

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2004-534279

(P2004-534279A)

(43) 公表日 平成16年11月11日(2004.11.11)

(51) Int. Cl.⁷

G02B 5/18
G02B 6/293

F I

G02B 5/18
G02B 6/28

テーマコード(参考)

2H049

D

審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 48 頁)

(21) 出願番号 特願2003-512744 (P2003-512744)
 (86) (22) 出願日 平成14年4月25日 (2002. 4. 25)
 (85) 翻訳文提出日 平成16年1月13日 (2004. 1. 13)
 (86) 国際出願番号 PCT/US2002/013309
 (87) 国際公開番号 W02003/007033
 (87) 国際公開日 平成15年1月23日 (2003. 1. 23)
 (31) 優先権主張番号 09/905, 769
 (32) 優先日 平成13年7月13日 (2001. 7. 13)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 597115727
 ローズマウント インコーポレイテッド
 アメリカ合衆国 55344 ミネソタ州
 、エデン プレイリー、テクノロジー ド
 ライブ 12001
 (74) 代理人 100065868
 弁理士 角田 嘉宏
 (74) 代理人 100106242
 弁理士 古川 安航
 (74) 代理人 100110951
 弁理士 西谷 俊男
 (74) 代理人 100114834
 弁理士 幅 慶司
 (74) 代理人 100122264
 弁理士 内山 泉

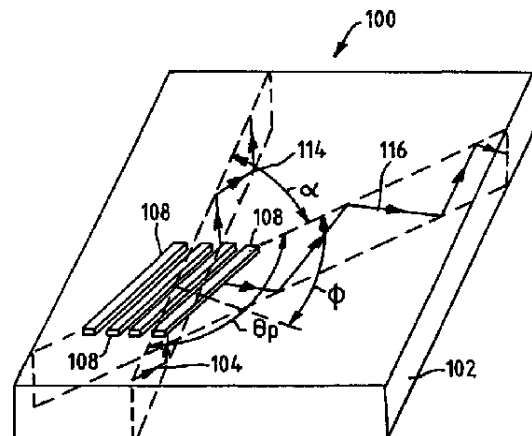
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 集積透明基板及び回折光学要素

(57) 【要約】

回折光学要素 (DOE) は、基板上に形成されている。DOE は、1つの実施形態で、基板の頂部表面上で各々個々に形成されている多数の部材から形成されていることにより特徴づけられる。部材は、基板にポリシリコン材料を配置されることにより、又は、基板上のシリコン結晶を形成し、腐食ステップを実行することにより形成されてもよい。基板は、サファイア結晶から形成されてもよい。DOEは、合計内部反射で基板中で移動する入射光を反射するために使用されてもよい。幅、間隔の間で、及び、DOEを形成しているストリップの高さは、入射光のそれに鋭い伝搬方向で基板中で入射光を反射するために設計されてもよい。

【選択図】 図2



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

合計内部反射で、基板の頂部表面から反射する主要な伝搬方向において、基板中で入射光信号が伝搬する光学基板と、

多数の別々に間隔を置かれた部材を有し、光学的透明材料から形成されており、かつ、基板の頂部表面上に配置されている回折光学要素とからなる集積光学装置であって、

前記入射光信号は、適切な伝搬方向に沿って基板中で反射される集積光学装置。

【請求項 2】

前記基板は、二酸化珪素から形成されている請求項 1 記載の集積光学装置。

【請求項 3】

前記基板は、サファイアから形成されている請求項 1 記載の集積光学装置。

10

【請求項 4】

前記部材は、本質的に平行である多数のストリップである請求項 1 記載の集積光学装置。

【請求項 5】

前記多数のストリップは、各々本質的に同一のストリップ幅を有している請求項 4 記載の集積光学装置。

【請求項 6】

前記多数のストリップは、各々別々に本質的に等しい隔てた距離で配置されている請求項 4 記載の集積光学装置。

【請求項 7】

前記多数のストリップは、本質的に同一のストリップ幅を有し、かつ、各々別々に本質的に等しい隔てた距離で配置されており、

前記隔てた距離は、ストリップ幅と本質的に同一である請求項 4 記載の集積光学装置。

20

【請求項 8】

前記距離及び幅の合計は、0.5 と 4 との間にあり、

前記 は、基板中での光信号の波長である請求項 7 記載の集積光学装置。

【請求項 9】

前記部材の厚さは、反射光信号の強度を最大にするために調整されている請求項 1 記載の集積光学装置。

【請求項 10】

前記部材は、アモルファスシリコン、結晶性シリコン、及び、ポリシリコンからなる群から選択される材料から形成されている請求項 1 記載の集積光学装置。

30

【請求項 11】

前記部材は、アルミナ、サファイア、窒化ケイ素、及び、ポリシリコンとポリゲルマニウムの合金からなる群から選択される材料から形成されている請求項 1 記載の集積光学装置。

【請求項 12】

前記部材は、基板の頂部表面との直接の接触で配置されている請求項 1 記載の集積光学装置。

【請求項 13】

前記部材は、基板の頂部表面とのエバネッセントフィールドカップリング接触で配置されている請求項 1 記載の集積光学装置。

40

【請求項 14】

前記回折光学要素は、主要な伝搬方向にある角度で適切な伝搬方向で基板中で移動する第 1 のオーダー回折モードを生産する請求項 1 記載の集積光学装置。

【請求項 15】

前記第 1 のオーダー回折モードは、合計内部反射で基板中で移動する請求項 14 記載の集積光学装置。

【請求項 16】

前記入射光信号は、分岐するビームであり、

50

入射光信号を受け取るために適応される平行要素をさらに備えており、さらに、平行要素からの入射光信号は、基板中で平行にされ、かつ、合計内部反射で基板中で移動するように、平行要素は、配置されている請求項 1 記載の集積光学装置。

【請求項 17】

前記平行要素は、基板の頂部表面で備え付けられたホログラフィー要素を備えている請求項 16 記載の集積光学装置。

【請求項 18】

光ビームは、GRINレンズによって基板中へ誘導されている請求項 1 記載の集積光学装置。

【請求項 19】

前記部材は、本質的に平行線形要素である請求項 1 記載の集積光学装置。

10

【請求項 20】

前記部材は、パターンのある形状でシリコン材料を配置されることにより基板の頂部表面で形成されている請求項 1 記載の集積光学装置。

【請求項 21】

前記部材及び基板は、同じ材料から形成されている請求項 1 記載の集積光学装置。

【請求項 22】

前記材料は、サファイアである請求項 21 記載の集積光学装置。

【請求項 23】

前記部材は、基板の屈折率より高い屈折率を有している請求項 1 記載の集積光学装置。

【請求項 24】

前記回折光学要素は、合計内部反射の方法によって作用している請求項 1 記載の集積光学装置。

20

【請求項 25】

多数の入射光信号は、各々異なる波長を有し、

前記回折光学要素は、異なる第 1 のオーダー回折モードへ各経路を反射し、

そして、各反射光信号は、主要な伝搬方向へある角度で多数の第 2 の伝搬方向のうちの 1 つで基板中で各々移動し、

各反射された経路は、合計内部反射で基板中で移動する請求項 1 記載の集積光学装置。

【請求項 26】

前記部材は、各々、反射光信号の強度を最大にするために選択された幅を有している請求項 1 記載の集積光学装置。

30

【請求項 27】

前記部材は、多数のストリップから形成されており、

各ストリップは、幅及び関連する間隔を有し、

幅及び間隔は、ストリップの間で変化する請求項 1 記載の集積光学装置。

【請求項 28】

前記幅及び間隔は、連続的な方法で変化する請求項 27 記載の集積光学装置。

【請求項 29】

基板の頂部表面上に配置された光学的透明材料から形成されている多数の部材と、

別々に隔てた距離を置かれ、部材幅を有する部材とからなる回折格子を備えており、

光信号は、入射方向の伝搬で頂部表面から合計内部反射で基板中で移動し、

回折格子上の入射は、入射方向の伝搬及び合計内部反射で基板中で伝搬することに関して、角度 θ_p で定義される反射された伝搬方向で基板中で伝搬する第 1 の回折オーダーへ反射されるように、合計 (a) は、間隔及び部材幅は選択される光学的透明基板を有する使用のための回折格子。

40

【請求項 30】

前記合計 (a) は、0.5 と 4 との間であり、

前記 θ_p は、基板中で光信号の波長である請求項 29 記載の回折格子。

【請求項 31】

前記 θ_p は、0.25 μm (ミクロン) と 10 μm (ミクロン) との間である請求項 30 記

50

載の回折格子。

【請求項 3 2】

前記光信号は、角度 θ で回折格子上で入射され、
臨界角を超えて、 θ_c は、法線から基板中へ伸びる基板の頂部表面へ測定され、
前記合計 (a) は、 θ_p は 90° より大きく、 180° より小さいように選択される請求
項 2 9 記載の回折格子。

【請求項 3 3】

前記隔てた距離は、材料幅と本質的に同一である請求項 2 9 記載の回折格子。

【請求項 3 4】

前記材料は、アモルファスシリコン、結晶性シリコン及びポリシリコンからなる群から選
択される材料から形成されており、
前記基板は、サファイアから形成されている請求項 2 9 記載の回折格子。

【請求項 3 5】

前記部材は、基板の屈折率より高い屈折率を有している請求項 2 9 記載の回折格子。

【請求項 3 6】

以下のステップからなる入射光信号を追い出させる方法。
基板の頂部表面から合計内部反射で光学基板中で入射光信号を送信すること、
入射光信号の位置を受け取るために、基板の頂部表面上に多数の別々に間隔を置かれたス
トリップを配置されていること、
入射光が、入射方向の伝搬及び合計内部反射で基板中で伝搬することに関して、ある角度
で定義される反射された伝搬方向で基板中で伝搬する第 1 の回折オーダーへ反射されるよ
うに多数のストリップが回折格子を形成していること。

【請求項 3 7】

多数の別々に間隔を置かれたストリップを配置するステップは、さらに以下のステップか
らなる請求項 3 6 記載の方法。
基板の頂部表面に光学用材料の薄膜を配置すること、
薄膜上をマスクすることを適用すること、
フォトリソグラフィックの露出プロセスで薄膜内のパターンを形成するために、ストリッ
プに対応するパターンである薄膜及びマスクを露出すること、
選択的に、ストリップを形成するために薄膜の部分をエッチングすること。

【請求項 3 8】

前記光学用材料は、ポリシリコン材料である請求項 3 6 記載の方法。

【請求項 3 9】

頂部表面上の多数のストリップは、頂部表面との直接の接触で、ストリップを形成する請
求項 3 6 記載の方法。

【請求項 4 0】

多数の別々に間隔を置かれたストリップを配置するステップは、さらに以下のステップか
らなる請求項 3 6 記載の方法。
基板の頂部表面で結晶性シリコンの薄膜を形成すること、
薄膜上をマスクすることを適用すること、
フォトリソグラフィックの露出プロセスで薄膜内のパターンを形成するために、ストリッ
プに対応するパターンである薄膜及びマスクを露出すること、
選択的に、ストリップを形成するために薄膜の部分をエッチングすること。

【請求項 4 1】

頂部表面上の多数のストリップは、頂部表面との直接の接触で、ストリップを形成する請
求項 4 0 記載の方法。

【請求項 4 2】

多数の別々に間隔を置かれたストリップを配置するステップは、さらに以下のステップか
らなる請求項 3 6 記載の方法。
基板の頂部表面にサクリフィシアル層を配置すること、

10

20

30

40

50

サクリフィシアル層上に光学用材料の薄膜を配置すること、
薄膜上をマスクすることを適用すること、
フォトリソグラフィックの露出プロセスで薄膜内のパターンを形成するために、ストリップに対応するパターンである薄膜及びマスクを露出すること、
選択的に、ストリップを形成するために薄膜の部分をエッチングすること、
頂部表面上に伸びるエバネッセントフィールドカップリング領域内の基板の頂部表面上にストリップは形成されるように、サクリフィシアル層を除去すること。

