

氏名	小野 寺 紀 明
授与学位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 60 年 3 月 26 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 応用物理学専攻
学位論文題目	半導体レーザーからの超短光パルスの発生および制御に関する研究
指導教官	東北大学教授 稲場 文男
論文審査委員	東北大学教授 稲場 文男 東北大学教授 平井 正光 東北大学教授 波岡 武 東北大学助教授 伊藤 弘昌

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 総 論

1970年に、 $AlGaAs-GaAs$ ダブルヘテロ接合構造の半導体レーザーにおいて最初の室温連続発振が実現して以来、低しきい値電流，高効率，単一モード発振，長寿命，高信頼性を有する優れた半導体レーザー素子が開発されてきた。また，これと共に，光伝送線路としての光ファイバーの研究も著しく進展し，波長 $1\mu m$ 以上の近赤外域において 0.2 dB/km という超低損失石英光ファイバーも製作され，光通信の新分野も実用の段階を迎えている。

この様な現状において，さらに次世代の 10 Gbits/s 以上での大容量光通信や光デジタル伝送，光情報処理の研究開発の推進には，半導体レーザーからの時間幅 100 ps 以下の超短光パルスの発生が必要不可欠であり，その研究に大きな関心もたれている。

本研究は，以上の様な観点から，半導体レーザーからの超短光パルスの発生と制御および測定について，実験的，理論的検討を行なうものである。

第 2 章 半導体レーザーからの超短光パルスの発生および制御に関する基礎的考察

本章では，半導体レーザーの基本構造について述べるとともに，その諸特性について概説した。特に，半導体レーザーが基本的に超短光パルス発生用光源として優れた特徴を有している事を明ら

かにした。次に、半導体レーザーからの超短光パルスの発生方法について比較検討を行ない、本論文で取扱う高周波直接変調法が半導体レーザーの特徴を活かした方法である事を示した。最後に、主要な超短光パルスの測定法について説明し、半導体レーザーからの超短光パルスの詳しい測定に適したSHG（第2高調波発生）相関法と、本論文第7章で利用するストリークカメラについてその原理および特徴などを述べた。

第3章 強い高周波変調による多重縦モード発振 InGaAsP 半導体レーザーからの超短光パルスの発生と制御

高周波変調による半導体レーザーからの超短光パルスの発生は、半導体レーザー自体のもつ小形簡便で、電流による変調の制御性が良いという特徴を活かした方法である。本章ではこの高周波変調法において、従来行なわれていなかった逆方向も含むより低い直流バイアス電流に、しきい値電流を越える様な強い高周波変調電流を重畳するという新しい励起方法により、InGaAsP半導体レーザーからの超短光パルスの発生を実現し、その諸特性について実験的検討を行なった。

実験には、ファブリ・ペロー型共振器構造を有する多重縦モード発振 double-channel planar buried heterostructure（以下DC-PBHと略す）型半導体レーザーを用い、前述の強い高周波変調法により超短光パルスの発生を行なった。

Fig.1には、発生した超短光パルスの自己相関波形と発振スペクトルの測定結果を示す。自己相関波形は、第2高調波（SH）強度が1から2までのびる緩やかな包絡線に、SH強度が3までのびる周期的なノイズスパイク列（繰り返し5.6 ps）が重畳した形になっている。これは多重縦モード発振半導体レーザーから発生する超短光パルスに現われる一般的な現象で、光パルスが複雑な微細構造を有している事を示している。また、Fig.2には、パルス時間幅と平均光出力の測定より求めた光ピーク出力のバイアス電流および変調周波数依存性を示す。光ピーク出力は、バイアス電流を順方向から逆方向へ低下させ、強い高周波変調を加える事により増大する。一例として、バイアス電流 I_b が $-2.7 I_{th}$ の場合には $0.8 I_{th}$ の時に比べて数倍の光ピーク出力が得られる事が明らかになった。実験では、バイアス電流レベルによりパルス時間幅を約30~70 psまで可変でき、さらにDC-PBH型 InGaAsP 半導体レーザーにおいては時

