

# 超高速省エネルギースピンの光インターフェースデバイスの研究

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

高精細動画配信サービスやビッグデータ解析、クラウドコンピューティングなどの普及に伴い、データセンターにおける通信トラフィックは近年急激に増大している。この通信トラフィックの中で、特にデータセンター内におけるデータ通信の割合が 70%程度と大きく [1]、100 m 以下程度の短距離通信の高速化や省電力化が重要視されている。そのため、低コストかつ閾値電流が低く省電力で駆動可能な面発光レーザ (VCSEL) の変調帯域を拡大することが今後より一層重要となる。しかしながら、VCSEL に限らず、通常の半導体レーザでは変調感度が緩和振動周波数を上限とした高周波領域において急激に低下するため [2]、得られる変調帯域は実質的に 30 GHz 程度に制限されていた [3, 4]。また、緩和振動周波数を十分に増大させるためには閾値電流の 10 倍以上といった大きな電流を注入する必要があり、高速化と省電力化の間にトレードオフの関係があった。このため、緩和振動周波数によって制限されない超高速な VCSEL の実現が求められていた。これまでに、VCSEL へ外部共振器構造を導入することで緩和振動周波数よりも高周波側の変調感度を共鳴的に向上させる取り組みが報告されている [5-7]。しかし、所望の変調特性を得るためには VCSEL と外部共振器との結合係数や位相の精密な調節を行う必要があり、このための制御端子を VCSEL に対して横方向に形成する必要があるため、再現性の良いデバイス作製に関しては高い技術が要求される。VCSEL を外部のマスターレーザに注入同期させることで広帯域な変調動作が実現できることも知られているが [8]、VCSEL とマスターレーザの発振周波数差や注入光強度比を精密に制御することが要求されるため、大掛かりな光源構成となることは避けられない。以上のように、緩和振動周波数で制限されない広帯域な変調周波数特性を有する VCSEL を、従来とは異なるアプローチから開発することが求められていた。

また、光-電気-光の変換を行わない全光信号処理に基づく省電力な光ルータの実現が期待されているが、これには光信号を一時的に保存するための光メモリが必要となる。しかし、光を停止させることや大幅な遅延を与えることが困難であることに由来して光メモリの実現は困難であり、待機時の駆動電力削減の面でも課題がある。このような課題の解決に向けて、磁性材料を活用した省電力な不揮発性光メモリの構造が提案された [9]。そこでは、右回り円偏光または左回り円偏光の注入光信号によって強磁性電極の磁化情報を書き換えて不揮発的に保存し、その読出しは強磁性電極からスピン偏極電子を VCSEL に注入し、電子のスピン偏極状態に対応した右回りまたは左回りの円偏光でレーザ発振させることで実現する。この場合、一般的な VCSEL とは異なる注入電子のスピン偏極変調下において駆動されることになるが、このような変調下における VCSEL の動特性は明らかにされていない。また、読み出した左右の円偏光間での偏光変調信号は光ファイバにおける偏波依存性を通じて劣化することが懸念されるため、強度変調や位相変調などのフォーマットに変換することも重要である。

そこで本研究では、VCSEL のスピン偏極変調特性を理論・実験の両側面から明らかにすることを目的とした。緩和振動周波数で制限されない超高速変調の可能性や変調信号フォーマット変換の可能性などを議論し、超高速直接変調レーザ光源としてのデバイス実現に向けた課題も明確にする。また、VCSEL のスピン偏極変調下において変調帯域の上限となる要素の考察や更なる広帯域化に向けた改善指針についても数値解析結果を基に議論する。

## 2 スピンリップレート方程式解析

### 2-1 解析モデル

本研究で解析対象とするデバイスの概念図を図 1(a) に示す。上向きまたは下向きにスピン偏極した電子をそれぞれ独立して VCSEL の活性層へ電流注入可能な構造である。このようにスピン偏極した電子を注入するための電極として、FePt/MgO や Fe/Tb 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 [10, 11] を用いることができる。注入する全電子密度を一定とし、各スピン偏極電子の密度差を差動的に変化させる状況をスピン偏極変調と定義する。正孔の注入には通常のオーミック電極を用いる。VCSEL から出力される光の

偏光状態は、活性層における電子のスピンの偏極状態を反映して左右の円偏光間で変調される。これには図 1(b)に示す光学遷移選択則[12]が関係している。この選択則は電子と光子の間での角運動量保存則に基づくものであり、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、伝導帯において下向きスピンの偏極している電子は重い正孔との再結合によって光子を放出する際、右回り円偏光を放出する。逆に右回り円偏光の光子を吸収することでスピン偏極電子が励起されるため、後で述べる VCSEL への光学的スピン偏極電子の注入実験においてこの選択則を利用する。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、VCSEL 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。本構造では独立した電極から上向きスピン電子と下向きスピン電子を注入するため、活性層において各スピンの空間的に分離することが懸念されるが、VCSEL において広く用いられている酸化電流狭窄層によって活性層における各スピンの面内空間分布を均一化することができる。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。

