

ファイバ型位相変調素子を用いた スペクトル線幅測定法におけるプッシュプル駆動方式

Push-Pull Drive Method in Linewidth Measurement System with Fiber Type Phase Modulators

小森 大喜†, 木村 悠人†, 森 正和†
Daiki KOMORI†, Yuhto KIMURA†, Masakazu MORI†

Abstract : Push-pull drive method in linewidth measurement systems with fiber type phase modulators is developed. Firstly, we discuss the operation of a fiber type phase modulator. Then the principle of a frequency shifter, which consists of a fiber type phase modulator and a fiber coupler, is described. Secondly, we describe the operation of the push-pull drive method, which arranges an ultrasonic transducer at each end of a fiber loop. Finally, the performance of the push-pull drive method is evaluated by measuring linewidths of several laser diodes. With the push-pull drive method, the carrier component and the second side band components are suppressed by about 10dB.

1. はじめに

レーザ技術の進歩により、光が持つエネルギーを利用する手法のみならず、波としての性質を利用する手法の進展が著しい。特に後者については、無線通信で用いられている方式が、ほぼそのまま光領域でも実現されるようになってきた。

トランジスタに代表されるエレクトロニクス技術では、変調、復調、周波数通倍、周波数混合、などの重要な機能は波動性と非線形性を利用するものである。光技術もこの方向に進んでいくと予測される。半導体レーザ (LD) について考えると、如何にスペクトル線幅を狭くするかが益々重要になってくる。また、その測定法や測定機器の開発も必要である。

LDのスペクトル線幅を測定する方法として、遅延自己ヘテロダイナ法が広く知られている¹⁾。この方法は、RFスペクトラムアナライザを用いることによって、レーザスペクトルを直視できるという利点がある。一方で、音響光学効果を用いた周波数シフタのコストが高いといった問題がある。

筆者らは、スペクトル線幅が 1MHz 以下の 1.55 μ m 帯 LD に適用できる、低コストで汎用性のあるスペクトル線幅測定法の開発を進めてきた²⁻⁶⁾。本報告では、超音波振動子による位相変調を利用した周波数シフタの原理、およびそれを用いたスペクトル線幅測定系とその結果について述べる。

2. ファイバ型位相変調器を用いた周波数シフタ

2.1 位相変調の大きさ

円環型の超音波振動子に偏波保持ファイバの素線を巻くことにより、位相変調素子として用いることができる²⁾。変調角周波数を ω_m とすれば、 φ_0 を定数として、単位長さ当たり $\varphi_0 \sin(\omega_m t)$ の位相変調が、ファイバに沿って一様に加えられと仮定できる。図2.1のように、光波の伝搬速度を考慮して、振動子に巻いたファイバの各部で生じる位相変調をベクトル的に加え合わせればよい。その結果、ファイバ型位相変調素子を通過する光波が受ける位相変化は、次式で与えられる最大位相偏移 θ_m の位相変調が変調領域の中央に集中して作用することと等価になる⁴⁾。

$$\theta_m = \varphi_0 \ell \frac{\sin \{(\omega_m \ell)/(2v)\}}{(\omega_m \ell)/(2v)} \quad (2.1)$$

ここで、 ℓ はファイバ長、 v は光の群速度である。

$(\omega_m \ell)/(2v) \ll 1$ であれば、最大位相偏移 θ_m はファイバ長 ℓ に比例する。この条件は、変調周波数が 10MHz のときには、 $\ell \ll 6.6$ m となる。

2.2 ファイバ型位相変調器の高周波駆動

超音波振動子には、小型で且つ静電容量が小さいものを用いた(タムラ製作所 TBLE3015、外径 30.0mm ϕ 、内径 14.7mm ϕ 、厚さ 5mm、静電容量 1.3nF)。この振動子の径方向共振周波数は 48kHz であるが、高周波で駆動するほど不要

† 愛知工業大学 工学部 電気学科(豊田市)

