

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 2日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2007 ～ 2011

課題番号：19101005

研究課題名（和文） 超並列電子線直接描画に関する研究

研究課題名（英文） Massive Parallel Electron Beam Lithography System

研究代表者

江刺 正喜 (ESASHI MASAYOSHI)

東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・教授

研究者番号：20108468

研究成果の概要（和文）：

本研究では超並列電子線直接描画に関する要素技術として、カーボンナノチューブ(CNT)を先端に成長させた電子源の作製方法、光によるスイッチングが可能な微小冷陰極、微小ステージの開発、静電レンズの新しい作製法の開発、などをおこなった。また、これらを組み合わせ、電子ビームをスキャンせず、ビームをスイッチングさせながらステージをスキャンさせる方式の超並列電子線描画システムの構築を試みた。

研究成果の概要（英文）：

The fabrication method for emitter with carbon nanotube at the top of the tip, optically controllable emitter, micro stage and the novel method for fabricate electro static electron rends are studied as one of the components of the massive parallel electron beam lithography system. With these components, prototype of the EB system was fabricated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	27,000,000	8,100,000	35,100,000
2008年度	24,400,000	7,320,000	31,720,000
2009年度	19,400,000	5,820,000	25,220,000
2010年度	10,300,000	3,090,000	13,390,000
2011年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
総計	84,800,000	25,440,000	110,240,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学 ・ マイクロ・ナノデバイス

キーワード：MEMS 電子描画装置

1. 研究開始当初の背景

フォトファブリケーションを基本とする集積回路製造技術を非平面的な方向に発展させた「マイクロマシニング」と呼ばれる微細加工技術は、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)を製作するのに使われている。この技術によって電子回路だけでなく機械や光など、多様な要素を組み合わせ、さらに多数配列させた構造が実現され、システムの鍵を握る重要な部分に使われている。マスクやレチクルと呼ばれる原版のパタ

ーンを光でウェハ上のレジストに一括転写するのがフォトリソグラフィの基本であり、これによる量産技術が確立している。これに対しコンピュータからのパターンデータで直接描画するマスクレス法は、大量生産には向いていないものの少量生産や開発には適している。微細パターンの最新のLSIでは1品種のチップ作製に必要なマスク代は1億円にもなるため少量では採算が合わない。また短い製品寿命のものでは開発期間を短縮することが要求されるためにマスクレス描画

が要望されている。これに応えるには電子線を使う必要があるが、そのスループットを大幅に改善しないと産業界の要求に応えることはできない。

電子線直接描画装置のスループットは 30 年ほど前には時間当たり 22 ウェハ描画できたものが、現在では 10 時間で 1 ウェハも描画できない。これは電子線描画装置の性能は 30 年で 2 桁ほど進歩したにもかかわらず、ウェハの大口径化と微細化の進歩によってウェハ当たりのデータ数は 4 桁以上多くなったためである。

これらの問題を解決するために複数の電子線を個別に制御し、描画を行うマルチ電子線描画装置というものが提案されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は半導体集積回路の製造で、特にその多品種少量生産や短期間開発に必要とされている高スループットのマスクレス電子線描画装置を開発することにある。

電流密度を上げ、スループットを大幅に上げる目的で、電界放出電子源からの低エネルギー電子を用い鏡筒を多数並列化した方式を目指している。同様なプロジェクトは欧州の "Nanolith" (K. B. K. Teo, J. Vac. Sci. Technol., B21(2), 693-697 (2003)) や米国の DARPA (L. P. Muray, J. Vac. Sci. Technol. B18, 3099-3104 (2000)) などでも行われているが、申請者らの研究はこれらと異なり 1 本のカーボンナノチューブ (CNT) を選択成長させて極小電子源にすることによって、静電レンズなどの電子光学系を単純化するものである。

超並列電子線描画装置に関する研究開始時までの研究で、シミュレーションでは 40nm ほどに集束できる見通しを得ており、また、Si 突起先端に CNT を選択成長させ、それからの電界放射電子やある程度の集束実験などを行っている。しかし多くの課題を抱えてお

り、本研究ではこれらの問題を解決して超並列電子線描画装置のプロトタイプを実現し、その基本的な評価を行う。

駆動用集積回路を実現することまでは本研究では行わないが、プロトタイプを試作しこのような並列電子線描画装置の実現可能性を実験的に検証する

3. 研究の方法

本研究では図 1 に示すように、研究総括(江刺)と各研究分担者が電子線描画システムの各要素の研究を分担する体制で研究を行った。

(1) 研究総括(江刺)

