

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号
特許第5922158号
(P5922158)

(45) 発行日 平成28年5月24日 (2016. 5. 24)

(24) 登録日 平成28年4月22日 (2016. 4. 22)

(51) Int. Cl.

F I

HO 1 J 35/22 (2006. 01)

HO 1 J 35/00 (2006. 01)

HO 1 J 35/22

HO 1 J 35/00 Z

請求項の数 27 (全 15 頁)

(21) 出願番号	特願2013-557922 (P2013-557922)	(73) 特許権者	304056899
(86) (22) 出願日	平成24年3月9日 (2012. 3. 9)		ザ リージェンツ オブ ザ ユニバーシ
(65) 公表番号	特表2014-511006 (P2014-511006A)		ティ オブ カリフォルニア
(43) 公表日	平成26年5月1日 (2014. 5. 1)		THE REGENTS OF THE
(86) 国際出願番号	PCT/US2012/028581		UNIVERSITY OF CALIF
(87) 国際公開番号	W02012/125492		ORNIA
(87) 国際公開日	平成24年9月20日 (2012. 9. 20)		アメリカ合衆国, 94607-5200
審査請求日	平成27年2月23日 (2015. 2. 23)		カリフォルニア州, オークランド, フラン
(31) 優先権主張番号	61/451, 694		クリン ストリート 1111
(32) 優先日	平成23年3月11日 (2011. 3. 11)		1111 Franklin Stree
(33) 優先権主張国	米国 (US)		t, Oakland, CA 9460
			7-5200, United Stat
			es of America
		(74) 代理人	110000877
			龍華国際特許業務法人
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 摩擦 X 線源

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

少なくとも 1 つの狭エネルギー帯の X 線を生成する X 線源であり、
封入器と、
前記封入器内で第 1 接触面を有して配置される第 1 接触部と、
前記封入器内で第 2 接触面を有して配置される第 2 接触部と、
前記第 1 接触部および前記第 2 接触部のうち少なくとも一方と動作可能に接続されたア
クチュエータアセンブリと
を備え、
前記アクチュエータアセンブリは、動作中、前記第 1 接触面と前記第 2 接触面とを反復
して接触および分離させ、
前記第 1 接触面は第 1 摩擦材料からなる表面であり、
前記第 2 接触面は第 2 摩擦材料からなる表面であり、
前記第 1 摩擦材料からなる前記表面は、前記第 2 摩擦材料からなる前記表面に対して負
の摩擦電位を有し、
前記第 2 接触部は、前記第 1 接触面から前記第 2 接触面に移動する電子により励起され
得る量子エネルギー励起状態を有する原子を組成中に含む材料を有し、
前記原子は、前記量子エネルギー励起状態から低エネルギー状態へ遷移すると前記少な
くとも 1 つの狭エネルギー帯に含まれるエネルギーを有する X 線を放射し、
前記封入器は、前記第 1 接触面および前記第 2 接触面が曝される大気環境の制御を行う

10

20

、少なくとも１つの狭エネルギー帯のＸ線を生成するＸ線源。

【請求項２】

前記原子は、前記第１接触面から前記第２接触面に移動する電子により励起され得る複数の量子エネルギー励起状態を有し、

前記原子は、前記複数の量子エネルギー励起状態から複数の低エネルギー状態へ遷移すると複数の狭エネルギー帯に含まれるエネルギーを有するＸ線を放射する、請求項１に記載の少なくとも１つの狭エネルギー帯のＸ線を生成するＸ線源。

【請求項３】

前記第２接触部は、前記第１接触面から前記第２接触面に移動する電子により励起され得る量子エネルギー励起状態をそれぞれが有する複数の原子を含む材料を有し、

前記複数の原子は、複数の量子エネルギー励起状態のそれぞれから対応する低エネルギー状態へ遷移すると対応する狭エネルギー帯に含まれるエネルギーを有するＸ線を放射する、請求項１に記載の少なくとも１つの狭エネルギー帯のＸ線を生成するＸ線源。

【請求項４】

前記原子は、少なくとも１３の原子番号を有する、請求項１から３のいずれか１項に記載の少なくとも１つの狭エネルギー帯のＸ線を生成するＸ線源。

【請求項５】

前記原子を含む前記材料は前記第２摩擦材料である、請求項１から４のいずれか１項に記載の少なくとも１つの狭エネルギー帯のＸ線を生成するＸ線源。

【請求項６】

前記第２摩擦材料と前記原子を含む前記材料とは、混合物、組成物、および層状構造のうち少なくとも１つを形成する互いに異なる材料である、請求項１から４のいずれか１項に記載の少なくとも１つの狭エネルギー帯のＸ線を生成するＸ線源。

【請求項７】

前記第２摩擦材料はエポキシ樹脂であり、

前記原子を含む前記材料は金属である、請求項６に記載の少なくとも１つの狭エネルギー帯のＸ線を生成するＸ線源。

【請求項８】

前記第１摩擦材料はポリマーである、請求項７に記載の少なくとも１つの狭エネルギー帯のＸ線を生成するＸ線源。

【請求項９】

前記第１摩擦材料および前記第２摩擦材料は、前記第１接触面において電荷密度が少なくとも 10^{-10} 電子 / cm^2 となるよう選択される、請求項６から８のいずれか１項に記載の少なくとも１つの狭エネルギー帯のＸ線を生成するＸ線源。

【請求項１０】

前記アクチュエータアセンブリは、前記第１接触面と前記第２接触面とを反復して接触および分離させる電気システム、水圧システム、および空気圧システムのうち少なくとも１つを有する、請求項１から９のいずれか１項に記載の少なくとも１つの狭エネルギー帯のＸ線を生成するＸ線源。

【請求項１１】

前記アクチュエータアセンブリは、前記第１接触面と前記第２接触面とを反復して接触および分離させるソレノイドを有する、請求項１から１０のいずれか１項に記載の少なくとも１つの狭エネルギー帯のＸ線を生成するＸ線源。

【請求項１２】

前記アクチュエータアセンブリは、前記第１摩擦材料または前記第２摩擦材料を表面に含むカンチレバーに結合された圧電アクチュエータを有する、請求項１から１１のいずれか１項に記載の少なくとも１つの狭エネルギー帯のＸ線を生成するＸ線源。

【請求項１３】

アレイ状に配置された複数の摩擦Ｘ線源を備え、少なくとも１つの狭エネルギー帯のＸ線アレイを生成するＸ線源アレイであり、

10

20

30

40

50

前記複数の摩擦 X 線源のそれぞれは、
封入器内で第 1 接触面を有して配置される第 1 接触部と、
前記封入器内で第 2 接触面を有して配置される第 2 接触部と、
前記第 1 接触部および前記第 2 接触部のうち少なくとも一方と動作可能に接続されたアクチュエータアセンブリと

