

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2006-243500

(P2006-243500A)

(43) 公開日 平成18年9月14日(2006.9.14)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
<b>G02B 6/26 (2006.01)</b>	G02B 6/26	2H048
<b>G02B 5/28 (2006.01)</b>	G02B 5/28	2H137
<b>H04B 10/02 (2006.01)</b>	H04B 9/00 M	5K102
<b>H04B 10/18 (2006.01)</b>	H04B 9/00 E	
<b>H04J 14/00 (2006.01)</b>		

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 15 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2005-60805 (P2005-60805)  
 (22) 出願日 平成17年3月4日(2005.3.4)

(71) 出願人 000005223  
 富士通株式会社  
 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番  
 1号  
 (74) 代理人 100078330  
 弁理士 笹島 富二雄  
 (72) 発明者 山内 康寛  
 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番  
 1号 富士通株式会社内  
 (72) 発明者 園田 裕彦  
 神奈川県横浜市港北区新横浜三丁目9番1  
 8号 富士通ネットワークテクノロジーズ  
 株式会社内

最終頁に続く

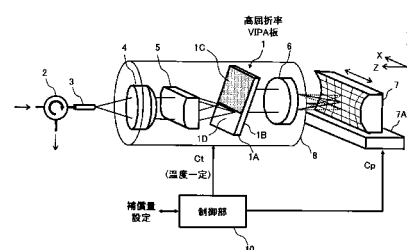
(54) 【発明の名称】 波長分散補償器

## (57) 【要約】

【課題】VIPAを利用した波長分散補償器について、透過帯域幅の減少を抑えてより大きな波長分散を補償可能にする。

【解決手段】本波長分散補償器は、光学ガラスよりも高い屈折率を有するシリコン等の材料を用いて形成され、入射光を波長に応じて異なる方向に出射することが可能な高屈折率VIPA板1と、高屈折率VIPA板1から出射される各波長の光を予め設定した位置で反射してVIPA板1に戻る3次元ミラー7と、波長分散の補償量に対応させて3次元ミラー7の位置を制御すると共に、高屈折率VIPA板1の温度を一定に制御する制御部10と、を備えて構成される。

【選択図】図1



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

相対する平行な 2 つの反射面を有する素子を含み、1 次元方向に集光した光が前記素子の各反射面の間に入射され、該入射光が各反射面で多重反射されながらその一部が一方の反射面を透過して出射され、該出射光が干渉することにより波長に応じて進行方向の異なる光束が形成される分波機能を備えた光部品と、

該光部品の一方の反射面から異なる方向に出射される各波長の光束を反射して前記光部品に戻す反射器と、

波長分散の補償量に対応させて前記反射器の位置を制御する反射位置制御部と、を備えて構成された波長分散補償器において、

前記光部品は、光学ガラスよりも高い屈折率を有する材料を用いて前記素子が形成されていることを特徴とする波長分散補償器。

10

## 【請求項 2】

前記素子に用いられる材料は、1550nm の光に対する屈折率が 2 よりも高いことを特徴とする請求項 1 に記載の波長分散補償器。

## 【請求項 3】

請求項 1 に記載の波長分散補償器であって、前記光部品の前記素子を形成する前記材料は、光学ガラスよりも低い熱膨張係数を有することを特徴とする波長分散補償器。

## 【請求項 4】

請求項 3 に記載の波長分散補償器であって、前記光部品の前記素子を形成する前記材料は、光学ガラスよりも高い屈折率の温度係数を有することを特徴とする波長分散補償器。

20

## 【請求項 5】

分散補償量にかかわらず前記光部品の温度を一定に制御することを特徴とする請求項 1 に記載の波長分散補償器。

## 【請求項 6】

前記反射器は、反射面の曲率が、光学ガラスを用いて前記素子を形成したときの反射面の曲率よりも小さいことを特徴とする請求項 1 に記載の波長分散補償器。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

30

本発明は、光通信の分野において、光ファイバ伝送路を伝搬した光信号に蓄積する波長分散を補償するための波長分散補償器に関し、特に、入力光を波長に応じて分波する機能を備えた光部品を利用して可変の波長分散を発生する波長分散補償器に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

従来の波長分散補償器の 1 つとして、例えば、波長多重 (Wavelength Division Multiplexing: WDM) 光を波長に応じて空間的に区別可能な複数の光束に分波する、いわゆるバーチャリ・イメージド・フェイズド・アレイ (Virtually Imaged Phased Array: VIPA) を利用して構成したものが提案されている (例えば、下記の特許文献 1, 2 参照)。

40

## 【0003】

図 8 は、従来の VIPA 型波長分散補償器の構成例を示す斜視図である。また、図 9 は、図 8 の構成例の上面図である。

各図に示すように従来の VIPA 型波長分散補償器では、例えば、光サーキュレータ 120 を介して光ファイバ 130 の一端から出射された光が、コリメートレンズ 140 で平行光に変換された後に、ライン焦点レンズ 150 によって 1 つの線分の上に集光され、VIPA 板 110 の照射窓 116 を通って対向する平行平面の間に入射される。この VIPA 板 110 への入射光は、例えば、VIPA 板 110 の一方の平面に形成された 100% より低い反射率を有する反射多層膜 112 と、他方の平面に形成された略 100% の反射率を有する反射多層膜 114 との間で多重反射を繰り返す。その際、反射多層膜 112 の

50

面で反射するごとに数%の光が当該反射面を透過してVIPA板110の外に出射される。

#### 【0004】

VIPA板110を透過した光は、相互に干渉し、波長に応じて進行方向が異なる複数の光束を作る。その結果、各光束を収束レンズ160で1点に集光すると、各々の集光位置は波長の変化に伴って直線上を移動するようになる。この直線上に例えば3次元ミラー170を配置することにより、VIPA板110から出射され収束レンズ160で集光された光は、各々の波長に応じて3次元ミラー170上の異なる位置で反射されてVIPA板110に戻される。3次元ミラー170で反射された光は波長によって異なる方向に進行し、VIPA板110に戻される際に光路がずれる。この光路ずれ量を波長によって変えることにより異なる波長成分は異なる距離を伝搬することになって、入力光の波長分散補償が行われる。