電子線描画以外にも近接場光による一括転写、走査トンネル顕微鏡プローブや近接場光プローブによる描画、マスクレス光描画によるグレースケールリソグラフィ、ダイヤモンドヒータプローブによる熱機械的描画、ダイヤモンドナノ構造や炭化珪素構造による加圧転写(インプリントリソグラフィ)など、リソグラフィについて様々な観点から研究を行ってきた。多数のプローブを配列させて並列化した、走査プローブ顕微鏡やデータ記録装置を研究してきたが、これはイメージングだけでなくパターン形成(描画)にも共通する技術であり総合的に研究を推進する。35 年前からのマイクロマシニングや MEMS に関する研究開発で蓄積した豊富な経験と試作設備を用い、試作・評価を繰り返しながら研究する。

(2) 電子源の製作と評価(小野・宮下)

電子源として、ニッケルなどの触媒を付けた Tip 先端部へ多層カーボンナノチューブ (MWNT) の選択成長を行い、それを電界放射電子源として用いる研究を行ってきた。

加熱した突端部からの電界放射を用いるショットキエミッタは安定した電子放出が期待できるため、CNT やダイヤモンドを用いたショットキエミッタの研究も行ってきた。

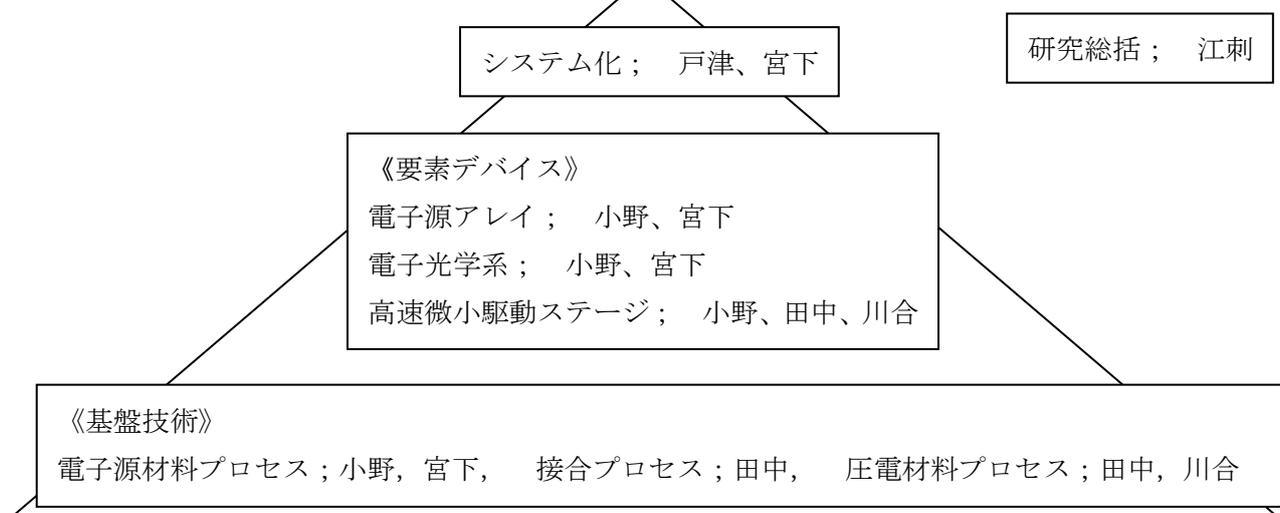


図 1 超並列電子線描画装置の要素と研究分担者の役割

ダイヤモンドはCVDで必要な形に作れるためヒータに突端があるショットキエミッタ形状を作れるが、電子源があまり小さくできない欠点があり、また加熱時の熱応力を回避する構造などの課題もある。現在までのCNTをTip先端に成長させた静電レンズ付き電子源では自己整合的に製作しているため電子源をゲート電極の中心に正しく作ることができているが、それらの間で電氣的に絶縁破壊する問題が残されている。これは間にある絶縁膜の絶縁破壊であるため、空隙を持つ構造にする必要がある。一方ダイヤモンドによるショットキエミッタの場合には、現在のものは自己整合的に製作していないため電子源とゲート電極の位置ずれで電子が斜めに引き出される欠点がある。これを自己整合的に製作するため、必要な技術としてプラズマ支援直接接合を用いて、応力無しの埋め込み酸化膜を形成する研究を行う。

