

超短光パルス光エレクトロニクス評価ラボ (Ultrashort Pulse Optoelectronics Lab.)

研究項目：超短パルス光エレクトロニクス技術開発評価
研究期間：平成9年度～16年度

1. はじめに

本ラボでは、光時分割多重を基盤としたテラビット光通信システムの要素デバイス並びにその評価技術の開発を行っている。内容的には、超短パルス発生デバイス評価技術、新原理デバイス開発評価技術、フェムト秒光パルス発生技術に分かれ、具体的な研究テーマは以下の5つである。

超短パルス発生デバイス評価技術では最新のデジタル信号処理技術を用いた光パルスのタイミング揺らぎの計測・制御技術の開発、新原理デバイス開発評価技術では結合量子構造を有する半導体デバイスからのテラヘルツ電磁波発生、およびII-VI族半導体による $1.5\mu\text{m}$ 帯光スイッチ素子の開発、フェムト秒光パルス発生技術ではQ-スイッチ半導体レーザーによる超短パルス発生とパルス圧縮技術および広帯域フェムト秒パルスの発生・制御技術の開発をそれぞれ進めている。

2. 研究成果の詳細

2.1 レーザパルスタイミング揺らぎの計測・制御^{1,4)}

近年、フェムト秒領域の光パルスを発生できるモード同期レーザーの性能・信頼性が向上し、テラビット情報伝送、半導体デバイス評価、微細加工、医療などへの応用が期待されている。可飽和吸収体等を利用する受動モード同期レーザーの繰り返し周波数(パルス間の時間隔)は、光パルスがレーザー共振器内を往復する時間により決定される。このため、共振器が熱的、機械的な外乱により伸縮すると繰り返し周波数が変動し、出力パルスのタイミング揺らぎとして現れる。最も信頼性の高い固体レーザーでもパルス幅の100倍以上のタイミングジッターが容易に発生し、情報伝送における符号誤りや、計測における感度・分解能の低下の要因となる。したがって、レーザーの産業応用促進には、タイミング揺らぎの高精度計測技術、並びに低

ジッターパルス発生制御技術の確立が必要である。

パルスタイミング揺らぎの計測に広く用いられてきたSSB位相雑音測定法は、1986年にvon der Lindeにより提案されたが、近似関係を利用して揺らぎの大きさを推定するため、ダイナミックレンジや解析周波数範囲に著しい制限があり、正確な評価が困難であった。本研究では、時間領域復調法、およびタイムインターバル解析法とよばれる二つの新しい手法を開発し、従来の近似的な計測法に対して、時間領域でパルス位相や時間間隔を直接測定し、厳密でより高度な評価を可能にした。

時間領域復調法ではパルス強度の実数、虚数部を検出して、復調により瞬時位相を計算する。一方、タイムインターバル解析法では安定なクロックを基準として、パルス間の時間間隔を空き時間なしで連続的に計数する。二つの手法は相補的な関係にあり、組み合わせることにより、解析周波数 1mHz - 1MHz の範囲でダイナミックレンジ 240dB 以上の位相雑音パワースペクトルの測定が可能になった。図1はモード同期Cr:LiSAF

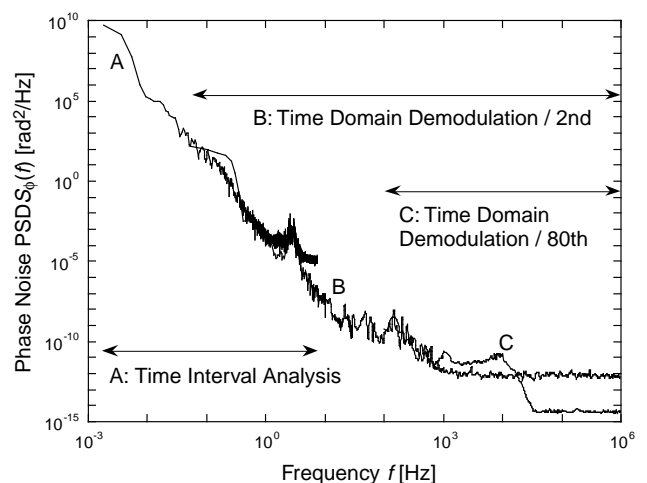


図1 モード同期Cr:LiSAFレーザーの位相雑音パワースペクトル

A:タイムインターバル解析法による測定結果
B:時間領域復調法による2次高調波の測定結果
C:時間領域復調法による80次高調波の測定結果

レーザーに対する測定結果の一例で、従来手法で観測できなかったレーザー構成部品の機械的共振に起因する揺らぎも初めて観測された。

光パルスのタイミング制御は、レーザー出力パルスを安定な電気信号に位相同期することで実現される。すなわち、パルスと電気信号間の位相差を検出し、偏差に基づいてレーザーを負帰還制御することによりタイミングが安定化される。位相差検出にマイクロ波ミキサを、共振器長の制御にピエゾアクチュエータを用いる方式が普及しているが、アナログ非線形回路素子であるミキサの出力には、オフセットやドリフトが含まれ、また光強度揺らぎの影響を受けるため、性能が著しく制限されていた。一方、制御系の帯域はピエゾアクチュエータの機械的な応答速度により制限されるため、高周波域の揺らぎを抑圧できない等の問題があった。これらの問題を克服するため、本研究では図2に示すように、高精度位相検出が可能なデジタル位相検出器、および広帯域制御が可能な共振器長と励起光強度を同時に併用する方式を開発し、これを利用して繰り返し100MHzのモード同期Cr:LiSAFレーザーの出力パルスを安定な水晶発振器に安定化した。その結果、電気信号に対する相対的なタイミングジッターを25mHz-10kHzの周波数帯域で7.5fsにまで抑圧することに成功した。

