

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

**特許第6964464号**  
**(P6964464)**

(45) 発行日 令和3年11月10日(2021.11.10)

(24) 登録日 令和3年10月21日(2021.10.21)

(51) Int. Cl. F I  
**HO1S 3/00 (2006.01)** HO1S 3/00 G

請求項の数 3 (全 10 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2017-156608 (P2017-156608)</p> <p>(22) 出願日 平成29年8月14日 (2017.8.14)</p> <p>(65) 公開番号 特開2019-36619 (P2019-36619A)</p> <p>(43) 公開日 平成31年3月7日 (2019.3.7)</p> <p>審査請求日 令和2年7月2日 (2020.7.2)</p> <p>特許法第30条第2項適用 集会名 東京工芸大学大学院工学研究科電子情報工学専攻博士前期課程 平成28年度修士論文発表会 (神奈川県厚木市飯山1583 東京工芸大学) 開催日 平成29年2月16日 刊行物名 第64回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集 発行所 応用物理学会 発行日 平成29年3月1日</p>	<p>(73) 特許権者 597040902 学校法人東京工芸大学 東京都中野区本町2丁目9番5号</p> <p>(74) 代理人 100109553 弁理士 工藤 一郎</p> <p>(72) 発明者 行谷 時男 神奈川県厚木市飯山1583 学校法人東京工芸大学内</p> <p>(72) 発明者 三河 寛太 神奈川県厚木市飯山1583 学校法人東京工芸大学内</p> <p>審査官 村井 友和</p>
--	--

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 波長可変レーザーの波長較正方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

較正用標準データとして予め知られた所定物質へのレーザー光の吸収強度スペクトルの内、所定の吸収強度を閾値として閾値以上の吸収強度を有する吸収ピークの周波数分布と、較正対象である波長可変レーザーの同物質へのレーザー光の吸収強度スペクトルの吸収強度が強い順に複数選択された吸収ピークの周波数分布と、を比較して、較正対象の各吸収強度に対応する正しい周波数を決定する波長可変レーザーの波長較正方法であって、

前記閾値は、較正用標準データとして予め知られた前記所定物質への前記レーザー光の吸収スペクトルの内、吸収強度が最大のピークに対する割合で定める波長可変レーザーの波長較正方法。

【請求項2】

前記較正対象である波長可変レーザーの同物質へのレーザー光への吸収ピークの選択は、前記較正用標準データに対して適用された閾値と無関係に設定される閾値以上の吸収強度を有するものを選択する請求項1に記載の波長可変レーザーの波長較正方法。

【請求項3】

前記比較は、較正対象の前記選択された吸収強度を有する吸収ピーク周波数間隔と合致する周波数間隔が較正用標準データの吸収ピークの周波数分布に存在するかを探索する処理である請求項1又は請求項2に記載の波長可変レーザーの波長較正方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

## 【0001】

本発明は、波長可変レーザの絶対波長を較正する方法に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

波長可変レーザ光を照射する波長可変レーザの絶対波長を較正する場合、光周波数標準スペクトルが用いられている。これは、所定の物質についての光の吸収強度スペクトルに絶対周波数が割り振られているものであり、較正する際の厳格な物差しとなる。このような光周波数標準スペクトルは、例えばNIST（アメリカ国立標準技術研究所）などの機関により規定されている。この光周波数標準スペクトルに、較正対象となるレーザ光の吸収スペクトルを重ね合わせることで測定対象の光の周波数を特定することができる。

10

## 【0003】

ここで、上述した光周波数標準スペクトルを用いて波長可変レーザ装置におけるレーザ光の較正をしようとする場合、併せて波長計などの測定機器を用いなければならない。それは、波長可変レーザ装置の周波数連続同調範囲が極めて狭く、概ね30GHz（1[cm<sup>-1</sup>]）程度しかないということに起因する。

