

スピン制御面発光レーザを用いた周波数シフト局発光源の研究

代表研究者

横田 信英

東北大学 電気通信研究所 助教

1 研究背景・目的

1-1 コヒーレント光通信

近年、高精細動画配信サービスの普及や災害対策のため、限られた周波数帯域でより大容量かつ通信経路に対して柔軟な光通信技術が要求されている。コヒーレント光通信[1]は光の振幅と位相を両方活用する通信方式であり、送信側と受信側の同期を得る手段に難があるが、周波数利用効率の優れた直交振幅変調方式などを活用でき、高速デジタル信号処理を併用することで通信経路に対して柔軟な対応が可能であるため積極的に研究されている。コヒーレント光通信では送信信号と受信側で用いる局発光の同期を得る必要があり、これまでに様々な方式が提案されている。受信側においてデジタル信号処理を用いた位相推定を行う手法[2]は特殊なハードウェアを必要としない代わりに、高多値度の信号を扱う場合の計算負荷が膨大となる欠点がある。光位同期ループを用いる手法[3]は古くから研究されているが、ループ帯域幅の確保と回路構成の複雑さにおいて難がある。また、これらの手法では位相ノイズの小さい狭線幅レーザが送受信側において必要となる。一方、半導体レーザにおける注入同期現象を活用した手法[4]は比較的簡便なハードウェア構成で同期を実現できることから注目されている。例えば、文献[4]では直交周波数分割多重方式のデータ信号帯域の中央にパイロットトーン信号を生成し、このパイロットトーンに半導体レーザを注入同期させ、その出力光を局発光として用いる手法が実証されている。注入同期のためのパイロットトーンの付加の仕方にはいくつかの方法が考えられるが、上述の文献で用いられるようなデータ信号帯域内にパイロットトーンを挿入する手法は、信号光の生成に用いるデュアルパラレルマッシュツェンダ変調器の動作点を最適点からずらす必要があり、信号波形の歪を生じる。また、パイロットトーンを挿入するためのガードバンドを確保する必要がある。このような欠点はパイロットトーンをデータ信号の帯域外に付加することで回避することができる。図1に示すように、データ信号外にパイロットトーンを付加し、受信側において半導体レーザに注入同期させた後、外部変調器によって周波数をシフトさせることで簡便なホモダイン検波が実現できる[5]。このような方式は魅力的であるが、局発光源を周波数シフトさせることに起因した光源構成の複雑化が短所となる。本研究では、このような周波数シフト局発光源の簡便化に向けてスピン制御面発光レーザを利用するアイデアについて検証する。

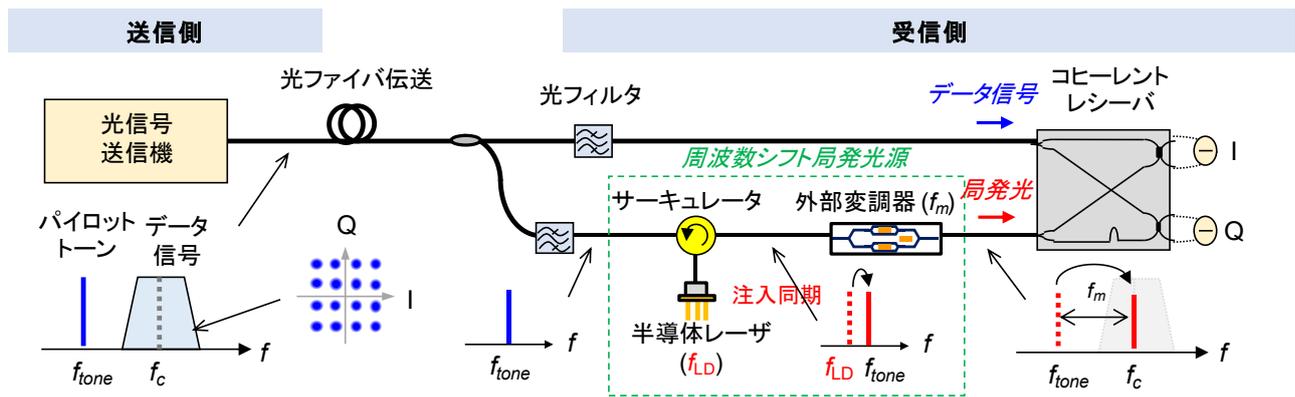


図1 光注入同期法を用いたコヒーレント光通信システム

1-2 光学遷移選択則とスピン制御面発光レーザ

面発光レーザの活性層に用いられる量子井戸において、図2に示すような光学遷移選択則が成り立つことが知られている[6]。この選択則は電子と光子の間での角運動量保存則に関係するものであり、図中では量子井戸におけるファラデー配置を想定している。例えば、伝導帯においてアップスピン偏極している電子は価電子帯の重い正孔と再結合するときに左回り円偏光 (σ^-) を放出する。逆に σ^- の光子を吸収することでアップスピン偏極した電子が励起される。同様に、伝導帯においてダウンスピン偏極している電子は価電子帯の

重い正孔と再結合するときに右回り円偏光 (σ_+) を放出する。このような選択則を利用すると、面発光レーザの発振円偏光状態を活性層における電子のスピンの偏極状態によって制御することが可能となる。また、量子井戸において重い正孔と軽い正孔の準位間が分離するため、面発光レーザの共振モードを適切に設計することで重い正孔に関連した遷移のみを抽出することができる。活性層を円偏光で光励起することによって、電子のスピンの偏極状態を光学的に制御することも可能であり、後で述べる面発光レーザへの光学的スピン偏極電子の注入・変調実験においてこの選択則を利用する。また、半導体中における正孔のスピンの緩和時間は一般にサブピコ秒オーダーと短いため、本研究では電子に対するスピン偏極状態のみを考慮する。

これまでに研究代表者は、図 3(a) に示すスピン制御面発光レーザ構造を提案し、注入電子のアップスピン密度とダウンスピン密度を差動的に変調するスピン偏極変調において、通常の電流変調とは異なる興味深い現象が生じることを明らかにしている。スピン制御面発光レーザはアップスピンまたはダウンスピンに偏極した電子をそれぞれ独立して面発光レーザの活性層へ電流注入可能な構造であり、スピン偏極した電子を注入するための電極として、FePt/MgO[7]や Fe/Tb[8]多層膜などの垂直磁化を有するトンネルスピン注入電極を用いることができる。注入する全電子密度を一定とし、正孔の注入には通常のオーミック電極を用いる。本構造では独立した電極から各スピン偏極電子を注入するため活性層において両者が空間的に分離することが懸念されるが、面発光レーザにおいて広く用いられている電流狭窄層によって面内空間分布を均一化することが期待できる。