10

#### 【0005】

上記のようにVIPA板110で多重反射される光の振る舞いは、例えば図10に示すようなモデルを考えると、階段状の回折格子として周知のエシュロン格子(Echelon grating)と同様の振る舞いをする。このため、VIPA板110は仮想的な回折格子として考えることができる。VIPA板110における干渉条件を考えると、図10の右側に示すように、出射光はその光軸を基準にして上側が短波長、下側が長波長の条件で干渉するので、各波長の光信号の短波長成分が光軸の上側に出射され、長波長成分が光軸の下側に出射されることになる。このような従来のVIPA型波長分散補償器は、波長分散を広い範囲で補償することができ、また、周期的に発生する光の透過帯域をVIPA板110の温度を調整して波長軸方向にシフトさせることにより、補償する光信号の波長(透過波長)を変化させることが可能であるなどの長所がある。

20

#### 【0006】

さらに、上記のVIPA型波長分散補償器については、例えば、2次元的に変化する透過損失特性を有する空間フィルタを利用し、または、3次元ミラー170の反射面の反射率を2次元的に変化させることによって、光の透過帯域を平坦化する技術も知られている(例えば、特許文献3参照)。また、3次元ミラー170の角度を波長に応じて変えて反射効率を変化させることで透過帯域の平坦化を図る技術も提案されている(例えば、特許文献4参照)。

30

【特許文献1】特表2000-511655号公報

【特許文献2】特表2002-514323号公報

【特許文献3】特開2003-207618号公報

【特許文献4】特開2003-294999号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

#### 【0007】

ところで、上記のような従来のVIPA型波長分散補償器については、より大きな波長分散を補償できることが望まれる場合がある。しかし、VIPA型波長分散補償器は、原理的に、波長分散の補償量(絶対値)を増加させていくと、周期的に発生する各透過帯域の幅が減少して透過光の損失が増大するという特性があるため、補償可能な波長分散量が制約されてしまうという問題がある。

40

#### 【0008】

ここで、VIPA型波長分散補償器において波長分散補償量を増加させると透過帯域幅が減少する理由について簡単に説明する。例えば図11に示すように、波長 $\lambda_c$ を中心とする光信号がVIPA板110の照射窓116に入射されると、平行平面間で多重反射した光の中心波長 $\lambda_c$ 成分は、多重反射の回数の増加とともに減衰していく強度分布I1に従ってVIPA板110から出射される。そして、収束レンズ160を介して3次元ミラー170で反射され、VIPA板110に戻されてきた中心波長 $\lambda_c$ の光は、出射時の強度分布I1とは対称な強度分布I2でVIPA板110に再び入射され多重反射した後に

50

照射窓 116 から出射される。このとき照射窓 116 から出射される中心波長  $\lambda_c$  の光（透過光）の強度は、図の斜線で示した各強度分布  $I_1$ 、 $I_2$  の重なり部分の面積に相当するものとして概念的に表すことができる。

#### 【0009】

このような中心波長  $\lambda_c$  の光に対して、光信号に含まれる短波長  $\lambda_s$  側の光は、負分散補償時では、図 12 に示すように、3 次元ミラー 170 での反射位置に応じて、VIPA 板 110 に戻される光の強度分布  $I_2'$  が図で上方にシフトするため、強度分布  $I_1$ 、 $I_2'$  の重なり部分の面積が減少する。このため、短波長  $\lambda_s$  側の光の透過率が減少、すなわち損失が増加するようになる。

#### 【0010】

また、光信号に含まれる長波長  $\lambda_L$  側の光は、負分散補償時では、図 13 に示すように、VIPA 板 110 に戻される光の強度分布  $I_2''$  が図で下方にシフトするため、短波長  $\lambda_s$  側に比べて変化量は少ないが、透過率が減少するようになる。そして、波長分散の補償量（絶対値）が増加すると、上記のような短波長  $\lambda_s$  側の上方へのシフト量および長波長  $\lambda_L$  側の下方へのシフト量がそれぞれ増大するため、中心波長  $\lambda_c$  に対する短波長  $\lambda_s$  側および長波長  $\lambda_L$  側の透過率が減少（損失が増加）する。したがって、例えば図 14 の上段に示すように、波長分散補償量（絶対値）の増加と共に透過帯域幅が減少するようになる。なお、図 14 の下段は、波長に対する群遅延時間の関係を波長分散の補償量に対応させて例示したものである。

#### 【0011】

VIPA 型波長分散補償器の従来構成において、波長分散の補償量を増加させるためには、例えば、VIPA 板 110 の平行平面間の距離を長くする、入射光に対する VIPA 板 110 の傾き角を小さくする、または、3 次元ミラー 170 の反射面の曲率を大きくするなどの方法が考えられる。

しかし、VIPA 板 110 の平行平面間の距離は、一定の波長（周波数）間隔で繰り返される透過帯域の周期（Free Spectral Range: FSR）を決めるため、補償する WDM 光に含まれる光信号の波長間隔（チャンネル間隔）に対応した値に設定する必要がある。また、VIPA 板 110 の傾き角は、照射窓 116 から入射した光が対向面 112 で反射された後、照射窓 116 を通って VIPA 板 110 の外に出てしまわないような値に設定しなければならず、ライン焦点レンズ 150 によって集光された入射光のビーム径に応じて決まる一定の角度以上の傾きを確保する必要がある。また、曲率の大きな 3 次元ミラー 170 は、製造が難しく、かつ、前述したような透過帯域幅の減少を顕著にする。

#### 【0012】

したがって、より大きな波長分散を補償可能な VIPA 型波長分散補償器を実現するためには、上記のような VIPA 型の構成に特有な様々な制約条件を十分に考慮した設計を行うことが重要になる。

また、上記のような波長分散補償量の増大に関する課題とは別に、従来の VIPA 型波長分散補償器については、VIPA 板 110 の温度制御に関連した次のような問題点もある。

#### 【0013】

従来の VIPA 型波長分散補償器は、実用上、補償する WDM 光に含まれる各チャンネルの光信号の波長帯域が、周期的に発生する各透過帯域内に含まれるようにするために、VIPA 板 110 の温度を制御して光路長を変化させることによって、周期的な透過帯域の最適化を図っている。通常、例えば図 15 に示すように、周期的な透過帯域のうちのある 1 チャンネルに対応した透過帯域について、その 3 dB 中心波長が光信号の中心波長と一致するように、VIPA 板 110 の温度制御が行われる。なお、3 dB 中心波長は、透過率が最大値から 3 dB 減少する範囲を透過帯域としたときの中心波長である。

