東海大学紀要工学部
vol.49,No2,2009,pp.25-28

2ビームファイバ照射を用いた半導体レーザ速度計

猪狩直志*1，アナス ルクマン ビン ムハマド*2，三上修*3

Laser Diode Velocimeter Using 2-Beam Fiber Irradiation

by

Naoyuki IGARI*1, Anas Luqman Bin Muhamad*2, and Osamu MIKAMI*3

(Received on Sep. 18, 2009 and accepted on Jan. 25, 2010)

Abstract

Two-beam fiber irradiation scheme enables Doppler velocity measurement using a laser diode without the information on the irradiation angle which is indispensable for calculating the object velocity from Doppler-shift frequency. By using the reflected beam from the fiber end as the reference beam, the measurement system can also be made very simple and compact. In this paper, this scheme was demonstrated using a pig-tail 1.55μm DFB laser diode and a 3-dB fiber coupler. It was confirmed that highly precise velocity measurement can be carried out with the measured first and second frequencies. A new application of the third frequency induced by crossover optical return was also discovered.

Keywords: Semiconductor laser, Doppler effect, Optical fiber, Velocimeter

1. はじめに

光計測技術の一つであるレーザドップラ速度計(Laser Doppler Velocimeter : LDV）は光のドップラ効果を利用した速度測定器であり，高空間分解能，広帯域測定，実時間測定，非接触測定が可能という特長を有している．しかしながら，従来の方式ではビームスプリッタ，レンズなどの光学素子を複数必要とし，装置の高コスト化，肥大化へと繋がってしまっていた．さらに測定ターゲットまでの照射角度設定が複雑で柔軟性に欠けるなど，簡易運用が不可能であった．

これに対して，ファイバを用いた自己混合型半導体レーザ速度計は LD（半導体レーザ）からのレーザを光ファイバによって測定対象物に照射させ，その戻り光を同一光ファイバで受け止める[1]．光路を逆に辿った戻り光は LD 内でレーザと自己混合することでビート波となる．それを LD 内部のモニター用 PD（フォトダイオード）で受光し,電気スペクトラムアナライザでドップラシフト周波数を計測するという流れをとることから，ファイバ使用による照射と受光の一体化という光学系の簡略化が得られ，フレキシブルであるファイバの特徴から，従来方式に比べて数段に小型化，簡易運用が可能という優位性を得た．しかしながら，自己混合型半導体レーザ速度計は，使用する LD にアイソレータがあってはビート波を発生させることができず，一般的な通信用ＬＤモジュールを用いることができなかった．加えて，ビート波検出用にモニター用 PD を用いるため，SN 比に限界が生じていた．

この課題を解決するために，今回我々は自己混合効果を使用しない，ファイバ端面で生じる反射光を参照光として用いた 2 ビームファイバ照射型半導体レーザ速度計を提案する．この方法を用いることで，速度の方向が変化する対象物であっても 2 ビームを含む面内の分速度の大きさを容易に測定できる．また，実験において確認された第 3 の周波数(Crossover frequency)を利用することで測定精度を改善できる目安を得た．加えて，レーザ光源，ビート波検出用のディティクタ選択にも柔軟性が生まれ，小型化，低コスト化，高機能化，高精度化のバランスが良い装置が実現できた．本稿では，その測定原理，実験結果について報告する．

2. 従来型 LDV

まず，Fig.1 に示した 1 ビーム照射型 LDV を例にして LDV の原理を説明する．光源となるレーザを角度 θ で速度測定ターゲットに向けて照射する．ターゲット表面で散乱した光を散乱角度 $\alpha=\pi$ で LD 内のモニター用 PD を使用して受光する．ターゲットからの散乱光が光源に戻ることにより生じる自己混合によって，ビート波が発生し，そのビート波を電気スペクトラムアナライザなどで観測する．これによって得られたドップラシフト周波数と照射角度の情報を用いて対象物の速度を求める．この時，ドップラシフト周波数 f_d は式(1)で表され，速度 v について解くことにより式(2)で示すことができる．1 ビーム照射型 LDV を用いることで光源の LD と受光器である PD とを一体化でき，光学系がシンプルになる．しかしながら，ターゲットへの照射角度情報 θ は常に既知でなければならず，ターゲットとの角度が変化する場合には対応できない．

