

VIPA(virtually imaged phased array)を用いた 波長分散技術と周波数コム分光法への応用

1. イントロダクション

安定化モード同期フェムト秒レーザーから発生する周波数コムは、非常に狭い線幅を有する CW レーザーが繰り返し周波数間隔で約百万近く並んだものと見なせる。周波数コムを用いた分子分光法は長い間研究されており、様々な物質の定量的評価や解析が可能であるため、分子に対する新たな知見が得られる非常に有益な手法である。

本雑誌会では、従来の周波数コム分光法とは大きく異なったアプローチである、VIPA (Virtually Imaged Phased Array) を用いた分光法について紹介する。VIPA は非常に高い角度分散量を有しており、VIPA と回折格子を組み合わせることにより、周波数コムを空間上に分離することが可能となる。

2. 「Large angular dispersion by a virtually imaged phased array and its application to a wavelength demultiplexer」 [1]

2-1. イントロダクション

VIPA は光通信における高密度波長分割多重システムとして、開発された。従来用いられていた回折格子は、一度に多くの波長に光を分解するより単純な手段である。しかし、回折格子は、回折効率、不十分な角度分散、偏光状態依存性といった欠点を有しており、非常に高密度なマルチプレクサが必要となる。

本論文では、大きな角度分散を示す VIPA を提案し、光分波器としての VIPA の特性について評価している。

2-2. VIPA の原理

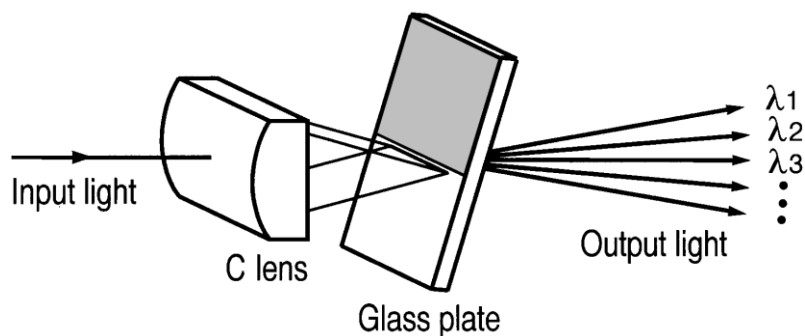


図 1 VIPA の概略図

VIPA は、図 2-1 に示すように、ガラス板とシリンドリカルレンズ (C レンズ) を使用する。入射光は、VIPA 板にシリンドリカルレンズで線集光する。図 2-2 に VIPA 構造の詳細を示す。ガラス板の片側は高反射膜 (反射率 95%以上) で被覆されており、他辺は反射防止 (AR) コーティングされている領域 (窓) を除いて~100%の反射膜で被覆されている。入力光は、窓を通してガラス板に入射し、シリンドリカルレンズ (C レンズ) でプレートの他方の面上に集光する。ここで、表面への入力光の中心軸は、小さな入射角 u を有する。 u はプレートから空気への入射角であり、屈折率 n (n はガラス用板の屈折率であり、 n は 1.5) 倍大きい。図 2 では無視している。入力光の 5% は、ガラス板に入射した後、ビームウエストの後面で発散する。入力光の 95% は反射し、2 回目の反射後、同一面において距離 d だけ離れた場所に当たり、再び光の 5% が表面を通過する。同様に、プレート後の光は、一定の距離 d で多数のパスに分割される。各パスのビーム形状は、あたかもビームウエストの虚像からそこにあるかのように振る舞う。ビームウエストの虚像は、ガラス板に垂直な線に沿って一定の間隔 $2t$ (t : 板厚) で位置する。次に、全てのビームは、光が回折格子のブラッグ角と同様の角度によって決定される方向に伝播する。光路の間隔は $d=2t\sin\theta$ であり、隣接するビーム間の光路長の差は、 $2t\cos\theta$ ある。角度分散はこれらの比である $\cot\theta$ に比例する。プレート後の角度分散は、屈折率のため n 倍される。したがって分散は、 $ncot\theta$ である。VIPA が回折格子と異なる点は、虚像の振幅の大きさが反射の数が増えるにつれて指数関数的に減衰することである。