今後はテラビット情報伝送用モード同期半導体レーザーに対する計測・制御技術の開発を進める。

2.2 半導体結合量子構造からのテラヘルツ電磁波発生⁵⁾

テラヘルツ (THz) 電磁波は100GHz-10THz (30 μ m-3mm)の領域であり、大容量情報通信処理、高分解能赤外イメージング、さらに気体の組成分析等、幅広い応用が期待される。本研究では半導体結合量子井戸構造による波長可変THz電磁波光源の開発を進め、半導体非対称二重結合量子井戸構造からのTHz電磁波の発生と空間EOサンプリング法による測定を行い、2.5psに渡ってLH-HHおよび結合準位での量子ビートが複合した振動を観測した。

測定用サンプルは、13nm厚GaAs井戸と10nm厚GaAs井戸を2.5nm厚のAl_{0.2}Ga_{0.8}As障壁層を介して結合させた結合量子井戸層を厚さ20nmのAl_{0.2}Ga_{0.8}As層で分離して10周期成長し、厚さ350nmおよび250nmのアンドープAl_{0.2}Ga_{0.8}As間に挟む形でn基板上に成長した。電界印加のためにn基板および表面にCr/Auのショットキー電極を形成した。

図3(a)に光学遷移の概念図を、(b)に印加電界に対する電子と重い正孔 (Heavy Hole : HH) の遷移エネルギー変化を示す。光学遷移には井戸内直接遷移と隣接井戸間の間接遷移がある。広い井戸が負、狭い井戸が正となる電界を印加すると前者のエネルギーは上がり、後者のエネルギーは下がり、各々の遷移エネルギーは図3(b)のように変化する。この変化を図3(c)のフォトカレントスペクトルに当てはめると破線になる。このフォトカレントスペクトルから、 -6.93 kV/cmで狭い井戸が