#### 【0014】

前述の図 14 にも示したように従来の VIPA 型波長分散補償器では、波長分散補償量を変化させたときの透過帯域のスペクトル形状の変化が大きいため、波長分散補償量の設

10

20

30

40

50

定変更の度にVIPA板110の温度を制御して透過帯域の調整を行う必要があった。

波長分散補償量の設定変更自体は、3次元ミラー170の移動により光の反射位置を変えればよいため比較的短時間で完了する。一方、VIPA板110の温度制御は、VIPA板110に用いられる光学ガラスの屈折率の温度係数が小さいため(例えば、典型的な光学ガラスであるBK7の屈折率の温度係数は $2.2 \times 10^{-6}$  [1/°C])、波長分散補償量の設定変更に伴う波長の調整に長時間を要してしまうという欠点がある。

#### 【0015】

本発明は上記のような問題点に着目してなされたもので、VIPAを利用した波長分散補償器について、透過帯域幅の減少を抑えてより大きな波長分散を補償可能にすると共に、透過帯域の最適化のためのVIPAの温度制御を容易に実現できるようにすることを目的とする。

10

#### 【課題を解決するための手段】

#### 【0016】

上記の目的を達成するため、本発明の波長分散補償器は、相対する平行な2つの反射面を有する素子を含み、1次元方向に集光した光が前記素子の各反射面の間に入射され、該入射光が各反射面で多重反射されながらその一部が一方の反射面を透過して出射され、該出射光が干渉することにより波長に応じて進行方向の異なる光束が形成される分波機能を備えた光部品と、該光部品の一方の反射面から異なる方向に出射される各波長の光束を反射して前記光部品に戻す反射器と、波長分散の補償量に対応させて前記反射器の位置を制御する反射位置制御部と、を備えて構成され、さらに、前記光部品は、光学ガラスよりも

20

#### 【0017】

上記のような波長分散補償器では、入力光を波長に応じて分波する機能を備えた光部品、すなわち、前述したVIPAを構成する素子の材料として、光学ガラスと比べて高屈折率のものを用いることにより、素子の相対する平行な反射面間で多重反射される光の単位長さあたりの反射回数が増えるため、光部品の内部での実効的な光路長が長くなる。

#### 【発明の効果】

#### 【0018】

上記のような本発明の波長分散補償器によれば、透過帯域幅の減少を抑えながら絶対値の大きな波長分散を補償することが可能になる。

30

また、波長分散補償量を変更したときの透過帯域の変化が低減されるため、波長分散量を変化させたときの光部品の温度制御を容易に行うことができる。

#### 【発明を実施するための最良の形態】

#### 【0019】

以下、本発明の波長分散補償器を実施するための最良の形態について添付図面を参照しながら説明する。なお、全図を通して同一の符号は同一または相当部分を示すものとする。

図1は、本発明の波長分散補償器の一実施形態を示す構成図である。

図1において、本実施形態の波長分散補償器は、例えば、相対する平行な2つの反射面を有する素子としての高屈折率VIPA板1と、その高屈折率VIPA板1の照射窓1Dに対して一線分上に集光する光信号を入射可能にする、光サーキュレータ2、光ファイバ3、コリメートレンズ4およびライン焦点レンズ5からなる光学系と、高屈折率VIPA板1で多重反射されて一方の平行平面から出射される光束を1点に集光する収束レンズ6と、その収束レンズ6で集光された光を所要の位置で反射し、収束レンズ6を介して高屈折率VIPA板1に戻すための反射器としての3次元ミラー7と、高屈折率VIPA板1を含む所要の光部品が内部に収納されるケース8と、3次元ミラー7の位置および高屈折率VIPA板1の温度を制御する制御部10と、を備えて構成される。

40

#### 【0020】

高屈折率VIPA板1は、対向する平行平面を備えた基板1Aと、その基板1Aの一方の平行平面に形成された反射多層膜1Bと、他方の平行平面に形成された反射多層膜1C

50

および照射窓 1 D と、を有する。この高屈折率 V I P A 板 1 は、照射窓 1 D に入射される光の光軸が垂直入射となる角度に対して所要の角度だけ傾けられている。

基板 1 A には、次に示す各条件を満たす材料が使用される。

- ・補償する光信号の波長帯域（使用波長帯域）内で透明である（吸収が小さい）。
- ・等方性材料で複屈折が発生しない。
- ・研磨等により高い平面度を有する平行平板に加工可能である（加工性が良い）。
- ・光学的均一性が高い（材料内部の屈折率ばらつきが小さい）。
- ・研磨面に成膜可能である。
- ・耐熱性および耐湿性が高い。
- ・光学ガラスよりも高屈折率である。

10

上記の各条件を満たす材料として、ここでは例えばシリコン（S i）を使用する。シリコンは、光ファイバ通信に使用される一般的な波長帯域の光信号に対して透明であり、その屈折率は例えば 1 5 5 0 n m の光に対して 3 . 2 である。従来の V I P A 板に用いられてきた光学ガラスには多様な組成のものがあるが、1 5 5 0 n m 付近の光に対する屈折率が 2 を超えるような材料は知られていない。例えば、典型的な光学ガラスである B K 7（硼珪酸ガラス）の 1 5 5 0 n m の光に対する屈折率は 1 . 5 であり、このような光学ガラスの屈折率に対してシリコンの屈折率は十分に高い。また、シリコンは、光学ガラスと比べて線膨張係数が小さく（S i :  $2.6 \times 10^{-6}$  [ 1 / ]、B K 7 :  $7.2 \times 10^{-6}$  [ 1 / ]）、温度変化に対する形状変化が少ない安定な材料である。

【 0 0 2 1 】

20

なお、ここでは基板 1 A の材料としてシリコンを用いる一例を示したが、本発明に適用可能な基板材料はシリコンに限定されるものではなく、前述したような各条件を満たす任意の材料を使用することが可能である。シリコン以外の基板材料の 1 つとして、例えばセレン化亜鉛（Z n S e）なども好適である。セレン化亜鉛の 1 5 5 0 n m の屈折率は 2 . 5 である。