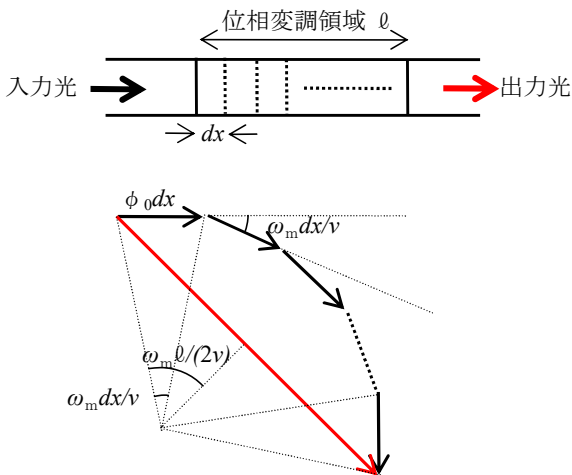


図 2.1 超音波振動子による位相変調の大きさ

スペクトル成分による漏れ込みを抑えることができるため、MHz 領域での駆動可能性を調べた⁵⁾。

インピーダンスの周波数変化から、10MHz までは、ほぼ 1.42MHz の奇数倍で鋭い直列共振が起きていることが分かった。10MHz を越えると、インピーダンスの目立った変化は見られなかった。

PANDA ファイバを 10 巻し、confocal Fabry-Perot 干渉計 (フリースペクトルレンジ=300MHz、フィネス=200) で位相変調波の周波数スペクトルを観測して、最大位相偏移を求めた。

クラッド径やジャケット径が異なる数種類の PANDA ファイバを用いて、最大位相偏移の大きさを比較した結果を表 2.1 に示す。これから、高い変調周波数で動作させるためには、クラッド径とジャケット径が細い PANDA ファイバを用いればよいことが分かる。

表 2.1 種々の PANDA ファイバの最大位相偏移

項	モードフィールド径/ クラッド径/ジャケット径	駆動周波数 [MHz]	最大位相偏移 [rad]@100Vp-p
1	9.5/80/165	7.139	0.74
		9.984	1.15
2	10.5/125/245	7.139	1.07
		9.984	0.21
3	10.5/125/400	7.139	0.31
		9.984	0.23

2.3 ファイバループによる偶数側波帯の抑圧

光波の中心角周波数は ω_0 で、位相は $\theta(t)$ であるとする。cw 駆動の半導体レーザーでは、スペクトル線幅は位相 $\theta(t)$ の揺らぎによって決まる。この光波に正弦波位相変調を施すと、次式のように多数の側波帯成分が発生する。

$$\exp[j\{\omega_0 t + \theta(t) + \theta_m \sin(\omega_m t)\}]$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\theta_m) \exp[j\{(\omega_0 + n\omega_m)t + \theta(t)\}] \quad (2.2)$$

通常は、遅延自己ヘテロダイン法における信号光として、 $n=+1$ または $n=-1$ の側波帯成分を取り出して用いる¹⁾。一方、(2.2)の位相変調波について、遅延自己ヘテロダイン法における出力電流のスペクトルを文献 7 に従って計算すると、 $n=\pm 1$ の側波帯成分を両方用いれば、 $n=+1$ または $n=-1$ のみを用いた場合と同じスペクトル形状でパワーが 2 倍になることが分かる。そこで本研究では、超音波振動子とファイバループ⁸⁾を組み合わせると $n=\pm 1$ 以外の成分を抑圧する手法を検討してきた²⁾。

超音波振動子を 1 個用いた場合の構成を図 2.2 に示す。分岐比 1:1 のカップラで分かれて左回りする光波は、分岐直後に振動子によって位相変調を受けて側波帯成分を生じる。これに対して、右回りする光波は、ファイバループを一周してから側波帯成分を生じる。ファイバループを一周する時間が振動子の変調周波数 f_m の半周期の奇数倍になれば、二つの光波は π だけずれた正弦波位相変調を受けてファイバカップラに戻ってくる。

$$\text{左回り: } \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\theta_m) \exp[j\{(\omega_0 + n\omega_m)t + \theta(t)\}]$$

$$\text{右回り: } \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(-\theta_m) \exp[j\{(\omega_0 + n\omega_m)t + \theta(t)\}]$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n J_n(\theta_m) \exp[j\{(\omega_0 + n\omega_m)t + \theta(t)\}] \quad (2.3)$$

搬送波成分、および偶数次の側波帯成分は左回りと右回りで位相差がないため、ファイバループによって全反射される。一方、奇数次の側波帯成分は逆位相であるので、ファイバループを通過する。 $n=\pm 1$ の成分のみならず、 $n=\pm 3, \pm 5, \dots$