その他電界放射性能の改善だけでなく、安定性や寿命等の課題を解決する必要がある。

この研究では電子源だけでなく、電子引き出し用のゲート電極や収束用の静電レンズなどを一体で形成する必要があり、それを可能にする構造や製法が最大の課題である。単純な静電レンズによる収束のシミュレーションと対比しながら、収束性能について実際に評価して改良する。

(3) 関連要素技術の開発 (田中・川合)

圧電材料であるチタン酸ジルコン酸鉛(PZT)のセラミックス板を用い、それに多層圧電アクチュエータと変位拡大機構などを形成したモノリシック6軸ステージを開発している。これは超並列電子線露光装置のステージとして用いるもので、電子源アレイのピッチ間隔だけスキャンしてそれぞれの電子源からの電子線をオンオフさせて並列に描画するものである。XYスキャンだけでなく位置合わせなどの調節のため高さや回転、さらに傾きなどを動かす6軸の運動機構が必要である。XY方向に十分大きな変位を得ることや、内蔵センサを用いたフィードバック制御などが課題として残されている。直接描画ではウェハ上のパターンに合わせて描画することが必要なため、そのための位置合わせ技術を検討する。

(4) 超並列電子線露光装置の試作と評価 (戸津)

従来の電子ビーム描画と大きく異なっている点は、電子ビームは偏向させずに電界放射をオンオフしながらステージをXYに走査して並列に描画する。具体的に装置を実現して、この新しい描画方式について評価を行うと共に改良する。

従来の数十kVで加速した電子線ではなく、kV以下での低加速電子を集束させて露光す

る。低加速の電子線によるレジスト露光は走査トンネル顕微鏡などで電子源を近接させた形では行われている。基本的に電子散乱による広がりはないため微細パターンに適しているが実績は少ないため、それに最適化したレジスト設計評価など多くの課題がある。

4. 研究成果

高速リソグラフィーのための超並列電子線描画装置を実現するには、電子線を放出する電子源が大量に並んだ電子源アレイ、電子源アレイからの複数の電子ビームを収束する電子レンズのアレイ、高速に駆動できる高速駆動ステージ、およびこれらのシステム化が必要であり、これらに関する研究を行った。

また、並列電子線描画のための描画システムを開発し、プロトタイプによる描画実験を行うことを目標に研究を遂行してきた。以下にこれらの研究成果を述べる。

(1) 電子源アレイ

本研究では水素終端により電子放出効率が非常に高くなると期待されているダイヤモンドを用い、ヒータ構造をもつショットキー型電子源を開発した(図2)。

また、電子源上に集積化した電子レンズアレイで電子線を収束できることをシミュレーションにより確認した(図3)。

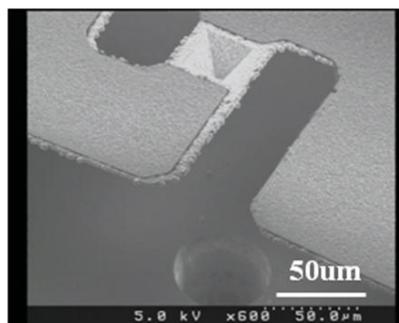


図2 ショットキー型ダイヤモンドエミッタ

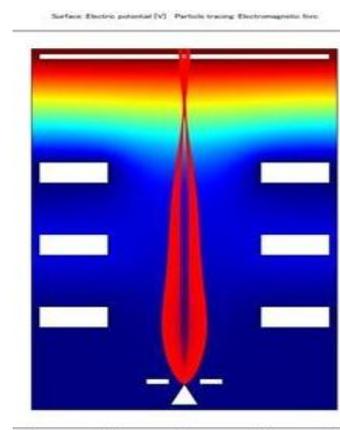


図3 電子レンズと集積化させた電子源からの電子軌道シミュレーション

CNT をエミッタとして用いると収束スポットを小さくでき、また引出電圧を下げることで、描画の解像度が向上すると期待できる。このためCNTのアレイからなる電子源の開発を進め、新しくCNTエミッタの作製方法を開発した。

この方法では、CNTの成長触媒をSiの突起先端のみに選択的に残し、単一CNTを先端に持つゲート電極付きの電子源を作製することに成功した(図4)。この電子源は、以前に作製した電子源などと比較して、セルフアライメントプロセスによりマスク1枚で作れる利点があり、また引出電圧も低い。