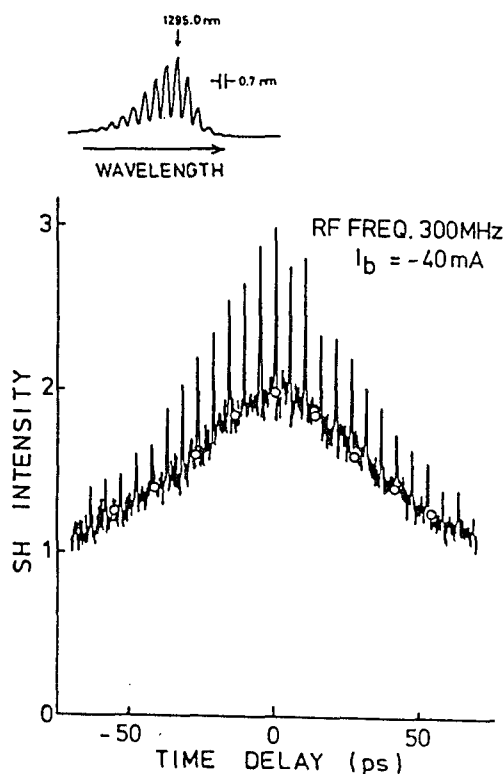


Fig.1 SHG相関法により測定した超短光パルスの自己相関波形と発振スペクトル分布
（ファブリ・ペロー型半導体レーザー）

間幅 28 ps, 光ピーク出力 1.2W という高出力光パルスの発生も可能である事が実証された。

第 4 章 強い高周波変調による 単一縦モード発振 In GaAsP 半導体レーザー からの超短光パルスの 発生と制御

強い高周波変調法により多重縦モード発振する半導体レーザーから発生する超短光パルスの発振スペクトルの半値幅は、通常数 10 \AA にも達している。しかし、今後の超短光パルスの光通信システムへの応用を考える場合には、光ファイバーの分散特性の影響をさけるために、素子単体から単一モードでのコヒーレントな、つまりパルス時間幅とスペクトル半値幅の間にフーリエ変換の関係が成立する様な光パルスの発生が望ましい。そこで本章では、室温連続動作でかなり安定な単一モード発振が実現できる分布帰還型 (DFB; distributed feedback) 構造の DC-PBH 型半導体レーザーを用い、強い高周波変調法により発生する超短光パルスの諸特性の測定を行なった。

Fig. 3 に、発生した超短光パルスの自己相関波形と発振スペクトルの測定結果を示す。発振スペクトルは、分光器の分解能の範囲では安定な単一モード発振が得られている。一方、自己相関波形は多重縦モード発振の半導体レーザーで測定された波形 (Fig. 1 参照) と異なり、周期的な微細構造が完全に消失し、SH 強度が 1 から 3 までのびる緩やかな包絡線からのみ成り立っている事がわかった。この事実は、光パルス時間波形が内部に微細構造を持たない滑らかな形状である事を示すものである。そこでさらに、光パルスのコヒーレント性の指標となるパルス時間幅 Δt とスペクトル幅 $\Delta \nu$ の積 $\Delta t \cdot \Delta \nu$ を求め、その検討を行なった。