【請求項 4 3】

光学的透明材料から形成され、合計内部反射で基板中で移動する光信号を有している基板と、

10

適切な伝搬方向で基板中で光信号を反射するために、基板の頂部表面上に配置されている、第 1 の多数の別々に間隔を置かれた部材から形成されている第 1 の回折光学要素と、
第 2 の多数の別々に間隔を置かれた部材から形成されており、第 1 の回折光学要素から反射光信号を受け取るために、基板の頂部表面上に配置されており、基板中の伝搬のために、反射光信号を出射するために配置されている第 2 の回折光学要素とからなる集積光学装置。

【請求項 4 4】

前記第 1 の回折光学要素は、平行要素である請求項 4 3 記載の集積光学装置。

【請求項 4 5】

前記適切な伝搬方向は、光信号の入射方向の伝搬と平行である請求項 4 3 記載の集積光学装置。

20

【請求項 4 6】

第 2 の回折光学要素から出力光信号は、適切な伝搬方向へ角度を有する第 1 のオーダー回折モードに沿って基板中で伝搬され、

さらに、出力光信号は、合計内部反射で基板中で伝搬される請求項 4 3 記載の集積光学装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本出願は、米国仮出願 60/223503 号（2001 年 8 月 7 日付願）、米国仮出願 60/223508 号（2000 年 8 月 7 日付願）及び米国仮出願 60/271103 号（2001 年 2 月 23 日付願）の優先権を主張する。

30

【0002】

本発明は、一般に集積光学回路に関し、特に、透明な光学基板上に備え付けられている回折光学要素に基づいた集積光学回路に関する。

【背景技術】

【0003】

集積光学回路は透明基板上に反射する平面光学要素を備え付けられていること、及び、透明基板のミラー表面からの内部反射の方法によって要素を連結することにより構築されていることが提案された。平面光学要素は、適切な方法で、反射光信号を誘導させる、集中させる、又は、そうでなければ回折させる。このアプローチは、電気的な集積回路に似ている平面の様式で構築され、かつ、相互に連結される複雑な光学装置を作製する。

40

【0004】

このアプローチは、固有の反射損失及び内部光信号に効率的に連結する平面要素を構築する困難さのために、制約があった。基板のミラー表面は、透明基板に金属の薄膜を適用することにより、一般に構築されているが、公知の薄膜材料は、数パーセントの損失を有しており、そして、多数の反射が必要であるならば、信号の強度は指数関数的に損失される。さらに、平面光学要素が基板表面との親密な接触でないならば、基板から及び基板に戻る光信号を得ることに関連する大量の損失がある。

【0005】

50

それらが表面で不可欠になるので、回折光学要素(DOE)は、理想的に反射する平面光学要素に適しているが、それらはいくつかの欠点がある。それらは、典型的に反射モードで作用するために、金属のコーティングを必要とし、また、これは光信号の損失に帰着する。DOE中の回折オブジェクトの寸法が、基板中の光の波長よりはるかに大きいならば、それらは、適切なモード以外のモードへ光を回折し、効率の損失に帰着し、また、クロストークのような不適切なエラーを引き起こす。オブジェクトが優先的に適切な方向で光を回折するために形作られるとき、この問題は、ブレイズ格子パターンを使用することにより多少最小になる。鋸歯上のブレイズ回折格子は、形作られた彫刻道具を使用して、典型的に作り上げられた例である。しかしながら、ブレイズ回折の3次元の性質は、それらを光学基板の表面上に作り上げることを困難にし、さらに、不適切なモードで光の回折及び誘導は、まだ問題である。

10

【0006】

回折オブジェクトの寸法が、光の波長に接近するならば、入射角度の適切な選択及び回折オブジェクトの適切なサイズによって、不適切なモード又は誘導は、最小にする又は除去する。装置は、一般にホログラフィーの光学要素(HOE)(DOEの部分集合である)として知られている。これらの装置は、反射表面の深さをパターン化することによって構築されるならば、回折表面の異なる深さは回折光でシフトする変化相を引き起こすので、表面の軽減又は相ホログラムとして知られている。これら相シフトは、パターンの深さの調整により、適切な光信号の適切な方向又はモードで光の発展的干渉を引き起こすために調整される。屈折オブジェクトのパターンが、反射する金属フィルムで覆われるならば、損失は、全く少量の光エネルギーはそのような装置に吸収されるので、数パーセントと同じくらい低くなる。しかしながら、實際上、高い効率を示し、かつ、効率的に製造できる方法で、基板の表面上でそのような装置を構築することは困難である。電子ビームは、直接、基板上にこれらの寸法のパターンを書くことができるが、これは非常に遅く、高価なプロセスであり、かつ、相型ホログラムのために必要になる表面の軽減を生産することに向いていない。エンボス加工にすることは、透明なプラスチック(例えば、クレジットカードセキュリティホログラム)上の表面型ホログラムを再生産するために使用されるが、これらの材料の耐性及び安定性は、ほとんどの適用に適していない。

20

【0007】

他方で、体積ホログラムも、妨害レーザー光のパターンにフォトグラフィック乳濁液を露出することにより、作製される。回折オブジェクトのパターンは、乳濁液の体積内で作製される。この方法で構築されたHOEは、高い効率を有しているが、それらは、生産することで悪評高いほどに困難であり、かつ、環境効果を悪化させる。

30

【0008】

上述した問題から明白であるように、比較的手頃なコストで大量生産することができる、高い光学効率を有する透明基板の表面上に回折光学要素に基づいた光学集積回路を形成する方法が必要とされている。

【発明の開示】

【課題を解決するための手段】

【0009】

1つの実施形態で、合計内部反射で、基板の頂部表面から反射する主要な伝搬方向において、基板中で入射光信号が伝搬している光学基板を有する集積光学装置が提供される。集積光学装置は、さらに多数の別々に間隔を置かれた部材(光学的透明材料から形成されている)を有し、かつ、基板の頂部表面上に配置されている回折光学要素を有し、前記入射光信号は、適切な伝搬方向に沿って基板中で反射される。

40

【0010】

さらに、実施形態によると、光学的透明基板を有する使用のための回折格子が提供され、別の光学透明材料から形成されている多数の部材を有し、基板の頂部表面上に配置されている。部材は、別々に隔てた距離を置かれ、かつ、部材幅を有している。隔てた距離及び部材幅の合計は、選択され、その結果、入射方向の伝搬及び回折格子上の入射で頂部表面

50

から合計内部反射で基板中で移動する光信号は、反射方向の伝搬で基板中で伝搬する第1の回折オーダーへ反射される。反射方向の伝搬は、入射方向の伝搬に関しての角度を定義し、また、反射光信号は、合計内部反射で基板中で伝搬される。

【0011】

別の実施形態によれば、入射光信号を送る方法は提供される。方法は、基板の頂部表面から合計内部反射で光学基板中で入射光信号を伝達するステップを含んでいる。入射光信号の部分を受け取るために、基板の頂部表面上の多数の別々に間隔を置かれたストリップを配置するステップは、方法の別のステップで実行される。ストリップは、配置され、その結果、ストリップは、入射方向の伝搬に関してある角度を定義し、かつ、合計内部反射で基板中で伝搬する反射方向の伝搬で基板中で伝搬する、第1の回折オーダーへ入射光を反射する回折格子を形成する。

10

【0012】

別の実施例によれば、光学的透明材料から形成されている基板を有し、かつ、合計内部反射で基板中で移動する光信号を有する集積光学装置は提供される。集積光学装置は、さらに、適切な伝搬方向で基板中で光信号を反射するために、基板の頂部表面上に配置された第1の多数の別々に間隔を置かれた部材から形成されている第1の回折光学要素を有している。さらに、集積光学装置は、第2の多数の別々に間隔を置かれた部材から形成されており、第1の回折光学要素から反射光信号を受け取るために基板の頂部表面上に配置されており、基板中で伝搬のための反射光信号を出力するために配置されている第2の回折光学要素を有している。

20

【発明を実施するための最良の形態】

【0013】

本発明の実施形態は、標準のMEMS材料及び組立て技術で組立てられる透明基板上に配置された回折光学要素を組込む光学装置を提供することにより、上述した問題を解決する。記載された技術で、多数の光学要素は、入射光を反射する回折要素を含んで、形成されてもよい。好ましい実施形態は、事実上のミラー（光学基板と共に使用されてもよい）を形成するHOEの形状で回折光学要素を以下に図示する。提供される実施形態のどれも、反射コーティングを必要としない。しかしながら、non-HOEの回折光学要素を使用してもよい。

【0014】

反射コーティングの代わりに、HOE及び基板は、合計内部反射で光学基板中で移動する光に影響するために以下に適応される。合計内部反射（TIR）は、非常に低い損失の光学現象であり、記載される装置で高い効率作用に結びつく。HOE自体の回折オブジェクトは、好ましくは合計内部反射が損失を最小になる手段により光を回折する。さらに、記載されるHOEは、1つの回折モードが存在することを単に可能にすることを示し、さらに損失を減少する。HOEは、全面的な効率が100%に接近することを可能にして、反射される $m = 0$ モードを抑制するホログラム相として好ましくは構築される。TIR（多数のHOEが光学的に高い全面的な装置の効率と関係のあることを可能にする）で基板中で反射光がさらに伝搬するように、移動する入射光を反射するために、HOEは光学基板で協同する。

30

【0015】

一般的に上述されたもののような回折光学要素は示される一方、現在の開示が、光学装置が構築されているシステムのために、より広く提供されること、及び、構築されてもよい光学装置は多数であることが理解される。実際に、現在の開示が、集積基板及び回折光学要素成分、又は、装置のシリーズを示す。集積成分は、反射器、コリメーター、回折格子、ビームスプリッター及び可変減衰器のような多くの光学装置を形成してもよい。集積基板及び回折光学要素は、さらに集中又は発散レンズとして機能してもよい。下述するように、開示は、多数の機能に役立つことができるホログラムパターンを再生する方法を提供する。

40

【0016】

図1は、好ましい実施形態は光学的透明であるHOE100及び光学基板材料の横断面の側面図を示す。より好ましくは、基板102は、波長分裂多重（WDM）赤外線光学長距離通

50

信のために使用されるCバンドのような赤外線領域で光学的透明である。このバンドは、1528nm～1621nm(ナノメートル)の波長を包含するが、他の光通信バンド中の作用も想像される。より詳細に下述されるように、基板102は、サファイア又はクォーツのような様々な材料、或いは、TIRで光信号を伝搬するために及びフォトリソグラフィプロセス用のエッチング停止として役立つのに適している別の基板材料から形成されている。

【0017】

入射光ビーム104は、基板102の外部の表面の境界で臨界入射角を超える現象として知れる合計内部反射で基板102によって移動する。好ましい実施形態において、基板102は、頂部表面106を上(空気を配置している)に有している。基板の屈折率及び空気の屈折率は、基板中で合計内部反射のための臨界角を定義する。

10

【0018】

入射角は、法線から頂部表面106へ測定され、基板102へ伸びる図1中で示される。空気境界によって囲まれるサファイア基板102について、臨界角が約35°であり、したがって、はTIR伝搬のための値で又はその値上である。すなわち、光ビーム104は、臨界角を超える角度で頂部表面106上の入射になり、また、HOE100作用を促進する。好ましい実施形態で、空気が頂部表面106上に配置されている一方、これらの材料がTIR条件を確立するために基板102の屈折率未満の屈折率を有している限り、他の材料は、基板102上に配置されてもよい。さらに、基板102の頂部表面106及び底部表面107からのTIRは、最小のコストである最大効率設計を提供する一方、光ビーム104を反射するために、二者択一で頂部表面106でTIRを有しており、底部表面107で反射コーティング又はミラーを使用する。同様に、底部表面107以下にクラッド層を使用してもよい。

20

【0019】

HOE100は、頂部表面106に直接配置されている任意形状の個々の回折部材から形成されている。部材108は、入射光信号の適切な修正を実行する回折パターンを形成している任意形状のドット、曲線のストリップ、直線のストリップ、又は、他の形状からなる。そのようなパターンの例は、任意の曲線の回折格子又はミラーを形成しているパターンである。もし部材108が、配列されたパターン中のドットであれば、入力104を受け取り、任意の数の出力方向へ入力の部分を反射するビームスピリッターとして機能するために、HOE100が形成されている。そのようなドットは、循環形状、楕円形状、クロス形状又は正形状で有しており、部材108から形成されているHOE100パターンは、ドット間の間に依存する1×2又は1×Nスピリッターを作成している。

