

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4233861号  
(P4233861)

(45) 発行日 平成21年3月4日(2009.3.4)

(24) 登録日 平成20年12月19日(2008.12.19)

(51) Int. Cl.		F I		
HO 1 L 29/66	(2006.01)	HO 1 L 29/66		M
HO 1 L 27/10	(2006.01)	HO 1 L 27/10	4 5 1	

請求項の数 4 (全 11 頁)

(21) 出願番号	特願2002-364588 (P2002-364588)	(73) 特許権者	503360115
(22) 出願日	平成14年12月17日(2002.12.17)		独立行政法人科学技術振興機構
(65) 公開番号	特開2004-200259 (P2004-200259A)		埼玉県川口市本町4丁目1番8号
(43) 公開日	平成16年7月15日(2004.7.15)	(74) 代理人	100089635
審査請求日	平成16年10月27日(2004.10.27)		弁理士 清水 守
		(72) 発明者	初貝 安弘
			千葉県千葉市花見川区浪花町1008-1
			東京大学検見川第2宿舍3-206
		審査官	小川 将之

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】非接触型多ビット量子状態制御方法及び量子状態制御装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

ホール伝導度が量子化する状況下で、2次元状の電子系に複数の穴を通して直接接触しない複数の磁束をビット数分設定し、前記複数の磁束をある順序で磁束単位だけ変化させることにより、前記穴の近傍に存在する量子ホール効果におけるエッジ状態としての局在した電子状態を変化させて、この系の量子状態を非接触型で量子的コヒーレンスを失うことなく任意に制御可能にすることを特徴とする非接触型ビット量子状態制御方法。

【請求項2】

(a) 下部ソレノイド層と、  
 (b) 該下部ソレノイド層上に積層され、量子ホール層と、該量子ホール層を挟むキャパシタ層とを具備する量子層と、  
 (c) 該量子層上に積層される上部ソレノイド層とを具備することを特徴とする非接触型多ビット量子状態制御装置。

【請求項3】

請求項2記載の非接触型多ビット量子状態制御装置において、前記ソレノイド層は、ソレノイド素子層と、リード線を導出する絶縁層とを交互に積層することを特徴とする非接触型多ビット量子状態制御装置。

【請求項4】

請求項2記載の非接触型多ビット量子状態制御装置において、同一光源から発した空間的にも時間的にもコヒーレンスを保つレーザー光を光学系を介してスプリットさせ、前記

10

20

量子層の異なる場所に照射し、その複数の散乱光間の干渉を起こさせ、干渉後の強弱の組合せのパターンを出力とすることを特徴とする非接触型多ビット量子状態制御装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、非接触型多ビット量子状態制御方法及び量子状態制御装置に係り、特に量子ホール効果を用いた非接触アハロノフ・ボーム型多ビット量子状態制御方法及び量子状態制御装置に関するものである。

【0002】

【従来の技術】

現状の電子デバイス、特に量子計算を目指す量子コンピュータにおいては、動作中のその素子の（量子力学的）状態を外乱から隔離して、いかに保つかが重要かつ本質的な問題である。しかし、いかなる素子であれ、何らかの動作をさせるためには、外部からの入力として相互作用を受け、その外部との相互作用を通じて、結果を出力するわけであり、外乱からの隔離とは常に相矛盾する要求がなされることとなる。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】

そこで、本発明は、この一見不可能とも思える基本的問題に対して、量子力学の原理に基づき、非接触型の電子状態制御を行うことができる非接触型多ビット量子状態制御方法及び量子状態制御装置を提供することを目的とする。

【0004】

その基本的構成は、2次元電子系に複数の穴を開け、前記穴の内部のみに存在する磁束により2次元電子系の量子力学的電子状態を非接触なままで制御しようとするものである。

【0005】

【課題を解決するための手段】

本発明は、上記目的を達成するために、

〔1〕非接触型ビット量子状態制御方法において、ホール伝導度が量子化する状況下で、2次元状の電子系に複数の穴を通して直接接触しない複数の磁束をビット数分設定し、前記複数の磁束をある順序で磁束単位だけ変化させることにより、前記穴の近傍に存在する量子ホール効果におけるエッジ状態としての局在した電子状態を変化させて、この系の量子状態を非接触型で量子的コヒーレンスを失うことなく任意に制御可能にすることを特徴とする。

