

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 6月 8日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21310083

研究課題名（和文）マイクロレンズ一体型フィールドエミッタの構造最適化

研究課題名（英文）Structure optimization of a field emitter with a built-in micro electrostatic lens

研究代表者

長尾 昌善（NAGAO MASAYOSHI）

独立行政法人産業技術総合研究所・ナノエレクトロニクス研究部門・主任研究員

研究者番号：80357607

研究成果の概要（和文）：

電子顕微鏡などへの応用を目的とし、微小なフィールドエミッタと多段の静電レンズをシリコン基板上に一体成形したマイクロレンズ一体型フィールドエミッタを提案し、その作製プロセスの確立と構造最適化を行った。その結果、イオン照射を活用するなどにより、薄膜と厚膜プロセスを両立した作製技術を確立した。また、電子ビームを収束させるための新たなウェネルト電極構造を考案し、充分小さな電子ビーム形成の見込みを得た。

研究成果の概要（英文）：

We proposed a field emitter with a built-in micro electrostatic lens, in which micron-sized field emitter and multi-stacked electrostatic lens are integrated on a silicon substrate, in order to achieve a tiny scanning electron microscope. We optimized and established the fabrication process by using ion irradiation technique, and so on. We also proposed new wehnelt electrode for obtaining strongly focused electron beam.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	10,600,000	3,180,000	13,780,000
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011年度	2,200,000	660,000	2,860,000
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

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：マイクロファブリケーション

1. 研究開始当初の背景

ミクロンサイズの微小なフィールドエミッタ（以下、単にエミッタと略することがある）に、電子ビームを集束させるための集束電極（レンズ）を一体化する構想は、電子ビームリソグラフィへの応用の期待から1990年代に盛んに研究が行われた。これまで論文レベルで試作が発表されているものは、すべて、2枚の電極（つまり、一枚は引き出しゲート電極、もう一枚が集束電極）の構成であり、ダブルゲートエミッタと呼ばれている。しか

しながら、この構造では電子ビームの集束と電流量の維持が両立しないことがすでわかっていた。これは集束電極の数を増やすことで解決できる。しかし、電極をさらに多重に積層したものは、構想として発表されたり、特許として出願されたりはしているが、実際に試作したという報告はまだなかった。この要因は、多層の電極をエミッタの上に何段も形成することの困難さが原因である。通常であれば、フォトリソグラフィのアライメント精度などが影響し、エミッタの中心軸とレ

レンズ電極の開口の中心を精度良く合わせるのがきわめて困難である。

そのような背景の中、我々は多段の電極からなる静電レンズ（以下、マイクロレンズと呼ぶ）を一体集積したエミッタの作製方法を発明した。我々の方法は、多段の開口レンズをセルフアラインで位置あわせができるという特徴を有している。研究開始時の試作段階では引き出しゲート電極と3枚のアインツェルレンズを集積したものまで作製できることを確認していた（図1）。この方法を使えばレンズ電極の段数を増やすことはさほど困難ではないと思われたので、さらに段数を増やして集束特性を向上させることも可能であると考えた。

このような、マイクロレンズ一体型のフィールドエミッタは電子ビーム装置に応用可能で、電子ビーム装置の飛躍的な小型化に貢献できる。例えば、cm オーダーの小さな電子顕微鏡（SEM）や、半導体ラインの様々な装置に組み込める SEM などへと応用できる。本研究で提案しているマイクロレンズ一体型フィールドエミッタはまさにこのような超小型の電子ビーム装置の開発を容易にする、あるいは、さらに小型化にするのに寄与するものと期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、電子ビーム軌道シミュレーションによって構造の最適化を行い、その最適化した構造を実際に試作し電子ビームの集束特性を評価し、その結果をフィードバックすることで、実際のデバイスにおいても最適な集束条件が得られるようなデバイス構造を決定していく。しかしながら、デバイス構造は作製プロセスにも依存する。到底作製できないような構造をシミュレーションして、理想的な構造だと言っても意味がない。したがって、実際に作製可能な構造でシミュレーションを行う必要があるが、それだけでも不十分である。つまり、作製方法を向上させ、より幅広い自由度のある作製プロセスを構築することも本研究の重要な目的である。

