

令和 4 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02186

研究課題名（和文）面発光レーザのスピンの偏極電子密度制御に基づくベクトル変調技術の開発

研究課題名（英文）Development of vector modulation technique using spin-controlled semiconductor lasers

研究代表者

横田 信英（YOKOTA, Nobuhide）

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：00734542

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：光の振幅と位相を両方制御するベクトル変調方式は複素平面上に信号点を高密度に配置することが可能であり、次世代の大容量コヒーレント光通信において不可欠なものである。本研究では、外部光に注入同期された面発光レーザ内のスピンの偏極電子密度を制御することでベクトル変調光を出力できることを理論的に明らかにし、その実験的評価に必要な面発光レーザの光変調による微小な応答波形の観測を実現した。また、面発光レーザのスピンの偏極電子密度変調に基づく簡便な光ファイバ無線伝送用光源とコヒーレント光通信用高機能局発光源を提案・実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光通信等で用いられる通常の半導体レーザでは電流注入される電子の密度のみが変調され、電子の有するスピンの偏極状態の自由度は制御されない。本研究は半導体レーザにおける注入電子のスピンの偏極度を高速に変調することが通常の半導体レーザの高速動作限界を突破する切り口になることを明らかにしたものであり、今後の光通信の大容量化や次世代無線通信技術（Beyond 5G）の発展に貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：A vector modulation scheme in which both amplitude and phase of light are modulated is promising for next-generation optical communication systems, because it can densely allocate signal points in a complex plane. In this study, the vector modulation of light using an injection-locked semiconductor laser under modulation of electron spin polarization was theoretically confirmed, and a preliminary experimental setup for evaluation of the vector modulation waveforms was developed. Moreover, application of the spin-controlled semiconductor laser to radio over fiber systems and local oscillators in coherent optical communication systems was proposed and demonstrated.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：面発光レーザ スピンの偏極 ベクトル変調

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

クラウドコンピューティングやサイバーフィジカルなどの新規情報システムの発展を支えるため、近年のデータ通信トラフィックは急激な増大を続けている。高度な情報処理を担うデータセンターの内部またはデータセンター間のような短距離光通信では、光の強度変化を利用した通信方式が発展してきたが、今後は光の振幅と位相を複素ベクトル空間で2次元的に変調する手法(ベクトル変調)を用いた大容量のコヒーレント光通信方式が短距離においても重要になってくると予想される。また、このようなベクトル変調は無線通信においても古くから活用されており、減衰の大きいミリ波帯・テラヘルツ帯の電波を光によってアナログ信号として伝送する光ファイバ無線伝送システムにおいても適用が求められる。したがって、ベクトル変調はコヒーレント光通信に限らず次世代無線通信(Beyond 5G)技術としても重要な変調方式である。しかしながら、ベクトル変調を導入するためには外部変調器が必要であり、コストや消費電力の増大を招く。半導体レーザを電流変調するだけでは光の振幅と位相の独立制御ができないため、この課題を打破するブレイクスルー技術が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、面発光レーザに電流注入する電子のスピンの偏極(アップ or ダウン)を制御する特殊な変調法に着目し、これを活用することで面発光レーザからベクトル変調光を直接生成する手法を理論と実験の両方から検証することを目的とする。このような変調を可能とするスピン制御面発光レーザ(図1)の変調動作は光学的スピン変調法を活用して原理検証する。また、提案手法を光ファイバ無線伝送システムにも適用するため、ミリ波帯に相当する高周波の変調信号をデータ信号波形に高効率重畳する手法について検討する。特に、複屈折を有する面発光レーザのスピンの偏極変調を行った際に得られる共鳴的な変調感度の向上効果を活用する場合について検討し、本手法の特徴と課題を明確にする。さらに、コヒーレント光通信システムの受信側に必要な局発光とベクトル変調光を簡便に同期するため、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を提案し、その基本原理を検証する。

