uchida and Shunri Oda, Silicon nanocrystals light-emitters for optical interconnects, 214th Meeting of The Electrochemical Society, Honolulu, (October 2008), invited
- 55. H. Mizuta, T. Nagami, J. Ogi, B. Pruvost, M.A.G. Ramírez, H. Yoshimura, Y. Tsuchiya

and S. Oda, "Co-integration of Silicon Nanodevices and NEMS for Advanced Information Processing (Invited Talk)", 9<sup>th</sup> International Conference on Solid-State and Integrated-Circuit Technology (ICSICT2008), Beijing, (October 2008).

- 56. H. Mizuta, Y. Tsuchiya and S. Oda, "Physics and Applications of Hybrid Silicon Nanoelectromechanical Devices (Plenary Talk)", 5<sup>th</sup> International Symposium on Nanovision Science / 10<sup>th</sup> Takayanagi Kenjiro Memorial Symposium, pp. 6-10, Hamamatsu, (November 2008).
- 57. S.Oda, Electron transport and photonic properties of Si nanocrystals prepared by VHF plasma processes, 2nd International Workshop on Semiconducting Nanoparticles, Duisburg, (December 2008), invited
- 58. Zahid Durrani, 2nd International Workshop on Semiconducting Nanoparticles, Duisburg, (December 2008), invited
- 59. S.Saito, "Lateral Carrier Injection to Quantum Confined Ultra-Thin Silicon", MRS fall meeting, MM Boston (December 2008), invited
- 斎藤慎一, "極薄シリコン共振共鳴器型発光ダイオード", 第56回応用物理学関係連 合講演会, シリコンLEDの実現に向けた新しいアプローチMarch. Tsukuba, (March 2009), invited
- 61. 山端元音, 土屋良重, 水田 博, 内田 建, 小田俊理,シリコン量子ドットデバイスの制 御性向上に関する検討, 第56回応用物理学関係連合講演会, つくば市, 30a-V-1, (March 2009), invited
- 62. S. Oda, NeoSilicon Materials, Materials Research Society Spring Meeting, San Francisco (April 20089) invited
- H. Mizuta, M. A. G.-Ramirez, Y. Tsuchiya, T. Nagami and S. Oda, "NEM MOS Co-integration for Fast & Nonvolatile Memory Applications (Invited Talk)", IEEE-NANO Satellite Workshop on Emerging Non-volatile Memory, Genova, (July 2009).
- 64. 小田俊理、イントロダクトリートーク:ネオシリコン材料の構造制御と新機能、 第70回応用物理学会学術講演会、富山、10p-TA-1、(September 2009)
- 65. Zahid Durrani、Transport properties of NeoSilicon materials、第70回応用物 理学会学術講演会、富山、10p-TA-2、(September 2009)
- 66. Bill Milne、CNT vs SiNW for future electronics、第70回応用物理学会学術講 演会、富山、10p-TA-3、(September 2009)
- 67. 水田博、土屋良重、小田俊理、ナノエレクトロメカニカルデバイス、第70回応 用物理学会学術講演会、富山、10p-TA-4、(September 2009)
- 68. 中里和郎, 電子線センサ集積回路と単電子検出バイオCMOS集積回路, 第70 回応用物理学会学術講演会、富山、10p-TA-6、(September 2009)
- 69. 越田信義、ナノ結晶シリコン発光デバイス、第70回応用物理学会学術講演会、 富山、10p-TA-7、(September 2009)
- 70. 斎藤慎一,内山博幸,ネオシリコンの応用展開,第70回応用物理学会学術講演 会、富山、10p-TA-9、(September 2009).
- 尾内享裕, 今後の展望(ネオシリコンへの期待), 第70回応用物理学会学術講演 会、富山、10p-TA-11、(September 2009).
- 72. 小田俊理、内田建、シリコンナノテクノロジー:1次元、0次元、その先は?、 第70回応用物理学会学術講演会、富山、8p-TE-3、(September 2009)
- 73. H. Mizuta, M. A. G. Ramirez, F. A. Hassani, M. A. Ghiass, Y. Tsuchiya, T. Nagami, B. Pruvost, J. Ogi, S. Sawai, S. Oda and M. Okamoto, "Multi-scale Simulation of Hybrid Silicon Nano-electromechanical (NEM) Information Devices", 8<sup>th</sup> International Conference on Global Research and Education Inter-Academia, Kazimierz Dolny, (September 2009).
- H. Mizuta, "Co-integration of Silicon Nanoelectronic Devices and NEMS for 'More-than-Moore' Functional Systems", International Workshop on Future Nanosilicon Technology – Of Silicon, By Silicon, For Silicon", Tokyo, (September 2009), invited
- 75. S. Oda, Performance Projections for Nanomechanical Memory, SRC/NSF/A\*STAR

Forum on 2020 Semiconductor Memory Strategies: Processes, Devices, and Architectures, (October 2009).

- 76. S. Oda, Si quantum dots and related devices, G-COE PICE International Symposium on Silicon Nano Devices in 2030, (October 2009).
- 77. S. Oda, Silicon quantum dots devices, IEEE EDS Minicolloquim on the Past and Future of Integrated Circuits, Thiruvannamalai (November 2009).
- 78. S. Oda, Silicon quantum dots devices, IEEE EDS Minicolloquim on the Past and Future of Integrated Circuits, Port Blair (November 2009).
- 79. S. Saito, Ultra-Thin Silicon Light-Emitting Diode, Nanolaser based Optical Sensing, (Invited, U. of Tokyo, 2009).
- 80. 斎藤慎一, 極薄シリコン共振共鳴器型発光ダイオード,(社)応用物理学会・日本 光学会 微小光学研究グループ,(招待講演,日本科学未来館,2009).
- 81. 斎藤慎一, 極薄シリコン発光素子の光増幅現象, エレクトロニクス実装学会 第 39回OPT研究会(招待講演,回路会館,2009).
- 82. S. Saito, Optical Gain in Silicon Quantum Well, Innovation of the Silicon, by the Silicon, for the Silicon, (Invited, Florancion-Aoyama, 2009).
- 83. S. Oda, Silicon quantum dots devices, International workshop on Physics of Semiconductor and Devices, Delhi (November 2009).
- 84. 斎藤慎一,シリコン発光素子,グリーンフォトニクス技術特別セミナー(招待講 演,オプトロニクス、2009)
- H. Mizuta, Y. Tsuchiya and S. Oda, 'Hybrid Silicon Nanoelectromechanical Devices: Physics and Applications (Invited Talk)', to be presented at UK-Japan Workshop on Novel Phenomena and Technologies in Semiconductor Nanostructures, Tokyo, (January 2010).

2学会

国内 113 件, 海外 151 件

- A. Kiuchi, B. Gelloz, A. Kojima, and N. Koshida, Possible Operation of Periodically Layered Nanocrystalline Porous Silicon as an Acoustic Band Crystal Device, Materials Research Society Symposium on Group-IV Semiconductor Nanostructures, Boston, (November 2004), F3.7.
- B. Gelloz, A. Kojima, and N. Koshida, Improved Optoelectronic Characteristics of Nanocrystalline Porous Silicon by High-Pressure Water Vapor Annealing, Materials Research Society Symposium on Group-IV Semiconductor Nanostructures, Boston, (November 2004), F7.1.
- Y. Tsuchiya, T. Nakatsukasa, H. Mizuta, S. Oda, A. Kojima, and N. Koshida, Quasiballistic Electron Emission From Planarized Nanocrystalline-Si Cold Cathode, Materials Research Society Symposium on Group-IV Semiconductor Nanostructures, Boston, (November 2004), F8.8.
- K. Tsubaki, T. Komoda, and N. Koshida, Enhancing the Sound Pressure of Thermally Induced Ultrasonic Emitter Based on Nanocrystalline Porous Silicon, Materials Research Society Symposium on Group-IV Semiconductor Nanostructures, Boston, (November 2004), F8.9.
- M. Khalafalla, H. Mizuta, S. Oda and Z.A.K. Durrani, "Investigation of variable coupling and current percolation paths in nanocrystalline silicon cross transistors", Int. Conf. Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions, Aysugi (January 2005).
- T. Arai, S. Saito, H. Fukuda, and T. Onai, "Chemically Controlled 2D-Artificial-Lattice Composed of Metal-Nano-Partticles", AMN-2 : Second International Conference on Advanced Materials and Nanotechnology, Queenstown, New Zealand, 6-11 Feb. (2005).
- S. Saito, T. Arai, H. Fukuda, S. Kimura, and T. Onai, "Iodine Doping to Self-Organized Gold Nano-Particles", AMN-2 : Second International Conference on Advanced Materials and Nanotechnology, Queenstown, New Zealand, 6-11 Feb. 2005
- 8. A. Tanaka, Y. Tsuchiya, K. Usami, H. Mizuta and S. Oda, High-Density Assembly of Nanocrystalline Silicon Quantum Dots, Second International Conference on Advanced

Materials and Nanotechnology, Queenstown, February 2005.