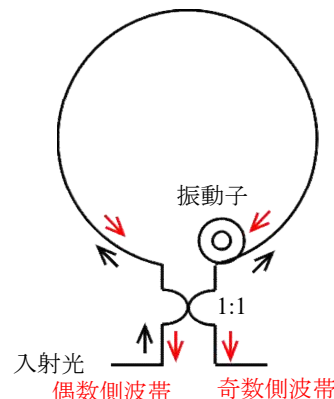


図 2.2 ファイバループによる不要成分の抑圧

の成分もファイバループを通過するが、最大位相偏移 θ_m が極端に大きくなければ、実用上はこれらを見捨てる。

一方、ファイバループを一周する時間が振動子の変調周波数 f_m の半周期の奇数倍からずれている場合には、左回りと右回りの光波が受ける正弦波位相変調の振幅は等しいが、位相差は π にはならない。そのため、搬送波成分や偶数側波帯成分もファイバループを通過してしまう。

3. プッシュプル駆動方式

前節で述べたように、超音波振動子を 1 個用いた周波数シフタでは、ファイバループ長に制約がある。そこで、ファイバループ長によらずに不要な側波帯成分を除去できる方法として、ファイバループの対称な位置に 2 個の振動子を配置し、各振動子にて等振幅で逆位相の位相変調を加えるプッシュプル駆動方式を検討した。

ファイバループ内に振動子を 2 個配置する構成は既に報告している³⁾。当初は最大位相偏移を大きくすることにのみ着目していた。今回は、不要成分抑圧という観点から検討し直した⁶⁾。

3.1 原理

プッシュプル駆動による周波数シフタの原理を図 3.1 に示す。ファイバループの両端から等距離の点 A、B に振動子を配置する。A 点を通り右回りに伝搬する光信号を AR、B 点を通り左回りに伝搬する光信号を BL とする。

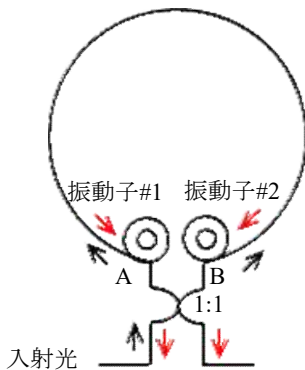


図 3.1 プッシュプル駆動の周波数シフタ

時刻 t に A 点を通過する光信号が受ける位相変調を $\theta_{Am} \sin(\omega_m t + \varphi)$ 、時刻 t に B 点を通過する光信号が受ける位相変調を $\theta_{Bm} \sin(\omega_m t)$ とする。このとき、時刻 t に B 点を通過した光信号 AR が見る位相変調 $\varphi_{AR}(t)$ は、

$$\varphi_{AR}(t) = \theta_{Am} \sin\{\omega_m(t - \tau) + \varphi\} + \theta_{Bm} \sin(\omega_m t) \quad (3.1)$$

ここで、 τ は A \rightarrow B (または B \rightarrow A) の伝搬遅れ時間である。同様に、時刻 t に A 点を通過した光信号 BL が見る位相変調 $\varphi_{BL}(t)$ は、

$$\varphi_{BL}(t) = \theta_{Am} \sin(\omega_m t + \varphi) + \theta_{Bm} \sin\{\omega_m(t - \tau)\} \quad (3.1)'$$

$\varphi_{AR}(t)$ と $\varphi_{BL}(t)$ を複素ベクトルで表示すると次式となり、そのベクトル図は図 3.2 のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_{AR} &= \theta_{Am} \exp(-j\omega_m \tau) \exp(j\varphi) + \theta_{Bm} \\ \dot{\varphi}_{BL} &= \theta_{Am} \exp(j\varphi) + \theta_{Bm} \exp(-j\omega_m \tau) \end{aligned} \quad (3.2)$$

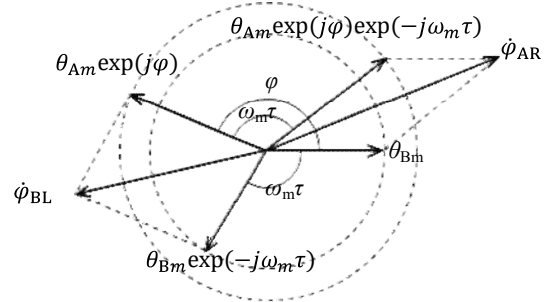


図 3.2 位相変調のベクトル図

ファイバループ長によらず、 $\dot{\varphi}_{AR} = -\dot{\varphi}_{BL}$ となる条件を求めると、

$$\begin{aligned} \theta_{Am} \exp(-j\omega_m \tau) \exp(j\varphi) + \theta_{Bm} \\ = -\{\theta_{Am} \exp(j\varphi) + \theta_{Bm} \exp(-j\omega_m \tau)\} \end{aligned}$$

