

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5971631号
(P5971631)

(45) 発行日 平成28年8月17日(2016.8.17)

(24) 登録日 平成28年7月22日(2016.7.22)

(51) Int.Cl.		F I	
HO 1 J 37/12	(2006.01)	HO 1 J 37/12	
HO 1 J 37/317	(2006.01)	HO 1 J 37/317	D
HO 5 H 5/00	(2006.01)	HO 5 H 5/00	

請求項の数 8 (全 9 頁)

(21) 出願番号	特願2012-197645 (P2012-197645)	(73) 特許権者	505374783
(22) 出願日	平成24年9月7日(2012.9.7)		国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
(65) 公開番号	特開2014-53202 (P2014-53202A)		茨城県那珂郡東海村大字舟石川765番地
(43) 公開日	平成26年3月20日(2014.3.20)		1
審査請求日	平成27年9月2日(2015.9.2)	(74) 代理人	100074631
			弁理士 高田 幸彦
		(72) 発明者	石井 保行
			群馬県高崎市綿貫町1233番地
			独立行政法人日本原
			子力研究開発機構 高崎量子応用研究所内
		(72) 発明者	大久保 猛
			群馬県高崎市綿貫町1233番地
			独立行政法人日本原
			子力研究開発機構 高崎量子応用研究所内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 高電位勾配型単一ギャップ加速管

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

アノード電極と、イオンビームの軸方向において前記アノード電極と対向するように前記アノード電極と平行に配置されたカソード電極と、前記アノード電極と前記カソード電極の間で、それぞれが絶縁体を介して所定の間隔で複数段に配置された中間電極とから構成された、イオンビームの加速と集束を行う単一ギャップ加速管において、

前記アノード電極が、前記イオンビームの軸と平行な垂直片とその軸に垂直な水平片から成る断面L字型の電極であって、前記垂直片の先端が前記カソード電極の方向に延びており、前記水平片の先端が絶縁体に固定されており、かつ

前記複数個の中間電極が、前記アノード電極と相似形の断面L字型をなし、それぞれの垂直片の先端が、前記カソード電極の間に電界を形成するように前記カソード電極と対向するように配置され、それぞれの水平片の先端が前記絶縁体に固定されていることを特徴とする高電位勾配型単一ギャップ加速管。

【請求項2】

請求項1に記載の加速管において、前記中間電極の垂直片の先端形状が、ナイフエッジ形状であることを特徴とする高電位勾配型単一ギャップ加速管。

【請求項3】

請求項1または2に記載の加速管において、前記中間電極の垂直片の先端が、イオンビームの光軸から離れるにしたがって、前記カソード電極に近い位置に配置されていることを特徴とする高電位勾配型単一ギャップ加速管。

【請求項 4】

請求項 1 乃至 3 のいずれかに記載の加速管の周囲全体を、加速管本体の高さを超える超高分子量ポリエチレンのカバーで覆い、該カバーと前記加速管の間に絶縁ガスを封入することを特徴とする高電位勾配型単一ギャップ加速管の使用方法。

【請求項 5】

請求項 4 に記載の高電位勾配型単一ギャップ加速管の使用方法において、前記絶縁ガスが2気圧以上のSF₆ガスであって、前記アノード電極と前記カソード電極の間に、300kVの電圧を印加することを特徴とする高電位勾配型単一ギャップ加速管の使用方法。

【請求項 6】

ガスイオン源と、該ガスイオン源からイオンビームを加速するための加速レンズ系と、該加速レンズ系で加速されたイオンビームを、さらに加速及び集束させるための請求項1記載の高電位勾配型単一ギャップ加速管とから構成されるガスナノビーム形成装置。

10

【請求項 7】

請求項 6 に記載のガスナノビーム形成装置において、前記加速管の前記中間電極の垂直片の先端形状が、ナイフエッジ形状であることを特徴とするガスナノビーム形成装置。

【請求項 8】

請求項 6 または 7 に記載のガスナノビーム形成装置において、前記加速管の前記中間電極の垂直片の先端が、イオンビームの光軸から離れるにしたがって、前記カソード電極に近い位置に配置されていることを特徴とするガスナノビーム形成装置。

【発明の詳細な説明】

20

【技術分野】

【0001】

本発明は、主として、微細加工に使用される集束イオンビーム(FIB)装置の高電圧用加速管に係り、特に、加速と集束を同時に行う小型かつ高エネルギーの高電位勾配型単一ギャップ加速管に関する。