- M. Khalafalla, H. Mizuta, Z. A.K. Durrani, H. Ahmed and S. Oda, Observation of Interdot Coupling Phenomena in Nanocrystalline Silicon, Second International Conference on Advanced Materials and Nanotechnology, Queenstown, February 2005.
- 10. 筆宝大平, 浦川 圭, 土屋良重, 水田 博, 越田信義, 小田俊理, I可視域3次元 シリコンフォトニック結晶の設計と作製プロセス, 第52回応用物理学関係連合講 演会, さいたま, (March 2005).
- 11. 鄭仰東(Zheng YanDong), 土屋良重, 佐藤大典, 水田 博, 小田俊理, 分光エリプ ソメトリによるHfO2薄膜成長過程のその場観察: 第一原理計算との比較, 第52回 応用物理学関係連合講演会, さいたま, (March 2005).
- 12. 藤田啓嗣, 土屋良重, 野平博司, 水田 博, 丸泉琢也, 服部健雄, 小田俊理, 角度分解X線光電子分光法によるPrシリケート/Si(100)界面近傍の深さ方向化学結合状態分析, 第52回応用物理学関係連合講演会, さいたま, (March 2005).
- Mohammed Khalafalla,水田 博, Zahid Durrani,小田俊理,ナノ結晶シリコンク ロストランジスタにおける静電相互作用の変化とパーコレーションパスの解析, 第52回応用物理学関係連合講演会,さいたま,(March 2005).
- 14. 山端元音,田中敦之,川田善之,土屋良重,斎藤真一,新井 唯,水田 博,小 田俊理,ナノ結晶Siドット分散溶液を用いたSiナノドットクラスタデバイスの作 製,第52回応用物理学関係連合講演会,さいたま,(March 2005).
- 15. 黒川康良, 東島 賢, 土屋良重, 岡本政邦, 水田 博, 小田俊理, 第一原理計算 によるシリコンナノロッドの量子輸送シミュレーション, 第52回応用物理学関係 連合講演会, さいたま, (March 2005).
- 16. Shaoyun Huang, 宇佐美浩一, 土屋良重, 水田 博, 小田俊理, Analysis of Combined Storage in Nitrided Nanocrystalline Silicon Dots, 第52回応用物理学関係連合講演会, さいたま, (March 2005).
- 17. 田中敦之, 土屋良重, 宇佐美浩一, 水田 博, 小田俊理, 分散溶媒を用いたナノ 結晶シリコンドットの2次元集積化, 第52回応用物理学関係連合講演会, さいた ま, (March 2005).
- 18. 永見 佑, 百々信幸, 土屋良重, 斎藤慎一, 新井 唯, 嶋田壽一, 水田 博, 小田俊理, 歪みを考慮したNEMSメモリデバイスの高精度スイッチング動作解析, 第52回応用物理学関係連合講演会, さいたま, (March 2005).
- 19. 池澤健太, 土屋良重, 宇佐美浩一, 水田 博, 小田俊理, SiH4/H2/Arガス混合プ ラズマによるナノ結晶シリコンの作製と評価, 第52回応用物理学関係連合講演会, さいたま, (March 2005).
- 20. R. Boukherroub, S. Billel, B. Gelloz, and N. Koshida, Porous silicon template for silicon nanowire growth, Electrochemical Society Meeting, Quebec, Canada, (May 2005).
- 21. Z. A. K. Durrani, M. A. Rafiq, A. Colli, A. Fasoli, A. C. Ferrari, J. Robertson, and W. I. Milne, 'Catalyst-free Silicon Nanowires and Nanocrystals: Growth and Electron Transport', 6<sup>th</sup> International Conference on the Science and application of Nanotubes, Göteborg, Sweden June 26 July 1, (2005)
- M. Khalafalla, H. Mizuta, S. Oda and Z. A.K. Durrani, "Variation of Electrostatic Coupling and Investigation of Current Percolation Paths in Nanocrystalline Silicon Cross Transistors", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, Kyoto, (June 2005).
- 23. S. Higashijima, Y. Kurokawa, Y. Tsuchiya, M. Okamoto, H. Mizuta and S. Oda, "Ab-initio calculations of electronic states in nano-crystalline Si quantum dots", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, Kyoto, (June 2005).
- Y. Kurokawa, S. Higashijima, Y. Tsuchiya, M. Okamoto, H. Mizuta and S. Oda, "Electronic states and quantum transport in Si nanorod transistors", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, Kyoto, (June 2005).
- T. Nagami, N. Momo, Y. Tsuchiya, S. Saito, T. Arai, T. Shimada, H. Mizuta and S. Oda, "Mechanical property analysis and structural optimization for NEMS memory devices", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, Kyoto, (June 2005).
- 26. G. Yamahata, A. Tanaka, Y. Kawata, Y. Tsuchiya, S. Saito, T. Arai, H. Mizuta and S.

Oda, "Bottom-up fabrication of Si nanodot transistors usign the nc-Si dots solution", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, Kyoto, (June 2005).

- 27. S. Huang, H. Mizuta and S. Oda, "Charging-storing-discharging process in nitrided nanocrystalline silicon dots", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, Kyoto, (June 2005).
- S. Huang, H. Mizuta and S. Oda, "Charge operation of nitrided nanocrystalline silicon dot memory devices", China International Conference on Nanoscience and Technology, Beijing, (June 2005),
- 29. 鄭仰東、土屋良重、佐藤大典、水田博、小田俊理: 「HfO2薄膜成長過程の分光 エリプソメトリによるその場観察と第一原理計算との比較」,応用物理学会 シリ コンテクノロジー分科会 第70回研究集会「ゲート絶縁膜の現状と課題 ~ 誘電 率と界面 ~」,広島,2005年6月
- A. Tanaka, G.Yamahata, Y.Tsuchiya, K.Usami, H.Mizuta and S.Oda, "Assembly of Nanocrystalline Silicon Quantum Dots based on a Colloidal Solution Method", 5<sup>th</sup> IEEE Conference on Nanotechnology, Nagoya, (July 2005).
- S. Higashijima, Y. Kurokawa, Y. Tsuchiya, M. Okamoto, H. Mizuta and S. Oda, "Ab-initio method of designing artificial quantum bits", 15<sup>th</sup> Workshop on Modelling and Simulation of Electron Devices, pp.19-20, Pisa, (July 2005).
- 32. P. Walker and H. Mizuta, "Energy-balance modeling of short channel single-GB thin film transistors", 15<sup>th</sup> Workshop on Modelling and Simulation of Electron Devices, pp.19-20, Pisa, (July 2005).
- 33. 筆宝、水田、小田、"シリコン3次元フォトニック結晶の新形成法" 電子情報通 信学会シリコン・フォトニクス研究会 SIPH2004-99 (2005年7月)
- M.A. Rafiq, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, S. Uno, Z.A.K. Durrani and W.I. Milne, "Temperature dependence of space charge limited current (SCLC) in thin films of silicon nanocrystals", 2005 International Conference on Solid State Devices and Materials, pp. 424-425, Kobe, (September 2005).
- A. Surawijaya, H. Mizuta and S. Oda, "Room temperature negative differential conductance due to resonant tunneling through a single nanocrystalline-Si quantum dot", 2005 International Conference on Solid State Devices and Materials, pp. 180-181, Kobe, (September 2005).
- 36. D. Hippo, H.-J. Chong, A. Tanaka, Y. Kawata, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, S. Oda, K. Urakawa and N. Koshida, "A new design of nanocrystalline silicon optical devices based on 3-dimensional photonic crystal structures", 2<sup>nd</sup> International Conference on Group IV Photonics, Antwarp, (September 2005).
- 37. B. Pruvost, H. Mizuta and S. Oda, "SET Analytical Model for Hybrid SET-MOSFET and NEMS-SET Simulation", 第66回応用物理学会学術講演会 (2005年9月)
- 38. 筆宝、浦川、川田、土屋、水田、越田、小田、"磁場印加陽極酸化法を用いたシ リコン3次元構造の作製",第66回応用物理学会学術講演会 (2005年9月)
- B. Gelloz, T. Kanda, T. Uchida, M. Niibe, A. Kojima and N. Koshida: Electroluminescence enhancement assisted with ballistic electron excitation in nanocrystalline silicon diodes, Int. Conf. Solid State Devices and Materials, Kobe, Japan, (September 2005).
- T. Ohta, A. Kojima, and N. Koshida, Characteristics of nanocrystalline porous silicon ballistic emitter in atmospheric pressure, Int. Vac. Nanoelectronics Conf., Oxford, UK, (July 2005).
- 41. M. Khalafalla, J. Ogi, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, Z. Durrani, and S. Oda, "Resonant tunneling effects in nanocrystalline silicon point-contact transistors", 第二回薄膜材料 デバイス研究会 (2005年11月)
- 42. K. Ogawa, K. Tomizawa, Y-T. Tan, My The Doan, Yu Ming Bin and Dim-Lee Kwong, S. Yamada, J. B. Cole, Y. Katayama, H. Mizuta and S. Oda: "Broadband Variable Chromatic Dispersion in Photonic-Band Electro-Optic Waveguide," OFC 2006, Anaheim (USA), OThE4, (Mar. 2006).
- 43. B. Gelloz and N. Koshida, Stabilization of nanocrystalline porous silicon electroluminescence by high-pressure vapor annealing, Int. Porous Semiconductors

Science and Technology, Barcelona, Spain, (March 2006).

- 44. 新井唯、斎藤慎一、福田宏、鳥居和功, 金属ナノ微粒子による2次元人工格子の 化学的制御, 応用物理学会第53回春期講演会、(2006年3月).
- 45. A. Surawijaya, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, and S. Oda, 'Resonant Tunneling Device Using a Single Nanocrystalline Silicon Quantum Dot', 応用物理学会第53回春期講演会、(2006年3月)
- 46. B. Pruvost, H. Mizuta, and S. Oda, 'Design and Analysis of Functional NEMS-gate MOSFETs and SET', 応用物理学会第53回春期講演会、(2006年3月)
- 47. 永見佑、百々信幸、土屋良重、斎藤慎一、新井唯、嶋田壽一、水田博、小田俊理: 「3次元有限要素シミュレーションによるNEMSメモリのスイッチング電圧低減 の検討」応用物理学会第53回春期講演会、(2006年3月)
- 48. 佐藤大典、新倉浩樹、土屋良重、水田博、野平博司、丸泉琢也、白木靖寛、小田 俊理: 「SiO2/HfO2/SiO2積層トンネル膜を用いたスタック型二重フローティン グゲートメモリ」応用物理学会第53回春期講演会、(2006年3月)
- 49. 鄭, 筆宝, 田中, 宇佐美, 土屋,水田,小田, "シリコン量子ドットからの可視エレク トロルミネッセンスの観測"応用物理学会第53回春期講演会、(2006年3月)
- 50. 筆宝、浦川、川田、土屋、水田、越田、小田、"2方向エッチングによるシリコン3次元フォトニック結晶の作製"、応用物理学会第53回春期講演会、(2006年3月)
- 51. 川田、Khalafalla、土屋、水田、小田、"マルチゲートシリコン単電子トランジス タの作製"、応用物理学会第53回春期講演会、(2006年3月)
- 52. M. Manoharan, H. Mizuta, and S. Oda, "Optimization of RF-SET sensitivity by using SET-Spice hybrid simulation", 応用物理学会第53回春期講演会、(2006年3月)
- 53. 百々、 永見、土屋、斎藤、新井、嶋田、水田、小田、"NEMSメモリデバイスの 実現に向けた2層ブリッジ構造体の作製"、応用物理学会第53回春期講演会、(2006 年3月)
- 54. 小木、百々、Khalafalla、水田、小田、"シリコンナノブリッジトランジスタの作 製と評価"、応用物理学会第53回春期講演会、(2006年3月)
- 55. S. Huang, K. Usami, Y. Tsuchiya, H. Mizuta and S. Oda, "A Few Electron Memory Device Based on Surface Nitrided Nanocrystalline Silicon Dots", 応用物理学会第53回 春期講演会、(2006年3月)
- 56. 田中、土屋、宇佐美、水田、小田、"分散溶媒を用いたナノ結晶シリコンドット 集積化技術: 傾斜基板上での集積化"、応用物理学会第53回春期講演会、(2006年3 月)
- 57. 浦川、筆宝、越田、"シリコンナノ周期構造の作製"、応用物理学会第53回春期講演会、 (2006年3月)
- 58. 山口賢、宇野重康、中里和郎, アバランシェダイオードを用いた電子線センサ, 応 用物理学会第53回春期講演会 (2006年3月).
- 59. 石崎賢治、新井 唯、宇野重康、中里和郎、金コロイド2次元格子系テンプレート によるDNAの電気伝導計測、応用物理学会第53回春期講演会、(2006年3月)
- 60. 林 勝堅、石崎 賢治、清水 毅、新井 唯、宇野 重康、中里 和郎、金コロイド2 次元格子の小信号特性とDNA検出への応用、応用物理学会第53回春期講演会、(2006年3月)
- 61. 石原英明,山口賢,宇野重康,中里和郎、ポーラス・シリコンを用いた温度セル・ アレイ、応用物理学会第53回春期講演会、 (2006年3月)
- 62. M.A. Rafiq, H. Mizuta, Shigeyasu Uno, and Z.A.K. Durrani, 'Fabrication of vertical nanopillar devices', presented at Micro- and Nano-Engineering 2006, (17-20 September 2006), Barcelona, Spain.
- 63. 越田 信義, 量子サイズナノシリコンの光・電子・音響・バイオ機能, 電子情報通信 学会シリコンフォトニクス研究会, 東京, (May 2006).
- 64. H.-J. Cheong, D. Hippo, A. Tanaka, K. Usami,, Y. Tsuchiya, H. Mizuta and S. Oda:

"Visible Electroluminescence from Size-Controlled SiliconQuantum Dots," CLEO/QELS 2006, Long Beach (USA),(May 2006).