面発光レーザのスピン偏極変調特性の例[9]を図 3(b) に示す。通常の電子密度変調の場合、キャリアと光子の相互作用に起因する緩和振動現象[10]によって 3 dB 帯域幅は 4 GHz 程度に制限されている。一方、スピン偏極変調の場合には、緩和振動周波数を大幅に超える 19 GHz において共鳴的に変調感度が向上しており、3 dB 帯域幅の向上にも寄与することがわかる。このような共鳴ピークは面発光レーザにおける複屈折に起因することがわかっている。一般的に面発光レーザのメサ領域では応力の異方性などが存在するため共振器が複屈折を示すが、これは偏光の直交する外部共振器のように見なすことができる。つまり、x 偏光と y 偏光に対して面発光レーザの共振器長が異なる状態に相当し、各偏光モード間に複屈折に依存した一定の周波数分離が生じる。例えば、面発光レーザが y 偏光で発振しており、直交する x 偏光のモードは相対的に利得が低く発振に至っていない場合を考えると、これは x 偏光に対する狭帯域な光増幅器のように機能する。スピン偏極変調では左右の円偏光成分の和（全光出力強度）は一定で左右の円偏光成分の差が変調されるため、変調サイドバンドは定常状態における発振偏光と直交した直線偏光で生じる。複屈折により生じた偏光モード間の周波数分離とスピン偏極変調周波数が概ね一致する場合、生成された変調サイドバンドは共鳴的に増幅される。ここで、x 偏光モードと y 偏光モードの位置関係から、スピン偏極変調時の変調サイドバンドは発振周波数の両側にそれぞれ異なる強度で生じる。このため、複屈折を適切に制御することで面発光レーザから周波数シフトした光スペクトルを生成することが可能であり、この特徴を周波数シフト局発光源に応用することが期待できる。

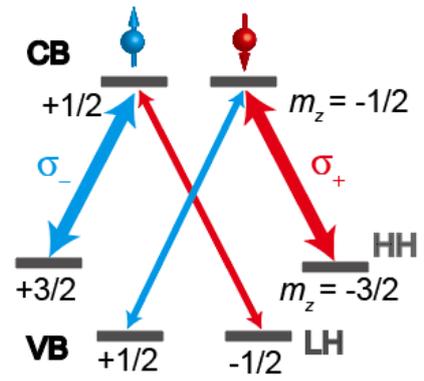


図 2 光学遷移選択則 (CB:伝導帯、VB:価電子帯、HH:重い正孔、LH:軽い正孔)

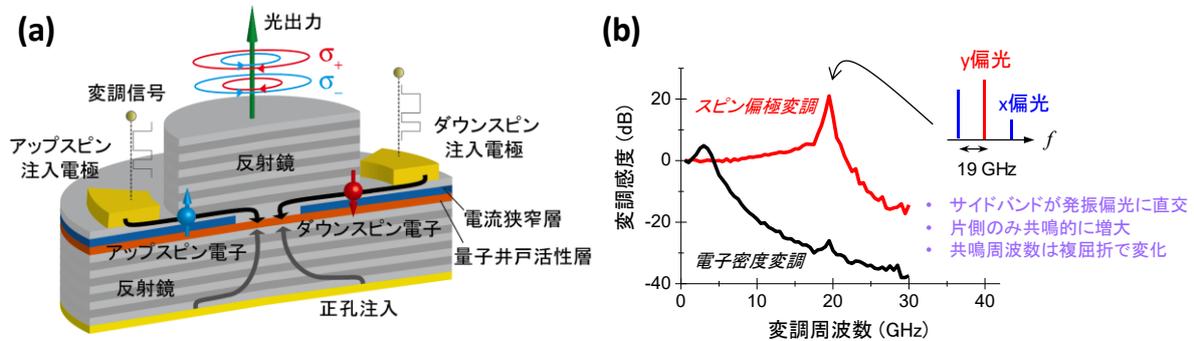


図 3 (a) スピン制御面発光レーザの概念図、(b) スピン偏極変調特性

1-3 スピン制御面発光レーザを用いた周波数シフト局発光源

本研究では、このようなスピン制御面発光レーザの特異な変調特性に注目し、周波数シフト用の外部変調器を用いない直接変調型の周波数シフト局発光源の足掛かりとする。図 4(a)に示すように、x 偏光のパイロットトーンをスピン制御面発光レーザに注入し、これに同期させた場合を考える。パイロットトーン (f_{tone}) に注入同期したスピン制御面発光レーザを変調周波数 $|f_c - f_{\text{tone}}|$ で変調すると、データ信号の中心帯域 (f_c) に対して発振偏光と直交する y 偏光の変調サイドバンドが生成でき、ホモダイン検波に利用することができる。ここで、スピン制御面発光レーザの偏光モード分離に起因して、片側のサイドバンドが強く生成されることから、不要なサイドバンドを抑制する効果も期待できる。この変調サイドバンドは狭帯域光フィルタを用いることなく偏光ビームスプリッタで簡便に分離することができるため、これを周波数シフト局発光として利用することができる。

このような手法を取り入れた集積型デバイスの構造例を図 4(b)に示す。スピン制御面発光レーザの下側ミラーをサブ波長回折格子型ミラー[11]に置き換え、二つの偏光依存入出力ポートを取り付けた構造である。x 偏光のパイロットトーンが導波路から入力された場合、サブ波長回折格子ミラーを通じてスピン制御面発光レーザの共振器内に結合し注入同期を得る。この状態で面発光レーザへ注入されるスピン偏極電子密度を差動的に変調することで、直交する y 偏光の変調サイドバンドを生成し、これをもう一つの導波路から出力するものである。このようなデバイスの実現にはスピン制御面発光レーザとシリコンフォトニクス等の細線導波路技術を融合することも必要となるが、小型かつ合理的な構成として期待できる。メサ付近における複屈折はメサ形状やレーザ加工などによってある程度は制御できることが知られるが[12]、実際にはマイクロヒータ等で制御[13]することも必要になると考えられる。

