

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23686016

研究課題名(和文) 表面プラズモン超集束を用いた高密度光制御電子源アレイの開発

研究課題名(英文) Development of High-density optically-controlled field emitter array based on surface plasmon superfocusing

研究代表者

岩見 健太郎 (Iwami, Kentaro)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80514710

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、プラズモン共鳴による電界放出の増強を利用した光制御電界放出電子源アレイの開発をめざし、電子線放出に適した電子源構造の検討および光照射方法の開発、電子源アレイの製作と評価を行った。高密度に集積化された電子源アレイに対し、個別的な光制御によって効率的な電界放出の増強を行うために、軸対称偏光によるプラズモン励起が効率的であることが分かった。これを可能にすべく、軸対称偏光子を多数アレイ化した素子を製作した。本研究の過程で金属ナノ構造からなるマイクロ光変調素子を製作し、可視光域で非常に高い透過率を得られることを示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, an electron field emitter array based on plasmon-resonant excitation is studied and developed. In order to excite highly-densed field emitters individually, radially-polarized excitation is found to be effective. Therefore, an array of radial polarizer array is needed. To realize this, a micro optical retarder based on gold nanograting is studied and successfully developed. This structure has very high transmittance over other plasmonic nano optical devices, because of its higher aspect ratio.

研究分野：MEMS

キーワード：MEMS NEMS プラズモニクス 電子ビーム 微小電子源 冷陰極 マイクロマシン 微細加工

1. 研究開始当初の背景

電子線リソグラフィや電子顕微鏡検査の高速化のため、超並列微小電子源の開発が喫緊の課題となっていた。しかし、多数並んだ電子源を電氣的に個別制御することが難しく、実現に至っていなかった。研究代表者は本研究開始まで、光学的に電子放出を制御する「プラズモン共鳴電子源」の原理を提案し、科学研究費補助金の支援を受けて研究を推進してきた。本課題では、この原理をさらに詳細に探求するとともに、この原理を発展させた「プラズモン超収束電子源」を確立するための研究開発を目的とした。その実現のため、裏面からの光照射によって動作する電子源アレイの開発を目的とした。

2. 研究の目的

電子線リソグラフィや電子顕微鏡検査の高速化のため、並列電子ビーム源や並列電子ビーム偏向器が研究されている(江刺ら JVSTB* 2004, Kruitら JVSTB 2007 等)。これらは一般的に高速化のために集積数・集積密度を向上させることが求められるが、電子放出の原理である電界放出に強い電場が必要なためスイッチング素子が小型化できないこと・配線の取り回しに多くの面積が必要となること等のために電子源を高密度に配置できないという問題がある。電場を低下させるために突端にカーボンナノチューブなどの高アスペクト比構造による電場集中効果を利用することや(Teoら JVSTB 2003)、負の電子親和力を持つ材料を利用すること(Yangら Science 2007)が研究されているが、前者では突端に1本だけナノチューブがついた構造を高い歩留まりで多数作ることが困難であり、後者では材料への電子の供給に難がある。このように、従来の電氣的な電子ビーム制御方法では高速化に必要な集積度を達成することが難しく、実用化のめどが立っていない。

これに対し申請者は、光照射によって電子線放出を制御する「プラズモン共鳴電子放出」という方式を独自に提案し、科学研究費補助金の支援を得て研究を推進してきた。この方法は、金属中の自由電子の集団振動であるプラズモン共鳴を電界電子放出に利用するもので、照射光の波長が電子源の形状・材質によって決まる固有の値に一致した場合、放出電流が共鳴的に大きくなる現象である。光照射による電子線放出方式はいくつかあるが、それらに比べて本方式は以下のような特徴を有している。

- (1) 低強度の連続波レーザーで励起が可能であり、光励起電界放出に従来用いられていたフェムト秒レーザーのような超短パルスレーザーが不要である。
- (2) 電子ビーム放出に必要な閾値は40%以上低下する。
- (3) 照射時/非照射時の放出電流比が 10^2 オーダーと、従来の手法(1~ 10^1 オーダー)に比べ大きい。