を有し、

前記アクチュエータアセンブリは、動作中、前記第 1 接触面と前記第 2 接触面とを反復して接触および分離させ、

前記第 1 接触面は第 1 摩擦材料からなる表面であり、

前記第 2 接触面は第 2 摩擦材料からなる表面であり、

前記第 1 摩擦材料からなる前記表面は、前記第 2 摩擦材料からなる前記表面に対して負の摩擦電位を有し、

前記第 2 接触部は、前記第 1 接触面から前記第 2 接触面に移動する電子により励起され得る量子エネルギー励起状態を有する原子を組成中に含む材料を含み、

前記原子は、前記量子エネルギー励起状態から低エネルギー状態へ遷移すると前記少なくとも 1 つの狭エネルギー帯に含まれるエネルギーを有する X 線を放射し、

前記封入器は、前記第 1 接触面および前記第 2 接触面が曝される大気環境の制御を行う、X 線源アレイ。

【請求項 14】

前記複数の摩擦 X 線源のうち少なくとも 2 つは、互いに異なる狭エネルギー帯の X 線を生成する、請求項 13 に記載の X 線源アレイ。

【請求項 15】

前記複数の摩擦 X 線源の全てを収容する封入器をさらに備える請求項 13 または 14 に記載の X 線源アレイ。

【請求項 16】

前記複数の摩擦 X 線源のうち対応する 1 つをそれぞれが収容する複数の封入器をさらに備える請求項 13 または 14 に記載の X 線源アレイ。

【請求項 17】

前記原子は、前記第 1 接触面から前記第 2 接触面に移動する電子により励起され得る複数の量子エネルギー励起状態を有し、

前記原子は、前記複数の量子エネルギー励起状態から複数の低エネルギー状態へ遷移すると複数の狭エネルギー帯に含まれるエネルギーを有する X 線を放射する、請求項 13 から 16 のいずれか 1 項に記載の X 線源アレイ。

【請求項 18】

前記第 2 接触部は、前記第 1 接触面から前記第 2 接触面に移動する電子により励起され得る量子エネルギー励起状態をそれぞれが有する複数の原子を含む材料を含み、

前記複数の原子は、複数の量子エネルギー励起状態のそれぞれから対応する低エネルギー状態へ遷移すると対応する狭エネルギー帯に含まれるエネルギーを有する X 線を放射する、請求項 13 に記載の X 線源アレイ。

【請求項 19】

前記原子は、少なくとも 13 の原子番号を有する、請求項 13 から 18 のいずれか 1 項に記載の X 線源アレイ。

【請求項 20】

前記原子を含む前記材料は前記第 2 摩擦材料である、請求項 13 から 19 のいずれか 1 項に記載の X 線源アレイ。

【請求項 21】

前記第 2 摩擦材料と前記原子を含む前記材料とは、混合物、組成物、および層状構造のうち少なくとも 1 つを形成する互いに異なる材料である、請求項 13 から 19 のいずれか 1 項に記載の X 線源アレイ。

【請求項 22】

前記第 2 摩擦材料はエポキシ樹脂であり、

前記原子を含む前記材料は金属である、請求項 2 1 に記載の X 線源アレイ。

【請求項 2 3】

前記第 1 摩擦材料はポリマーである、請求項 2 2 に記載の X 線源アレイ。

【請求項 2 4】

前記第 1 摩擦材料および前記第 2 摩擦材料は、前記第 1 接触面において電荷密度が少なくとも 10^{-10} 電子 / cm^2 となるよう選択される、請求項 2 1 から 2 3 のいずれか 1 項に記載の X 線源アレイ。

【請求項 2 5】

前記アクチュエータアセンブリは、前記第 1 接触面と前記第 2 接触面とを反復して接触および分離させる電気システム、水圧システム、および空気圧システムのうち少なくとも 1 つを含む、請求項 1 3 から 2 4 のいずれか 1 項に記載の X 線源アレイ。

10

【請求項 2 6】

前記アクチュエータアセンブリは、前記第 1 接触面と前記第 2 接触面とを反復して接触および分離させるソレノイドを含む、請求項 1 3 から 2 5 のいずれか 1 項に記載の X 線源アレイ。

【請求項 2 7】

前記アクチュエータアセンブリは、前記第 1 摩擦材料または前記第 2 摩擦材料を表面上に含むカンチレバーに結合された圧電アクチュエータを含む、請求項 1 3 から 2 6 のいずれか 1 項に記載の X 線源アレイ。

20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

〔関連出願の相互参照〕

本願は、2011年3月11に提出された米国仮特許出願第61/451,694の優先権を主張する。同仮特許出願は、その内容の全体が参照により本明細書に組み込まれる。

【0002】

本願発明は、ARMY/Medical Research and Materiel Command から与えられた米国連邦政府補助金第W81XWH-10-1-1049号の援助を受けてなされた。米国政府は本願発明に関する一定の権利を有する。

30

【0003】

本願発明の分野は、摩擦 X 線源に関する。

【背景技術】

【0004】

初期の Haukesbee (F. Haukesbee, Physico-Mechanical experiments on various subjects (London: 1709)) の静電装置から van der Graaf の自身の名前に基づいた名称を持つ生成器まで 3 世紀に亘って、摩擦電気は高い静電電位の生成源として基礎科学研究に用いられ続けてきたが、当該主題においては理にかなった第 1 のアプローチが不在のままとなっている (M. Stoneham, Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 17, 084009 (2009))。静電生成器は 2 つの材料が互いに摩擦接触して擦れ合った時に生成される統合された電荷を蓄積する。選択される材料は、帯電する材料および電荷の極性の特性を示す、実験に基づき抽出されたリストである帯電列において互いに最も離れたものである (P. E. Shaw, Proc. R. Soc. Lond. A 94, 16 (1917))。2 つの材料の接触点において、摩擦帯電の程度は、当該材料の周囲の気体をイオン化し、摩擦ルミネセンスを引き起こす程である。圧力に敏感な接着 (PSA) テープを剥離する際に観察される摩擦ルミネセンスは長く亘って科学の興味の対象であり (E. N. Harvey, Science 89, 460 (1939))、静電に関する研究に起源を有する。テープが剥離されると、剥離さ