【0006】

〔2〕非接触型多ビット量子状態制御装置において、下部ソレノイド層と、この下部ソレノイド層上に積層され、量子ホール層と、この量子ホール層を挟むキャパシタ層とを具備する量子層と、この量子層上に積層される上部ソレノイド層とを具備することを特徴とする。

【0007】

〔3〕上記〔2〕記載の非接触型多ビット量子状態制御装置において、前記ソレノイド層は、ソレノイド素子層と、リード線を導出する絶縁層とを交互に積層することを特徴とする。

【0008】

〔4〕上記〔2〕記載の非接触型多ビット量子状態制御装置において、同一光源から発した空間的にも時間的にもコヒーレンスを保つレーザー光を光学系を介してスプリットさせ、前記量子層の異なる場所に照射し、その複数の散乱光間の干渉を起こさせ、干渉後の強弱の組合せのパターンを出力とすることを特徴とする。

【0009】

【発明の実施の形態】

以下、本発明の実施の形態について詳細に説明する。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 1 0 】

本発明の説明の前に、本発明にかかる用語の説明を行う。

## 【 0 0 1 1 】

〔量子ホール効果とエッジ状態〕

1979年に発見された、磁場下の2次元電子系において、ホール伝導度が極めて高い精度の量子化を示す現象（量子ホール効果と呼ぶ）が起きる。発見者のV. Klitzingは、その業績によりノーベル物理学賞を受ける。その基本的概念は現代の物性物理学に極めて大きな影響を与える。21世紀のエレクトロニクスにおいても重要な影響を与えることは確実である。

## 【 0 0 1 2 】

図2は $1/B$ （磁場の逆数）とホール伝導度との関係を示す図である。

## 【 0 0 1 3 】

この図に示すように、量子ホール効果においては物理系の形状に応じてエッジ状態と呼ばれる特有の局在状態が存在し、ホール伝導度の量子化に対して本質的な役割を果たす。本発明は、このエッジ状態を、次のアハロノフ・ボーム効果と併用し新たな量子干渉型電子デバイスを提供するものである。

## 【 0 0 1 4 】

〔アハロノフ・ボーム効果〕

古典的には、磁場が存在しないところを通過する電子は、当然ながら磁場の影響を一切受けないが、量子力学的には、ある状況下においては磁場のないところを通過する電子でさえ、磁場の影響を受ける可能性があることをアハロノフとボームは指摘した。これは、量子力学的に本質的に重要な物理量が磁場ではなくベクトルポテンシャルであることによる。例えば、図3に示すように、ソレノイド11を挟んで左右の経路12, 13を通る電子は、磁場の存在しない場所を通るにもかかわらず、その干渉パターンはソレノイド11の磁束に依存することとなる。この現象は、物性物理のみならず全ての量子力学的物理現象における基本的概念である。実験的にもメソスコピック系において近年確認された。本発明における非接触型の電子輸送を行うにあたってこの原理が本質的に重要となる。

## 【 0 0 1 5 】

〔ゲージ不変性と磁束量子〕

電磁気学の基礎方程式であるマクスウェル方程式が持つある種の対称性をゲージ対称性と呼ぶが、その重要な量子力学的帰結としてゲージ不変性が導かれる。例えば、磁束量子と呼ばれる単位だけ異なる磁束は、遠方から見たとき量子力学的には区別できないこととなる。本発明においては、この磁束量子程度の磁束を2次元電子系において非接触な形で多数制御することが必要である。必要な磁場強度は2次元電子系に開ける穴の大きさに依存する。ただし、デバイス全体に渡る量子力学的コヒーレンスを保つことが本発明においては必須である。