*1 工学研究科情報通信制御システム工学専攻修士課程
*2 情報理工学部情報通信電子工学科学部生
*3 工学部光・画像工学科教授

$$f_d = \frac{2v}{\lambda}\cos\theta \tag{1}$$

$$v = \frac{f_d \lambda}{2\cos\theta} \tag{2}$$

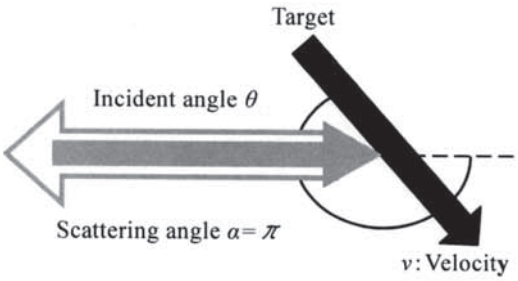


Fig.1 Principle of LDV with one beam

3. 2ビームファイバ照射型LDV

3.1 原理

1ビーム照射型自己混合型LDVの抱えている問題に対し，我々は2ビームファイバ照射型LDVを提案する．Fig.2に測定原理を示す．測定ターゲットの速度をv，光源となるレーザの波長をλ，2ビームの照射角度をそれぞれθ_1, θ_2とすると，ドップラシフト周波数f_1, f_2は以下の式で表すことが出来る．

$$f_1 = \frac{2v}{\lambda}\cos\theta_1 \tag{3}$$

$$f_2 = -\frac{2v}{\lambda}\cos\theta_2 \tag{4}$$

ここで2ビームのオフセット角度$\Delta\theta$は

$$\Delta\theta = \pi - (\theta_1 + \theta_2) \tag{5}$$

式(3)，(4)，および(5)より，速度vについて求めると以下の式となる[1]．

$$v = \frac{\lambda}{2\sin\Delta\theta}\sqrt{f_1^2 + f_2^2 - 2f_1 f_2 \cos\Delta\theta} \tag{6}$$

式(6)の解には光源の波長λ，ドップラシフト周波数f_1, f_2に加えてオフセット角度$\Delta\theta$が必要になる．試作したLDVでは，電気スペクトラムアナライザ上でドップラシフト周波数f_1, f_2の測定を行っているため，それら符号の識別が出来ない．そのため，速度の大きさが

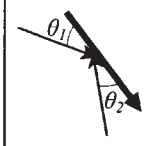
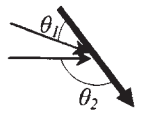
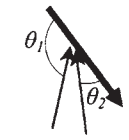
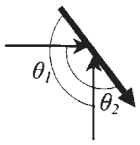
$$v = \pm\frac{\lambda}{2\sin\Delta\theta}\sqrt{f_1^2 + f_2^2 + 2f_1 f_2 \cos\Delta\theta}$$

の場合と

$$v = \pm\frac{\lambda}{2\sin\Delta\theta}\sqrt{f_1^2 + f_2^2 - 2f_1 f_2 \cos\Delta\theta}$$

の場合のいずれであるか決められない．これを避けるには$\Delta\theta$=90°に設定するか，照射角度θ_1, θ_2についてあらかじめTable.1に示す4通りのうちのどれに属するのかを知って，f_1, f_2の符合を決めておかなければならない．

Table.1 Special cases for two beam irradiation

1)	2)	3)	4)
			
$0<\theta_1<\pi/2$ $0<\theta_2<\pi/2$	$0<\theta_1<\pi/2$ $\pi/2<\theta_2<\pi$	$\pi/2<\theta_1<\pi$ $0<\theta_2<\pi/2$	$\pi/2<\theta_1<\pi$ $\pi/2<\theta_2<\pi$
$f_1<0$ $f_2>0$	$f_1<0$ $f_2<0$	$f_1>0$ $f_2>0$	$f_1>0$ $f_2<0$

また，2ビーム照射型LDVに関して，ドップラシフト周波数f_1, f_2とは別に第3の周波数f_3が発生する．それはビーム1の散乱光がビーム2の光路に入射するパターンが存在するためである．ビーム2の散乱光にも同じ現象が存在する．このドップラシフト周波数f_3は式(8)のようにf_1, f_2の中央に生じることが分かる．加えて，f_3は交差する2つの入射光の交わる測定体積部分でターゲットを捕らえた場合にのみ発生する．

$$\begin{aligned} f_3 &= \frac{2v}{\lambda}\cdot\sin\left\{\pi - \frac{\theta_1+\theta_2}{2}\right\}\cdot\sin\left\{\theta_1 + \pi - \frac{\theta_1+\theta_2}{2}\right\} \\ &= -\frac{2v}{\lambda}\cdot\sin\frac{\theta_1+\theta_2}{2}\cdot\sin\frac{\theta_1-\theta_2}{2} \end{aligned} \tag{7}$$