VCSEL のスピン偏極変調下において予想される変調特性を図 1(c)に示す。一般的に VCSEL 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、これは一種の外部共振器のように振る舞う。つまり、x 偏光と y 偏光に対して VCSEL 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、VCSEL が x 偏光で発振しており、直交する y 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 y 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。このような定性的原理によって、スピン偏極変調下では偏光モード間の周波数分離に一致する変調周波数での共鳴的変調感度の向上が期待される。なお、全電流を一定とした差動的変調を行うため、通常の VCSEL の電流変調時に生じる緩和振動現象は生じないと考えられる。

解析に用いるスピンのフリップレート方程式を以下に示す。

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

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

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 $N^-$ は上向きスピンと下向きスピンの電子密度を表す。 $\alpha$ ,  $\Gamma$ ,  $v_g$ ,  $A_g$ ,  $N_t$ ,  $\varepsilon$ ,  $\gamma_a$ ,  $\gamma_p$ ,  $\tau_p$ ,  $\tau_c$ ,  $\tau_s$ ,  $I$ ,  $e$ ,  $V$ ,  $M$ ,  $f_m$ 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、光子寿命、キャリア寿命、電子スピン緩和時間、注入電流、電気素量、活性層体積、変調振幅係数、変調周波数を表す。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1~3項目がそれぞれ誘導放出、2つの偏光モード間の結合、共振器内の光損失を表す。式(2)は上向きスピンと下向き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解析する。これらの式は、VCSEL の偏光スイッチング現象などを議論するために考案されたスピンのフリップモデル[13]において利得飽和効果を考慮し、定量的に扱えるように変形したものである。特に記述が無い場合は $\gamma_a = 1$  GHz,  $\gamma_p = 100$  GHz,  $\varepsilon = 1 \times 10^{-18}$  cm<sup>-3</sup>,  $\tau_s = 0.01$  ns,  $I = 5$  mA,  $M = 1$ をパラメータとして用いた。その他のパラメータには、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  $\mu$ m 帯 VCSEL において実験的に評価されたパラメータ[14]を用いた。

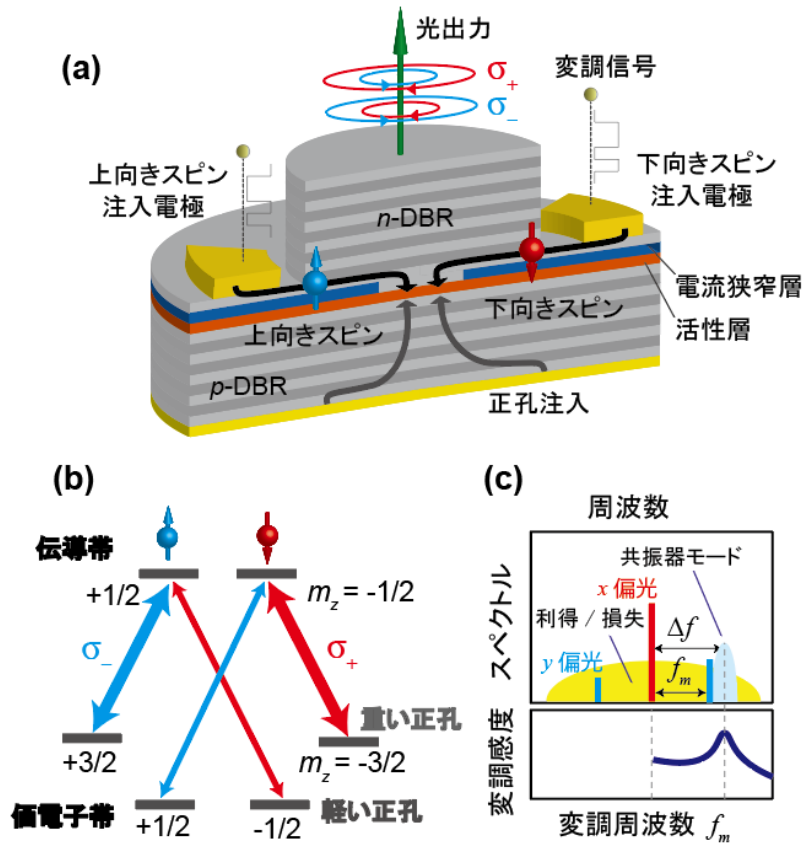


図 1 (a) スピン偏極変調 VCSEL の概念図、DBR: 分布ブラッグ反射鏡、(b) 量子井戸における光学遷移選択則、(c) 複屈折を有する VCSEL の共振器モードとスピン偏極変調感度特性の関係