【 0 0 2 2 】

反射多層膜 1 B は、照射窓 1 D から入射される光信号に対して 1 0 0 % より低い（好ましくは 9 5 ~ 9 8 % 程度）反射率を有し、基板 1 A の一方の平面全体に形成されている。また、反射多層膜 1 C は、照射窓 1 D から入射される光信号に対して略 1 0 0 % の反射率を有し、基板 1 A の他方の平面の一部分に形成されている。基板 1 A の他方の平面の反射多層膜 1 C が形成されていない部分は、光信号に対して透明な照射窓 1 D となっている。

30

【 0 0 2 3 】

光サーキュレータ 2 は、例えば、3 つのポートを有し、第 1 ポートから第 2 ポートに向かう方向、第 2 ポートから第 3 ポートに向かう方向、第 3 ポートから第 1 ポートに向かう方向に光を伝達する一般的な光部品である。ここでは本波長分散補償器に入力される光信号が、光サーキュレータ 2 の第 1 ポートに与えられ、第 2 ポートを介して光ファイバ 3 の一端に送られると共に、光ファイバ 3 の他端に戻されてきた光信号が、第 2 ポートを介して第 3 ポートから本波長分散補償器の出力光として出力される。

【 0 0 2 4 】

光ファイバ 3 は、例えばシングルモードファイバ等の一端を光サーキュレータ 2 の第 2 ポートに接続し、他端をコリメートレンズ 4 の近傍に配置したものである。なお、光ファイバ 3 の種類は上記に限られるものではない。

40

コリメートレンズ 4 は、光ファイバ 3 の他端から出射される光ビームを平行光に変換してライン焦点レンズ 5 に与える一般的なレンズである。

【 0 0 2 5 】

ライン焦点レンズ 5 は、コリメートレンズ 4 からの平行光を 1 つの線分の上に集光させるものであり、具体的にはシリンドリカルレンズや屈折率分布レンズなどを用いることが可能である。

収束レンズ 6 は、高屈折率 V I P A 板 1 で多重反射して反射多層膜 1 B 側から出射され、相互に干渉して進行方向が波長に応じて異なる複数の光束をそれぞれ 1 点に集光する一

50

般的なレンズである。

【0026】

3次元ミラー7は、例えば、表面形状が非球面の3次元構造となっており、その非球面ミラー上には設計基準となる中心軸が存在する。この3次元ミラー7は、移動ステージ7A上に載置されており、移動ステージ7Aの走行軸と中心軸の各方向（図1におけるX軸方向）とが平行となるように配置されている。移動ステージ7Aは、制御部10から出力される制御信号Cpに従って図示を省略したパルスモータ等を駆動することによりX軸方向に走行する。なお、ここでは高屈折率VIPA板1に照射される光信号の光軸方向をZ軸とし、高屈折率VIPA板1から出射される光の角度分散方向に対して垂直方向をX軸、平行方向をY軸としている。

10

【0027】

ケース8は、例えば、図示を省略したフィルムヒータを側面に設けた円筒形の容器等であって、ここでは、コリメートレンズ4、ライン焦点レンズ5、高屈折率VIPA板1および収束レンズ6が上記容器内部の所定の位置に収容されている。フィルムヒータは、その動作が制御部10からの制御信号Ctに従って制御される。

制御部10は、外部等から入力される波長分散補償量の設定値に従って、3次元ミラー7を所定の位置に移動させるための制御信号Cpを移動ステージ7Aに出力すると共に、ここでは波長分散補償量の設定値に関係なく、高屈折率VIPA板1の温度を一定にするための制御信号Ctをフィルムヒータに出力する。なお、波長分散補償量の設定値に対応した3次元ミラー7の位置に関する情報は、図示しないメモリ等に予め記憶されているものとする。

20

【0028】

次に、本実施形態の波長分散補償器の動作について説明する。

上記のような構成の波長分散補償器では、光ファイバ伝送路等を伝搬して波長分散の発生したWDM光が光サーキュレータ2の第1ポートに入力され、そのWDM光が光サーキュレータ2の第2ポートを介して光ファイバ3に送られる。光ファイバ3から出射されたWDM光は、コリメートレンズ4で平行光に変換された後、ライン焦点レンズ5によって一線分上に集光されて、制御部10により一定の温度に制御された高屈折率VIPA板1の対向する平行平面の間に入射される。

【0029】

高屈折率VIPA板1への入射光は、基板1Aの平行平面に形成された各反射多層膜1B、1Cの間で多重反射を繰り返し、反射多層膜1Bの面で反射するごとに数%の光が当該反射面を透過してVIPA板1の外に出射される。このとき、高屈折率VIPA板1内を伝搬する光の経路は、基板1Aの材料として従来の光学ガラスよりも屈折率の高いシリコンを用いたことにより、例えば図2の左側に示すように、光学ガラスを用いたときの経路（図2の右側）と比較して、単位長さあたりの反射回数が増加するようになり、高屈折率VIPA板1の内部での実効的な光路長が長くなる。なお、この実効的な光路長が長くなることの詳細については後述する。

30

【0030】

高屈折率VIPA板1の反射多層膜1B側から出射された光は、相互に干渉し、波長に応じて進行方向の異なる複数の光束がそれぞれ形成される（図10参照）。各波長の光束は、収束レンズ6により集光されて、3次元ミラー7の反射面上のY軸方向に異なる位置でそれぞれ反射される。このときの3次元ミラー7のX軸方向の位置は、制御部10によって波長分散補償量に対応した所定の位置に制御されている。そして、3次元ミラー7で反射された光は、反射前に伝搬してきた経路を反対の方向に進み、収束レンズ6、高屈折率VIPA板1、ライン焦点レンズ5、コリメートレンズ4および光ファイバ3を順に通過して、光サーキュレータ2の第3ポートから出力される。これにより、本波長分散補償器に入力されるWDM光に対して、3次元ミラー7の位置に応じて設定される所要量の波長分散補償を施したWDM光が波長分散補償器から出力されるようになる。

40

【0031】

50

本波長分散補償器における波長分散補償量は、上記図 2 に示したように、高屈折率 V I P A 板 1 の内部での実効的な光路長が長くなるため、V I P A 板に光学ガラスを用いた従来の構成と比べてより大きな値を設定することができる。また、高屈折率 V I P A 板 1 の内部での実効的な光路長が長くなったことにより、大きな値の波長分散補償量を設定しても透過帯域幅の減少を抑えることが可能になる。