3. 研究の方法

上記したように、より幅広い自由度のある

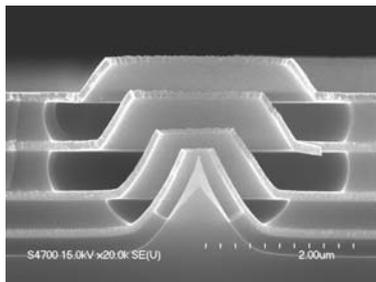


図1 マイクロレンズ一体型フィールドエミッタの試作例

作製プロセスを構築することも本研究の大きな目的の一つであるので、ここではまず、本研究のマイクロレンズ一体型エミッタの作製方法について、概要を説明しておく。この方法の最も基本的な工程を図2に説明する。シリコン基板などをエッチングすることで先鋭なエミッタを形成し、その上に絶縁膜となる SiO_2 膜と電極膜を成膜する(a)。その後フォトレジストを回転塗布すると平坦な部分は厚く、突起状の部分は薄くなる(b)。これをリアクティブイオンエッチング (RIE) などのドライエッチングをかけることでレジストの薄いエミッタ先端部分の電極のみ選択的にエッチングできる(c)。最後にフォトレジストを除去する(d)。この方法は、フォトレジストの回転塗布を利用しているので、高精度の位置あわせの必要がない（セルフアライン）。図2で示した方法を複数回適用し、最後にエミッタの直上の SiO_2 膜をバッファードフッ酸 (BHF) により除去すれば、図1に示したような構造が完成する。

この構成において電子ビームの集束を大きく左右するパラメータは電極の縦方向間隔を決定する絶縁膜の厚さ、各電極の開口径、電極の段数の3つである。収束特性を向上させるためには、レンズを厚くする必要があり、それは、絶縁膜を厚くすることに対応する。絶縁膜を厚くするにあたっての第1の障害は、エミッタの上に厚い膜を積んでいくと上の方の電極は平坦化が起きるので、図2の方法で開口できなくなってしまうという問題

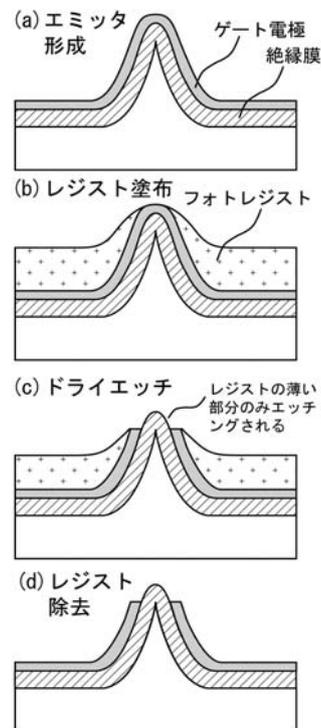


図2 マイクロレンズ一体型フィールドエミッタの作製工程の基本部分

である。したがって、絶縁膜をこれ以上熱くするためには①エミッタそのものも図1の $1\ \mu\text{m}$ より大きくしなければならない。また、開口径を正確に制御しようとする図2に示した方法では対応できなくなるので、②新たなエッチバック方法を開発する必要も出てくる。さらに、膜厚を厚くすると応力による剥離も起こるようになるので、③剥離が起きないような成膜条件を見つけていかなければならない。この他にも、電極エッジがエッチング工程でギザギザになるので、④エッジラフネスを低減する必要がある。さらには⑤実際に作製する上で発生する課題を克服していく必要がある。研究成果(1)ではここに上げた①~⑤について詳しく報告する。