## 【 0 0 1 6 】

〔クーロンブロッケード〕

ある閉じた系に電子が一つ局在していると、電子の持つ電荷同士のクーロン斥力によって次の電子が同じまたは近くの場所に局在する確率が減少する現象である。伝導度を精密に測定することにより、系の大きさが十分小さくなったとき、一つの電子状態の存在の有無を確認する方法として用いられる。本発明においては、局在したエッジ状態の有無並びに個数をこの効果で検出する。

## 【 0 0 1 7 】

図1は本発明の実施例を示す量子ホール効果を用いた多ビット量子状態制御装置の模式図である。

## 【 0 0 1 8 】

この図において、1はシリコン反転層、超格子等の2次元電子系、2は基板、3はその基板2にあけられた複数の穴、Bは一様磁場、 $1 \sim 12$ は2次元電子系には直接接触しないような磁束である。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 1 9 】

シリコン反転層、超格子等の2次元電子系1を、複数の穴3を開けた形状の基板2に形成し、全体に一樣磁場Bを印加し、整数量子ホール効果によりそのホール伝導度が整数に量子化するような磁場、電子密度に系を調整する。

## 【 0 0 2 0 】

その後、図1に示すような複数の穴3の位置に2次元電子系1には直接触しないような磁束を複数、例えば $\phi_1 \sim \phi_{12}$ を系に印加する。この設定下において、2次元電子系1の複数の穴3の近傍には量子ホール効果によって、上述のエッジ状態による局在状態が何個所か存在する（その局在状態の位置は、磁束 $\phi_1 \sim \phi_{12}$ に依存して決まる）。

## 【 0 0 2 1 】

ここで、磁束 $\phi_1 \sim \phi_{12}$ を磁束量子 $\phi_0 = hc/e$ だけ断熱的に変化させると、局在した1電子状態がアハロノフ・ボーム効果により移動することとなる。例えば、 $\phi_1$ を $\phi_0$ 、 $\phi_7$ を $-\phi_0$ だけ変化させると、局在状態Aから局在状態Bへの電子移動を起こすことができることとなる。

## 【 0 0 2 2 】

さらにまた、 $\phi_8$ を $\phi_0$ 、 $\phi_{10}$ を $-\phi_0$ だけ変化させると、局在状態Cから局在状態Dへの電子移動が生じるとする。このとき、前述のAからBへの電子移動と、ここでのCからDへの電子移動はお互いに全く干渉なく独立に行える。

## 【 0 0 2 3 】

この原理を用いることにより、穴周りの磁束を変化させることにより、磁束周り局在電子状態を（量子）ビットとした、非接触型多ビット量子状態制御を行うことができる。つまり、非接触型多ビット量子状態制御方法を提供することができる。

## 【 0 0 2 4 】

ところで、量子ホール効果におけるエッジ状態の存在ならびに単一の磁束による電子移動の可能性は、理論的には従来から既知である。本発明においては、その基礎的な理論の概念を応用し、多くのエッジ状態をアレイ状に具体的に構成した系が量子ビットとして極めて有利である事実に着目し、さらには多ビット化した際のビット間の相互非干渉性を用いた具体的な多ビット量子状態制御方法及びそれを用いた多ビット量子状態制御装置を提供する点にある。

## 【 0 0 2 5 】

上記したように、本発明の特徴点は、移動する局在電子にその制御磁束は直接触していない点にあり、この物理的な過程は非接触型の電子過程であるため外部からの攪乱を極めて受け難く、系の量子的コヒーレンスの保持のためには極めて高い技術的メリットがある。

## 【 0 0 2 6 】

また、この原理は、量子ホール効果の基礎概念である系のゲージ不変性に基づくため、穴さえあればその形がどうであれ、その穴の近傍に局在状態が原理的に生じることとなり、デバイス化する際の高い工作精度は必要でないことが、具体的に本発明をデバイス化する際に極めて有利である。また、同様の理由により、構成基板等に存在する不純物に対しても極めて安定であることも利点である。