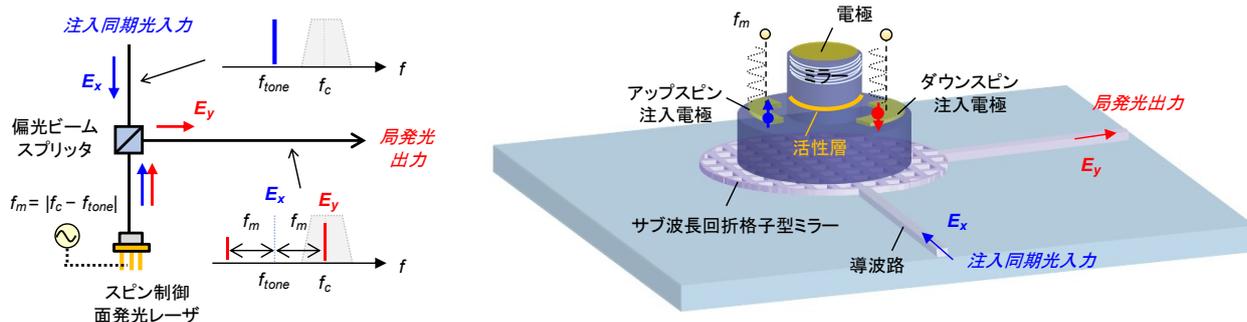


図 4 (a) スピン制御面発光レーザの直接変調に基づく周波数シフト局発光源の概念図、(b) 提案手法を用いた集積型デバイスの構造例

1-4 研究目的

以上のように、スピン制御面発光レーザの直接変調を用いることでコヒーレント光通信において重要な周波数シフト局発光源を簡便に実現することが期待できるが、これは現時点では仮説に留まっており、注入同期スピン制御面発光レーザが通常のスピン制御面発光レーザ（フリーラン状態）と同様な変調特性を有するかどうかは判明していない。そこで本研究では、注入同期スピン制御面発光レーザの変調特性を理論と実験の両側面から明らかにすると共に、本レーザを用いた周波数シフト局発光源の可能性について検証する。これらを通じて、今後のデバイス実現に向けた足掛かりとなる成果を得ることを目指す。

2 理論解析

2-1 スピンドリップレート方程式モデル

本研究で用いる解析モデルは、面発光レーザにおける偏光ダイナミクスの解析などで古くから知られているスピンドリップモデル[14]において利得飽和の影響を考慮したものであり、以下に示す連立方程式で表すことができる。

$$\frac{dE^{\pm}}{dt} = \frac{1}{2} \left[(1 + j\alpha) \left(\Gamma v_g A_g \frac{N^{\mp} - N_t}{1 + \varepsilon |E^{\pm}|^2} - \frac{1}{\tau_p} \right) E^{\pm} + (\gamma_a - j2\pi\gamma_p) E^{\mp} \right] - j2\pi f_d E^{\pm} + \kappa E_i \quad (1)$$

$$\frac{dN^\pm}{dt} = \frac{I_0 \pm I_m \sin 2\pi f_m t}{eV} - v_g A_g \frac{N^\pm - N_t}{1 + \varepsilon |E^\mp|^2} |E^\mp|^2 - \frac{N^\pm}{\tau_c} \pm \frac{N^- - N^+}{\tau_s} \quad (2)$$

ここで、 E^+ と E^- は右回り円偏光と左回り円偏光に対する複素電界であり、 N^+ と N^- はアップスピンとダウンスピンの電子密度を表す。 α , Γ , v_g , A_g , N_t , ε , γ_a , γ_p , f_d , κ , E_i , τ_p , τ_c , τ_s , I_0 , I_m , f_m , e , V はそれぞれ線幅増大係数、閉じ込め係数、光の群速度、微分利得係数、透明キャリア密度、利得飽和係数、二色性、複屈折、離調、結合係数、注入電界、光子寿命、キャリア寿命、電子スピン緩和時間、DC電流、スピン偏極電流変調係数、スピン偏極変調周波数、電気素量、活性層体積を表す。式(1)は左右の円偏光成分に対する複素電界の時間変化を表しており、右辺の1項目が誘導放出、2つの偏光モード間の結合、共振器内の光損失を表す。右辺の2項目と3項目は注入同期させるためのマスターレーザ光の離調と光注入を考慮している。式(2)はアップスピンとダウンスピンの各電子密度の時間変化を表しており、右辺の1~4項目がそれぞれスピン偏極電子の電流注入、誘導放出、キャリア寿命に依存した全電子密度の減衰、スピン緩和時間を反映したスピン偏極電子密度差の減衰を表す。ここで、第1項目においてスピン偏極電子が差動的に電流注入される状況を考慮している。パラメータには、後の実験で用いたRayCan社製のInAlGaAs量子井戸を活性層とした1.55 μm 帯面発光レーザ[15]に関するパラメータ [16, 17]を用いた。

2-2 注入同期スピン制御面発光レーザの変調特性

まずは注入同期スピン制御面発光レーザの基本的特性を明らかにするため、異なる離調周波数 Δf と注入比10 dBにおけるスピン偏極変調特性を解析した。ここで、 Δf はレーザ発振周波数と注入光の周波数の差を表しており、正の Δf は短波側の光を注入することを意味する。パラメータ f_d とは異なり、 Δf は発振偏光モードからの離調を考慮するために $\Delta f = f_d + \gamma_p/2$ として再定義している。また、注入比はレーザ発振出力光パワーと注入光パワーの比を表しており、正の注入比は注入光の方が大きいことを意味する。図5(a)に示すように、面発光レーザにおける偏光モード間の周波数分離を表す γ_p が30 GHzにおいて、 $\Delta f = -5, 0, 5$ GHzの場合を比較すると、どの Δf においても、フリーラン時に生じるはずの γ_p に一致する共鳴周波数よりも低い周波数領域に共鳴ピークがシフトしていることがわかる。また、正の Δf においてシフト量が大きく、共鳴ピーク強度も低下していることがわかる。同様に $\gamma_p = 40, 50$ GHzの場合について解析すると、図5(b)、5(c)に示すように、 γ_p の増大に対応した共鳴ピーク周波数がシフトしており、共鳴ピーク強度もわずかに増大する傾向が見られた。これらの結果を図5(d)にまとめて示す。 γ_p が共鳴ピーク周波数と共鳴ピーク強度の両方の値を増大させる傾向にあり、これらは Δf にも依存することがわかる。周波数シフト局発光源への適用という観点では、共鳴ピーク強度が強く、高周波領域で共鳴ピーク周波数が得られることが望ましいため、正よりは負の離調周波数を選択することが望ましいと言える。ただし、後の実験においても確認されるように、注入比の小さい場合には同期の得られる離調周波数範囲が狭くなるため、 $\Delta f \sim 0$ におけるスピン偏極変調特性が最も興味の対象となるものである。