構造最適化にあたっては、計算機シミュレーションにより、電子ビームの集束が最適になるような構造を模索する。具体的には、①レンズ電極の間隔を決定する絶縁膜の厚さ、②各電極の開口径、を変化させて集束特性の違いを調べていく。研究成果(2)では、ビームのフォーカスを向上させるための新しい構造としてウェネルト電極を挿入することを提案し特許化したのでその部分について詳しく述べる。

4. 研究成果

(1) マイクロレンズ一体型フィールドエミッタの作製プロセスの確立

①エミッタの大型化に伴う課題とその対策：エミッタを大きくするのは、マスク設計の問題のみであろうと思われたが、実際に試作してみると克服べき課題もあった。本研究ではエミッタを形成するマスクのサイズを $1\ \mu\text{m}$ から $3\ \mu\text{m}$ へと大きくした。その分エッチ時間が長くなる。エッチング時間が長くなると、エッチング速度のほんのわずかな結晶面方位依存性が顕在化してくる。本研究で用いたエッチング条件では、(001)面と(011)面のエッチング速度に8%の差があったため、 $1\ \mu\text{m}$ の小さなマスクパターンでは円錐形状にエッチングできたものが、 $3\ \mu\text{m}$ のマスクパターンでは先端がピラミッド状の四角錐形状になってしまった。エッチング条件を最適化することで完全に等方的にエッチングできる条件も見つかる可能性があるが、その場合にはエミッタのアスペクト比が下がってしまうため、望ましくない。本研究では、エッチングに用いるマスクパターンを8%の差を設けることでほぼ円錐のエミッタを形成することに成功した。図3にマスクの形状とエッチング後のエミッタの形状の関係を示す。

②エッチバック方法の改善：低粘度のレジストを使ったエッチバックプロセスでは、エミッタの高さに応じて粘度を変える必要があるなど、ゲート開口径の制御性が悪い。そこ

で、逆にレジストの粘度を高くし、レジストのみをエッチングしゲート電極を露出させる工程と、露出した電極をエッチングする工程にわたる方法を採用した。今回エミッタの高さは $3\ \mu\text{m}$ 程度であるので、使用したレジストの厚みは $4\ \mu\text{m}$ とした。レジストのみのエッチング工程は O_2 による RIE でおこない、電極のエッチングは SF_6 のみによる RIE を行うことで、レジストへのダメージを低減し、エッチング中に過度にゲートが広がるのを抑えた。これにより、エミッタの大きさが変わってもゲート開口径を制御できるようになった。

③絶縁膜の厚膜化に伴う課題：電極間隔を広げるために絶縁膜を厚くすると、それだけ膜中に発生する内部応力が大きくなり、薄膜の剥離が起きる。成膜した直後には剥離が起きなくても、プロセスの最終段階である BHF に浸漬した際にも剥離は起こる。本デバイスでは多層の薄膜を形成しているその全ての界面で剥離を抑えなければならない。ゲート電極は DC スパッタで成膜しており、圧縮応力が発生している。一方、絶縁膜はプラズマ援用化学気相合成法 (PE-CVD) で成膜しており、我々が膜厚の面内の均一性を重視して決定した条件 (TEOS ガス流量 $7\ \text{sccm}$ 、酸素ガス流量 $300\ \text{sccm}$ 、圧力 $106.4\ \text{Pa}$ 、高周波電力 $200\ \text{W}$ 、基板温度 $350\ ^\circ\text{C}$) では、引張応力となる。この電極膜と絶縁膜の応力の向きの違いが剥離の主な原因であると考えられる。

本研究では、電極膜 ($200\ \text{nm}$) に比べて絶縁膜の膜厚 ($1\sim 2\ \mu\text{m}$) が一桁程度厚い。したがって、絶縁膜の応力を制御することで薄膜の剥離を避ける方法を検討した。応力は、薄膜の成膜条件によって変化する。PE-CVD ではガスの流量、圧力、投入する高周波電力、基板温度などがパラメータとして制御できる。これらのパラメータを変化させて絶縁膜の応力の制御を試みた。その結果、PE-CVD の