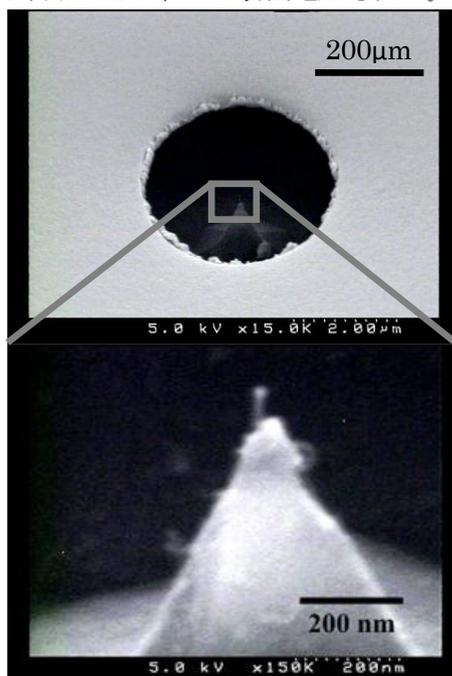
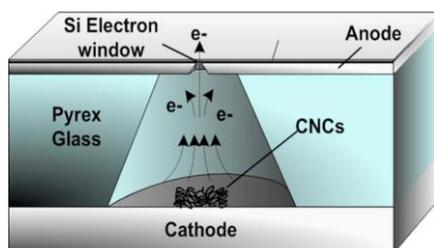


図4 単一カーボンナノチューブを成長させた電子源

CNTを用いた面放出型構造をもつ電子源も試作し、これまでと異なる、大気中に取り出した電子による近接電子描画システムでの



描画実験を行った(図5)。

この電子源は、真空中でCNTから電子を放出し、薄いシリコンの膜を通して大気中に電子を放出するものである。この電子源を用いて実際にレジストに描画シパターンが形成できることを確認した。

多数の電子線の制御のためにはアクティブマトリクスを用いる手法などいくつかの

方法があるが、電子源との接続用配線が複雑になるという問題がある。この問題を解決するために光により電子線を制御する光制御型電子源アレイの開発を行った。これは、電界放出素子のシリコン突起先端にp-n接合を作製し、ここに変調された光を当てることで電子線を制御するものである。本研究では静電レンズ付き電子源を試作し、原理検証実験により電子線の制御が可能であることを実証した(図6)。さらに、これを用いて超並列電子線描画システムの構築を行った。

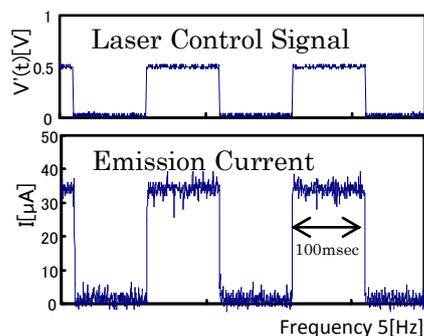


図6 光による電子放出の制御

電子源の研究と関連してCNTの成長法についても様々な手法について研究を行った。光制御型電子源にCNTを成長させ、電子放出特性を向上させることに成功した。

(2) 電子光学系

電子を収束させる電子レンズなど、微小な電子光学系の場合、積層プロセスでのアライメント誤差による電子光学軸のずれ等が大きな問題となる。これらの問題を解決するため電子レンズを構成する電極をアライメント無しで形成する新しい手法を開発した。

あらかじめ電極のもととなるシリコン基板とガラススペーサを積層しておき、反応性イオンエッチング(RIE)一気に貫通し、軸精度の高い静電レンズを作製した。これを用い、3つの電極を持つアインツェルレンズのアレイを作製した(図7)。