次に、異なる注入比 (IR) における注入同期スピン制御面発光レーザの変調特性について解析した。 $\Delta f = 0$, $\gamma_p = 50$ GHzにおける解析結果を図6(a)に示す。IRを10 dBから-10 dBに低減することで共鳴ピーク周波数が高周波側にシフトしており、共鳴ピーク強度も増大していることが確認できる。IRが-40 dBまで減少すると、フリーラン状態のスピン制御面発光レーザの場合に概ね一致する変調特性が得られていることがわかる。IRを究極的に小さくすることで注入光無し (フリーラン状態) の状態に収束することから、このような傾向は妥当であると考えられる。また、IRが小さい場合では、ほぼ γ_p に依存する共鳴ピーク周波数が得られ、共鳴ピーク強度も最大化することから、周波数シフト局発光源として理想的な変調特性であると言える。共鳴ピーク強度を更に増大させるためには、フリーラン状態のスピン制御面発光レーザの変調特性の場合と同様に、二色性に関するパラメータ γ_a を低減することで実現できると考えられる[18]。注入同期スピン制御面発光レーザの変調時における偏光分解光スペクトルの解析結果を図6(b)-6(d)に示す。ここで、無変調時の発振偏光をx偏光 (青線) としており、スピン偏極変調に起因した変調サイドバンド成分はそれに直交するy偏光 (赤線) として表れている。IRが-40 dBの場合には、変調サイドバンドが正の周波数側に強いピークとして表れており、負の周波数側のピークとの差は53 dBであった。このことから、不要なサイドバンドを抑制した片側への周波数シフトが実現できていることがわかる。一方、IRが-10 dBの場合には正の周波数側のピークが低減され、IRが10 dBの場合にはこの低減は更に顕著になっていることがわかる。これらは、IRが増大するにつれて共鳴ピーク強度が低下することから共鳴的変調感度向上を活用したスピン偏極変調の効

率が低下したものと考えられる。以上の結果から、スピン制御面発光レーザを周波数シフト局発光源として活用する場合には、低い IR かつ $\Delta f \sim 0$ の条件下で注入同期させることが効率的であると言える。

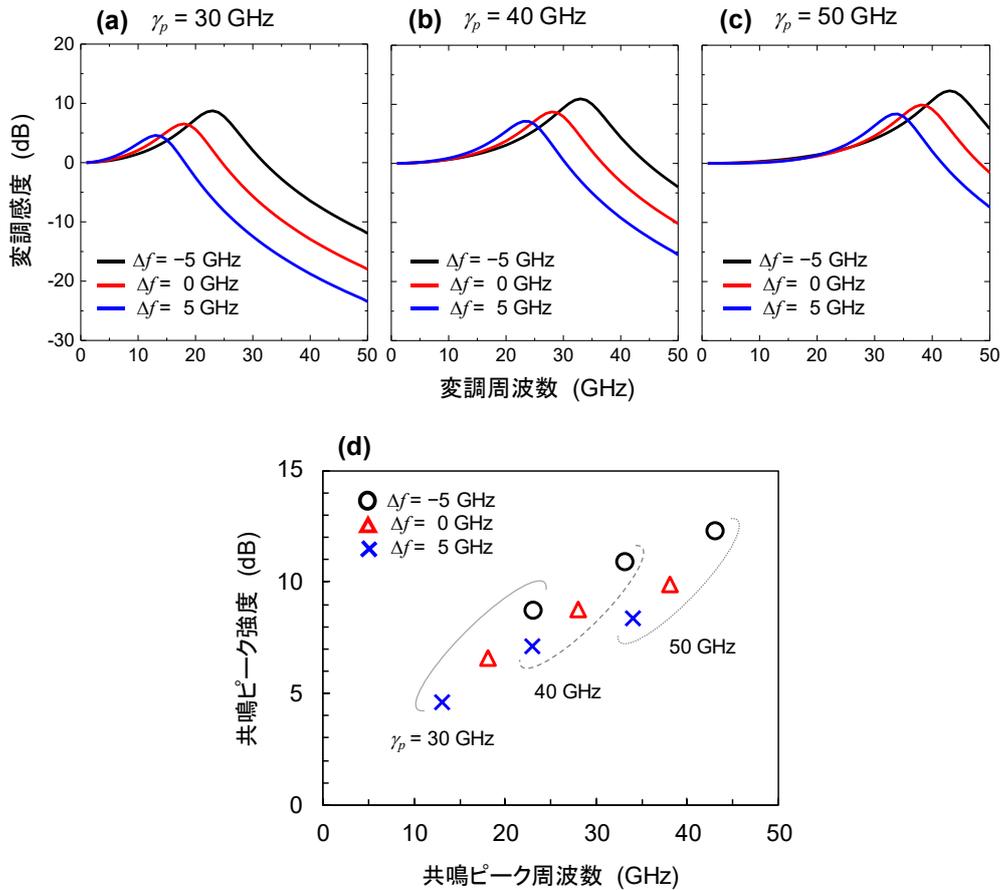


図 5 異なる離調周波数における注入同期スピン制御面発光レーザの変調特性 (a) $\gamma_p = 30$ GHz、(b) $\gamma_p = 40$ GHz、(c) $\gamma_p = 50$ GHz、(d) 共鳴ピーク強度と共鳴ピーク周波数の関係

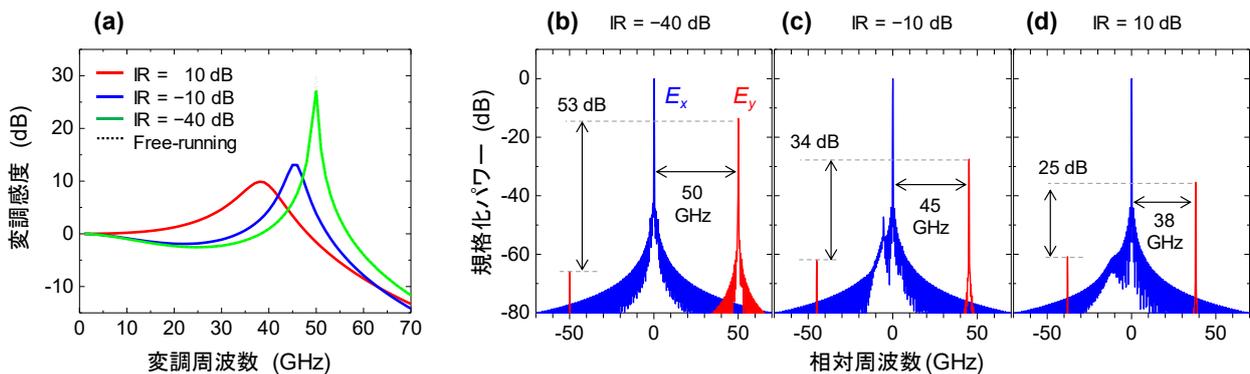


図 6 $\Delta f = 0$, $\gamma_p = 50$ GHz における解析結果 (a) 異なる注入比における注入同期スピン制御面発光レーザの変調特性、偏光分解光スペクトル (b) IR = -40 dB, $f_m = 50$ GHz、(c) IR = -10 dB, $f_m = 45$ GHz、(d) IR = 10 dB, $f_m = 38$ GHz (青線 : x 偏光、赤線 : y 偏光)