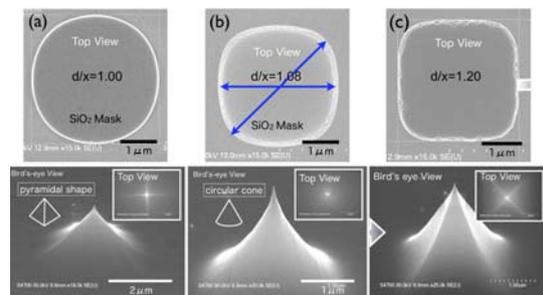


図3 マスク形状とエッチング後のエミッタティップの形状の関係。上段がマスク形状で、 d/x は(001)方向と(011)方向の長さの比。下段が形成されたエミッタ形状。 $d/x=1.08$ の時のみ円錐形状が形成できた。

成膜パラメータのうち、高周波電力を変化させても、膜の応力は制御できなかったが、基板温度とガスの流量比（TEOS と酸素ガスの比）で制御できることを見出した。図5は成膜パラメータと応力の関係を示している。TEOSの流量が小さいほど、また、基板温度が高いほど圧縮側に応力が強くなることがわかった。

これらの条件の内、引張応力の強い条件と圧縮応力の強い条件において、電極膜100nmとSiO₂膜1μmの組み合わせを7層成膜した構造を作製し、その基板を劈開した後BHFに浸漬し、界面から剥離が起こるかどうかの試験を行った。その結果、引張応力の強い条件では剥離が起こったが、圧縮応力の強い条件では剥離は全く起きないことを確認することができた。この成膜方法を採用することで、トータルの膜厚が10μm程度までは剥離が起きずに絶縁膜と電極膜の積層構造が形成できるようになった。

④エッジラフネスの低減方法：エッチング端面に生じるラフネスはイオン照射により低減できることを見いだした。ゲート開口端へと25 keVのAr⁺イオンを10¹⁶個/cm²照射すれば、エッジが丸くなり微小な凹凸が無くなっていることが確認できた。