30

【0020】

図示する実施形態において、部材108は、光学的透明材料から形成されている。これらの部材108は、傾けられたミラーの機能を実行するHOEを形成している。部材108の幾何学は、HOE100の特性及び作用に影響する。図1の実施形態は、同様に、わずかに頂部表面106上でストリップ108は配置されていることができるが、部材が、頂部表面106との直接の物理的な接触で形成されているストリップ108であることを示す(図8参照)。

40

【0021】

ストリップ108は、さらに、1又は0.5µmのマイクロ電気機械システム(MEMS)処理技術を使用して、処理することができる単結晶シリコン、ポリシリコン、アモルファスシリコン、アルミナ、サファイア、シリコン亜硝酸塩、ゲルマニウム珪酸又は他の光学的透明材料から形成されてもよい。適切な作用の周波数で透明であり、容易にMEMSプロセスで処理することができ、高い屈折率を有するので、好ましい材料はポリシリコンである。ほんの少数のストリップ108は、極端に示されるが、典型的に、光ビーム104がHOE100のある部分上の入射であることを、多数のストリップが保証する作用中を示す。さらに、ストリップ108は、断面図で示され、実際に図2で記載されるとして、図中で又は図から延ばされる。

50

【0022】

ストリップ108は、幅「b」を有しており、頂部表面106上で別々に間隔を距離「c」で置かれている。格子間隔「a」は、これら2つの値の合計と等しい。H0E100は、光ビーム116へ入射光104を反射し、また、幅「a」は、反射するためにH0E100が最適化される光の波長に影響する。好まれる実施形態において、幅「b」は、幅「c」と等しい、だが、もし望まれるのであれば、幅は等しくなくてもよい。ストリップの厚さ及び幅は、反射光の強度を最大にするために調整されてもよい。さらに、内部幅変化があってもよい（幅「b」は変化する（例えば、 b_1 、 b_2 、 b_3 等）、幅「c」は変化する（例えば、 c_1 、 c_2 、 c_3 等））。例えば、H0Eは、異なる「a」値（ a_1 、 a_2 、 a_3 等）で形成されてもよく、「a」は、例えば、 $a_1 > a_2 > a_3$ 等のように連続的に変化する。デマルチプレクシング用途で役立つように、典型的な装置は、反射信号で分散を減少するために、又は、分散の量を増加するために使用されてもよい。ストリップ108は、回折パターンを形成するとともに、正確な寸法の精密度は、機能する装置を生産するために必要としない。ストリップ108の集合の影響及び間隔は、任意の特別のストリップ108のサイズの不精密度を最小にすることである。H0E100は、それにもかかわらず「a」間隔を有しているが、つまり、「a」は、H0E100にわたって本質的に同じである。この方法で、「a」は、「b」又は「c」よりH0E100作用でより影響がある。典型的な構造で、幅「a」は、約 $1.5 \mu\text{m}$ のオーダーにあり、つまり、入射光の波長のオーダー（サファイア基板中でCバンドのための約 $0.9 \mu\text{m}$ である）である。

10

【0023】

ストリップ108は、断面図で示され、かつ、図から伸びている。ストリップ108は、光104の伝搬の平面に鋭角で各々ある平行平面で伸びている（つまり、図の平面）。これは図2から見られる。ストリップ108は、好ましい実施形態において、線形であり、かつ、並列であるが、非線形のストリップが使用されてもよい。例えば、曲線のストリップは、集中させるミラーの役割をするH0Eを作製するために使用されてもよい。さらに、ストリップ108は、図2で示されるように、ラインを二分する角度 ρ に垂直に方向を合わせられる。

20

【0024】

作用において、ストリップ108が、頂部表面106で回折格子パターン又は傾けられたミラーを定義するように協同する。図示され、かつ、下述されるように、入射光104は、パターンに命中され、かつ、反射される。このように、H0E100は、反射要素の役割をする。

30

【0025】

基板102の頂部で、ともにストリップ108間の間隔「c」は、インターフェース層110（空気基板インターフェース層である）を形成している。光ビーム104が、合計内部反射で基板102中で移動するので、光ビーム104の部分は、合計内部反射でインターフェース層110で回折される。すなわち、光ビーム104の第1部分は、空気基板インターフェース層110で入射され、ストリップ108間の間隔の反射行為によって回折される。これらの間隔が、入射光の波長のオーダーであるので、回折が平面波反射ではなくて生じる。H0E100上に入射する光ビーム104の別の部分は、ストリップ108下の頂部表面106の部分上に入射される。ここで、ストリップ108は、基板から光エネルギーを吸収し、より低い屈折率の材料（好ましい実施形態の空気）によって、頂部表面112及び側面上で跳ね返させる低損失導波管共鳴装置のように作用する。したがって、基板102中でTIR伝搬と同様にストリップ108中でTIR反射がある。定常波は、ストリップ108で本質的に形成され、また、吸収された光は、ストリップ108を出射し、インターフェース層110によって反射される光から変化する基板102相を再び入れる。もしストリップ108は、基板102より高い屈折率を有しているならば、定常波はさらにより低い屈折率への推移で、より低い表面によって跳ね返されるので、効率はさらに改善される。ストリップ108及びインターフェース層110の効果は、基板102中で伝搬する $m = -1$ モードへ集合的に光ビーム104を回折することである。パス114がパ

40

50

ス光ビーム 104 である間、反射信号を表わす光ビーム 116 が、ストリップ 108 によって影響されないならば、基板 102 中で移動する。破壊的妨害が出力を最小にするところで、パス 114 は、さらに HOE 回折パターンでの $m = 0$ モードと一致してもよい。

【0026】

図 2 は、反射される光ビーム 116 の伝搬を示す。伝搬パス 116 は、光ビーム 104 の伝搬の平面に角度 (θ 又は ρ) にある平面で移動する。したがって、伝搬パス 116 は、図 1 の図から伸びる平面で移動する。第 2 の伝搬方向で移動する反射される光ビーム 116 を有することは、HOE 100 が、入射伝搬ビームの信号パスから反射信号パスを空間で分けることを可能にし、したがって、出力を切り替える方法として、HOE 100 の使用を提案する。例えば、ビームが HOE 100 で入射する方向で TIR で伝搬するために形成されているならば、ビームは切り替えられるが、もしビームが HOE 100 で入射しない別のパスに沿って伝搬するために作製されているならば、本来の伝搬パスに沿って伝搬する。

10

【0027】

HOE 100 によって作製されている反射角 ρ は、ストリップ間隔「 a 」、入射角 θ 及び光の波長 λ を含んでいる多数の要因に依存する。 ρ とこれらの変数との関係を示すサンプルグラフは、図 3 で示される。図 3 は、様々な入射角 θ による、 x -軸の角度 ρ と y -軸の「 a 」/ λ とのプロットである。図 3 は、HOE を有する光の相互作用の前後に入射角 θ が同じであり、その結果、基板で TIR が維持されると仮定される。図 3 に見られるように、 $\theta = 35^\circ$ で 1.5 の「 a 」/ λ は、約 110° の ρ になる。同様に、 $\theta = 45^\circ$ で 1.5 の「 a 」/ λ は、約 125° の ρ になる。グラフは、さらにこの例において、パラメータに依存して、約 90° から約 145° まで ρ が及ぶことができることを示す。「 a 」の範囲は一般的にパラメータに依存して約 0.5 ~ 約 4 まで及ぶけれども、グラフは、さらに「 a 」の典型的な範囲を示す。図 3 のグラフは、さらに、ちょうど $m = -1$ モードより多くのモードへ光は反射する F 線を超える領域及び禁止領域を示す。

20

【0028】

図 2 において、HOE 100 の別の明白な特徴は、合計内部反射で基板 102 中で光パス 116 が移動するということである。これは、反射信号で損失を減少することに望ましい。合計で内部に反射されるパスへの反射は、格子間隔「 a 」の調整により達成される。

【0029】

ストリップ 108 は、基板 102 の頂部表面 106 との直接の接触に置かれることにより、基板 102 中で移動する、光ビーム 104 の部分を連結するために配置される。しかしながら、現在の開示は、図示された実施形態に限定されない。代わりに、HOE は完全に頂部表面 106 上に配置され、また、基板 102 中の移動する光に連結されてもよい。知られているように、合計内部反射で境界のインターフェースで反射される光は、境界のインターフェース上に伸びるエバネッセントフィールドを生産する。HOE は、エバネッセントフィールドに連結されてもよく、つまり、基板との直接の物理的な接触でのストリップなしで、また、基板中に移動する光にまだ影響する。屈折される合計内部反射が、この原理で作用する。そのような代案は、図 10 に関して下述される。

30

【0030】

ストリップの厚さは、インターフェース層 110 から回折される光と共鳴装置ストリップ 108 からの光との間の相変化を確立する。好ましい実施形態では、すべてのストリップの厚さが同一である。さらに、厚さは光パス 116 へ反射される入射光 104 の量を最大にするために選択される。グラフは、HOE 効率対シリコンのストリップの厚さが示されているグラフが図 4 で示される。この典型的なグラフにおいて、基板がサファイアから形成され、入射ビームは TE 極性化される ($a = 1.5 \mu\text{m}$ 、 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 、 $\theta = 45^\circ$ 及び $\rho = 65.3^\circ$)。示されるように、非常に高い効率を生産する多数のストリップの厚さがある。効率ピークが、約 $1.55 \mu\text{m}$ 、 $1.84 \mu\text{m}$ 及び $2.15 \mu\text{m}$ に生じる。このグラフは、しかしながら、単に代表的であり、また、より低い厚さが使用されてもよい。例えば、ストリップ 108 の厚さが、吸収光に適切な相変化を与えるために選択されることになるので、特別の厚さの複合の倍振動は、同じ相変化を与えて、したがって、

40

50

使用される。MEMSプロセスで作りに上げられるポリシリコンからなるストリップの好ましい厚さは、 $0.5\ \mu\text{m} \sim 3\ \mu\text{m}$ である。

【0031】

HOE100の補足利点は、ストリップの厚さが、入射光ビームの極性化状態から本質的に独立した構造が形成されることを可能にするということである。この実行特徴は、極性化依存損失として知られ、設計要求は、産業Telecordia standard GR1073によって公にされる。我々は、任意の入射的な線形の極性化状態にとって、90%以上のHOE効率が、理論上達成可能であることがわかった。

【0032】

ストリップ108を形成するために、サファイア基板102で、ポリシリコン又は他の材料のフィルムを配置するプロセスが使用されてもよい。二者択一で、単結晶シリコンは、エピタクシーによってサファイア基板102で成長させられる。いずれの場合も、頂部表面106で形成されるポリシリコン層又は単結晶シリコン層で、標準 $1\ \mu\text{m}$ 又は $0.5\ \mu\text{m}$ のMEMSのフォトリソグラフィ技術は、フォトレジスト層で適切な格子パターンを形成するために使用され、また、営利上利用可能なマルチユーザーMEMSプロセス(MUMPsTM)に似ている標準MEMSエッチング技術を使用して、シリコンにパターンがエッチングされる。正確にストリップの高さは、コントロールされることができるよう、サファイア基板102は、腐食停止を提供する。

【0033】

HOE100及び集積基板102は、様々な光学機能を実行するために、様々な用途で使用される。1つは、HOE100がデマルチプレクサーとして役割をする図5で例証される。HOEは、作用において依存する波長である。したがって、入力光ビーム120が密集波長分裂多重(DWDM)システムで多数の経路を運ぶビームのように、1以上の波長の光を含んでいるならば、異なる波長は、異なる角度でHOE100によって回折される。この現象は、伝搬パス122a、122b及び122cとして典型的に示される異なる成分に入力光ビーム120の異なる波長を分けるために使用される。異なる各伝搬パス122a-cが、各平面が伝搬パス104の平面に異なる角度である個別の平面にある。伝搬パス122a-cの全ては、それにもかかわらず、本質的に合計内部反射で基板102で好ましくは移動する。HOE100は、例えば、異なる出力ファイバーへ様々な伝搬パス122a-cを連結することにより、デマルチプレクサーとして作用するために形成される。図5に示されるHOE100は、出力ファイバーへ適切な伝搬パスのみを追い出す波長ファイバーとして使用される。したがって、集積基板及び回折光学要素(HOE100の形状をして)は、波長に依存する異なる反射パスへ信号を反射する。