## 【0004】

つまり、重ね合わせて合致する周波数領域を光標準スペクトルのなかから探索しようとする際に、較正対象となるレーザ光の吸収スペクトルが1[cm<sup>-1</sup>]程度しかないため、広範囲にわたる光周波数標準スペクトルにおいて照合すべき周波数領域の見当をつけることができず、探索に膨大な作業量を要し実際には較正を完了することができない。そのため、まず波長計により較正対象のレーザ光の周波数を測定し、測定されて判明した周波数領域の光周波数標準スペクトルと較正対象のレーザ光の吸収強度スペクトルとを厳格に重ね合わせることで較正を行っているのが実情である。

20

## 【先行技術文献】

## 【特許文献】

## 【0005】

【特許文献1】特開2000-101177号公報

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0006】

波長可変レーザの波長較正には、上述したように波長計が必要となる。しかし、波長計が高額であるという問題がある。そこで、波長計を用いることなく簡便に波長可変レーザの波長較正を行うことのできる技術が望まれている。

30

## 【課題を解決するための手段】

## 【0007】

上記課題を解決するために本発明において、以下の波長可変レーザの波長較正方法を提供する。すなわち、第一の発明として、較正用標準データとして予め知られた所定物質へのレーザ光の吸収強度スペクトルの内、所定の吸収強度を閾値として閾値以上の吸収強度を有する吸収ピークの周波数分布と、較正対象である波長可変レーザの同物質へのレーザ光の吸収強度スペクトルの吸収強度が強い順に複数選択された吸収ピークの周波数分布と、を比較して、較正対象の各吸収強度に対応する正しい周波数を決定する波長可変レーザの波長較正方法であって、前記閾値は、較正用標準データとして予め知られた前記所定物質への前記レーザ光の吸収スペクトルの内、吸収強度が最大のピークに対する割合で定める波長可変レーザの波長較正方法を提供する。

40

## 【0009】

また、第二の発明として、前記較正対象である波長可変レーザの同物質へのレーザ光への吸収ピークを選択は、前記較正用標準データに対して適用された閾値と無関係に設定される閾値以上の吸収強度を有するものを選択する第一の発明に記載の波長可変レーザの波長較正方法を提供する。

## 【0010】

50

また、第三の発明として、前記比較は、較正対象の前記選択された吸収強度を有する吸収ピーク周波数間隔と合致する周波数間隔が較正用標準データの吸収ピークの周波数分布に存在するかを探索する処理である第一の発明又は第二の発明に記載の波長可変レーザの波長較正方法を提供する。

【0011】

また、第四の発明として、較正用標準データとして予め知られた所定物質へのレーザ光の吸収強度スペクトルの内、吸収ピークの周波数分布と、較正対象である波長可変レーザの同物質へのレーザ光の吸収強度スペクトルの所定閾値以上の吸収強度を有する吸収ピークの周波数分布と、を比較して、較正対象の各吸収強度に対応する正しい周波数を決定する波長可変レーザの波長較正方法であって、前記閾値は、較正用標準データとして予め知られた前記所定物質への前記レーザ光の吸収スペクトルの内、吸収強度が最大のピークに対する割合で定める波長可変レーザの波長較正方法を提供する。

10

【0012】

また、第五の発明として、前記比較は、較正対象の所定閾値以上の吸収強度を有する吸収ピーク周波数間隔と合致する周波数間隔が較正用標準データの吸収ピークの周波数分布に存在するかを探索する処理である第四の発明に記載の波長可変レーザの波長較正方法を提供する。

【発明の効果】

【0013】

以上のような構成をとる本発明によって、波長計などを用いることなく波長較正を行うことができる。

20

【図面の簡単な説明】

【0014】

【図1】一臭化ヨウ素分子の近赤外光領域における吸収強度スペクトルの一部を示す図

【図2】較正対象である波長可変レーザの一臭化ヨウ素分子に対するレーザ光の吸収強度スペクトルの一例を示す図

【図3】較正対象の吸収強度スペクトルにおけるピーク間隔の一例を示す図

【図4】較正用標準データにおけるピークAとピークBとの間隔測定についての図

【図5】複数のピーク間隔を用いて較正対象と合致するスペクトルの検索にかかる数についての図

30

【図6】複数のピーク間隔を用いて較正対象と合致するスペクトルの検索結果の正答率を示す図

【発明を実施するための形態】

【0015】

以下に、図を用いて本発明の実施の形態を説明する。なお、本発明はこれら実施の形態に何ら限定されるものではなく、その要旨を逸脱しない範囲において、種々なる態様で実施しうる。