Fig. 4 には DFB-DC-PBH 型半導体レーザーより発生した超短光パルスの $\Delta t \cdot \Delta \nu$ 積の測定

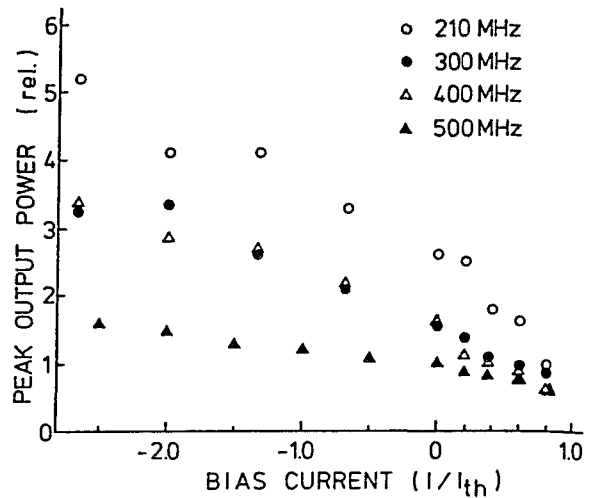


Fig. 2 単一パルス発振状態での光ピーク出力のバイアス電流および変調周波数依存性の測定結果

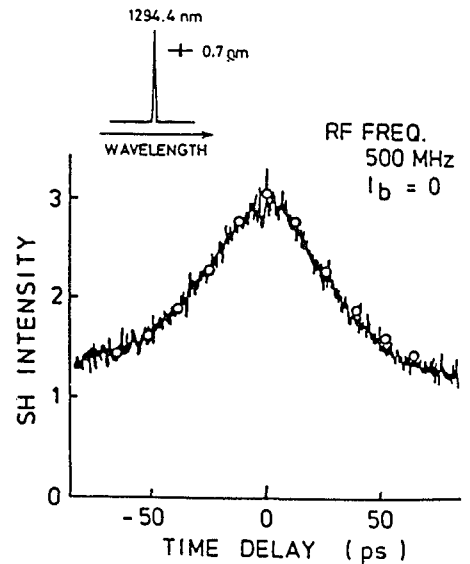


Fig. 3 SHG 相関法により測定した超短光パルスの自己相関波形と発振スペクトル分布 (分布帰還型 半導体レーザー)

結果を示す。測定値はほぼ0.3と0.4の間に集中しており、光パルス波形が擬ローレンツ形である事を考慮すれば、この事実から、高周波変調法により良好なコヒーレント性を有する時間幅数10 psの超短光パルスが発生できる事が初めて実証された。

第5章 単一モードレート方程式による半導体レーザーからの超短光パルス発生の数値的解析

半導体レーザーからの超短光パルスの発生あるいは高速変調特性の理論的解析には、光子密度およびキャリア密度の時間変化を記述したレート方程式がしばしば用いられる。本章では、単一モードのレート方程式の数値的解析

により超短光パルスの発振特性を導き、実験結果との比較検討を行なった。

レート方程式の数値的解析では、単一縦モード発振半導体レーザーで測定された超短光パルスの発振特性はほぼ定量的に説明することができた。また多重縦モード発振半導体レーザーにおける超短光パルス発振特性も、一部には差異も見られるもののほぼ実験結果と一致する解析結果が得られた。

第6章 単一モードレート方程式による半導体レーザーからの超短光パルスの理論的近似解析

第5章で行なったレート方程式の数値的解法は、ある動作条件における光子密度やキャリア密度の時間波形のシミュレーションには適しているが、非線形方程式なため、数値解析にたよらざるを得ない事から全般的な発振特性の解析や物理的解釈に適しているとは言えない。本章ではこの問題を解決するために、強い高周波変調時における超短光パルスの発振特性を単一モードレート方程式に適当な近似法を導入し、解析的に導出する事を試みた。

初めに、単一モードレート方程式の光子密度およびキャリア密度に対する微分方程式を積分する事により、変調の一周期における単一パルス発振領域や、変調限界周波数を導出できる事がわかった。さらに、単一パルス発振条件において、キャリア密度の時間変化波形を近似式で表わす事により、パルス時間幅のバイアス電流および変調周波数依存性を求めた結果、第3章および第4章で測定された実験結果や数値的解法の結果とも定性的に一致する結果が得られ、同時にその物理的解

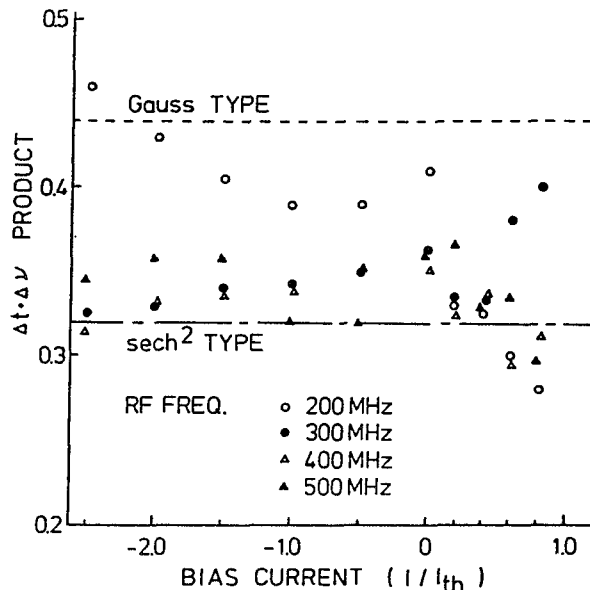


Fig. 4 単一パルス発振状態でのDFB-DC-PBH型半導体レーザーからの超短光パルスの $\Delta t \cdot \Delta \nu$ 積のバイアス電流および変調周波数依存性の測定結果