- D. Hippo, Y. Kawata, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, S. Oda, K. Urakawa and N. Koshida: "Fabrication of Silicon 3D Photonic Crystal Structures in 100nm Scale Using Double Directional Etchings Method," CLEO/QELS 2006, Long Beach (USA), (May 2006).
- B. Pruvost, H. Mizuta and S. Oda: "Design, Analysis of Functional NEMS-gate MOSFETs and SETs," IEEE Silicon Nanoelectrinics Workshop, Honolulu (USA), (Jun. 2006).
- J. Ogi, N. Momo, M.A.H. Khalafalla, Y. Tsuchiya, H. Mizuta and S. Oda: "Fabrication and evaluation of Si nanobridge transistor," IEEE Silicon Nanoelectrinics Workshop, Honolulu (USA), (Jun. 2006).
- N. Momo, T. Nagami, S. Matsuda, Y. Tsuchiya, S. Saito, T. Arai, Y. Kimura, T. Shimada, H. Mizuta and S. Oda: "Fabrication and characterization of nanoscale suspended floating gates for NEMS memory," IEEE Silicon Nanoelectrinics Workshop, Honolulu (USA), (Jun. 2006).
- Nagami, N.Momo, Y. Tsuchiya, S. Saito, T. Arai, T. Shimada, H. Mizuta and S. Oda: "Electro-Mechanical simulation of programming/readout characteristics for NEMS memory," IEEE Silicon Nanoelectrinics Workshop, Honolulu (USA), (Jun. 2006).
- M. Khalafalla, H. Mizuta, Z. A.K. Durrani and S. Oda: "Observation of quantum effects in the electron transport characteristics of a nanocrystalline silicon point contact transistor," International Conference on Physics of Semiconductors, Vienna (Austria), (Jul. 2006).
- 71. 筆宝大平、浦川圭、川田善之、土屋良重、水田博、越田信義、小田俊理:「2方向 エッチングによるシリコン3次元フォトニック結晶への欠陥導入プロセス」、第67 回応用物理学会学術講演会、草津、29a-ZD-5、(2006年8月).
- 72. 向井崇、田中敦之、土屋良重、宇佐美浩一、水田博、小田俊理:「分散液中のナノ結晶シリコンドットの表面修飾」、第67回応用物理学会学術講演会、草津、 29a-ZR-2、(2006年8月).
- 73. 田中敦之、土屋良重、宇佐美浩一、齋藤真一、新井唯、水田博、小田俊理:「LB 膜作製法を用いたナノ結晶シリコンドット集積化技術」、第67回応用物理学会学 術講演会、草津、29a-ZR-3、(2006年8月).
- 74. 山端元音、土屋良重、水田博、小田俊理:「シリコン多重量子ドットアレイデバ イスの作製」、第67回応用物理学会学術講演会、草津、29a-ZR-4、2006年8月.
- 75. 澤井俊一郎、東島賢、土屋良重、岡本政邦、水田博、小田俊理:「第一原理計算 によるSiO2/Si/SiO2ナノ構造中のフォノン解析」、第67回応用物理学会学術講演会、 草津、29a-ZR-6、(2006年8月).
- 76. 川田善之、Mohamed Kharafalla、宇佐美浩一、土屋良重、水田博、小田俊理:「ナ ノ結晶シリコン二重量子ドットと単電子トランジスタの集積化」、第67回応用物 理学会学術講演会、草津、29a-ZR-7、(2006年8月).
- Manoharan Muruganathan、Kawata Yoshiyuki、Mizuta Hiroshi、Oda Shunri:「RF-SET に向けた可変トンネルバリア・マルチゲートシリコン単電子トランジスタ」、第 67回応用物理学会学術講演会、草津、29a-ZR-8、(2006年8月).
- Mohammed Khalafalla、水田博、小田俊理、Durrani Zahid:「ナノ結晶シリコンポ ッイントコンタクトトランジスタにおけるクーロンギャップ内共鳴コンダクタ ンスの観測」、 第67回応用物理学会学術講演会、草津、29a-ZR-3,(2006年8月).
- 小木純、Mohammed Khalafalla、永見佑、土屋良重、水田博、小田俊理:「シリコ ンナノブリッジトランジスタの作製と評価」、第67回応用物理学会学術講演会、 草津、29a-ZR-4、(2006年8月).
- 80. 栗原智之、新倉浩樹、土屋良重、水田博、小田俊理:「スタック型二重フローティングゲート不揮発性メモリ特性シミュレーション」、 第67回応用物理学会学術 講演会、草津、30a-ZR-6、(2006年8月).
- 81. 永見佑、松田真之介、土屋良重、斎藤慎一、新井唯、嶋田壽一、水田博、小田俊 理:「有限要素シミュレーションによるNEMSメモリの読み出し特性の解析」、第

67回応用物理学会学術講演会、草津、30a-ZR-7、(2006年8月).

- 82. 松田真之介、永見佑、土屋良重、斎藤慎一、新井唯、嶋田壽一、水田博、小田俊 理:「NEMSメモリデバイスの実現にむけた電圧印加による曲がり梁のスイッチン グ検証」、第67回応用物理学会学術講演会、草津、30a-ZR-8、(2006年8月).
- 83. 古川亮介、須藤貴也、土屋良重、野平博司、水田博、丸泉琢也、白木靖寛、小田 俊理:「MOCVD法によるPrシリケートゲート絶縁膜のN2アニール効果の検討」、 第67回応用物理学会学術講演会、草津、31a-P10-1、(2006年8月).
- 84. B. Pruvost、水田博、小田俊理:「ハイブリッドSET-NEMS用いた構造を新機能デバイスの研究」、第67回応用物理学会学術講演会、草津、31p-ZR-9, (2006年8月).
- 85. 幡井 崇, 櫟原 勉, 相澤浩一, 菰田卓哉, 越田信義、ナノ結晶化多結晶Si弾道 電子エミッタの気体放電イグニッション効果、応用物理学会2006秋季講演会、 31p-ZM-8, (2006年8月).
- 86. 太田敢行,小島 明,越田信義、ナノシリコン弾道電子エミッタの大気圧動作と 表面終端制御による安定化、応用物理学会2006秋季講演会、31p-ZM-7.7, (2006年8 月).
- 87. 鄭恵貞(H.-J. Cheong)、田中敦之、筆宝大平、宇佐美浩一、土屋良重、水田博、 小田俊理:「サイズ制御したシリコン量子ドットからの可視エレクトロルミネッ センス」、第67回応用物理学会学術講演会、草津、1a-P15-27、(2006年9月).
- 88. B. ジェローズ, 越田信義、Photonic properties of nanocrystalline porous silicon treated by high-pressure water vapor annealing, 応用物理学会2006秋季講演会、1a-P15-20, (2006年9月).
- 89. 水田博、永見祐、Benjamin Pruvost、百々信幸、小木純、松田真之助、柴村純平、 土屋良重、斎藤慎一、新井唯、木村嘉伸、嶋田壽一、小田俊理:「ナノエレクト ロメカニカル構造を有するシリコンナノ機能デバイス」、応用物理学会シリコン テクノロジー分科会第85回研究集会、東京、(2006年9月).
- Y. Kawata, M. Khalafalla, K. Usami, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, S. Oda: "Tunnel-coupled double nanocrystalline Siquantum dots integrated into a single electron transistor," Int. Conf. on Solid State Devices and Materials, Yokohama, Yokohama (Japan), (Sep. 2006).
- 91. M. A. H. Khalafalla, H. Mizuta, S. Oda and Z. A. K. Durrani: "Possible Nonequilibrium Kondo Effect in a Nanocrystalline SiliconPoint-Contact Transistor," Int. Conf. on Solid State Devices and Materials, Yokohama, Yokohama (Japan), (Sep. 2006).
- 92. M. Manoharan, H. Mizuta and S. Oda: "Hybrid simulation of the RFSET and its charge sensitivity analysis," Int. Conf. on Solid State Devices and Materials, Yokohama, Yokohama (Japan), (Sep. 2006).
- 93. B. Gelloz and N. Koshida, Highly Efficient and Stable Photoluminescence of Nanocrystalline Porous Silicon with Fully Annealed and Passivated Surfaces, Int. Conf. on Solid State Devices and Materials, Yokohama, (2006), pp. 40-41.
- T. Ohta, A. Kojima, and N. Koshida, Emission characteristics of nanocrystalline porous silicon ballistic cold cathode in atmospheric ambience, Int. Vacuum Nanoelectronics Conf., Keilin, (2006), pp. 31-32.
- 95. B. Gelloz and N.. Koshida, Blue and Red Luminescence Bands of Nanocrystalline Porous Silicon Induced by High-Pressure Water Vapor Annealing, Meet. Abst. Electrochem. Soc. 602, Cancun, (2006), 2177.
- 96. B. Gelloz, Y. Coffinier, B. Salhi, N. Koshida, G. Patriarche, and R. Boukherroub, Synthesis and optical properties of silicon oxide nanowires, Mater. Res. Soc. Symp., Boston, (2006), L05.10.
- B. Gelloz, T. Shibata, R. Mentek, and N. Koshida, Pronounced photonic effects of high-pressure water vapor annealing on nanocrystalline porous silicon, Mater. Res. Soc. Symp., Boston, (2006), L08.02.
- 98. Y. Tsuchiya, R. Furukawa, T. Suto, H. Mizuta, S. Oda, H. Nohira, T. Maruizumi and Y. Shiraki: "Effect of Post-Deposition Annealing on the Electrical Properties of MOCVD-grown Praseodymium Silicate MIS Diode," International Workshop on Dielectric Thin Films for Future ULSI Devices (IWDTF2006), Kawasaki (Japan), (Nov.

2006).