<実施形態>

【0016】

本発明に係る波長可変レーザの波長較正方法は、較正用標準データとして予め知られた所定物質へのレーザ光の吸収強度スペクトルの内、吸収ピークの周波数分布と、較正対象である波長可変レーザの同物質へのレーザ光の吸収強度スペクトルの所定閾値以上の吸収強度を有する吸収ピークの周波数分布と、を比較して、較正対象の各吸収強度に対応する正しい周波数を決定する波長可変レーザの波長較正方法である。

40

【0017】

以下に説明する本実施形態の波長可変レーザの波長較正方法は、ハードウェア及びソフトウェアの組み合わせとして実現され得る。具体的には、コンピュータを利用するものであれば、CPUや主メモリ、バス、あるいは二次記憶装置（ハードディスクや不揮発性メモリ、CDやDVDなどの記憶メディアとそれらメディアの読取ドライブなど）、情報入

50

力に利用される入力デバイス、表示装置、波長可変レーザ、ファブリペロー共振器、電気光学変調器、ガスセル、A/D変換装置、その他の外部周辺装置などのハードウェア構成部、またその外部周辺装置用のインターフェース、通信用インターフェース、それらハードウェアを制御するためのドライバプログラムやその他アプリケーションプログラム、ユーザインターフェース用アプリケーションなどが挙げられる。そして主メモリ上に展開したプログラムに従ったCPUの演算処理によって、入力デバイスやその他インターフェースなどから入力され、メモリやハードディスク上に保持されているデータなどが加工、蓄積されたり、上記各ハードウェアやソフトウェアを制御するための命令が生成されたりする。あるいは本システムの機能ブロックは専用ハードウェアによって実現されてもよい。

【0018】

また、本明細書に記載の各実施形態は装置として実現できるのみでなく、方法としても実現可能である。また、このような装置の一部をソフトウェアとして構成することができる。さらに、そのようなソフトウェアをコンピュータに実行させるために用いるソフトウェア製品、及び同製品を固定した記録媒体も、当然に本明細書に記載の各実施例の技術的な範囲に含まれる（本明細書の全体を通じて同様である）。

【0019】

広く利用されている波長可変レーザには、例えば、近赤外光領域で発振するチタンサファイアレーザ（Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Laser）やヒ化ガリウム半導体レーザ（GaAs Laser）がある。これらの波長可変レーザの吸収強度スペクトルを測定するための所定物質としては、近赤外光領域における光の吸収強度スペクトルに多くの吸収線を有する物質が好ましい。吸収線における吸収強度は較正の際の比較照合の指標となるからである。このような物質として、一臭化ヨウ素（IBr）や一塩化ヨウ素（ICl）などのハロゲン間化合物がある。

【0020】

図1は、ハロゲン間化合物の一つである一臭化ヨウ素分子の近赤外光領域における吸収強度スペクトルの一部を示す図である。横軸に波数（[cm<sup>-1</sup>]）を取り波長可変レーザの周波数連続可変範囲を示している。本図において横軸に振られている波数の値で示しているのは絶対周波数であり、縦軸は吸収強度の最大強度と最小強度との差を百分率した値を示している。図示するように、周波数連続可変範囲に吸収強度の顕著なピークが複数存在している。これらのピークが波長較正で照合する際の有効な指標となるため較正用標準データとして好適なのである。

【0021】

本発明では、図1に示すような所定物質へのレーザ光の吸収スペクトルにおいて、所定の吸収強度を閾値として閾値以上の吸収強度を有する周波数分布を較正用標準データとして用いる。図1の例によれば、相対的に吸収強度が高い「A<sub>std</sub>」、「B<sub>std</sub>」、「C<sub>std</sub>」の3つのピークにおける中心波数が較正用標準データとなる。図示するように、各ピークの中心波数は「A<sub>std</sub> = 14047.36549」、「B<sub>std</sub> = 14047.50706」、「C<sub>std</sub> = 14047.80195」である。