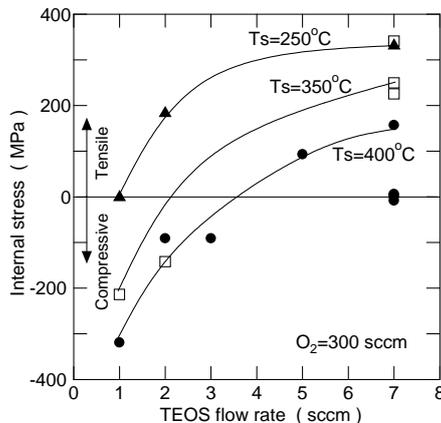


図5 PE-CVDで成膜したSiO₂薄膜の内部応力の成膜パラメータ依存性

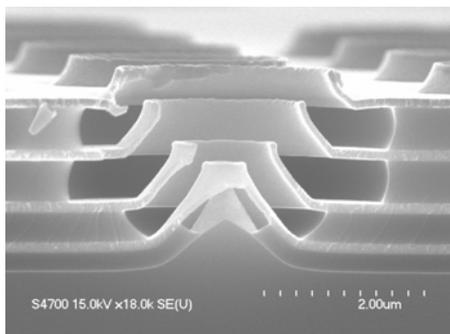


図6 イオン照射によりエッジラフネスを低減したデバイス

⑤電極の腐食とその解決策：初期の試作では電極にはNbを用いてきた。これは、NbがBHFには腐食されず、またSiO₂との密着性がよく、SF₆ガスを用いたRIEにより簡単にエッチングが可能であるという特徴を持っているからである。しかしながら、酸化膜を厚くしたデバイスの作製においては、これまでBHFでは腐食されなかったNb電極が腐食されると言う問題が発生した。腐食は電極全面にわたって起こるのではなく局所的に発生する。図7はNb電極がBHF浸漬により腐食された様子である。Nb電極がリング状に腐食されて亀裂が入っている。また、図には示していないが、断面観察の結果から腐食は電極の裏面から起こっていることが確認できた。また、Nbとは別にBHFではエッチングされない他の金属（MoとMoSi₂）を用いて、デバイス試作を行ったが、やはりいずれの金属でも腐食が発生した。この電極の腐食は特定の条件が重なると発生することがわかった。その条件は下記のようなものである。

- 開口のあるゲート電極構造にのみ腐食が発生する。（平坦な膜では腐食は起きない。また、ゲート電極と同様の構造であっても開口を行っていないと腐食は起きない。）
- 腐食されるのは、ゲート電極の立ち上がりの部分だけである。
- ゲート電極をパターンニングしなければ腐食は起きない（ゲート電極がウエハ面に連続膜になっている状態では腐食は起きず、孤立した電極パターンにした場合のみ腐食される）
- Nb、Mo、MoSi₂のいずれであっても腐食は発生する。（いずれも、本来はBHFで腐食されない金属である）

このような特徴があることから、成膜の際に生じる薄膜の内部構造に起因しているのではないかと考えた。具体的には、電極の立ち上がる境界付近でのみ腐食が起こるので、平坦なところに成長する薄膜と、斜面の部分に成長する薄膜とがぶつかり合う境界部分で、薄膜の内部構造がいびつになっているのが原因ではないかと推測した。したがって、そのいびつな内部構造を壊してしまえば腐食が起きないのではないかと考え、ゲート金属

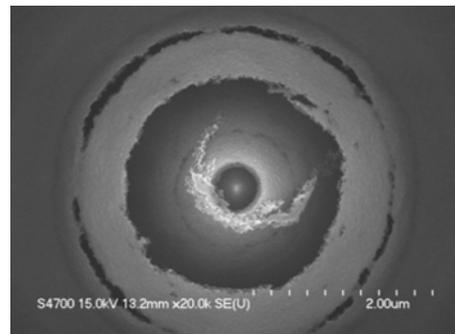


図7 Nb電極がBHFにより腐食された様子

膜に対して多量のイオン注入を行い、薄膜の内部構造をアモルファス化することを検討した。ゲート電極の構造を形成した後、BHF浸漬する前にイオン注入装置を用い Ar^+ イオンを 100 keV、 1×10^{16} ions/cm² のドーズ量でゲート電極膜に注入した。その結果、 Ar^+ イオン照射したものは腐食が全く起きなくなることが確認できた。

(2) マイクロレンズ一体型フィールドエミッタの構造最適化 (ウェネルト電極の提案)

①5 段ゲート型マイクロレンズのビームプロファイル評価：試作した 5 段ゲートのマイクロレンズ一体型フィールドエミッタの電子ビーム系を擬似ナイフエッジ法により評価した。その結果ビームスポット系は 40 μm 以下であることが確認でき、また、ビームの集束動作には欠かせないクロスオーバーが形成できていることも確認できた。

このクロスオーバー形成について、電子ビーム軌道計算を行い検証した。電子ビーム軌道計算には境界電荷法による電子軌道計算プログラムを用いた。図 8 にシミュレーション結果を示す。各ゲート電極の印加電圧条件は、電子ビームスポットサイズが最も狭小化される条件である。この結果から、静電レンズによって形成されるクロスオーバーの焦点距離が、電子軌道の内周部と外周部で異なることがわかる。静電レンズによりクロスオーバーを形成するのは外周部近傍の軌道のみで、かつ焦点距離が非常に短い事がわかる。また一方軸近傍の軌道は弱いレンズ効果しか受けておらず、長い焦点距離を持つ事、クロスオーバーを形成しない軌道が含まれている事等が今回明らかとなった。