40

50

れたばかりの領域の表面に、 $10^{12} \text{ e } \text{ cm}^{-2}$ (e は電子の基本的な電荷である)の電荷密度が曝され、続いて放出される(C. G. Camara, J. V. Escobar, J. R. Hird and S. P. Putterman, Nature 455, 1089 (2008))。~10ミリの真空でテープが剥離されると、生成された摩擦ルミネセンスは、X線エネルギーにまで拡大することがわかっている(V. V. Karasev, N. A. Krotova and B. W. Deryagin, Dokl. Akad. Nauk. SSR 88 777 (1953))。より最近になって(Camaraら、同文献)、真空でテープを剥離する際の摩擦帯電には2つの時間尺度があることが分かった。1つ目は静電生成器および旧来からの静電に関する実験に共通のものであり(W. R. Harper, Contact and frictional electrification, (Oxford University Press, London, 1967))、テープの表面上において平均 $10^{10} \text{ e } \text{ cm}^{-2}$ の電荷密度が維持されることになる長い時間尺度処理である。2つ目は、 $10^{12} \text{ e } \text{ cm}^{-2}$ の電荷密度であるナノ秒の処理である。加えて、テープの剥離によって放出されるX線は、人の指の指節間の間隔を分析出来る程、剥離の線においてそれ自体で十分に平行となっていることが分かっている。ナノ秒レベルのX線パルスを放射することにより、放射領域の推定を計算出来た。続く、幅が1.5mmのPSAテープを剥離した研究によって、プロセスが300 μm 未満の寸法において起こることが確認された(C. G. Camara, J. V. Escobar, J. R. Hird and S. P. Putterman, Appl. Phys. B 99, 613 (2010))。この結果は、摩擦電気効果に基づくサブmmのアレイからなる複数要素のX線源を実現する可能性を示した。

【0005】

摩擦電気に関するこの最近の研究を支持しているのは、異なる材料間、特にポリマー間で電荷がどのように移動するかという疑問に改めて関心が集まっているという事実である。特に興味深いのは、互いに似通ったポリマー同士が互いに帯電するという報告である(M. M. Apodaca, P. J. Wesson, K. J. M. Bishop, M. A. Ratner and B. A. Grzybowski, Angew. Chem. Int. Ed. 49, 946 (2010))。さらに基本的には、移動する粒子がイオンであるのか(L. McCathy and G. M. Whitesides, Angew. Chem. Int. Ed. 47, 2188 (2008))、電子であるのか(Harper、同文献)という数世紀にも亘る実験研究にも関わらず依然として議論されている未解決の問題である。摩擦帯電を引き起こす電荷担体が電子であるかイオンであるかに関わらず、非常に高い電荷密度が容易に生成されるということははっきりしている。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

最も効果的に帯電を引き起こすには、材料同士の密な接触、および接触面の清潔さが重要である(R. Budakian, K. Weninger, R. A. Hiller and S. P. Putterman, Nature 391, 266 (1998))。PSAテープの剥離のジオメトリは数学的に見事であり(A. D. McEwan and G. I. Taylor, J. Fluid Mech. 26, 1 (1966))、両方の基準を満たしてはいるが、高電圧源を必要としない携帯型のX線源においてこれらを用いることの不利な点は、市販のテープを真空内で剥離する際に起こる顕著な気体放出である(E. Constable, J. Horvat and R. A. Lewis, Appl. Phys. Lett. 97, 131502 (2010))。よって、改善された摩擦X線源の必要性は依然として存在する。

【課題を解決するための手段】

【0007】

本願発明の一実施形態に係る、少なくとも1つの狭エネルギー帯のX線を生成するX線源は、封入器と、封入器内で第1接触面を有して配置される第1接触部と、封入器内で第

2 接触面を有して配置される第 2 接触部と、第 1 接触部および第 2 接触部のうち少なくとも一方と動作可能に接続されたアクチュエータアセンブリとを含む。アクチュエータアセンブリは、動作中、第 1 接触面と第 2 接触面とを反復して接触および分離させる。第 1 接触面は第 1 摩擦材料からなる表面であり、第 2 接触面は第 2 摩擦材料からなる表面であり、第 1 摩擦材料からなる表面は、第 2 摩擦材料からなる表面に対して負の摩擦電位を有する。第 2 接触部は、第 1 接触面から第 2 接触面に移動する電子により励起され得る量子エネルギー励起状態を有する原子を組成中に含む材料を有し、原子は、量子エネルギー励起状態から低エネルギー状態へ遷移すると少なくとも 1 つの狭エネルギー帯に含まれるエネルギーを有する X 線を放射する。封入器は、第 1 接触面および第 2 接触面が曝される大気環境の制御を行う。

10

【0008】

本願発明の一実施形態に係る、少なくとも 1 つの狭エネルギー帯の X 線アレイを生成する X 線源アレイは、アレイ状に配置された複数の摩擦 X 線源を含む。複数の摩擦 X 線源のそれぞれは、封入器内で第 1 接触面を有して配置される第 1 接触部と、封入器内で第 2 接触面を有して配置される第 2 接触部と、第 1 接触部および第 2 接触部のうち少なくとも一方と動作可能に接続されたアクチュエータアセンブリとを有する。アクチュエータアセンブリは、動作中、第 1 接触面と第 2 接触面とを反復して接触および分離させる。第 1 接触面は第 1 摩擦材料からなる表面であり、第 2 接触面は第 2 摩擦材料からなる表面である。第 1 摩擦材料からなる表面は、第 2 摩擦材料からなる表面に対して負の摩擦電位を有する。第 2 接触部は、第 1 接触面から第 2 接触面に移動する電子により励起され得る量子エネルギー励起状態を有する原子を組成中に含む材料を有し、原子は、量子エネルギー励起状態から低エネルギー状態へ遷移すると少なくとも 1 つの狭エネルギー帯に含まれるエネルギーを有する X 線を放射する。封入器は、第 1 接触面および第 2 接触面が曝される大気環境の制御を行う。

20

【図面の簡単な説明】

【0009】

他の目的および効果は説明、図面、および例から明らかになるであろう。

【図 1】図 1 は、本願発明の一実施形態に係る X 線源の概略図であり、X 線源はシリコンロッドとエポキシ基板とを接触状態および非接触状態にし、エポキシ基板 106 は、厚さが 3.5 mm であり、~10 mm の直径を有する円柱状のシリコンロッド 102 の跡 (imprint) を有しており、シリコンはピンによりテフロン (登録商標) マウント 118 を介してソレノイド 112 へ取り付けられており、ソレノイドの電機子は、テフロン (登録商標) ブロック 120 に搭載されたエポキシ基板側へ 2 つの引っ張りばね 114、116 により引っ張られており、ソリッドステート X 線検出器 122 が 65 度の角度で X 線源から 7 cm だけ離れた位置に配置されており、エポキシ基板 106 とシリコンロッド 102 との離間距離は 0 ~ 5 mm の範囲で変化させることが出来、X 線源は最大 20 Hz で動作出来ることが分かっている。

