

研究課題別研究評価

1. 研究課題名: 偏光双安定面発光半導体レーザ
2. 研究者氏名: 河口 仁司
3. 研究のねらい:

我々は最近、外部から光トリガパルスを注入することにより、面発光半導体レーザの発振偏光を極めて高速にスイッチング出来ること、動作条件によっては双安定にスイッチング出来ることを実験的に世界で初めて明らかにした。現在のところ、我々はこれらの現象は利得飽和効果によって生ずるものと考えている。

本研究では、この現象を一層明確にし、より高速なスイッチングや新規な機能をもつ光機能素子を実現するため、偏光のスイッチングや双安定特性を相転移としてとらえ一般化するとともに、半導体のバンド構造もとり入れた密度行列法を用いて詳細な解析を行いその物理機構を解明する。又、半導体レーザの発振偏光を任意に制御することを目標として、円偏光発振の可能性を検討する。さらに、半導体レーザのレーザ発振偏光と注入電子のスピン状態との関係を明らかにし、スピン偏極した電子の注入によるレーザ発振偏光の制御の可能性を検討する。

4. 研究結果及び自己評価:

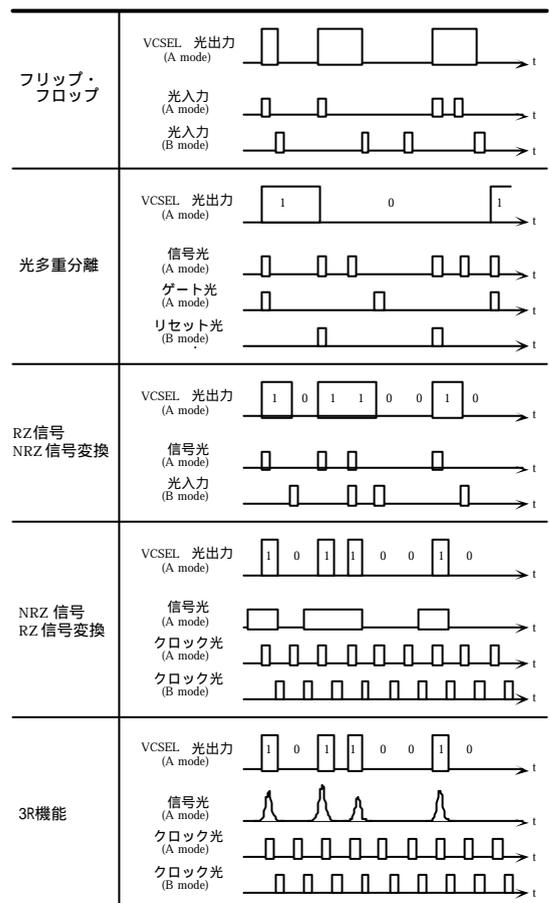
偏光双安定性の起源の解明

半導体レーザの偏光双安定特性は、その光自身による光学利得の飽和と、相直交した偏光面を持つ光によって引き起こされる光学利得の飽和の大きさに依存している。これまで、これらの係数の間の関係について詳細な検討がなされていなかった。解析の結果、バルク活性層をもつ VCSEL では、広い波長域にわたって双安定の条件を満足すること [国際会議 3]、量子井戸 VCSEL の場合には、電子と重い正孔の間の遷移に対応する波長付近でより一層偏光双安定性が得やすいことがわかった [学術論文 1]。従って、面発光半導体レーザの偏光双安定特性は、極めて普遍的な特性であると言える。

各種全光型信号処理の実現

面発光半導体レーザの偏光双安定性と高速スイッチング特性を用いて、表 1 に示す種々の光信号処理を実現した [国際会議(招待講演)1.4、国際会議 6]。面発光半導体レーザの発振偏光が、光入力のパルスと同一の偏光にスイッチングし、保持されることから、全光型フリップ・フロップが実現できる。一時メモリとして光交換への応用が期待される。信号光とゲート光が同時に入力されたとき偏光がスイッチするように設定すれば、時間多重信号から必要なチャンネルを取り出す光多重分離が可能になる。このときビット長が変換できる他には見られない機能を

表 1 . 実現した種々の光信号処理



もつ[国際会議(招待講演) 2.3、国際会議 1]。さらに RZ 信号(return-to-zero 信号)と NRZ 信号(non-return-to-zero 信号)との変換も可能 [国際会議 2.5]であり、基幹回線のような高速の回線に適した RZ 信号と LAN のような低速の回線に適した NRZ 信号とが自由に変換出来る。さらに、信号光からクロック光を抽出し、信号光と、2 つの直交する偏光をもつクロック光を面発光半導体レーザに注入することにより、光中継器として必要とされる光 3R 機能(Retiming, Reshaping, and Regenerating)も実現できる。光 3R 中継に関しては特許を出願した[特許]。

スピン偏極電子の緩和およびスピン偏極電子注入

面発光半導体レーザの偏光を制御する事を目標に、光励起により生成したスピン偏極電子が半導体中を輸送される間のスピン緩和、強磁性金属から半導体へのスピン偏極電子の注入を検討した。