この方式を並列電子源に利用すれば、図1の構想図に示すように、電子源・引出電極間に常に電圧を印加しておき、ミラーアレイデバイス(例えば、Texas Instruments社製デジタルマイクロミラーデバイス; DMD等)を用いて個々の電子源に選択的に光を照射することで、高速に電子線放出ができると考えられる。しかし、本方式の詳細な原理はまだ明らかになっておらず、また並列電子源への適用可能性についてもさらなる研究を要する点が残されている。そこで本研究は、プラズモン共鳴電子線放出の原理の解明を進めるとともに、これを利用した光制御並列電子源への応用の基盤を確立することを目的とした。

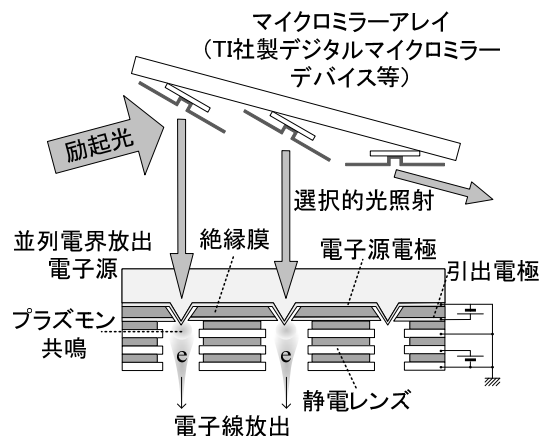


図1 光制御並列電子源の構想図

3. 研究の方法

(1) 軸対称偏光照射に対するプラズモン共鳴特性と、裏面照射への応用

裏面からの光照射による電子ビーム放出制御を行った。この方式では、高屈折率媒質を先鋭化して金薄膜をコーティングすることにより電子源電極とし、電子源電極表面に絶縁膜と引き出し電極を配置する。電子源電極のテーパ部と絶縁膜・引き出し電極間には空隙を設ける。この構造に裏面から光を入射すると、電子源電極のテーパ部において表面プラズモンが発生し先端に向かって伝搬する。伝搬したプラズモンが先端付近に集中するので、電子ビーム放出が可能となると考えられる。

(2) 裏面光照射により動作するプラズモン共鳴電子源アレイの製作(小規模)

電子源を、14 μmピッチで配列した並列電子源デバイスを製作した。放出される電子ビームの電流などを計測した。さらに、裏面から光照射した場合の放出特性について調査した。

(3) 軸対称偏光照射によるプラズモン共鳴特性と、裏面照射への応用、ならびにプラズモン共鳴を効率的に励起するための金ナノグレーティング型光学位相氏の製作および軸対称偏光子への応用

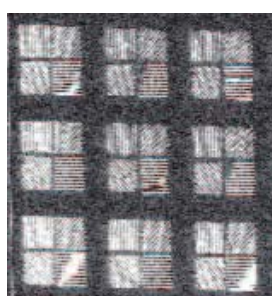
裏面照射において、電子ビーム放出を効率的に励起するのに必要な変更状態および照射条件について、数値計算に基づいて評価を行った。また、裏面光照射によって効率的にプラズモン共鳴を発生させるためには、軸対称偏光の利用が有効となる。本課題では、アレイ状の電子源一つ一つに対し、軸対称偏光を発生させるため、アレイ化可能なマイクロ軸対称偏光子の製作を行った。そして、その構成要素である、金属ナノグレーティングからなる1/2波長板を製作した。それを発展させ、具レーティング構造の機械的変形による位相変調素子を作成した。

4. 研究成果

3. の(1)について、透明基板上に金属突起構造からなる電子エミッタアレイを製作し、裏面からの光照射による放出電流の増強を確認した。これは直線偏光照射によって行ったが、増強度は側面照射の場合に比べて劣ったものとなった。強い増強度を得るためには、軸対称偏光を利用した裏面照射が効率的であることがわかり、電子源と集積化可能なマイクロ軸対称偏光子の製作に取り組むこととした。

3. の(2)について、電子源を3万個程度配列した電子源アレイを製作した。このアレイは引き出し電極を備え、低い電圧で電子放出を行うことが可能であった。

3. の(3)について、図2に示すような、可視波長軸対称偏光子アレイを製作した。金属スリット構造が有する巨大複屈折の性質を生かし、波長以下の厚みの極薄1/2波長板を多数配列してある。さらに、金属ナノスリット型メタサーフェスに熱アクチュエータを集積化した位相変調素子を提案し、可視光(波長500-700nm)で位相を変調することに世界で初めて成功した。