【0034】

TIR伝搬の確立のために基板102へ光信号を連結する多数の方法がある。例えば、充分な方法は、入力ファイバーを突き進むこと、基板の端を突き進むこと、光ファイバーと基板との間に突き進む要素を提供すること又はこれらの組合せを含んでいる。図6は、基板へ光を連結する典型的な方法を示す。ここで、光ファイバー202は、屈折要素203によって基板102に連結される。光ファイバー202は、基板102の屈折率より低い屈折率を有する光学的透明材料から形成されている、屈折要素203へ分岐する入射光ビーム204を連結する。屈折要素203は、基板102でTIR伝搬のための光204を反射する。光ビーム204は、集中要素206(実施形態で、拡散する光ビーム204を平行にし、かつ、基板102中でTIRで移動するためにそれを反射するために、頂部表面106で形成されているHOEである)に影響を与える。集中要素206は、任意の適切なHOE構造であり、又は、上述されたHOE100によって形成されてもよい。HOE100のそのように集中要素206を形成することは、装置組立てをより容易にすることという利点を有している。集中要素206は、図1の部材108のように、部材208を有している。ファイバー202から光を連結する集中要素206以外で、図6の構造は図1のそれと同じである。したがって、図6は、集積基板及び回折光学要素(HOE206の形状をしているビームコリメーター)を使用して作製することができる、別の光学装置を示す。

10

20

30

40

50

【0035】

図6は、さらに複数の回折光学要素が単一の基板で組合せられてもよく、したがって、複雑な構造を形成するために、その上に集積されてもよいことを示す。同様である又は相違する光学機能を実行する多くの回折光学要素の使用は、記載される装置及び技術を使用して、集積光学回路を生成する。特別の例において、集積要素206は、基板の同じ側に形成されるHOE100に平行にされる入射光204を送る。2つの要素構造は、したがって、入力信号を連結される及び反射する。反射信号パス210（パス116のそのような特性を有している）は、図6で示される。記載される構造への他の修正は、例えば、反射要素と集中又は発散レンズ又はミラーとしての両方で機能する曲線のストリップから形成されているHOE100を有しているように、存在する。複合の回折光学要素を備えることは、集積光学回路を作製する長所を有し、また、そのような集積光学回路は、より容易に製造される。反射器、ビームスプリッター、コリメーター、可変減衰器、回折格子等の集積光学回路が設計されてもよい。さらに、形成する能力、例えば、単一のフォトリソグラフィプロセスを使用する基板102の同じ表面でHOE100及び集中要素206は、より容易な装置組立だけを意味せず、適切な整列がフォトリソグラフィ開発プロセスを通じて作製されるとともに、既存の集積光学回路装置を悩ます整列問題も回避される。

10

【0036】

図7は、206のような平行要素を使用しない図6に連結する代案を示す。ここで、基板220は、突き進む側表面222（入って来る信号のためのプリズムの役割をする）を有している。45°のカットで、表面222が、基板220中でTIRのための平行にするグレード・インデックス・レンズ（GRIN）226から光信号を受け取る。GRINレンズ226は、屈折要素又は反射損失を最小にする非反射コーティング228の薄い層に直接連結されてもよい。

20

【0037】

図8は、上述したものに代替のHOEを示す。図1は、基板との物理的な接触でHOEを示すが、図8は、基板302上に（つまり、物理的な接触でない）HOE300が置かれることを示す（基板302によって光304がパスする）。光ビーム304は、TIRで基板302中で伝搬する。上述されたように、基板302中でTIR伝搬は、基板へ光の連結から達成されてもよい。さらに、図1で、好ましくはTIRは両方の表面306、307で生じるが、ミラーを有する基板302の頂部表面306又は基板の底部表面307で反射層を単に

30

【0038】

HOE500は、基板302の頂部表面306上に配置されるストリップ308から形成されている。ストリップ308は、HOE100中のストリップ108のような基板302と協同し、ストリップ308が頂部表面306との直接の物理的な接触でない図8と差があり、しかし、むしろ、頂部表面306上に伸びて、TIR伝搬によって作製されるエバネッセントフィールドを通して基板302との接触を連結する。作用で、光ビーム304の第1の部分が、頂部表面306から回折され、また、別の部分は、ストリップ308へ連結され、その結果、反射パス310と一致する $m = -1$ オーダーモードを形成するために、ストリップ308からの出力が反射される第1の部分で協同される。影響されない反射パス、つまり、 $m = 0$ モードは、312に示される。この条件は、屈折する合計内部反射と見なされてもよい。パス310に沿った反射ビームは、好ましい実施形態において、上述されたHOEでのように、入射ビーム304の伝搬の方向に及びTIRで基板中で角度 θ （又は θ_p ）で反射するために形成される。HOE300は、最初のステップで、サクリフィシアル層又はスペーサー層以外は、基板302に配置されるHOE100のそれと同様に形成されてもよい。上述された配置及びフォトリソグラフィのステップの後に、サクリフィシアル層は、基板へのエバネッセントカップリング距離内のストリップ308を除去する最終プロセスステップとして遠くに溶かされる又は除外される。ストリップ308を支持するために、標準アンカー部分もMEMSプロセスを使用して形成される。

40

【0039】

50

それらの明白な範囲及び想到から離れないで、発明に多くの追加の変更及び修正を行なうことができる。いくつかの変更の範囲は、上述される。他の範囲は、追加されたクレームから明白になる。

【図面の簡単な説明】

【0040】

【図1】図1は、実施形態にしたがうホログラフィーの光学要素の断面図である。

【図2】図2は、反射される光ビームの方向を示す図1のホログラフィー光学要素の遠近図である。

【図3】図3は、典型的なHOEのための波長毎の角度 θ_p 対格子間隔のグラフである。

【図4】図4は、典型的なHOEのためのHOEストリップの厚さ対HOE効率のグラフである。

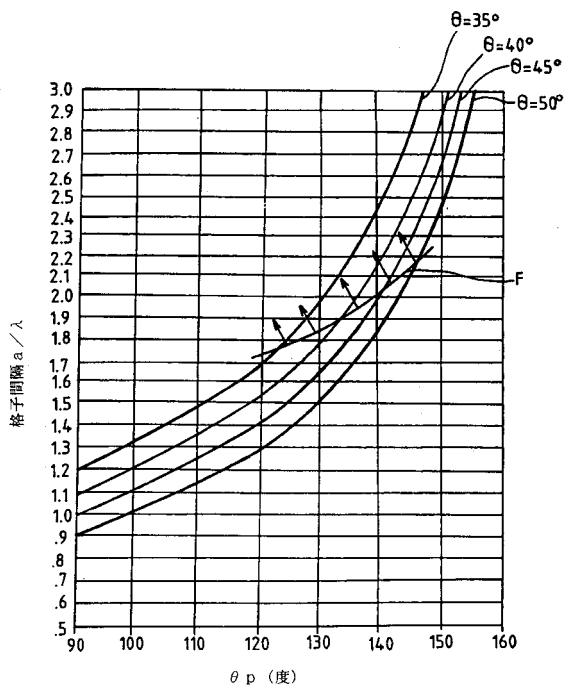
【図5】図5は、様々な構成の波長に入力信号を分けるために、デマルチプレクサーとして使用される図1のホログラフィー光学要素の側面図である。

【図6】図6は、合計内部反射で、そこに移動するための基板へ光信号を連結するための典型的な構造の図である。

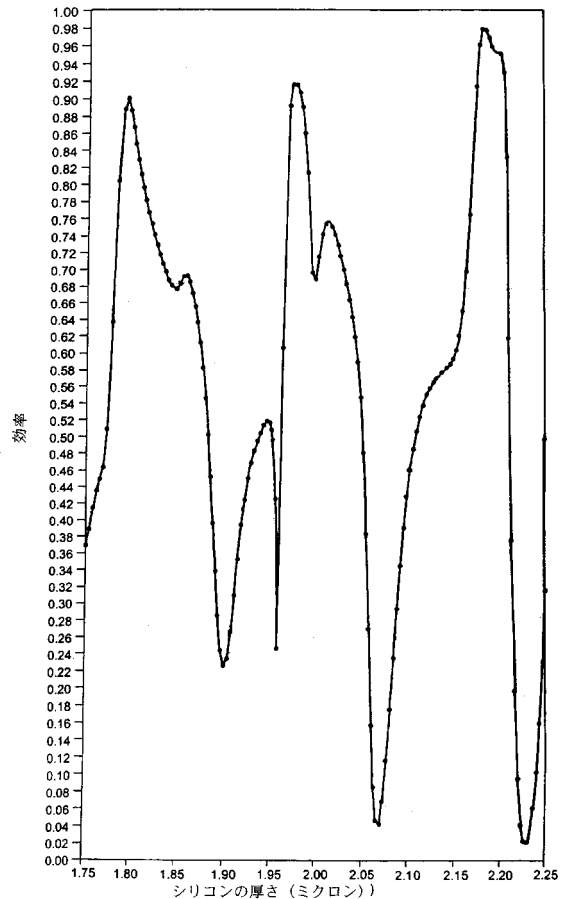
【図7】図7は、合計内部反射のための基板へ光を連結する代替方法の側面図である。

【図8】図8は、HOEを形成しているストリップは光学基板上に配置されている代替HOEの断面図である。

【図3】



【図4】



【国際公開パンフレット】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization
International Bureau



(43) International Publication Date
23 January 2003 (23.01.2003)

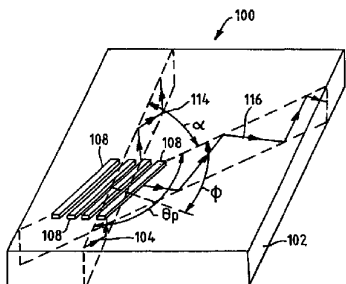
PCT

(10) International Publication Number
WO 03/007033 A1

- (51) International Patent Classification: G02B 6/12, 6/43, 6/34
- (74) Agent: STEPHENS, Paul, B., Marshall, Gerstein & Borun, 6300 Sears Tower, 233 South Wacker Drive, Chicago, IL 60606-6357 (US).
- (21) International Application Number: PCT/US02/13309
- (81) Designated States (national): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GH, GM, GR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, P1, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW.
- (22) International Filing Date: 25 April 2002 (25.04.2002)
- (84) Designated States (regional): ARIPO patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), Eurasian patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), European patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IL, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OAPI patent (BF, BI, CI, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- (25) Filing Language: English
- (26) Publication Language: English
- (30) Priority Data: 09/905,769 13 July 2001 (13.07.2001) US
- (71) Applicant: ROSEMONT INC., [US]; 12001 Technology Drive, Eden Prairie, MN 55344 (US).
- (72) Inventors: FRICK, Roger, L.; 993 North Widow Lake Road, NW, Hackensack, MN 56542 (US); WILLCOX, Charles, R.; 16128 Baywood Lane, Eden Prairie, MN 55346 (US).
- Published: with international search report

[Continued on next page]

(54) Title: INTEGRATED TRANSPARENT SUBSTRATE AND DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENT



(57) Abstract: A diffractive optical element (DOE) is shown formed on a substrate. The DOE is characterized, in one embodiment, by being formed from a plurality of members that are each individually created on a top surface of the substrate. The members may be formed by depositing a poly-silicon material on the substrate or by growing a silicon crystal on the substrate and performing an etch step. The substrate may be formed of a sapphire crystal. The DOE may be used to reflect incident light traveling within the substrate under total internal reflection. The widths, spacing between, and heights of the strips forming the DOE may be designed so as to reflect the incident light within the substrate in a direction of propagation acute to that of the incident light.

WO 03/007033 A1

WO 03/007033 A1 

For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.

**INTEGRATED TRANSPARENT SUBSTRATE AND DIFFRACTIVE
OPTICAL ELEMENT**

Cross-Reference to Related Applications

- 5 This application claims the benefit of U.S. Provisional Application No. 60/223,503, filed August 7, 2001, U.S. Provisional Application No. 60/223,508 filed August 7, 2000, and U.S. Provisional Application No. 60/271,103 filed February 23, 2001.