釈について新たな見通しを得る事が可能となった。

第7章 和周波変換法を用いた近赤外域超短光パルスのストリークカメラによる実時間測定

超短光パルスの発生の研究が進むにつれて、種々の測定法が考案、開発されてきた。しかし波長 $1\ \mu\text{m}$ 以上の低出力な近赤外域あるいは赤外域の超短光パルスの実時間、高時間分解能 ($\sim 1\ \text{ps}$) の測定法は開発されていなかった。本章では、非線形光学結晶を用いた和周波変換法とストリークカメラの組み合わせによる新しい方法の提案と動作解析および測定実験を行なった。

波長 $1.3\ \mu\text{m}$ の信号光と波長 $1.064\ \mu\text{m}$ のポンピング光の組み合わせの動作解析では、長さ $10\ \text{mm}$ の LiIO_3 結晶を用いた場合にピーク出力が $1\ \text{mW}$ 程度の超短光パルスの測定が可能なる事が明らかとなった。DC-PBH型半導体レーザーからの超短光パルスの測定実験では、単発掃引による実時間測定により、この新しい測定法の有用性が実証された。本方式は、ポンピング光および非線形結晶の組み合わせを適当に選ぶ事により、近赤外から赤外波長領域に至る広い波長領域において測定可能な有用な技術である。

第8章 結 論

第1章から第7章までの研究結果を総括し、考察を加えて結論とした。

近い将来における光通信、光情報処理に必要な半導体レーザーからの超短光パルスの時間幅、光出力が制御できる事を実験的、理論的に明らかにし、さらに素子単体のみによるコヒーレントな超短光パルスの発生を初めて実現し、その重要性を実証した。また、近赤外域の超短光パルスの新しい測定法の提案と測定実験を行ない、その有用性を明らかにした。

謝 辞

本研究に終始御指導、御鞭撻を賜った稲場文男教授、有益なる御教示を賜った平井正光教授、波岡武教授、伊藤弘昌助教授に深く感謝の意を表します。

審査結果の要旨

大容量通信や超高速情報処理に対する需要は、情報化社会の発展と共に急速に増大し、そのためレーザーを用いた光通信や光エレクトロニクスの実用化が世界的に進められている。しかし、この目的に適合した、広帯域で時間幅の極めて狭い超短光パルスを安定に発生する半導体レーザーの動作方法の開発は未だ不十分で、制御法も殆んど知られていない。

著者はこのような観点から、InGaAsP化合物半導体を用いたダイオードレーザーに着目し、再現性に優れたほぼ理論通りの、十ピコ秒代の時間幅の超短光パルスを高速で発生する方法とその物理的制御法を詳細に研究してきた。本論文はその研究成果をとりまとめたもので、全編8章よりなる。

第1章は総論である。

第2章では、半導体レーザーが超短光パルス発生に極めて適した基本的特性を有することを総合的に明らかにして、その発生および測定方法を論じている。

第3章では、多重縦モード発振のダイオードレーザーに直流電流と強い高周波電流を重畳印加して、高出力の超短光パルスを発生する方法を開発し、その諸特性を明らかにすると共に、正から負へ直流電流を変化する手法により、パルス時間幅や、ピーク出力が制御可能であることを見出している。これらは実用上有用な成果である。

第4章では、さらに上記の方法を単一縦モード発振の分布帰還型レーザーに適用し、パルス時間幅とスペクトル幅の間にフーリエ変換関係が成立する、ほぼ理想的と見られる超短光パルスの発生に成功し、出力特性とその制御特性を詳細に検討している。これらは新しい有意義な知見である。

第5章は、半導体レーザーのレート方程式を用いて前2章の実験に対応する超短光パルスの発振特性の理論的な数値解析をとりまとめたものであって、両者の結果の間に良好な傾向の一致が見出されることを確認している。

第6章では、これらの発振特性をさらにレート方式の近似的解析解に基づいて解明することを試み、実験結果との比較検討の下に超短光パルスの発生および制御機構や各種の動作パラメータの効果を明らかにしている。

第7章では、近赤外域の超短光パルスの新しい実時間計測法として、非線形光学結晶による和周波変換法とストリークカメラを組合せた方式を考察し、実験によってその動作を実証しており、これは優れた成果といえる。

第8章は結論である。

以上要する本論文は、半導体レーザーによる超短光パルスの高速で安定な発生に成功し、その動作特性を実験と理論の両面から研究して、いくつかの重要な知見を加えたものであって、応用物理学ならびに量子電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。