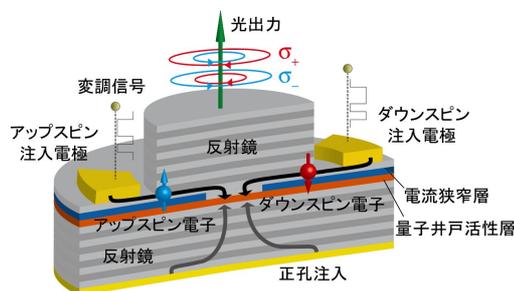


図1 スピン制御面発光レーザ

3. 研究の方法

面発光レーザ内のスピン偏極電子密度を制御するため、光とスピンの間の角運動量保存則に基づく光学遷移選択則(図2)を利用し、右回り円偏光(σ_+)または左回り円偏光(σ_-)によってスピン偏極電子を光励起する手法を用いる。例えば、励起光の偏光を σ_+ と σ_- の間で高速に変調することで、活性層に励起される電子のスピンの偏極度はアップスピンとダウンスピンの間で変調される。この変調周波数を変化させることで、面発光レーザが有するスピン偏極変調の周波数応答特性を評価することが可能である。また、レーザ内の電子密度が変動したときに生じる発振周波数変動(チャープ)を抑制するため、外部光を注入したときにその周波数と位相にレーザが同期する現象(注入同期)を活用する。また、スピン制御面発光レーザの理論的解析については、一般的な半導体レーザの数値解析モデルに光の偏光と電子のスピンの自由度を追加し、さらに共振器の複屈折や二色性を考慮したスピンフリップレート方程式モデルを用いる。

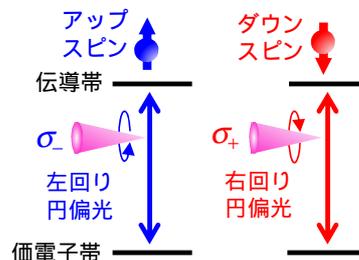


図2 光学遷移選択則

4. 研究成果

(1) ベクトル変調光生成

理論解析

図3(a)に示す構成でベクトル変調光の生成を検証した。スピン制御面発光レーザは光学遷移選択則を通じて σ_+ または σ_- の間で偏光変調することが可能である。これを偏光子によって特定の直線偏光として切り出すことで、直交振幅変調(QAM)に相当する光の実部と虚部を独立に制御した状態に変換することができる。しかし、各スピン偏極電子の密度を変調した際に生じる発振周波数変動のため、変調光の波形を変調信号レートでサンプリングし複素ベクトル空間にプロットした図(コンステレーション)が歪むという問題があった。そこで、スピン制御面発光レーザに外部から直線偏光を注入し、これに注入同期させることで、各スピン偏極電子の密度変動に起因した発振周波数変動を抑制する方法を導入した。

16 値のシンボル点を有する QAM 形式のベクトル変調光の解析結果を図 3 (b) に示す。変調レートは 10 Gbaud である。灰色の曲線は変調の軌跡であり、変調信号レートでサンプリングしたコンステレーション (黒丸) は規則的に配置されていることがわかる。このようなコンステレーションの理想値からのずれの程度をエラーベクトル振幅として評価し、面発光レーザ内の電子スピン緩和時間に対する依存性として示したものが図 3 (c) である。一般的な面発光レーザの活性層では電子スピン緩和時間が数十ピコ秒オーダーであるが、100 ピコ秒を超える長い値が得られる活性層材料を用いることでエラーベクトル振幅を数%以下程度に低減できることがわかった。