- M Ohura, S Uno, and K Nakazato, An Analog BioCMOS Circuit for the Electrical Detection of Biomolecular Charges with Extended Gate MOSFET Cells, 2006 IEEJ International Analog VLSI Workshop, (November 16-18, 2006), Hangzhou, China
- 100. 古川亮介、土屋良重、松田徹、野平博司、水田博、丸泉琢也、白木靖寛、服部 健雄、池永英司、小林啓介、小田俊理:「MOCVD法により作製したPrシリケート 極薄膜の化学結合状態のアニール処理依存性」、第12回「ゲートスタック研究会 ー材料・プロセス・評価の物理-」、三島、(2007年2月).
- B. Pruvost、H. Mizuta、S. Oda:「Voltage-limitation-free comtact SET model incorporating the effects of spin-degenerate discrete energy states」、第54回応用物理学 関係連合講演会、相模原、(2007年3月).
- 102. 服部淳一、宇野重康、森伸也、中里和郎、自立シリコン量子細線における閉じ込めフォノン状態及び電子フォノン相互作用に関する理論研究、応用物理学会第54回春期講演会、青山学院大学、平成19年3月28日,(2007)
- S. Akhtar、A.Tanaka、Y.Tsuchiya、K.Usami、H. Mizuta、S. Oda: 「Low Temperature Synthesis of Silicon Nanowires」、第54回応用物理学関係連合講演会、相模原、(2007 年3月).
- 104. A. Tanaka, Y. Tsuchiya, K. Usami, S. Saito, T. Arai, H. Mizuta and S. Oda, "Nanocrystalline Si dot assembly based on the Langmuir-Blodgett method", 3<sup>rd</sup> International Conference on Advanced Materials and Nanotechnology (AMN-3)", p. 543, Wellington, (February 2007).
- 105. Y. Tsuchiya, K. Ikezawa, T. Nakatsukasa, N. Inaba, K. Usami, H. Mizuta, and S.Oda, "Study of silicon nanodot formation in pulsed-gas VHF plasma process", 3<sup>rd</sup> International Conference on Advanced Materials and Nanotechnology (AMN-3)", p. 436, Wellington, (February 2007).
- 106. K. Nakazato, M. Ohura, K. Sugimoto, J. Tsukada, and S. Uno, Extended-gate MOSFET Biosensor Array LSIs, Fourth International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE4), Tokyo, Japan, (14-16 March 2007)
- 107. B. Pruvost, H. Mizuta, S. Oda: [Voltage-limitation-free comtact SET model incorporating the effects of spin-degenerate discrete energy states]、第54回応 用物理学関係連合講演会、相模原市、2007年3月.
- 108. S. Akhtar, A.Tanaka, Y.Tsuchiya, K.Usami, H. Mizuta, and S. Oda: 「Low Temperature Synthesis of Silicon Nanowires」、第54回応用物理学関係連合講演 会、相模原市、2007年3月.
- 109. 古川亮介、土屋良重、須藤貴也、松田徹、野平博司、水田博、丸泉琢也、白木 靖寛、服部健雄、池永英司、小林啓介、小田俊理:「MOCVD法により作製したPr シリケート極薄膜の化学結合状態のアニール処理依存性」、第54回応用物理学関 係連合講演会、相模原、(2007年3月).
- 110. 川田善之、土屋良重、水田博、小田俊理:「2電荷量子ビットに向けた2重単電 子トランジスタ型電荷検出器の検討」、第54回応用物理学関係連合講演会、相模 原、(2007年3月).
- 111. 筆宝大平、浦川圭、土屋良重、水田博、越田信義、小田俊理:「3次元フォト ニック結晶への欠陥導入によるシリコン量子ドットの自然放出制御」、第54回応 用物理学関係連合講演会、相模原、(2007年3月).
- 112. 服部淳一, 宇野重康, 森伸也, 中里和郎, 自立シリコン量子細線における閉じ 込めフォノン状態及び電子フォノン相互作用に関する理論研究, 春季第54 回応 用物理学関係連合講演会, 東京(2007年3月) 28p-G-5
- 113. H.-J. Cheong, A. Tanaka, D. Hippo, K. Usami, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, S. Oda, "Light emission from size reduced nanocrystal silicon quantum dots", CLEO2007, (May 2007).
- 114. Saeed Akhtar, K. Usami, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, and S. Oda,Influence of Crystal Orientation of Substrate on Low Temperature Synthesis of Silicon Nanowires from Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, 5th International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures (ICSI-5), Marseille, (May 2007)

- B. Gelloz, H. Koyama, and N. Koshida, Polarization memory of blue and red luminescence from nanocrystalline porous silicon treated by high-pressure water vapor annealing, 5th Int. Conf. on Silicon Epitaxy and Heterostructures, Marseille, (May 2007), pp.389-390.
- 116. B. Pruvost, H. Mizuta, and S. Oda, "Voltage-Limitation-Free Compact SET Model Incorporating the Effects of Spin-Degenerate Discrete Energy States", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, pp.51-52, Kyoto, (June 2007).
- 117. Y. Kawata, M. Manoharan, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, and S. Oda, "Fabrication and Characterization of Double Single-Electron Transistors as a Readout for Charge Qubits", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, pp.119-120, Kyoto, (June 2007).
- 118. Y. Tsuchiya, T. Kurihara, D. Sato, H. Niikura, H. Mizuta and S. Oda, "High-speed and Non-volatile Memory Devices Using a Macroscopic Polarized Stack Consisting of Double Floating Gates Interconnected with Engineered Tunnel Oxide Barriers", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, pp.145-146, Kyoto, (June 2007).
- S. Higashijima, S. Sawai, Y. Tsuchiya, M. Okamoto, H. Mizuta, and S. Oda, "DFT Simulation of Dynamic Charge States in Double Silicon Quantum Dots", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, pp.169-170, Kyoto, (June 2007).
- 120. M. Manoharan, Y. Kawata, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, and S. Oda, "Observation of strongly-coupled multiple-dot characteristics in the dual recess structured silicon channel with different oxidation conditions", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, pp.151-152, Kyoto, (June 2007).
- 121. S. Sawai, H. Mizuta, S. Higashijima, S. Uno, M. Okamoto, Y. Tsuchiya, and S. Oda, "Ab-initio simulation of phonon properties of ultra-thin silicon films", International Symposium on Frontiers in Computational Science of Nanoscale Transport, pp. 97-98, Tokyo, (June 2007).
- 122. Y. Zheng, H. Mizuta and S. Oda, "Theory of Nonequilibrium Transport Properties for a Three-site Quantum Wire", International Symposium on Frontiers in Computational Science of Nanoscale Transport, pp. 79-80, Tokyo, (June 2007).
- 123. Junichi Hattori, Shigeyasu Uno, Nobuya Mori and Kazuo Nakazato, "Reduction of Acoustic Phonon Limited Electron Mobility due to Phonon Confinement in Silicon Nanowire MOSFETs", 2007 Device Research Conference, South Bend, IN (June, 2007), IV.B-8 (Proc. p.177).
- 124. J. Hattori, S. Uno, N. Mori and K. Nakazato, Reduction of Acoustic Phonon Limited Electron Mobility due to Phonon Confinement in Silicon Nanowire MOSFETs, 2007 Device Research Conference, South Bend, IN (June, 2007), IV.B-8 (Proc. p.177)
- 125. Y. Zheng, H. Mizuta and S. Oda, "Nonequilibrium Transport Properties for a Three-site Quantum wire Model", 15<sup>th</sup> Int. Conf. on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS-15), Tokyo, (July 2007).
- 126. T. Ohta, B. Gelloz, and N. Koshida, Characteristics of nanosilicon ballistic cold cathode in liquids as an active electrode, Int. Vac. Nanoelectron. Conf., Chicago, (July 2007), pp. 74-75.
- 127. N. Negishi, T. Sato, Y. Matsuba, R. Tanaka, T. Nakada, Sakemura, Y. Okuda, A. Watanabe, T. Yoshikawa, and K. Ogasawara, M. Nanba, S. Okazaki, K. Tanioka, and N. Egami, and N. Koshida, Development of a super-high sensitive image sensor using 640×480 pixel active-matrix high-efficency electrion emission device, Int. Vac. Nanoelectron. Conf., Chicago, (July 2007), pp. 68-69.
- 128. 筆宝大平, 土屋良重, 水田 博, 浦川 圭, 越田信義, 小田俊理、2方向エッチング によるシリコン3次元フォトニック結晶の作製とフォトニックバンドギャップ効果、第68回応 用物理学会学術講演会、(September 2007)、7a-R-1、札幌
- 129. 田中敦之, 土屋良重, 宇佐美浩一, 斎藤慎一, 新井 唯, 水田 博, 小田俊理、表面 修飾したナノ結晶シリコンドットを用いたLB膜作製、第68回応用物理学会学術講演会、 (September 2007)、6a-M-、札幌
- 130. Xin Zhou, H-J Cheong, 土屋良重, 水田 博, 小田俊理、Conduction of size controlled silicon nanocrystals film、第68回応用物理学会学術講演会、(September 2007) 5a-ZF-5、札幌