$Al_{0.1}Ga_{0.9}As$ 層で光励起により生成されたスピン偏極電子が、pn 接合を介して InGaAs 井戸層へ注入され、ドーパされた正孔と発光再結合をする構造の試料を作製した。図 1 に示すようにスピン緩和時間は 170ps であった。一方、直接井戸層で励起された電子のスピン緩和時間が 100ps であったことから、pn 接合を伝導したスピン偏極電子は井戸層の正孔を枯渇させ、その結果 BAP スピン緩和機構の寄与が小さくなり、スピン緩和時間が若干長くなったものと考えられる [国際会議 4]。

スピン偏極した電子を半導体中に注入するため、 $Co_{0.75}Cr_{0.25}$ の薄膜を GaAs 上にスパッタ法により作製した。膜面に垂直方向に c 軸配向し、BH 曲線にヒステリシスを持ち、磁化容易軸が膜面に垂直になる作製条件を求めた。図 2 に示す構造をもち、上記のスパッタ条件で成膜した $Co_{0.75}Cr_{0.25}$ 薄膜を電極とする発光ダイオードを作製し、電流注入により自然放出光を観測した。現在、自然放出光の偏光特性から、注入された電子のスピン偏極度を求める実験を行っている。

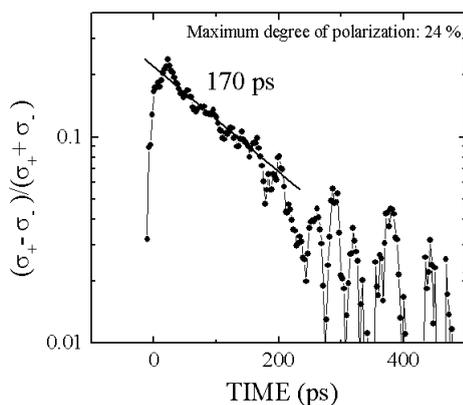


図 1. 偏極度の時間変化

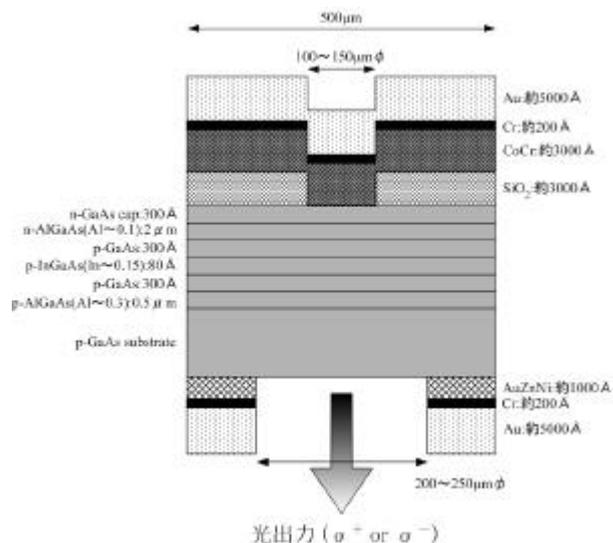


図 2. スピン注入発光ダイオードの構造

[自己評価]

研究開始時の研究計画書で、以下のような研究スケジュールを提出した。

研究項目	平成10年度	平成11年度	平成12年度	平成13年度
偏光双安定性の解明	密度行列法により 利得飽和の解析 利得飽和の測定	双安定特性の解析		
			フリップ・フロップ 動作の限界速度の測定	
円偏光発振の可能性の検討	外部光注入		自己帰還型	
電子のスピン状態のレーザー発振への影響		電子のスピン状態の自然放出光による観測		スピン偏極電子の注入によるレーザー発振偏光の制御

「偏光双安定性の解明」：バルクおよび MQW 活性層 VCSEL で一般的に利得飽和により偏光双安定が生じることが理論的に解明し、計画が達成出来た。さらに各種全光型信号処理を提案し、実験的に実証出来た。これは、私自身の初期の予定を上まわる成果である。

「円偏光発振の可能性の検討」：上記のように、全光型信号処理が期待以上に進展しそうであったため、この項目は研究期間内には実施しなかった。しかし、量子エレクトロニクスの観点から極めて重要な研究内容であり、今後別の研究として行っていきたい。

「電子のスピン状態のレーザー発振への影響」：光励起したスピン偏極電子は、半導体ヘテロ構造中を輸送される場合にも、スピン偏極がかなり保存されることが分かったこと、および GaAs 基板上 $\text{Co}_{0.75}\text{Cr}_{0.25}$ 膜で磁化容易軸が膜面に垂直に出来ること、 $\text{Co}_{0.75}\text{Cr}_{0.25}$ 膜を電極とする発光ダイオードで電流注入により発光を観測出来たことなどの成果が得られた。従って、おおむね計画が達成できたと考える。しかし、素子作製プロセスの立ち上げなどに時間がかかり、発光の偏光特性によるスピン偏極度の評価や、スピン偏極電子の注入によるレーザー発振偏光の制御は、研究期間内に十分な検討が出来なかった。現在、検討している。