【背景技術】

【0002】

加速と集束を同時に行うFIB装置用の加速管としては、特許文献1に開示されたものが知られている。この文献に開示された小型高エネルギー集束イオンビーム装置では、イオン源から発生されたガス状のイオンが、加速レンズ系を構成する中央に一つの孔を備えた多段電極に供給され、その孔を通過する際にその電極によって生ずる電位の作用により加速されると同時にそのガスイオンの径を順次集束化させるように構成されている(図8を参照)。ここでは、加速レンズ系で加速され、且つ集束化されたガスイオンが、加速管を構成する多段電極の中央孔を通過する際に更に加速されると同時に、加速管電極の電場作用によりガスイオンを更に集束化させることで、その集束点におけるイオンビームを、ナノミリメートル単位まで微細にしている。

30

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】特許第4,665,117号

40

【非特許文献】

【0004】

【非特許文献1】Y. Furuta, H. Nishikawa, T. Satoh, et al. Nucl. Instr. and Meth. B, 267(2009)2285-2288

【非特許文献2】Y. Ishii, A. Isoya, T. Kojima, Nucl. Instr. and Meth. B, 210(2003)70-74

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

上述の特許文献1に開示された従来の高電圧用加速管は、図8から理解されるように上

50

下両端のアノード電極とカソード電極の間に多段の平行平板状の中間電極を挿入し、電位固定をすることにより、数100 kV領域までの高電圧を印加できる構造となっている。この加速管の中間電極間の電場は10 kV/cm程度である。しかし、この加速管に代表されるような従来の加速管では、微細加工を行うために、高縮小率を得ようとする、集束点が電極間に形成され、最小ビーム径を得ることができない。逆に集束点をレンズ外に形成しようとする、低縮小率となり、集束レンズとして十分に機能しなくなるという問題点があった。

【0006】

上述の理由についてさらに詳細に説明する。従来の加速管をレンズとして使用する場合、レンズの縮小率(D)はアノード電極(Va)とカソード電極(Vc)の比を加速比(N)とし、物点距離(a)、像点距離(b)とすると、一次近似で次式のようになる。

10

【0007】

【数1】

$$D = \frac{a}{b} \sqrt{\frac{V_c}{V_a}} = \frac{a}{b} \sqrt{N} \quad (1)$$

【0008】

この式から、縮小率Dを大きくするには、a/bを大きくするか、ルートNを大きくするか、或いはこれらの両方を大きくすることが考えられる。像点距離bをレンズ外とし、この大きさを変えないで、a/bを大きくするためには、物点距離aを長くすることが必要になる。しかし、一般的な加速管では、像点距離bをレンズ外とするには、加速管の長さに近い、あるいはこれ以上のbが必要であるため、a/bの値を更に大きくするには、この物点距離aを更に長くすることになり、これは装置の大型化に繋がる。一方、N値を大きくする方法としては、Vcを大きくするか、Vaを小さくすることが考えられる。Vaを小さくする方が、Vcを大きくするより、効果的であるが、集束イオンビーム装置では、イオン源からイオンビームを発生することから、イオンビームの引き出し電圧のVcが最小になるため、下限値が存在する。一方、Vcを大きくすることにも、電極間の放電の問題から限界値が存在する。このため、一般的な加速管を用いて、集束点をレンズ外とする条件下で、縮小率を大きくすることは、困難である。

20

30

【0009】

また、縮小率以外にも、荷電粒子を集束する際には、収差が発生する。収差のうち、球面収差と色収差が特に重要な収差であるが、これらを小さくすることが必要になる。これらの収差を小さくするためには、収差係数を小さくすることが必要になる。収差係数は荷電粒子が電場から受ける力の積分値であるため、電場が存在する距離が長いとその分この値が増大する。即ち、収差の点からも、従来型の加速管は、集束レンズとして使用することは難しい。

【0010】

また、従来の加速管は、中間電極形状が平行平板であるため、電場は放電の開始となる電子と平行に形成される。このため、より高エネルギーのイオンビームを得るために一層の高電圧を印加しようとする、カソード側の金属表面で発生した電子は平行電場で直線的に加速され、エネルギーが増大した電子がアノード電極に達し、電極にぶつかる。このとき、電極表面から二次イオンや電子が発生し、イオンは電場で加速されてカソード電極に当たり、再度二次イオンや電子が発生する。これが繰り返されると、イオン電子の雪崩現象となり、最終的に放電が発生する恐れがあるという問題があった。