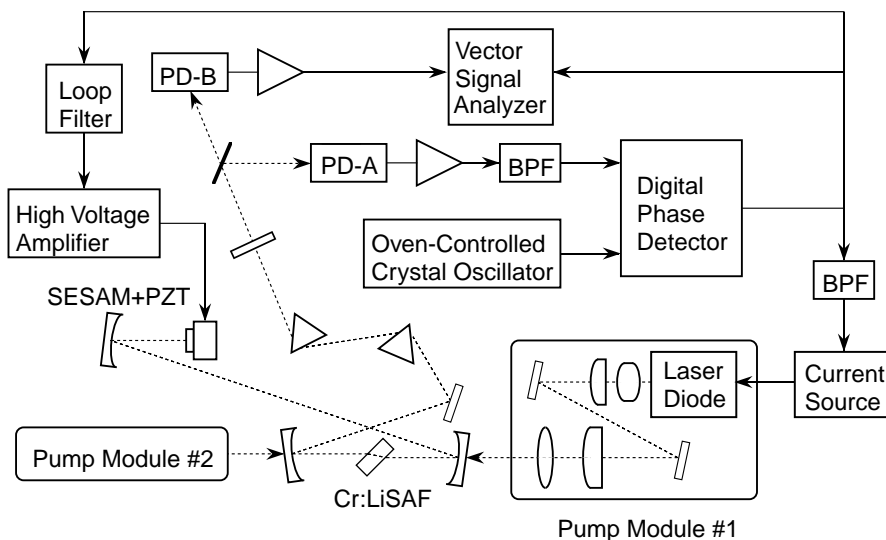


図2 モード同期Cr:LiSAFレーザーのパルスタイミング安定化装置

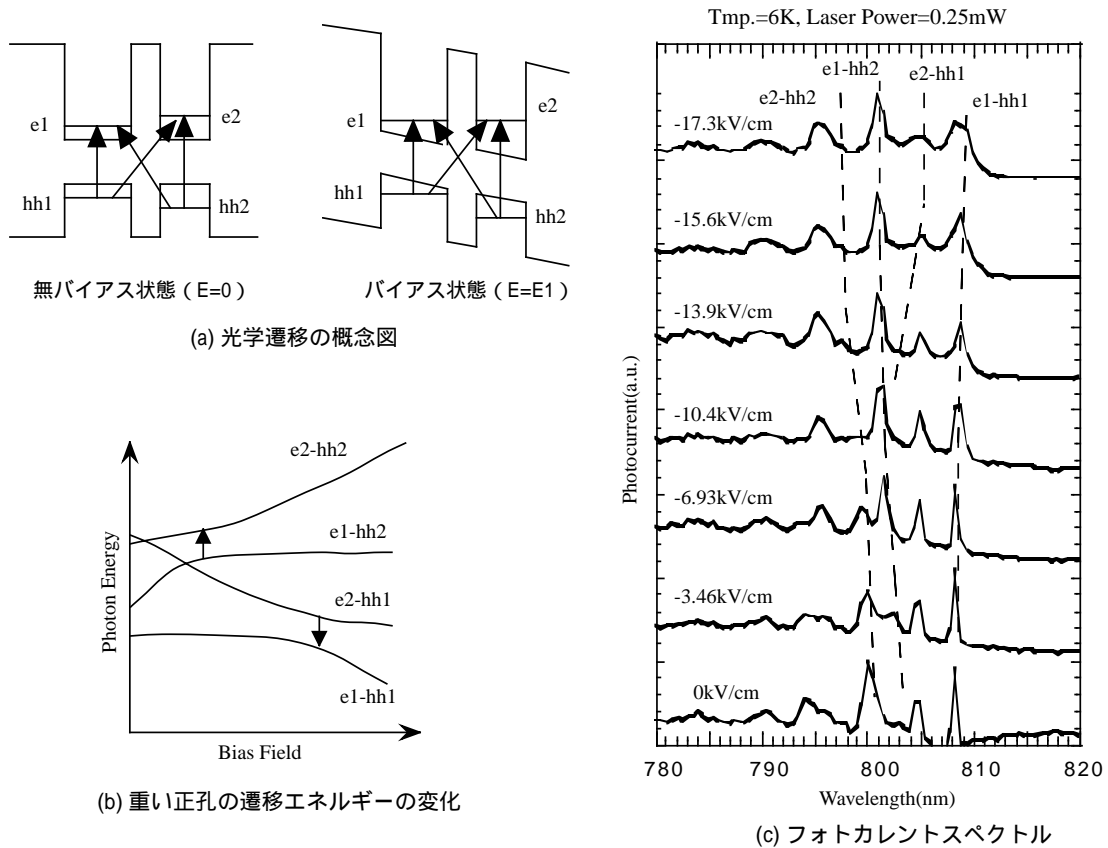


図3 非対称DQWのフォトカレントスペクトル

結合状態となり、その分裂エネルギーは3.87meVで、発生する電磁波は、0.94THzであると推測される。

図4に測定系の概略図を示す。結合量子井戸試料は温度14K一定とし逆バイアスを印加した。Ti:サファイアレーザーからの超短光パルス(パルス幅約140fs、繰り返し周波数76MHz)を約45°の角度で試料に照射し、発生するTHz電磁波を軸はずし放物面鏡によりEO結晶に集光した。他方、遅延したプローブ光をTHz電磁波とほぼ同軸にEO結晶((110)面で1mm厚のZnTe結晶)に入射し、EO結晶で変調を受けたプローブ光を直交成分に分割し、バランスフォトディテクタによりロックイン検出した。

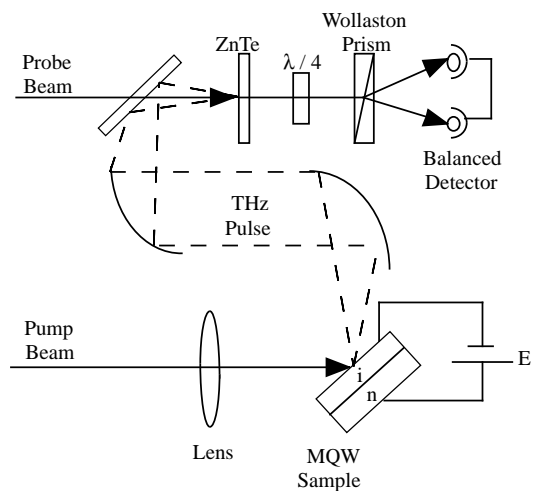


図4 測定系

図5に発生したTHz電磁波の時間波形(a)とフーリエ変換スペクトル(b)の印加電界依存性を示す。測定はレーザー光の波長を805nm、試料温度を14Kとし、電界を-3.46kV/cmから-15.6kV/cmまで変化させた。原点付近から約2.5psにわたり0.7pA(1.4THz)周期の振動が観測され、電界増加に伴い最初の振動が強くなる。FFT解析結果から1.4THz付近にピークを持つスペクトルを得た。図3からHHが1.534eV、LH(Light Hole)が1.540eVであり、HH-LHの量子ビートにより発生する電磁波は

1.45THzと推測され、1.4THz付近のスペクトルピークはLH-HHの量子ビートと考えられる。結合準位での量子ビートは、1THz付近にある(図5(b)矢印)。本測定は大気中のため水蒸気吸収が結果に影響しており、その排除が必要である。また、DQWにおいてHHとLHの両方を励起したためLH-HHの量子ビートを誘起した。今後、励起光の中心波長およびバンド幅を調節することによるHHのみの励起が必要である。