#### 【 0 0 3 2 】

ここで、高屈折率 V I P A 板 1 の使用によって高波長分散補償時でも透過帯域幅の減少を抑えることができる理由について詳しく説明する。

上述したように、V I P A の透過波長特性は、所要の帯域幅をもつ透過帯域が一定の波長（周波数）間隔で繰り返される周期性を有している。この繰返しの周期は「チャンネル間隔」または「F S R（Free Spectral Range）」等とも呼ばれる。公知の V I P A 型波長分散補償器に設定される F S R は、典型的な値として 1 0 0 G H z および 2 0 0 G H z が挙げられ、また、上記以外の値も実用上存在する。V I P A の F S R は、V I P A 板に用いられる材料の屈折率、V I P A 板の厚さ、および、V I P A 板内部での反射角度によって決まる。したがって、V I P A 板に使用する材料、補償する光信号のチャンネル間隔に対応した F S R の設定値、および、V I P A 板内部の反射角度の設定が決まると、次の（ 1 ）式の関係に従って、V I P A 板の厚さが決定される。

#### 【 0 0 3 3 】

$$t = c / ( 2 \cdot n \cdot F S R \cdot \cos \theta_g ) \quad \dots ( 1 )$$

ただし、 $t$  は V I P A 板の厚さ、 $c$  は光速、 $n$  は屈折率、 $\theta_g$  は V I P A 板内部の反射角度である。

ここで、F S R および V I P A 板内部の反射角度  $\theta_g$  を一定とし、V I P A 板に使用する材料として、高屈折率  $n_H$  を有する材料および低屈折率  $n_L$ （ $n_H > n_L$ ）を有する材料の 2 種類を考えると、高屈折率材料を用いた V I P A 板の厚さは、低屈折率材料を用いた V I P A 板の厚さの  $n_L / n_H$ （ $< 1$ ）倍となり、薄くなる。したがって、高屈折率材料を用いた V I P A 板の内部で多重反射される光は、前述の図 2 に示したような経路を伝搬するようになる。図 2 より明らかなように、V I P A 板の長さ方向（図の縦方向）の単位長さあたりの反射回数は、高屈折率材料を使用した場合のほうが多くなる。一方、F S R が一定としているので、V I P A 板内部での一往復あたりの実効的な光路長は屈折率に関係なく等しくなっている。

#### 【 0 0 3 4 】

したがって、高屈折率材料を使用した場合は、短い V I P A 板の長さで、長い実効的な光路長を得ることができる、つまり、大きな波長分散を発生させることができるようになる。言い換えると、V I P A 板の平行平面間を一往復して同じ面に光が戻ってきたときに、縦方向（長さ方向）への光路のシフトを小さくできるために、縦方向の狭い領域で長い実効光路長をとることができ、大きな波長分散が得られるようになる。

#### 【 0 0 3 5 】

ここで、V I P A 型波長分散補償器の透過帯域幅を広くするためには、単一のチャンネル内に含まれる各波長の光成分が 3 次元ミラーで反射されて高屈折率 V I P A 板 1 に戻ってきた際に、高屈折率 V I P A 板 1 に再入射する位置が出射時の位置と比べてあまりずれないようにすることが必要である。上述の図 1 1 ~ 図 1 3 に示したように、光学ガラスなどの低屈折率材料を使用した場合、大きな波長分散を発生させようとする、波長間の光路差を大きくするためにチャンネル内の短波長側の光は V I P A 板の上部に戻し、長波長側の光は V I P A 板の下部に戻す必要があり、単一チャンネルの両端での損失が大きくなってしまう。すなわち、透過帯域が狭くなってしまう。

#### 【 0 0 3 6 】

一方、高屈折率材料を使用した場合には、V I P A 板 1 の縦方向の狭い領域内に非常に長い光路が含まれているので、それほど大きく戻り位置を変えなくても大きな光路差をつけることが可能であり、透過帯域幅の減少を抑えることができる。このような V I P A 板に使用する材料の屈折率の違いによる差は、波長分散補償量が増加するほど顕著になる。



なお、VIPA型波長分散補償器の透過特性、特に透過帯域幅は、VIPA板の形状（例えば、面精度等）に対して敏感であり、もしVIPA板に反りがある場合、波長分散補償に実効的に機能する部分がVIPA板の縦方向の一部だけになってしまう。このため、従来と同様にVIPA板に低屈折率材料を使用し、VIPA板の縦方向の長さを伸ばすことで波長分散補償量を増大させることは困難である。このような観点からもVIPA板への高屈折率材料の適用は、透過帯域幅の減少を抑えつつ波長分散補償量を増加させるのに有効である。

#### 【0037】

図3は、本波長分散補償器のある1つの透過帯域について、波長分散補償量を例えば0 ps/nm、-1800 ps/nmおよび-6000 ps/nmに設定したときのスペクトル形状を示したものである。このように、高屈折率VIPA板1を適用することによって、波長分散補償量（絶対値）の増加による透過帯域幅の減少を防ぐことができるという効果も得られる。

#### 【0038】

図4は、波長分散補償量に対する1dB帯域幅の関係を、シリコンを用いた高屈折率VIPA板1を適用した場合と、従来の光学ガラスを用いたVIPA板を適用した場合とについて比較した一例である。なお、1dB帯域幅は、透過率が最大値から1dB減少する波長帯域の幅である（図15参照）。図4より、従来のVIPA板では、波長分散量が約-1000 ps/nmから約-2000 ps/nmに減少（絶対値が増加）した段階で1dB帯域幅が0.2nmよりも狭くなってしまうのに対して、高屈折率VIPA板1では、波長分散量が約-5000 ps/nmの前後まで、0.2nmの1dB帯域幅を確保できることがわかる。このように、シリコンを用いた高屈折率VIPA板1を適用することによって、従来よりも大きな波長分散を補償することが可能になる。

#### 【0039】

また、高屈折率VIPA板1を用いた波長分散補償器は、上記のような絶対値の大きな波長分散補償量を設定できるという効果とは別に、従来と同様に比較的小さな値の波長分散を補償する場合に、より広い透過帯域を実現できるという効果も得られる。その理由を以下に詳しく説明する。

上述したようにVIPAは一種の回折格子であるため、入力光を波長に応じて分波するのに必要となる主要な回折次数の光の他に、不要な隣接次数の回折光もVIPA板から出射される場合がある。この不要な次数の回折光は、主要な次数の回折光を乱す原因となる。不要な次数の回折光が多く出射されると、VIPA板に入射された光のうち不要な光として捨てられる割合が大きくなり、光損失が増大する原因となる。