30

【図 2】図 2 は、シリコンゴムと接触するモリブデンが添加されたエポキシ樹脂 (薄い影付き) または銀が添加されたエポキシ樹脂 (濃い影付き) を用いて 1 Hz で 60 秒間の間、動作させた図 1 の X 線源の X 線放射スペクトルを示し、最大離間距離は 5 mm であり、スペクトルの分解は機器の制限を受けた。

40

【図 3】図 3 は、図 1 の X 線源 (シリコン - Ag - エポキシ樹脂システム) を 0.5 Hz、5 mm の離間距離、および 1 ミリトルで動作させた場合の到達時間の関数としてプロットされた個々の X 線光子を示し、X 線は開放サイクル中、継続的に放射され、1 秒より長い時間、Ag の K 線を励起するのに十分な強度であり、差し込み図は、最初の 100 ミリ秒 (黒) および最後の 100 ミリ秒 (影付き) の放射された光子のスペクトルを示し、サイクル全体に亘りスペクトルの差異がないことを示している。

【図 4】図 4 は、10 Hz で動作する図 1 の X 線源の圧力の関数としての Ag が添加されたエポキシ樹脂の X 線放射スペクトルを示し、真空圧力を 1 ミリトル (薄い影付き) から 30 ミリトル (濃い影付き) へ変化させることによるスペクトルの変化を示し、かつ、高

50

い圧力においてA gのK線が存在していないことを示し、差し込み図は、X線放射の時間的縮小を示す、30ミリの真空圧力において1秒間の間に記録したX線光子のヒストグラムである。

【図5】図5は、20ミリの圧力で動作するA g - エポキシ樹脂 - シリコンシステムの異なる複数の繰り返し数で生成されるX線フラックスをそれぞれ示し、差し込み図は、短いサンプル時間の間のスケールがおおよそ線形であることを示す。

【図6】図6は、本願発明の他の実施形態に係るX線源を示す。

【図7】図7は、低圧力のネオン雰囲気中で動作する、図6のX線源を示す写真である。

【図8】図8は、本願発明の一実施形態に係るX線源アレイの概略図である。

【図9】図9は、図8のX線源アレイの4分の1を示す概略分解図である。

10

【図10】図10は、図8のX線源アレイに含まれる2つの摩擦X線源の断面概略図である。

【図11A】図11Aは、本願発明の他の実施形態に係るX線源アレイの一部を切り取った概略斜視図である。

【図11B】図11Bは、図11AのX線源アレイの概略図であり、封入機の一側面が取り除かれた状態を示す。

【発明を実施するための形態】

【0010】

本願発明のいくつかの実施形態を以下に詳細に説明する。実施形態の説明において、説明を明確にすべく特定の用語を用いる。しかし本願発明は、そのように選択される特定の用語によって限定されない。当業者であれば、本願発明の幅広い概念から逸脱することなく他の同等のコンポーネントを用いることが可能であり、他の方法を実施することが可能であることを理解されよう。背景技術および発明を実施するための形態の項を含む本明細書のあらゆる箇所において参照される参考文献は全て、それぞれが組み込まれるかのように参照により組み込まれる。

20

【0011】

本願発明のいくつかの実施形態は、高電圧電源を必要としない低コストのX線源を提供する。一実施形態においてX線源は、アクチュエータ（例えば、圧電気、電気機械的な力、磁気歪み、または人的エネルギーを用いて動きを生み出すデバイス）を用いて、真空内で反復して接触状態および非接触状態にさせられる2つの摩擦材料を備える。1つの材料は、ポリマーまたはモノマー（シリコン、ビニル、ラテックス、EPDM、テフロン（登録商標）など）であってよいがそれらに限定されないカソードである。他方の材料はアノードを提供し、金属、若しくは、制動放射の効率を向上させ、特徴的なX線のラインを生成すべく金属材料が充填されるプラスチック、セラミック、ポリマー、モノマー、またはエポキシドなどである。当該X線源は、X線撮像、元素分析、および分光法などに用いることが出来、X線が用いられる多くの分野において新たな可能性を開き得る。

30

【0012】

本願発明のいくつかの実施形態は、PSAテープを組み込んだシステムよりも優れた多くの利点を提供する。それら利点の例としては以下のようなものが挙げられる。電界を増やすべく、または特定の形状のX線源を形成すべく配置が変更され得る。真空内での気体放出を低減出来る。要素の特徴的なラインを生成すべく、X線のスペクトルを制御できる。より迅速な放電を促すよう接触面を設計し得る。X線源はさらに小型化され得、個々の要素をアレイ状に配置できる。X線放射は、接触の繰り返し数、気体の構成および圧力、温度、接触により生じる応力、表面粗さ、表面剛性によって制御出来る。

40

【0013】

本願発明のいくつかの実施形態に係るX線源は、X線が用いられる分野において適用され得、加えて、新たな市場を開拓し得る。適用例としては、コスト、または遠隔地での電源の不在が課題となる医療分野における撮像が挙げられる。他の適用例としては、地質学または材料科学などにおける蛍光X線および元素分析が挙げられる。しかし、本願発明の幅広い概念は、これらの特定の例に限定されない。

50

【 0 0 1 4 】

図 1 は、本願発明の一実施形態に係る、少なくとも 1 つの狭エネルギー帯の X 線を生成する X 線源 1 0 0 の概略図である。X 線源 1 0 0 は、封入器（図 1 には示さず）と、封入器内で第 1 接触面 1 0 4 を有して配置される第 1 接触部 1 0 2 と、封入器内で第 2 接触面 1 0 8 を有して配置される第 2 接触部 1 0 6 と、第 1 接触部 1 0 2 および第 2 接触部 1 0 6 のうち少なくとも一方と動作可能に接続されたアクチュエータアセンブリ 1 1 0 とを含む。アクチュエータアセンブリ 1 1 0 は、動作中、第 1 接触面 1 0 4 と第 2 接触面 1 0 8 とを反復して接触および分離させる。第 1 接触面 1 0 4 は第 1 摩擦材料からなる表面である。第 2 接触面 1 0 8 は第 2 摩擦材料からなる表面である。第 1 摩擦材料からなる表面は X 線源の動作中、第 2 摩擦材料からなる表面に対して負の摩擦電位を有する。第 2 接触部 1 0 6 は、第 1 接触面 1 0 4 から第 2 接触面 1 0 8 に移動する電子により励起され得る量子エネルギー励起状態を有する原子を組成中に含む材料を有する。原子は、量子エネルギー励起状態から低エネルギー状態へ遷移すると少なくとも 1 つの狭エネルギー帯に含まれるエネルギーを有する X 線を放射する。封入器は、第 1 接触面および第 2 接触面が曝される大気環境の制御を行う。

