

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号
特許第4871994号
(P4871994)

(45) 発行日 平成24年2月8日(2012.2.8)

(24) 登録日 平成23年11月25日(2011.11.25)

(51) Int.Cl.

F I

G O 2 F 3/00 (2006.01)

G O 2 F 3/00

請求項の数 6 (全 9 頁)

(21) 出願番号	特願2009-513177 (P2009-513177)	(73) 特許権者	511076424
(86) (22) 出願日	平成19年5月22日 (2007.5.22)		ヒューレット・パカード デベロップメント カンパニー エル. ビー.
(65) 公表番号	特表2009-539140 (P2009-539140A)		Hewlett-Packard Development Company, L.P.
(43) 公表日	平成21年11月12日 (2009.11.12)		アメリカ合衆国 テキサス州 77070
(86) 国際出願番号	PCT/US2007/012242		ヒューストン コンパック センタ ド
(87) 国際公開番号	W02007/142826		ライブ ウェスト 11445
(87) 国際公開日	平成19年12月13日 (2007.12.13)	(74) 代理人	100087642
審査請求日	平成20年12月5日 (2008.12.5)		弁理士 古谷 聡
(31) 優先権主張番号	11/444,222	(74) 代理人	100076680
(32) 優先日	平成18年5月31日 (2006.5.31)		弁理士 溝部 孝彦
(33) 優先権主張国	米国 (US)	(74) 代理人	100121061
前置審査			弁理士 西山 清春
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 導波路に結合されるナノ粒子

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

単一光子を放出することができるナノ粒子と、
前記ナノ粒子に結合され、前記単一光子を受け取ることができる導波路と、
前記導波路に光学的に結合され、前記単一光子を前記導波路に向けて反射するように構成される後方反射体とを備え、
前記ナノ粒子は前記導波路の端部上に配置され、
前記ナノ粒子の背後において、前記後方反射体が前記導波路の前記端部に結合され、
前記単一光子を放出するために光パルスを前記後方反射体を通じて前記ナノ粒子に向けて誘導することで、前記ナノ粒子は励起され、
前記単一光子は前記導波路に向けて反射され、前記導波路を通じて誘導されることを特徴とするデバイス。

【請求項 2】

前記導波路はフォトニック結晶ファイバであることを特徴とする請求項 1 に記載のデバイス。

【請求項 3】

前記後方反射体は、前記ナノ粒子を励起するための励起周波数において少なくとも部分的に透過性であることを特徴とする請求項 1 に記載のデバイス。

【請求項 4】

前記後方反射体に光学的に結合され、前記ナノ粒子を励起するための励起周波数におい

て、前記光パルスを前記後方反射体を通じて前記ナノ粒子に向けて誘導することができるレンズをさらに備えることを特徴とする請求項1に記載のデバイス。

【請求項5】

ナノ粒子を導波路の端部上に配置し、
前記ナノ粒子の背後において、後方反射体を前記導波路の前記端部に結合し、単一光子を放出するために前記ナノ粒子を励起し、
前記単一光子を導波路に向けて反射し、
前記導波路を通じて前記光子を誘導し、
前記ナノ粒子を励起することは、光パルスを前記後方反射体を通じて前記ナノ粒子に向けて誘導することを含むことを特徴とする光子伝送における漏洩モードを抑圧する方法。

10

【請求項6】

単一光子を放出することができる量子光子放出手段と、
前記放出手段に結合され、前記単一光子を受け取ることができる光子誘導手段と、
前記光子誘導手段に光学的に結合され、前記単一光子を前記光子誘導手段に向けて反射するように構成される光子反射手段とを備え、
前記量子光子放出手段は前記光子誘導手段の端部上に配置され、
前記量子光子放出手段の背後において、前記光子反射手段が前記光子誘導手段の前記端部に結合され、
前記単一光子を放出するために光パルスを前記光子反射手段を通じて前記量子光放出手段に向けて誘導することで、前記量子光放出手段は励起され、
前記単一光子は前記光子誘導手段に向けて反射され、前記光子誘導手段を通じて誘導されることを特徴とするデバイス。