これより、

$$\{\theta_{Am} \exp(j\varphi) + \theta_{Bm}\} \{1 + \exp(-j\omega_m \tau)\} = 0$$

ファイバループ長によらず、つまり $1 + \exp(-j\omega_m \tau) \neq 0$ でもこの式が成立するためには、

$$\theta_{Am} \exp(j\varphi) + \theta_{Bm} = 0 \quad (3.3)$$

すなわち、逆位相 ($\varphi = \pi$) で、かつ等振幅 ($\theta_{Am} = \theta_{Bm}$) とすればよい。

3.2 スペクトル線幅測定の実験系

遅延自己ヘテロダイン法によるスペクトル線幅測定の実験系を図 3.3 に示す。5km ファイバを除いて、全系が偏波保持光ファイバで構成されている (同図の赤色部分)。また、偏波消光比の劣化を抑えるため、カップラ以降のファイバループ部を、光コネクタを使わずに 1 本の偏波保持光ファイバで構成した。

超音波振動子には、前述のタムラ製作所 TBLE3015 を使い、クラッド径 $80\mu\text{m}$ ・被覆外径 $165\mu\text{m}$ の PANDA ファイバ素線を 20 巻して位相変調素子として用いた。最大位相偏移がそれほど低下しない範囲で高周波駆動できる条件を実験により調べ、変調周波数 $f_m = 9.931\text{MHz}$ で駆動して実験を行った。

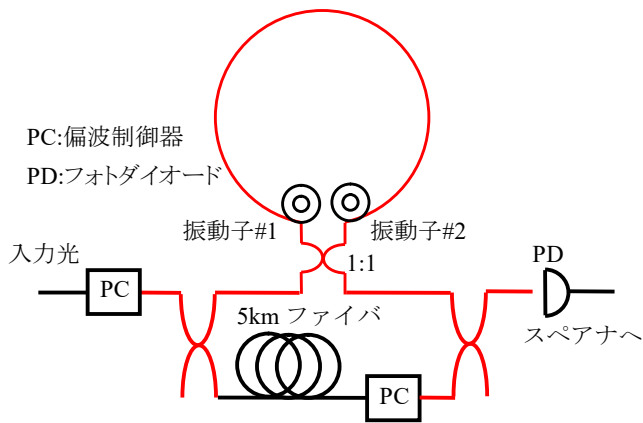


図 3.3 スペクトル線幅測定の実験系

3.3 プッシュプル駆動の効果

ファイバループ内に二つの超音波振動子を配置した図 3.3 のスペクトル線幅測定系について、一つの超音波振動子のみを駆動した場合（片方駆動）と、二つの超音波振動子をプッシュプル駆動した場合の動作特性を比較した。

ファイバループを一周する伝搬遅延時間が変調周波数の半周期にほぼ等しくなるファイバ長は 11.75m であった。この最適ファイバ長に設定したときの結果を図 3.4 に示す。赤線がプッシュプル駆動、青線が片方駆動の測定結果である。変調周波数 $f_m=9.931\text{MHz}$ を中心として現れる成分がスペクトル線幅に関する信号である。プッシュプル駆動では片方駆動に比べて、スペクトル線幅に関する信号は 2~3dB 増加し、 $0f_m$ や $2f_m$ 近辺の不要信号は 6~11dB 抑圧されていることが分かる。これらの不要成分を完全には抑えられない主な原因は、ファイバループ内の偏波消光比が大きいためである。特に、カップラによる偏波消光比劣化の影響が大きい。