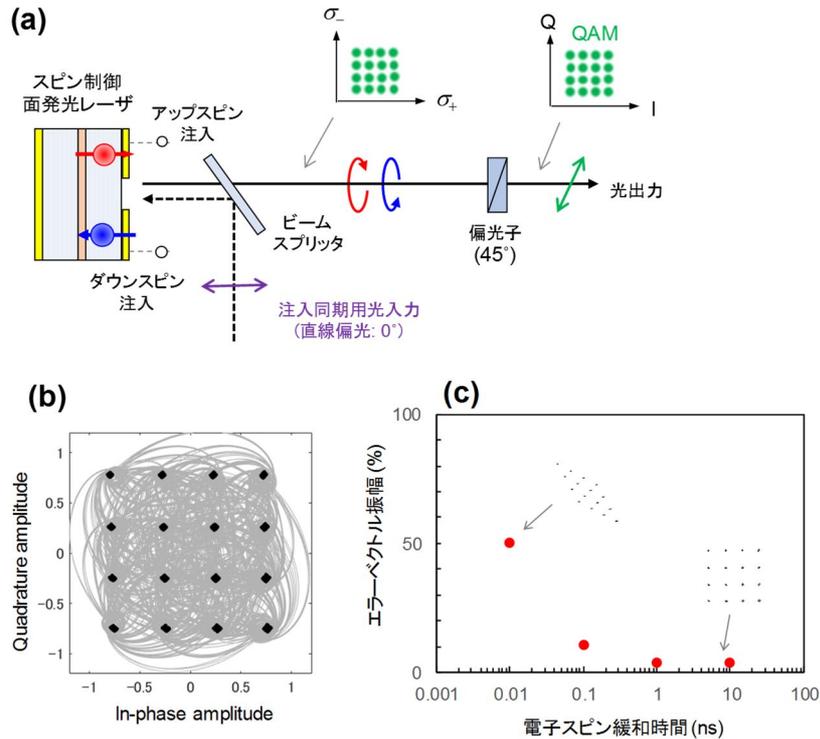


図 3 (a)ベクトル変調光生成の概要、(b)ベクトル変調パターンの解析結果、(c)エラーベクトル振幅の電子スピン緩和時間依存性

光学的スピン偏極変調を用いた実験系の構築

スピン偏極電子密度の光学的変調法を利用する実験系 (図 4) を構築した。市販の 1.55 μm 帯 InAlGaAs 量子井戸面発光レーザに (スピン無偏極) 電流を流して発振させ、その発振波長よりも十分に短波 (1480 nm) の光励起用レーザ光を注入する。このレーザ光には外部変調器によって 10 Gb/s の強度変調を施し、これを 2 分岐した後に遅延を与えて相関を無くし、互いに直交する直線偏光状態で合流し、最終的に面発光レーザの手前で σ_+ と σ_- の励起光が独立した 10 Gb/s の変調パターンを有するように偏光制御器を調節する構成である。ここで、先に述べたように円偏光と励起される電子のスピン偏極は光学遷移選択則によって関係づけられる。1565 nm の CW レーザ光は面発光レーザを注入同期させるための外部光である。面発光レーザの発振偏光軸から 45° 傾いた偏光子を用いることで、位相が直交する二つの信号成分 (I, Q) を発生させ、コヒーレント受光器を用いて各成分をそれぞれ検出する。

図 4 注入同期面発光レーザの光学的スピン偏極電子密度変調実験系

このような構成で 4 値の QAM 形式のベクトル変調光の検出を試みたが、光励起による面発光

レーザの変調光成分が微弱であるため観測には至らなかった。そこで、実験系の改善点を明確化するため、スピン無偏極電子を光励起する直線偏光強度変調光を励起光として用い、オンオフ変調形式のコンステレーションが得られるかどうかを調べた。その結果、図5に示すように、0と1のシンボル間で変化するオンオフ変調形式のコンステレーションが確認できた。本結果より、面発光レーザへ注入する励起光の光損失の低減や実験系の測定感度の向上がベクトル変調光の観測実現に寄与するものと考えられる。また、今回用いた面発光レーザは量子井戸活性層における障壁層を光励起することが困難であったが、井戸層と障壁層を両方光励起できる面発光レーザをサンプルとして用いることが測定感度の向上に寄与すると考えられる。

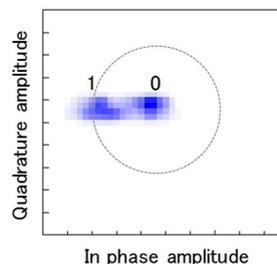


図5 光強度のコンステレーション測定結果

(2) アナログ光ファイバ無線伝送用光源への適用理論解析

面発光レーザの電流変調とスピン偏極変調の応答感度特性解析結果を図6(a)に示す。電流変調では約4.5 GHzに変調感度のピークを有し、3 dB帯域幅は6.7 GHzと狭い。この帯域幅はキャリアと光子の緩和振動現象に起因している。一方、スピン偏極変調時には複屈折に起因した偏光モード間の周波数分離(60 GHz)において大きな変調感度ピークが得られることがわかる。この共鳴的変調感度向上を利用し、面発光レーザにミリ波帯の変調信号を効率的に重畳するものである。この面発光レーザに対して、電流変調によって5 Gb/sの疑似ランダムビット信号をデータ信号として印加し、スピン偏極変調によって60 GHzの正弦波信号を重畳した。図6(b)に示すように、面発光レーザに2種類の異なる変調信号を印加した場合でも、その出力光強度の時間変化はデータ信号のみが反映されている。これはスピン偏極変調が出力光の偏光を変調することに起因し、図6(b)のように45°の偏光子を通過させることで60 GHzの信号が重畳されることを確認できる。