②ウェネルト電極の提案：上記のような欠点は、エミッタから放射される電子の初期の発散角が非常に大きく、それにより収差が発生しているからである。そこで、エミッタから放射される電子ビームの放射角の広がりを抑える手段として引き出し電極の内側に更

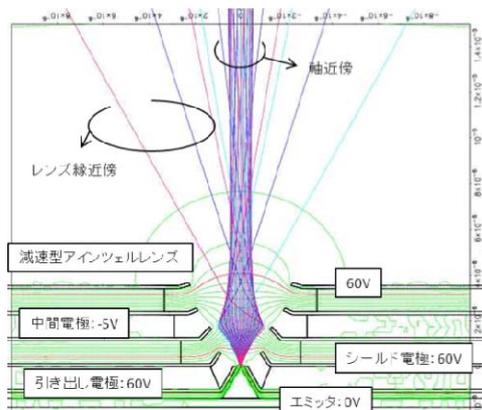


図 8 5 段ゲートマイクロレンズ一体型フィールドエミッタの電子軌道結果

に 1 段の電極を加えることを提案した。この電極をウェネルト電極と呼ぶことにする。図 9 はウェネルト電極を挿入しない従来構造 (a) と、ウェネルト電極を挿入した新構造 (b) の電子源の電子放射角のシミュレーション結果である。ウェネルト電極にはエミッタと同じかそれよりも若干低い電圧を印加することで、エミッタ先端での電界の分布を平行平板の電界分布に近づけることが可能となり放射角の狭小化を実現するものである。ウェネルト電極に印加する電圧は低ければ低いほど狭小化の効果は上がる。また、ウェネルト電極の位置も、エミッタ先端と同じであれば最も効果が高くなる。しかしながら、それに伴い引き出し電極にはより高い電圧を印加する必要が生じ、結果として絶縁破壊を起こしてしまう可能性も出てくる。様々な条件をシミュレーションした結果、ウェネルト電極の高さがエミッタ先端から 100nm 低く配置する構造が、破壊することなく安定に動作しなおかつ、ビーム径が最も狭小化出来る構造であることがわかった。

③6 段ゲートマイクロレンズ一体型フィールドエミッタ：上記の収差の影響と、ウェネルト電極の効果を踏まえ、従来の 5 段ゲート型マイクロレンズにウェネルト電極を挿入した 6 段ゲートマイクロレンズの検討を行った。図 10 にウェネルト電極を有する 6 段ゲートマイクロレンズ一体型フィールドエミッタの電子ビームの収束特性を示す。ウェネルト