20

【発明の詳細な説明】

【背景技術】

【0001】

ナノテクノロジー及び量子情報技術は、分子レベルにおいて構築される極めて小さな電子回路及び光学回路の設計を伴う、科学の新たな分野である。従来のオプトエレクトロニクス回路は、チップを形成するために半導体ウエハを用いて製造される。エッチングによって、半導体ウエハ又はチップの中に回路が形成される。エッチング工程は、チップの特定の領域又は層から材料を除去する。対照的に、ナノテクノロジーは一般的に、材料、多くの場合に1つずつ原子を追加することによって上方に向かって構築されるデバイスを取り扱う。この技法によれば、結果として、あらゆる粒子が1つの目的を有することができるデバイスが形成される。したがって、エッチングによって形成されるデバイスよりもはるかに小さな、超小型のデバイスを実現することができる。たとえば、わずか数個の原子から論理ゲートを構成することができる。単原子厚である「ナノワイヤ」から、電気導体を構築することができる。単一の陽子の存否によって、1ビットのデータを表すことができる。

30

【0002】

量子情報技術は、より小型で、さらに強力になる可能性があるコンピュータを作り出すための新たな手段を提供する。現在、より小型で、さらに強力なコンピューティングデバイスを作り出す可能性を探るために、量子重ね合わせ及び量子エンタングルメントのような科学理論が用いられている。当該技術分野の発展によって、情報を伝達するために、光粒子、すなわち光子が用いられるようになった。光は種々の状態に偏光することができ（たとえば、水平偏光、垂直偏光）、種々の運動量及び周波数状態において存在することもできる。これらの特性を利用することによって、単一光子が、1つの量子情報ビットを表すことができるようになる。

40

【発明の開示】

【0003】

本発明を例示するために、図面では、1つの例示的な実施態様が示される。しかしながら、本発明は、図示されるものと全く同じ構成及び手段には限定されないことは理解され

50

たい。

【発明を実施するための最良の形態】

【0004】

量子ビットの使用は、研究者らに、コンピューティング技術における大きな進歩の可能性を与える。光子重ね合わせ及びエンタングルメントの理論を理解し、情報を生成するためにその理論を利用することができることは、大変興味深い新たな分野である。しかしながら、光子を量子ビットとして使用する可能性を巡る1つの重要な問題は、望まれる場所において要求に応じて光子を生成する必要があることである。第2の重要な問題は、光子を検出及び捕捉することができることであり、すなわち、光子源から放射される光を効率的に収集することができることである。上記の属性はいずれも、単一光子源及び非線形デバイスを作り出す際に有用である。これらの要件に対処するためのいくつかの例示的なデバイス及び技法が、2005年6月10日に出願された「Fiber-Coupled Single Photon Source」と題する、同時係属中で、同じ譲受人に譲渡される米国特許出願第11/149,511号（代理人整理番号第200406613-1号）に記述されており、当該特許出願の開示は、参照により本明細書に援用される。

10

【0005】

図1は、導波路150及び後方反射体130に結合される1つの例示的なナノ粒子110を備える、本発明の一実施形態によるデバイスの分解図を示す。ナノ粒子110は、要求に応じて、1つの光子を放出することができ、それゆえ、光子源としての役割を果たすことができる。

20

【0006】

1つの例示的なナノ粒子110は、光の波長よりも小さい寸法を有する粒子であり、本発明の一実施形態を用いるデバイスが動作することになる望ましい波長において、光子を放出するように構成することができる。典型的には、ナノ粒子110は、直径が約10nm〜100nmである。一般的に、ナノ粒子110が本発明の一実施形態によるデバイスにおいて有用であるためには、そのナノ粒子110は、光学的にアドレス指定することができる単一の量子系を提供しなければならないか、又は多数の量子系が存在する場合には、周波数選択を通じて、それらの量子系を個々にアドレス指定することができなければならない。

30

【0007】

いくつかの実施形態では、ナノ粒子110は半導体基板上に成長する。IⅤ族半導体材料、IⅡⅠ-V族半導体材料又はIⅠ-VⅠ族半導体材料を用いることができる。典型的な材料は、Si又はGaAsを含むことができる。