ファイバ長を最適値から故意にずらして 7.93m としたときの結果を図 3.5 に示す。この場合でも、プッシュプル

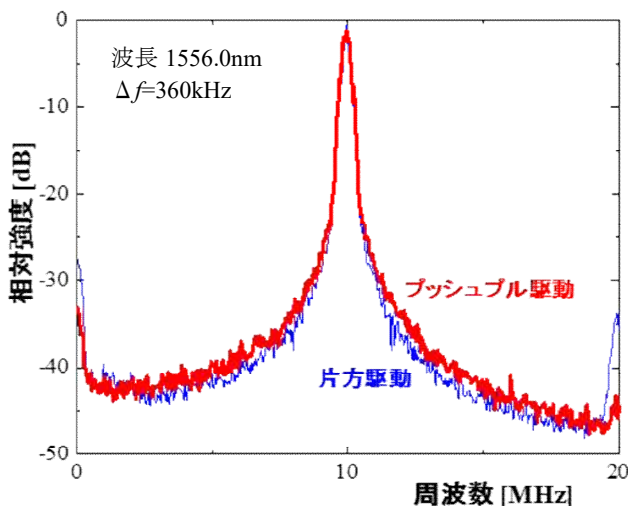


図 3.4 最適ファイバ長での線幅測定結果

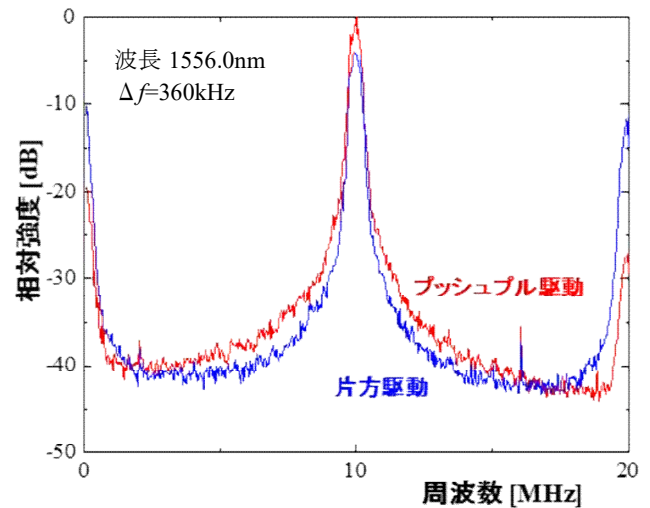


図 3.5 最適ファイバ長からずらしたときの線幅測定結果

駆動では片方駆動に比べて、スペクトル線幅に関する信号は 2~3dB 増加し、 $0f_m$ や $2f_m$ 近辺の不要信号は 10~15dB 抑圧されていることが分かる。

このように、プッシュプル駆動することによって信号成分を増加させ、不要成分を抑圧することができる。

3.4 変換効率

プッシュプル駆動の状態ファイバカップラを結合無しとし、光信号のスペクトルを confocal Fabry-Perot 干渉計（フリースペクトルレンジ=300MHz, フィネス=200）で測定した結果の例を図 3.6 に示す。周波数シフトしない成分は同図で 0 と表記されたものであり、非常に小さくなっている。一方、 ± 1 と表記されたものは、 $\pm f_m$ だけ周波数シフトした成分であり、線幅信号として利用できる。

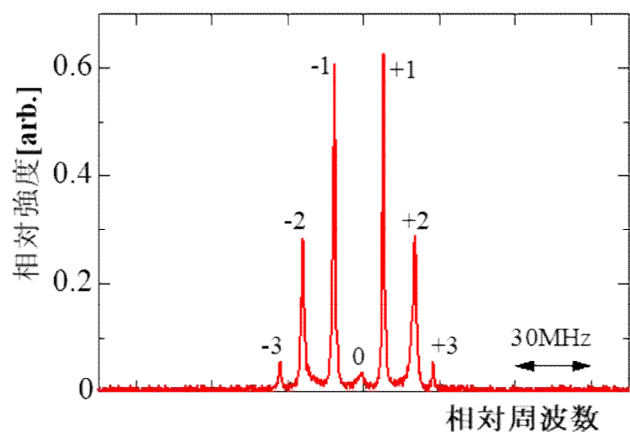


図 3.6 Confocal Fabry-Perot 干渉計によるスペクトル

線幅信号として利用できる光パワーの入力光パワーに対する比を変換効率と定義すれば、図 3.6 の場合では 0.64 となる。

一方、正弦波位相変調の(2.2)式から変換効率を求めると次式が得られる。

$$\frac{J_{-1}^2(\theta_m) + J_1^2(\theta_m)}{\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2(\theta_m)} = 2J_1^2(\theta_m) \quad (3.4)$$

この変換効率は、最大位相偏移 $\theta_m=1.84[\text{rad}]$ のときに最大であり、 $2J_1^2(1.84)=0.677$ となる。この値が位相変調器を周波数シフタとして用いる場合の変換効率の上限となる。上下の第一側波帯成分を両方とも線幅信号として利用できるため、高効率な変換が実現されている。