[今後の展開]

偏光双安定 VCSEL を用いた信号処理の部分では、(1) 本研究の成果として特許出願した光 3R 機能の実験的実証、(2) 光通信に適する $1.55\ \mu\text{m}$ 帯の VCSEL の開発と、この波長帯での全光型信号処理の実現、(3) 1 ビットの光メモリ作用をもつユニークな特徴と、二次元アレイ化が容易であることを生かした、超高速光通信のためのパケット交換用光メモリの実現が実用上も重要で、極めてインパクトの大きな展開として考えられる。又、本研究の計画にありながら実施出来なかった円偏光発振の可能性は量子エレクトロニクスの興味深いとともに双安定スイッチングの高速化の観点からも重要である。一方、光励起スピン偏極電子の緩和については、この研究からも構造や材料依存性が大きいことが分かっており、今後、より系統的な検討が必要である。スピン注入発光ダイオードに関しては、自然放出光の偏光制御、VCSEL 構造によるレーザー発振とその偏光制御等広い展開が期待される。

5. 領域総括の見解

半導体レーザーは、素子構造と動作条件によって決まる特定の偏光モードを示すが、本研究者は動作条件を変えることにより、2つの偏光モードの間で高速の相安定性が生じること、この効果を利

用して各種の全光型信号処理システムが実現出来ることを実証した。

これは、基礎的な光電子過程の解明に基づいた新規な光中継器としての実用化につながる成果として評価できる。また、この研究課題の進捗に伴い、新しい試みとして、強磁性体薄膜から偏極したスピンを有する電子を光励起によって半導体超格子の中に注入し、半導体レーザの偏極モードを制御する可能性を追求する試みを3年間の研究期間の後半で行ない、これについても注目すべき結果を得ている。意表外の発想による“さきがけ”研究ではなく、成熟した半導体レーザ技術に基づき、そこに新規な可能性をもたらした“さきがけ”研究であるが、本領域の他の研究者に少なからぬ刺激を与えた点も評価できる。

6. 主な論文等

学術論文

1. Y. Takahashi and H. Kawaguchi, “ Polarization Dependent Gain Saturations in Quantum Well Lasers ” , IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 36, No. 7 pp. 864-871, 2000.

国際会議（招待講演）

1. H. Kawaguchi, “ Bistable Laser Diodes and Their Applications for Optical Networks ” , ICTON ' 99 (1st International Conference of Transparent Optical Networks), Th.A.1, 1999.
2. H. Kawaguchi, “ All Optical Demultiplexing and Format Conversion Using an Ultrafast Polarization VCSEL ” 2000 2nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2000), Th, A. 1., pp. 207-210, 2000.
3. H. Kawaguchi, “ All optical demultiplexing and format conversion using an ultrafast bistable laser diode, Third International Workshop on LASER and FIBER-OPTICAL NETWORKS MODELLING(LFNM ' 2001) , Proceedings, pp. 56-60, 2001.
4. H. Kawaguchi, “ All Optical Signal Processing Using a Bistable VCSEL ” , ICTON ' 02 (4th International Conference of Transparent Optical Networks), to be presented, 2002.

国際会議

1. H. Kawaguchi, Y. Yamayoshi, and K. Tamura, “ All-optical Demultiplexing using an ultrafast polarization bistable vertical-cavity surface-emitting laser ” , ECOC ' 99 (The European Conference on Optical Communication), Vol II, pp. 268-269, 1999.
2. H. Kawaguchi, Y. Yamayoshi, and K. Tamura, “ All-Optical Format Conversion Using an Ultrafast Polarization Bistable Vertical Cavity Surface-Emitting Lasers ” , Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2000), CW2, pp. 379-380, 2000.
3. Y. Takahashi and H. Kawaguchi, "Polarization-Dependent Optical Gain and Gain Saturation in Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers," Extended Abstracts of the 2000 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2000), C-1-6, pp. 80-81, 2000.
4. M. Iwamoto, T. Kawazoe, Y. Takahashi, Y. Kawamura, and H. Kawaguchi, " Spin Relaxation Time of the Spin-Polarized Electrons Transmitting Through the p-n Junction," The 7th International Workshop on Femtosecond Technology (FST 2000), p. 68, 2000.

5. H. Kawaguchi, Y. Yamayoshi, and K. Tamura, " All-Optical RZ to NRZ Format Conversion Using an Ultrafast Polarization Bistable Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser," IEEE Lasers and Electro-Optics Society 2000 Annual Meeting (LEOS 2000), Vol. 2, pp. 575-576, 2000.
6. H. Kawaguchi, " All-Optical Signal Processing Using an Ultrafast Polarization Bistable VCSEL", International Workshop on Optical Signal Processing, pp. 26-28 2001.

特許

河口仁司、「双安定性半導体レーザを用いた再生中継器」特願 2001-244302.