10 Field of the Invention

The present invention relates generally to integrated optical circuits and more specifically integrated optical circuits based on diffractive optical elements mounted on a transparent optical substrate.

15 Background of the Prior Art

- It has been proposed that integrated optical circuits could be constructed by mounting reflective planar optical elements on a transparent substrate and coupling the elements by means of internal reflections from the mirrored surface of a transparent substrate. The planar optical elements would direct, focus or otherwise
20 diffract an incident optical signal in a desired manner. This approach would allow complex optical devices to be constructed and interconnected in a planar fashion similar to electrical integrated circuits

- This approach has had limited success because of inherent reflection losses and the difficulty of constructing planar elements that are efficiently coupled to the
25 internal optical signal. Mirrored surfaces of the substrate are commonly constructed by applying a thin film of metal to a transparent substrate, but known thin film materials have losses of several percent, and the signal strength is lost exponentially if multiple reflections are necessary. Further, if the planar optical elements are not in intimate contact with the substrate surface there can be large losses associated with
30 getting the optical signal out of and back into the substrate.

Diffractive optical elements (DOEs) are ideally suited for the reflective planar optical elements since they can be integral with the surface, but they suffer from

several deficiencies. They typically require a metallic coating to operate in the reflective mode and this results in the loss of optical signal. If the dimensions of the diffracting objects in the DOE are much larger than the wavelength of light in the substrate they will diffract the light into modes other than the desired mode, which
5 can result in a loss of efficiency and cause undesirable errors such as crosstalk. This problem can be somewhat minimized by using blazed grating patterns in which the objects are shaped to preferentially diffract light in a desired direction. A sawtooth blazed diffraction grating is an example, typically fabricated using a shaped engraving tool. Nevertheless, the three dimensional nature of blazed gratings makes them
10 difficult to fabricate on the surface of an optical substrate, however, diffraction of light into undesired modes and directions is still a problem.

If the dimensions of the diffracting objects approach the wavelength of light, the undesired modes or directions can be minimized or eliminated by the proper selection of incident angles and size of the diffracting objects. Such a device is
15 generally known as a holographic optical element (HOE), which is a subset of DOEs. If these devices are constructed by means of patterning the depth of a reflective surface they are known as surface relief or phase holograms since the different depths of the diffracting surface cause varying phase shifts in the diffracted light. These phase shifts can be adjusted to cause constructive interference of light in the desired
20 direction or mode of the directed light signal by adjusting the depth of the pattern. If the pattern of refracting objects is coated with a reflecting metal film, losses could be as low as a few percent since very little of the light energy is absorbed in such a device. In practice, however, it is difficult to construct such a device on the surface of a substrate in a manner that exhibits high efficiency and can be efficiently
25 manufactured. Electron beams can directly write patterns of these dimensions onto a substrate but this is a very slow and expensive process and does not lend itself to producing the surface relief required for a phase type hologram. Embossing is used to reproduce surface type holograms on transparent plastics (e.g. credit card security holograms) but the tolerances and stability of these materials are not suitable for most
30 applications.

On the other hand, volume holograms can also be created by exposing a photographic emulsion to a pattern of interfering laser light. A pattern of diffracting

objects is created within the volume of the emulsion. HOEs constructed with this method can have high efficiency, but they are notoriously difficult to produce and are subject to deterioration due to environmental effects.

As would be evident from the above problems, there is a need for a method of forming an optical integrated circuit based on diffractive optical elements on the surface of a transparent substrate with high optical efficiency that can be mass-produced at a relatively affordable cost.

Summary of the Invention

In one embodiment, provided is an integrated optical device having an optical substrate, wherein an incident light signal is propagating within the substrate in a primary direction of propagation reflecting off a top surface of the substrate under total internal reflection. The integrated optical device also has a diffractive optical element having a plurality of spaced-apart members formed of an optically transparent material and that are disposed above the top surface of the substrate such that the incident light signal is reflected within the substrate along a desired direction of propagation.

In accordance with an even further embodiment, provided is a diffraction grating for use with an optically transparent substrate and having a plurality of members formed of a second optically transparent material and disposed on a top surface of the substrate. The members are spaced apart a spacing distance and have member widths. The sum of the spacing distance and the member width is chosen such that a light signal traveling within the substrate under total internal reflection off the top surface in an incident direction of propagation and incident upon the diffraction grating is reflected into a first diffracted order propagating within the substrate in a reflected direction of propagation. The reflected direction of propagation defines an angle with respect to the incident direction of propagation and the reflected light signal is propagating within the substrate under total internal reflection.

In accordance with another embodiment, provided is a method of routing an incident light signal. The method includes a step of transmitting the incident light signal in an optical substrate under total internal reflection off of a top surface of the

substrate. Performed in another step of the method is a step of disposing a plurality of spaced-apart strips above the top surface of the substrate for receiving a portion of the incident light signal. The strips are disposed such that the strips form a diffraction grating that reflects the incident light into a first diffracted order propagating within
5 the substrate in a reflected direction of propagation defining an angle with respect to an incident direction of propagation and propagating within the substrate under total internal reflection.

In accordance with another embodiment, provided is an integrated optical device having a substrate formed of an optically transparent material and having a
10 light signal traveling within the substrate under total internal reflection. The integrated optical device also has a first diffractive optical element formed of a first plurality of spaced-apart members disposed above a top surface of the substrate so as to reflect the light signal within the substrate in a desired direction of propagation. Furthermore, the integrated optical device has a second diffractive optical element
15 formed of a second plurality of spaced-apart members and disposed above the top surface of the substrate to receive the reflected light signal from the first diffractive optical element and disposed to output the reflected light signal for propagation within the substrate.

20 **Brief Description of the Drawings**

FIG. 1 is a cross-sectional illustration of a holographic optical element in accordance with an embodiment.

FIG. 2 is a perspective view of the holographic optical element of FIG. 1 showing the direction of a reflected light beam.

25 FIG. 3 is a graph of angle θ_p versus grating period over wavelength for an exemplary HOE.

FIG. 4 is a graph of the HOE strip thickness versus HOE efficiency for an exemplary HOE.

30 FIG. 5 is a side view of the holographic optical element of FIG. 1 used as a demultiplexer to separate out an input signal into various constituent wavelengths.

FIG. 6 is an illustration of an exemplary structure for coupling an optical signal into a substrate for traveling therein under total internal reflection.

FIG. 7 is a side view of an alternative way of coupling light into the substrate for total internal reflection.

FIG. 8 is a cross-sectional view of an alternative HOE in which strips forming the HOE are disposed above the optical substrate.

5

Description of the Preferred Embodiment

The presently disclosed embodiments solve the above-described problems by providing an optical device incorporating diffractive optical elements positioned on a transparent substrate that can be fabricated with standard MEMS materials and fabrication techniques. With the disclosed teachings, numerous optical elements can be formed including diffractive elements reflecting incident light. The preferred embodiments below illustrate a diffractive optical element in the form of a HOE that forms a virtual mirror, which may be used in conjunction with an optical substrate. None of the embodiments provided requires a reflective coating. Nevertheless, non-
10
15

In lieu of reflective coatings the HOE and substrate hereinbelow are adapted to affect light traveling within an optical substrate under total internal reflection. Total internal reflection (TIR) is a very low loss optical phenomenon, leading to high efficiency operation in the disclosed devices. The diffracting objects in the HOE itself preferably diffract light by means of total internal reflection to minimize losses. In addition, the depicted HOEs are designed to only allow one diffracted mode to exist, which further reduces losses. The HOEs are preferably constructed as phase holograms that suppress the reflected $m=0$ mode thus allowing overall efficiency to approach 100%. The HOEs cooperate with the optical substrate to reflect an incident light traveling therein such that the reflected light also propagates within the substrate under TIR, which allows many HOEs to be optically connected with a high overall device efficiency.
20
25

While diffractive optical elements such as these generally described above are shown, it would be understood that the present disclosure provides more broadly for a system of building optical devices and that the optical devices that may be built are many. In fact, the present disclosure shows a series of integrated substrate and diffractive optical element components, or devices. These integrated components can
30

form many optical devices such as reflectors, collimators, diffraction gratings, beam splitters and variable attenuators. The integrated substrate and diffractive optical element could also function as a converging or diverging lens. As the descriptions below indicate, the disclosures provide a way of reproducing hologram patterns that could serve numerous functions.

FIG. 1 shows a cross-sectional side view of an HOE 100 and an optical substrate material, which in the preferred embodiment is optically transparent. More specifically, the substrate 102 should be optically transparent in the infrared region such as the C band used for wavelength division multiplexed (WDM) infrared optical long distance communication. This band encompasses wavelengths from 1528 nm to 1621 nm nanometers but operation in other optical communications bands is also envisioned. The substrate 102 may be made of various materials such as sapphire or quartz or another substrate material suitable for propagating a light signal under TIR and for serving as an etch-stop for a photolithography process, as explained in more detail below.

An incident light beam 104 is traveling through the substrate 102 under total internal reflection, which as would be known occurs above a critical angle of incidence at the outer surface boundary of the substrate 102. In the preferred embodiment, the substrate 102 has a top surface 106 above, which is disposed air. The index of refraction of the substrate and the index of refraction of air define the critical angle for total internal reflection within the substrate.

An angle of incidence, θ , is shown in FIG. 1 measured from a normal to the top surface 106 and extending into the substrate 102. For a sapphire substrate 102 surrounded by an air boundary, the critical angle is approximately 35°, and so θ is to be at or above this value for TIR propagation. That is, the light beam 104 can be made incident upon the top surface 106 at angles above the critical angle and still facilitate HOE 100 operation. While in the preferred embodiment, air is disposed above the top surface 106, other materials may be disposed above the substrate 102 so long as these materials have an index of refraction less than that of the substrate 102 to establish the TIR conditions. Further, while TIR off of the top surface 106 and a bottom surface 107 of the substrate 102 offers the most efficient design with the least cost, one could alternatively have TIR on the top surface 106 and use mirrors or a

reflective coating on the bottom surface 107 to reflect the light beam 104. Similarly, a cladding layer could be used below the bottom surface 107.

The HOE 100 is formed of individual diffracting members 108, of arbitrary shape, disposed directly on the top surface 106. The members 108 could consist of
5 arbitrarily shaped dots, curved or straight strips or other shapes forming a diffracting pattern that performs a desired modification of an incident light signal. Examples of such patterns are patterns that form diffraction gratings or mirrors of arbitrary curvature. If the members 108 were dots in an arrayed pattern, the HOE 100 could be
10 made to function as a beam splitter receiving the input 104 and reflecting portions of the input into any number of output directions. Such dots could have circular, oval, cross, or square shapes, and the HOE 100 pattern formed of the members 108 could create a 1x2 or 1xN splitter depending on the spacing between the dots.

In the illustrated embodiment, the members 108 are formed of an optically transparent material. These members 108 create a HOE performing the function of a
15 tilted mirror. The geometry of the members 108 will affect the properties and operation of the HOE 100. The embodiment of FIG. 1 shows the members to be strips 108 formed in direct physical contact with the top surface 106, though these strips 108 could be disposed slightly above the top surface 106, as well (see, FIG. 8).

The strips 108 may be formed of a single crystal silicon, poly-silicon,
20 amorphous silicon, alumina, sapphire, silicon-nitride, germanium silica or other optically transparent material which is also processable using a 1 or .5 μm micro-electromechanical systems (MEMS) processing technique. The preferred material is poly-silicon since it is transparent at the desired operating frequencies, can be easily processed with MEMS processes and has a high refractive index. Only a few strips
25 108 are exemplarily shown, but in operation there would typically be a larger number of such strips to ensure that the light beam 104 is incident upon some part of the HOE 100. Further, the strips 108 are shown in cross-section and actually would extend into and out of the illustration, as depicted in FIG. 2.