## 【 0 0 2 7 】

これは、量子ホール効果におけるホール伝導度の極めて高い精度とその起源を同じくする。換言すれば、量子ホール効果における極めて高い精度のホール伝導度の量子化が、本発明において極めて重要な系の量子的コヒーレンスを保持するともいえる。

## 【 0 0 2 8 】

この原理の応用上必須な点は、一つ一つの穴に通すべき磁束が磁束単位程度であるという極めて強い磁場の構成並びにその制御のみである。

## 【 0 0 2 9 】

（本発明の具体的な応用例1）

本発明は、磁束周りの局在電荷を、微小コンデンサーもしくはクーロンブロック法

10

20

30

40

50

で検出することにより、電荷の存在を古典的なビットとした、多ビットのメモリ等電子記憶デバイスが可能となる。この記憶素子においては、メモリ上の状態を変化させるために、本発明による非接触型の量子状態操作を用いることができ、上記した本発明の技術的メリットを享受することができる。

【 0 0 3 0 】

( 発明の具体的応用例 2 )

本発明は、全て量子力学的コヒーレンスを保った過程から構成されるため、素子全体を一つの量子系とした量子計算機としての基礎素子として用いることができる。その際、磁束の穴周りの電子状態は古典的なビットではなく、位相情報を保つ量子ビット(量子多ビット)として用いることができる。このデバイスにおいては本発明の特徴である非接触型である点がデバイスの量子的コヒーレンスを極めて高く保存する点で、他の量子ビット制御方法に対して有利な点である。

【 0 0 3 1 】

次に、本発明の具体例を示す機能素子について説明する。

【 0 0 3 2 】

図 4 は本発明にかかる機能素子の全体を示す模式図、図 5 はその機能素子のソレノイド層の構成の説明図であり、図 5 ( a ) はそのソレノイド層の斜視図、図 5 ( b ) はそのソレノイド層の平面・右側面・正面を示す図、図 5 ( b ) はそのソレノイド層の展開平面図、図 6 はその機能素子の量子層の構成図であり、図 6 ( a ) はその量子層の断面模式図、図 6 ( b ) はその量子層の一部を構成する量子ホール層の平面模式図、図 6 ( c ) はその機能素子の量子層の一部を構成するクーロンブロック層の平面模式図である。

【 0 0 3 3 】

図 4 に示すように、機能素子 2 0 は、中央に配置された量子層 3 1 をソレノイド層 2 1 で上下からサンドイッチ状に積層した形状をしている。

【 0 0 3 4 】

図 5 に示すように、ソレノイド層 2 1 は、ソレノイド素子層 2 2 と絶縁層 2 3 からなり、そのソレノイド素子層 2 2 はソレノイド部 2 2 - 1 とそのリード部 2 2 - 2 を備え、絶縁層 2 3 はソレノイド部 2 2 - 1 の先端に対応しリード導出用導体を有するスルーホール 2 3 - 1 を備えており、そのソレノイド素子層 2 2 と絶縁層 2 3 が交互に積層されている。

【 0 0 3 5 】

より詳細に説明すると、図 5 に示すように、ソレノイド層 2 1 のソレノイド素子層 2 2 は、酸化シリコン等の絶縁体基板(絶縁層 2 3)にソレノイド部のリード部 2 2 - 2 とソレノイド部 2 2 - 1 (実線部分)のみ金属(例えば金)と置換した各層を構成し、また、ソレノイド部 2 2 - 1 の先端に対応しリード導出用導体を有するスルーホール 2 3 - 1 を有する絶縁層 2 3 は上記したソレノイド素子層 2 2 に挟まれて交互に積層される。つまり、上部から、Layer S1, Layer B1.5, Layer S2, Layer B2.5, Layer S3, Layer B3.5, Layer S4, Layer B4.5, Layer S5, Layer B5.5, Layer S6, Layer B6.5, Layer S7 の順に積み重ねられ、各層のソレノイド部のリード部 2 2 - 2 がカスケードに接続されて、最上層と最下層のソレノイド素子層 2 2 のリード部 2 2 - 2 から導出され、これによって電流が通じて磁束を制御することができる。