## 2-2 解析結果：スピン偏極変調特性

まず、100 GHz の RF 信号によって VCSEL のスピン偏極変調を行った時の偏光分解光スペクトルを図 2(a) に示す。これは解析によって得られた複素電界の時間変化を高速フーリエ変換したものである。本解析において、VCSEL は無変調時に x 偏光で発振しているが、スピン偏極変調によって生成された変調サイドバンド成分はそれに直交する y 偏光を有していることが確認できる。これは、x 偏光と y 偏光がそれぞれ右回り円偏光と左回り円偏光の和と差によって表されることと対応している。また、片側の変調サイドバンドのみ高い強度を示しているが、これは図 1(c) で示した関係によって理解できる。VCSEL を電流変調した場合には変調サイドバンドが発振偏光と同じ x 偏光のままであるため、このような現象は観測されない。また、変調サイドバンドの増幅効果に起因し、VCSEL の変調周波数特性において共鳴的な変調感度の向上が生じる。100 GHz のスピン偏極変調下における偏光状態の時間変化をストークスペクトルの軌跡として図 2(b) に示す。ポアンカレ球面上の上下の極はそれぞれ右回り円偏光と左回り円偏光の状態を表している。ストークスペクトルの軌跡から偏光は左右の楕円偏光間で変調されていることがわかる。ここで得られる最大の円偏光度は各偏光間の相対的利得差に相当する二色性  $\gamma_a$  の大きさによって制限されている。スピン偏極変調時における変調周波数特性の解析結果を図 2(c) に示す。変調感度は右回りと左回りの円偏光光子密度差  $|E^+|^2 - |E^-|^2$  から評価しており、 $\tau_s = 1$  ns かつ変調周波数 1 GHz における変調感度を基準としている。スピン偏極変調時の変調感度は  $1/\tau_s$  を上限として低下するローパスフィルタのような特性を示しており、 $\tau_s$  が 0.01 ns において 100 GHz を超える 3 dB 帯域が得られることを示している。また、 $\gamma_p$  に一致する変調周波数 100 GHz において共鳴的に変調感度が向上していることが確認でき、このピーク強度は  $\gamma_a$  の値が 1 GHz から 50 GHz に増大することで低減される様子が確認できる。これらの傾向は図 1(c) から定性的に予想される変調特性に相当するものであり、低周波領域における変調感度を犠牲にする代わりに、緩和振動周波数を大幅に超える高周波領域まで変調感度特性を平坦化することが可能であることを示している。

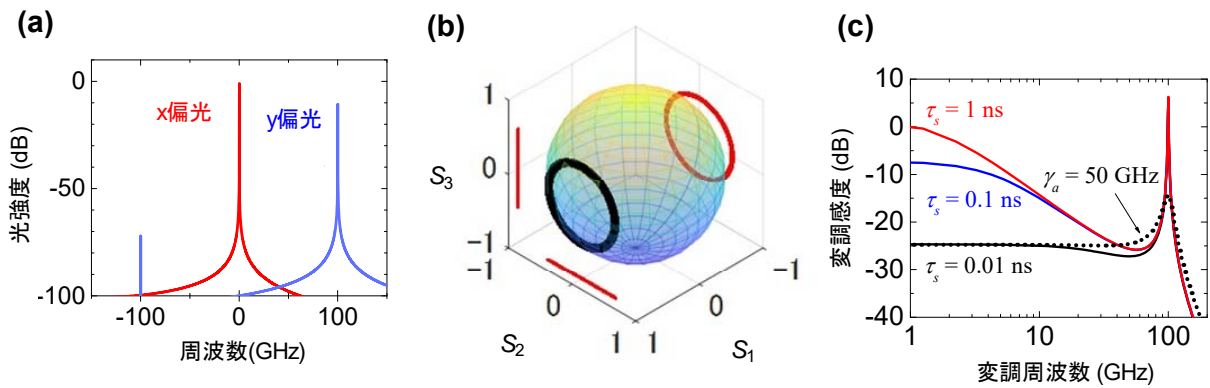


図2 (a)100 GHz スピン偏極変調時の偏光分解光スペクトル、(b)ストークスペクトルの軌跡、(c)変調周波数特性の $\tau_s$ 依存性

### 2-3 解析結果：光信号の発生とフォーマット変換

前節では単一周波数においてスピン偏極変調した場合の解析結果を示したが、ここでは変調信号を 100 Gb/s の non-return-to-zero (NRZ)  $2^2-1$  擬似ランダムビット信号列として解析を行った。VCSEL 出力光の右回り円偏光光子密度と左回り円偏光光子密度の差 $|E^+|^2 - |E^-|^2$ をアイパターンとして図 3(a)に示す。100 Gb/s という超高速な変調信号下においても良好なアイ開口が見られる。周期的な振動は $\gamma_p = 100$  GHz であることに起因した共鳴的感度向上によるものであるが、この寄与は VCSEL における電氣的 RC 時定数に起因した変調感度の低下を相殺するために活用でき、 $\gamma_a$ を通じて制御可能である。

このような偏光変調信号に対し、クロスニコル配置の偏光子を適用することで差動位相変調信号のフォーマットに変換できる。無変調時の VCSEL が x 偏光で発振する場合、偏光子は光出力を消光するが、スピン偏極変調によって発生した y 偏光を有する変調サイドバンド成分は透過する。10 Gb/s NRZ 信号によるスピン偏極変調時の y 偏光電界成分について解析した位相の時間変化を図 3(b)に示す。この図から、スピン偏極変調によって y 偏光電界の位相が反転する効果が確認できる。ここで、差動位相変調信号は市販の遅延干渉計を用いることで非同期条件下においても検出することができ、最も基本的な強度変調信号に比べて受信感度が 3 dB 高く、強度変調を行わないことから、光ファイバ中における非線形効果に起因した波形歪の影響を抑制できるという特徴を有する。