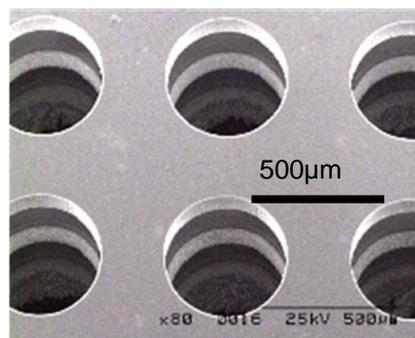


図7 深堀 RIE による静電レンズアレイ

また、同じく電子光学軸のずれを無くすため、このSiの結晶異方性エッチングによるエッチピットとマイクロボールを用いることで、電子レンズを電子源に高精度でアライ

メントして組立てることに成功した。また、新しく通電加熱ガラス融着技術を用いた組み立て技術を開発した。

(3) レジスト描画実験

面放出型構造をもつ電子源を用い、加速電圧 10kV での低加速電子線レジスト描画実験を行い、良好な描画結果を得た (図 8)。

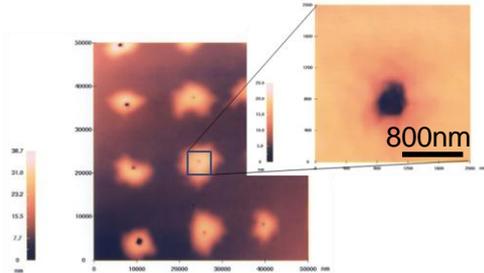


図 8 加速電圧 10kV での露光実験

さらに、光制御型電子源からの 1kV 以下の電圧で描画実験を行い、露光に成功した。

(4) 並列電子線描画装置用ステージ

これまで当研究室では、PZT を用いた多層圧電アクチュエータに微細加工によるシリコンステージを組み合わせた、ハイブリッド XY ステージの試作研究を行ってきたが、超並列電子線描画装置に応用するためには XY 方向に十分大きな変位を得ることや、内蔵の変位センサを用いたフィードバック制御などが課題として残されていた。この問題の解決のため Si でステージや変位拡大機構および変位センサを一体で製作し、PZT 板に形成した多層圧電アクチュエータを組み合わせた方式のステージを開発した (図 9)。

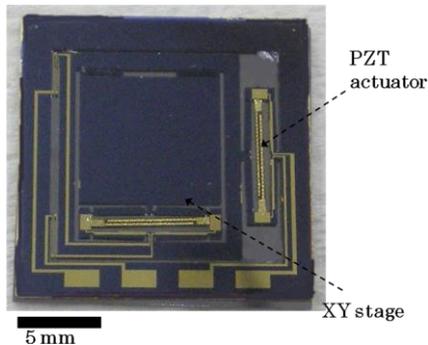


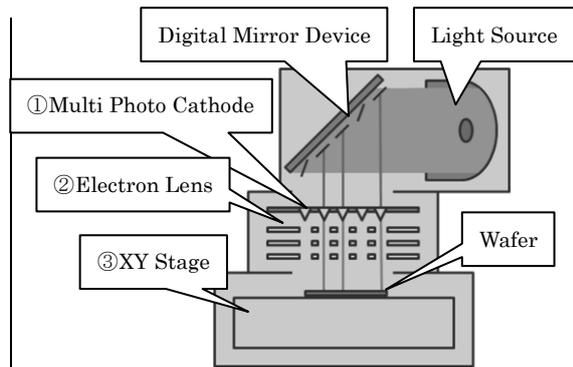
図 9 PZT 多層アクチュエータステージ

これを並列電子線描画露光用ステージに用い、高速に動かす方法について検討した。

(5) 超並列電子線描画システム

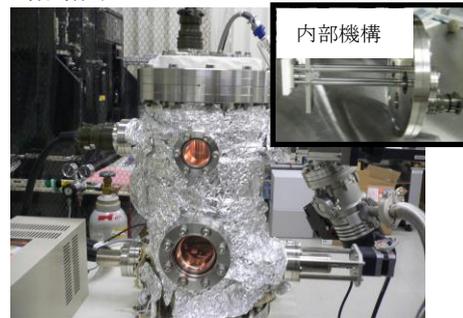
図 10 (a)-①②③に示す並列電子線描画システムの各要素が上記のようにそれぞれ完成してきており、これらをシステム化した超並列電子線描画装置を作製した。

この装置は本研究課題中の電子源アレイの研究で新しく提案し開発された光制御型電子源アレイを用いている。超並列電子線描画装置の実現に向けて図 10 (b) に示すよ



(a) 光制御電子源型超並列電子線露光装置

概略図



(b) 超並列電子線露光装置の外観

図 10 超並列電子線露光装置の各要素とプロトタイプシステム

うなプロトタイプとなる装置を作製した。上記の低加速電圧によるレジスト描画実験は本装置を用いて、おこなわれた。また、本装置には上記の光制御型並列電子源を用いているが、デジタルミラーデバイス (DMD) を用いて、光制御型並列電子源を駆動させるた