【 0 0 3 6 】

また、ここでは、図 6 に示すように、量子層 3 1 は、量子ホール層(機能層) 3 2 とクーロンブロック層(検出層) 3 3 からなる。

【 0 0 3 7 】

このように構成された機能素子 2 0 を面に垂直な強磁場下に設置し、量子層 3 1 の中の量子ホール層 3 2 において、2 次元的な量子ホール効果を起こさせ、ソレノイド層 2 1 で各ソレノイドの磁束を独立に変化させることにより、量子層 3 1 の中のエッジ状態を非接触なままで変化させる。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 3 8 】

このようにして制御したアレイ状のエッジ状態のパターンは量子層（機能層）3 1 中のクーロンブロッケード層 3 3 での各磁束近傍を通る独立な回路の伝導度を精密に測定することで検出することができる。

## 【 0 0 3 9 】

図 7 は本発明の機能素子の量子層の第 2 実施例を示す図であり、図 7 ( a ) はその量子層の断面模式図、図 7 ( b ) はその量子層の一部を構成する量子ホール層の平面模式図、図 7 ( c ) はその機能素子の量子層の一部を構成するキャパシタ層の平面模式図である。

## 【 0 0 4 0 】

これらの図において、量子層 4 1 は、量子ホール層（機能層）4 2 と、この量子ホール層（機能層）4 2 を挟むキャパシタ層 4 3 からなる。

## 【 0 0 4 1 】

この実施例では、量子ホール層（機能層）4 2 を挟むキャパシタ層 4 3 間の静電容量を測定することにより、量子層にある各エッジ状態の電荷を個別に検出することができる。

## 【 0 0 4 2 】

次に、位相相関法の適用について説明する。

## 【 0 0 4 3 】

フェルミ状態近傍の電子状態は量子力学的には量子層全体が一つの波動関数で記述され、その波動関数はその空間的な位相はコヒーレントに保たれたままフェルミエネルギーに対応する振動数で振動していると考えられる。この空間的にコヒーレントな量子力学的状態の情報をピックアップする検出法として、以下に示す実施例について説明する。

## 【 0 0 4 4 】

図 8 は本発明の機能素子の第 3 実施例を示す全体構成を示す断面模式図、図 9 はその機能素子の量子層の斜視模式図、図 1 0 はその空間的にコヒーレントな量子力学的状態の情報のプローブ手法の模式図、図 1 1 は本発明の機能素子の空間的にコヒーレントな量子力学的状態の情報のピックアップシステムの模式図である。

## 【 0 0 4 5 】

これらの図において、5 0 は機能素子、5 1 , 5 3 はその機能素子のソレノイド層、5 2 はその機能素子の量子層、5 4 は同一光源から発したレーザー光、5 5 は機能素子 5 0 のプローブ光となるレーザー光である。また、プローブ光となるレーザー光を得る光学系 5 6 は、ビームスプリッター 5 7 やミラー 5 8 などからなる。

## 【 0 0 4 6 】

図 1 1 に示すように、機能素子の量子層の量子力学的状態の情報のピックアップシステムは、その量子層からの検出光 6 1 を光学系 6 2 ( ビームスプリッター 6 3 やミラー 6 4 などからなる ) を介した、光検出器 7 1 , 8 1 , 8 2 , 9 1 , 9 2 , 9 3 によって構成される。

## 【 0 0 4 7 】

まず、同一光源から発した空間的にも時間的にもコヒーレンスを保つレーザー光 5 4 を光学系 5 6 を介してスプリットさせ、機能素子 5 0 の量子層 5 2 の異なる場所に照射し、その複数の散乱光間の干渉を起こさせ、干渉後の強弱の組合せのパターン、つまり、光検出器 7 1 , 8 1 , 8 2 , 9 1 , 9 2 , 9 3 の組合せパターンを機能素子 5 0 の出力とする。