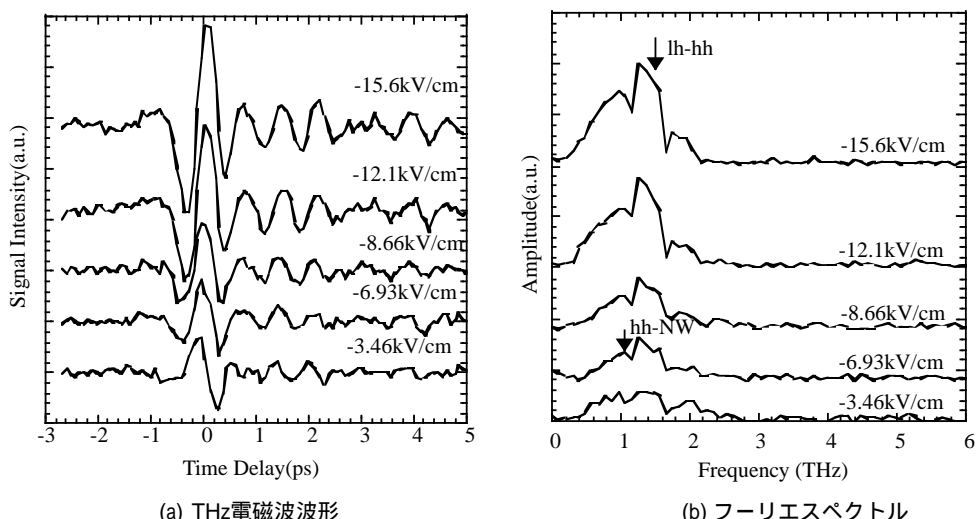


図5 非対称DQWからのTHz電磁波
 $\lambda = 805\text{nm}$, Temp.=14K

2.3 II-VI族半導体サブバンド光・光スイッチ素子⁶⁾
 本研究は ZnSe/BeTe II-VI族半導体超ヘテロ構造の伝導帯サブバンド間遷移を利用し、光通信帯(1.55 μm)においてテラビット/秒級で動作する光・光スイッチ素子の実現を目的とする。テラビット光通信で想定される超高速光・光スイッチデバイスは、遅くとも1ピコ程度の時間内でON/OFF動作を行うことが必要である。半導体量子井戸サブバンド間遷移では、数100fs-数psの超高速緩和現象が知られており、同時に大きな遷移双極子モーメントをもち光非線形性の増大も期待できる。ZnSe/BeTe系は、(1)伝導帯バンドオフセット E_c が2.3eVと大きく7原子層(ML)程度のZnSe井戸層で1.55 μm のサブバンド間遷移が可能、(2)III-V族半導体に比べてイオン性が高く、電子・LOフォノン結合定数も大きいのでIII-V族半導体より速い緩和速度が期待できる、(3)GaAs基板に対するZnSe、BeTeの格子不整合が小さく良質なエピタキシャル膜成長が可能、等の特徴をもつ。ZnSe/BeTeの膜厚比をZnSe:BeTe=2:1に設定すれば、GaAs基板に格子整合も可能である。

ZnSe/BeTeの成長はマルチチャンパー分子線エピタキシー装置を用い、GaAs(001)基板上に2500Å程度のGaAsバッファ層を成長し基板表面の平坦性を向上させた。その後As安定化(2×4)面上に5ML程度のBeTe層と10ML程度のZnSe層を成長し、BeTe層/ZnSe層ペアを50回程度成長した。作製したZnSe(28ML)/BeTe(10ML)超格子の発光スペクトル(PL)とその励起スペクトルを図6に示す。PLピークと励起スペクトル

の間に0.95eVものストークスシフトがある。これはZnSe/BeTe系のバンドアラインメントがタイプII型であることを示す。励起スペクトルの最低エネルギー位置での鋭い構造はZnSeのバンド間遷移に相当する。その上の何本かの鋭い構造はZnSe層の高次の伝導帯サブバンド構造・価電子帯間光遷移に対応する。これらの構造を追いかければ直接サブバンド間遷移を観測せずにZnSe層の伝導帯サブバンド構造を調べられる。励起スペクトル上の構造A-C間のエネルギー差がサブバンド間遷移(E2-E1)に対応していると推測できる。

以上を確かめるため、伝導帯の非放物線性(電子有効質量のエネルギー依存性)をkp摂動による3バンドモデルで取り込み、歪みによるバンド位置シフトを考慮したクローニッヒ・ペニーモデルによる計算を行った(図7)。障壁層上にある正孔に対して電子波干渉による量子化効果を取り入れ、前者の結果に加えた。その結果を斜線の領域で示す。計算結果に現れる幅は正孔の成長方向への運動に対するバンド幅に対応する。電子はZnSe層幅が5MLでもバンド幅を相対的に無視でき、本補正により実験結果を良く再現できた。以上の結果からZnSe層幅が約7ML(20Å)のとき、サブバンド間遷移(E2-E1)が0.8eV(1.5 μm)に達すると予想される。GaN/Al_xGa_{1-x}N系ではx>0.7でGaN井戸層厚が7ML以下の時、サブバンド間遷移エネルギーが光通信波長帯に到達すると予想される。一方、ZnSe/BeTe系でもほぼ同じ井戸幅で光通信波長帯に到達するとの結果を得た。これは両者の伝導帯有効質量($m_{\text{ZnSe}}=0.16$, $m_{\text{GaN}}=0.20$)

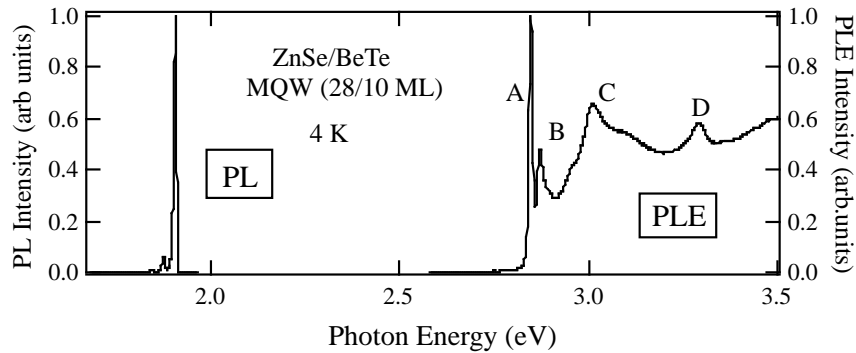


図6 ZnSe/BeTe (28/10 ML) 超格子における発光 (PL) とその励起(PLE)スペクトル。測定温度は4K。

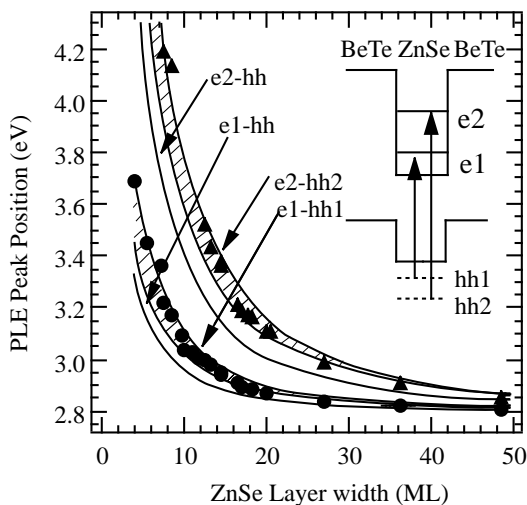


図7 クローニツヒペニーモデルで計算した励起スペクトル(図6の構造A, C)のZnSe層幅依存性。黒丸, 三角は構造A, Cの実験データ。実線は伝導帯の量子効果のみ考慮した結果であり, 斜線で囲まれた範囲は, 価電子帯の障壁層上の状態による補正も入れた結果である。