40

【0011】

さらに、このような従来の加速管は、中間電極がイオンビーム軸方向に等間隔に形成された多数の平行平板電極によって電場を形成しているため、電場が存在している距離が長くなり、収差の原因となる収差係数も大きくなるという問題があった。

50

【0012】

したがって、本発明の目的は、従来の加速管では得られない極めて高い縮小率が得られ、高電圧を印加しても放電を発生することがなく、かつ収差の原因となる収差係数が比較的小さい、加速と集束を同時に行う小型かつ高エネルギーの高電位勾配型単一ギャップ加速管を提供することにある。

【0013】

本発明の他の目的は、本発明の主たる目的を達成するための高電位勾配型単一ギャップ加速管を効果的に使用するための使用方法を提供することにある。

【0014】

本発明のさらに他の目的は、本発明の主たる目的を達成するための高電位勾配型単一ギャップ加速管を用いた、最適なガスナノビーム形成装置を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0015】

本発明の一つの観点にかかる高電位勾配型単一ギャップ加速管は、アノード電極と、イオンビームの軸方向において前記アノード電極と対向するように前記アノード電極と平行に配置されたカソード電極と、前記アノード電極と前記カソード電極の間で、それぞれが絶縁体を介して所定の間隔で複数段に配置された中間電極とから構成された、イオンビームの加速と集束を行う単一ギャップ加速管において、前記アノード電極が、前記イオンビームの軸と平行な垂直片とその軸に垂直な水平片から成る断面L字型の電極であって、前記垂直片の先端が前記カソード電極の方向に延びており、前記水平片の先端が絶縁体に固定されており、かつ前記複数個の中間電極が、前記アノード電極と相似形の断面L字型をなし、それぞれの垂直片の先端が、前記カソード電極の間に電界を形成するように前記カソード電極と対向するように配置され、それぞれの水平片の先端が前記絶縁体に固定されていることを特徴としている。

【0016】

本発明の別の観点に係る加速管の使用法では、上述の構成を持つ加速管の周囲全体を、加速管本体の高さを超える超高分子量ポリエチレンのカバーで覆い、該カバーと前記加速管の間に絶縁ガスを封入することを特徴とする高電位勾配型単一ギャップ加速管の使用法。

【0017】

また、本発明のさらに別の観点に係るガスナノビーム形成装置は、ガスイオン源と、該ガスイオン源からイオンビームを加速するための加速レンズ系と、該加速レンズ系で加速されたイオンビームを、さらに加速及び集束させるための請求項1記載の高電位勾配型単一ギャップ加速管とから構成される。

【発明の効果】

【0018】

本発明に係る高電位勾配型単一ギャップ加速管は、独特の優れた電極構造を有し、電位勾配が極めて高く、しかも高・低電圧電極の間が単一ギャップで構成される加速管である。このため、従来の加速管では得られない良好な高縮小率が得られ、高電圧を印加しても放電を発生することがなく、かつ収差の原因となる収差係数が小さいという利点を持つ。

【0019】

また、本発明に係る高電位勾配型単一ギャップ加速管を荷電粒子ビーム集束装置の集束レンズとして使用することもでき、ナノメートル単位の高エネルギー集束イオンビームを持つFIB装置を実現できる。

【図面の簡単な説明】

【0020】

【図1】本発明に係る高電位勾配型単一ギャップ加速管の概略構成図。

【図2】本発明に係る加速管における電場形成の説明図。

【図3】本発明に係る加速管をガスナノビーム形成装置に適用した場合の概略構成図。

【図4】本発明に係る加速管を集束イオンビーム形成装置に適用した場合の概略構成図。

10

20

30

40

50

【図5】本発明に係る加速管を使用する際の絶縁方法の説明図。

【図6】本発明に係る加速管のビーム軌道の計算結果の例を示す図。

【図7A】ビーム径の計算を行うための加速管の模式図

【図7B】図7Aの模式図に基づいて計算された加速電圧とビーム径の関係を示すグラフ

【図8】従来の加速管の概略構成図。

【発明を実施するための形態】

【0021】

本発明の理解を助けるために、再度従来の加速管の構造について図面を用いて説明する。初めに図8を参照する。図8は従来の一般的な荷電粒子用加速管の電極部の断面図を示している。電極構造は、イオンビームの流入側（紙面に向かって上側）から順に、円盤状のアノード電極、互いに所定の間隔で複数段にわたって配列された円盤状の中間電極、及び同じく円盤状のカソード電極から成っている。上部のアノード電極と下部のカソード電極の間に、各段ごとに絶縁物を介して多段の中間電極を挿入し、電位固定をすることにより、数100kV領域までの高電圧を印加できるようになっている。アノード電極とこの加速管の中間電極間の電場は10kV/cm程度である。このような電極構造を持つ加速管は、前述したような欠点を持っている。