2-3 原理検証解析

コヒーレント光通信を模擬した原理検証解析を行い、スピン制御面発光レーザに基づく周波数シフト局発光源のアイデアを確認した。本解析では図 7 に示すように、データ信号として 25 Gbaud の 16 QAM (QAM: 直交振幅変調) 信号を用いた。本信号はデュアルパラレルマツハツェンダ変調器モデルを用いて生成した。デー

タ信号から 50 GHz 分離したパイロットトーンをスピン制御面発光レーザに注入し、この条件下でスピン偏極変調を行った。生成した変調サイドバンド成分は直交偏光成分として搬送波（無変調成分）と分離し、コヒーレントレシーバを模擬した 90° ハイブリッドの構成で検出した。ここで、 $I_m = 1 \times I_{th}$, $f_m = 50.0$ GHz, $\gamma_p = 50.0$ GHz, $\Delta f = -100$ MHz, $f_c = 50.1$ GHz, $f_{tone} = 100$ MHz とした。100 MHz のわずかな離調を導入することで、コンスタレーションマップにおける 16 QAM シンボル配置の回転の有無からスピン制御面発光レーザの同期の有無を確認することができる。また比較のため、ノイズのない理想的な局発光源と注入光を導入していないフリーラン状態のスピン制御面発光レーザを局発光に用いた場合についてもそれぞれ同様に解析した。

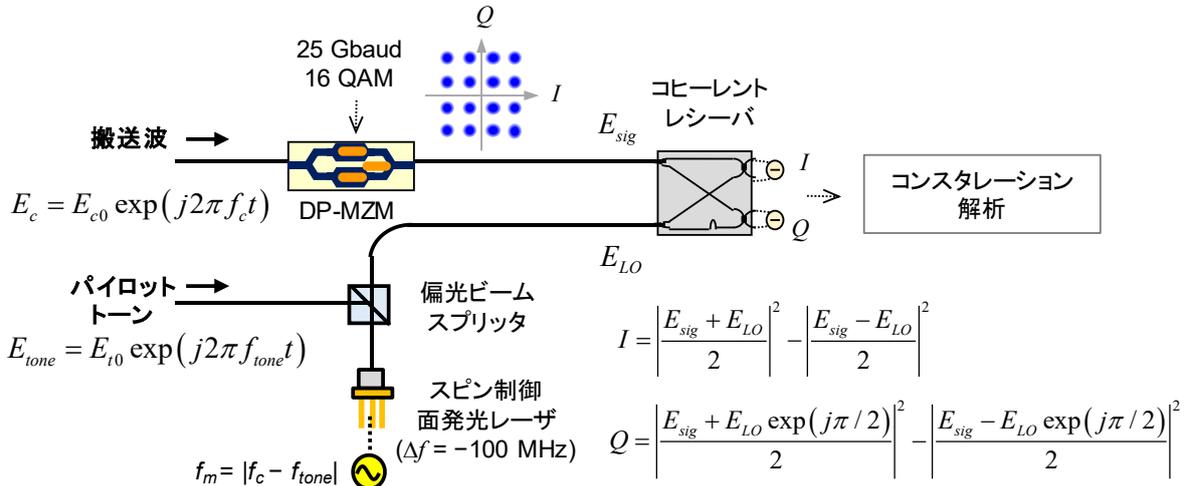


図 7 スピン制御面発光レーザに基づく周波数シフト局発光源の検証モデル

本解析で考慮するスピン制御面発光レーザ、パイロットトーン、データ信号の相対的周波数関係について図 8(a)にまとめた。各種の局発光源を用いてコヒーレント検波したデータ信号の解析結果を図 8(b)-8(d)に示す。図 8(b)に示すように、注入同期スピン制御面発光レーザを局発光として用いた場合には、16 QAM 信号のシンボル配置を有するコンスタレーションが得られていることがわかる。この時、理想的なシンボル点とのずれの程度を表すエラーベクトル振幅 (EVM) は 0.69%であった。この値は 16 QAM 信号の生成に用いたデュアルパラレルマツペンダ変調器における非線形歪に起因する非常に小さい値であり、図 8(c)に示すように、理想的な局発光を用いた場合にも同じ EVM の値が得られている。また、図 8(d)に示すように、注入同期の得られていないフリーラン状態のスピン制御面発光レーザを局発光に用いた場合にはコンスタレーションの回転が生じていることがわかる。このことから、スピン制御面発光レーザの注入同期が解析結果に反映されていることを確認すると共に、本研究で提案する周波数シフト局発光源の基本的アイデアを検証することができた。

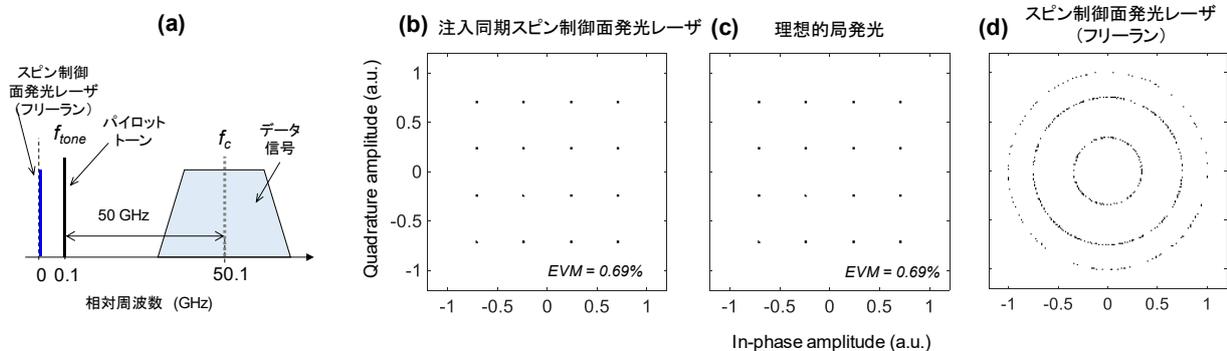


図 8 (a)解析に用いたパラメータの概要、25-Gbaud 16-QAM 信号のコンスタレーションマップ (b) 注入同期スピン制御面発光レーザを用いた場合、(c)理想的な局発光を用いた場合、(d)フリーラン状態のスピン制御面発光レーザを用いた場合