## 【 0 0 4 8 】

例えば、量子層 5 2 に磁束が 4 箇所導入された例では、干渉の組み合わせとして、 $4 \times 3 / 2 = 6$  通りの干渉光が得られ、その強弱で出力を分類すれば、 $2^6 = 64$  通りの干渉パターンをもって出力とする。一般には磁束が  $n$  本あれば、 $n(n-1)/2$  通りの干渉光が得られ、強弱のパターンとしては  $2^{n(n-1)/2}$  の可能性があることとなる。

## 【 0 0 4 9 】

なお、この検出法を用いる場合、量子層を挟んで少なくとも片側のソレノイド層は可視光（レーザー）が透過できる程度の厚さで、かつこのレーザーを吸収しない触媒で構成す

10

20

30

40

50

ることが必要であり、また用いるレーザーとしては量子層を構成する電子系と相互作用する（ラマン散乱等）ものを用いる必要がある。

【0050】

このように構成することにより、機能素子の量子層の量子力学的電子状態を量子（多）ビットとしたとき、アハロノフボーム効果の作用は、ある種の量子演算と考えられ、かかる検出により、この量子計算に対する結果の検出を行うことができる。

【0051】

なお、本発明は上記実施例に限定されるものではなく、本発明の趣旨に基づいて種々の変形が可能であり、これらを本発明の範囲から排除するものではない。

【0052】

【発明の効果】

以上、詳細に説明したように、本発明によれば、以下のような効果を奏することができる。

【0053】

(A) 2次元電子系に複数の穴を開け、その穴の内部のみに存在する磁束により2次元電子系の量子力学的電子状態を非接触なままで制御することができる非接触型多ビット量子状態制御方法及び量子状態制御装置を提供する。

【0054】

(B) 量子層をネットワーク化し、多くの電極を付加することにより、量子層の（量子化）伝導度を各電極で測定し、特にその時間相関まで観測することにより量子層全体の波動関数の位相の情報をピックアップし、量子層の量子力学的電子状態を量子（多）ビットとすることにより量子計算機へと展開を可能にすることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の実施例を示す量子ホール効果を用いた多ビット量子状態制御装置の模式図である。

【図2】  $1/B$ （磁場の逆数）とホール伝導度との関係を示す図である。

【図3】 アハロノフとボームの理論の説明模式図である。

【図4】 本発明にかかる機能素子の全体を示す模式図である。

【図5】 本発明にかかる機能素子のソレノイド層の構成の説明図である。

【図6】 本発明にかかる機能素子の量子層の構成図である。

【図7】 本発明の機能素子の量子層の第2実施例を示す図である。

【図8】 本発明の機能素子の第3実施例を示す全体構成を示す断面模式図である。

【図9】 本発明の機能素子の量子層の斜視模式図である。

【図10】 本発明の機能素子の空間的にコヒーレントな量子力学的状態の情報のプローブ手法の模式図である。

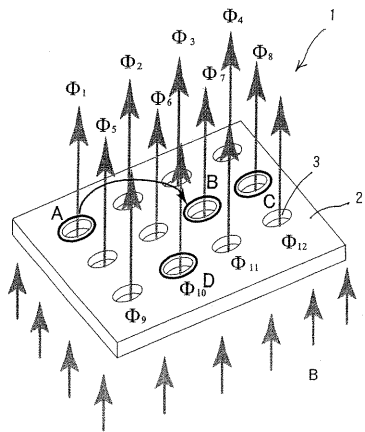
【図11】 本発明の機能素子の空間的にコヒーレントな量子力学的状態の情報のピックアップシステムの模式図である。