10

【 0 0 1 5 】

X 線の「狭エネルギー帯」という用語は、原子内電子エネルギーレベルなど複数の量子化エネルギーレベル間での遷移が起こることによって放射される X 線のタイプを指す。これに限定されるわけではないがドップラー広がりなどエネルギー帯のいくらかの広がりが、「狭エネルギー帯」の定義に含められてもよい。また狭エネルギー帯は、X 線を放射する原子が磁界にある場合など、狭エネルギー帯の微細構造を含んでもよい。限定されるわけではないがこれには K 線が含まれ得る。またこれには、L 線および / または他の転移線が含まれ得る。

20

【 0 0 1 6 】

本願発明のいくつかの実施形態において、原子は、第 1 接触面 1 0 4 から第 2 接触面 1 0 8 に移動する電子により励起され得る複数の量子エネルギー励起状態を有し得る。この場合、原子は、複数の量子エネルギー励起状態から低エネルギー状態へ遷移すると複数の狭エネルギー帯に含まれるエネルギーを有する X 線を放射する。

【 0 0 1 7 】

いくつかの実施形態において、第 2 接触部 1 0 6 は、第 1 接触面 1 0 4 から第 2 接触面 1 0 8 に移動する電子により励起され得る量子エネルギー励起状態をそれぞれが有する複数の原子を組成中に含む材料を有する。この場合、複数の原子は、各量子エネルギー励起状態から対応する低エネルギー状態へ遷移すると複数の狭エネルギー帯のそれぞれに含まれるエネルギーを有する X 線を放射する。言い換えるといくつかの適用例において特定の原子は、複数の有用な X 線を提供し得る。他の適用例において、2 つ、3 つ、4 つ、またはそれ以上の原子を第 2 接触部 1 0 6 において用い、複数の線を生成する X 線源を提供してもよい。

30

【 0 0 1 8 】

原子の K 線は、Z を原子番号とした場合、およそ $Z - 1$ の二乗に比例して増加する。よって、高い狭エネルギー帯の X 線源が必要とされる適用例において、第 2 接触部 1 0 6 に、より大きな原子番号 Z を有する原子を含めることを考慮してもよい。例えばいくつかの適用例において、少なくとも 13 の原子番号 Z を有する原子が望ましい。いくつかの実施形態において、X 線の狭エネルギー帯を放射する原子を含む材料は、第 2 摩擦材料となり得る。例えばいくつかの実施形態において第 2 接触部 1 0 6 は、金属からなる接触部である。いくつかの適用例において適切であり得る例は、第 2 接触部 1 0 6 に鉛 (Pb) を用いることである。しかし本願発明の幅広い概念はこれらの例に限定されない。他の実施形態において、摩擦特性、および / または他の特性に基づいて第 2 摩擦材料を選択してもよく、所望される狭エネルギー帯の X 線を提供する原子を有する材料を追加で選択してもよい。材料の他の特性は、コスト、安全性、製造可能性、所望される原子を含む材料と組み合わせられるかどうかなど実用性に関する特性であってよい。例えばいくつかの適用例に

40

50

において、第2摩擦材料はエポキシ樹脂であり、原子を有する材料は金属である。いくつかの実施形態において、ポリマーが第1摩擦材料に適していることがわかっている。しかし、本願発明の幅広い概念は、これらの特定の例に限定されない。

【0019】

いくつかの実施形態において、第1摩擦材料および第2摩擦材料は、第1接触面において電荷密度が少なくとも 10^{10} 電子/cm² となるよう選択される。

【0020】

アクチュエータアセンブリ110は、第1接触面と第2接触面とを反復して接触および分離させる電気システム、水圧システム、および空気圧システムのうち少なくとも1つを含んでよい。アクチュエータのいくつかの特定の実施形態を以下により詳細に説明する。しかし本願発明は、これら特定の例に限定されない。

【0021】

上述したように本願発明のいくつかの実施形態は、PSAテープを用いない摩擦電気に基づく単純なX線源を提供する。特定の実施形態をより詳細に説明する。図1に図示するX線源100は、直流12Vの「プルタイプ」のソレノイド112、および、遅延発生器(SRS DG535)からのTTLパルスにより起動させられる、関連付けられたドライバを含む。シリコンロッド(直径8mm)周りに平滑なシリコンゴム(厚さ1.6mm/60Aデュロメータ)のシリンダが形成され、ソレノイドの電機子の端部に搭載されており、ハンマー(円柱半径~5mm)を形成し、第1接触部102を提供している。シリコンとエポキシ樹脂とが接触するようにソレノイド112のボディから電機子を引き離す引っ張りばね112、114を用いて、厚さ3.5mmの成形されたエポキシ樹脂(Devcon No. 14270)にハンマーが衝突する。搭載する前にシリコンをエチルアルコールで超音波処理し、表面を洗浄する。エポキシ基板と良好に接触するように、当該基板に接触させる前に(同様の組成の)エポキシ樹脂から成る薄膜が当該基板に適用される。これが乾くまで15分待つ。エポキシ樹脂はシリコンに付着しないので分離されると、シリコンは基板の形状に沿って中心部が多少盛り上がった(slightly proud of)円柱状のレリーフとなる。接触部は、 $64 \pm 5 \text{ mm}^2$ の見掛けの接触面積(第2接触面108)を有する。

【0022】

粉末状の元素金属をエポキシ樹脂に加えてもエポキシ樹脂バインダの摩擦帯電挙動を損なわないことが分かっている。以下の例では、モリブデン($1 \sim 2 \mu\text{m}$)および銀(400メッシュ)の粉末を添加した。エポキシ基板は同時に成形し、アプリケーションガンおよびミキサーノズルを用いてエポキシ樹脂を分注してポリスチレンの秤量皿で重量を計測した。金属充填剤を用いた場合にはエポキシ樹脂が添加される前に最初に重量が計測され、木製の攪拌棒を用いて十分に攪拌が行われる。

【0023】

乾式のポンプを用いるターボ分子ポンプにより真空とされた真空チャンバーにX線源を設置した。真空圧力はN₂に関して校正したピラニ真空計(SRS PG105)および制御器(SRS IGCI00)を用いて計測した。真空チャンバーのブリード弁によって圧力は可変である。 25 mm^2 の検出領域、および10~60keVの範囲において100%に近い効率性を有するソリッドステートX線検出器(Amptek XR-100T-CdTe)を用いてX線を検出した。ソリッドステートX線検出器はチャンバーの外で、6mmのポリカーボネートの窓(補正せず)の後ろに設置した。関連付けられた増幅器(Amptek PX2T-CdTe)の出力信号は、収集ボード(NI PXI-1033)により1Msamples⁻¹で記録され、分析を行う前にディスク内に格納した。データ収集ボードは、ソレノイドTTLトリガを用いて起動させた。他の説明がない限り、本実験に関して提示される全てのデータの収集時間は60秒であり、X線源の中心から7cmだけ離れた位置に検出器が配置された。このX線源を用いて、 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ トルの間の真空圧力、2.5mmおよび5mmの離間距離、並びに1~20Hzの繰り返し数という条件でのX線の生成およびスペクトルを分析した。