これを三角関数の公式で変形することによって，

$$\begin{aligned} f_3 &= \frac{1}{2}\left(\frac{2v}{\lambda}\cos\theta_1 + \frac{-2v}{\lambda}\cos\theta_2\right) \\ &= \frac{1}{2}(f_1 + f_2) \end{aligned} \tag{8}$$

となる．また，この式(8)で与えられる第3周波数発生の有無によって，2ビーム照射における照射位置の確認に利用できる．測定ターゲットが固体の場合，第3周波数の情報はとくに必要としないが，後述するように，液体速度の測定では，この情報は測定位置の精度向上に有効である．これらにより，簡易で応用性の広いLDV構成が可能となる．

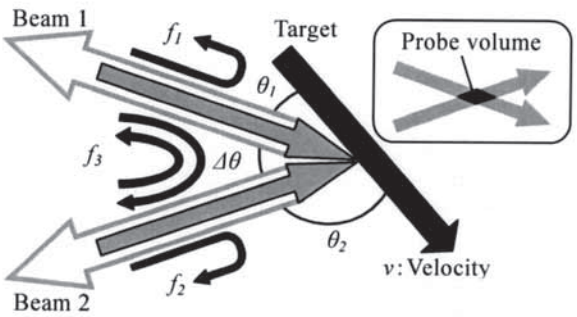


Fig.2 Principle of LDV with two beam

3．2　実験系

2 ビーム LDV の測定原理に基づき，半導体レーザと光ファイバを用いた LDV の構成を行った．実験系を Fig.3 に示す．光源には単一縦モードを実現するため，波長 1.545[μm]，可干渉距離 10m の DFB-LD を用いた．光源から発振したレーザは DFB-LD のピッグテール PANDA ファイバを伝搬し，コネクタを用いて 3dB-SMF カップラへ入射され，2 ビームに分割される．

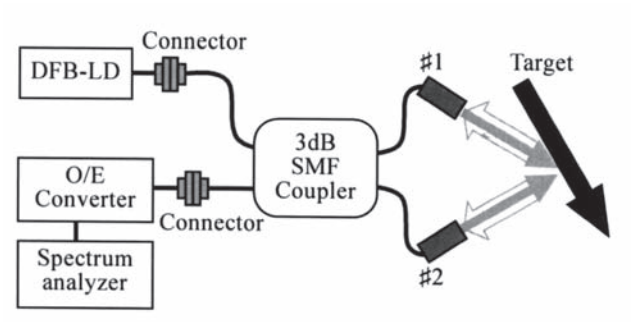


Fig.3 Experimental setup of two beam LDV using a 3-dB fiber coupler

2 ビーム先端は SC コネクタ形状になっており，そこに可変集光可能な両凸レンズを取り付けている．Fig.4 に光学ヘッドの構成を示す．レンズは SC コネクタが固定される形状となっており，レンズ部分を回転させることで入射光の集光距離を変化させることができる．これを用いて，光学ヘッド内のファイバ端面からの戻り光を参照光として作用させる．

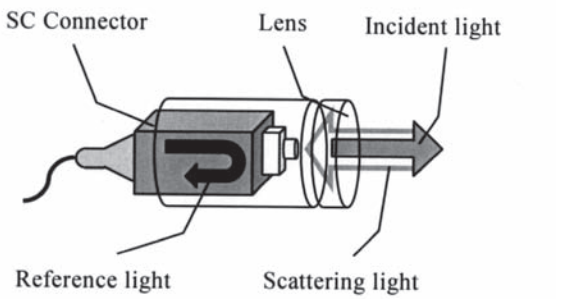


Fig.4 Composition of the optical head

DFB-LD に注入電流を印加し，発振させた状態では，2 つのポートのうち#1 の光強度は 620μW であり，#2 の光強度は 630μW であった．実験における集光距離はレンズ端からターゲット表面までを設定した．レンズによって集光された入射光はターゲット表面で散乱し，その散乱光が両凸レンズに再入射する．散乱光と SC コネクタ端面で反射した参照光が光路を逆に辿る．このときの参照光の光強度は 17μW，信号光と参照光の合計は 44μW であった．そしてカップラ後方に配置した O/E コンバータにて散乱光と参照光の重畳によりビート波が発生し，同時に光電変換と信号増幅が行われる．その信号を電気スペクトラムアナライザで観測することにより，#1，#2 のポートによって得られた 2 つの独立したドップラシフト周波数の観測が可能となる．