以上の解析結果より、VCSEL をスピン偏極変調によって動作させる場合、高い複屈折 $\gamma_p$ と短いスピン緩和時間 $\tau_s$ を有する VCSEL を用いることで緩和振動周波数によって制限されない超高速な応答が可能であり、偏光子の適用によって差動位相変調信号へフォーマットを簡便に変換可能であることがわかった。

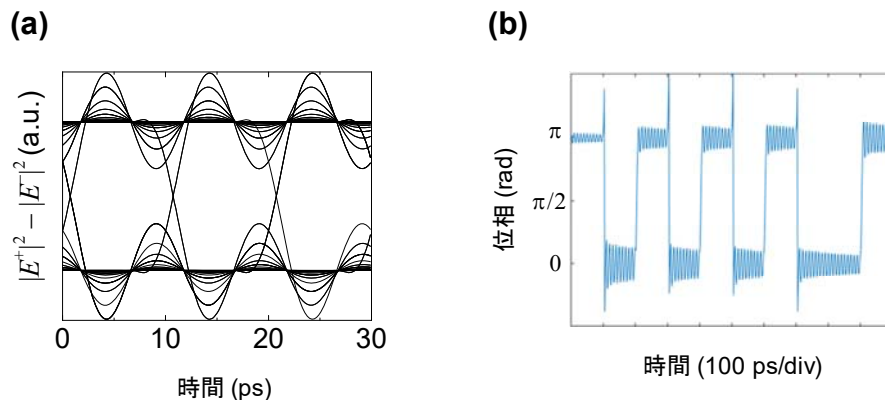


図3 (a)100 Gb/s NRZ スピン偏極変調時における偏光変調信号のアイパターン、(b)10 Gb/s NRZ スピン偏極変調時における y 偏光電界位相の時間変化

### 3 原理検証実験

#### 3-1 測定サンプル

サンプルには RayCan 社製の  $1.55\ \mu\text{m}$  帯 InAlGaAs 量子井戸 VCSEL [15] を用いた。本サンプルのメサ領域の断面を集束イオンビーム加工によって露出させ透過電子顕微鏡観察した結果を図 4(a) に示す。活性層は井戸幅  $6\ \text{nm}$  の 7 層歪補償量子井戸であり、上側の分布ブラッグ反射鏡 (DBR) の上には反射率増強とフリップチップボンディングのための Au 膜が形成されている。InP 基板側から出力光を取り出す裏面出射型であり、図 4(b) に示すように Au 膜側をサブマウントにフリップチップボンディングしている。VCSEL の複屈折に起因した偏光モード間の周波数分離を制御するため、レーザ加工による異方性応力付加 [16] を導入した。VCSEL チップの中央領域にある直径  $12\ \mu\text{m}$  のメサ領域周辺で応力分布が変化するように、CW チタンサファイアレーザを用いたレーザ加工によって InP 基板を貫通する穴を形成した。今回はフリップチップボンディングされた VCSEL のメサ領域への応力分布を変化させるために大規模なレーザ加工を必要としたが、表面出射型 VCSEL の場合、今回のような穴を形成しない程度の微弱なレーザ照射によって複屈折制御が可能である [17]。以上のように、レーザ加工によって 3 つの異なる偏光モード周波数分離を示すサンプルを作製した。各サンプルの発振スペクトルを図 4(c) に示す。偏光モード周波数分離と閾値電流はそれぞれ  $17.5\ \text{GHz}$  ( $1.7\ \text{mA}$ )、 $19.4\ \text{GHz}$  ( $1.3\ \text{mA}$ )、 $45.8\ \text{GHz}$  ( $1.6\ \text{mA}$ ) であり、これらをサンプル No. 1, 2, 3 とする。

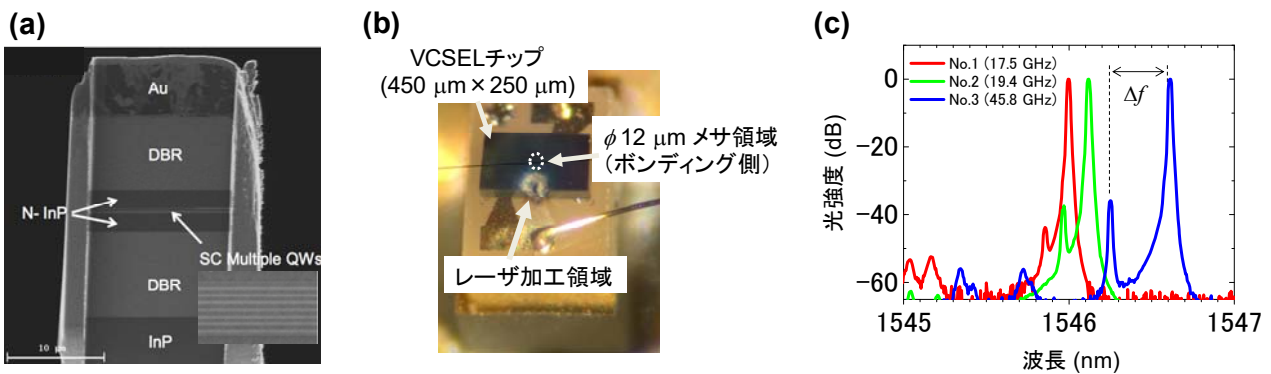


図 4 (a) VCSEL メサ領域の透過電子顕微鏡写真、(b) レーザ加工された VCSEL チップの光学顕微鏡写真、(c) VCSEL の発振スペクトル測定結果 (電流  $5\ \text{mA}$ )