【0022】

なお、図1では14047.0 [cm<sup>-1</sup>] から14048.0 [cm<sup>-1</sup>] までの範囲における吸収強度スペクトルを示しているが、較正用標準データとしては、より広範囲における吸収強度スペクトルが存在する。また、図1では「A<sub>std</sub>」、「B<sub>std</sub>」、「C<sub>std</sub>」の3つのピークのみを例示したが、較正用標準データには、測定された範囲内のすべてのピークの中心波数と吸収強度とが関連付けられたデータとなっている。

【0023】

このような較正用標準データは、本発明に係る波長可変レーザの波長較正方法を実行する計算機が備える不揮発性メモリなどの記憶装置に予め保持され、CPUに適宜読み出されてCPUによる処理に供される。

【0024】

図2は、較正対象である波長可変レーザの一臭化ヨウ素分子に対するレーザ光の吸収強度スペクトルの測定データの一例を示す図である。図1に示した較正用標準データとして

10

20

30

40

50

の吸収強度スペクトルと同様に横軸に波数（ $[\text{cm}^{-1}]$ ）を取っているが、付与されている値は相対波長である。相対波長は、ファブリペロー共振器などにより生成した干渉縞を用いることで、測定される較正対象の波長可変レーザの吸収強度スペクトルに付与することができる。このように較正対象の波長可変レーザの波長可変範囲内の吸収強度スペクトルを測定し、併せて相対波長を付与する。

#### 【0025】

このように相対波長が付与された測定データにおける吸収強度スペクトルは、本発明に係る波長可変レーザの波長較正方法を実行する計算機が備えるCPUが所定のプログラムを実行し、一臭化ヨウ素分子を封入したガスセルを経由したレーザ光とファブリペロー共振器などにより生成した干渉縞とを検出した信号を所定の処理に供することにより生成され、生成された較正対象の吸収強度スペクトルは不揮発性メモリなどの記憶装置に記憶される。

10

#### 【0026】

そして、波長可変範囲内に存在する吸収強度のピークを複数選択して、それらのピークの間隔と一致するピーク間隔を較正用標準データの中から探索することにより、較正対象の吸収強度スペクトルに絶対周波数を付与する。較正対象の吸収強度スペクトルの内から選択されるピークは任意に選択され得るが、例えば、吸収強度の強い順に選ぶことができる。また、吸収強度の強いピークが複数選択されるよう、任意の吸収強度を閾値として当該閾値以上の吸収強度を有するピークを選択するようにしてもよい。なお、この閾値は後述する較正用標準データに対して適用する閾値とは無関係に設定されるものである。

20

#### 【0027】

図2は、較正対象の吸収強度スペクトルの中から、吸収強度の強い順に4つのピークが選択された態様を示す概念図である。ここでは、4つのピーク（a, b, c, d）が選択されている。そして、それらのピークの間隔を用いて較正用標準データとの比較を行う。図示するように、ピークaとピークbとの間隔、ピークbとピークcとの間隔、ピークcとピークdとの間隔、ピークaとピークdとの間隔を用いる。

#### 【0028】

ピーク間隔は、それぞれのピークの中心波数（中心周波数）の差分をとることで得られる。較正対象の吸収スペクトルに付与される波数は相対波数であるが、差分を取ることで絶対周波数が付与された較正用標準データにおけるピーク間隔との比較が行える。

30

#### 【0029】

一方、比較する較正用標準データの吸収強度スペクトルには膨大な数のピークが含まれ、すべてのピークを対象として一致するピーク間隔の探索を行うことは多大な計算量となり好ましくない。そこで、較正対象において吸収強度の強いピークが選択されることに応じて、較正用標準データにおいても吸収強度による閾値を設けて比較の対象とするピークを絞り込む。