10 μm

図2 ナノスリット型可視波長軸対称偏光子アレイ

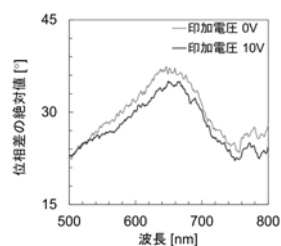


図3 可変金属グレーティングによる位相変調特性

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 4 件)

- ① 石井美帆、岩見健太郎、梅田倫弘、「A1 ナノスリットアレイを用いた可視-紫外域用透過型位相子」、レーザー研究, 43 (2015)304-308 [査読有] DOI: 10.2184/laj.43.304
- ② M. Ishii, K. Iwami, N. Umeda, “High efficiency plasmonic optical retarder for visible wavelength based on Au nanofin array”, Applied Physics Letters, 106 (2015) pp. 021115 1-4 [査読有]DOI: 10.1063/1.4905369
- ③ K. Iwami, S. Kaneko, R. Shinta, J. Fujihara, H. Nagasaki, Y. Matsumura, and N. Umeda, “Plasmon-resonance dew condensation sensor made of gold-ceramic nanocomposite and its application in condensation prevention”, Sensors and Actuators B: Chemical, 184, pp. 301-305 (2013) [査読有] DOI:10.1016/j.snb.2013.04.011
- ④ K. Iwami, M. Ishii, Y. Kuramochi, K. Ida, and N. Umeda, “Ultrasmall radial polarizer array based on patterned plasmonic nanoslits”, Applied Physics Letters 101 (16), pp. 161119 1-4 (2012) [査読有] doi:10.1063/1.4761943

[学会発表] (計 18 件)

- ① 志村崇、石井美帆、岩見健太郎、梅田倫弘「熱駆動型金属ナノスリットを用いたマイクロ光学位相変調器」、第31回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム, くにびきメッセ (島根県松江市), (21/10/2014)
- ② 鈴木順也、岩見健太郎、梅田倫弘「サファイアの反応性イオンエッチングにおけるマスク材が表面粗さに与える影響」、第31回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム, くにびきメッセ (島根県松江市), (20/10/2014)
- ③ 石井美帆、岩見健太郎、梅田倫弘「ナノコーティングプロセスによる金ナノフィ