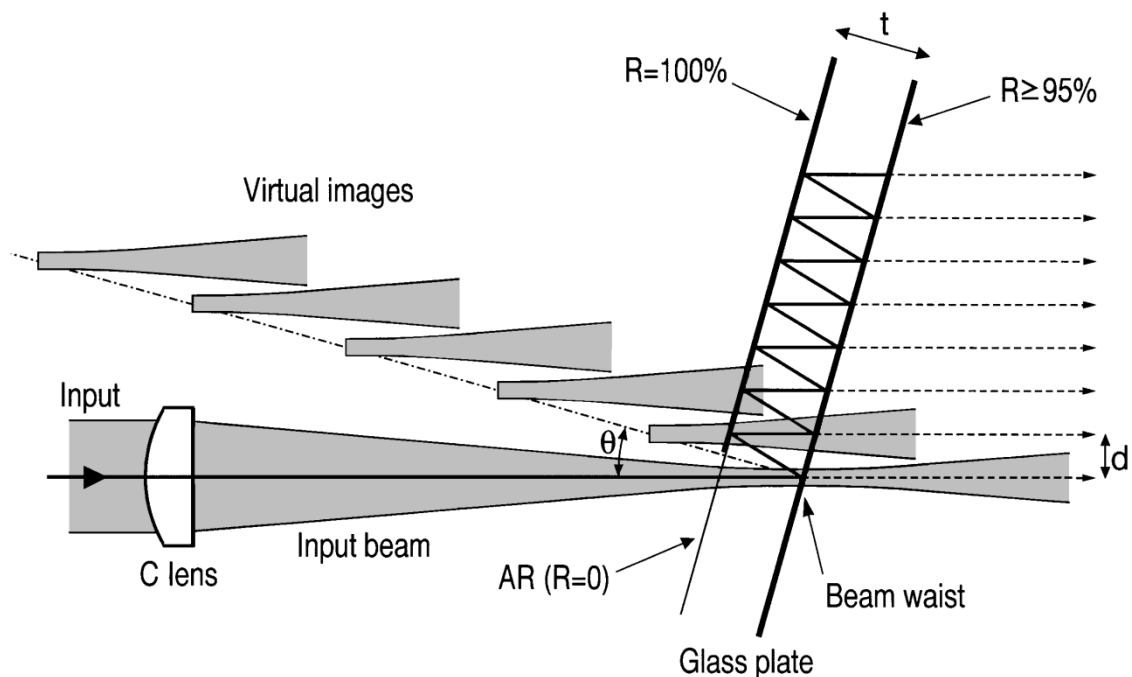


図 2-2 VIPA の原理図

回折格子において、回折面上での振幅の大きさは、入力ビームプロファイルによって決定され、一般的にガウス分布である。VIPA の 1 回の反射での減衰率は、反射率が 95% のとき、反射率の平方根である 0.975 となる。それらは虚像であるため、反射率に位相がなく、入射角の範囲内で変化しない条件において、全ての光路におけるビームプロファイルは同じとなる。ビームの振幅の大きさは出力ピーク方向周りに一定であると仮定すると、角度 $\Delta\theta$ の方向に進行する出力領域は、 $1/[1 - \exp(-\alpha + ikd\Delta\theta)] \approx 1/(\alpha - ikd\Delta\theta)$ に比例する。ここで、 $\exp(-\alpha)$ は VIPA における減衰率(0.975)であり、 $k = 2\pi/\lambda$ である (λ は波長である)。したがって、出力光におけるパターンはローレンツタイプになる。ローレンツ出力からガウスモードへの結合効率を評価することは重要である。図 2 の平面に垂直な方向のビームプロファイルはガウシアンであると仮定し、次に、結合効率は図 2 の二次元モデルによって決定する。VIPA からの出力光がレンズによりガウスモードに集束されると、結合効率はガウスフィールドと $\exp(iky\Delta\theta)/(\alpha - ikd\Delta\theta)$ 間の重なり積分の平方根から計算される。ここで y はレンズの横位置である。数値シミュレーションでは、レンズ位置、焦点距離が最適化されたときの結合効率が 80% と高かったことを示した。

また、VIPA は本質的に偏光に依存しない。VIPA の偏光依存性は反射膜の複雑な反射率が、振幅や位相のいずれかに偏光依存性を持っている場合にのみ生じる。しかし、それらの偏光依存性は、10 度以下の小さな入射角では無視することができる。

2-3. 実験光学系および実験結果

まず初めに、VIPA の角度分散を測定した。以下は実験で使用されるパラメータである。中心波長 1.55 μm の波長範囲は 100 μm 、 θ は 6.4°、および $d=22.4$ ミリメートルである。したがって、 $\text{ncot}\theta$ は 13.4 以上である。また回折格子では、 $2\tan$ (ブレード角) であり、ブレード角 30 度において、1 以下程度である。したがって、VIPA の角度分散は、グレーティングのものよりもはるかに大きいことが分かる。1.55 mm の波長可変レーザー・ダイオードからの光は、シングルモードファイバを介して、図 2-3 に示すように平凸レンズ (曲率半径 3mm) でコリメートされる。光は、曲率半径 3mm のシリンドリカルレンズ (C レンズ) により線集光される。ガラス板から 20cm の距離で測定したビーム径は 0.6mm 以下であった。図 2-4 に、測定した出力角 θ を示す。波長が変化すると、 θ は敏感に変化する。曲線が直線ではなく、角度分散 $|d\theta/d\lambda|$ は、 θ が小さいほど大きく表れる。これは θ の変化は無視できるほど小さくないために生じる。この時、角度分散の有効な因子は、 $\text{ncot}(\theta+\theta/n)$ となる。角度分散は θ の関数として、0.4 から 0.8deg/nm に変化する。 $\theta=0$ のとき、角度分散は 0.5deg/nm であり、この値は $\text{ncot}\theta/\lambda$ の理論値とよく一致している。

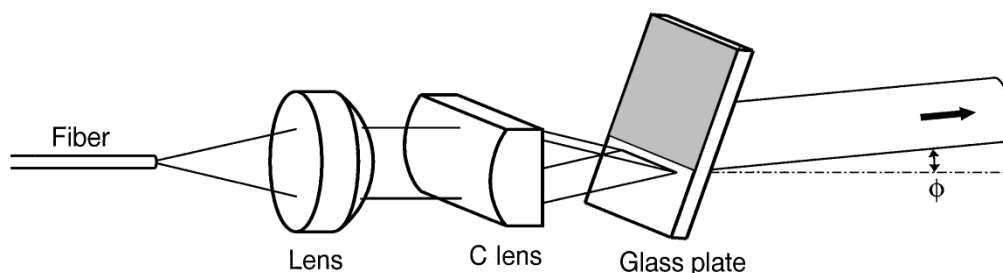
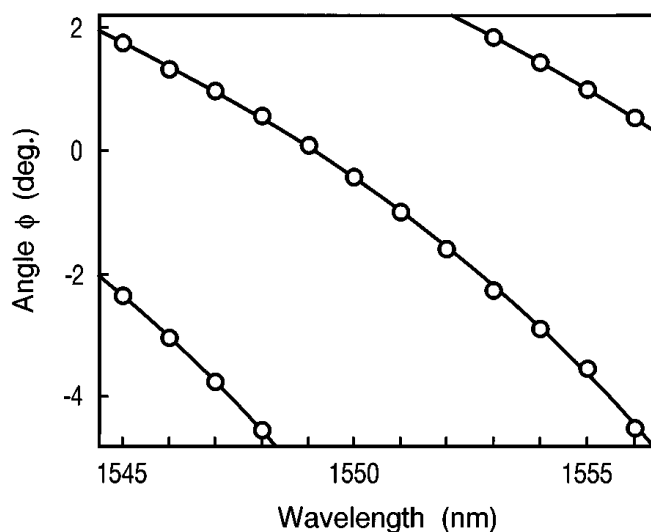