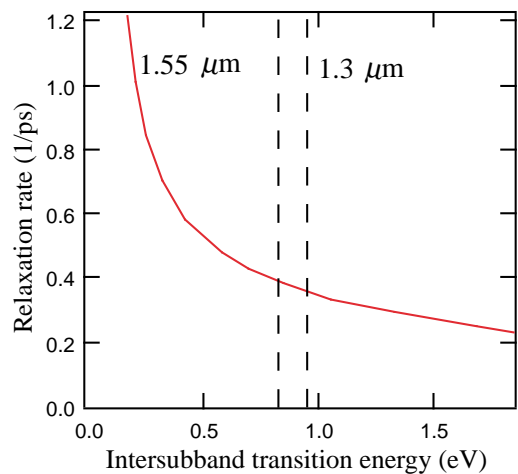


図8 Ridleyの近似式により評価したZnSe/BeTe系超格子における, 第二伝導帯サブバンドから第一サブバンドへのLOフォノン散乱による緩和時間のサブバンド間エネルギー依存性

がほぼ同じであるためであろう。

図8にZnSe/BeTe系のサブバンド間緩和レートの計算結果をサブバンド間エネルギーの関数として示す。遷移エネルギーが大きくなるにつれサブバンド間緩和レートは小さくなる。1.55 μm の遷移波長での緩和時間は2-3ピコ秒程度と見積られる。InGaAs/AlAsSb系では, 遷移波長1.55 μm において緩和時間は1.2psとの報告がなされている。この緩和時間がLOフォノンによる散乱により支配されているとするとZnSe/BeTe系では数100fs台で緩和する可能性がある。

今後, ZnSe 井戸層へ伝導電子をドーブし, 直接サブバンド間遷移の吸収とその過飽和吸収の時間応答を近赤外波長領域で観測する。現在, バンド間遷移を光

励起し過渡的に伝導キャリアを導入することにより, サブバンド間遷移を観測する方法を試みている。また, それと平行して分子線エピタキシー法により化学的なドーピング(ZnCl_2)を行い, 井戸層に電子を導入する準備を進めている。

2.4 Q-スイッチ半導体レーザーによる超短パルス発生とパルス圧縮⁷⁻¹⁰⁾

半導体レーザーを用いた短パルス発生技術は, 光計測技術や光通信等への応用が期待される。本研究では, 光計測用光パルス発生素子として応用可能なAlGaAs系材料を用いたQ-スイッチ半導体レーザーに着目し, その素子の改善を行った。

図9に作製した半導体デバイスの構造を示す。電極によって分割された二つの領域はそれぞれ可飽和利

得領域と可飽和吸収領域として作用する。利得領域に電氣的な短パルスを入力すると急激なレーザー発振が起こり、パルス幅数10ps以下の光パルスが発生する。これは利得領域に電流が注入されて共振器内の光強度が強くなる一方、吸収体の飽和特性により急激に透明化するため、言い替えれば共振器損失Qが急激に変化(スイッチ)したため、発振が瞬間的に起きる。

図10に利得領域にピーク電圧15V、パルス幅200psの電氣パルス、可飽和吸収体に-2.5Vから-4.5Vの逆バイアスを印加したときのパルス幅の共振器長依存性を示す。直線は共振器内の往復時間を示す。共振器長が200 μm のときに光パルスが最短となる。200 μm 以上でパルス幅が長くなるのは共振器内往復時間が長くなりレーザー発振の立ち上がりが遅くなるためと考えられる。一方200 μm 以下では共振器内往復時間が短いにもかかわらずパルス幅は広がる。以上の結果から共振器長の最適化により7ps以下の短パルスが再現性よく得られた。

次に活性領域の最適化を行った。Q-スイッチ半導体レーザーでは利得領域に印加する電氣パルスのピーク電圧が15V程度であり、連続動作時の電圧(約1.5V)に比べて格段に大きい。そのため多重量子井戸活性領域には非常に高密度のキャリアが蓄えられる。効率的なキャリアの生成とともに活性領域の利得(光の増幅率)が大きくなり、より短いパルスが得られる。しかし、一方で高いキャリア密度はリーク電流を発生する。これはキャリアが活性領域を通り抜ける現象であり、主としてnクラッド層から活性領域に注入された電子がpクラッド層へ通り抜けるためである。