#### 3-2 高速偏光変調器の構築

VCSEL の量子井戸活性層へ光学的にスピン偏極電子を注入するため、光学遷移選択則に従って右回りまたは左回りの円偏光によって量子井戸を光励起することが必要となる。偏光変調器としては光弾性変調器などが知られるが、GHz オーダの高速性は得られない。そこで、図 5(a) に示す構成で高速偏光変調器を構築した。まず、CW レーザ光をファイバ型の偏光スプリッターへ入力し、互いに直交する直線偏光成分に分離・合波し、偏光分解マッハツェンダ干渉計を形成する。片側の経路のみファイバ型の高速な位相変調器を挿入し変調することで、各偏光成分を合波した時の位相差が変調されるため、これによって左右の円偏光間で高速に変調することが可能となる。干渉計の相対的位相差  $\Delta\phi$  が  $0$  の場合は、 $\pi$  の位相変調振幅を与えることで図 5(b) に示すように左右の円偏光間での変調が可能となるが、例えば  $\Delta\phi$  が  $\pi/2$  の場合、出力光の偏光状態は互いに直交する直線偏光間での変調となり、スピン偏極度を効率よく変調することができない。本研究で構築した偏光変調器では、偏光分解マッハツェンダ干渉計を形成している光ファイバの振動や温度揺らぎなどによって僅かに  $\Delta\phi$  のドリフトが見られた。この成分は位相変調器にバイアス・ティーを介した DC 電圧を加えることで相殺できるため、後で述べるように偏光状態の変動を検出し、DC 電圧としてフィードバック制御することで安定した偏光変調を実現した。



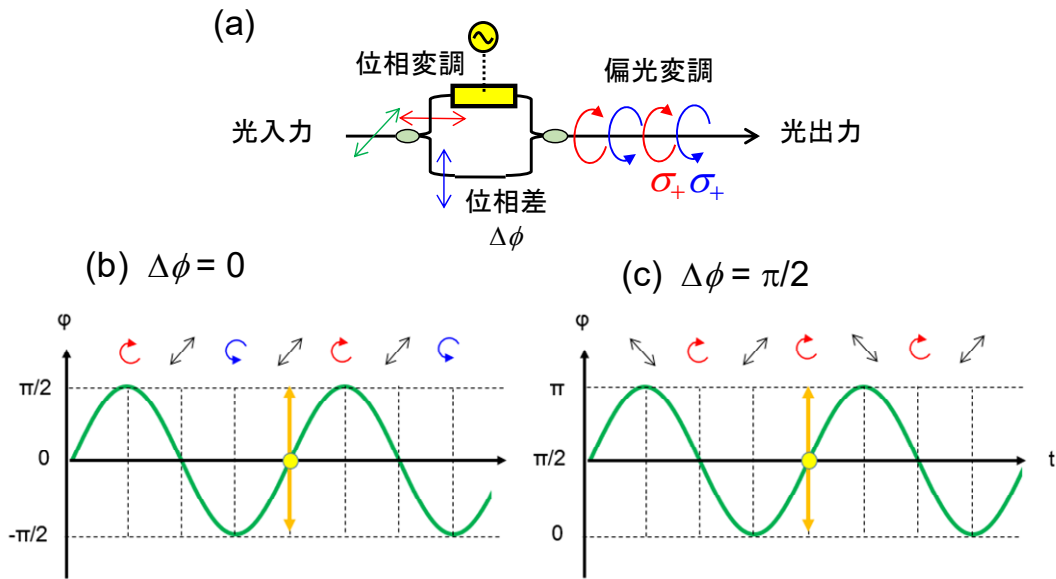


図5 (a)構築した偏光変調器の構成、(b)  $\Delta\phi = 0$  と (c)  $\Delta\phi = \pi/2$  における偏光状態の時間変化