【0008】

1つの例示的なナノ粒子110を、後方反射体130に、又は導波路150に、又はその両方に結合することができる。たとえば、ナノ粒子110は、後方反射体130上に配置されるか若しくはその上で成長することができるか、又は導波路150の端部に配置されるか若しくはその上で成長することができる。適切なナノ粒子110の例示は、窒素空孔(NV)中心を有するダイヤモンドナノ結晶、及び半導体ナノ結晶のようなナノ結晶を含む。さらなる実施形態では、ナノ粒子110は、電氣的に駆動されるか又は光学的に駆動される量子ドットを含むことができる。量子ドットは、電荷又は光レーザによって励起されるときに、1つの光子を生成することができる。ナノ粒子110のさらなる例は、後方反射体130上に、又は後方反射体130上にあるマイクロピラー内に配置されるか又はその上で成長する自己組織化量子ドットを含む。

40

【0009】

例示される実施形態では、導波路150はフォトニック結晶ファイバであり、それは漏洩モードを抑圧することができる。フォトニック結晶ファイバは、「ホーリー」ファイバと呼ばれ、ファイバ内に存在する複数の空孔通路160を備える。適切なフォトニック結晶ファイバの例には、中実又は中空いずれかのコアがある。他の実施形態では、導波路150として、漏洩モードを抑圧することができる適切な中空コアバンドギャップファイバ

50

、たとえばオムニガイドファイバを用いることができる。

【0010】

1つの例示的な実施形態では、ナノ粒子110は、導波路150の端部上にナノ粒子110を成長させるか、又は配置すること等によって、導波路150の端部上に位置決めすることができ、後方反射体130（たとえば、分布ブラッグ反射器）は、ナノ粒子110上に、且つ導波路150の端部に成長することができ、それにより、導波路150の端部にナノ粒子110を封止するための層を形成する。本発明の実施形態では、ナノ粒子110は、必ずしもそうである必要はないが、導波路150の端部の中心に完全に配置されることがある。いくつかの実施形態では、ナノ粒子110は、空孔通路160に、たとえば、中央の空孔通路160の内縁に結合されることがある。いくつかの実施形態では、ナノ粒子110は空孔通路160の完全に外側にある。他の実施形態では、ナノ粒子110は、空孔通路160に入ることがある。

10

【0011】

後方反射体130は、導波路150に向けて光子を反射するように構成される。1つの例示的な後方反射体130は、ブラッグ反射器（たとえば、分布ブラッグ反射器）を含む。ブラッグ反射器は、当該技術分野において既知であり、高い反射率を必要とする用途において用いられる。いくつかの実施形態では、後方反射体130は周波数選択性ミラーである。さらなる実施形態では、後方反射体130は、金属反射体、たとえば、金属薄膜を含む。

20

【0012】

位置合わせを維持するために、いくつかの実施形態では、導波路150、ナノ粒子110及び後方反射体130は、たとえば、接着剤を用いる等の既知の技法を用いて、所定の場所に固定することができる。いくつかの実施形態では、後方反射体130は、たとえば、適切に低い屈折率を有する接着剤又はエポキシを用いて、導波路150の端部に機械的に結合することができる。

【0013】

ナノ粒子110は、たとえば、光パルスで励起することによって、光子を放出するようにトリガすることができ、その場合、ナノ粒子110は、ナノ粒子110の放射波長よりも短い励起波長を有するパルスを用いて、光学的にポンピングされる。いくつかの例示的な実施形態では、たとえば、図4及び図5に示されるように、後方反射体130が励起波長において部分的に透過性である場合には、励起パルスは後方反射体130を通じて入射することができる。

30

【0014】

さらなる実施形態では、励起パルスは導波路150の側面を通じて入射することができるか、又は導波路150の導波モードを通じて（たとえば、ナノ粒子110の遠端にある導波路150の第2の端部から）直接入射することができる。いくつかの実施形態では、励起波長がナノ粒子110の自然放出波長と異なる場合には、結果として放出される光子を、後方散乱又は散乱される励起パルスから分離するために、後に、スペクトルフィルタリングすることができる。さらなる実施形態では、結果として放出される光子と、後方散乱又は散乱される励起パルスとを区別するために、励起パルスをタイミング制御又はゲート制御することができる。

40

【0015】

代替的に、本発明の一実施形態によるデバイスは、適切な時間プロファイルを有する1つ又は複数の入力パルスがナノ粒子110の光学的な遷移と共振する場合には、非線形デバイスとしての役割を果たすことができる。その際、そのパルスは、ナノ粒子110によって与えられる非線形性を通じて互いに相互作用し、それにより、反射したパルスにおけるスイッチング又はエンタングルメントを可能にする。