図 2-3 実験光学系

図 2-4 各波長の出力角 ϕ

次に、図 2-5 に示すように、この大きな角度分散を有する VIPA を用いて波長分波器を構築した。出力後のレンズの焦点距離は 20mm であり、その後、110 mm の間隔で、直径 62.5 μm のコアを有する 11 の出力ファイバがある。図 2-6 に、スペクトラムアナライザを用いて測定した、入力ファイバから出力ファイバ#5 への透過率を示す。透過ピーク間の間隔は、ガラス板の厚さに対応しており、8nm である。3~20 dB の帯域幅は、それぞれ 0.3~1.5 nm である。ピーク波長における透過率の偏光依存性は、0.1dB であった。11 本のそれぞれのファイバ位置での透過スペクトルを図 2-6 に示す。スペクトルの変化は、0.4 deg/nm の角分散に対応している。この図より、得られた特性は 0.8 nm の間隔を有する 10 チャンネル波長分割多重方式に適応していることを示しているこの波長分散実験において、ガラス板の有効サイズは、1mm \times 1mm \times 0.1mm である。したがって、デバイスの大きさは、1-2 mm の直径領域内となる。

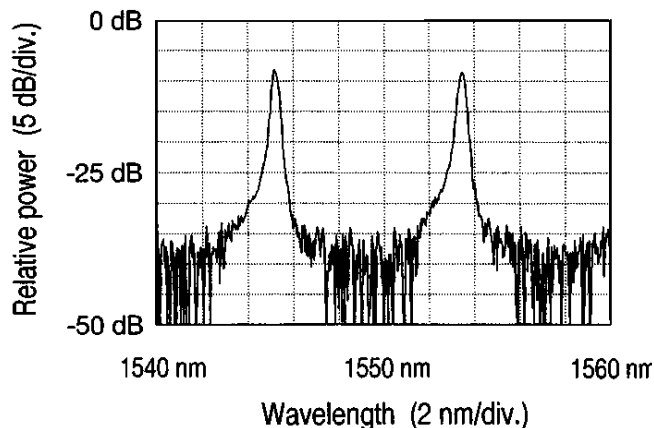


図 2-5 (上) 出力ファイバ#5 への透過率

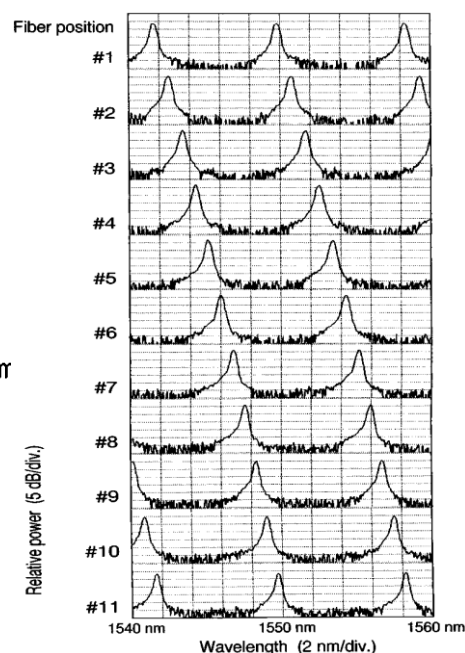


図 2-6 (右) 各出力ファイバへの透過率

2-4. まとめ

大きな角度分散をもつ VIPA を提案し、その実証を行っている。波長分波器への応用についても同様に実証した。0.4-0.8 deg/nm の大きな角度分散が観測され、0.8 nm の間隔で 10 波長多重分離が、0.1dB の偏光依存性で達成された。波長分散する波長範囲は、8 nm だったが、ガラス板の厚さを 50mm に減らすことで 16 nm に波長範囲を倍増することが可能となる。

3. 「Molecular fingerprinting with the resolved modes of a femtosecond laser frequency comb」 [2]

3-1. イントロダクション

モードロックフェムト秒レーザーから出射された広帯域周波数コムは、次世代原子時計のための光サイクルのカウントから位相検出高磁場プロセスの測定値まで、科学技術の広範囲にわたり用いられている。安定化された周波数コムは、単一のレーザービームに、非常に狭い線幅で約百万にも及ぶモードがあり、 10^{15} 以上の精度で絶対周波数が決定できるという点である。高コヒーレント光で多数のモードの重要な用途として、多数のモードを内部原子構造、およびダイナミクスの見解のために使用することができる精密分光法がある。しかし、個々のモードの絶対周波数と振幅や相対位相を同時に測定する効率的な手段は存在しなかった。本論文では、空間的に安定化周波数コムを分離するために、高い角度分散を有する VIPA を使用する。VIPA 分光器は空間的にコムモード

を分離し、マルチチャンネル検出を行うため、従来とは大幅に異なるアプローチを取る。したがって、マルチチャンネル検出器は、個々のコムモードの振幅を測定することができる。高周波数分解能と帯域幅 6THz の吸収イメージを数ミリ秒で取得し、ヨウ素分子の蒸気の高分解能指紋スペクトルを得ている。