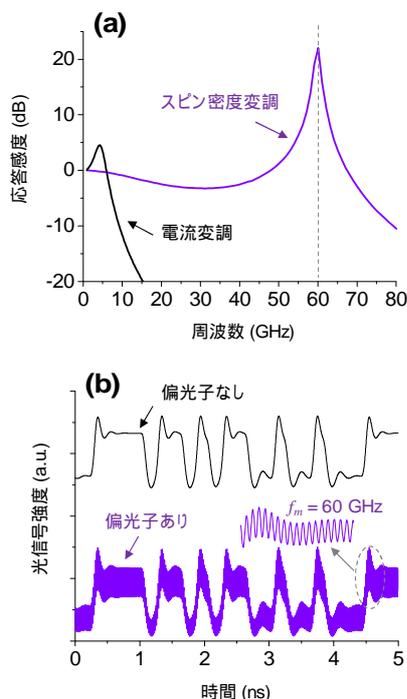


図6 (a)面発光レーザの電流変調とスピン偏極変調の応答感度解析結果、(b)偏光子を用いた高周波信号の重畳

原理検証実験

偏光子を用いた直交偏光モード間のビート信号重畳を検証するため図7(a)に示す構成で実験を行った。前述の実験で用いた面発光レーザには閾値電流の約2倍に相当する3 mAの電流を注入し、バイアスティを介してパルスパターン発生器(PPG)から出力した繰返し周波数156 MHzの矩形波信号パターンの電圧を重畳した。面発光レーザの出力光は85°の偏光子を通過させた後にコリメータによって光ファイバへ入力し、光ファイバ増幅器で増幅した後に不要な自然放出光ノイズ成分を光フィルタで除去し、単一走行キャリアフォトダイオード(UTC-PD)によって受光した。ここまです光ファイバによる伝送に相当する。受信した電気信号を25 GHzの局発信号(L0)と干渉させ、24 GHzのビート成分をヘテロダイン検出する。ここで、干渉させた同相成分(I)とその直交成分(Q)の信号から得られる絶対値の振幅を取得した。

面発光レーザを発振させたときの光スペクトルを図7(b)に示す。実線は面発光レーザの出力光を光スペクトラムアナライザで直接測定したデータであり、点線は偏光子を透過した光成分である。偏光子は主に発振している0°の直線偏光モードに対して85°ずらしており、このため直交する90°の直線偏光モードが相対的に大きく検出されている。各モードの間隔は24 GHzであり、この周波数でスピン偏極変調を行うと90°の直線偏光モードのスペクトル強度が共鳴的に向上するが、今回は検証実験であるため、発振には至っていない90°の直線偏光モードの光成分を活用して搬送波用の高周波信号を生成した。

送受信した信号波形を図7(c)に示す。送信信号波形は電流変調される面発光レーザの出力光波形であり、約156 MHzの矩形信号波形が確認できる。受信信号波形はLOと干渉させて検出したものである。二つの波形を比較すると信号周期と矩形の形状が一致しており、光ファイバ伝送後でもデータ信号が復調できていることが確認できる。本実験では、UTC-PDの受信信号をそのまま測定しているため無線信号伝送を含んでいないが、UTC-PDの受信信号をアンテナに導波することで自由空間に放出し、無線通信に用いることができる。このように、スピン制御面発光レーザの光ファイバ無線伝送への適用について、基本的アイデアを検証することができた。今後、高効率な電氣的スピン偏極変調を導入することで、小型かつ省電力な光ファイバ無線伝送用光源が実現できる。