【0016】

図2を参照すると、ナノ粒子110を導波路150に結合することができるようにするための代替的な実施形態が示される。いくつかの実施形態では、ナノ粒子110は基板2

50

00上に成長することができる。ナノ粒子110は、中央の空孔通路160のような導波路150の空孔通路160と位置合わせされるか、又はその中に延在するように位置決めされる。

【0017】

空孔通路160は、導波路150を通じて、ナノ粒子110に結合される導波路150の端部にある孔から、導波路150の反対側の端部にある対応する孔まで延在する。しかしながら、明確に例示するために、空孔通路160の孔間の部分は、図2には示されない。

【0018】

ナノ粒子110と導波路150との間の所望の機械的な位置関係を維持することは、難しい場合がある。この困難を克服するために、導波路150を、基板200の表面上に正確に位置決めすることができる。いくつかの実施形態では、ナノ粒子110は、シリコンのような基板200の中に成長する。導波路150をその中に位置決めすることができる位置合わせ孔140が、ナノ粒子110を包囲する基板200内にエッチングされる。ナノ粒子110の場所に導波路150を正確に位置合わせすることによって、ナノ粒子110と導波路150との間の機械的な位置関係をさらに良好に維持することができ、結果として、生成された光子を捕捉する確率が高くなる。位置合わせを維持するために、たとえば、接着剤を用いること等の既知の技法を用いることによって、導波路150を所定の位置に固定することができる。

【0019】

後方反射体130は、指標付け孔140の下に配置されるか又はその下で成長する。たとえば、後方反射体130は、指標付け孔140の底面にあるブラッグ反射器を含むことができる。いくつかの実施形態では、後方反射体130は、導波路150の端部の向かい側にある、基板200の下側201に位置決めすることができる。

【0020】

例示される実施形態では、ナノ粒子110が導波路150内に含まれる選択された空孔通路160内に延在するように、導波路150が指標付け孔140内に位置決めされる。この構成を用いるとき、ナノ粒子110は、導波路150に対して正確に位置決めすることができる。さらに、フォトニック結晶ファイバが典型的には、電気通信業界において一般的に用いられるような従来の単一モードファイバよりも多くの開口数を有するという事実に加えて、ナノ粒子110の双極放射と、導波路150の導波モードとの間のモード整合によって、結合効率を向上させることができる（たとえば、単一モードファイバは典型的には、約0.2～0.5の範囲の開口数を有し、一方、フォトニック結晶ファイバは典型的には、約0.7～0.9の範囲の開口数を有する）。

【0021】

いくつかの事例では、直接結合過程は、図3に示されるような構成を用いることによって改善されることがある。ナノ粒子110を、2次元のフォトニック結晶302を含む基板300内に埋め込むことができる。2次元のフォトニック結晶は、2次元平面において、ブラッグ反射及び大きな屈折率分散を与えることができる。結晶内の各界面において、光は、その一部が反射され、一部が透過される。フォトニック結晶のこの特性を用いることによって、ナノ粒子110によって放出される光子は、導波路150の基本モードに対して、さらに良好にモード整合されることができる。孔309のパターンは、2次元のフォトニック結晶内にエッチングすることができ、これは、ナノ粒子110に対して正確な機械的位置に導波路150を位置合わせするために用いることができる。

【0022】

後方反射体130は、孔309のうちの1つ又は複数の下に配置されるか又はその下に成長する。たとえば、後方反射体130は、ナノ粒子110を含む孔309の底面にあるブラッグ反射器を含むことができる。いくつかの実施形態では、後方反射体130は、導波路150の端部の向かい側にある、基板300の下側311に位置決めすることができる。

【0023】

ナノ粒子110を2次元のフォトニック結晶302内に埋め込むことによって、ナノ粒子110による放射が導波路150の外側のモードに入らないようにされる。さらに、ナノ粒子110を、InGaAs又はSi/SiO₂コーティングでコーティングされたガラスのような、2次元のフォトニック結晶基板302内に埋め込むことによって、大部分の方向において、放射がナノ粒子110から発散するのが避けられる。生成された光子を捕捉するために、導波路150はナノ粒子110に極めて近接して（たとえば、1μm未満の距離に）位置決めすることができる。