10

【実施例】

【0022】

次に、本発明の一実施例に係る高電位勾配型単一ギャップ加速管1の概略構成について、図1を用いて説明する。本発明の一実施例に係る高電位勾配型単一ギャップ加速管1は、電極間長の長さが15mmの単一ギャップにより300kVまで印加できる構造となっている。この加速管は荷電粒子ビームを加速と同時に集束することができるレンズとしても機能し、図1に示す様に上下のアノード電極とカソード電極の先端部の曲率を10mm、アノード電極のボア径を15mm、カソード電極のボア径を10mmにすることで、球面及び色収差係数を小さくすることができる。この場合、電極間の電場は $300\text{kV}/15\text{mm} = 200\text{kV}/\text{cm}$ であり、従来型の加速管の10倍程度の強電場を形成することが可能である。

20

【0023】

これを可能としているのは図1に示すように、(1)アノード電極3とカソード電極4の上下電極間の印加電圧を、例えば4段の電極により分圧することに加えて、(2)図1において電場集中型電極と記しているように、この分圧電極である中間電極をカソード側に曲げて、カソード側の下電極は平板とするところにある。これにより、電場は、図2に示す様にアノード側で電場集中型電極（中間電極）6の先端部に集中するとともに、カソード電極4側に向けて緩やかとなる。本発明の加速管1では、電界集中型電極6とカソード電極4の間で大部分の電場が湾曲しているため、従来構造の加速管のように放電の引き金となる電子が直線的に加速されにくく、イオン電子の雪崩が起きにくい。これにより強電場が発生可能となる。中間電極6の先端部を細く、例えばナイフエッジのように鋭く形成すれば（図2を参照）、アノード電極3側の電場をより集中させることができ、一層効果的である。

30

【0024】

本発明の加速管1は高電圧を印加するため、各電極は表面の粗さが少ない電極で構成されている。各電極間の絶縁体5は超高分子量ポリエチレンで構成されている。なお、本発明の加速管1はナノイオンビーム形成用の加速レンズとして使用するため、電極の高精度の光軸調整が必要である。そのため、本発明の加速管1の製造時には、表面の粗さが極めて少ない調整用のジグ（図示せず）をイオンビーム光軸に沿ってアノード電極3とカソード電極4にかけて挿入し、光軸調整を行う必要がある。

40

【0025】

また、本発明に係る高電位勾配型単一ギャップ加速管は、静電荷の荷電粒子を集束する集束レンズとして使用することができる。本発明の加速管1の場合、アノード電極3とカソード電極4の間に300kV以下を印加する場合、イオンビームの集束点がカソード電極4

50

より下側(加速レンズの外側)に形成されるので、集束ビームとして使用することができる。さらに、集束レンズでは、収差が発生するが、本電極形状の場合、収差係数のうち、球面及び色収差係数を小さくすることができる。

【0026】

次に、本発明を集束ガスイオンビームが形成されるガスナノビーム形成装置に適用した場合の概略構成を図3に示す。図3は、先に示した特許第4,665,117号に開示された装置の加速管として本発明の加速管を適用した一例を示している。本発明の高電位勾配型単一ギャップ加速管を適用することによって、集束レンズ系の縮小率をより大きくでき、ビーム径もより小さくできるようになる。

【0027】

また、本発明を集束イオンビーム形成装置に適用した場合の概略構成を図4に示す。図4はイオン源を特定しない集束イオンビーム形成装置であり、種々なイオン源と本発明の加速管との組み合わせにより、コンパクトな集束イオンビーム形成装置を構築できる一例を示している。