3-2. 実験原理および実験光学系

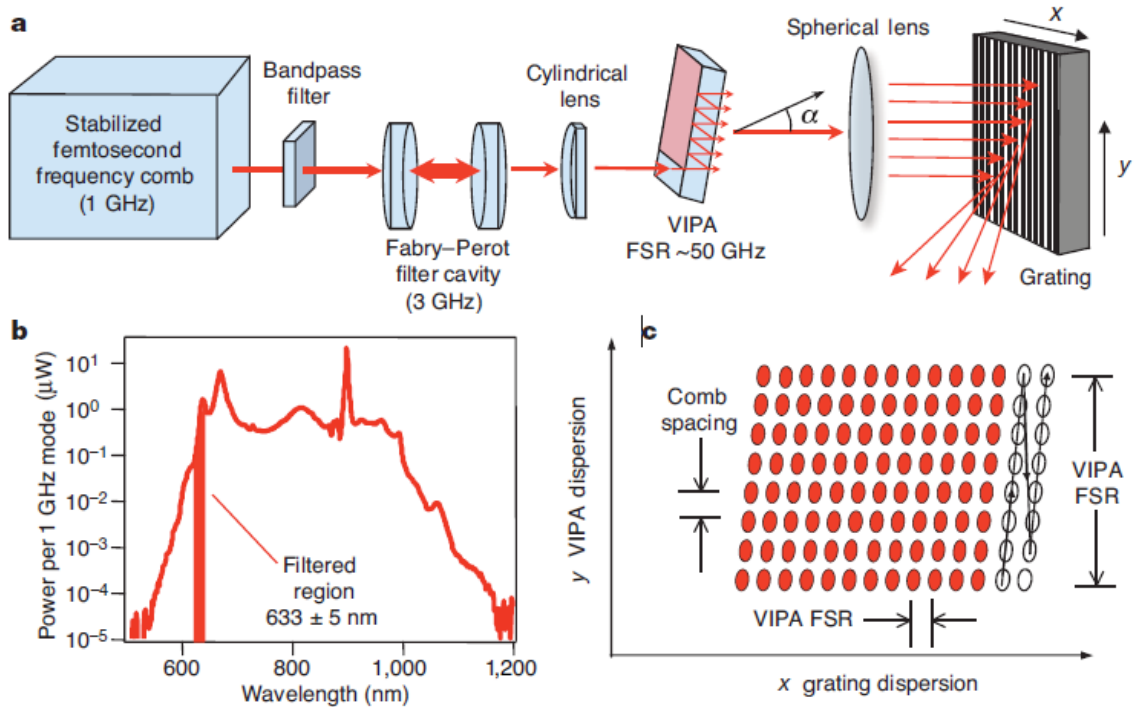


図 3-1 a. 実験光学系 b. Ti:S レーザーのスペクトル c. VIPA イメージの概略図

図 3-1a に実験系の概略図を示す。Ti:S レーザーの繰り返し周波数(f_{rep})は 1GHz である。 f_{ceo} とキャリアエンベロープオフセット(f_{cep}) は、安定度 2×10^{-13} 以下の低雑音マイクロ波周波数標準 (水素メーザ) に安定化されており、帯域幅はおよそ 600~1,000 nm (図 3-1b) を有する。しかし、一回の測定で全帯域幅を測定およびイメージングするには、広すぎるため、633nm 周りの帯域幅 10nm にスペクトルを制限するフィルタを使用している。この 10nm の帯域幅を、二つの球面鏡からなるファブリペローキャビティ (フィネス: 300) を用いて、さらに分光器の分解能を考慮して、モード間隔 $3f_{rep}$ の周波数コムにフィルタリングする。高分解能分光器(図 3-1a)は、従来の回折格子と VIPA スペクトル分散器を組み合わせることによって、可視(633 nm)のスペクトル領域で 1.2 GHz の分解能を有する。VIPA は、線集光された入射光が前面のコーティングされていない入射窓に、ある入射角度で入射する平行平面ソリッドエタロンである。裏面の反射率は 96 %のコーティングを有しており、前面の入射窓以外の部分は、高反射コーティング (~100%) されている。VIPA エタロン内の多重反射後の出力ビームが干渉条件を満たすように、各波長で異なる角度で出力さ

れる。VIPA の FSR は、材料の厚さと屈折率によって決定される（今回は FSR = 50 GHz）。結果は、50GHz を超えるスペクトル帯域幅を有する入射光に対して、出力光の次数が互いに空間的に重畳した。この問題は、直交空間次元に沿って第二の分散素子を用いることによって解消できる[3]。この場合、回折格子は VIPA の FSR よりも良好なスペクトル分解能が望まれる。今回、回折格子の 24,000 の溝が照射されるよう、大きな入射角で 2400 line/mm の回折格子を使用し、20GHz の分解能を達成した。

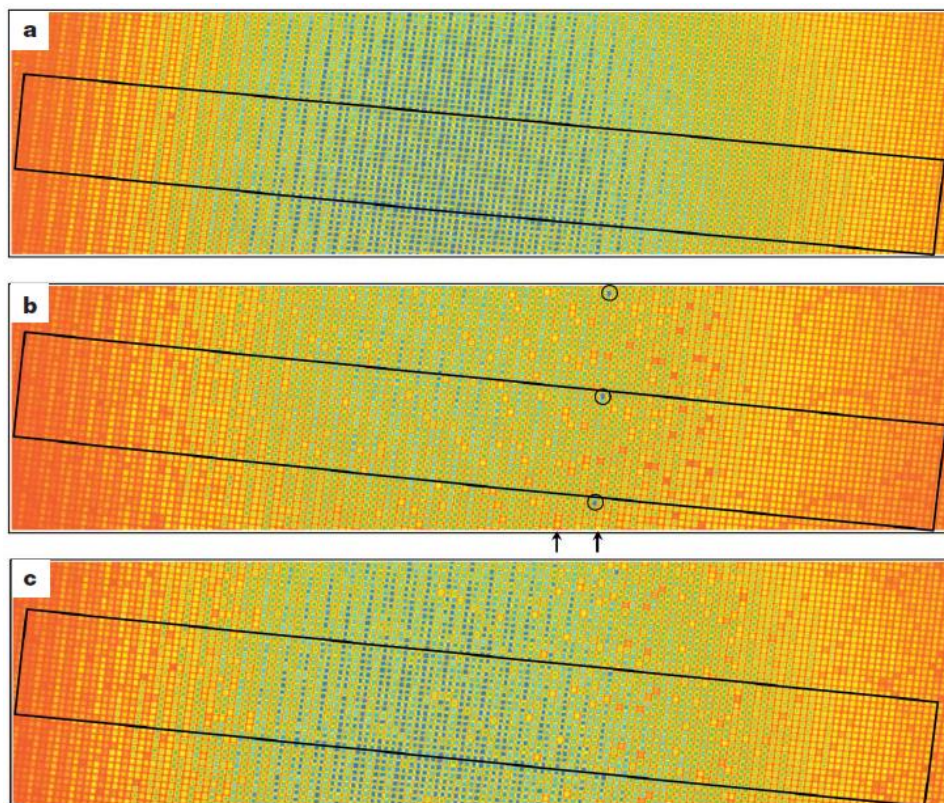


図 3-2 a. バックグラウンドイメージ b. ヨウ素遷移の吸収イメージ（黒丸はデータ補正を行うための参照レーザー光） c. f_{rep} を変化させたヨウ素遷移の吸収イメージ