#### 【0030】

図3は、較正用標準データにおいて閾値によって比較の対象として絞り込まれたピークを示す概念図である。図示するように $14047.0 [\text{cm}^{-1}]$ から $14048.0 [\text{cm}^{-1}]$ までの範囲に多数のピークが存在する。そこで、較正用標準データの最大吸収強度と最小吸収強度との差を百分率し、最大吸収強度の相対値を閾値として用いる。図中の6つのピーク（A, B, C, D, E, F）は、閾値を「70%」と定めた場合のピークである。図示するように、閾値を最大吸収強度の「60%」と定めた場合には、より多くのピークが抽出される。

40

#### 【0031】

続いて、図2で示した4つのピーク（a, b, c, d）により生じる4つのピーク間隔（, , , ）を用いた場合における、合致するピーク間隔の探索について説明する。まず、間隔と同じ周波数間隔が較正用標準データの吸収強度ピークの周波数分布に存在するかを探索する。すなわち、較正用標準データに存在する一のピークについて当該ピークとの間隔が間隔となる他のピークが存在するかを探索する。この処理を較正用標準データに存在するすべてのピークについて行う。

50

## 【 0 0 3 2 】

そして、間隔  $\Delta$  と等しい間隔として、図 3 に示したピーク A とピーク B との間隔  $\Delta$  が見出されたら、一のピークから他のピークを探索した方向と同方向にさらに探索し、次に存在するピーク C とピーク B との間隔  $\Delta$  が、図 2 に示したピーク b とピーク c との間隔  $\Delta$  と等しいか否かの比較を行う。等しい場合には、さらに隣に存在するピーク D とピーク C との間隔  $\Delta$  が、ピーク c とピーク d との間隔  $\Delta$  と等しいか否かの比較を行う。等しい場合には、ピーク A とピーク D との間隔  $\Delta$  が、ピーク a とピーク d との間隔  $\Delta$  と等しいか否かの比較を行う。

## 【 0 0 3 3 】

このように、複数のピークにより構成されるピーク間隔を順次シフトしながらピーク間隔の比較していくことで、較正用標準データにおける多数のピーク間隔の中から較正対象の吸収強度スペクトルに存在する所定のピークの連なりと同じ間隔にて連なるピークを絞り込んでいくことができ、最終的に一致するピークの連なりを導出することができる。そして、較正用標準データの吸収強度スペクトルにおいて一致したピークを中心周波数である絶対周波数が、較正対象における一致したピークを中心周波数として決定される。

## 【 0 0 3 4 】

このようなピーク間隔の比較は、本発明に係る波長可変レーザの波長較正方法を実行する計算機が備える CPU が所定のプログラムを実行し、不揮発性メモリなどの記憶装置に記憶されている較正対象の吸収強度スペクトルを読み出してピークとして選択された複数の吸収強度とその吸収強度に対応する中心周波数を取得し、続いて、取得した複数の中心周波数の差分を算出する処理を行うことで複数のピーク間隔を取得し記憶装置に記憶させる。

## 【 0 0 3 5 】

続いて、CPU が所定のプログラムを実行し、不揮発性メモリなどの記憶装置に記憶されている較正用標準データの閾値以上の吸収強度を有する一のピークとこれと隣接する他のピークとの間隔をそれぞれのピークを中心周波数の差分から算出し、算出された間隔と較正対象におけるピーク間隔とが一致するか否かの比較処理を CPU が実行する。このように、較正対象におけるピーク間隔と等しい間隔を較正用標準データの中から探索する処理を経て、較正用標準データにおいて等しいピーク間隔を形成する各ピークの絶対周波数を較正対象のピークに付与することで絶対周波数が決定される。

## 【 0 0 3 6 】

また、較正用標準データにおけるピーク間隔と較正対象におけるピーク間隔との一致を判定する際に、所定の誤差を許容するようにしてもよい。例えば、図 4 に示すように、較正対象におけるピーク間隔との比較をするにあたり、較正用標準データにおけるピーク A とピーク B との間隔を測定する場合に、例えばピーク B の中心波数の  $\pm 0.003$  [  $\text{cm}^{-1}$  ] 程度の誤差を許容する。これは、較正対象の吸収強度スペクトルを測定するための測定機器などに誤差が生じ得るからである。