#### 【0040】

VIPA板から不要な次数の回折光が出射されるか否かは、図5の概念図に示すように、VIPA板からの出射光の広がり角 $\theta_d$ の範囲内に、不要な次数の回折方向が含まれているかどうかによる。一方、出射光の広がり角 $\theta_d$ の大きさは、VIPA板に光が入射される際に、VIPA板の出射面上に収束されたビームウェストの大きさ（ビーム半径） $w_0$ によって決まる。具体的に、広がり角 $\theta_d$ は、VIPA板内での光の波長 $\lambda$ とすると、ビーム半径 $w_0$ を用いて次の(2)式により近似的に表すことができる。

#### 【0041】

$$\theta_d = \lambda / (w_0 \cdot \sin \theta_i) \quad \dots (2)$$

図6は、シリコン等の高屈折率材料を用いたVIPA板および一般的な光学ガラスを用いたVIPA板からそれぞれ出射される光の進行方向の波長依存性を計算した結果を示したものである。ここでは、高屈折率VIPA板（ $n_H = 3.2$ ）からの光の出射角度と、光学ガラスを用いたVIPA板（ $n_L = 1.8$ ）からの光の出射角度とを計算し、その結果を横軸に相対波長をとって示してある。なお、図の中央に示した太線が主要な次数の光の出射方向であり、上部に示した細線および下部に示した破線が隣接する不要な次数の光の出射方向である。

#### 【0042】

10

20

30

40

50

図6に示すように、高屈折率材料では、主要な次数の光とそれに隣接する不要な次数の光とが離れているために、ビームの広がり角 $\theta_d$ （図5参照）内に隣接次数光の進行方向が含まれ難い。典型的なVIPA型波長分散補償器のレンズ構成を用いると、広がり角 $\theta_d$ は2°程度となり、この場合、図6の上段に示した高屈折率VIPA板については、 $-0.3 \sim +0.2 \text{ nm}$ の広い波長範囲に亘って隣接次数光が広がり角 $\theta_d$ 内に含まれないことになる。一方、図6の下段に示した光学ガラスを用いたVIPA板については、広がり角 $\theta_d$ 内に隣接次数光が含まれない波長範囲は存在しない。このように、高屈折率VIPA板では、従来の光学ガラスを用いたVIPA板と比べて、隣接次数光による影響が少ない。

#### 【0043】

10

また、上の説明からも分かるように、隣接次数光の進行方向がVIPA板からの出射光の広がり角 $\theta_d$ 内に含まれる現象は、単一チャンネルの波長帯域内の中心波長よりも、帯域の周辺部の波長領域において、より発生し易い。したがって、この現象は、透過帯域幅を減少させる一因となっていることが分かる。ところが、上記のように高屈折率材料を用いたVIPA板では隣接次数光の影響が少ないので、透過帯域幅を広くすることができる。

#### 【0044】

なお、従来の光学ガラスを用いたVIPA板においても、広がり角 $\theta_d$ を小さくすれば隣接次数光の影響を除くことができる。しかし、これを実現するためには、VIPA板に入射される光のビーム半径 $w_0$ を大きくする必要があり、ラインフォーカスレンズの焦点距離を長くすることが必要となる。これは、VIPA型波長分散補償器の小型化とは相反する方向であり、また、光学系を大きくすることは、系の安定性の面からも好ましくない。さらに、上記の図6の計算結果からも分かるように、従来の光学ガラスでは高屈折率材料と比べて主要次数光と隣接次数光の分離角度が小さく、これらを精密に分離することは困難である。上記のような観点から考えても、従来の光学ガラスを用いたVIPA板において広がり角 $\theta_d$ を小さくするよりも、高屈折率材料を用いてVIPA板を構成するのが有効である。

20

#### 【0045】

図7は、高屈折率材料を用いたVIPA板および光学ガラスを用いたVIPA板について、同一の波長分散補償量を設定したときに得られる透過特性を計算した一例である。ここでは、例えば $-3000 \text{ ps/nm}$ の波長分散補償量を各々に設定して単一チャンネルの透過帯域を比較している。図7の計算結果より、高屈折率VIPA板を適用することによって、特に短波長側の透過率の減少（損失の増加）が効果的に抑えられていることが分かる。

30

#### 【0046】

ここで、上記のような広い透過帯域が得られるという効果に関連させて、波長分散補償量の設定値が比較的小さな範囲で本波長分散補償器を使用する場合に得られる他の効果を考えると、3次元ミラー7の反射面の曲率を小さくしても従来と同等の波長分散補償を行うことが可能になる。これにより、3次元ミラー7を容易に製造することができるようになると共に、3次元ミラー7の横方向の傾きに起因する透過帯域の減少を防ぐことが可能になるという効果も得られる。

40

#### 【0047】

また、従来は、分散補償量を変化させるとスペクトル形状が変化するため、分散補償量を変化させるときは、VIPA板の温度を変化させて精度よく制御し、補償する光信号の中心波長と透過帯域の中心波長を一致させていた。

一方、高屈折率VIPA板1を適用した波長分散補償器では、分散補償量を変化させても透過帯域のスペクトル形状の変化が僅かであるため、分散補償量にかかわらずVIPA板の温度を一定に保つ制御によっても、光信号の分散を補償することができる。

#### 【0048】

具体的には、想定される波長分散補償量の設定範囲にもよるが、設定変更により透過帯域がシフトしても単一チャンネルの光信号のスペクトルが透過帯域内に含まれるようになる

50

場合が多くなる。この場合には、分散補償量とは関係なく、VIPA板の温度を一定に制御しておくだけで、所望の光信号の波長分散補償を行うことが可能になる。図1に示した実施形態の構成では上記の場合を想定して、制御部10が高屈折率VIPA板1の温度一定制御を行うものとしている。

【0049】

なお、高屈折率VIPA板1を適用する場合でも、従来と同様にして、波長分散補償量の設定値に対応させて高屈折率VIPA板1の温度を制御し（温度一定制御とは異なる）、透過帯域の調整を行うことも勿論可能である。この場合、例えばシリコンは、光学ガラスと比べて屈折率の温度係数が大きい（ $S_i: 160 \times 10^{-6} [1/^\circ\text{C}]$ 、BK7:  $2.2 \times 10^{-6} [1/^\circ\text{C}]$ ）ため、温度の制御によって屈折率を高速に変化させることができる。したがって、高屈折率VIPA板1の温度の最適化制御に要する時間を従来よりも短縮することが可能である。