3-3. 実験結果

VIPA/回折格子分光器により、3GHz のモード間隔で個々のコムモードのパワーを示す 'ドット' のアレイが、CCD カメラ (6.7 ミリメートル画素ピッチ) 上に結像される。このように、VIPA/回折格子分光器は、1次元のコムを2次元のコムに変換させる (図 3-2a)。この画像の垂直方向において、各データは VIPA の FSR50GHz で繰り返している (図 4-2 の黒い四角)。この領域の内部に、6.5 テラヘルツ帯域幅にわたる約 2,200 個々のモードが、明白に CCD 上に結像されている。図 3-2 が斜めに傾いているのは、VIPA の FSR、回折格子の角度分散、および、カメラ軸に対し実験装置の相対的なわずかな回転あるためである。FSR は、分光器前のビーム経路に挿入したヨウ素蒸気を分光した画像である図 3-2b より明白である。

セルは、室温（25℃）であり、マルチパス（2mのパス長さ）を用いている。結果から見られるように、数々のモードは、ヨウ素の様々な吸収遷移により減衰される。室温環境において、ヨウ素蒸気のドップラー広がり線幅は400MHzであるが、分光器の分解能により1~2GHzの線幅となる。

次に、個々のコムモードの絶対周波数の較正を行った。今回は、He-Ne レーザーを用いて絶対周波数の較正を行っている（He-Ne レーザーの周波数474,612.353604GHz [4]）。このレーザーは、シングルモードファイバにおける周波数コムと重複し、同じVIPA/回折格子分光器を介して伝搬する。その出力は強いため（VIPA出力の3桁に相当する）、容易に判別できる（図3-2bに丸で囲まれている）。高速検出におけるHe-Ne レーザーとフィルタリングした周波数コムとの同時ヘテロダイン測定は、モード次数 n と絶対周波数較正を可能にする。VIPA イメージの隣接する列は、線形周波数軸上のデータを表示するように連結することができ、図3-2b下部の矢印間における7つの列の間で行った結果を図3-3に示している。図3-3のプロットの各々における線（赤色）は、未処理のCCDイメージに沿ってライトレースを連結することから得られる。上部軸は、CW レーザー分光法から得られたヨウ素透過スペクトルをプロットしている（ブルー）。ヨウ素遷移と一致する各モードは減衰し、その結果、定量的かつ正確な結果を得るためのこの技術の可能性を実証した。

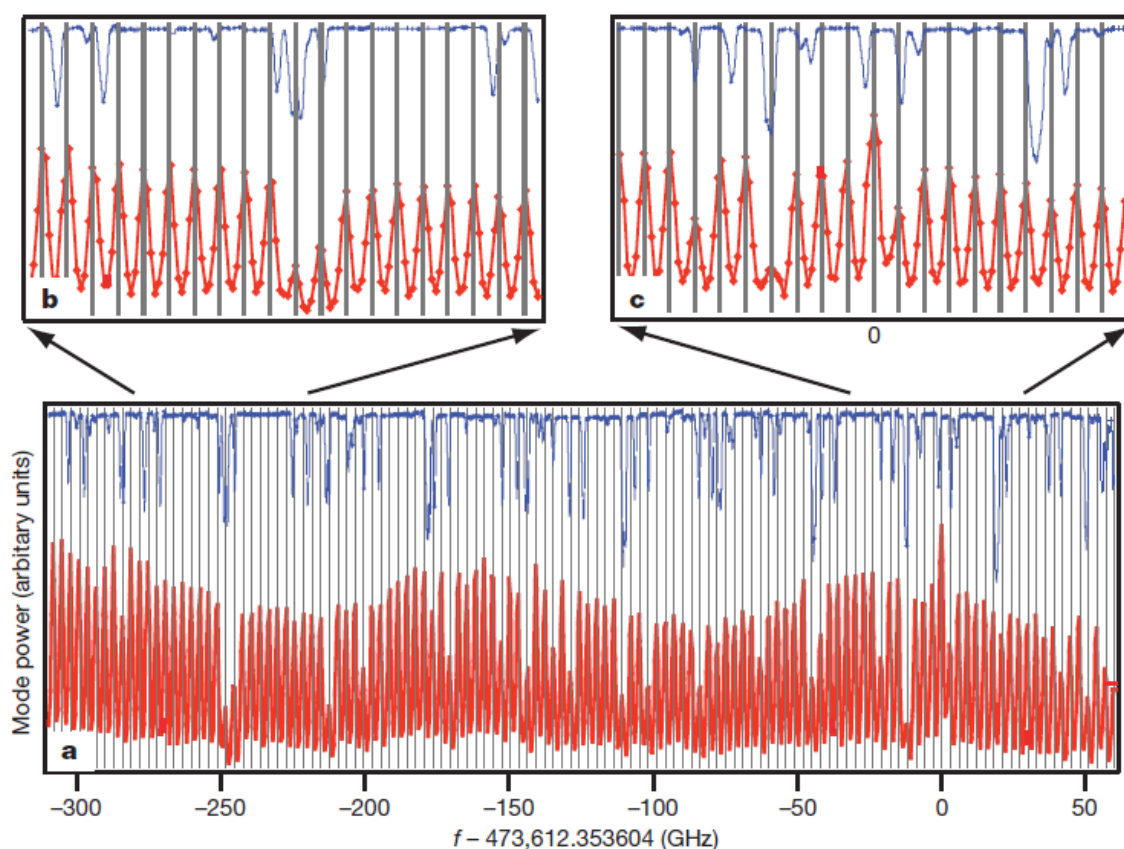


図 3-3 a. ヨウ素蒸気の吸収スペクトル b, c. a の拡大図

図 3-3 のデータにおける強度ピークの幅は、474THz における分光器の分解能が、計算した分解能の 2 倍以下である 1.2 GHz であることを示している。これは約 440 MHz に対応したカメラの画素分解能と一致している。レーザーの繰り返し周波数を走査することで、研究のシステムに適した分解能でフルスペクトルをスキャンすることが可能になる。図 2c は、同じスペクトル領域であるが異なる繰り返し周波数で計測したイメージであり、図 2b との違いが明確に見られる。また、異なる繰り返し周波数で取得した画像からライントレースを比較することによって、定量的に評価することができる。繰り返し周波数を 700Hz ずつ変え、帯域 30GHz 以上のスペクトルを図 4-4 に示す（光領域において 330MHz（約 47 万次のため）に対応する）。このように、特定の吸収特性をマッピングすることができる。コンピュータ制御の下での繰り返し周波数の高速チューニングは、フレームレートにおいて、ドップラー限界分光のための適切な分解能（200 MHz）で、テラヘルツ領域のスキャンを可能にする。