- 131. 古川亮介, 土屋良重, 野平博司, 丸泉琢也, 白木靖寛, 小田俊理 、極薄熱酸化 膜を界面層に用いたMOCVD堆積Pr系高誘電率絶縁膜の電気特性評価、第68回応用 物理学会学術講演会、(September 2007)、7a-ZM-9、札幌
- 132. 柴村純平, Benjamin Pruvost, 土屋良重, 宇佐美浩一, 斎藤慎一, 水田 博, 小田俊 理、Suspended-Gate MOSFETのための梁構造の作製とC-V測定によるpull-inの観測、 第68回応用物理学会学術講演会、(September 200)、5p-ZE-2、札幌
- 133. B PRUVOST, SVERRE HAMRE, 水田 博, 小田俊理、SET-NEMS -ゲート可動式 単電子トランジスタの研究-、第68回応用物理学会学術講演会、(September 2007)、 5p-ZE-3、札幌
- 134. SAEED AKHTAR, 田中敦之, 宇佐美浩一, 土屋良重, 水田 博, 小田俊理、低温で のジシランを用いた単結晶シリコンナノワイヤーの作製、第68回応用物理学会学術講 演会、(September 2007)、5p-ZE-4、札幌
- 135. 澤井俊一郎, 東島 賢, 宇野重康, 岡本政邦, 土屋良重, 水田 博, 小田俊理、第一 原理計算によるシリコン極薄膜のフォノン解析、第68回応用物理学会学術講演会、 (September 2007)、5p-ZE-15
- 136. 栗原智之,新倉浩樹,土屋良重,水田 博,小田俊理、スタック型二重フローティング ゲート分極構造の作製と評価、第68回応用物理学会学術講演会、September 2007)、 6a-ZE-5
- 137. 松田真之介,永見 佑,土屋良重,斎藤慎一,新井 唯,嶋田壽一,水田 博,小田 俊理、NEMSメモリデバイス実現に向けた電荷注入2次元シリコンナノドット層のKFM観 察、第68回応用物理学会学術講演会、(September 2007)、8p-ZL-1
- 138. 小木 純, 土屋良重, 水田 博, 小田俊理、量子ドットを有するシリコンナノブリッジトラ ンジスタの電子輸送特性評価、第68回応用物理学会学術講演会、(September 2007)、 8p-ZL-3、札幌
- 139. 山端元音, 土屋良重, 水田 博, 小田俊理、シリコン2重結合量子ドット構造における 静電結合制御、第68回応用物理学会学術講演会、(September 2007), 8p-ZL-4、札幌
- 140. Manoharan Muruganathan, 川田善之, Mohammed Khalafalla, 土屋良重, 水田 博, 小田俊理、Formation of strongly-coupled multiple-dot in the dual recess structured silicon channel、第68回応用物理学会学術講演会、(September 2007)、8p-ZL-5、札幌
- 141. 鄭 恵貞, 栗原智之, 田中敦之, 宇佐美浩一, 土屋良重, 水田 博, 小田俊理、ナノ 結晶シリコンドット発光デバイスの断面構造解析と窒化膜を利用した高性能化の検討、 第68回応用物理学会学術講演会、(September 2007)、6a-L-12、札幌
- 142. 稲葉直樹, 宇佐美浩一, 土屋良重, 水田 博, 小田俊理、VHFプラズマ気相形成シリ コンナノドットへの不純物ドーピング、第68回応用物理学会学術講演会、(September 2007)、4p-M-10、札幌
- 143. Akhmadi Surawijaya, Yoshishige Tsuchiya, Hiroshi Mizuta, Shunri Oda、 Characteristic of Single Nanocrystalline Silicon Quantum Dot Resonant Tunneling Diodes in Series Combination、第68回応用物理学会学術講演会、(September 2007)、 8p-ZL-6、札幌
- 144. 川田善之, 土屋良重, 水田 博, 小田俊理、2重単電子トランジスタ型リードアウトによる2量子ビット電荷偏極検出の検討、第68回応用物理学会学術講演会、(September 2007)、7a-P14-16、札幌
- 145. 太田敢行, B. ジェローズ, 越田信義、ナノシリコン弾道電子エミッタの水溶液中動作 応用物理学会講演会札幌、(2007年9月)
- 146. 服部淳一, 宇野重康, 森 伸也"自立シリコン量子細線における電子閉じ込めフォノン相互作用に関する理論研究", 秋季第68 回応用物理学会学術講演会, 札幌 (September 2007)7p-ZE-10.
- 147. B. Gelloz, M. Sato and N. Koshida, Cavity Effect in Nanocrystalline Porous Silicon Ballistic Lighting Device, Int. Conf. on Solid State Devices and Materials, Tsukuba, (September 2007), pp. 120-121.
- 148. Y. Hirano, S. Yamazaki and N. Koshida, Improved Photoconduction Effects of

Nanometer-Sized Si Dot Multilayers, Int. Conf. on Solid State Devices and Materials, Tsukuba, (September 2007), pp. 1116-1117.

- 149. B. Gelloz, M. Sugawara and N. Koshida, Acoustic Wave Manipulation by Phased Operation of Two-Dimensionally Arrayed Nanocrystalline Silicon Ultrasonic Emitters, Int. Conf. on Solid State Devices and Materials, Tsukuba, (September 2007), pp. 1140-1141.
- 150. Y. Kawata, S. Nishimoto, Y. Tsuchiya, S. Oda and H. Mizuta, "Study of Single-Charge Polarization on two Charge Qubits Integrated onto a Double Single-Electron Transistor Readout", 39<sup>th</sup> International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2007), pp. 1126-1127, Tsukuba, (September 2007).
- 151. G. Yamahata, Y. Tsuchiya, S. Oda and H. Mizuta, "Control of electrostatic coupling observed for Si double quantum dot structures", 39<sup>th</sup> International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2007), pp. 598-599, Tsukuba, (September 2007).
- 152. J. Ogi, Y. Tsuchiya, S. Oda and H. Mizuta, "Single-electron tunnelling via quantum dot cavities built on a silicon suspension nanobridge", 33<sup>rd</sup> International Conference on Micro- and Nani-Engineering (MNE2007), Copenhagen, (September 2007).
- 153. D. Hippo, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, S. Oda, K. Urakawa, N. Koshida, Optical Properties of Silicon Three-Dimensional Photonic Crystal Fabricated by Self-Aligned Two-Directional Electrochemical Etching Method, 4th International Conference on Group IV Photonics, (September 2007), WP4, Tokyo
- 154. B. Gelloz, Y. Yoshida, N. Koshida, Light-emissive nonvolatile memory based on nanocrystalline porous Si, 2007 4<sup>th</sup> IEEE Int. Conf. on Group IV Photonics (19-21 Sep., 2007), Tokyo, pp. 204-206.
- 155. Saeed Akhtar, K. Usami, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, and S. Oda, Observation of Size Dependent Structural Defects in Silicon Nanowires, 20th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2007), N8 B-13-5L, Kyoto (November 2007)
- 156. S.Sawai, S.Uno, M.Okamoto, Y.Tsuchiya, S.Oda and H.Mizuta, Phonon properties of ultra thin silicon films, 2nd Workshop on ab initio phonon calculations, (December 2007), Cracow
- 157. Y. Okuda et al, Low Voltage and High Speed Operation of 640X480 Pixel Ac-tive-matrix HEED (High-efficiency Electron Emission Device) Array for HARP Image Sensor, Proc. Int. Display Workshop, Sapporo (5-8 December 2007).
- 158. 古川亮介、土屋良重、北村幸司、野平博司、小田俊理、Pr-silicate極薄膜界面化学 結合状態のin-situ N2アニール処理依存性、第13回「ゲートスタック研究会-材料・プロ セス・評価の物理-、(February 2008)、三島市
- B. Gelloz and N. Koshida, Photonic characteristics of nanocrystalline porous silicon treated by high-pressure water vapor annealing, Int. Conf. On Porous Semiconductors Science and Technology, (March 2008), Mallorca.
- 160. A. Chouket, H. Koyama, B. Gelloz, H. Elhouichet, M. Oueslati, N. Koshida, Polarization memory in enhanced photoluminescence of porous silicon as a trace of energy transfer to embedded laser dye molecules, Int. Conf. On Porous Semiconductors Science and Technology, (March 2008), Mallorca.
- 161. D. Hippo, K. Urakawa, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, N. Koshida, and S. Oda, "Mechanism of One-Directional Nano Etching in Silicon Using Magnetic-Field-Assisted Anodization", Porous Semiconductors Science and Technology 2008, Mallorca, (March 2008).
- 162. M. A. Rafiq, Z. A. K. Durrani, H. Mizuta and S. Oda, "Single electron transport simulations in silicon nanochains", Annual Conference on Condensed Matter and Materials Physics 2008, London, (March 2008).
- 163. 筆宝大平, 浦川 圭, 土屋良重, 水田 博, 越田信義, 小田俊理、磁場印加陽極酸 化法による高アスペクト比2次元フォトニック結晶形成機構、第55回応用物理学関係連 合講演会、(March 2008)、27a-ZX-2、船橋市
- 164. 永見 佑, 松田真之介, 土屋良重, 斎藤慎一, 新井 唯, 嶋田壽一, 水田 博, 小田 俊理、ダンピングを考慮したNEMSメモリの過渡応答特性の解析、第55回応用物理学 関係連合講演会、(March 2008)、27a-P2-9、船橋市

- 165. 山端元音, 土屋良重, 水田 博, 小田俊理、シリコン多重量子ドットアレイデバイスに おける電子輸送特性評価、第55回応用物理学関係連合講演会、(March 2008)、 28a-P5-4、船橋市
- 166. 亀谷祐輔, 宇野重康, 中里和郎 "CMOS集積回路を用いた高速電子線センサの検討"、電子情報通信学会2008総合大会, March, Hakata, (2008), C-12-25
- 167. B. Gelloz, R. Mentek and N. Koshida, Specific blue light emission from nanocrystalline porous Si, treated by high-pressure water vapor annealing, Ext. Abst. 2008 Int. Conf. Solid State Devices and Mater., pp. 956-957, (2008).
- 168. B. Gelloz, A. Takeuchi, and N. Koshida, Optoelectronic effect of high-pressure water vapor annealing for nanocrystalline silicon films prepared by ion implantation, 5th Int. Conf. on Group IV Photonics, 2008, pp. 317-319, (2008).
- 169. 亀谷祐輔, 宇野重康, 中里和郎 "CMOS 集積回路を用いた高速電子線センサの 検討"、電子情報通信学会2008年総合大会(March 2008) C-12-25
- 170. Gento Yamahata, Yoshiyuki Kawata, Manoharan Muruganathan, and Shunri Oda, Yoshishige Tsuchiya, and Hiroshi Mizuta, Silicon-based Quantum Information Devices, The forth International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation (INC-4), Tokyo, (April 2008).
- 171. T. Ishikawa, A. Tanaka, N. Inaba, S. Nishimoto, K. Usami and S. Oda, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, Integration, Assembly and Doping of Nanocrystalline Silicon Quantum Dots, The forth International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation (INC-4), Tokyo, (April 2008)
- 172. T. Nagami, S. Matsuda, N. Momo, S. Oda, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, NEMS Memory Devices for Future Integrated Systems, The forth International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation (INC-4), Tokyo, (April 2008)
- B. Pruvost, H. Mizuta and S. Oda, "Design optimization of NEMS switches for single-electron logic applications", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, P1-32, Honolulu, (June 2008).
- 174. C. G. Li, K. Usami, H. Mizuta and S. Oda, "Controlled Ge nanowire grouwth on patterned Au catalyst substrate", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, P2-4, Honolulu, (June 2008).
- 175. G. Yamahata, Y. Tsuchiya, H. Mizuta and S. Oda, "Electron transport through silicon multiple quantum dot array devices", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, S0445 (2 pages), Honolulu, (June 2008).
- 176. Y. Kawata, T. Yamaguchi, K. Ishibashi, Y. Tsuchiya, S. Oda and H. Mizuta, "Observation of quantum level spectrum for silicon double single-electron transistors", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, S0245 (2 pages), Honolulu, (June 2008).
- 177. M. Manoharan, Y. Tsuchiya, S. Oda and H. Mizuta, "Is it possible to avoid uncontrolled multiple tunnel junctions induced by random dopants in heavily-doped silicon single-electron transistor?", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, P1-22 (2 pages), Honolulu, (June 2008).
- 178. T. Nagami, S. Matsuda, Y. Tsuchiya, S. Saito, T. Arai, T. Shimada, H. Mizuta and S. Oda, "Transient response analysis of programming/readout characteristics for NEMS memory", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, M0430 (2 pages), Honolulu, (June 2008).
- 179. J. Ogi, M. Manoharan, Y. Tsuchiya, S. Oda and H. Mizuta, "Anomalous suppression of single-electron tunneling observed for Si nanobridge transistors with a suspended quantum dot cavity", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, P1-27 (2 pages), Honolulu, (June 2008).
- 180. S. Sawai, S. Uno, M. Okamoto, Y. Tsuchiya, S. Oda and H. Mizuta, "Atomistic study of phonon states in hydrogen-terminated Si ultra-thin films", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, M0200 (2 pages), Honolulu, (June 2008).
- 181. Y. Tsuchiya, S. Matsuda, T. Nagami, S. Saito, T. Arai, T. Shimada, S. Oda and H. Mizuta, "Switching properties of electromechanically-bistable and multistable bridges for nonvolatile memory applications", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, M0415 (2 pages), Honolulu, (June 2008).
- 182. X. Zhou, M. A. Rafiq, H. Mizuta and S. Oda, "P-type Si nanocrystal thin-film

transistors", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, P1-23 (2 pages), Honolulu, (June 2008).