### 3-3 VCSEL のスピン偏極変調実験

光学的手法を用いた VCSEL のスピン偏極変調により原理検証実験を行った。その実験系を図 6 に示す。波長 1485 nm の CW レーザ光を偏光変調器によって高速変調し、VCSEL へ注入することで活性層に光励起される電子のスピン偏極度を光学遷移選択則を通じて変調する。この波長では VCSEL の DBR の反射率が 30-40%程度に低下しているため、活性層量子井戸を効率良く光励起することができる。励起光強度はサンプルの直前で 1 mW となるように設定した。偏光変調器を構成する偏光分解マッハツェンダ干渉計の各径路における相対位相差のドリフトが偏光状態のドリフトとして生じるため、これを光パワーの変化としてフォトダイオードで検出し、位相変調器に印加する DC バイアスからフィードバック補正している。サンプル直前の光学系を自由空間で構築することにより、光ファイバ中での偏光揺らぎが測定に与える影響を低減した。VCSEL には閾値以上の電流を注入することでレーザ発振させ、光学的スピン偏極変調に起因して発振偏光が左右の楕円偏光間で変調される効果を検出する。光フィルタによって VCSEL の出力光から励起光を除去した後、左右円偏光成分をバビネソレイユ補償板によって互いに直交する直線偏光成分に変換し、偏光スプリッタとバランスドレシーバを用いることで偏光変調信号の差分を検出する。光検出感度を向上させるため、光ファイバ増幅器によって VCSEL の出力光を増幅し、SN 比を劣化させる自然放出光ノイズ成分をバンドパスフィルタで除去している。偏光変調器に印加する変調信号周波数を掃引し、この周波数に対応するバランスドレシーバの出力信号強度を RF スペクトラムアナライザで測定することでスピン偏極変調に対する変調周波数特性を得る。変調器やバランスドレシーバなどの測定器に由来する周波数応答特性はサンプルの測定データから差し引いて補正した。また、比較のためにマッハツェンダ強度変調器を用いて強度変調した光を VCSEL に注入し、通常の電流変調を行った場合に相当する結果も取得した。この測定ではバランスドレシーバの代わりに単一のフォトレシーバを用いて光の強度変調成分を検出した。

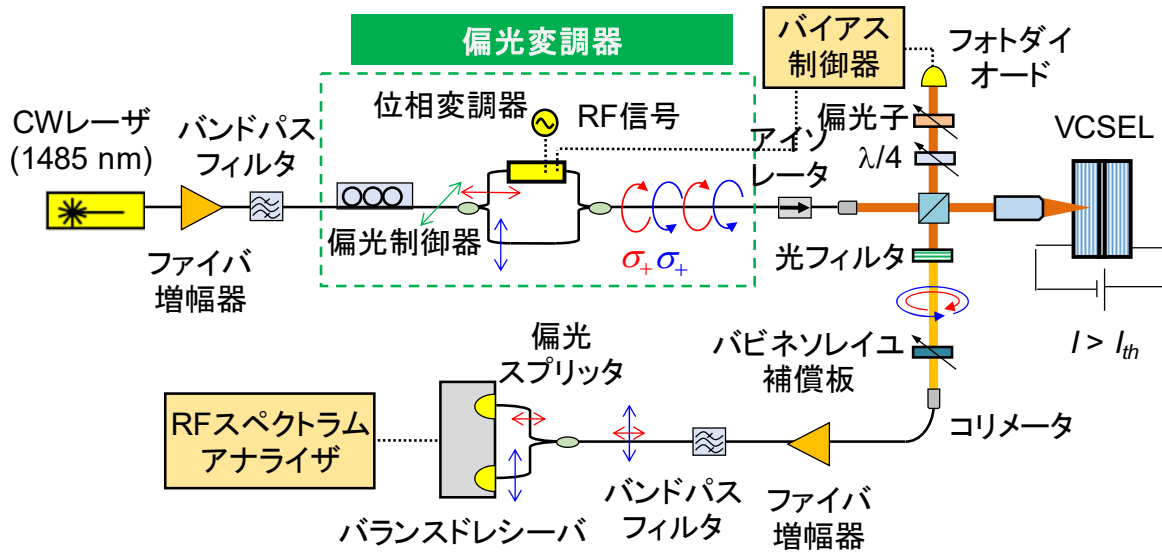


図6 VCSELの光学的スピン偏極変調実験系の構成

### 3-4 実験結果

19.4 GHzの偏光モード周波数分離を有するサンプル No. 2 について変調周波数特性を測定した結果を図7(a)に示す。5.0 mAのDC電流を注入した状態で強度変調光を注入した場合、約3 GHzの緩和振動周波数をピークとして急激に感度が低下し、3 dB帯域は4.5 GHzの狭い値であった。この緩和振動周波数は同じデバイス構造を有するRayCan社製のVCSELに対する典型的な値であり[14]、このような狭い帯域では10 Gb/sを超える高速な変調信号を発生させることができない。一方、偏光変調光を注入した場合、偏光モード間の周波数分離に一致する約19.5 GHzをピークとした共鳴的特性を示しており、23 GHzの広い3 dB帯域が得られた。この結果は、図7(b)に示すように実験条件に対応させた変調周波数特性の解析結果と傾向がよく一致し、スピン偏極変調に特有の応答が観測されたものと考えられる。ここでの解析では、実験結果を良く再現可能なパラメータとして、 $\gamma_a = 0.5$  GHz,  $\gamma_p = 19.4$  GHz,  $\tau_s = 20$  psを用い、その他のパラメータは先に述べた数値解析時と同じ値を用いた。また、注入電流を2.6 mA ( $2.0 I_{th}$ ), 5.0 mA ( $3.8 I_{th}$ ), 6.6 mA ( $5.1 I_{th}$ )と変化させても変調特性には大きな変化が見られなかった。図7(a)において、19.5 GHzでの変調感度ピークが注入電流の増大につれて低下しているが、これは定常状態におけるキャリア密度の上昇が利得飽和を通じて変調感度を低下させたものと考えられる。変調時のチャープの影響によって変調感度のピークが0.5 GHz程度シフトすることが数値解析で予想されたが、実験では周波数分解能の制限のために観測されなかった。