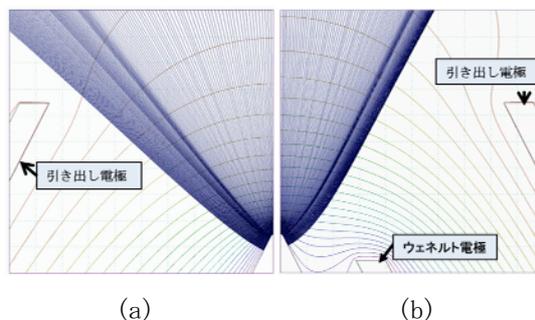


図 9 (a)従来構造と(b)ウェネルト電極を挿入した場合の電界分布と電子放射角

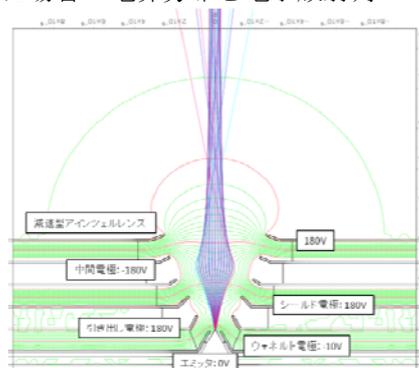


図 10 ウェネルト電極を有する 6 段ゲートマイクロレンズの収束特性

電極によりエミッタ先端からの電子の放射書くが狭まり、電子軌道がより軸に近い位置を通過するため、より小さなクロスオーバーを形成できることが確認できた。

以上まとめると、作製上の課題を克服し、設計自由度の大きいマイクロレンズ一体型フィールドエミッタの作製方法を確立した。また、充分小さなクロスオーバーを形成できる構造としてウェネルト電極を有する構造を提案し、シミュレーションおよび実デバイスにおいてその動作を確認した。

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 小池昭史、田上智也、高木康男、吉田知也、長尾昌善、青木徹、根尾陽一郎、三村秀典、“Emission and Focusing Characteristics of a Quintuple-Gated Field Emitter Array”, Applied Physics Express, 査読有, Vol. 4、2011, pp. 026701-1~026701-3.
DOI: 10.1143/APEX.4.026701
- ② 小池昭史、高木康男、藤野高弘、青木徹、根尾陽一郎、三村秀典、吉田知也、長尾昌善、酒井健太郎、村田英一、“Design of an Electrostatic Lens of the Micro-Column Microscopes using a Multi-Gated FEA”, Advanced Materials Research, 査読有, Vol. 222, 2011, pp. 94-97.
DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.222.94
- ③ 高木康男、小池昭史、藤野高弘、青木徹、根尾陽一郎、三村秀典、西孝、吉田知也、長尾昌善、酒井健太郎、村田英一、“Fabrication of the Field Emitter Array with a Built-in Suppressor Gate”, Advanced Material Research, 査読有, Vol. 222, 2011, pp. 209-212.
DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.222.209

[学会発表] (計13件)

- ① 長尾昌善、“Field Emitter Array Technology developed in AIST”, International Meeting on Information Display, 2011/10/11, 韓国・ソウル
- ② 吉田知也、“Revised Fabrication of Field Emitters with a Multi-stacked Electrostatic Lens”, International Vacuum Nanoelectronics Conference, 2010/7/26, 米国・パロアルト
- ③ 長尾昌善、“Field emitter array with a

built-in multi-electrode lens”, International Vacuum Nanoelectronics Conference, 2009/7/24, 浜松

[産業財産権]

○出願状況 (計3件)

- ①名称：電界放出素子
発明者：長尾昌善、吉田知也、根尾陽一郎
権利者：(独) 産業技術総合研究所、静岡大学
種類：特許
番号：PCT/JP2010/070416 (WIPO)
出願年月日：2010年11月10日
国内外の別：外国
- ②名称：電子顕微鏡
発明者：長尾昌善、吉田知也、金丸正剛、根尾陽一郎
権利者：(独) 産業技術総合研究所、静岡大学
種類：特許
番号：PCT/JP2010/068200 (WIPO)
出願年月日：2010年10月15日
国内外の別：外国
- ③名称：電界放出素子
発明者：長尾昌善、吉田知也、根尾陽一郎
権利者：(独) 産業技術総合研究所、静岡大学
種類：特許
番号：特願 2009-259464
出願年月日：2009年11月13日
国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等

http://staff.aist.go.jp/my.nagao/zhen_kongnanoerekutoronikusu/Research/entori/2010/4/1_maikurorenzu_yi_ti_xingfirudoe_mittano_kai_fa.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長尾 昌善 (NAGAO MASAYOSHI)

(独) 産業技術総合研究所・ナノエレクトロニクス研究部門・主任研究員
研究者番号：80357607

(2) 研究分担者

吉田 知也 (YOSHIDA TOMOYA)

(独) 産業技術総合研究所・ナノエレクトロニクス研究部門・研究員
研究者番号：80462844

(3) 連携研究者

根尾 陽一郎 (NEO YOICHIRO)

静岡大学・電子工学研究所・助教
研究者番号：50312674