Fig.5 に電気スペクトラムアナライザで観測された波形を示す．第 3 の周波数 f_3 は 2 つのドップラシフト周波数 f_1，f_2 値の中間に存在し，3 つの周波数 f_1，f_2，f_3 は式(8)の示す通り，等間隔であることを確認した．

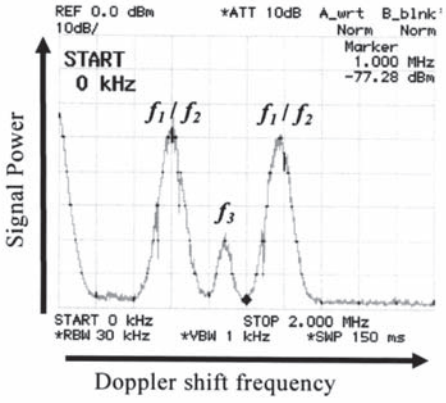


Fig.5 Observed spectrum for two-beam irradiation

4.　速度測定実験

4．1　速度測定追従性

Fig.6 に測定ターゲットの速度を変数とした場合の測定結果を記す．測定に用いたターゲットは円柱物体上面部分（平面）とし，2 ビームのオフセット角度 $\Delta\theta$ を 25°に設定して 2 ビーム照射を行った．回転するターゲットの測定点における速度ベクトル方向は 2 ビームを含む面内に設定した．ドップラシフト周波数 f_1，f_2，f_3 の電気スペクトラムアナライザ上での値は測定ターゲットの速度変化により，式(3)，(4)，(7)に従って変化することを確認した．さらに式(6)による最終的な LDV 速度計算結果と市販の回転計によって求めた速度（理論値とする）を記す．第 3 周波数 f_3 の同時観測により，2 ビームの照射角度を厳密に設定できたことで 2～3%と低い誤差率を実現できた．

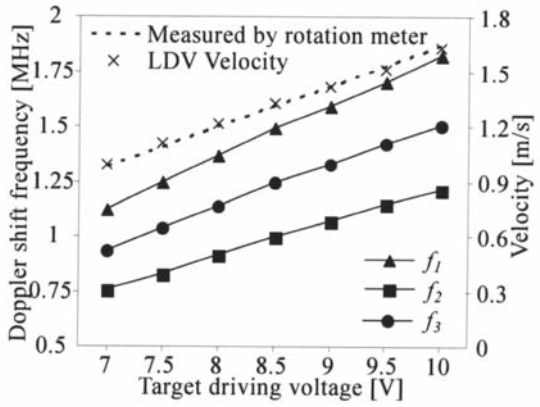


Fig.6 Experimental result

4. 2　照射角度変化実験

Fig.7 に 2 ビームにおける照射角度 θ_1 を変数とした場合の測定結果を記す．測定ターゲットは先ほどと同じ円柱物体上面(平面)であり，それを駆動するモータの電圧は7.0[V]で固定した．2 ビームのオフセット角度 $\Delta\theta$ は 25° に固定して設定する．回転するターゲット測定点での速度ベクトル方向は 2 ビームを含む面内に設定した．結果より，同一速度で動くターゲットにおいて，ドップラシフト周波数 f_1, f_2 は照射角度 θ_1 に依存する形で値を変えていくことを確認した．加えて，式(6)による最終的な LDV 速度測定結果と市販の回転計によって求めた速度（理論値とする）を記す．2 つの速度値の誤差率は 2～3% であった．以上により既知のオフセット角度 $\Delta\theta$ での 2 ビーム照射型 LDV が照射角度 θ_1 が多様に変化する場合においても，速度測定デバイスとして有用であることを確認した．