【 0 0 2 4 】

図 2 は、モリブデンの特徴的な K 線 ($K_{\alpha 1} = 17.48 \text{ keV}$ 、 $K_{\beta 1} = 19.61 \text{ keV}$)、および銀の特徴的な K 線 ($K_{\alpha 1} = 22.16 \text{ keV}$ 、 $K_{\beta 1} = 24.94 \text{ keV}$) をはっきりと示す、銀およびモリブデンをエポキシ樹脂に添加することによって得られる X 線スペクトルを示す。これらの線の分解は機器の制限 ($\sim 400 \text{ eV}$) があるので、 $K_{\alpha 2,3}$ 、 $K_{\beta 2,3}$ の成分を分解することは出来ない。示される銀のスペクトルに関し、 $2.43 \times 10^5 \text{ X線光子 s}^{-1}$ のフラックスが 2π へ放射された。これらのうち、9% が $20.5 \sim 23 \text{ keV}$ の範囲のエネルギーを有する。

【 0 0 2 5 】

制動放射により K 線が表れたということは、金属が添加されたエポキシ樹脂は標的電子またはアノードとしての働きをするはずなので、シリコンがエポキシ樹脂に対し負の電位を有するという明らかな証拠である。接触面間のずれは直接的に計測されていないが、データの検証により、用いられた最大サイクル周波数 (20 Hz) で、放射の期間がほぼ正確に、シリコンとエポキシ樹脂とが分離させられていた期間と対応していることが示された。このことが示唆するのは、25 ミリ秒よりはるかに短い時間で最大離間距離に達したということである。またエポキシ樹脂に Z が大きな材料を添加することにより、放射の可能性および効率が高められるはずである。実験上の変動によりこの予測を完全に検証することは出来なかったが、記録した最大 X 線フラックス ($\sim 8 \times 10^5 \text{ X線 s}^{-1}$) は、タングステン充填剤を用いて行った実験におけるものであるということには言及するに値するであろう。用いた最低気体真空圧力 (1 ミリトル) において、数秒にわたって X 線放射が減衰し (図 3)、強度が 1 桁だけ弱まった以外にはスペクトル上の大きな差はなかった (図 3 の差し込み図)。サイクルのうち分離に対応する部分全体において銀の $K_{\alpha 1}$ 、 $\beta 1$ 線が見られたということは、プロセスに関わるエネルギー論の際立った証拠であり、 40 kV の電位が 1 秒間の放電後にも依然として存在することを示す。シリコンおよびエポキシ樹脂により形成される電界における電子の最大運動エネルギーが各開放サイクルの終わりの時点で 40 kV であると想定し、さらに、接触部が平行な帯電した 64 mm^2 の板であるものとして想定すると、 5 mm の離間距離の場合の最終的な電荷密度 σ_f は $4.4 \times 10^{10} \text{ e}^{-} \text{ cm}^{-2}$ である。図 3 に示す実験において、 $1.26 \times 10^5 \text{ X線光子 s}^{-1}$ のフラックスを記録した ($2.52 \times 10^5 / \text{開放サイクルに対応する}$)。金属を添加されたエポキシ樹脂の制動放射効率が $\sim 10^{-4}$ であると、最初の電荷密度 σ_i は $4.6 \times 10^{10} \text{ e}^{-} \text{ cm}^{-2}$ であり、サイクルの終わりの時点における表面上の電荷密度よりもわずかに高いだけである。

【 0 0 2 6 】

真空圧力を高めると、スペクトルのエンベロプ (図 4)、および X 線バーストのタイミング (図 4 / 差し込み図) の両方を変化させられることが分かった。1 ミリトルでのシステムを特徴付ける長い X 線放射の時間 (図 3) は短く出来、パルスの時間的長さは 10 ミリ秒より短く縮小出来る。これらのバーストは、エポキシ樹脂とシリコンとが最初に分離される際に起こった。この縮小を引き起こす最適な圧力は実験ごとに異なるが、通常は $20 \sim 30 \text{ ミリトル}$ の間であることが分かった。 296 K の温度、および 30 ミリトル の圧力 (4 N m^{-2}) において、電子の平均自由行程は計算により $\sim 8 \text{ mm}$ であるとされ、板の離間距離 (2.5 mm) と同じ桁である。このことは気体分子との相互作用が同メカニズムにおいてより大きな役割を果たしていることを示す。

【 0 0 2 7 】

圧力および接触サイクルの数の両方に応じているようにみられる X 線源の特徴的な減衰が見られた。これにも関わらず、連続するサンプリング間隔の時間尺度が短い場合にサイクル周波数を増やして 20 Hz までのほぼ線的な増加が可能であることが分かった。図 5 は、システムを 1 Hz 、 10 Hz 、および 20 Hz で動作させた場合の 1 秒あたりに記録された X 線光子の数を示す。図 5 の差し込み図は、示される 10 Hz 、 1 Hz 、および 20 Hz のシーケンスの 1 つの接触サイクル当たりの X 線光子の平均数をプロットしたものである。

10

20

30

40

50

【0028】

本願発明の実施形態よる、高電圧電源の代わりに摩擦電気効果を用いた単純なX線源が本例において示された。金属が添加されたエポキシ樹脂とシリコンゴムとの間の反復される接触の間、電荷が移動させられ、エポキシ樹脂よりもシリコンに負の電位を与える。結果として生じる電荷の不均衡により、金属が添加されたエポキシ樹脂に向かう過剰な電子の移動を促す電界を生成し、強い特徴的なX線のラインおよび制動放射を生成する。電界が比較的長い時間尺度において維持されたことが驚くべき発見である。高い圧力において、X線強度は20Hzまでのサイクル周波数に合わせて線的に高められる。このことは、実用的な108光子 s^{-1} を有するデバイスの実現に関する限られた制限は、少なくとも500Hzの周波数で動作出来るミリ単位のずれに対応可能なアクチュエータを見つ

10

【0029】

図6は、本願発明の他の実施形態に係るX線源200を示す。ここでも内部構造を明確に示すべく封入器は示されていない。動作においてX線源200は真空状態を提供すべく封入器に封入されている。封入器は、生成されるX線に対して他の部分と比べてより透明な窓部分を有してよい。X線源200は圧電変換器により駆動されるカンチレバー202を有する。第1接触部を設けるべく、カンチレバー202には薄いシリコン膜204が配される。第2接触部を設けるべく、エポキシ樹脂接触部206には金属粒子が混ぜ合わせられている。図7は、ネオン放電による特徴的な赤-橙色の輝きを放つ、封入器内の低圧力のネオン気体雰囲気において動作中のX線源200を示す写真である。