- 183. C. B. Li, K. Usami, H. Mizuta, S. Oda, "The impacts of silicon substrate surface conditions on the VLS growth of germanium nanowires", 29<sup>th</sup> International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-29), Rio de Janeiro, (July 2008).
- 184. M. A. Rafiq, Z. A. K. Durrani, H. Mizuta, A. Colli, P. Servati, A. C. Ferrari, and W. I. Milne, S. Oda, "Silicon nanochains: fundamental properties and applications", 29<sup>th</sup> International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-29), Rio de Janeiro, (July 2008).
- 185. X. Zhou, K. Usami, M. A. Rafiq, H. Mizuta and S. Oda, "Size effects on hopping conduction in Si nanocrystals", 29<sup>th</sup> International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-29), Rio de Janeiro, (July 2008).
- 186. C. B. Li, K. Usami, H. Mizuta, and S. Oda, The influence of surface condition on the growth of germanium nanowire on Si substrate, International Conference on Physics of Semiconductors, Rio de Janeiro, (August 2008).
- 187. X. Zhou, M. A. Rafiq, H. Mizuta, and S. Oda, Size effect on hopping conduction in silicon nanocrystals, International Conference on Physics of Semiconductors, Rio de Janeiro, (August 2008)
- 188. Akhmadi Surawijaya, Ken Uchida, Shunri Oda, Fabrication of Silicon Nanogap Electrodes for Measuring Single Nanocrystalline Silicon Quantum Dot, 第69回応用物 理学会学術講演会,春日井, 5a-E-1, (September 2008)
- 189. Benjamin Pruvost, 内田 建, 水田 博, 小田俊理,単電子論理回路応用に向けた NEMSスイッチ設計の最適化, 第69回応用物理学会学術講演会, 春日井, 2p-E-10, (September 2008)
- 190. Manoharan Muruganathan, Yoshishige Tsuchya, Hiroshi Mizuta, Ken Uchida, Shunri Oda, Operation of SOI-based radio frequency single electron transistor above 4.2 K, 第69回応用物理学会学術講演会,春日井, 5a-E-4, (September 2008)
- 191. Saeed Akhtar, 宇佐美浩一, 内田 建, 小田俊理, 高密度細線シリコンナノワイヤ作 製に向けたナノコロイド配列の検討, 第69回応用物理学会学術講演会, 春日井, 4a-E-9, (September 2008)
- 192. Xin Zhou, 内田 建, 小田俊理, Silicon nanocrystal Thin film transistor, 第69回応 用物理学会学術講演会, 春日井, 4p-W-17, (September 2008)
- 193. 佐野 洋, 中峯嘉文, 筆宝大平, 内田 建, 小田俊理, シリコン2次元フォトニック結 晶によるSiナノ結晶の発光特性の制御, 第69回応用物理学会学術講演会, 春日井, 2p-V-10, (September 2008)
- 194. 山端元音, 土屋良重, 水田 博, 内田 建, 小田俊理, シリコン3重結合量子ドットに おける電子輸送特性評価, 第69回応用物理学会学術講演会,春日井, 5a-E-2, (September 2008)
- 195. 石川哲也, 岡田哲男, 内田 建, 小田俊理, ナノ結晶シリコン量子ドットの表面修飾 によるゼータ電位の変化, 第69回応用物理学会学術講演会, 春日井, 3p-ZT-19, (September 2008)
- 196. 石川哲也, 内田 建, 小田俊理, ディップコーティング法によるナノ結晶シリコン量子 ドットの集積, 第69回応用物理学会学術講演会, 春日井, 3p-ZT-18, (September 2008)
- 197. 川田善之,山口智弘,石橋幸治,土屋良重,水田 博,内田 建,小田俊理,シリコ ン2重単電子トランジスタにおける量子準位スペクトルの観測,第69回応用物理学会学 術講演会,春日井, 5a-E-3, (September 2008)
- 198. 鄭 恵貞, 宇佐美浩一, 内田 建, 土屋良重, 水田 博, 小田俊理, 基板窒化処理に よるシリコンナノ結晶ELデバイスの高性能化, 第69回応用物理学会学術講演会, 春日 井, 2p-S-10, (September 2008)
- 199. 服部淳一, 宇野重康, 森 伸也, 沼田達宏, 中里和郎, 自立シリコン量子細線におけ る電子—変調音響フォノン相互作用に関する理論研究, 秋季第69 回応用物理学会 学術講演会, 春日井, (2008 年9 月) 3p-P11-4, (September 2008)
- 200. C. B. Li, K. Usami, H. Mizuta, K. Uchida, S. Oda, "VLS growth of germanium

nanowires on SiO<sub>2</sub>-terminanted Si (111) substrate", 40th International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2008), Tsukuba, (September 2008).

- 201. M. Manoharan, Y. Tsuchiya, S. Oda, and H. Mizuta, "Silicon radio frequency single-electron transistors operating at above 4.2 K", 40th International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2008), Tsukuba, (September 2008).
- 202. K. Nakazato, M. Ohura, H. Ozawa, and S. Uno, "A BioCMOS LSI circuit with extended-gate FET sensor array, 40th International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2008), Tsukuba, (September 2008).
- 203. B. Gelloz, T. Shibata and N. Koshida, Sound emission from nanocrystalline silicon device under operation of electroluminescence, 40th International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2008), Tsukuba, (September 2008)..
- 204. G. Yamahata, K. Uchida, S. Oda, Y. Tsuchiya and H. Mizuta, "Enhanced tunnel conductance due to QCA cotunneling processes observed for silicon serial triple quantum dots", the 38th European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC), Edinburgh, (September 2008).
- 205. Y. Kawata, S. Oda, Y. Tsuchiya and H. Mizuta, "Detection of Single-Charge Polarisation in Silicon Double Quantum Dots by Using Serially-Connected Multiple Single-Electron Transistors", 38th European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC), Edinburgh, (September 2008).
- 206. M. A. G.-Ramirez, H. Yoshimura, Y. Tsuchiya and H. Mizuta, "Suspended gate silicon nanodot memory", ESSDERC/CIRC Fringe (ESS-Fringe), Edinburgh, (September 2008).
- 207. N. Inaba, Y. Nakamine, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, K. Uchida, R. Pereira, A. Stegner, M. Stutzmann, and S. Oda, "Phosphorous-doping in silicon nanocrystals", 34<sup>th</sup> International Conference on Micro and Nano Engineering (MNE 2008), Athens, (September 2008).
- 208. Junichi Hattori, Shigeyasu Uno, Nobuya Mori, and Kazuo Nakazato, A Theoretical Study of Electron Mobility Reduction due to Acoustic Phonon Modulation in a Free-Standing Semiconductor Nanowire, International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD 2008), Hakone, Japan 7-4. 2008, September
- 209. B. Gelloz, A. Asami and N. Koshida, Characteristics of thermo-acoustic nanocrystalline porous silicon ultrasound generator as a wide-band tweeter, Abst Mater. Res. Soc. Fall Meeting, (2008), MM13.1.
- T. Ohta, S. Ogawa, B. Gelloz and N. Koshida Activity of nanocrystalline silicon planar ballistic electron emitter in solutions, Abst. Mater. Res. Soc. Fall Meeting, (2008), MM13.5
- 211. S. Saito, N. Sakuma, Y. Suwa, H. Arimoto, D. Hisamoto, H. Uchiyama, J. Yamamoto, T. Sakamizu, T. Mine, S. Kimura, T. Sugawara, M. Aoki, and T. Onai, "Observation of Optical Gain in Ultra-Thin Silicon Resonant Cavity Light-Emitting Diode", IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) 19.5, San Francisco, (December 2008).
- 212. T. Kawamura, H. Uchiyama, S. Saito, H. Wakana, T. Mine, M. Hatano, K. Torii, and T. Onai, "1.5-V Operating Fully-Depleted Amorphous Oxide Thin Film Transistors Achieved by 63-mV/dec Subthreshold Slope", IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) 4.2, San Francisco, (December 2008).
- 213. B. Gelloz, K. Murata, T. Ohta, M. Ghulinyan, L. Pavesi, D.J. Lockwood, and N.Koshida, Stabilization of Porous Silicon Free-Standing Coupled Optical Microcavities by Surface Chemical Modification, ECS Trans. 16 (3), 211-220 (2008).
- 214. B. Gelloz, M. Masunaga, T. Shirasawa, R. Mentek, T. Ohta, and N. Koshida, Enhanced Controllability of Periodic Silicon Nanostructures by Magnetic Field Anodization, ECS Trans. 16 (3), 195-200 (2008).
- 215. T. Ichihara, T. Hatai and N. Koshida, Vacuum-ultraviolet light emission from xenon directly excited by ballistic output electrons of nanocrystalline silicon planar cathode, Tech. Digest 21th Int. Vac. Nanoelectron. Cof., (2008), pp. 58-59.
- 216. T. Ohta, S. Ogawa, B. Gelloz, and N. Koshida, Hydrogen generation by operation of nanosilicon ballistic electron emitter in aqueous solutions, Tech. Digest 21th Int. Vac. Nanoelectron. Cof., (2008), pp. 17-18.
- 217. M. A. Rafiq, Z. A. K. Durrani, H. Mizuta, S. Oda, Effective temperature conduction in

silicon nanocrystals, IEEE International Conference of Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, Shenzhen, China, (January 5-8 2009).