3 注入同期面発光レーザのスピンの偏極変調特性

3-1 実験内容

図9に示す構成を用いて、注入同期面発光レーザのスピンの偏極変調特性に関する検証実験を行った。将来的には図3(a)で示したような電氣的スピンの偏極変調を想定しているが、本研究では市販の1.55 μm 帯面発光レーザを高速偏光変調光によって光励起し、励起された電子のスピンの偏極度を変調する。ここで、光励起波長は面発光レーザの発振波長よりも十分に短波側の1476 nm とするため、面発光レーザは励起光には注入同期しない。光学遷移選択則を通じたスピンの偏極電子密度の変調を行うため、励起光の偏光状態を右回り円偏光と左回り円偏光の間で高速に変調することがポイントである。ここで、このような高速偏光変調を実現可能な偏光変調器は市販されていないため、2つの偏光スプリッタで構成される偏光分離マッシュツェンダ干渉計の片側に高速に動作する位相変調器を挿入し、これを変調することで偏光変調を実現している。光ファイバの振動や温度変化などに起因してファイバ内の伝搬光の位相が低速で変動するため、位相シフタのフィードバック制御によってこの影響を補償している。一方、波長可変型のマスターレーザの光強度を可変アッテネータで制御し、偏光状態を面発光レーザの発振偏光と一致するように制御した後、面発光レーザへと注入する。これらの励起光と注入同期用のマスターレーザ光は波長多重カプラによって合波している。面発光レーザへ光注入する直前では、偏光状態をモニターするためにファイバではなく自由空間の光学系を用いている。面発光レーザは6 mAのDC電流を注入することで発振させており、この状態でスピンの偏極した電子を光学的に注入している。面発光レーザの出力光はビームスプリッタで反射した成分を再度光ファイバへ入力し、ファイバ増幅器による光増幅とバンドパスフィルタによる不要なノイズ光成分のフィルタリングを行った後、バランスドレシーバで左右の円偏光成分を差分検出している。偏光変調器の変調周波数を信号発生器で掃引し、本検出信号をRFスペクトラムアナライザでロックインアンプ的に検出することで微弱なスピンの偏極変調特性を測定する。

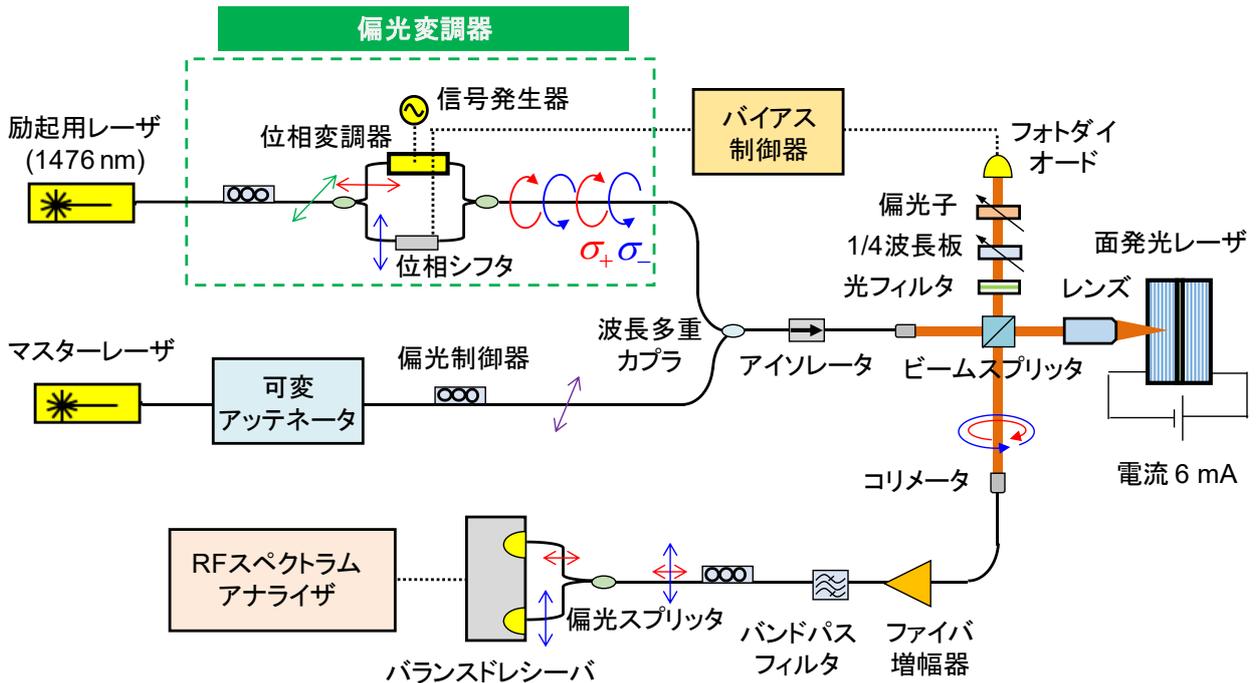


図9 注入同期面発光レーザのスピンの偏極変調特性測定系

3-2 注入同期の離調特性

本実験で用いた面発光レーザ（フリーラン）の発振スペクトルを図10(a)に示す。発振波長は1547.3 nmであり、21 GHz離れた箇所に小さいピークが見られる。これは発振偏光と直交する発振には至らない偏光モードであり、この周波数分離は面発光レーザのメサ領域における複屈折に依存するものである。周波数分離を実験的に観測可能な大きさに調節するため、レーザ加工による面発光レーザへの異方性応力付加[19]を導