- ン光学位相子」, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス (札幌市北区), (18/09/2014)
- ④ T. Shimura, K. Iwami, M. Ishii, N. Umeda, “CONFIGURABLE OPTICAL RETARDER BASED ON PLASMONIC GRATING INTEGRATED WITH BIMORPH ACTUATOR”, 2014 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN2014), 22/Aug/2014, Glasgow, UK, pp. 139-140, DOI: 10.1109/OMN.2014.6924560
- ⑤ 岩見健太郎, 志村崇, 石井美帆, 梅田倫弘「金属ナノグレーティングを用いた可視・紫外光学位相子と可変メタマテリアルへの応用」, 第 39 回光学シンポジウム, 東京大学生産技術研究所(東京都目黒区), (27/06/2014)
- ⑥ 石井美帆, 岩見健太郎, 梅田倫弘「金属ナノスリット構造を用いた微小光学位相子」, 日本機械学会関東支部第 20 期総会・講演会, 東京農工大学小金井キャンパス (東京都小金井市), (15/03/2014)
- ⑦ 岡野貴央, 岩見健太郎, 梅田倫弘「高速電子ビームリソグラフィのためのプラズモン共鳴電子源アレイ」, 日本機械学会関東支部第 20 期総会・講演会, 東京農工大学小金井キャンパス (東京都小金井市), (15/03/2014)
- ⑧ 佐藤勝久, 岩見健太郎, 梅田倫弘「プラズモン共鳴を援用した熱電子発電素子に関する研究」, 日本機械学会関東支部第 20 期総会・講演会, 東京農工大学小金井キャンパス (東京都小金井市), (14/03/2014)
- ⑨ 石井美帆, 岩見健太郎, 梅田倫弘「アルミニウムナノスリット構造によるマイクロ近紫外 1/2 波長板」, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 同志社大学京田辺キャンパス (京都府京田辺市), (19/09/2013)
- ⑩ Miho Ishii, Kentaro Iwami, Norihiro Umeda “Plasmonic half-waveplate based on gold nanoslit and its application to ultrasmall radial polarization converter”, SPIE Optics and Photonics 2013, 29/Aug/2013, San Diego, CA, USA, Proc. SPIE 8809, 880922 1-6 (2013) DOI: 10.1117/12.2024785
- ⑪ J. Suzuki, K. Hirata, K. Iwami, A. Taguchi, N. Umeda, “PHOTOCHEMICAL POLISHING OF SAPPHIRE SUBSTRATE BASED ON NONADIABATIC OPTICAL NEAR-FIELD ETCHING”, 2013 IEEE International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN2013), 21/Aug/2013, Kanazawa Bunka Hall, Kanazawa, Japan, pp. 121-122, DOI: 10.1109/OMN.2013.6659089
- ⑫ M. Ishii, K. Ida, K. Iwami and N. Umeda, “Microfabricated half-waveplate based on Gold Fin Array”, The 9th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (APNF02013), 5/Jul/2013 Singapore, pp. 113
- ⑬ 井田健一, 岩見健太郎, 梅田倫弘「石英-金フィールドエミッタアレイにおけるプラズモン共鳴電子放出」, 日本光学会年次学術講演会(OPJ2012)、タワーホール船堀 (東京都江戸川区)、2012 年 10 月 24 日
- ⑭ 石井美帆, 井田健一, 岩見健太郎, 梅田倫弘「プラズモニックナノスリットによる光学位相子」日本光学会年次学術講演会(OPJ2012)、タワーホール船堀 (東京都江戸川区)、2012 年 10 月 24 日
- ⑮ 岩見健太郎, Jae Hyung lee, Igor Bargatin, Karl A. Littau, Maxime Vincent, Roya Maboudian, Z. -X Shen, Nicholas A. Melosh, and Roger T. Howe, “Wafer-Scale Encapsulation of Thermionic Energy Converter”, 第 73 回応用物理学会学術講演会、愛媛大学・松山大学 (愛媛県松山市)、13p-F7-9, 2012 年 9 月 12 日
- ⑯ Miho Ishii, Yuzuru Kuramochi, Kenichi Ida, Kentaro Iwami and Norihiro Umeda, “Microfabricated Radial Polarization Converter based on Gold Plasmonic Nanoslit”, JSAP-OSA Joint Simposia, 11a-G1-5, 11/Sep/2012, Ehime University, Matsuyama, Japan
- ⑰ Kentaro Iwami, Yuzuru Kuramochi, Miho Ishii, Kenichi Ida, and Norihiro Umeda, “Microfabricated radial polarization converter based on plasmonic nanoslit array retarder”, The 12th International Conference on Near-field Optics, Nanophotonics & Related Techniques (NFO-12), pp. , 6/Sep/2012, Donostia - San Sebastian, Spain
- ⑱ Kentaro Iwami, Kenichi Ida, Norihiro Umeda, “Gold-Tip Cathodes for Plasmon-Assisted Field Emitter Array”, 2011 24th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC2011), pp.108-109, 20/Jul/2011, Wuppertal, Germany

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 偏光制御素子、近接場光源、および並列電子線装置

発明者: 岩見健太郎、梅田倫弘

権利者: 国立大学法人東京農工大学

種類: 特許

番号：WO2014/003146

出願年月日：平成 25 年 6 月 27 日

国内外の別： 国外

○取得状況（計 1 件）

名称：電子放出装置および電子放出方法

発明者：岩見健太郎、梅田倫弘

権利者：国立大学法人東京農工大学

種類：特許

番号：第 541376 号

出願年月日：平成 21 年 4 月 28 日

取得年月日：平成 25 年 11 月 22 日

国内外の別： 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://nmems.lab.tuat.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩見 健太郎 (IWAMI, Kentaro)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：80514710

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし