

機関番号：12605

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009~2010

課題番号：21760048

研究課題名 (和文) プラズモン共鳴を利用した低電圧駆動光制御並列電界放出電子源の研究

研究課題名 (英文) Optically-driven field emitter array based on plasmon resonance

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・助教

研究者番号：80514710

研究成果の概要 (和文)：プラズモン共鳴を電界電子放出に応用した。

金蒸着したタングステンナノ探針先端に光を照射した際の電界電子放出応答について調べ、プラズモン共鳴波長照射時に電子線放出が最も増強されることが分かった。また、光変調に応じた電子線放出の変調が見られた。これらの結果から、プラズモン共鳴による電子線増強メカニズムを明らかにし、最大 217 倍の電流増倍を達成した。この原理に基づき、電子源アレイを製作した。

研究成果の概要 (英文) : Application of plasmon resonance to electron field emission has been studied. Emission characteristics of gold sharp tip formed on electrochemically-sharpened tungsten apex were investigated under laser irradiation at several wavelengths. Electron beam current was maximized under irradiation at the plasmon-resonant wavelength, and optically emission control was demonstrated. These study clarified the mechanism of plasmon-resonant field emission, and the maximum enhancement factor of 217 was achieved. Field emitter array based on this principle was fabricated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：プラズモニクス

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 ・ 応用物理学一般

キーワード：プラズモン、電子ビーム、ビーム応用、電子線リソグラフィ、MEMS、電子デバイス・機器、応用物理学一般、電界放出

1. 研究開始当初の背景

電子線描画装置の高速化のために、マイクロマシニング技術を用いて一括製作された並列電子線描画装置が研究されている(江刺ら、JVSTB 2004)。しかしながら、電子源の引き出し電圧が高くスイッチング素子が小型化できないことから、電子源を高密度に配置できないという欠点があった。さらに、電

子源と引出電極間で絶縁破壊が起こるために寿命が短い。引出電圧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、後者では材料の長期的な安定性に問題があった。

2. 研究の目的

金属粒子や先鋭化した金属探針の突端に光を照射すると、局所プラズモンが励起されることが知られている。入射光の周波数が、材料や形状によって決まる値に一致した場合、プラズモン共鳴により局所的な電場増強効果が得られ、その大きさは入射光の電場の数十倍～数百倍にも達する。このような強い電場のもとで電界放出を行うと、引出電圧が低くともトンネル障壁を十分に小さくすることが期待できる。さらに、電子源・引出電極間に常に電圧を印加しておき、レーザーが照射されたときだけ電子線を放射する光制御方式が実現できれば、配線の問題がクリアし、高密度に配置された並列電子源が期待できる。そこで本研究では、レーザー照射により電子源突端部にプラズモン共鳴を励起し、その電場増強効果によって引出電圧を低下させること、さらに光照射による電子線のオン・オフ制御が可能な電界放出電子源を製作することを目的とする。さらに、この電子源を多数並べた構造である並列電界放出電子源を試作し、長寿命化が可能であるか評価することを目的とした。これらに基づいて、以下の研究目的を掲げた。

- (1) 電子源突端の共鳴周波数に一致する光でプラズモンを励起した場合、引出電圧がどれだけ下げられるか。究極的には、数V程度の低電圧での動作が可能であるか。
- (2) 引き出し電圧を一定に保った場合、光制御による電子線のオン・オフが可能であるか。
- (3) プラズモン共鳴により低電圧で電子源を駆動すると、絶縁膜の寿命がどれだけ向上するか。

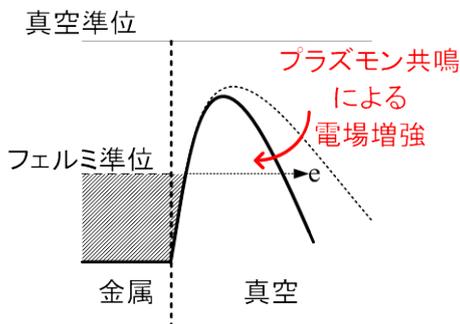


図1 電場増強に基づくプラズモン共鳴電子放出モデル

3. 研究の方法

電界放出実験を行うためには、圧力 10^{-6} パスカ程度の高真空環境が必要となる。この環境を得るため、本研究課題の2009年度の経費を利用して超高真空チャンバおよびロータリーポンプを購入した。これと所有していたターボ分子ポンプを組み合わせ、上記の超高真空環境を実現した。

電子源として、当初は先端曲率の均一性がよい商用の走査プローブ顕微鏡に金蒸着加工を施して製作することを想定していたが、電圧印加によるプローブの曲がり変位が問題となることが分かった。そこで、電子源として、電解研磨によって先鋭化したタングステン線にクロムと金を真空中で連続性膜したものをを用いた。クロムおよび金の膜厚はそれぞれ10、20 nmであった。電子顕微鏡観察によって、金電子源先端の曲率半径は100 nmと推定された。また、エネルギー分散型X線分析法により、先端部に金が成膜されていることが確認された。

この電子源のプラズモン共鳴波長を、電磁場解析法の一つである有限差分時間領域法 (Finite difference time domain; FDTD) を用いて数値解析した。パルス波を電子源に照射した際の、電子源先端の電場の時間応答をフーリエ変換することで、周波数特性を計算した。その結果、共鳴波長は530 nm付近と計算された。そこで、波長532 nmのYAG SHGレーザーをプラズモン共鳴波長として実験を行った。電子源を 5×10^{-6} Paまで真空引きしたチャンバ内に設置し、レーザーを照射しながら電界放出実験を行った。レーザーには波長442、532、633 nmの3種類を用いた。これらのレーザーの出力および偏光方向は、1/2波長板および直線偏光子によって調整した。引き出し電圧に印加する電圧を変化させながら、電子源を流れる電流値を測定し、電流電圧特性をプロットした。

4. 研究成果

レーザー非照射および各波長照射のすべての場合について、指数関数的な電流-電圧特性が得られた。これは、電子線放出の原理が電界放出であることを意味する。さらに、レーザー照射によって電流値が増加した。レーザーの照射パワーはいずれも8.3 mWに固定していた。特筆すべきことに、3種類の波長の中で532 nmの場合に最も大きな電流増倍が得られた。これは、プラズモン共鳴による効果を反映していると考えられる。

この効果の起源を解明するため、Fowler-Nordheimの理論に基づく解析を行った。金の仕事関数を5.0 eVとすると、非照射の場合、電子源先端における電界集中効果 $\beta = 7.5 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ と計算された。これは、電子顕微鏡観察による電子源の先端曲率を

考えると妥当な値である。また β から、電子線放出時の先端における電界は $10^7 \sim 10^8 \text{ Vcm}^{-1}$ と見積もられる。レーザー光の焦点における光電場は、この値に比べ 3~4 桁小さい。このことは、当初想定していた図 1 のような電場増強による電子放出モデルの過程が成り立たないことを示す。そこで、 β は光照射に対して不変であると仮定して、放出面積と有効仕事関数を計算した。その結果、放出面積と有効仕事関数の両方とも、532 nm の照射時に最小値を取っていることが分かった。このことは、プラズモン共鳴によって、自由電子が効率的に励起されたことと、電子の存在領域が局在化したことを意味すると考えられる。

この効果を利用した、プラズモン共鳴電子源アレイを製作した。テンパックスガラス基板の両面に Cr 膜を成膜し、片方を保護して他方をパターンニングした。パターンは直径 6 μm の円形とし、13.68 μm 間隔で横 1024 個 \times 縦 768 個アレイ化されている。クロム膜パターンをマスクとしてガラス基板を等方性エッチングし、電子源の鋳型となる突起構造を製作した。ここに金薄膜を成膜することで、電子源を製作することができる。この電子源を用いた電界電子放出を達成した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- [1] Kentaro Iwami, Arata Iizuka and Norihiro Umeda, “Electron field emission properties under laser irradiation at the plasmon-resonant wavelength”, *Journal of Vacuum Science and Technology B*, **29** (2) 02B103 pp. 1-5 (2011) 査読有
- [2] Kentaro Iwami, Arata Iizuka and Norihiro Umeda, “Electron field emission based on plasmon resonance”, *Proceedings of SPIE*, **7544**, 75443O pp.1-6 (2010) 査読無
- [3] Kentaro Iwami, Takahito Ono and Masayoshi Esashi
“Design and fabrication of a scanning near-field microscopy probe with integrated zinc oxide photoconductive antennas for local terahertz spectroscopy”, *Sensors and Materials*, **22** pp.135-142 (2010) 査読有

[学会発表] (計 8 件)

- [1] A. Iizuka, K. Iwami, and N. Umeda, “Laser Stimulated Electron Field Emission at the Plasmon Resonant Wavelength”, The 6th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS 2010), 23 February 2011, Kaohsiung, Taiwan
- [2] Kentaro Iwami*, Arata Iizuka, Norihiro Umeda, “Electron field emission based on plasmon resonance”, 6th International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation (ISPEMI 2010), 10/Aug/2010, Hangzhou, China
- [3] Kentaro Iwami*, Arata Iizuka, Norihiro Umeda, “Field Emission from the gold emitter under laser irradiation at the plasmon resonant wavelength”, 11th International Conference on Near-field Optics, Nanophotonics & Related Techniques (NFO-11), 30/Aug/2010, Peking University, Beijing, China
- [4] Kentaro Iwami*, Arata Iizuka, Norihiro Umeda, “Field Emission Properties under Laser Irradiation at the Plasmon Resonant Wavelength”, IEEE 23rd International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC 2010), 29/Jul./2010, Palo Alto, USA
- [5] Kentaro Iwami*, Arata Iizuka, Norihiro Umeda, “Current enhancement of electron field emitter illuminated by plasmon-resonant wavelength laser”, The 7th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (APNFO-7), 25/Nov./2009, Jeju, Korea
- [6] Kentaro Iwami*, Arata Iizuka, Norihiro Umeda, “An electron field emitter assisted by electric field enhancement of plasmon resonance”, 2009 International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2009), 19/Nov./2009, Sapporo, Japan
- [7] 飯塚新、岩見健太郎、梅田倫弘
「プラズモン共鳴による電界放出の増強」
2009 年秋季 第 70 回応用物理学会学術講演会、富山大学、2009 年 9 月 9 日
- [8] 飯塚新、岩見健太郎、梅田倫弘
「電界放出電子源へのプラズモン共鳴波長レーザーの照射による電流の増加」、2009 年日本光学会年次学術講演会(OPJ2009)、新潟、2008 年 11 月 25 日

〔図書〕（計1件）

樋口俊郎・大岡昌博監修、梅田倫弘・岩見健太郎、株式会社 エヌ・ティー・エス、「新アクチュエータ開発最前線」エバネッセント場による光マニピュレータの開発、2011年5月

〔産業財産権〕

○出願状況（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：東京農工大学

種類：特許

番号：特願 2009-109717

出願年月日：2009年4月28日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tuat.ac.jp/~umedalab>

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・助教

研究者番号：80514710

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

梅田 倫弘 (UMEDA NORIHIRO)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：60111803