図 11 光制御型電子源アレイへのレーザー照射用光学系

めの光学系を設計・作製した。(図 11)。

さらに、初回のプロトタイプ装置で真空中での光路が長すぎるという問題をはじめ、いくつかの問題点が見つかったことを踏まえ、セカンドプロトタイプ装置を作製した。

(6) その他要素技術・派生技術

その他にも本研究から接合技術や、CNT の成長・加工技術、マルチプローブを用いたデータストレージ技術等が開発されている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

1. “Modeling and experimental validation of the performance of a silicon XY-microstage driven by PZT actuators”, M. Sabri, T. Ono, and M. Esashi, Journal of Micromechanics and Microengineering, 査読有, Vol. 19, 2009, pp. 095004-1~095004-9.
2. “Photolithographic fabrication of gated self-aligned parallel electron beam emitters with a single-stranded carbon nanotube”, J. Ho, T. Ono, C. Tsai, & M. Esashi, Nanotechnology, 査読有, Vol. 19, 2008, pp. 365601-1 ~ 365601-5
3. “Bonding of a Si microstructure using field-assisted glass melting”, H. Seki, T. Ono, Y. Kawai, & M. Esashi, Journal of Micromechanics and Microengineering, 査読有, Vol. 18, 2008, pp. 085003-1~085003-5
4. “Proximity electron lithography using permeable electron windows”, W. Cho, T. Ono, & M. Esashi, Applied Physics Letters, 査読有, Vol. 91, 2007, pp. 044104-1~044104-3
5. “Fabrication of diamond Schottky emitter array by using electrophoresis pre-treatment and hot-filament chemical vapor deposition”, C. Tsai, T. Ono, & M. Esashi, Diamond & Related Materials, 査読有, Vol. 16, 2007, pp. 1398-1402

[学会発表] (計 30 件)

1. “Optically controllable emitter array with pn-junction integrated Si tip” Y. Tanaka, H. Miyashita, E. Tomono, M. Esashi, & T. Ono, 24th International Vacuum Nanoelectronics Conference, pp. 76-77, Jul. 18, 2011, Wuppertal, Germany
2. “A Large Displacement Piezodriven Silicon XY-Microstage”, M. Sabri, T. Ono, & M. Esashi, the 15th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2009), pp. 2405-2408, Jun. 21-25, 2009, Denver, USA
3. “Multiprobe systems for data storage and other applications” M. Esashi, T. Ono, & S. Yoshida, 5th International Symposium on Instrumentation Science and Technology (ISIST’ 2008), pp. 258-259., Sep. 15-18, 2008, Shenyang, China

[図書] (計 5 件)

1. 江刺正喜, はじめての MEMS, 森北出版株式会社 (2011), 全 230 頁
2. T. Ono, M. Sabri, & M. Esashi, Next Generation Actuators Leading Breakthroughs, Springer (2010), Chapter 6, PZT Driven Micro XY Stage, pp. 55-66.
3. 小野崇人, MEMS/NEMS 工学全集, 桑野博喜監修, テクノシステム (2009), 薄膜形成技術 (pp. 330-333), カーボンナノチューブ (pp. 486-489), 走査型プローブ顕微鏡 (pp. 740-745)
4. 小野崇人, MEMS マテリアルの最新技術, カーボンナノチューブ, 江刺正喜 監修, CMC 出版 (2007), pp. 25-32.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: “電子線描画装置用光スイッチング電子源”

発明者: 宮下英俊、小野崇人、江刺正喜、友納栄一、川合祐輔

権利者: 国立大学法人 東北大学

種類: 出願

番号: 2010-045994

出願年月日: 2010 年 3 月 2 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ

www.mems.mech.tohoku.ac.jp

www.nme.mech.tohoku.ac.jp

6. 研究組織

(1) 研究代表者

江刺 正喜 (ESASHI MASAYOSHI)

東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・教授

研究者番号: 20108468

(2) 研究分担者

小野 崇人 (ONO TAKAHITO)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 90282095

田中 秀治 (TANAKA SYUJI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 00312611

戸津 健太郎 (TOTSU KENTARO)

東北大学・マイクロシステム融合研究センター・准教授

研究者番号: 60374956

川合 祐輔 (KAWAI YUSUKE)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 20451536

宮下 英俊 (MIYASHITA HIDETOSHI)

東北大学・マイクロシステム融合研究センター・助教

研究者番号: 00401258

(3) 連携研究者

無し