【符号の説明】

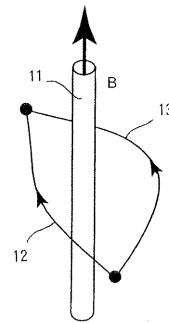
- 1 シリコン反転層、超格子等の2次元電子系
- 2 基板
- 3 複数の穴
- B 一様磁場
- $1 \sim 12$  磁束
- 20, 50 機能素子
- 21, 51, 53 ソレノイド層
- 22 ソレノイド素子層
- 22-1 ソレノイド部
- 22-2 ソレノイド部のリード部
- 23 絶縁層
- 23-1 リード導出用導体を有するスルーホール

- 3 1 , 4 1 , 5 2      量子層
- 3 2 , 4 2      量子ホール層 (機能層)
- 3 3      クーロンブロッケード層 (検出層)
- 4 3      キャパシタ層
- 5 4 , 5 5      レーザー光
- 5 6 , 6 2      光学系
- 5 7 , 6 3      ビームスプリッター
- 5 8 , 6 4      ミラー
- 6 1      検出光
- 7 1 , 8 1 , 8 2 , 9 1 , 9 2 , 9 3      光検出器

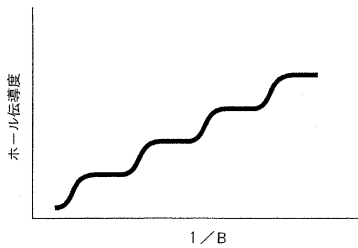
【 図 1 】



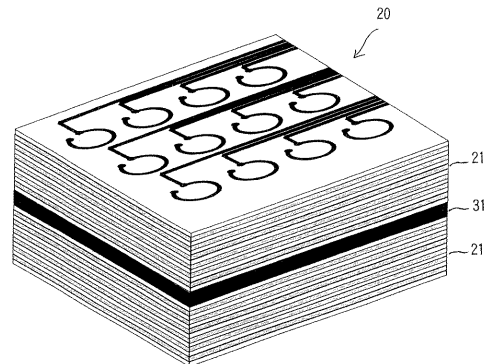
【 図 3 】



【 図 2 】

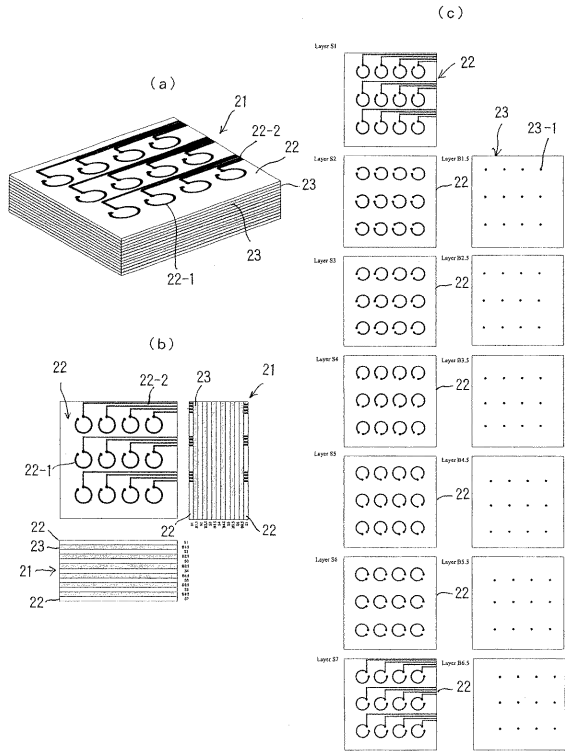