## 【 0 0 3 7 】

なお、計算量が膨大に増えることを抑制し効率的な探索を行うために較正用標準データにおいて比較の対象となるピークの抽出にあたり閾値を設定した場合について説明してきたが、本発明が設定して課題の解決手段としては、閾値を設けることなくすべてのピークを比較の対象として用いることも当然に含まれる。

## 【 0 0 3 8 】

また、波長可変レーザの使用にあたり本較正方法が併せて行われるように構成することも好ましい。波長可変レーザはガス分析などに用いられるが、分析対象となるガスセルに導光するレーザ光をビームスプリッタなどで分光し、分光対象となるガスセルに導光するとともに一臭化ヨウ素分子を封入したガスセルにも導光することにより、この波長可変レーザの較正とガス分析とを併せて行うことができる。その結果、較正された波長可変レーザに基づくガス分析が行われることになり、例えば、ガスセル内における吸収強度スペクトルに絶対周波数を付与するといった正確なガス分析が可能となる。このように波長可変

レーザの本来の使用時に本較正方法が併せて行えるように構成することにより、本較正方法による較正機能が付与された波長可変レーザとして実現することができる。

< 本較正方法の検証 >

【 0 0 3 9 】

図5に複数のピーク間隔を用いて較正対象と合致するスペクトルの検索にかかる数について示す。縦軸は平均ヒット数。横軸は本較正方法において使用するピークの数である。検索にかかる数は、較正対象の吸収強度スペクトルの測定データとして13800 - 14000[ $\text{cm}^{-1}$ ]領域にて多数取得したピークのデータ(強度と波数)のうちで強度の高いピークデータを用いて1つのピークデータごとに実行し、これを329回実行し、実行結果より出力される検索数の合計をピークファイルの総数329で割った値である。最大強度の閾値は45[%]とした。 10

【 0 0 4 0 】

今回、ピーク誤差の閾値を変化させ複数のピークを用いた場合の検索にかかる数の確認を行った。使用するピークが3本、ピーク誤差の閾値0.003[ $\text{cm}^{-1}$ ]以上の場合、ヒット数は170以上となっている。また、複数のピーク間隔を用いた場合もピーク誤差の閾値を下げることで、ヒット数が比例して増加しているのが確認できた。使用するピークが4本の場合、ピーク3本に比べてヒット数の絞り込みを行っておりピーク誤差の閾値0.003 [ $\text{cm}^{-1}$ ]において31のヒット数となった。ピーク5本以上についてもヒット数が減少し、平均ヒット数が1に近い値へと収束している。

【 0 0 4 1 】

図6に複数のピーク間隔を用いて較正対象と合致するスペクトルの検索結果の正答率について示す。縦軸は正答率、横軸はスペクトル探索に使用するピークの数である。図5のヒットした中に、ピークファイルに記載されている波数と同一であるデータが存在するかを確認した。 20

【 0 0 4 2 】

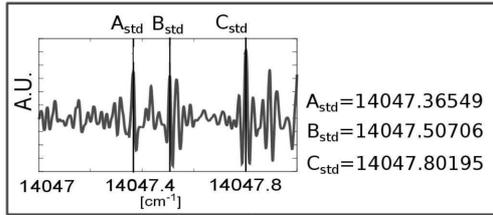
今回、正答の基準として用いるのはピーク誤差の閾値を用いた2乗誤差が1番低い値が正答であると仮定する。2乗誤差の1番低い値となったピークとピークデータに記載されているピークの差が0.1[ $\text{cm}^{-1}$ ]以下であるとき正答とした。図6は、今回のシステムにおいて正答率のもっとも高いデータである。最大強度の閾値45[%]、ピーク誤差の閾値0.006[ $\text{cm}^{-1}$ ]、使用するピーク本数8本の時に正答率90.3[%]を得ることができた。