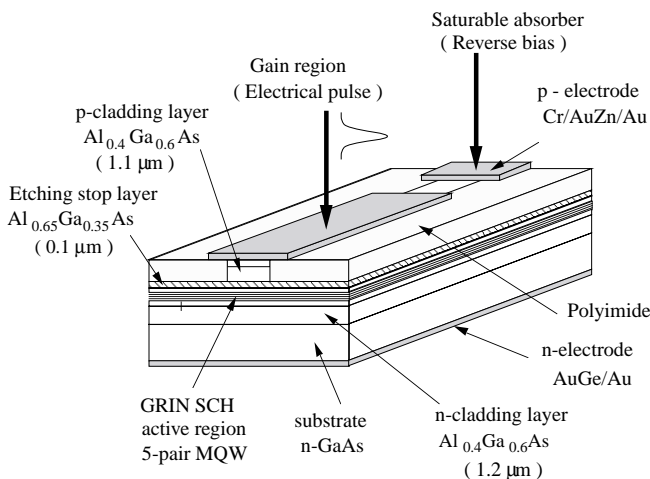


図9 Qスイッチ半導体レーザーの構造

電子の分布屈折率層への放出量は分布屈折率層のAl組成比とドーピング密度により変化する。伝導帯端はAl組成比とともに高くなり、高Al組成比のAlGaAs層でGaAs井戸層を挟めば電子の移動を抑制できる。しかしAlは酸化されやすくAl組成比の増加は素子の劣化をまねく。このためドーピング濃度の調整によるリーク電流抑制がより一般的な方法である。本研究では、クラッド層の設計指針を得るためリーク電流の影響を加えた進行波型レート方程式を解析し、クラッド層のドーピング濃度を高くすることで電子の漏れが小さくなることを明らかにした。

また半導体レーザーから発生した光パルスを圧縮する技術も重要である。図11に可飽和吸収領域と利得領域を交互に配置した光パルス圧縮素子の構造を提案する。可飽和吸収領域と利得領域を多重回通過させることで、一層のパルス圧縮とパルスエネルギーの回復が期待できる。図12に可飽和吸収領域長と利得領域長が60 μm と130 μm の素子にパルス幅7ps、パルスエネ

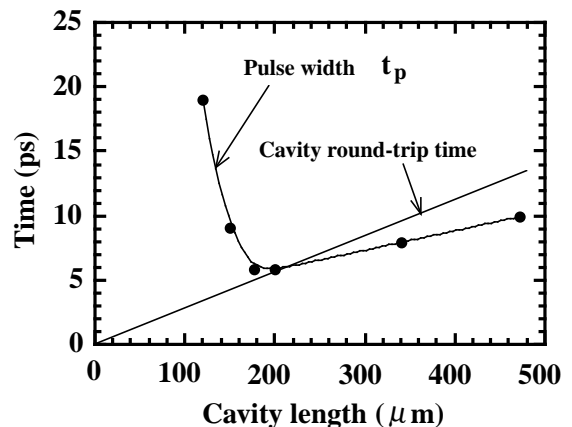


図10 光パルス幅の共振器長依存性の実験結果

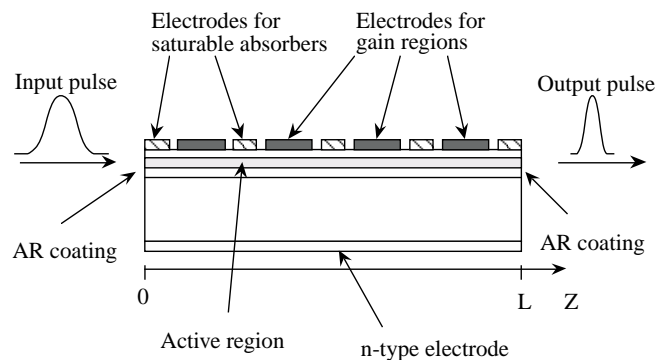


図11 半導体光パルス圧縮素子の構造

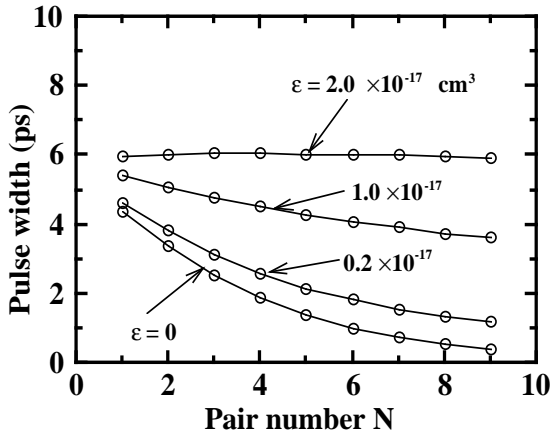


図12 幅7ps,パルスエネルギー10pJの入力パルスを仮定した時の計算結果。利得領域数Nを変えた時の出力パルス幅を示してある。可飽和吸収体の数はN+1である。εは光強度に依存した利得飽和の効果を示す。

ルギー10pJのパルスを入力したときの計算結果を示す。横軸のペア数Nは利得領域の数であり、可飽和吸収領域はN+1である。図中のεは利得の飽和係数で、光密度が大きくなると利得が小さくなる効果を考慮する係数であり、εが大きいとその効果が大きくなる。εは電子のバンド内緩和時間に関係するもので、その大きさは正確に特定されてないが、実験結果から $0.3 \times 10^{-17} \text{cm}^3$ よりも小さいと予想される。本構造によりps以下のパルス幅への圧縮も可能と考えられる。

2.5 広帯域フェムト秒パルスの発生・制御^{11,12)}

非線形波長変換用基本波光源として利用される0.7-0.8μm帯と1.2μm帯で発振するフェムト秒Ti:サファイアレーザーとCr:フォルステライトレーザーの高出力・高安定発振を実現した。一般にTi:サファイアレーザーの高出力化はCr:フォルステライトレーザーに比べ容

易だが、1MWを越える100MHz級フェムト秒発振器は2例のみで、しかも標準的自己モード同期フェムト秒レーザーに比べ構成が幾分複雑である。本研究ではレーザー結晶の選択とレーザー共振器配置を最適化し1MWを越えるパルス列発振を標準的な自己モード同期レーザー構成で実現した。また、広帯域低損失半導体可飽和吸収鏡を共振器内に組み込み、自律モード同期発振可能な高安定メガワットレーザーを初めて実現した。