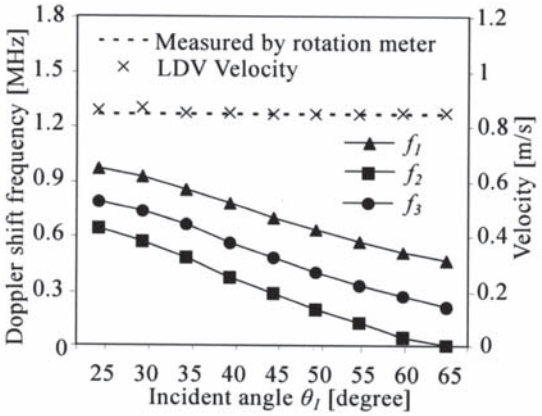


Fig.7 Experimental result

5.　第 3 周波数応用についての考察

3.1 で示したように．2 ビーム LDV の速度算出に影響を及ぼさない第 3 の周波数 f_3 が存在するが，2 ビーム照射型 LDV の測定精度を向上させる照射位置確認の利用方法以外について検討を行った．ここで考察する方式においては，照射角度 θ_1 の情報が必要となるが，2 ビームの応用の一例として考察したものである．Fig.8 に測定原理を示す．

Fig.8(a)のように，配管などの管壁に対し平行である速度ベクトルを持った水流を考える．このように，ポジション v_1, v_2, v_3 において流速が異なる水流に対し，本稿で示した 2 ビーム LDV を用いようとする場合，Fig.8(b)のように電気スペクトラムアナライザ上でのドップラシフト周波数 f_1, f_2 は v_1, v_2, v_3 に対応した波形を同時に表示してしまうことになり，各ポジションにおけるドップラシフト周波数の識別，速度算出が困難になってしまう．そこで我々は，水流測定などにおいて，片方 90° 照射型 2 ビーム LDV を提案する．

Fig.8(a)のように，水流に対して 2 ビームの片方を照射角度 90° に設定する．この場合，式(3)よりドップラシフト周波数 f_1 は 0[Hz]となるため，電気スペクトラムアナライザ上で f_1 をモニタリングすることで角度設定に関して柔軟性を得ることが可能である．次に，もう片方のレーザをポジション v_2 に向けて照射する．すると，Fig.2 に示す測定体積部分が生まれる．この部分を水流が通過することで，電気スペクトラムアナライザ上で測定体積部分でのドップラシフト周波数 f_3 が発生する．最終的にこの条件時の $2f_3$ の値を f_2 と定めることで Fig.8(c)のように瞬時的な 2 つのスペクトル値 f_1, f_2 が確定し，ポジション v_2 における速度算出が可能となると考えられる．

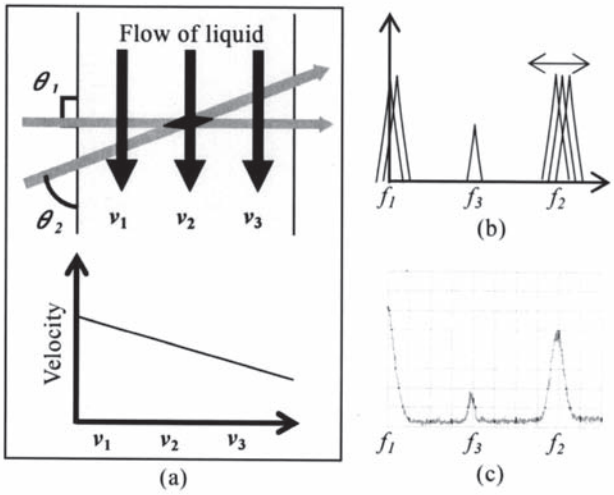


Fig.8 Application method to water current speed

6.　まとめ

本論では，光ファイバ端面からの反射光を参照光とする LDV の提案を行い，さらに広い応用性を実現するべく 2 ビームファイバ型 LDV の提案をした．2 ビームのオフセット角度を既知として測定ターゲットに照射することにより，正確な照射角度決め無しで速度測定が可能である．さらに，第 3 周波数の利用により，装置の測定誤差低減の可能性を示した．さらに流速分布を持つ流れに対して，測定ポジションの確定に有効であることを示した．

以上より，2 ビームファイバ型 LDV は非常に簡易な構成でありながら，高精度な速度測定が可能であることを示した．今後は，測定ターゲットを固体から液体へと変え，流速測定を検討していく予定である．

参考文献

1)今村峰宏，瀬間久稔，井藤嘉泰，三上修，“2 ビーム照射による自己混合型半導体レーザー速度計“，光学，vol.30(2001)，No.11，pp.748-753.

2)木下勝弘，永田浩司，三上修:周波数変調した自己混合半導体レーザによる速度測定，第 53 回応用物理学関係連合講演会，25a-ZD-11，2006.3.

3)小竹佑治，小寺博，角正雄:正弦波変調自己混合半導体レーザによる距離測定，電子情報通信学会総合大会，C-229，1996.