- 218. J. Tsukada, H. Ozawa, S. Uno, K. Nakazato, N. Terasaki, N. Yamamoto, T. Hiraga, M. Iwai, M. Konno, K. Ito, and Y. Inoue, Integrated Bio-Photosensor with Extended-gate Source-Drain Follower on a Chip, Fifth International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics, D-P14, p. 252, Miyazaki, Japan, (March 2009)
- 219. Xin Zhou, 中峯嘉文, 内田 建, 小田俊理, Trap effects on carrier transport in Si nanocrystals thin film transistor, 第56回応用物理学関係連合講演会, つくば市, 31p-TF-9, (March 2009)
- 220. 小木 純, Thierry Ferrus, 土屋良重, 内田 建, David Williams, 水田 博, 小田俊 理, Siナノブリッジチャネルに埋め込まれた結合二重量子ドット特性観測, 第56回応用 物理学関係連合講演会, つくば市, 30a-V-2, (March 2009)
- 221. 塚田淳一、小澤寛晃、宇野重康、中里和郎、寺崎正、山本典孝、平賀隆、岩井 雅子、今野雅恵、伊藤公祐、井上康則, 光合成タンパク質PSIとCMOS集積回路の インテグレーションによるバイオ光受容素子, 第56回応用物理学関係連合講演会, 筑波大学、30p-ZL-8 (March 2009)
- 222. 服部淳一, 宇野重康, 森 伸也, 沼田達宏, 中里和郎, 自立シリコン量子細線 における電子—変調音響フォノン相互作用に関する理論研究, 第56回応用物理学 関係連合講演会 筑波大学、31a-V-1 (March 2009)
- 223. 永見 佑, 土屋良重, 斎藤慎一, 新井 唯, 嶋田壽一, 水田 博, 内田 建, 小田 俊理, pn接合部でのトラップを介したトンネリングを考慮したNEMSメモリの動作特性と微 細化の検討,第56回応用物理学関係連合講演会, つくば市, 2p-V-1, (April 2009)
- 224. 村木太郎, 李 伝波, 増渕和典, 宇佐美浩一, 内田 建, 小田俊理, ラジカル窒化 を用いたゲルマニウムナノワイヤデバイスの作製, 第56回応用物理学関係連合講演会, つくば市, 1a-ZA-8, (April 2009)
- 225. 中峯嘉文, 内田 建, 小田俊理, VHFプラズマにより作製されたSi量子ドットのPドー ピング, 第56回応用物理学関係連合講演会, つくば市, 1a-P13-17, (April 2009)
- 226. 沼田達宏, 宇野重康, 中里和郎1, ミリニコフゲナディ, 鎌倉良成, 森伸也, 江崎達也, 弾道輸送ナノワイヤMOSFET のI-V 特性コンパクトモデル, 春季 第 56回応用物理学関係連合講演会, 筑波 1a-V-7, (April 2009)
- 227. T. Kurihara, Y. Nagahama, D. Kobayashi, H. Niikura, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, H. Nohira, K. Uchida and S. Oda, "Engineering of Heterostructured Tunnel Barrier for Non-Volatile Memory Applications: Potential of Pr-based Heterostructured Barrier as a Tunneling Oxide", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, Kyoto, (June 2009).
- 228. J. Ogi, T. Ferrus, Y. Tsuchiya, K. Uchida, D. A. Williams, S. Oda and H. Mizuta, "Study of single-electron transport via suspended double silicon quantum dots", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, Kyoto, (June 2009).
- 229. X. Zhou, K. Uchida, H. Mizuta and S. Oda, "Lateral conduction of Si nanorystals by thin film transistor structures", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, Kyoto, (June 2009).
- 230. X. Zhou, K. Uchida, H. Mizuta and S. Oda, "Current oscillations observed for sparse Si nanorystal thin films", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, Kyoto, (June 2009).
- Aditi Goyal, Muhammad A Rafiq, Ken Uchida, Shunri Oda, "Parameter Randomness Analysis of Multiple Tunnel Junctions", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, Kyoto, (June 2009).
- 232. N. Mori, H. Minari, S. Uno, H. Mizuta and N. Koshida, "Quasi-ballistic electron transport through silicon nanocrystals", 16<sup>th</sup> International Conference on Electron Dynamics In Semiconductor, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON 16), Montpellier, (August 2009).
- Xin Zhou,内田 建,小田俊理、Characteristics of current oscillations phenomenon in Si nanorystal thin films、第70回応用物理学会学術講演会、富山、9a-TB-1、 (September 2009)
- 234. 二階堂広基, 石川哲也, 内田 建, 小田俊理, 内田 建, 小田俊理、

Langmuir-Blodgett法によるナノ結晶シリコン量子ドットの集積配列、第70回応 用物理学会学術講演会、富山、8p-ZA-3、(September 2009)

- 235. 筆宝大平, 中峯嘉文, 内田 健, 小田俊理、レーザ照射によるナノ結晶シリコ ンの温度上昇の観測、第70回応用物理学会学術講演会、富山、11a-ZL-3、(September 2009)
- 236. 晏超, 内田 建, 小田俊理、MEMS (NEMS) 共振器設計のための体系的最適化法、 第70回応用物理学会学術講演会、富山、10a-TB-1、(September 2009)
- 237. 山端元音,小寺哲夫,水田 博,内田 建,小田俊理、トップゲートとサイド ゲートによるシリコン結合量子ドットの静電結合制御、第70回応用物理学会学術 講演会、富山、9a-TA-4、(September 2009)
- 238. 小寺哲夫,大野圭司,中岡俊裕,熊谷直人,樽茶清悟,小田俊理,荒川泰彦、 InAs量子ドットとInGaAs量子井戸を内包した縦型ピラー構造の電気伝導特性、第 70回応用物理学会学術講演会、富山、8a-TH-11、(September 2009)
- 239. M. A. G.Ramirez, Y. Tsuchiya and H. Mizuta, "Hybrid circuit analysis of a suspended-gate silicon nanodot memory (SGSNM) cell", 35<sup>th</sup> International Conference on Micro and Nano Engineering (MNE2009), Ghent, (September 2009).
- 240. T. Ishikawa, H. Nikaido, K. Usami, K. Uchida, S. Oda, "Fabrication of nano Si ink and two-dimensionally assembled Si nanocrystals", 35<sup>th</sup> International Conference on Micro and Nano Engineering (MNE2009), Ghent, (September 2009).
- 241. F. A. Hassani, C. Cobianu, S. Armini, V. Petrescu, P. Merken, D. Tsamados, A. M. Ionescu, Y. Tsuchiya and H. Mizuta, "Design and Analysis of an In-Plane Resonant Nano-Electro-Mechanical Sensor for Sub-Attogram-Level Molecular Mass-Detection", 41<sup>st</sup> International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2009), Sendai, (October 2009).
- 242. H. Yoshimura, Y. Tsuchiya, H. Mizuta and N. Koshida, "Evidence of carrier accumulation effects on the response enhancement in thin-film electrochromic devices", submitted to 41<sup>st</sup> International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2009), Sendai, (October 2009).
- 243. J. Hattori, S. Uno, N. Mori and K. Nakazato, A Theoretical Study of Electron-Modulated-Acoustic-Phonon Interactions in Silicon Nanowire MOSFETs, 2009 International Conference on Solod State Devices and Materials, (7-9 Oct. 2009), Sendai, Japan
- 244. T. Numata, S. Uno, K. Nakazatoa, G. Mil'nikov, Y. Kamakura, and N. Mori, An Analytical Compact Model of Ballistic Cylindrical Nanowire MOSFET, 2009 International Conference on Solod State Devices and Materials, (7-9 Oct. 2009), Sendai, Japan
- 245. H. Matsumoto, J. Tsukada, H. Ozawa, S. Uno, K. Nakazato, N. Terasaki, N. Yamamoto, T. Hiraga, M. Iwai, M. Konno, K. Ito, and Y. Inoue, Integrated Bio-Photosensor Array with CMOS Cascode Source-Drain Follower", 2009 International Conference on Solod State Devices and Materials, (7-9 Oct. 2009), Sendai, Japan
- 246. Gento Yamahata, Tetsuo Kodera, Hiroshi Mizuta, Ken Uchida, and Shunri Oda, Electron transport through coupled Si quantum dots toward quantum information devices, G-COE PICE International Symposium on Silicon Nano Devices in 2030, (October 2009).
- 247. J. Ogi, T. Ferrus, T. Kodera, Y. Tsuchiya, K. Uchida, D. A. Williams, H. Mizuta and S. Oda, Suspended quantum dot devices for sensor or quantum bit applications, G-COE PICE International Symposium on Silicon Nano Devices in 2030, (October 2009).
- 248. T. Nagami, Y. Tsuchiya, K. Uchida, H. Mizuta, and S. Oda, Scaling Analysis of NEMS Memory Devices, G-COE PICE International Symposium on Silicon Nano Devices in 2030, (October 2009).
- 249. Y.Nakamine, T. Kodera, K. Uchida and S. Oda, Phosphorous-Doping in Silicon Nanocrystals by using VHF Plasma, G-COE PICE International Symposium on Silicon Nano Devices in 2030, (October 2009).
- 250. Chao Yan, Ken Uchida and Shunri Oda, Design Optimization of MEMS(NEMS) Resonator by 3-D Anisotropic Thermoelastic Modeling, G-COE PICE International

Symposium on Silicon Nano Devices in 2030, (October 2009).

- 251. Berrin Pinar Algul, Ken Uchida, Shunri Oda, Modeling of Band-to-Band Tunneling in MOS Structures, G-COE PICE International Symposium on Silicon Nano Devices in 2030, (October 2009).
- 252. Jean L. Tarun, Shaoyun Huang, Ken Uchida, Naoki Fukata, Koji Ishibashi and Shunri Oda, Transport Properties of Silicon Nanowire with Ferromagnetic Leads, G-COE PICE International Symposium on Silicon Nano Devices in 2030, (October 2009).
- 253. Ian C. Robertson, Ken Uchida and Shunri Oda, Artificial Membrane Interfacial Layers via 1D nanostructures for Bio-Sensors, G-COE PICE International Symposium on Silicon Nano Devices in 2030, (October 2009).
- 254. Liang HE, Koichi Usami, Ken Uchida and Shunri Oda, Preparation and characterization of P-doped Ge nanowires by VLS-CVD, G-COE PICE International Symposium on Silicon Nano Devices in 2030, (October 2009).
- 255. T. Kodera, G. Yamahata, T. Kambara, T. Ferrus, D. A. Williams, K. Uchida, Y. Arakawa, S. Oda, Fabrication and characterization of silicon double quantum dots towards spin qubits, G-COE PICE International Symposium on Silicon Nano Devices in 2030, (October 2009).
- 256. Xin Zhou, Ken Uchida and Shunri Oda, Carrier transport in ensemble of Si nanocrystals prepared by VHF plasma process, G-COE PICE International Symposium on Silicon Nano Devices in 2030, (October 2009).
- 257. Tetsuya Ishikawa, Hiroki Nikaido, Koichi Usami, Ken Uchida, Shunri Oda, Formation of two-dimensional array of Si nanocrystals using nano Si ink, G-COE PICE International Symposium on Silicon Nano Devices in 2030, (October 2009).
- 258. D. Hippo, Y. Nakamine, K. Uchida, and S. Oda, Thermotherapy for Cancer Using Silicon Nanocrystals, G-COE PICE International Symposium on Silicon Nano Devices in 2030, (October 2009).
- 259. Y. Nakamine, T. Kodera, K. Uchida, and S. Oda, "Removal of Surface Oxide Layer from Silicon Nanocrystals by HF Vapor Etching', 22<sup>nd</sup> Int. Microprocess and Nanotechnology Conference (MNC 2009), Sapporo, (November 2009).
- 260. J. Ogi, T. Ferrus, T. Kodera, Y. Tsuchiya, K. Uchida, D. A. Williams, S. Oda and H. Mizuta, "Electron-phonon interaction in suspended Si double quantum dots', 22<sup>nd</sup> Int. Microprocess and Nanotechnology Conference (MNC 2009), Sapporo, (November 2009).
- 261. J. Ogi, T. Ferrus, T. Kodera, Y. Tsuchiya, K. Uchida, D. A. Williams, S. Oda and H. Mizuta, "Inelastic single-electron tunneling assisted by confined phonons observed for suspended silicon double quantum dots", to be presented at QDCAM2010, Cambridge, (January 2010).
- 262. S. Armini, M. Carli, J. Snauwaert, V. Cherman, I. De Wolf, V. Simons, A. Maestre Caro, J. Moonens, P. Neutens, K. Arstila, J. Ogi, S. Oda, Y. Tsuchiya and H. Mizuta, "Nanoscale Selective Silicon Nanowires Surface Functionalization for Sensing Applications", 2010 MRS Symposium on Functional Materials and Nanostructures for Chemical and Biochemical Sensing, San Francisco, (April 2010)
- 263. Ian C. Robertson, K. Uchida, and S. Oda, "Artificial membrane constructed by one-dimensional nanostructure using DNA origami", 2010 MRS Symposium on Functional Materials and Nanostructures for Chemical and Biochemical Sensing, San Francisco, (April 2010)
- 264. X Zhu, K.Uchida, W.I.Milne and S. Hofmann, Epitaxial and non-epitaxial Growth of Si nanowires, MRS Spring Meeting, San Francisco, (April 2010)