The strips 108 have a width 'b' and are spaced apart on the top surface 106 a
30 distance 'c'. Grating period 'a' is equal to the sum of these two values. The HOE 100 reflects incident light 104 into light beam 116, and the width 'a' affects the wavelength of light the HOE 100 is optimized to reflect. In the preferred

embodiment, the width 'b' is equal to width 'c', yet the widths may be non-equal, if so desired. Strip thickness and width can be adjusted to maximize the intensity of the reflected light. Additionally, there could be intra-width variation, wherein the width 'b' could vary (e.g., b1, b2, b3, etc.) and the width 'c' could vary (e.g., c1, c2, c3, etc.). For example, a HOE could be formed with different 'a' values (a1, a2, a3, etc.) where 'a' varies continuously, such that $a1 > a2 > a3 > \text{etc.}$ An exemplary apparatus could be used to reduce dispersion in the reflected signal or to increase the amount of dispersion therein, as might be useful in demultiplexing applications. As the strips 108 form a grating pattern, exact dimensional precision is not necessary to produce a functioning device. The aggregate affect of the strips 108, and spacings therebetween, is to minimize inexactness in the sizing of any particular strip 108. It is preferred, nonetheless, that the HOE 100 have 'a' periodicity, i.e., that 'a' is substantially the same throughout the HOE 100. In this way, 'a' is more influential on HOE 100 operation than 'b' or 'c'. In an exemplary structure, width 'a' would be on the order of 1.5 μm , i.e., on the order of the wavelength of incident light, which is about .9 μm for the C band in a sapphire substrate.

The strips 108 are shown in cross-section and extend out of the illustrations. The strips 108 extend in parallel planes that are each at an acute angle to the plane of the propagation of the light 104, i.e., the plane of the illustration. This can be seen from FIG. 2. The strips 108 are linear and parallel in the preferred embodiment, but non-linear strips may be used. For example, curved strips may be used to create a HOE that acts as a focusing mirror. Furthermore, the strips 108 are oriented perpendicularly to a line-bisecting angle θ_p , shown in FIG. 2.

In operation, the strips 108 cooperate with the top surface 106 to define a diffraction grating pattern or tilted mirror. The incident light 104 hits the pattern and is reflected, as shown and described below. Thus, the HOE 100 acts as a reflective element.

At the top of the substrate 102, the spacings 'c' between the strips 108 together form an interface layer 110, which is an air-substrate interface layer. As the light beam 104 is traveling in the substrate 102 under total internal reflection, a portion of the light beam 104 is diffracted at the interface layer 110 under total

internal reflection. That is, a first portion of the light beam 104 is incident upon the air-substrate interface layer 110 and is diffracted by the reflective action of the spaces between the strips 108. Since these spaces are on the order of the wavelength of the incident light, diffraction occurs rather than plane-wave reflection. A second portion
5 of the light beam 104 incident upon the HOE 100 is incident upon that portion of the top surface 106 below the strips 108. Here, the strips 108 will absorb light energy from the substrate and act like low loss waveguide resonators bounded on a top surface 112 and side surfaces by a lower index of refraction material—air in the preferred embodiment. Thus, there is TIR reflection within the strips 108 as well as
10 the TIR propagation within the substrate 102. A standing wave is essentially created in the strips 108, and absorbed light will eventually leave the strips 108 and reenter the substrate 102 phase shifted from the light reflected by the interface layer 110. If the strips 108 have a higher index of refraction than the substrate 102, efficiency is further improved since the standing waves also are bounded by a lower surface with a
15 transition to a lower index of refraction. The effect of the strips 108 and the interface layer 110 is to collectively diffract the light beam 104 into a $m=-1$ mode that propagates within the substrate 102. Light beam 116 represents this reflected signal, while path 114 is the path light beam 104 would travel within the substrate 102 if unaffected by strips 108. Path 114 could also coincide with the $m=0$ mode of the
20 HOE diffraction pattern where destructive interference has minimized the output.

FIG. 2 shows the propagation of the reflected light beam 116. The propagation path 116 travels in a plane that is at an angle, α or θ_p , to the plane of propagation of the light beam 104. Thus, propagation path 116 travels in a plane extending out of the illustration of FIG. 1. Having the reflected light beam 116 travel
25 in a second direction of propagation allows the HOE 100 to spatially separate out the reflected signal path from the signal path of the incident propagating beam and, therefore, suggests the use of the HOE 100 as a way of switching an output. For example, if a beam is made to propagate under TIR in a direction incident upon the HOE 100 the beam will be switched, whereas if the beam is made to propagate along
30 another path not incident upon the HOE 100 it will propagate along its original propagation path.

The angle of reflection, θ_p , created by the HOE 100 depends on numerous factors, including the strip periodicity 'a', the angle of incidence θ , and the wavelength of the light λ . A sample graph showing the relationship between θ_p and these variables is shown in FIG. 3. FIG. 3 plots angle θ_p on the x-axis and 'a'/ λ on the y-axis for various angles of incidence θ . FIG. 3 assumes that the angle of incidence θ is the same before and after interaction of the light with the HOE such that TIR in the substrate is maintained. As can be seen, for $\theta=35^\circ$, 'a'/ λ of 1.5 will result in θ_p of approximately 110° . Similarly, with $\theta=45^\circ$ an 'a'/ λ of 1.5 will result in θ of approximately 125° . The graph also shows that, in this example, θ can range from about 90° to about 145° depending on the parameters. The graph also shows exemplary ranges on 'a', though 'a' ranges generally extend from approximately $.5\lambda$ to 4λ depending on parameters. The graph of FIG. 3 also shows a forbidden region, extending above a line F, within which light is reflected into more modes than just the $m=-1$ mode.

Returning to FIG. 2, another apparent feature of the HOE 100 is that light path 116 travels within the substrate 102 under total internal reflection. This is desirable to reduce losses on the reflected signal. The reflection into a totally internally reflected path is achieved by adjusting the grating periodicity 'a'.

The strips 108 are disposed to couple a portion of the light beam 104 traveling in the substrate 102 by being placed in direct contact with top surface 106 of the substrate 102. The present disclosure, however, is not limited to the illustrated embodiment. Instead, an HOE may be disposed entirely above the top surface 106 and still be coupled to light traveling within the substrate 102. As is known, light reflected at a boundary interface under total internal reflection produces an evanescent field extending above the boundary interface. An HOE may be coupled to this evanescent field, i.e., without the strips in direct physical contact with the substrate, and still affect the light traveling within the substrate. Frustrated total internal reflection operates on this principle. Such an alternative is described below with respect to FIG. 10.

Strip thickness establishes a phase shift between the light diffracted from the interface layer 110 and the light from the resonator strips 108. In the preferred

embodiment, the thicknesses for all strips 108 are identical. Furthermore, the thickness is chosen to maximize the amount of the incident light 104 reflected into light path 116. A graph showing HOE efficiency versus silicon strip thickness is shown in FIG. 4. In this exemplary graph, the substrate is made of sapphire, the incident beam is TE polarized, $a'=1.5 \mu\text{m}$, $\lambda=1.55 \mu\text{m}$, $\theta=45^\circ$, and $\phi=65.3^\circ$. As is shown, there are numerous strip thickness which produce very high efficiency. Efficiency peaks occur at approximately $1.55 \mu\text{m}$, $1.84 \mu\text{m}$, and $2.15 \mu\text{m}$. This graph is merely representative, however, and lower thicknesses may be used. For example, as the thickness of the strips 108 is to be chosen to impart the appropriate phase shift on the absorbed light, multiple harmonics of a particular thickness would impart the same phase shift, and therefore, could be used. Preferred thickness for strips consisting of poly-silicon fabricated with MEMS processes are $.5 \mu\text{m}$ to $3 \mu\text{m}$.

An additional advantage of the HOE 100 is that strip thickness allows structures to be formed that are substantially independent of the polarization state of the incident light beam. This performance feature is known as polarization dependent loss, a design requirement set-forth by the industry Telecordia standard GR1073. We have found that for any incident linear polarization state HOE efficiencies over 90% are theoretically achievable.

To form the strips 108, a process of depositing a film of poly-silicon, or other material, on the sapphire substrate 102 can be used. Alternatively, a single crystal silicon can be epitaxially grown on the sapphire substrate 102. In either case, with the poly-silicon layer or the single crystal silicon layer formed on the top surface 106, standard $1 \mu\text{m}$ or $.5 \mu\text{m}$ MEMS photolithography techniques can be employed to form the desired grating pattern in a photoresist layer and the pattern can be etched into the silicon using standard MEMS etching techniques similar to the commercially available multi-user MEMS process (MUMPs™). The sapphire substrate 102 provides an etch stop so that the height of the strips can be accurately controlled.

The HOE 100 and integrated substrate 102 can be used in various applications to perform various optical functions. One is exemplified in FIG. 5 where the HOE 100 acts as a demultiplexer. HOEs are wavelength dependent in operation. Thus, if the input light beam 120 contains light of more than one wavelength, such as beams carrying multiple channels in a dense wavelength division multiplexed (DWDM)

systems, the different wavelengths will be diffracted by the HOE 100 at different angles. This phenomenon can be used to separate out the different wavelengths of the input light beam 120 into different components, exemplarily shown as propagation paths 122a, 122b, and 122c. Each of the different propagation paths 122a-c would be
5 in a separate plane where each plane would be at a different angle to the plane of the propagation path 104. The propagation paths 122a-c, nonetheless, would all preferably travel in the substrate 102 under substantially total internal reflection. The HOE 100 can be made to operate as a demultiplexer by coupling the various propagation paths 122a-c into different output fibers, for example. The HOE 100
10 shown in FIG. 5 could also be used as a wavelength filter by routing only a desired propagation path to an output fiber. Thus, an integrated substrate and diffractive optical element, here in the form of the HOE 100, can reflect a signal into different reflected paths depending on wavelength.

There are numerous ways to couple light signals into the substrate 102 for
15 establishing TIR propagation. For example, sufficient methods include cleaving an input fiber, cleaving an edge of the substrate, providing a cleaved element between the optical fiber and the substrate, or some combination of these. FIG. 6 shows an exemplary way of coupling light into a substrate. Here, an optical fiber 202 is coupled to the substrate 102 via refractive element 203. The optical fiber 202 couples
20 a diverging incident light beam 204 into the refractive element 203, formed of an optically transparent material with an index of refraction lower than that of the substrate 102. The refractive element 203 refracts the light 204 for TIR propagation in the substrate 102. The light beam 204 impinges on a focusing element 206, which in an embodiment is a HOE formed on the top surface 106 to collimate the spreading
25 light beam 204 and to reflect it for travel under TIR within the substrate 102. The focusing element 206 can be any suitable HOE structure or may be formed according to the HOE 100, described above. Forming the focusing element 206 like that of the HOE 100 has the advantage of making device fabrication easier. The focusing element 206 has members 208, like members 108 of FIG. 1. Other than the focusing
30 element 206 coupling light from the fiber 202, the structure in FIG. 6 is the same as that of FIG. 1. Thus, FIG. 6 shows another optical device that can be created using an

integrated substrate and diffractive optical element, a beam collimator in the form of the HOE 206.

FIG. 6 also shows that multiple diffractive optical elements may be combined on a single substrate, and therefore integrated therewith, to form complex structures.

5 The use of many diffractive optical elements performing similar or dissimilar optical functions allows for the creation of an integrated optical circuit using the disclosed devices and techniques. In the particular example, the focusing element 206 sends the collimated incident light 204 to the HOE 100 also formed on the same side of the substrate. The two-element structure, therefore, allows for both coupling and
10 reflecting of the input signal. Reflected signal path 210 (having properties like that of path 116) is shown in FIG. 6. Other modifications to the depicted structure could exist, such as having the HOE 100 formed of curved strips that function both as a reflecting element and a converging or diverging lens or mirror. Adding multiple diffractive optical elements together has the advantage of allowing for the creation of
15 integrated optical circuits and such integrated optical circuits could be more easily manufactured. Integrated optical circuits of reflectors, beam splitters, collimators, variable attenuators, diffraction gratings etc. may be designed. Furthermore, the ability to form, for example, the HOE 100 and the focusing element 206 on the same surface of the substrate 102 using a single photolithography process means not only
20 easier device fabrication, but the alignment problems plaguing existing integrated optical circuit devices will be avoided as the desired alignment will be created through the photolithography development process.

FIG. 7 shows a coupling alternative to FIG. 6 that does not use a collimating element like 206. Here, a substrate 220 has a cleaved side surface 222, which acts as
25 a prism for incoming signals. At a 45° cut, the surface 222 will receive light signal 224 from a collimating graded index lens (GRIN) 226 for TIR within the substrate 220. The GRIN lens 226 may be coupled directly to a refractive element or a thin layer of anti-reflecting coating 228 that minimizes reflection losses.