【0028】

以上の適用例において、本発明の加速管に電圧を印加する場合は、図5に示されるように、加速管1を、最低450mm以上の長さを持つ、例えば、超高分子量ポリエチレンで構成された絶縁体カバーで、その周囲を覆い、さらに、加速管1と絶縁体カバー7の間に絶縁ガスSF₆を2気圧以上封入した状態で使用することが望ましい。

【0029】

次に、図6を参照して、本発明の加速管を用いた場合のイオンビームの軌道の計算結果の例を説明する。図6は、最大電圧300kVを本発明の加速管1のアノード電極3とカソード電極4の間に印加し、加速管1をレンズとして使用した時に、物点から45°で加速管に入射するビームは、この図6の軌道で集束される。実際のビームは、角度がこれよりも小さいので、軌道もこの比率でスケールされる。

【0030】

次に、本発明の高電位勾配型単一ギャップ加速管1の構造の持つ効果を補足するため、図3や図4に示されたビーム形成装置の最終段加速レンズとして、本発明の高電位勾配型単一ギャップ加速管1を使用した場合のビーム径について、図7A及び図7Bを参照しながら説明する。

【0031】

軌道計算から得られる縮小率と収差の値を基に、集束点で得られるビーム径は、次式で表される。

$$\text{ビーム径} = \{ (\text{物点径} \times \text{倍率})^2 + (\text{球面収差})^2 + (\text{色収差})^2 \}^{1/2}$$

【0032】

従って、図7Aに示す計算パラメーターを参照し、入射ビームエネルギーを50keV、本加速管の前段に接続した二段加速レンズにより形成されるビーム径を0.5μmとし、対物点の長さ(物点距離)を300mm、加速管全面のコリメータ径を0.3mmとすると、集束点のビーム径は図7Bのグラフに示される電圧を変数とした関数となる。この図から、加速管の加速電圧を例えば250kVとすると、縮小率は7.4(倍率は0.135)となる。この時の球面収差係数(Cs)及び色収差係数(Cc)は3450mmと468mmとなる。また、集束点での発散角()は 1.65×10^{-4} rad、加速管に電圧を供給する電源の安定度を $=1 \times 10^{-5}$ とする。一方、球面収差(Ds)は、 $Ds=Cs^3$ 、色収差(Dc)は、 $Dc=Cc$ と表わせるので、球面収差Ds=15.6nm、色収差Dc=7.7nmとなり、これらの値を式に代入することで、ビーム径を求めることができる。集束点でのビーム径は、これらの収差の値と、物点×倍率の値を上述のビーム径の式に、代入して78nmとなる。ビーム径は本発明の高電位勾配型単一ギャップ加速管を使用した場合、前述の従来型の加速管を使用した場合に比べて、1/2以下になり、小さなビーム径を形成できる。

【符号の説明】

【0033】

10

20

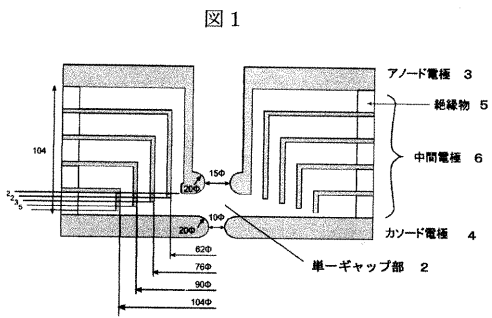
30

40

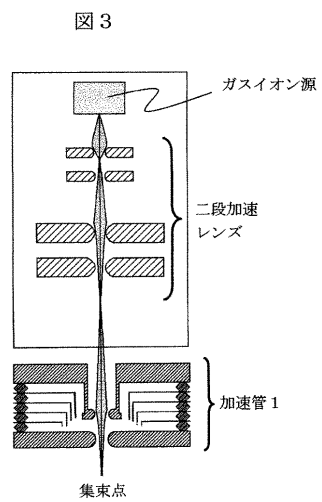
50

- 1 ... 加速管
- 2 ... 単一ギャップ部
- 3 ... アノード電極
- 4 ... カソード電極
- 5 ... 絶縁体
- 6 ... 電位集中型電極 (中間電極)
- 7 ... 絶縁体カバー