10

【0050】

また、高屈折率VIPA板1の温度を一定に制御する場合にも最適値に制御する場合にも共通に得られる他の効果として、高屈折率VIPA板1の基板材料にシリコンを用いることによって、屈折率を高くして実光路長が短くなることで影響が大きくなる、熱膨張の影響を抑えることができるという効果もある。すなわち、VIPA板の基板材料の屈折率を高くすると、基板材料の熱膨張変化による光路長変化が大となり、温度変動に対して透過帯域の周期（FSR）が変動しやすくなるが、前述したようにシリコンは、光学ガラスと比べて線膨張係数が小さい（ $S_i: 2.6 \times 10^{-6} [1/^\circ\text{C}]$ 、BK7:  $7.2 \times 10^{-6} [1/^\circ\text{C}]$ ）ので、温度変化に対する形状変化が少ない。このため、高屈折率VIPA板1の平行平面間の距離が温度によって変化し難くなり、透過帯域の周期（FSR）をより安定にすることが可能である。

20

【0051】

以上、本明細書で開示した主な発明について以下にまとめる。

【0052】

（付記1）相対する平行な2つの反射面を有する素子を含み、1次元方向に集光した光が前記素子の各反射面の間に入射され、該入射光が各反射面で多重反射されながらその一部が一方の反射面を透過して出射され、該出射光が干渉することにより波長に応じて進行方向の異なる光束が形成される分波機能を備えた光部品と、

30

該光部品の一方の反射面から異なる方向に出射される各波長の光束を反射して前記光部品に戻す反射器と、

波長分散の補償量に対応させて前記反射器の位置を制御する反射位置制御部と、を備えて構成された波長分散補償器において、

前記光部品は、光学ガラスよりも高い屈折率を有する材料を用いて前記素子が形成されていることを特徴とする波長分散補償器。

【0053】

（付記2）前記素子に用いられる材料は、 $1550\text{nm}$ の光に対する屈折率が2よりも高いことを特徴とする付記1に記載の波長分散補償器。

【0054】

（付記3）付記1に記載の波長分散補償器であって、前記光部品の前記素子を形成する前記材料は、光学ガラスよりも低い熱膨張係数を有することを特徴とする波長分散補償器。

40

【0055】

（付記4）付記3に記載の波長分散補償器であって、前記光部品の前記素子を形成する前記材料は、光学ガラスよりも高い屈折率の温度係数を有することを特徴とする波長分散補償器。

【0056】

（付記5）付記1に記載の波長分散補償器であって、前記光部品の前記素子を形成する前記材料は、シリコン（Si）であることを特徴とする波長分散補償器。

【0057】

50

(付記 6) 付記 1 に記載の波長分散補償器であって、前記光部品の前記素子を形成する前記材料は、セレン化亜鉛 (ZnSe) であることを特徴とする波長分散補償器。