【0024】

図4は、本発明の1つの例示的な実施形態による、単一モード光ファイバ410に結合される1つの例示的なナノ粒子110、導波路150及び後方反射体130を備えるデバイスの分解図を示す。本発明の一実施形態では、ナノ粒子110の光学的なポンピング又は光学的な励起を与えるために、任意の長さの単一モード光ファイバ410が、入射端411において光子源（図示せず）に結合される。光子は、ファイバ410を通じて、入射端411から目的端412まで伝送される。ファイバ410は、導波路150のモードに概ねモード整合するように作ることができる。いくつかの実施形態では、ファイバ410は、たとえば、接着剤を用いること等の既知の技法を用いることによって、後方反射体130及び導波路150に結合される（たとえば、接着又は接合される）ことがある。

【0025】

後方反射体130は、導波路150内に光子を反射するように構成され、励起波長において少なくとも部分的に透過性であり、光子を励起波長においてファイバ410の目的端412からナノ粒子110まで伝送することができるようにする。例示される実施形態では、ナノ粒子110の放射波長よりも短い励起波長を有するパルス、ファイバ410を通じてナノ粒子110まで伝送することによって、ナノ粒子110を光学的ポンピングすることができる。いくつかの実施形態では、後方反射体130は周波数選択性ミラーである。他の実施形態では、後方反射体130は金属反射体を含む。実例では、金属後方反射体130は、励起周波数において1パーセント（1%）未満の透過性を有するにすぎないが、金属反射体130を通過するパルスの部分がナノ粒子110を励起するのに十分であるように、ファイバ410を通じて十分に強いパルスを与えることができる。

【0026】

図5は、本発明の1つの例示的な実施形態による、レンズ520に光学的に結合される1つの例示的なナノ粒子110、導波路150及び後方反射体130を備えるデバイスの分解図を示す。本発明の一実施形態において、ナノ粒子110の光学的なポンピング又は光学的な励起を与えるために、レンズ520は、光ビーム510をナノ粒子110上に合焦するように構成される。いくつかの実施形態では、レンズ520は、対物レンズ（図示せず）内に実装することができる。さらなる実施形態では、レンズ520は、ビーム510をナノ粒子110上に誘導し、合焦するための多数のレンズ、ミラー等を備える光学縦列又は光学系の一部にすることができる。

【0027】

後方反射体130は、導波路150内に光子を反射するように構成され、励起波長において少なくとも部分的に透過性であり、このことによって、光ビーム510の光子が、励起波長において後方反射体130を通じてナノ粒子110まで伝送することができるようにする。例示される実施形態では、ナノ粒子110の放射波長よりも短い励起波長を有するパルスを、レンズ520を通じてナノ粒子110まで伝送することによって、ナノ粒子110を光学的ポンピングすることができる。いくつかの実施形態では、後方反射体130は周波数選択性ミラーである。他の実施形態では、後方反射体130は金属反射体を含む。実例では、金属後方反射体130は、励起周波数において1パーセント（1%）未満の透過性を有するにすぎないが、金属反射体130を通過するパルスの部分がナノ粒子110を励起するのに十分であるように、レンズ520を通じて十分に強いパルスを伝送することができる。

10

20

30

40

50

【0028】

いくつかの実施形態が説明されてきたが、異なる実施形態からの特徴が組み合わせられることもある。たとえば、図4に示されるファイバ410又は図5に示されるレンズ520のいずれかを、ナノ粒子110の向かい側にある、図1～図3に示される後方反射体130の側に位置決めすることができる。たとえば、図5に示されるレンズ520を用いて、光ビーム510が図1～図3に示される後方反射体130を通過しない側面位置のような位置から、光ビーム510を図1～図3に示されるナノ粒子110上に向けることができる。説明された実施形態に対する種々の変更は、本明細書において提供される開示から当業者には明らかになるであろう。したがって、本発明は、その精神又は不可欠な属性から逸脱することなく、他の具体的な形で具現化することができ、したがって、本発明の範囲を指摘する際には、上記の明細書ではなく、添付の特許請求の範囲が参照されるべきである。