FIG. 8 shows an alternative HOE to those previously described. Whereas
30 FIG. 1 shows a HOE in physical contact with a substrate, FIG. 8 shows an HOE 300 is deposited above (i.e., out of physical contact with) a substrate 302, in which light 304 passes through the substrate 302. Light beam 304 propagates within the substrate

302 under TIR. TIR propagation in the substrate 302 may be achieved from the coupling of light into the substrate, as discussed above. Furthermore, as with FIG. 1, TIR need only be established on a top surface 306 of the substrate 302 with mirrors or a reflective layer on a bottom surface 307 of the substrate, though preferably TIR would occur at both surfaces 306, 307.

The HOE 500 is formed of strips 308 positioned above the top surface 306 of the substrate 302. The strips 308 cooperate with the substrate 302 like strips 108 in HOE 100, the difference being in FIG. 8 that the strips 308 need not be in direct physical contact with the top surface 306, but rather are in coupling contact with the substrate 302 through an evanescent field extending above the top surface 306 and created by the TIR propagation. In operation, a first portion of light beam 304 will be diffracted from the top surface 306 and a second portion will be coupled into the strips 308, such that the output from the strips 308 will cooperate with the reflected first portion to form a $m=-1$ order mode coinciding with reflected path 310. The unaffected reflection path, i.e., the $m=0$ mode is shown in 312. This condition may be thought of as frustrated total internal reflection. The reflected beam along path 310, in the preferred embodiment, will be made to reflect at an angle α (or θ_p) to the direction of propagation of the incident beam 304 and within the substrate under TIR, as with the HOEs previously described. The HOE 300 may be formed similarly to that of HOE 100, except a sacrificial layer or spacer layer would be deposited on the substrate 302, in an initial step. After the depositing and photolithography steps described above, the sacrificial layer would be dissolved away or removed as a final processing step leaving the strips 308 within evanescent coupling distance to the substrate. To support the strips 308, standard anchoring portions would also be formed using MEMS processing.

Many additional changes and modifications could be made to the invention without departing from the fair scope and spirit thereof. The scope of some changes is discussed above. The scope of others will be come apparent from the appended claims.

30

We claim:

1. An integrated optical device comprising:
an optical substrate, wherein an incident light signal is propagating within the
5 substrate in a primary direction of propagation reflecting off a top surface of the
substrate under total internal reflection; and
a diffractive optical element having a plurality of spaced-apart members
formed of an optically transparent material and disposed above the top surface of the
substrate such that the incident light signal is reflected within the substrate along a
10 desired direction of propagation.
2. The integrated optical device of claim 1, wherein the substrate is
formed of quartz.
3. The integrated optical device of claim 1, wherein the substrate is
formed of sapphire.
- 15 4. The integrated optical device of claim 1, wherein the members are a
plurality of strips that are substantially parallel.
5. The integrated optical device of claim 4, wherein the plurality of strips
each have a substantially identical strip width.
6. The integrated optical device of claim 4, wherein the plurality of strips
20 are each spaced apart a substantially equal spacing distance.
7. The integrated optical device of claim 4, wherein the plurality of strips
each have a substantially identical strip width, the plurality of strips are each spaced
apart a substantially equal spacing distance, and the spacing distance is substantially
identical to the strip width.
- 25 8. The integrated optical device of claim 7, wherein the sum of the
distance and width is between $.5\lambda$ and 4λ , where λ is the wavelength of the light
signal in the substrate.
9. The integrated optical device of claim 1, wherein the thickness of the
members is adjusted to maximize the intensity of the reflected light signal
- 30 10. The integrated optical device of claim 1, wherein the members are
formed of a material selected from the grouping consisting of amorphous silicon,
crystalline silicon, and poly-silicon.

11. The integrated optical device of claim 1, wherein the members are formed of a material selected from the grouping consisting of alumina, sapphire, silicon nitride, and an alloy of poly-silicon and poly-germanium.
12. The integrated optical device of claim 1, wherein the members are
5 disposed in direct contact with the top surface of the substrate.
13. The integrated optical device of claim 1, wherein the members are disposed in evanescent field coupling contact with the top surface of the substrate.
14. The integrated optical device of claim 1, wherein the diffractive optical element produces a first order diffracted mode that travels within the substrate in the
10 desired direction of propagation at an angle to the primary direction of propagation.
15. The integrated optical device of claim 14, wherein the first order diffracted mode travels within the substrate under total internal reflection.
16. The integrated optical device of claim 1, wherein the incident light signal is a diverging beam and further comprising a collimating element adapted to
15 receive the incident light signal, the collimating element being positioned so that the incident light signal from the collimating element is collimated in the substrate and traveling in the substrate under total internal reflection.
17. The integrated optical device of claim 16, wherein the collimating element comprises a holographic element mounted on the top surface of the substrate.
- 20 18. The integrated optical device of claim 1, wherein the light beam is coupled into the substrate through a GRIN lens.
19. The integrated optical device of claim 1, wherein the members are substantially parallel linear elements.
20. The integrated optical device of claim 1, wherein the members are
25 formed on the top surface of the substrate by depositing a silicon material in a patterned form.
21. The integrated optical device of claim 1, wherein the members and the substrate are formed of the same material.
22. The integrated optical device of claim 21, wherein the material is
30 sapphire.
23. The integrated optical device of claim 1, where the members have a higher index of refraction than that of the substrate.

24. The integrated optical device of claim 1, where the diffractive optical element operates by means of total internal reflection.
25. The integrated optical device of claim 1, comprising a plurality of incident light signals each having a different wavelength and wherein the diffractive optical element reflects each channel into a different first order diffracted mode such that each reflected light signal travels within the substrate in one of plurality of secondary directions of propagation each at an angle to the primary direction of propagation and such that each reflected channel travels within the substrate under total internal reflection.
26. The integrated optical device of claim 1, wherein the members each have a width selected to maximize the intensity of the reflected light signal.
27. The integrated optical device of claim 1, wherein the members are formed of a plurality of strips, each strip having a width and an associated spacing, wherein the widths and the spacings vary among the strips.
28. The integrated optical device of claim 27, wherein the widths and the spacings vary in a continuous manner.

29. A diffraction grating for use with an optically transparent substrate, the diffraction grating comprising:
- a plurality of members formed of an optically transparent material disposed above a top surface of the substrate, the members being spaced apart a spacing distance and having member widths, whereby the sum, a , of the spacing distance and the member width is chosen such that a light signal traveling within the substrate under total internal reflection off the top surface in an incident direction of propagation and incident upon the diffraction grating is reflected into a first diffracted order propagating within the substrate in a reflected direction of propagation defining an angle, θ_p , with respect to the incident direction of propagation and propagating within the substrate under total internal reflection.
30. The diffraction grating of claim 29, wherein the sum, a , is between $.5\lambda$ and 4λ , where λ is the wavelength of the light signal within the substrate.
31. The diffraction grating of claim 30, wherein λ is between $.25 \mu\text{m}$ and $10 \mu\text{m}$ microns.
32. The diffraction grating of claim 29, wherein the light signal is incident upon the diffraction grating at an angle, θ , above a critical angle, θ_c being measured from a normal to the top surface of the substrate extending into the substrate, and wherein the sum a is chosen such that θ_p is greater than 90° and less than 180° .
33. The diffraction grating of claim 29, wherein the spacing distance is substantially identical to the member width.
34. The diffraction grating of claim 29, wherein the members are formed of a material selected from the grouping consisting of amorphous silicon, crystalline silicon, and poly-silicon and wherein the substrate is formed of sapphire.
35. The diffraction grating of claim 29, wherein the members have an index of refraction higher than the index of refraction of the substrate.

36. A method of routing an incident light signal comprising the steps of:
transmitting the incident light signal in an optical substrate under total internal reflection off of a top surface of the substrate; and
disposing a plurality of spaced-apart strips above the top surface of the substrate for receiving a portion of the incident light signal such that the plurality of strips form a diffraction grating that reflects the incident light into a first diffracted order propagating within the substrate in a reflected direction of propagation defining an angle with respect to an incident direction of propagation and propagating within the substrate under total internal reflection.
37. The method of claim 36, wherein the step of disposing a plurality of spaced-apart strips further comprises the steps of:
depositing a thin film of optical material on the top surface of the substrate;
applying a masking over the thin film;
exposing the thin film and the mask to a photolithographic exposure process to form a pattern within the thin film, the pattern corresponding to the strips; and
selectively etching portions of the thin film to form the strips.
38. The method of claim 36, wherein the optical material is a poly-silicon material.
39. The method of claim 36, wherein the step of disposing the plurality of strips above the top surface forms the strips in direct contact with the top surface.
40. The method of claim 36, wherein the step of disposing a plurality of spaced-apart strips further comprises the steps of:
growing a thin film of crystalline silicon on the top surface of the substrate;
applying a masking over the thin film;
exposing the thin film and the mask to a photolithographic exposure process to form a pattern within the thin film, the pattern corresponding to the strips; and
selectively etching portions of the thin film to form the strips.
41. The method of claim 40, wherein the step of disposing the plurality of strips above the top surface forms the strips in direct contact with the top surface.
42. The method of claim 36, wherein the step of disposing a plurality of spaced-apart strips further comprises the steps of:
depositing a sacrificial layer on the top surface of the substrate;

WO 03/007033

- 20 -

PCT/US02/13309

- depositing a thin film of an optical material over the sacrificial layer;
applying a masking over the thin film;
exposing the thin film and the mask to a photolithographic exposure process to
form a pattern within the thin film, the pattern corresponding to the strips;
5 selectively etching portions of the thin film to form the strips; and
removing the sacrificial layer so that the strips are formed above the top
surface of the substrate within an evanescent field coupling region extending above
the top surface.

43. An integrated optical device comprising:
- a substrate formed of an optically transparent material and having a light signal traveling within the substrate under total internal reflection;
 - a first diffractive optical element formed of a first plurality of spaced-apart members disposed above a top surface of the substrate so as to reflect the light signal within the substrate in a desired direction of propagation;
 - a second diffractive optical element formed of a second plurality of spaced-apart members and disposed above the top surface of the substrate to receive the reflected light signal from the first diffractive optical element and disposed to output the reflected light signal for propagation within the substrate.
44. The integrated optical device of claim 43, wherein the first diffractive optical element is a collimating element.
45. The integrated optical device of claim 43, wherein the desired direction of propagation is parallel to an incident direction of propagation of the light signal.
46. The integrated optical device of claim 43, wherein the output light signal from the second diffractive optical element propagates within the substrate along a first order diffracted mode having an angle to the desired direction of propagation, the output light signal also propagating within the substrate under total internal reflection.