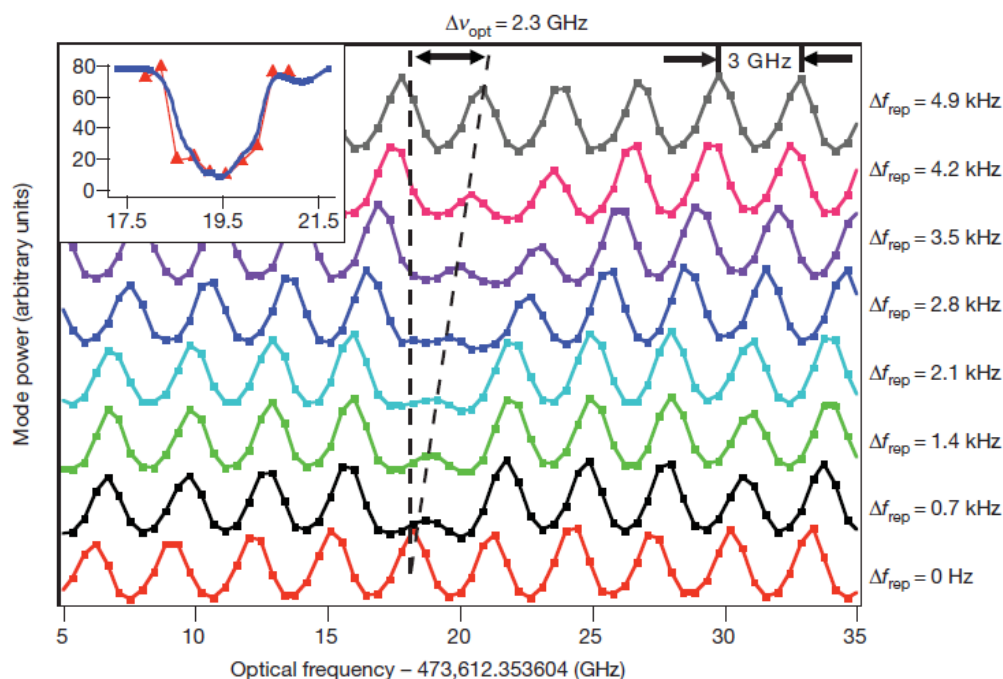


図 4-4 繰り返し周波数 700Hz ずつ変化させたときの各スペクトル

3-4. まとめ

VIPA と回折格子による分光器を用いて、ヨウ素蒸気の分光を行った。今回の手法は、安定化された周波数コムを空間的に分離して、各モードを検出する手法であり、CW レーザー分光技術のほとんどの応用することが可能である。

4. 「Mid-infrared virtually imaged phased array spectrometer for rapid and broadband trace gas detection」 [5]

4-1. イントロダクション

分子振動を示す領域である中赤外（MIR）における周波数コム分光法は、環境モニタリング、健康、安全、化学診断など、様々な分野への応用が進んでいる。これまで、MIR コム分光法は、点検出器、もしくは CCD 検出を行うために、近赤外へのアップコンバージョンが行われてきた。点検出は、シンプルであり、優れたスペクトル分解能と速い測定時間といった利点を有するが、検出器の飽和による信号対雑音比の制限といったデメリットがある。一方、マルチチャンネルの信号を用いる検出器アレイでは、スペクトル帯域幅および早い測定時間を維持しつつ、検出器の飽和を軽減する。そこで本論文では、InSb アレイ検出器を用いた VIPA 分光器に基づく MIR 分光器について紹介する。分光器の分解能、感度、ノイズ特性を評価し、ガス分光により、時間分解能及び広帯域化について解析を行っている。

4-2. 実験光学系

図 1(a) に実験光学系の概要を示す。フェムト秒光パラメトリック発振器（OPO）は、繰り返し周波数 100 MHz で安定化されており、波長を 2.5~4.5 μm まで可変な広帯域光源である。また、差周波発生に基づいた数 MHz の線幅を持つ CW 光源を用いて、VIPA 分光器の分解能およびスペクトル範囲（FSR）の測定を行う。VIPA 板にはシリコンを使用している(0.8mm thick, $n \sim 3.43$ @ 3.3 μm)。