【0058】

(付記 7) 分散補償量にかかわらず前記光部品の温度を一定に制御することを特徴とする付記 1 に記載の波長分散補償器。

【0059】

(付記 8) 前記反射器は、反射面の曲率が、光学ガラスを用いて前記素子を形成したときの反射面の曲率よりも小さいことを特徴とする付記 1 に記載の波長分散補償器。

【図面の簡単な説明】

【0060】

10

【図 1】本発明の波長分散補償器の一実施形態を示す構成図である。

【図 2】上記実施形態に用いる高屈折率 VIPA 板内を伝搬する光の経路を VIPA 板に光学ガラスを用いた場合と比較した図である。

【図 3】上記実施形態における透過帯域の形状を波長分散補償量に対応させて示した図である。

【図 4】上記実施形態における波長分散補償量に対する透過帯域幅の関係を VIPA 板に光学ガラスを用いた場合と比較した図である。

【図 5】VIPA 板から出射される光の広がり角を説明する概念図である。

【図 6】高屈折率 VIPA 板および光学ガラスを用いた VIPA 板について光の出射角度を計算した結果を示す図である。

20

【図 7】高屈折率 VIPA 板および光学ガラスを用いた VIPA 板について同一の波長分散補償量を設定したときの透過特性を計算した結果を示す図である。

【図 8】従来の VIPA 型波長分散補償器の構成例を示す斜視図である。

【図 9】図 8 の構成例の上面図である。

【図 10】VIPA の動作原理を説明するためのモデルを示す図である。

【図 11】従来の波長分散補償器における中心波長の光についての透過特性を説明するための概念図である。

【図 12】従来の波長分散補償器の負分散補償時における短波長側の光についての透過特性を説明するための概念図である。

【図 13】従来の波長分散補償器の負分散補償時における長波長側の光についての透過特性を説明するための概念図である。

30

【図 14】従来の波長分散補償器における透過帯域の形状および群遅延時間を波長分散補償量に対応させて示した図である。

【図 15】従来の波長分散補償器における波長分散補償量に対応した透過帯域の最適化を説明するための図である。

【符号の説明】

【0061】

1 ... 高屈折率 VIPA 板

1 A ... 基板

1 B , 1 C ... 反射多層膜

40

1 D ... 照射窓

2 ... 光サーキュレータ

3 ... 光ファイバ

4 ... コリメートレンズ

5 ... ライン焦点レンズ

6 ... 収束レンズ

7 ... 3 次元ミラー

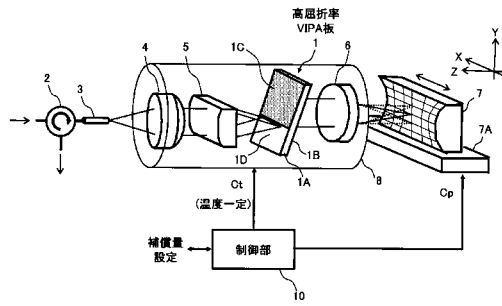
7 A ... 移動ステージ

8 ... ケース

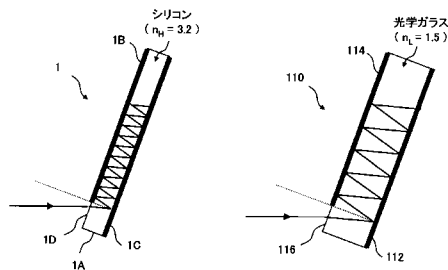
10 ... 制御部

50

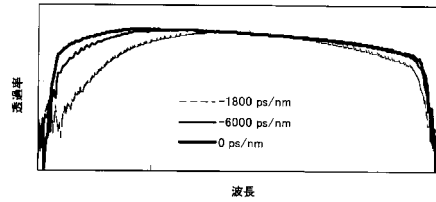
【図 1】



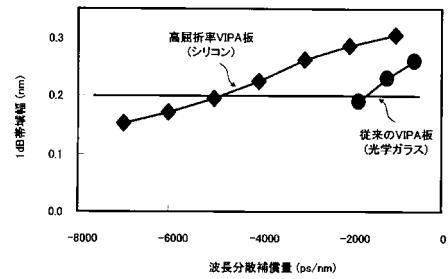
【図 2】



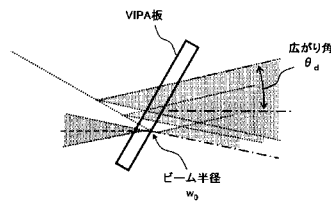
【図 3】



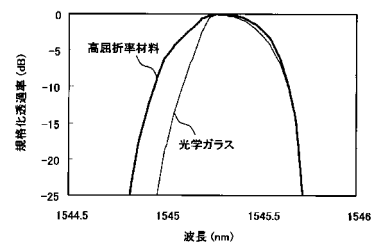
【図 4】



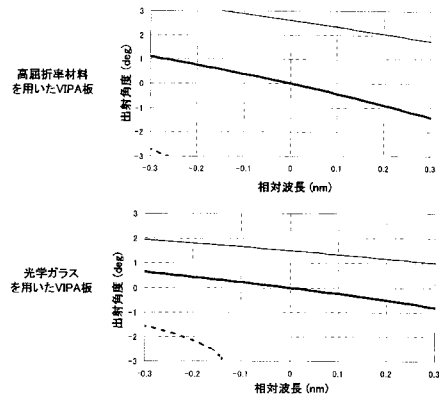
【図 5】



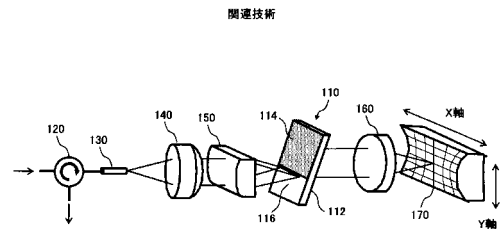
【図 7】



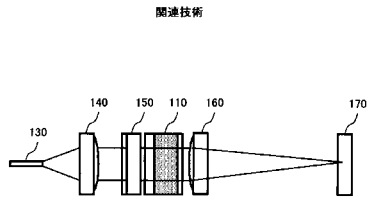
【図 6】



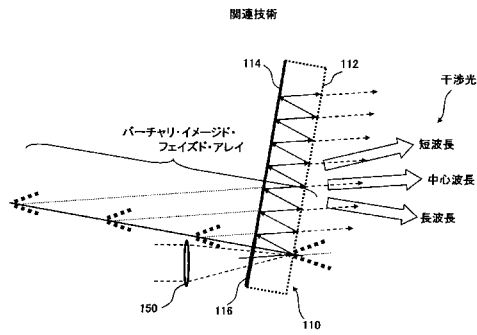
【図 8】



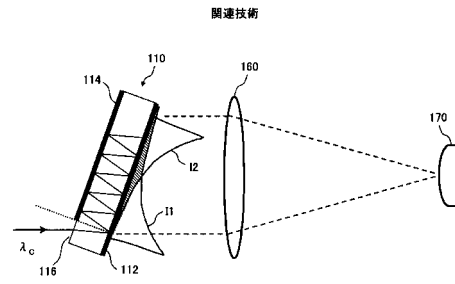
【図 9】



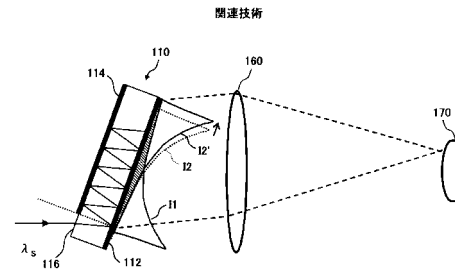
【図 10】



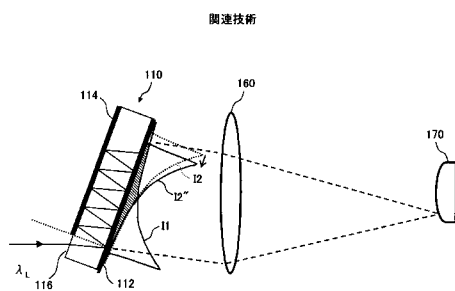
【図 11】



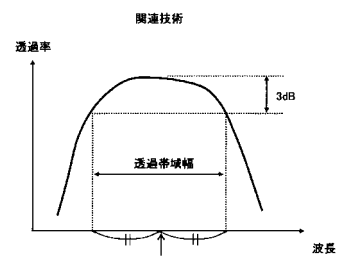
【図 12】



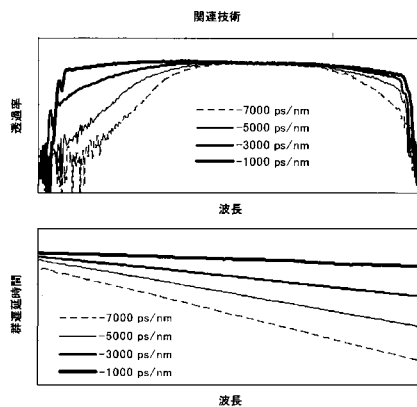
【図 13】



【図 15】



【図 14】



---

フロントページの続き

(51)Int.Cl.

F I

テーマコード(参考)

**H 0 4 J 14/02 (2006.01)**

(72)発明者 古川 博之

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内

(72)発明者 久保田 嘉伸

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内

Fターム(参考) 2H048 GA01 GA13 GA24 GA60 GA62

2H137 AB15 BA12 BC12 BC32 BC52

5K102 AA01 AD01 KA02 KA33 KA42 PC05 PH41 RB02 RD28