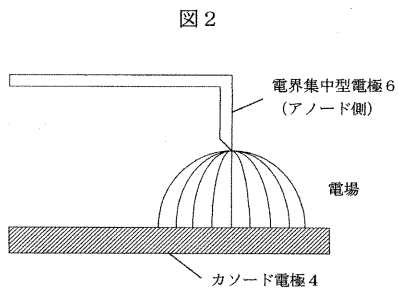
【図1】



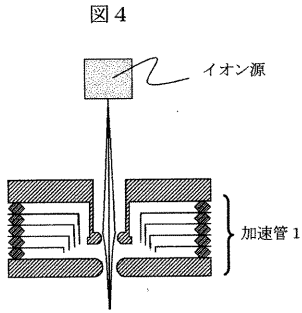
【図3】



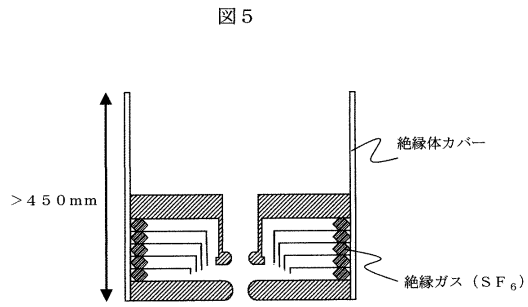
【図2】



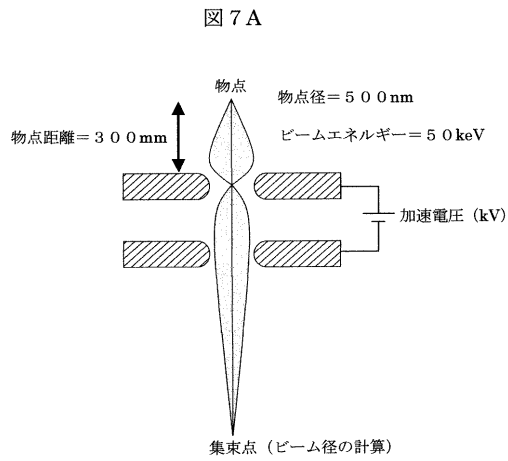
【図4】



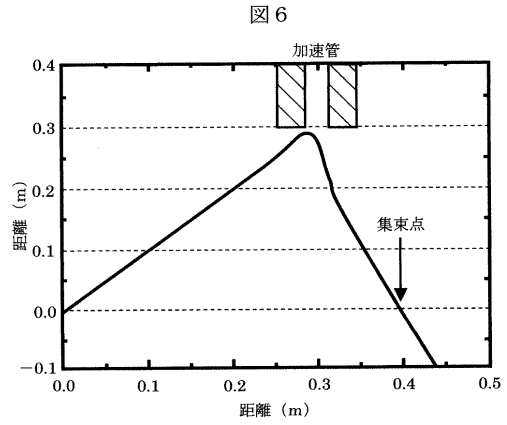
【図5】



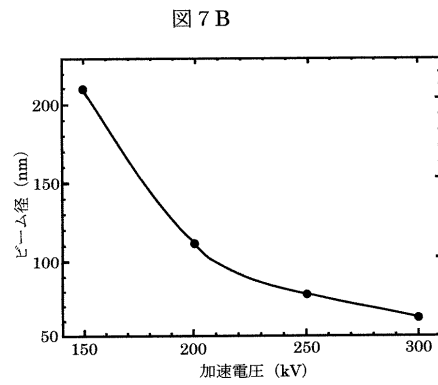
【図7A】



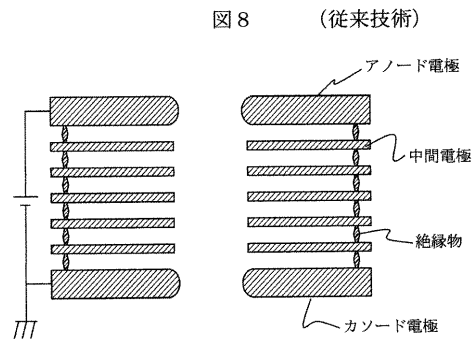
【図6】



【図7B】



【図8】



フロントページの続き

(72)発明者 神谷 富裕
群馬県高崎市綿貫町1233番地
機構 高崎量子応用研究所内
独立行政法人日本原子力研究開発

(72)発明者 三宅 善信
東京都大田区蒲田一丁目20番3号
株式会社ビーム精工内

審査官 小野 健二

(56)参考文献 実開昭62-001400(JP,U)
特開昭61-200699(JP,A)
特開平05-234698(JP,A)
実公昭39-17995(JP,Y2)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H01J 37/00-37/36
H05H 5/00
G21K 5/00