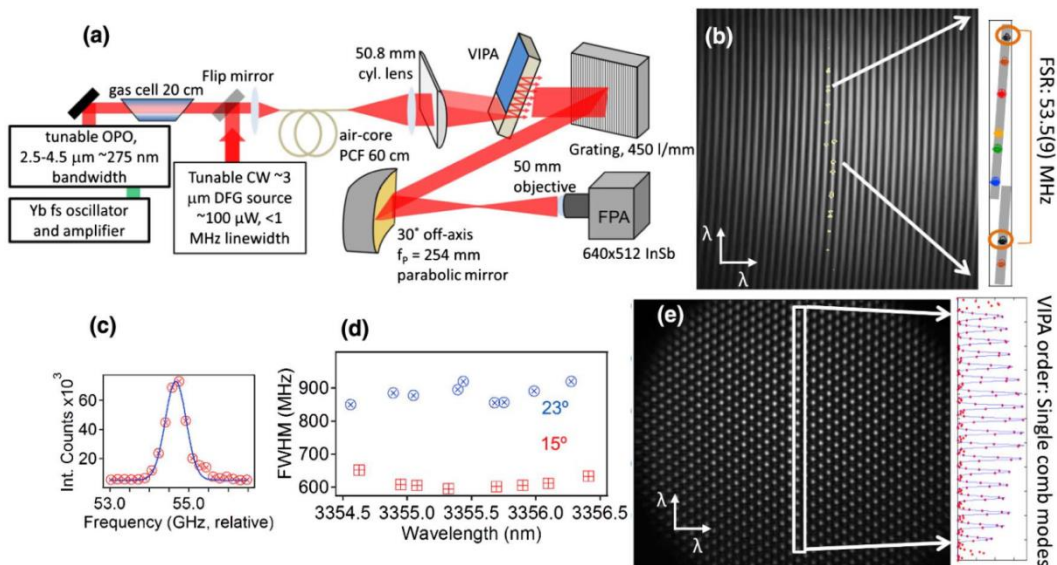


図 4-1 (a)実験光学系 (b)可変 CW レーザーの周波数を変化させ、重ねた図（縦の線）
(c)VIPA イメージから測定した CW レーザーの線幅 (d)入射角を変えたときの各波長にお

ける線幅の変化 (e)3.1 μm 周辺における繰り返し周波数 2GHz のコム の VIPA イメージ

出力側は反射率 97%~98% でコーティングされており、AR コーティングされた入射窓を除いて、入力側が高反射 (~99.8%) でコーティングされている。各回折光を分離するために、VIPA 出力は 450 l/mm の回折格子により水平に分散される。そして、液体窒素で冷却した InSb のアレイ検出器で 2 次元 (2D) イメージを記録する (640 \times 512 pixels, 20 μm pitch, 120 Hz maximum full frame rate)。図 2(b) に示すように、100MHz のコム間隔を有する広帯域 OPO 光の像は、VIPA 自由スペクトル範囲 (FSR) で区切られた垂直線として、検出器アレイ上に表示される。

4-3. 実験結果

4-3-1. ノイズ特性

MIR の VIPA の基本特性の評価を行った。まず、可変 CW レーザーを用いて、97% 反射率を持つ VIPA イメージシステムの分解能が ~600MHz になるように調整を行った。VIPA の FSR は、入射角 15 度における予測値 54.5GHz に近い値である 53.5GHz を実験で得た。そして次に、これらの結果を、3.8 μm 付近において 2.0GHz の MIR コム (キャビティフィルター 137MHz の OPO から発生) を用いて、VIPA 分散器において確認した (図 1 (e))。入射角 15 度、反射率が 98% の二つ目の VIPA においても、およそ 600MHz の分解能を得ている。コムモードのような周波数走査は、VIPA の代わりにコムの線幅によって MIR 分光器の分解能が与えられる。

微量サンプルを検出するためには、分光器のノイズ限界を解析することが重要である。図 4-2 は中心波長 3.1 μm における広帯域 MIR 光の 640 \times 514 イメージのノイズ特性を示している。OPO スペクトルの連続した 1500 の VIPA イメージから成るデータは、35 μs の積算時間と 8.3ms のリードアウト時間で取得する。ノイズ特性を定量的に評価するために $\epsilon = \ln(S_1/S_2)$ を計算した (S_1 , S_2 は連続するイメージ)。ここで、 ϵ は吸収ノイズフロアとする。図 4-2 は、平均数 N に対する ϵ の標準偏差を示している。シングルショット間の 5×10^{-4} のノイズフロアが、検出器のショットノイズ限界であることが明確に分かる。このノイズフロアは N の平方根で減少していくが、およそ 5 回の平均数における 2×10^{-14} のノイズフロアから、水平になっている。これはレーザーの出力の 1/f ノイズによるものである。さらに、MIR 光と同等のパワーを有する熱光源を用いた計測結果 (青線) から、この 1/f ノイズは InSb アレイによるものではないことが分かった。

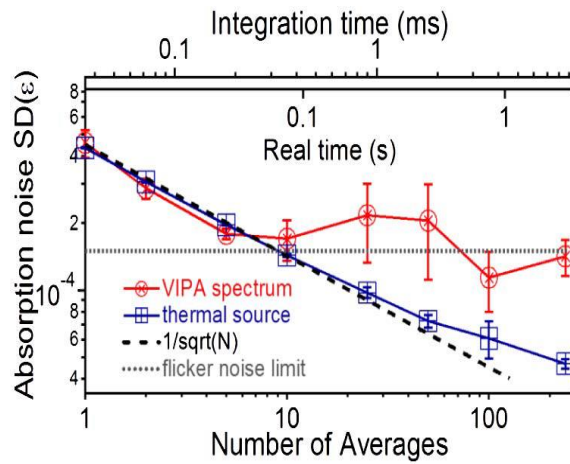


図 4-2 VIPA システムのノイズ特性

4-3-2. VIPA システムを用いた分光測定結果

図 4-3 に、20cm のガスセル中に N₂ (300Torr) ガス中のメタンガスの混合気体の分光測定結果を示す。VIPA の入射角は 15° であり、10 スペクトルの積算結果である（積算時間は 7μs）。図 3 のトップはバックグラウンドをサンプルイメージで割ったものを表示している。検出器の検出サイズの制限により、回折格子を回転させて OPO 光の 210nm の帯域を二つのイメージをつなげて合わせている。また、図 3 下の青い線は HITRAN のデータベースから計算したものであり、HITRAN と比較した結果、残差は 0.0017 程度であり、この要因は、セル中の不純物や不確定要素によるものであると判断した。