サンプル No. 1, 3 についても注入電流5.0 mAにおいて同様に測定した結果を図7(c)に示す。偏光モード間の周波数分離が17.5 GHzのサンプル No. 1 において、この周波数分離に一致する17.5 GHzで変調感度のピークが見られた。サンプル No. 3 では、偏光モード間の周波数分離45.8 GHzにおいて変調感度のピークが存在すると予想されるが、本実験系で測定可能な帯域の範囲外のため確認できていない。しかしながら、No. 1, 2 のサンプルとは異なり共鳴的な変調感度のピークが見られないことから、本実験で観測された変調感度ピークが偏光モード間の周波数分離によって制御可能であることを支持する結果である。各サンプルに相当する複屈折 $\gamma_p$ を考慮した解析結果を図7(d)に示す。サンプル No. 1, 2 に関しては共鳴的に感度が向上する特徴が良く再現されていることがわかる。サンプル No. 3 について比較すると、実験的に得た変調周波数特性の方が20 GHz付近における変調感度の劣化が大きい。この要因としてはVCSELの量子井戸活性層におけるスピン緩和時間の影響が考えられる。本解析では20 psの $\tau_s$ を用いることで実験結果を再現しているが、 $\tau_s$ が長くなるほど図2(c)で示したように、中間周波数領域での変調感度が低下する傾向がある。VCSELにはレーザ加工によって異方的な応力を付加しているが、量子井戸に対して面内・面直の両方に応力分布が存在すると予想され、これが $\tau_s$ の値に影響したことが考えられる[18, 19]。

850 nm帯、980 nm帯のVCSELではGaAs/AlGaAsやInGaAs/GaAsから成る量子井戸を活性層に用いたVCSELが市販されているが、これらの量子井戸における $\tau_s$ は室温で10–50 psオーダーであることが知られており[20–22]、スピン偏極変調によるVCSELの高速動作という観点では適した値である。また、本研究では偏光モ

ード間の周波数分離を制御するためにレーザ加工を用いたが、VCSEL のメサ形状に異方性を持たせる方法や熱的に制御する方法なども報告されている [23, 24]。100 GHz を超える周波数分離も実験的に観測されており [25]、このような大きな周波数分離（複屈折）を得ることが更なる広帯域化において重要である。

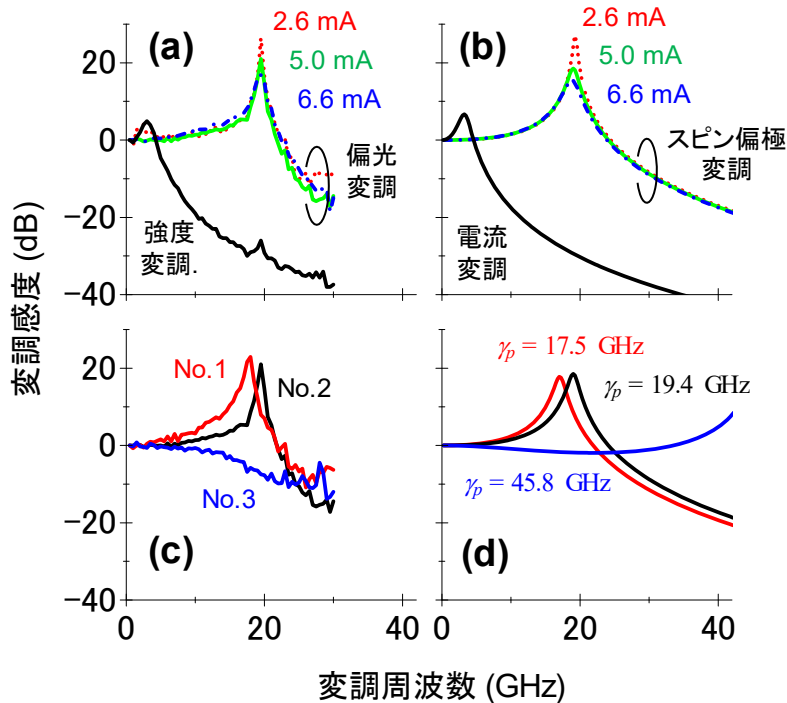


図 7 (a) サンプル No. 2 における変調周波数特性の測定結果と (b)  $\gamma_p = 19.4$  GHz における計算結果、注入電流：2.6, 5.0, 6.6 mA、(c) サンプル No. 1-3 におけるスピン偏極変調周波数特性の測定結果と (d)  $\gamma_p = 17.5$  GHz, 19.4 GHz, 45.8 GHz における計算結果、注入電流：5.0 mA