図13に開発した自己モード同期Ti:サファイアレーザーを示す。レーザーは長さ4mmのレーザー結晶、透過率70%の出力ミラー、曲率半径10cmの2枚のポンピング用ミラー、半導体可飽和吸収鏡及び可飽和吸収鏡へ集光するための曲率半径10cmの全反射ミラーからなる。半導体レーザー励起Nd:YVO₄の第2高調波パワー10Wで励起し、出力1.5Wが得られた。図14に発振スペクトルと自己相関波形を示す。相関波形からパルス幅は16fs、また発振繰り返し周波数75MHzから尖頭出力は1.25MWとなる。一般に自己モード同期発振は発振出力の増加とともに不安定になるが、半導体可飽和吸収鏡の導入により1MWを越える高出力高安定なフェムト秒レーザー発振が実現した。

Cr:フォルステライトレーザーは1μm以上の長波長域で最短パルスが得られている固体レーザーである。固体レーザーを用いたフェムト秒パルスの発生には、レーザー結晶で発生する群速度分散を補償するプリズム対が必要で、特に群速度分散の大きな長尺結晶の場合、より分散性の高いプリズム材料が望まれる。本研究では19mmのレーザー結晶をもつレーザー共振器にSF58プリズム対を初めて適用し、自己モード同期Cr:フォルステライトレーザーの試作を行った。

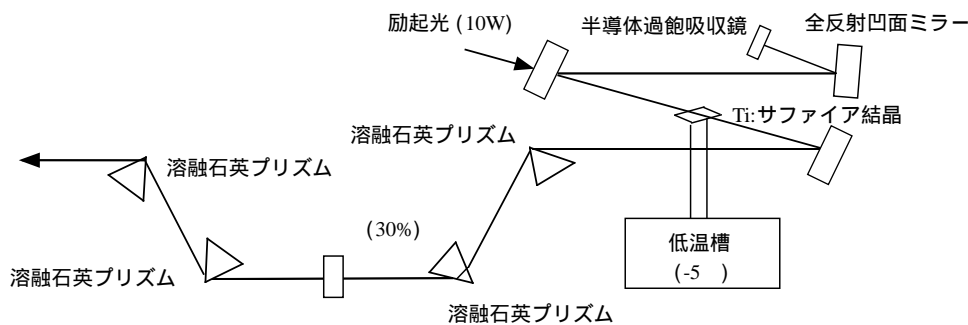


図13 自己モード同期Ti:サファイアレーザー

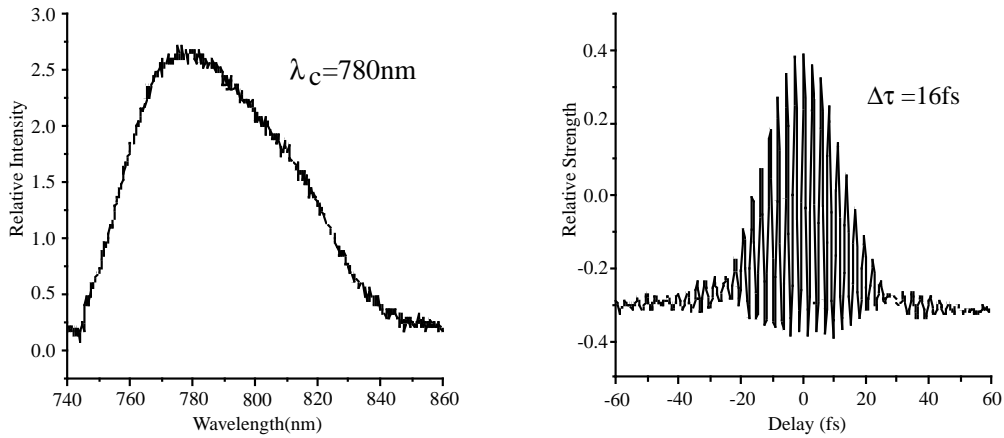


図14 発振スペクトルと自己相関波形

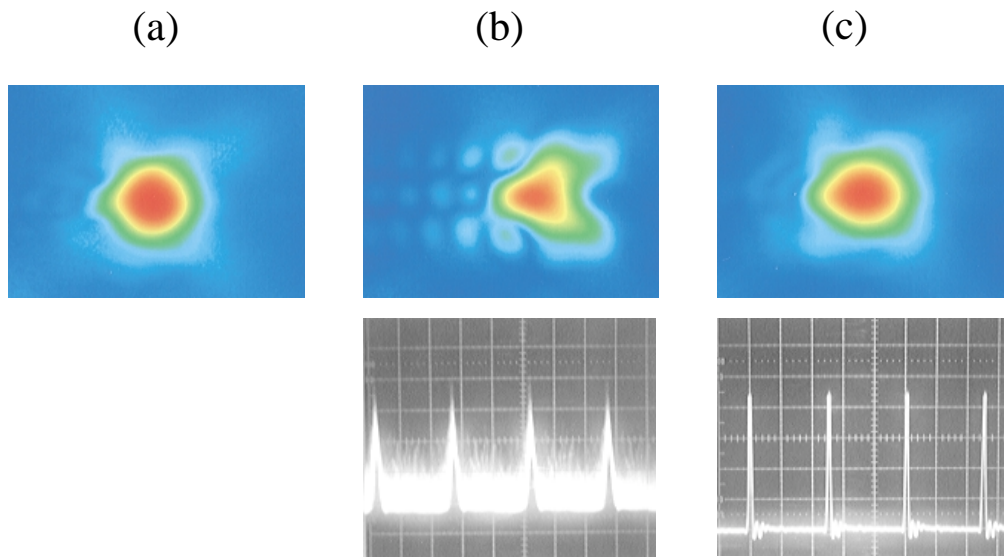


図15 (a)最大CW発振出力時のビームパターン (b)自己モード同期可能な共振器配置におけるCW発振時のビームパターンとそのときの周期的ノイズ波形 (c)自己モード同期発振時のレーザービームパターンとそのときの自己モード同期パルス列波形