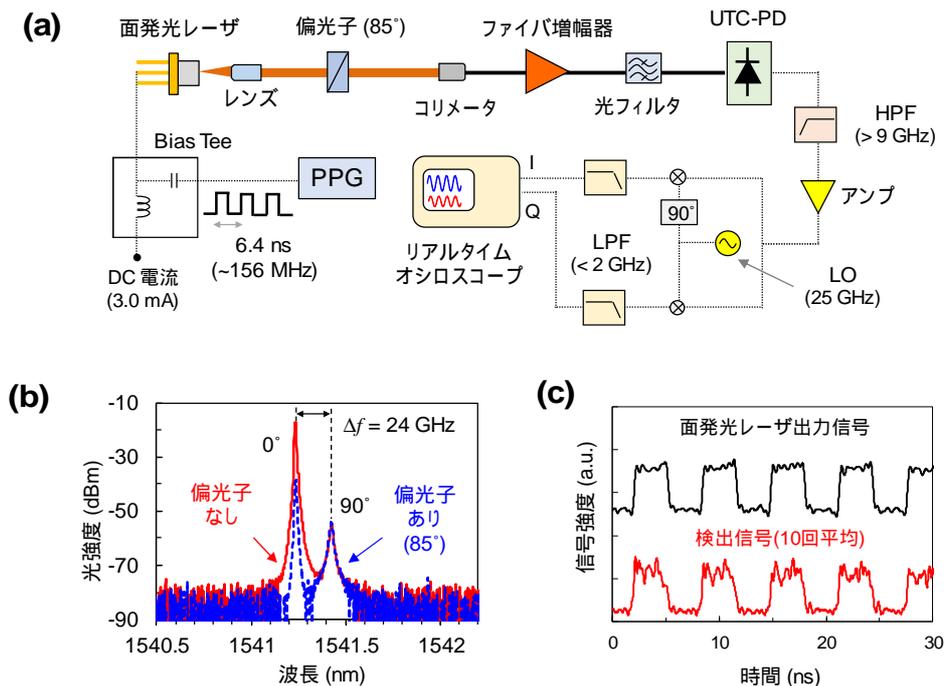


図7 (a)実験系の構成、(b)発振光スペクトル、(c)送信信号波形と受信信号波形

(3) 周波数シフト局発光源

ベクトル変調光をコヒーレント光通信で活用するためには、信号光と受信側の局発光を同期することが重要である。そこで本研究では、面発光レーザの注入同期とスピン偏極変調に基づく変調サイドバンドの生成を活用した周波数シフト局発光源を考案・検証した。スピンフリップレート方程式解析により、注入同期時のスピン制御面発光レーザから定常発振偏光に直交する直線偏光のサイドバンドが生成され、その生成効率は変調周波数が複屈折に起因する偏光モード間の周波数差と一致するときに最大化されることがわかった。また、このサイドバンド成分は注入同期用の外部光と同期していることがわかった。このことから、信号光とともにパイロットトーンを送信する場合、受信側に配置されたスピン制御面発光レーザによってパイロットトーンの信号対雑音比を改善しつつ周波数シフトできる。これは簡便なホモダイン検波を可能にする。

また、注入同期状態の面発光レーザが有するスピン偏極変調特性について実験的評価を行った。図8に示すように、出力光に対する外部光の注入強度比(IR)を小さくすることで、注入光なしのスピン偏極変調特性に近づくことを明らかにした。本結果は、信号光とともに送信されるパイロットトーンが微弱であっても感度良くサイドバンドを生成できることを示唆するものである。

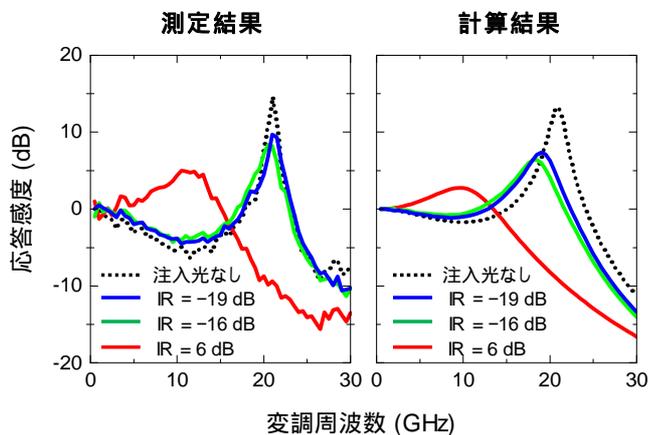


図8 注入同期面発光レーザのスピン偏極変調特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yokota Nobuhide, Yasaka Hiroshi	4. 巻 12
2. 論文標題 Spin Laser Local Oscillators for Homodyne Detection in Coherent Optical Communications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 573 ~ 573
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/mi12050573	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yokota Nobuhide, Ikeda Kazuhiro, Yasaka Hiroshi	4. 巻 33
2. 論文標題 Spin-Injected Birefringent VCSELs for Analog Radio-Over-Fiber Systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Technology Letters	6. 最初と最後の頁 297 ~ 300
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LPT.2021.3059697	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 3件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 N. Yokota, K. Ikeda, and H. Yasaka
2. 発表標題 pin-VCSELs for analog radio-over-fiber systems in 5G and beyond
3. 学会等名 SPIE OPTICS+PHOTONICS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横田信英, 池田和浩, 八坂洋
2. 発表標題 注入同期による面発光レーザのスピンの偏極変調特性制御
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 N. Yokota, K. Ikeda, and H. Yasaka
2. 発表標題 Numerical investigation of direct IQ modulation of spin-VCSELs for coherent communications
3. 学会等名 SPIE OPTICS+PHOTONICS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N. Yokota, K. Nisaka, K. Ikeda, and H. Yasaka
2. 発表標題 Spin polarization modulation of 1.55- μm VCSELs for high-speed data communications
3. 学会等名 SPIE OPTICS+PHOTONICS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関