入している。注入同期の有無を判別する方法はいくつか考えられるが、光スペクトラムアナライザを用いて光スペクトルのシフト（引き込み現象）を確認する手法が最も簡便である。図 10(b)に示すように、フリーラン状態の面発光レーザの発振波長に対して約5 GHz の離調周波数を有するマスターレーザ光を注入した場合において、面発光レーザのスペクトルピークはマスターレーザのものと一致していることがわかる。ここで注入比は 0 dB としており、面発光レーザの発振偏光とマスターレーザの偏光を一致させるように制御している。同期が得られない場合は、光スペクトルに大きなサイドモードが生じ、意図的に変調を行っていない場合でも面発光レーザの光出力強度が振動する現象が発生する。面発光レーザの基本的な注入同期特性を把握するため、注入比と離調周波数に対する同期範囲の関係を測定した。その結果を図 10(c)に示す。注入比が-10dB 付近では同期の得られる離調周波数範囲は数 GHz 程度と狭いが、注入比が 5 dB 付近では同期範囲が拡大し、負の離調周波数側に 50 GHz 以上の広い同期範囲が得られていることがわかる。負の離調周波数側において同期範囲が拡大する傾向は面発光レーザの線幅増大係数に起因しており、過去の報告例[20]と同じ傾向である。また、図 10(c)において斜線で示した同期範囲内においても不安定になる領域が存在することが報告されている[21]。

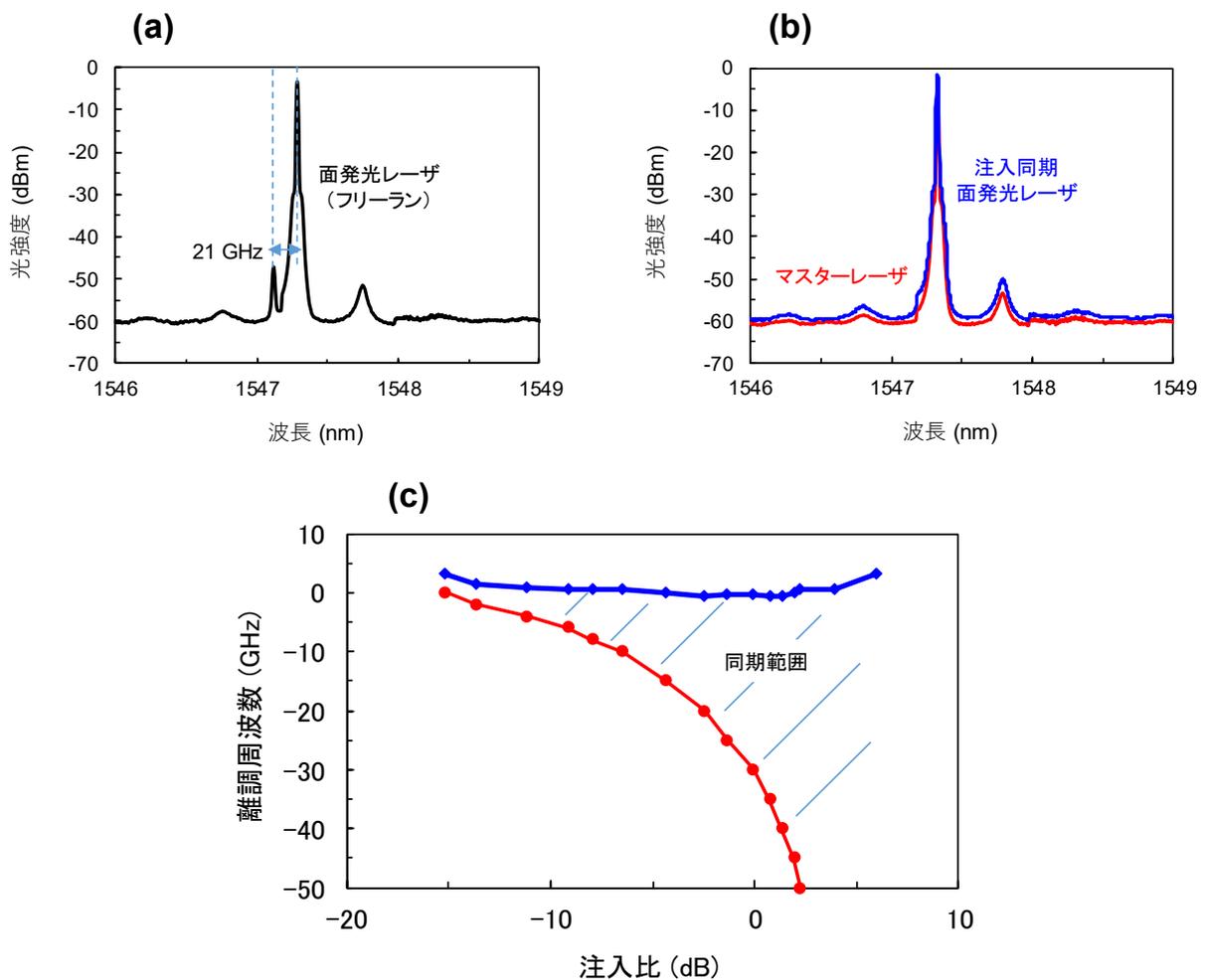


図 10 (a)面発光レーザの光スペクトル (フリーラン)、(b)マスターレーザと注入同期面発光レーザの光スペクトル、(c)注入比と離調周波数に対する同期範囲の測定結果

3-3 スピン偏極変調特性

離調周波数-1 GHz における注入同期面発光レーザのスピンの偏極変調特性の測定結果を図 11 に示す。ここでは、フリーラン状態の測定結果の他、異なる注入比 (-6, -16, -19 dB) において測定している。先に述べたように、同期範囲の中で安定した注入同期が得られる条件は限られるため、設定した注入比は等間隔にしている。フリーラン状態のスピンの偏極変調特性は光スペクトルにおける偏光モード間の周波数分離に一致

する 21 GHz において共鳴ピークが得られていることがわかる。注入比が-6 dB と比較的大きい場合は 12 GHz 付近で緩やかなピークが確認でき、そこから注入比を-16 dB、-19 dB と低下させることでピークが高周波側にシフトし、注入比-19 dB の場合にはフリーラン状態の変調特性と概ね一致するピーク形状が確認できる。このような傾向は先に数値解析で確認したものと対応する結果である。低い注入比における注入同期スピン制御面発光レーザはフリーラン状態のスピン制御面発光レーザと概ね同等な変調特性とみなすことができ、本研究で提案していた周波数シフト局発光源の基本的アイデアを支持するものであることがわかった。このように、注入同期スピン制御面発光レーザの変調特性を光学的スピン偏極変調法によって評価し、スピンプリップレート方程式を用いた解析結果を指示する実験結果を得ることに成功した。本実験では、スピン偏極変調の効率が小さく、大きな変調サイドバンドを生成することはできていないが、電気的スピン注入を実現することで改善が見込まれるものである。