3.5 種々の線幅での測定結果

図 3.7 は、最適ファイバ長 11.75m に設定し、二個の超音波振動子を 9.931MHz でプッシュプル駆動した状態で、種々の半導体レーザについてスペクトル線幅を測定した結果である。それぞれのレーザの線幅は、LD1 が 360kHz、LD2 が 1.2MHz、LD3 が 360kHz であった。

LD1 は典型的なローレンツ型スペクトルの形である。一方、LD2 と LD3 では裾部分のスペクトルの減少の仕方は、ローレンツ型よりも急峻となっている。これは、短時間でのレーザ光の線幅は狭いけれども、中心周波数が揺らいでいることを示している。

このように、スペクトル線幅測定においては、ピーク付近の様子を見るだけでなく、裾の形状を見ることも重要である。測定可能な雑音レベルの範囲(ダイナミックレンジ)を広げる

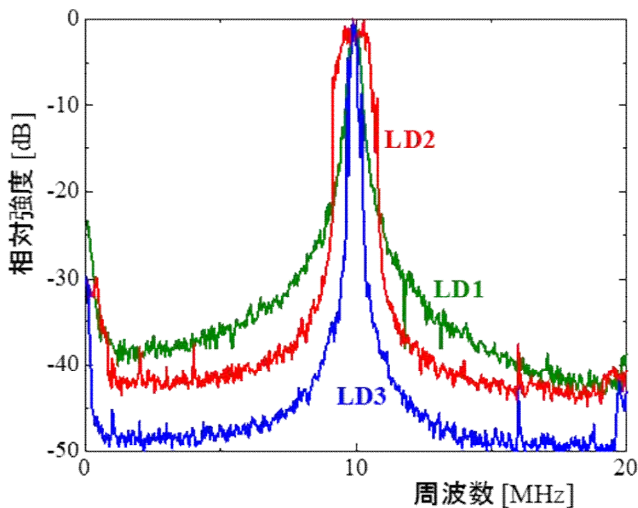


図 3.7 種々のスペクトル線幅での測定結果

ためには周波数シフタの変換効率が低いこと、および低雑音光受信器を用いることが必要となる。

4. まとめ

ファイバ型位相変調素子を用いたスペクトル線幅測定法について、ファイバループ長によらず不要スペクトル成分を抑圧する方法としてプッシュプル駆動方式を考案した。超音波振動子を 2 個用い、等振幅で逆位相の位相変調を加える方式である。実験により、プッシュプル駆動では、振動子を 1 個のみ用いた場合よりも不要信号成分を 10dB 程度抑圧できることが分かった。

5. 参考文献

- 1) T.Okoshi, T.Kikuchi, and A.Nakayama, "Novel Method for High Resolution Measurement of Laser Output Spectrum", *Electron.Lett.*, vol.16, No.16, pp630-631(1980).
- 2) 森正和, 岩井真人, 後藤了祐: 位相変調を用いた半導体レーザのスペクトル線幅測定法, 愛知工業大学研究報告, 第 44 号, 平成 21 年, 第 44 号, pp.105-110(2009).
- 3) 森正和, 後藤了祐: 超音波振動子による位相変調を用いた半導体レーザのスペクトル線幅測定法, 電子情報通信学会総合大会, C-4-32(2010).
- 4) 森正和, 棚森鶴, 青山雄祐, 後藤了祐: 超音波振動子による位相変調を用いたスペクトル線幅測定法の性能改善, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-4-28(2010).
- 5) 森正和, 近藤佑紀: 偏波保持ファイバと超音波振動子による位相変調素子の高周波化, 電気関係学会東海支部連合大会, H3-6(2017).
- 6) 森正和, 小森大喜: ファイバ型位相変調素子を用いたスペクトル線幅測定法におけるプッシュプル駆動方式, 電気関係学会東海支部連合大会, C2-4(2019).
- 7) J.A.Armstrong, "Theory of Interferometric Analysis of Laser Phase Noise", *J.Opt.Soc.Am.*, vol.56, No.8, pp.1024-1031(1966).
- 8) G.P.Agrawal, *Lightwave Technology*, pp.76-81, Wiley, Hoboken(2004).

(受理 令和 2 年 3 月 19 日)