自己モード同期発振は比較的不安定な発振状態であり、高出力化と安定化はトレードオフにあるが、Cr:フォルステライトレーザーでは特にその傾向が著しい。本研究ではCW発振からフェムト秒発振へ移行するときのビームモードの詳細な検討を行い、CW発振時に特異なビームパターンを与える共振器配置で安定な高出力フェムト秒発振が起こることを見出した。図15に、最大のCW発振出力時(図15(a))、自己モード同期可能な共振器配置におけるCW発振時(図15(b))、および自己モード同期発振時(図15(c))におけるレーザービームパターンを示す。また、そのとき得られた

レーザービーム強度の時間変化をあわせて示す。図15(b)ではCW発振にわずかに現れるノイズ状のパルス列が見られる。このノイズ状パルスが共振器のわずかな乱れ(わずかなミラー変動など)により、図15(c)のような自己モード同期パルスへ成長する。図15(c)のパルス列は非常に安定であり、中心波長 $1.26\mu\text{m}$ 、パルス幅35 fs、発振出力330 mW、繰り返し80 MHzのフェムト秒パルス列が得られた。このときの尖頭出力は120 kWである。

今回開発した上記高出力高安定レーザーを用いて、光パラメトリック発振器などの非線形相互作用に基づく波長変換器の開発を進めている。

参考文献

- 1) H. Tsuchida : "Wideband phase noise measurement of mode-locked laser pulses by a demodulation technique", Opt. Lett., vol.23, no.4, 286 - 288 (1998).
- 2) H. Tsuchida : "Correlation between amplitude and phase noise in a mode-locked Cr:LiSAF laser", Opt. Lett., vol.23, no.21, 1686-1688 (1998).
- 3) H. Tsuchida : "Time interval analysis of laser pulse timing fluctuations", Opt. Lett., vol.24, no.20, 1434-1436 (1999).
- 4) H. Tsuchida : "Pulse timing stabilization of a mode-locked Cr:LiSAF laser", Opt. Lett., vol.24, no.22, 1641-1643 (1999).
- 5) I. Morohashi, K. Komori, T. Sugaya, and T. Hidaka : "Generation of THz Electromagnetic Wave from Semiconductor Multi-Coupled Quantum Well", IEEE Seventh International Conference on Terahertz Electronics Proceedings (M.Hangyo, and K. Sasaki), MTTTS, and CRL, Nara, Japan, pp149-152, 1999.
- 6) R. Akimoto, Y. Kinpara, and K. Akita : "Large quantum confinement effect of conduction electrons in ZnSe/BeTe Type II heterostructures", The proceedings of the 25th International Conference on the Physics of Semiconductors, to be published from Springer Verlag.
- 7) M. Shimizu : "Electrical Feedback Using a Saturable Absorber as an Internal Photodetector in Self-Pulsating Two-Section Laser", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 35, Part 2, No. 9B, pp. L1191-L1193, 1996.
- 8) M. Shimizu, Y. Suzuki and M. Watanabe: "Characteristics of Cavity Round-Trip Time Pulses in Short-Cavity Q-Switched AlGaAs Multiple-Quantum-Well Semiconductor Lasers", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 37, Part2, No. 9A/B, pp. L1040-L1042, 1998.
- 9) M. Shimizu, Y. Suzuki, S. Mukai, M. Watanabe and T. Hasama: "Effect of Leakage Current on Pulse-Width Characteristic in Q-Switched Two-Section AlGaAs Multiple-Quantum-Well Semiconductor Lasers", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 38, Part 1, No. 6A, pp. 3530-3534, 1999.
- 10) M. Shimizu, Y. Suzuki, S. Mukai and T. Hasama : "Use of Multiple Pairs of Gain and Saturable Absorber Regions for Semiconductor Optical-Pulse Compressor", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 39, Part 1, No. 2A, pp. 475-479, 2000.
- 11) 挟間寿文 : "1.26 μ m フェムト秒固体レーザーとその第2高調波発生", 電総研彙報, vol.63, no.7, 243 -256 ,1999.

- 12) Jie Jiang, Toshifumi Hasama, Zhigang Zhang, Takeyoshi Sugaya, and Tadashi Nakagawa : "1.25-MW peak-power Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser with a broadband semiconductor saturable-absorber mirror", accepted to be published in Optics Communications.

当該研究担当者等

ラボ構成員(総数24名)

職員(23名) 挟間寿文* ,土田英実 ,小森和弘 ,清水三聡 ,鈴木克弘 ,遠藤道幸 ,安平哲太郎 ,鳥塚健二 ,高田英行 ,渡辺正信 ,向井誠二 ,永宗 靖 ,鍛冶良作 ,吉澤明男 ,山本宗継 (光技術部) , 杉山佳延 ,小倉睦郎 ,中川 格 ,板谷太郎 ,菅谷武芳 (電子デバイス部) 秋本良一 ,時崎高志 ,河島 整 (材料科学部)

職員以外(1名) Jang Jie (光技術部)

* ラボリーダー