【 図 4 】

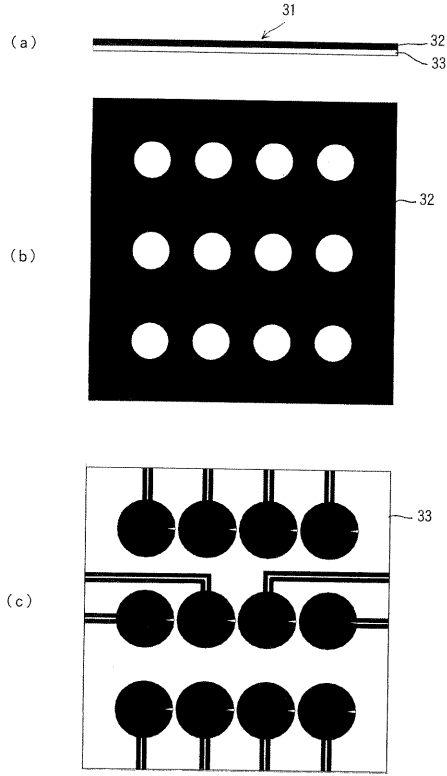




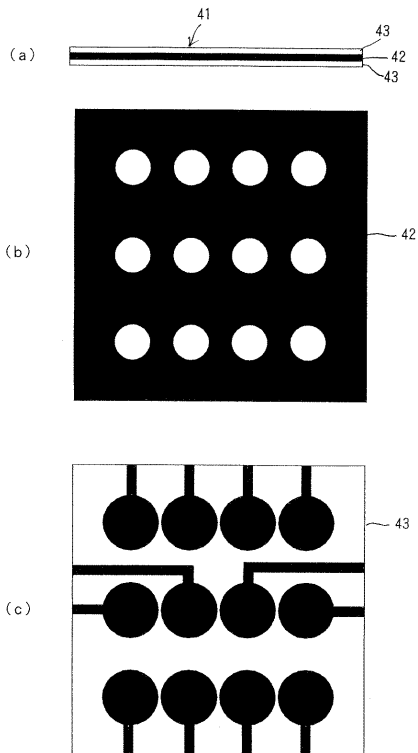
【 図 5 】



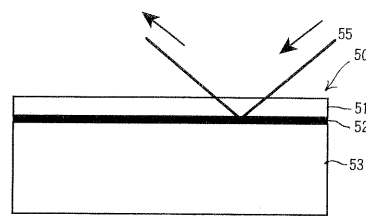
【 図 6 】



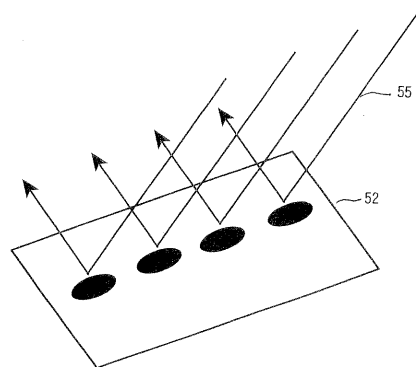
【 図 7 】



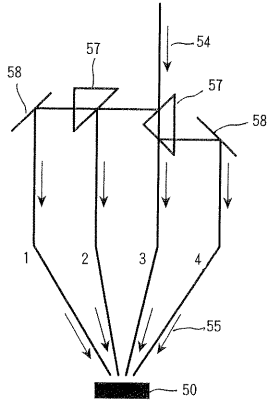
【 図 8 】



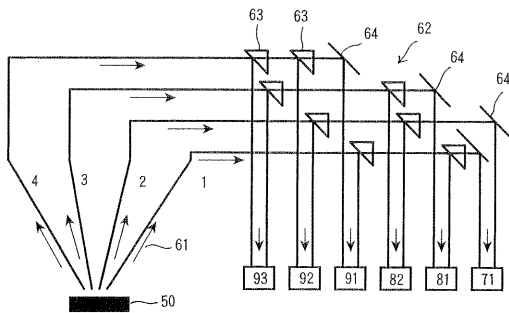
【 図 9 】



【図 10】



【図 11】



---

フロントページの続き

- (56)参考文献 特開平02 - 306672 (JP, A)  
特開昭53 - 053994 (JP, A)  
特開平06 - 252461 (JP, A)  
特開平10 - 321832 (JP, A)  
特開平06 - 314800 (JP, A)  
特開平02 - 060177 (JP, A)  
特開2000 - 261061 (JP, A)  
特開平04 - 273478 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 29/66

H01L 27/10