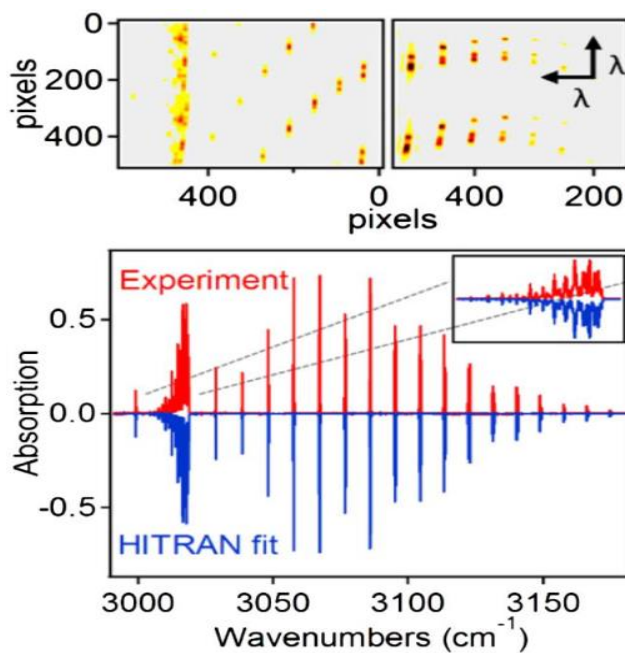


図 4-3 分光測定結果

4-3-3. シングルショット計測の評価

最後に、VIPA 分光器の高速かつ広帯域な検出能力を実証するために、20cm のセルをメタンで満たし測定を行った（フレームレート 2.67ms、320×320 ピクセル、帯域 50cm⁻¹）。図 4(a)は、メタンの吸収線を示しており、図 4(b)は一对の吸収線の時間変化を、吸収の強さを色で分けて表示している。測定時間が増えるにしたがって、吸収が強くなっているように見える。図 4(c)は、吸収の強さの時間変化を表している。

VIPA システムのダイナミック分光法の感度を評価するために、吸収線の時間変化から、ある時間を切り出し、フレームごとの吸収スペクトルを図 4(d)に示している。赤い線は、シングルショット（ $t=2.67\text{ms}$ ）での計測を示しており、ノイズフロアは図 2 のノイズの標準偏差とよく一致しており、 $\text{SN}\sim 5$ である。この結果から、吸収のメインピークは高速に検出することが可能であることが分かるが、サイドピークを明確に検出することはできていない。また、青い線は、二回積算した場合（ $t=5.34\text{ms}$ ）の吸収スペクトルを示しており、 $\text{SN}\sim 10$ である。サイドピークもノイズフロアより上にクリアに検出できている。

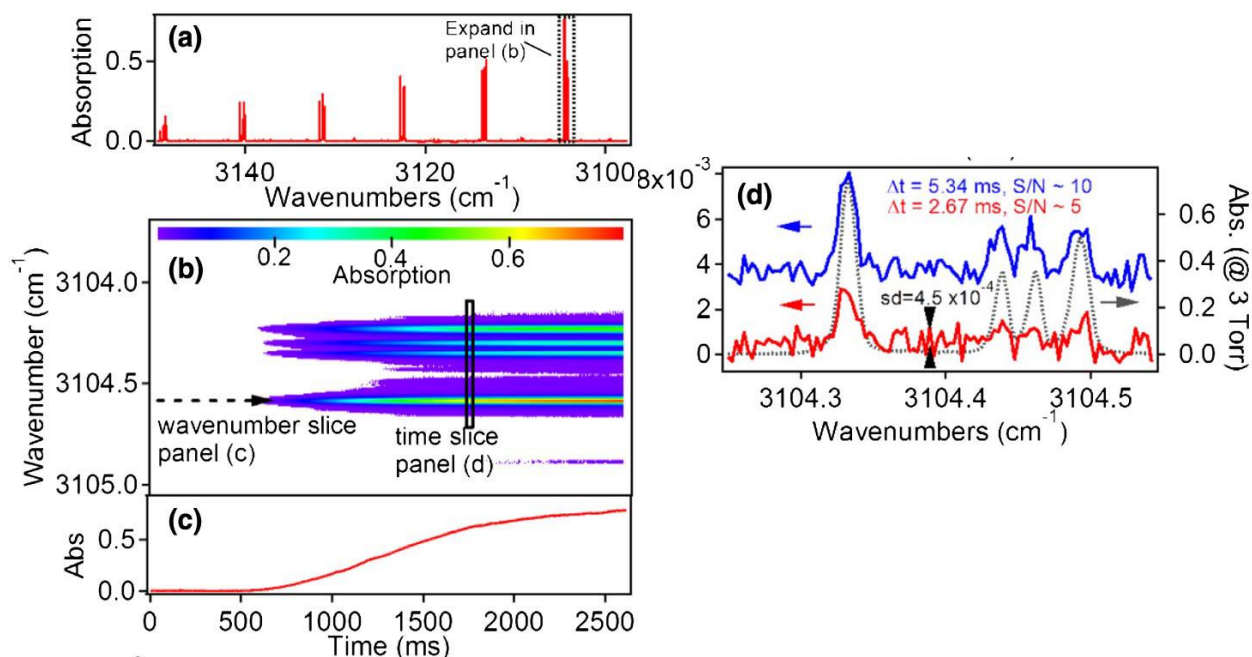


図 4-4 (a)1500 フレーム積算したメタンガスの吸収スペクトル (b)計測時間に対する吸収の強さ（波長ごと） (c)特定の波長における吸収の強さの時間変化 (d) $t=2.67\text{ms}$ における吸収スペクトル（赤）、 $t=5.34\text{ms}$ における吸収スペクトル（青）、破線は 3Torr のメタンの吸収スペクトル

4-4. まとめ

CW レーザーを用いて、VIPA 分光器の基本特性を調べ、検出限界について評価した。メタンの分光実験を行い、本装置の正確性が実証された。フレームごとのイメージの評価を

行い、ダイナミック分光法を実証した。

5. まとめ

VIPA の原理・基本特性について説明した。VIPA を用いた光ファイバの分散補償技術、さらに第 2 の分散素子として回折格子を用いることにより、周波数コム の 2 次元分離を可能にし、アレイ検出による分光法について紹介した。

参考文献

- [1] M. Shirasaki, *Optics Letters*, **21**, No.5, 366(1996)
- [2] Scott A. Diddams, Leo Hollberg & Vela Mbele, *Nature*, **445**, 627(2007)
- [3] Xiao, S. & Weiner, A. M., *Opt. Express* **12**, 2895–2901 (2004).
- [4] Quinn, T. J. *Metrologia* **40**, 103–133 (2003).
- [5] Lora Nugent-Glandorf, et al, *Optics letters*, **37**, No.15, 3285(2012)