FIG. 1

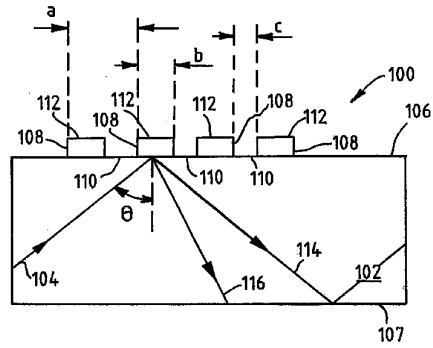


FIG. 2

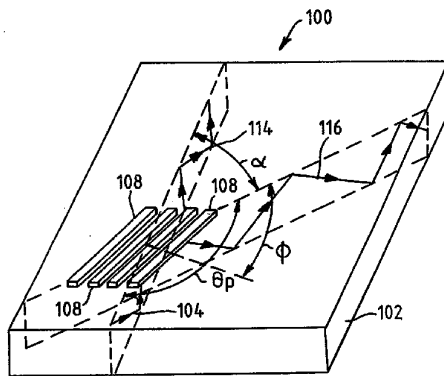
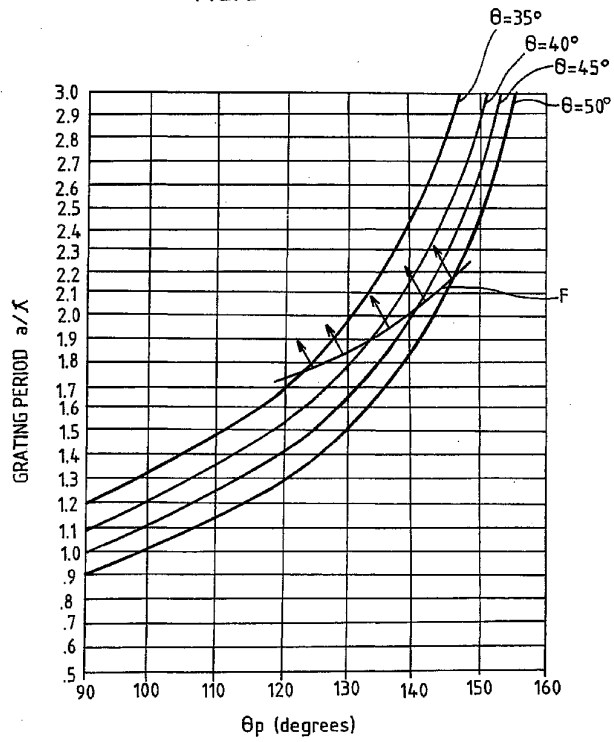


FIG. 3

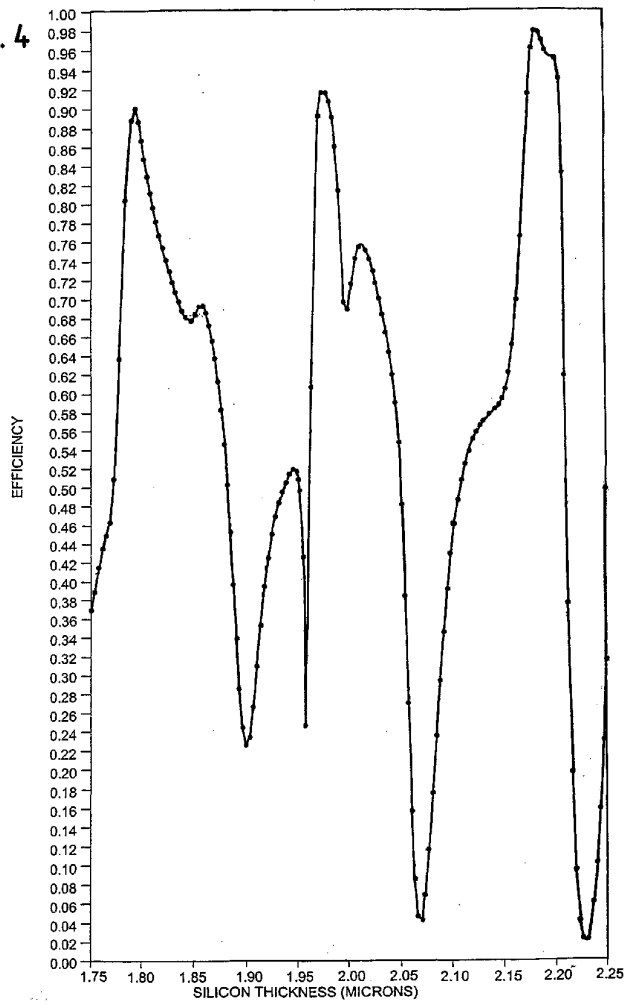


WO 03/007033

4 / 8

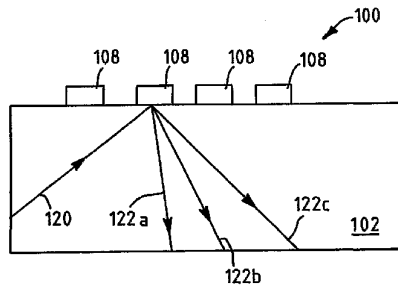
PCT/US02/13309

FIG. 4



SUBSTITUTE SHEET (RULE 28)

FIG. 5



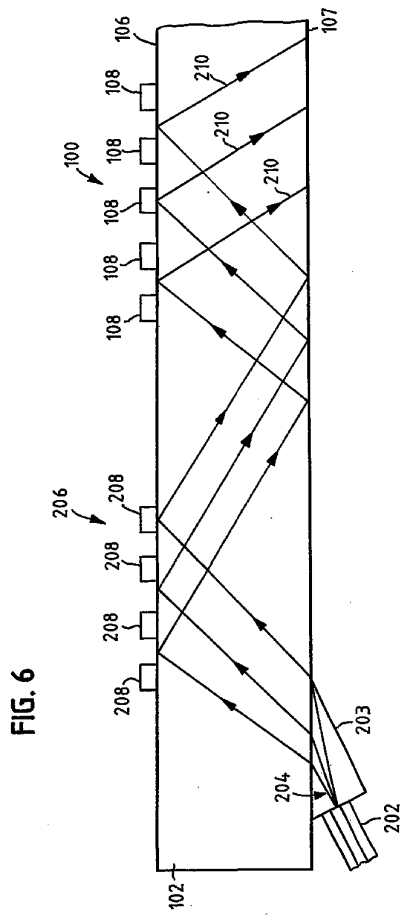


FIG. 6

FIG. 7

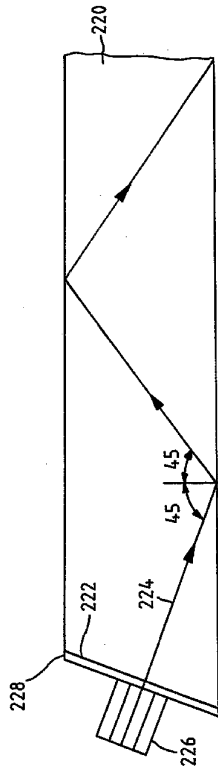
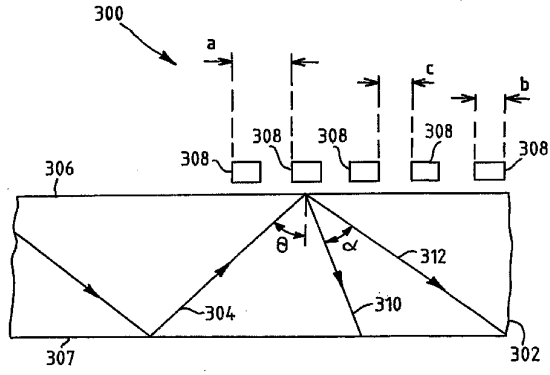


FIG. 8



【 国際調査報告 】

| INTERNATIONAL SEARCH REPORT | | national Application No PCT/US 02/13309 |
|--|---|--|
| A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER IPC 7 602B6/12 602B6/43 602B6/34 | | |
| According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC | | |
| B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) IPC 7 602B H04B | | |
| Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched | | |
| Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used) WPI Data, PAJ, EPO-Internal, INSPEC, IBM-TDB, COMPENDEX | | |
| C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT | | |
| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
| L | US 2002/047129 A1 (WILLCOX CHARLES R ET AL) 25 April 2002 (2002-04-25) cited in the application (Cited with respect of validity of claimed priority) the whole document --- | 1-46 |
| X | EP 0 322 218 A (PHYSICAL OPTICS CORP) 28 June 1989 (1989-06-28) page 3, line 45 - line 62 page 4, line 39 -page 5, line 14 page 5, line 34 - line 59; figures 2,5,8 --- -/-- | 1, 4, 6, 12-17, 19, 25, 29, 36, 43, 44, 46 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of box C. <input checked="" type="checkbox"/> Patent family members are listed in annex. | | |
| * Special categories of cited documents: *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance *E* earlier document but published on or after the international filing date *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed *T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone *Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art. *Z* document member of the same patent family | | |
| Date of the actual completion of the international search 22 August 2002 | | Date of mailing of the international search report 29/08/2002 |
| Name and mailing address of the ISA European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2260 HV Rijswijk Tel (+31-70) 340-2940, Tx. 31 651 epo nl, Fax (+31-70) 340-3016 | | Authorized officer Hylla, W |

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 1992)

| INTERNATIONAL SEARCH REPORT | | national Application No PCT/US 02/13309 |
|--|--|--|
| C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT | | |
| Category * | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
| X | EP 0 609 812 A (MATSUSHITA ELECTRIC IND CO LTD) 10 August 1994 (1994-08-10) page 4, line 43 -page 5, line 6; claims 1,5; figures 2,3,6-8 --- | 1,4-6, 12,13, 19,29, 36,43 |
| X | PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 011, no. 378 (P-645), 10 December 1987 (1987-12-10) & JP 62 146443 A (FUJITSU LTD), 30 June 1987 (1987-06-30) abstract; figure | 1,12,13, 16,17, 29,43,44 |
| A | --- | 36,39 |
| X | US 5 315 676 A (SUNAGAWA HIROSHI) 24 May 1994 (1994-05-24) | 1,3-6,9, 12-14, 16,19,29 36 |
| A | column 9, line 11 - line 50; claims 1-4; figures 1A,2,5 --- | |
| A | EP 0 467 303 A (MATSUSHITA ELECTRIC IND CO LTD) 22 January 1992 (1992-01-22) page 5, line 41 - line 58 page 6, line 16 - line 25; figures 10-14; example 8 ----- | 1,2,4, 12,16, 19,29, 36,43 |

Form PCT/ISA/210 (continuation of second sheet) (July 1992)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/US 02/13309

| Patent document cited in search report | Publication date | Patent family member(s) | Publication date |
|--|------------------|-------------------------|------------------|
| US 2002047129 A1 | 25-04-2002 | US 2002048423 A1 | 25-04-2002 |
| EP 0322218 A | 28-06-1989 | US 4838630 A | 13-06-1989 |
| | | AT 111275 T | 15-09-1994 |
| | | DE 3851421 D1 | 13-10-1994 |
| | | DE 3851421 T2 | 09-02-1995 |
| | | EP 0322218 A2 | 28-06-1989 |
| | | JP 2001802 A | 08-01-1990 |
| | | JP 2085442 C | 23-08-1996 |
| | | JP 7117618 B | 18-12-1995 |
| EP 0609812 A | 10-08-1994 | DE 69407628 D1 | 12-02-1998 |
| | | DE 69407628 T2 | 27-08-1998 |
| | | EP 0609812 A1 | 10-08-1994 |
| | | JP 6282637 A | 07-10-1994 |
| | | US 5448659 A | 05-09-1995 |
| JP 62146443 A | 30-06-1987 | JP 1900462 C | 27-01-1995 |
| | | JP 6030165 B | 20-04-1994 |
| US 5315676 A | 24-05-1994 | JP 6094939 A | 08-04-1994 |
| EP 0467303 A | 22-01-1992 | DE 69119313 D1 | 13-06-1996 |
| | | DE 69119313 T2 | 09-01-1997 |
| | | EP 0467303 A2 | 22-01-1992 |
| | | JP 4219640 A | 10-08-1992 |
| | | US 5317551 A | 31-05-1994 |

フロントページの続き

(81)指定国 AP(GH,GM,KE,LS,MW,MZ,SD,SL,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,MD,RU,TJ,TM),EP(AT, BE,CH,CY,DE,DK,ES,FI,FR,GB,GR,IE,IT,LU,MC,NL,PT,SE,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW,ML,MR,NE,SN, TD,TG),AE,AG,AL,AM,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BR,BY,BZ,CA,CH,CN,CO,CR,CU,CZ,DE,DK,DM,DZ,EC,EE,ES,FI,GB,GD,GE, GH,GM,HR,HU,ID,IL,IN,IS,JP,KE,KG,KP,KR,KZ,LC,LK,LR,LS,LT,LU,LV,MA,MD,MG,MK,MN,MW,MX,MZ,NO,NZ,OM,PH,PL,PT,RO,RU,SD,SE,SG,SI,SK,SL,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,UZ,VN,YU,ZA,ZM,ZW

(74)代理人 100125645

弁理士 是枝 洋介

(72)発明者 フリック, ロジャー エル.

アメリカ合衆国 5 6 5 4 2 ミネソタ ハッケンサック エヌ ダブリュ ノース ウィド
レイク ロード 9 9 3

(72)発明者 ウィルコックス, チャールズ アール.

アメリカ合衆国 5 5 3 4 6 ミネソタ エデン プレーリー ベイウッド レーン 1 6 1 2 8

Fターム(参考) 2H049 AA07 AA13 AA33 AA37 AA41 AA44 AA59 AA62 AA64