#### 4 まとめ

本研究では、これまで明らかにされていなかった VCSEL のスピン偏極変調特性を理論・実験の両側面から調査した。スピンフリップレート方程式解析により、本変調方式によって緩和振動周波数で制限されない VCSEL の超高速動作を実現可能であり、偏光子を用いることで偏光変調信号を簡便に差動位相変調信号へ変換可能であることを明らかにした。InAlGaAs 量子井戸 VCSEL のメサ領域における複屈折をレーザ加工による応力付加で制御し、発振偏光モード間の周波数分離に一致する変調周波数においてスピン偏極変調感度の共鳴の上昇効果を観測した。電流変調では 3 dB 帯域が 4.5 GHz に留まる低速な VCSEL をスピン偏極変調することで、23 GHz の大幅に広い 3 dB 帯域を得ることに成功した。

今後は、スピン偏極変調 VCSEL から出力される偏光変調信号の変調度を向上させるための検討を進めると共に、偏光変調信号を偏光子の適用によって差動位相変調信号にフォーマット変換し、本研究の数値解析によって予想した結果との比較・検証を進める予定である。

本研究の遂行において多大なご支援を頂きました貴財団に心よりお礼申し上げます。

#### 【参考文献】

- [1] Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2014–2019 White Paper.
- [2] L. A. Coldren, S. W. Corzine, and M. L. Mashanovitch, Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits, 2nd ed. (Wiley, New York, 2012).



- [3] A. Larsson, J. S. Gustavsson, E. Haglund, E. P. Haglund, T. Lengyel, E. Simpanen, and M. Jahed, "VCSEL Modulation Capacity: Continued Improvements or Physical Limits?", IEEE Optical Interconnect Conference, (2017).
- [4] N. H. Zhu, Z. Shi, Z. K. Zhang, Y. M. Zhang, C. W. Zou, Z. P. Zhao, Y. Liu, W. Li, and M. Li, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 24, 1500219 (2018).
- [5] H. Dalir and F. Koyama, Appl. Phys. Express 7, 022102 (2014).
- [6] S. T. M. Frysile, M. P. Tan, D. F. Siriani, M. T. Johnson, and K. D. Choquette, IEEE Photon. Technol. Lett. 27, 415 (2015).
- [7] H. Dalir and F. Koyama, Appl. Phys. Express 7, 092701 (2014).
- [8] C.-H. Chang, L. Chrostowski, and C. J. C.-Hasnain, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 9, 1386 (2003).
- [9] 奈良先端大、特許第 5688739 号.
- [10] A. Sinsarp, T. Manago, F. Takano, and H. Akinaga, Jpn. J. Appl. Phys. 46, L4 (2007).
- [11] 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).
- [12] M. Holub and P. Bhattacharya, J. Phys. D: Appl. Phys. 40, R179 (2007).
- [13] M. S. Miguel, Q. Feng, and J. V. Moloney, Phys. Rev. A 52, 1728 (1995).
- [14] P. Pérez, A. Valle, and L. Pesquera, J. Lightw. Technol. 32, 1601 (2014).
- [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] N. Yokota, R. Takeuchi, H. Yasaka, and K. Ikeda, IEEE Photon. Technol. Lett. 29, 711 (2017).
- [17] A. K. Jansen van Doorn, M. P. van Exter, and J. P. Woerdman, Appl. Phys. Lett. 69, 3635 (1996).
- [18] I. Žutić, J. Fabian, and S. D. Sarma, Rev. Mod. Phys. 76, 323 (2004).
- [19] D. J. English, P. G. Lagoudakis, R. T. Harley, P. S. Eldridge, J. Hübner, and M. Oestreich, Phys. Rev. B 84, 155323 (2011).
- [20] A. Tackeuchi, T. Kuroda, S. Muto, Y. Nishikawa, and O. Wada, Jpn. J. Appl. Phys. 38, 4680 (1999).
- [21] A. Malinowski, R. S. Britton, T. Grevatt, R. T. Harley, D. A. Ritchie, and M. Y. Simmons, Phys. Rev. B 62, 13034 (2000).
- [22] F.-k. Hsu, W. Xie, Y.-S. Lee, S.-D. Lin, and C.-W. Lai, Phys. Rev. B 91, 195312 (2015).
- [23] K. D. Choquette and R. E. Leibenguth, IEEE Photon. Technol. Lett. 6, 40 (1994).
- [24] M. Lindemann, T. Pusch, R. Michalzik, N. C. Gerhardt, M. R. Hofmann, Appl. Phys. Lett. 108, 042404 (2016).
- [25] T. Pusch, M. Lindemann, N. C. Gerhardt, M. R. Hofmann, and R. Michalzik, Electron. Lett. 51, 1600 (2015).

### 〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
電子スピン偏極変調による InAlGaAs 面発光半導体レーザの高速動作	第 65 回応用物理学会春季学術講演会	2018 年 3 月 18 日
High-Speed Modulation of 1.55- $\mu\text{m}$ VCSELs with Spin Polarization Modulation	Conference on Lasers and Electro-Optics	2018 年 5 月 15 日