10

【図面の簡単な説明】

【0029】

【図1】本発明の一実施形態による、導波路及び後方反射体に結合される1つの例示的なナノ粒子を備えるデバイスの分解図である。

【図2】本発明のさらなる実施形態による、導波路及び後方反射体に結合される1つの例示的なナノ粒子の概略図である。

【図3】本発明の一実施形態による、導波路及び後方反射体に結合される、2次元のフォトリック結晶に埋め込まれる1つの例示的なナノ粒子の概略図である。

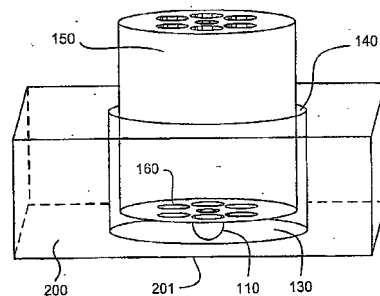
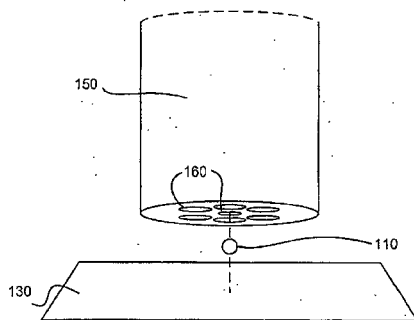
20

【図4】本発明の1つの例示的な実施形態による、単一モード光ファイバに結合される、1つの例示的なナノ粒子、導波路及び後方反射体を備える、デバイスの概略的な分解図を示す。

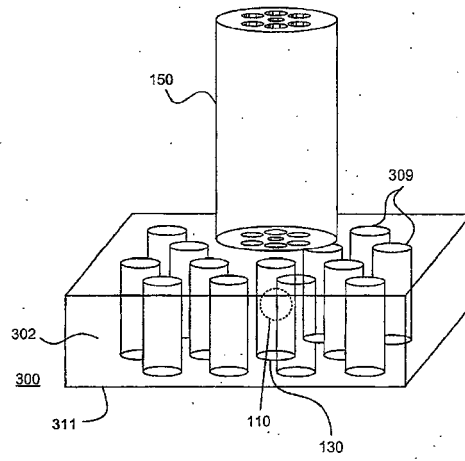
【図5】本発明の1つの例示的な実施形態による、レンズに結合される1つの例示的なナノ粒子、導波路及び後方反射体を備える、デバイスの概略的な分解図を示す。

【図1】

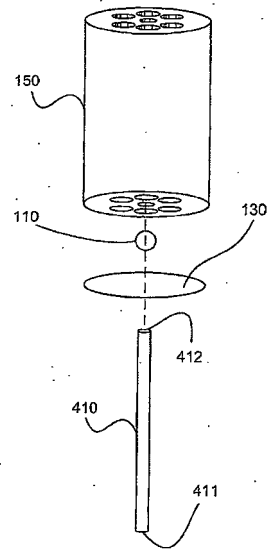
【図2】



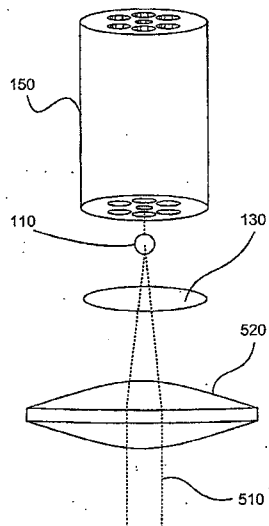
【図 3】



【図 4】



【図 5】



フロントページの続き

- (72)発明者 サントリ チャールズ
アメリカ合衆国 カリフォルニア 94304 パロ アルト, ペイジ ミル ロード 150
1
- (72)発明者 スピレーン ショーン
アメリカ合衆国 カリフォルニア 94304 パロ アルト, ペイジ ミル ロード 150
1
- (72)発明者 ビューソレイル レイマンド
アメリカ合衆国 ワシントン 98052 レドモンド, ノースイースト 175番目 プレイ
ス 13837
- (72)発明者 フィオレンティーノ マルコ
アメリカ合衆国 カリフォルニア 94304 パロ アルト, ペイジ ミル ロード 150
1

審査官 山本 貴一

- (56)参考文献 米国特許第07019333 (US, B1)
特開2006-060143 (JP, A)
特表2008-546039 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02B 6/00-6/10
G02F 3/00
H01S 3/00-3/10
IEEE Xplore
JSTPlus(JDreamII)
JST7580(JDreamII)