20

【0030】

図8は、本願発明の一実施形態に係る、少なくとも1つの狭エネルギー帯のX線のアレイを生成するX線源アレイ300の概略図である。X線源アレイ300は、アレイ状に配置された摩擦X線源302および摩擦X線源304など複数の摩擦X線源を含む。説明を明確にすべく2つの摩擦X線源のみに参照番号が付されている。アレイ300は、合計で16の摩擦X線源を有する。本実施形態において、X線源アレイ300に含まれる16の摩擦X線源はそれぞれ別個の封入器に封入され、それら封入器は互いに接続されている。複数の摩擦X線源のそれぞれは、封入器内で第1接触面を有して配置される第1接触部306と、封入器内で第2接触面を有して配置される第2接触部308と、第1接触部306および第2接触部308のうち少なくとも一方と動作可能に接続されたアクチュエータアセンブリ310とを含む(図9および10を参照)。アレイに含まれる別個の摩擦X線源のそれぞれは上述した実施形態のように構成され動作してもよい。図9は、図8に示すアレイ300の4分の1を示す分解図である。図10は、封入機内の構造を示す2つの摩擦X線源の断面図である。

30

【0031】

X線源アレイ300に含まれる摩擦X線源のそれぞれはカラー動画ディスプレイに類似するものとして考えることも出来る。各摩擦X線源は、選択されたエネルギー(または周波数)の1以上の狭エネルギー帯のX線を提供でき、よって或る意味においては、X線の「カラー」の放射パターンを提供できる。

40

【0032】

図11Aおよび図11Bは、本願発明の他の実施形態に係る、少なくとも1つの狭エネルギー帯のX線のアレイを生成するX線源アレイ400の概略図である。X線源アレイ400は、アレイ状に配置された摩擦X線源402および摩擦X線源404などの複数の摩擦X線源を含む。本実施形態は図8~10に示した実施形態と同様であるが、複数の摩擦X線源の全てが共通の封入機内に封入される点異なる。

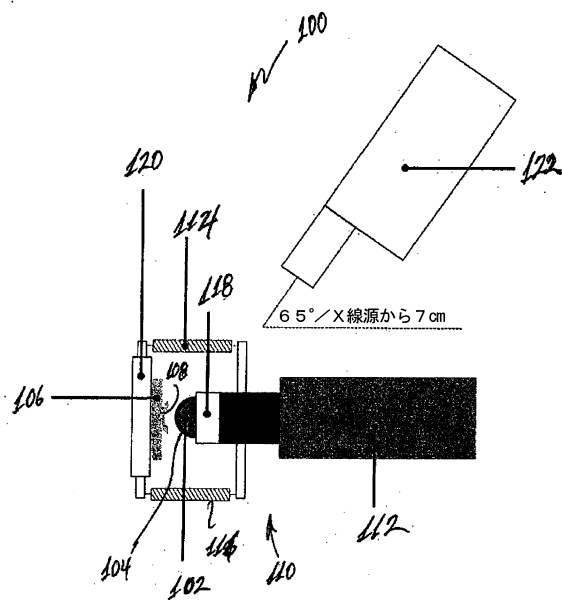
【0033】

本明細書において図示し説明した実施形態は、当業者に本願発明を実施し利用する方法を提示することのみを目的としている。本願発明に係る実施形態の説明を明確にすべく、特定の用語が用いられている。しかし本願発明は、その選択された特定の用語によって限

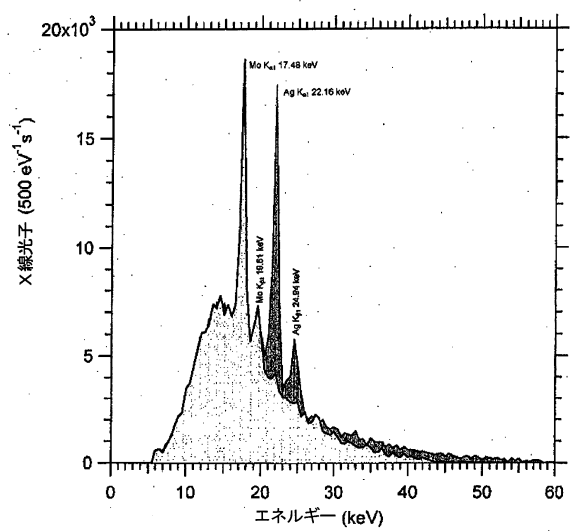
50

定されない。本願発明に係る上述した実施形態は、上述した提示の内容から当業者には理解いただけるように、本願発明から逸脱することなく修正および変更を加えることが可能である。特許請求項およびそれらの同等物の範囲において、特定して説明されるものは異なる実施が可能であることが理解されよう。