(3)特許出願(SORST研究の成果に関わる特許(出願人がJST以外のものを含む))

	件数
国内出願	5
海外出願	2
計	7

(4)その他特記事項

受賞

- 1. 小田俊理、応用物理学会、フェロー、2007年8月
- 2. 越田信義、応用物理学会、フェロー、2007年8月
- 3. Best Poster Awards, Gento Yamahata, Yoshiyuki Kawata, Manoharan Muruganathan, and Shunri Oda, Yoshishige Tsuchiya, and Hiroshi Mizuta, Silicon-based Quantum Information Devices, The forth International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation (INC-4), Tokyo, 2008, April
- 4. 映像情報メディア学会丹羽高柳賞「論文賞」越田信義「1インチ256×192画素アクティブ駆動型HEED冷陰極HARP撮像板」(2008年5月)
- 5. 第24回(2008年9月)応用物理学会講演奨励賞、太田敢行、越田信義、「ナノシリコン 弾道電子エミッタの水溶液中動作と水素発生」
- 6. Int. Display Workshop '08 Best Paper Award, "MEMS5-2, Direct Excitation of Xenon by Ballistic Electrons Emitted from Nanocrystalline Silicon Planar Cathode and Vacuum-Ultraviolet Light Emission", T. Ichihara, T. Hatai, N. Koshida (2008 年 12 月)
- 7. 第 25 回(2009 年 3 月)応用物理学会講演奨励賞、山端元音, 土屋良重, 水田 博, 内田 建, 小田俊理, シリコン 3 重結合量子ドットにおける電子輸送特性評価
- 8. 第25回(2009年3月)応用物理学会講演奨励賞 服部淳一, 宇野重康, 森伸也, 沼田達 宏, 中里和郎 3p-P11-4「自立シリコン量子細線における電子 – 変調音響フォノン相互作 用に関する理論研究」

報道

- 1. 蛍光灯に代わる省エネ照明(弾道電子による Xe ガス励起と真空紫外光発生)「日経新聞 2008 年 7 月 9 日朝刊」
- 2. プラスチックフィルム上に室温で形成できる透明な酸化物半導体膜を用いた薄膜トランジ スタで動作電圧 1.5V を実現 (2008, 12/17, 日経産業新聞、日刊工業新聞)
- 3. 極薄シリコン発光素子の光増幅現象を観察(2008, 12/18, 日経産業新聞)
- 4. 常識覆す「ネオシリコン」(2009/9/28, 日刊工業新聞)
- シンポジウムの開催
  - 1. 2009 年秋季応用物理学会でシンポジウム(2009 年 9 月 10 日)「More than Moore に向けたネオシリコン材料の新展開」を開催、SORST メンバー 8 名を含めて 11 名 の招待講演者が 150 名の聴衆を対象に、ネオシリコン関連研究の成果と将来への展 望を講 2. 演し討論を行った。
  - 2. International Symposium on Atom -scale Silicon Hybrid Nanotechnologies for 'More-than-Moore' & 'Beyond CMOS' Era (2010 年 3 月 1-2 日)英国サザンプトン 大学で国際シンポジウムを開催、SORST メンバーを含む 23 名の世界的エキスパー トが講演を行う。100 名の出席を見込んでいる。SORST の成果を基に、ナノメカと ナノエレクトロニクスの新しい融合学問分野誕生の興奮を参加者が共有することを 目指している。
Japan Science and Technology Agency

## International Symposium on Atom-scale Silicon Hybrid Nanotechnologies for 'More-than-Moore' & 'Beyond CMOS' Era

Sponsored by JST (Japan Science and Technology Agency)

Date: 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> March 2010 Venue: Garden Court, University of Southampton, UK

## **Topics includes:**

- Top-down & bottom-up Si nanodevice technology
- Atomically-controlled Si nanostructure fabrication
- Electron transport in extremely-scaled Si nanostructures
- Si single-dopant device technology
- Si-based quantum information technology
- Si nano-electro-mechanical systems
- Heterogeneous silicon organic / inorganic interface
  Advanced panetechnologies for (More than Mean)
- Advanced nanotechnologies for 'More-than-Moore' applications

## Invited speakers

Prof. P. Beton (Nottingham, UK) Dr. M. T. Björk (IBM Zurich, Switzerland) Dr. D. R. Bowler (LCN, UK) Dr. Z. A.K. Durrani (Imperial College, UK) Dr. A. Ferguson (Cambridge, UK) Dr. A. Fujiwara (NTT BRL, Japan) Dr. S. Hoffmann (Cambridge, UK) Prof. N. Koshida (TUAT, Japan) Prof. M. Kraft (Southampton, UK) Prof. H. Matsumura (JAIST, Japan) Prof. H. Mizuta (Southampton, UK)

Prof. N. Mori (Osaka, Japan)

Dr. J. Morton (Oxford, UK) Prof. S. Oda (Tokyo Tech., Japan) Dr. Y. Ono (NTT BRL, Japan) Dr. N. Osakabe (Hitachi CRL, Japan) Prof. G. Parker (Southampton, UK) Prof. D. Pum (BOKU, Vienna) Prof. S. Rogge (TUDelft, Netherlands) Dr. S. Saito (Hitachi CRL, Japan) Prof. M. Tabe (Shizuoka, Japan) Dr. S. Uno (Nagoya, Japan) Dr. D. Williams (Hitachi Cambridge, UK)

Admission free. Please register by sending an email to hm2@ecs.soton.ac.uk (Hiroshi Mizuta)







5nm

サザンプトン国際シンポジウム(2010年3月)のポスター

9. 結び

ネオシリコンの構造制御については、均一粒径のナノシリコンを集積化配列させるとい う、だれも挑戦したことのないテーマに取り組んだが、2次元集積配列の大面積化にも展 望が開けて、ほぼ目的は達成された。しかし、2次元集積膜の形成に成功したのは、研究 期間の最終段階であり、ネオシリコン単層2次元膜の電気特性評価は出来なかった。ナノ ドット間の結合を更に強くするため、表面酸化膜厚を減少する技術や、直接窒化膜を利用 する方法などの対策が必要である。

ナノシリコン・メカニカル融合デバイスについては、シミュレーションにより多くの成 果を挙げることが出来た。NEMS メモリデバイスに付いては、電荷のやりとりが無いため非 常に消費エネルギーが小さいことや、蓄積電荷が孤立しているため、メモリ保持時間は 100 年以上が期待できるなど、他の不揮発性メモリと比較して特筆すべき特徴が明らかになっ た。NEMS メモリの実験的実証については、簡略化したデバイスの試作の最終段階である。

ナノ構造に特有なフォノン状態についても理論的、実験的に格段の進展を見た。バルク では存在しない、フォノンバンドギャップの存在を理論的に示し、実験的にはナノ構造の 電子フォノン相互作用に特有なサブピークを観測している。これらの発見は、ナノ物理学 における新しい学問分野の創成に繋がるインパクトの大きいものである。これらの成果を 元に 2010 年 3 月にはサザンプトン大学で国際シンポジウムを開催する。ナノメカとナノエ レクトロニクスの融合による新しい学問分野の到来を告げる会議になると期待されている。

NEMS 共振器構造を有する、シリコン超薄膜発光素子で光増幅を観測した実験事実は、当初の研究計画にはなかった、セレンディピティな成果であるが、シリコン初の注入型レーザとして大変注目されている。将来のシリコン集積回路内光配線の応用に期待されている。

これらの成果を総合すると、本研究の達成度としては、十分に及第点がとれると自己評価している。学術的な成果とは別に、若手研究者の要請にも大変な効果があった。SORSTの研究期間中には東工大だけでも13名の学生が博士課程を修了した。また、ケンブリッジ大学の博士課程修了者が東工大にポスドクとして採用され、東工大でポスドクを務めた研究者がインペリアルカレッジに採用された。さらに、東工大や農工大の博士課程学生は、ケンブリッジ大学やサザンプトン大学に3-6ヶ月間滞在して研究をおこなった。このように国際的な人材交流も盛んになり、指導教員が出張して情報交換するだけではなく、実際の研究担当者が直接国際共同研究を実施する体制が出来たことは、お互いの研究室に大変良い刺激をもたらすことが出来た。

最後に、プロジェクトの推進に当たりご指導いただいた三谷忠興先生、予算の執行や運 営に関して大変なご助力を頂いた、JST 事務所の三上技術参事、古賀技術参事、宮田事務参 事に深い感謝の意を表したい。

最後に、SORST ネオシリコンチームのチーム会議や研究室の集合写真を掲載する。プロジェクトの雰囲気が伝われば幸いである。



図 9-1 ケンブリッジ大学で開催 のチーム会議を終えたところ。 (2005 年 8 月)



図 9-2 富山国際会議場で開 催のチーム会議。 (2009 年 9 月)



図 9-3 卒業式後の 研究室謝恩歓送会 (2008 年 3 月)



図 9-4 研究室のクリスマス パーティ (2008 年 12 月)