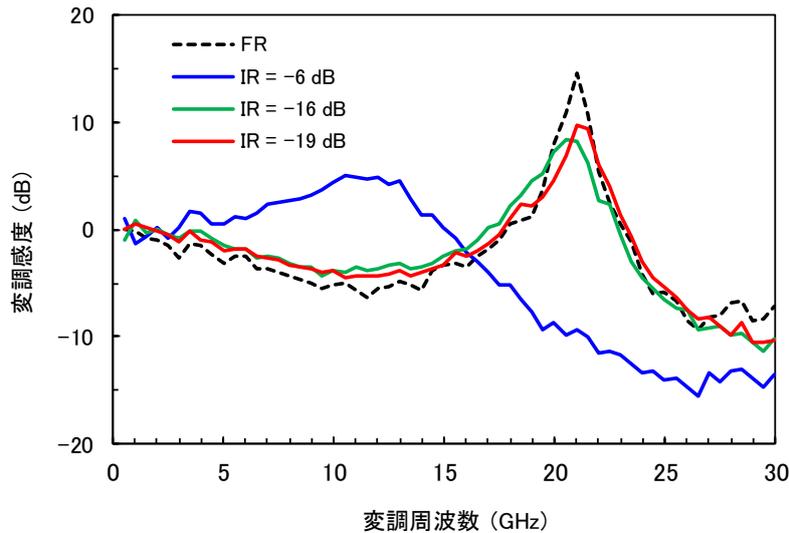


図 11 注入同期面発光レーザのスピン偏極変調特性の測定結果

4 まとめ

本研究ではコヒーレント光通信において重要となる局発光源に着目し、注入同期スピン制御面発光レーザの直接変調による周波数シフト方式を検証した。方法式は発振偏光と直交する直線偏光の変調サイドバンドを生成できることから変調サイドバンドを偏光ビームスプリッタによって簡便に分離できる点が特徴である。スピンプリップレート方程式解析により、注入同期スピン制御面発光レーザの変調特性は変調感度の共鳴周波数に影響するパラメータ γ_p の他、注入同期の典型的な自由度である離調周波数と注入比に依存することがわかった。微弱なパイロットトーンに注入同期させるためには低い注入比における変調特性を活用することになるが、このような場合にはフリーランの場合にほぼ一致する強い共鳴特性を示し、効率的な周波数シフトが実現できることがわかった。このような注入同期スピン制御面発光レーザが有する特異な変調特性は光学的スピン偏極変調法を用いた実験からも確認でき、本研究の基本的アイデアを検証することができた。ここまでの実験的成果は今後の学術論文発表に向けて更に考察を進めていくことを予定している。光学的スピン偏極変調の効率が低いことから今回は変調サイドバンドを局発光として用いたコヒーレント光通信の伝送実験には至らなかったが、今後、面発光レーザへの高効率な光結合と信号光の低ノイズ検出の観点から実験方法の改善を継続して進める予定である。また、電気的スピン注入に基づくスピン制御面発光レーザの実現に向けた共同研究にも着手していくことを計画している。

本研究の遂行において多大なご支援を頂きました電気通信普及財団のご関係者の皆様に心よりお礼申し上げます。

【参考文献】

- [1] E. Ip, A. P. T. Lau, D. J. F. Barros, and J. M. Kahn, *Opt. Express* 16, 753 (2008).
- [2] K. Kikuchi, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 12, 563 (2006).

- [3] K. Balakier, L. Ponnampalam, M. J. Fice, C. C. Renaud and A. J. Seeds, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 24, 1500112 (2018).
- [4] Z. Liu, J. Kim, D. S. Wu, D. J. Richardson, and R. Slavík, J. Lightwave Technol. 33, 34 (2015).
- [5] K. Kasai, Y. Wang, S. Beppu, M. Yoshida, and M. Nakazawa, Opt. Express 23, 29174 (2015).
- [6] M. Holub, and P. Bhattacharya, J. Phys. D Appl. Phys. 40, R179–R203 (2007).
- [7] A. Sinsarp, T. Manago, F. Takano, and H. Akinaga, Jpn. J. Appl. Phys. 46, L4 (2007).
- [8] N. C. Gerhardt, S. Hovel, C. Brenner, M. R. Hoffman, F. Y. Lo, D. Reuter, A. D. Wieck, E. Schuster, W. Keune, S. Halm, G. Bacher, and K. Westerholt, J. Appl. Phys. 99, 073907 (2006).
- [9] N. Yokota, K. Nisaka, H. Yasaka, and K. Ikeda, Appl. Phys. Lett. 113, 171102 (2018).
- [10] L. A. Coldren, S. W. Corzine, and M. L. Mashanovitch, Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits, 2nd ed. (Wiley, New York, 2012).
- [11] Y. Tsunemi, N. Yokota, S. Majima, K. Ikeda, T. Katayama, and H. Kawaguchi, Opt. Express 21, 28685 (2013).
- [12] A. K. Jansen van Doorn, M. P. van Exter, and J. P. Woerdman, Appl. Phys. Lett. 69, 3635 (1996).
- [13] T. Pusch, E. La Tona, M. Lindemann, N. C. Gerhardt, M. R. Hofmann, and R. Michalzik, Appl. Phys. Lett. 110, 151106 (2017).
- [14] M. S. Miguel, Q. Feng, and J. V. Moloney, Phys. Rev. A 52, 1728 (1995).
- [15] M. -R. Park, O. -K. Kwon, W. -S. Han, K. -H. Lee, S. -J. Park, and B. -S. Yoo, IEEE Photon. Technol. Lett. 18, 1717 (2006).
- [16] P. Pérez, A. Valle, and L. Pesquera, J. Lightw. Technol. 32, 1601 (2014).
- [17] N. Yokota and H. Yasaka, "Spin Laser Local Oscillators for Homodyne Detection in Coherent Optical Communications," Micromachines 12, 573 (2021).
- [18] M. Lindemann, G. Xu, T. Pusch, R. Michalzik, M. R. Hofmann, I. Žutić, N. C. Gerhardt, Nature, 568, 212 (2019).
- [19] N. Yokota, R. Takeuchi, H. Yasaka, and K. Ikeda, IEEE Photon. Technol. Lett. 29, 711 (2017).
- [20] Z. Liu and R. Slavík, J. Lightwave Technol. 38, 43 (2020).
- [21] A. Murakami, K. Kawashima, and K. Atsuki, IEEE J. Quantum Electron. 39, 1196 (2003).

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Spin Laser Local Oscillators for Homodyne Detection in Coherent Optical Communications	Micromachines	May 2021
Spin-Injected Birefringent VCSELs for Analog Radio-Over-Fiber Systems	IEEE Photonics Technology Letters	February 2021