< 効果 >

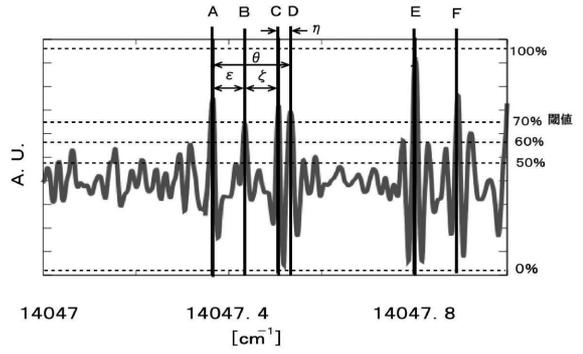
【 0 0 4 3 】

本実施形態の波長可変レーザの波長較正方法によって、波長計などを用いることなく波長較正を行うことができる。 30

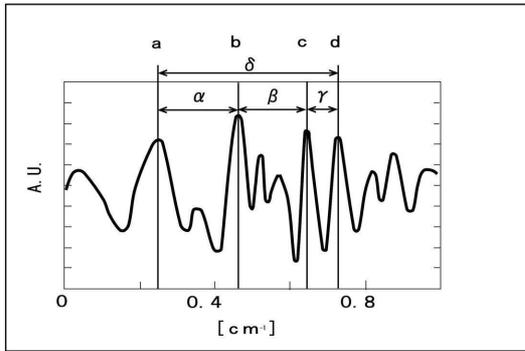
【 図 1 】



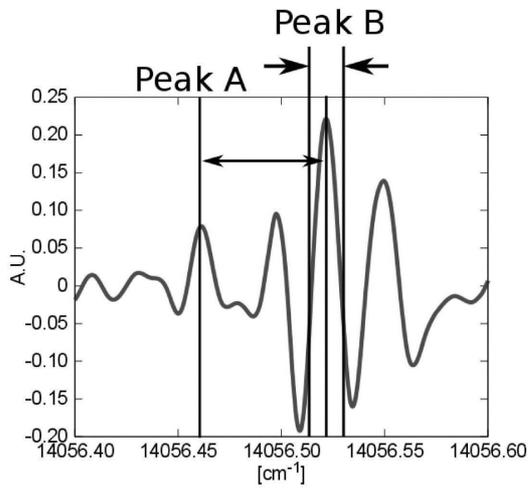
【 図 3 】



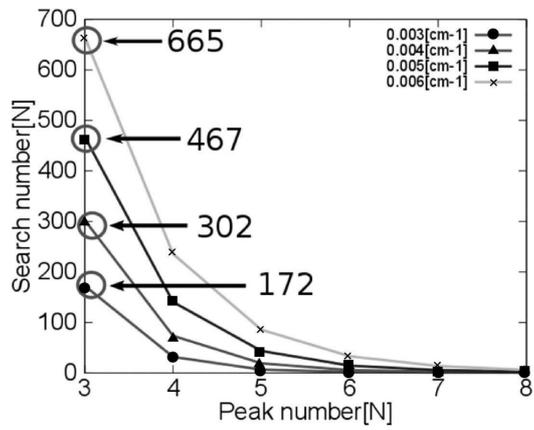
【 図 2 】



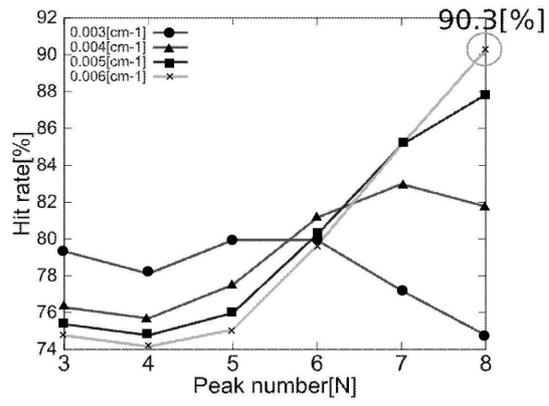
【 図 4 】



【 図 5 】



【 図 6 】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開2016-070776(JP,A)  
特開昭63-259439(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01S 3/00 - 3/30