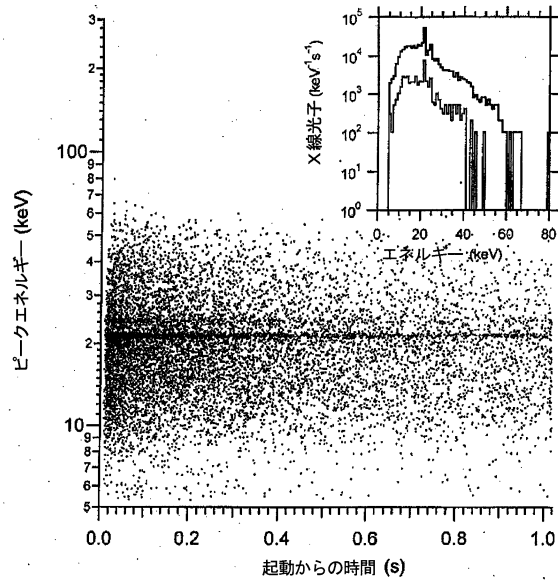
【図 1】



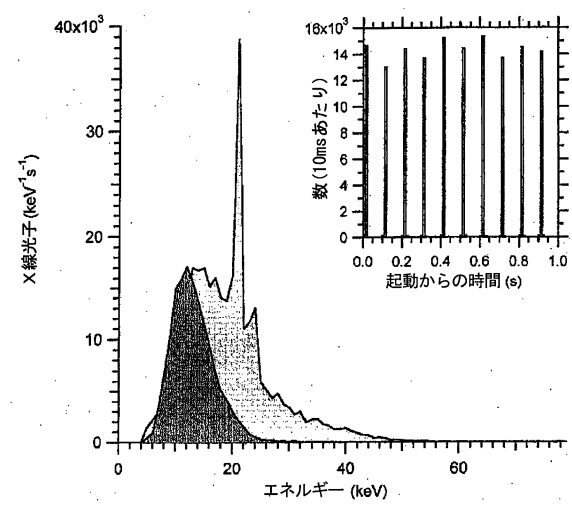
【図 2】



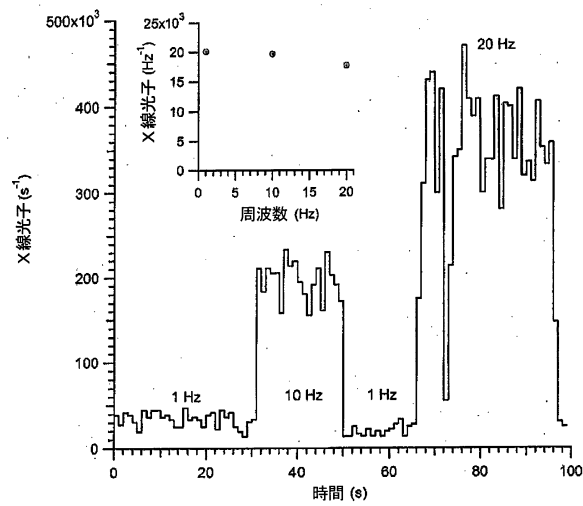
【図 3】



【図 4】



【図 5】



【図 6】

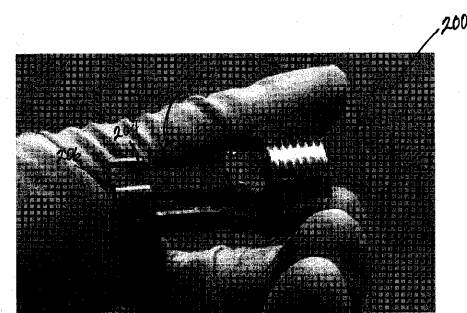


FIG. 6

【図 7】

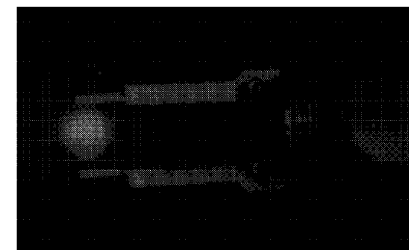


FIG. 7

【図 8】

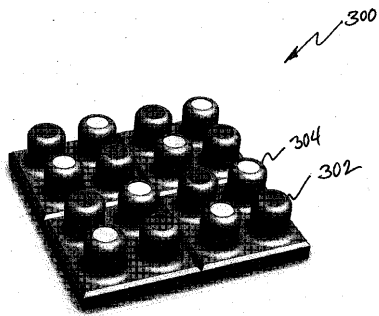


FIG. 8

【図 9】

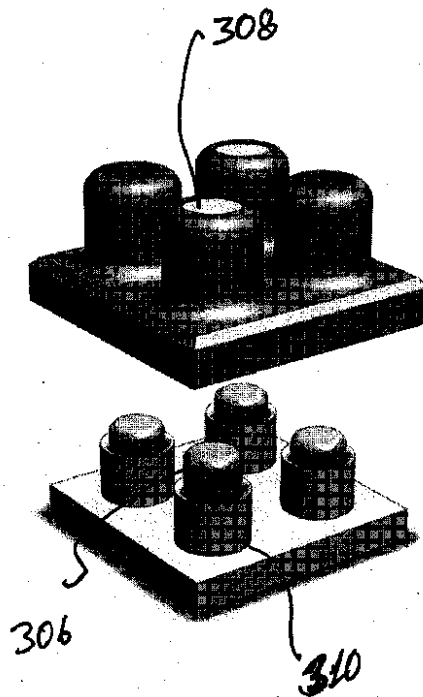


FIG. 9

【図 10】

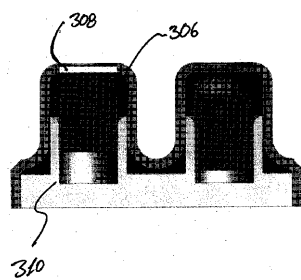
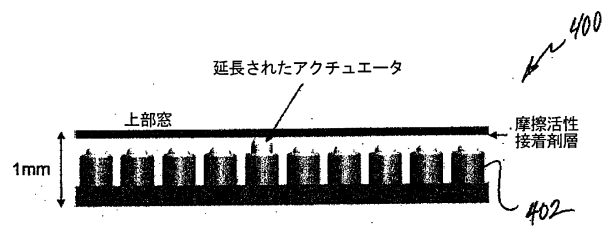
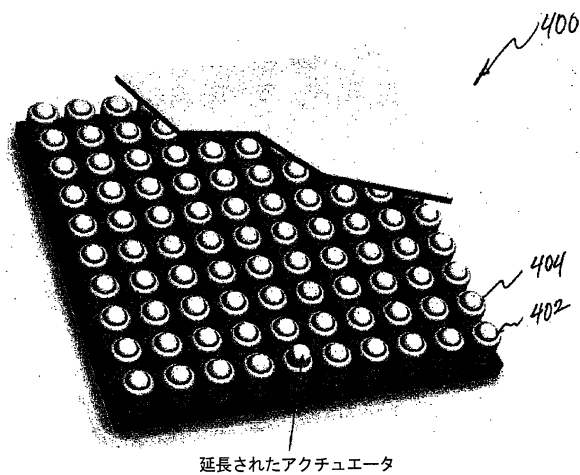


FIG. 10

【図 11 B】



【図 11 A】



延長されたアクチュエータ

フロントページの続き

(72)発明者 ブッターマン、セス、ジェイ .

アメリカ合衆国、9 4 6 0 7 - 5 2 0 0 カリフォルニア州、オークランド、フランクリン ストリート 1 1 1 1 ザ リージェンツ オブ ザ ユニバーシティ オブ カリフォルニア内

(72)発明者 ハード、ジョナサン

アメリカ合衆国、9 4 6 0 7 - 5 2 0 0 カリフォルニア州、オークランド、フランクリン ストリート 1 1 1 1 ザ リージェンツ オブ ザ ユニバーシティ オブ カリフォルニア内

(72)発明者 カマラ、カルロス

アメリカ合衆国、9 4 6 0 7 - 5 2 0 0 カリフォルニア州、オークランド、フランクリン ストリート 1 1 1 1 ザ リージェンツ オブ ザ ユニバーシティ オブ カリフォルニア内

審査官 桐畑 幸▲廣▼

(56)参考文献 国際公開第2 0 0 9 / 1 0 2 7 8 4 (WO , A 1)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

H 0 1 J 3 5 / 2 2

H 0 1 J 3 5 / 0 0

H 0 5 G 2 / 0 0