

論文の内容の要旨

論文題目 光励起利得スイッチ半導体レーザーによる
フェムト秒パルス発生

(Femtosecond pulse generation by optically pumped gain-switched semiconductor lasers)

氏名 伊藤 隆

利得スイッチ半導体レーザーからのフェムト秒パルス発生は、1970年代から現在に至るまで40年間にわたって期待され、研究が続けられてきた。様々な実験や理論的予測によって、フェムト秒パルス発生の可能性が指摘されてきたが、自己相関測定などによる明確な証拠を示した例は無い。本研究は、光励起利得スイッチ半導体レーザーからフェムト秒パルスを発生させ、それを疑い無い測定結果で示す事を目的とした。本研究では、GaAs多重量子井戸レーザーとGaAsダブルヘテロ(バルク)レーザーを測定試料とし、電氣的帯域の影響を受けない光パルス励起法によって、利得スイッチ動作を系統的に調べた。測定には、パルス幅を明確に計測できる自己相関法と、時間分解能は数ピコ秒に制限されるが、パルスダイナミクス全体を測定できるシンクロスキャンストリークカメラ計測法を用いた。得られた測定結果が、シングルモードレート方程式を用いた利得スイッチ理論によって説明できるかを明らかにしつつ、この理論では説明できない新たな短パルス発生現象の発見と理解を目指した。

本論文は、以下に述べる全4章で構成される。

第1章では、研究背景となる利得スイッチ実験の先行研究についてレビューする。利得スイッチ動作を解析するための基礎となるシングルモードレート方程式利得スイッチ理論について説明し、課題と研究目的について述べる。

第2章では、実験方法について説明する。測定試料にはGaAs 3周期量子井戸レーザーとGaAsバルクレーザーを設計作製して用いた。励起光源として、市販のモードロックチタンサファイアレーザー(パルス幅2 ps、繰り返し80 MHz、パルスエネルギー10 nJ)と、高密度励起のための独自開発モードロックファイバーレーザー光源を用いた。ファイバーレーザー光源の開発に先立ち、設計作製を行う上で重要となる光ファイバーの群速度分散のカタログ値がどの程度信頼できるかを、高精度測定を通して確かめた。タイムオブフライト法による、指紋スペクトルと全点解析を組み合わせた測定方法を開発し、シングルモードファイバーの測定値とカタログ値が10%以内で一致する事を確かめた。

図1に、ファイバーレーザー光源の概略図を示す。この光源は、10 MHz繰り返し1.55 μm 帯モードロックErドープファイバーレーザー発振器、パルス幅伸長器、2台のファイバー増幅器、パルス幅圧縮器、第2次高調波発生器から構成される。第2次高調波の最大平均強度は330 mW、パルス幅は360 fsである。パルスエネルギー33 nJ、ピーク強度90 kW、スペクトル幅4.28 meV (2.1 nm、1.03 THz)のフーリエ限界パルスを発生する。この光源をシンクロスキャンスト

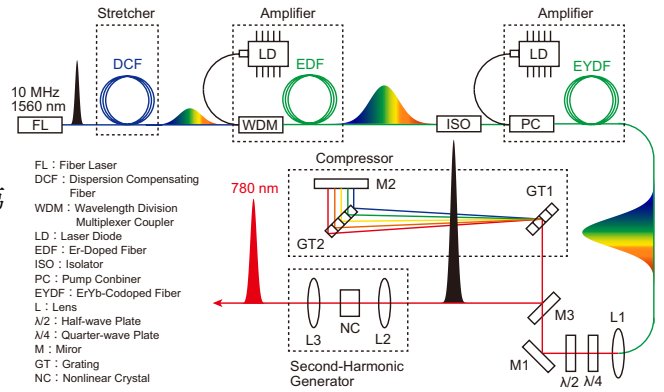


図1. モードロック Er ファイバーレーザー光源の概略図。

リークカメラと同期させて測定に用いた。測定システムの最高時間分解能は、チタンサファイアレーザーとの組み合わせで1.3 ps、ファイバーレーザー光源との組み合わせで2.7 psであった。

第3章では、実験結果と考察について述べる。

第3章前半では、GaAs 3周期量子井戸レーザーの基礎測定と利得スイッチング実験結果を説明する。利得スイッチ実験ではモードロックチタンサファイアレーザーを用いた。試料の環境温度は300 K、励起エネルギーは1.70 eVとした。

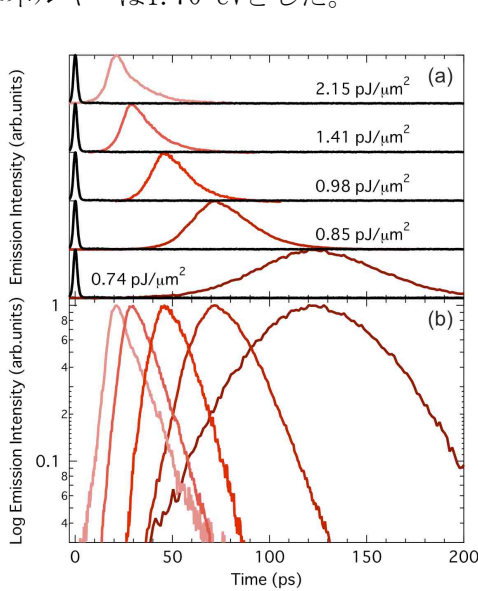


図2. GaAs 3周期量子井戸レーザーからの利得スイッチパルスの時間波形測定。(a)線形プロットと(b)対数プロット。

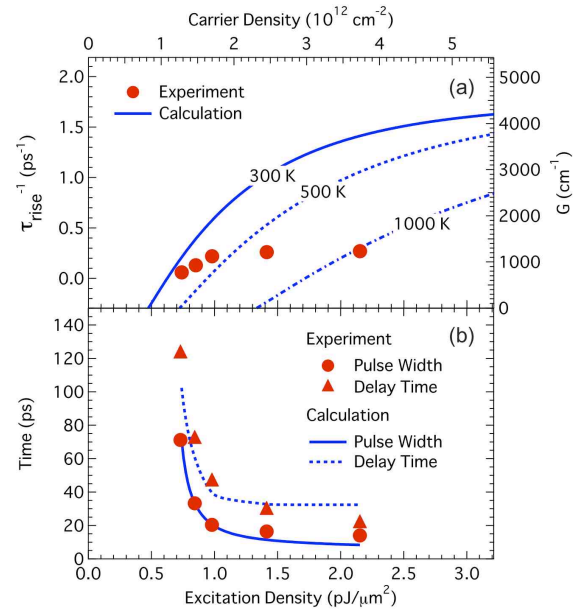


図3. (a)初期利得と(b)パルス幅及び遅延時間の励起密度依存性。

図2に、低密度領域における利得スイッチパルス時間波形の励起密度依存性を示す。赤線と黒線は出力パルスと励起パルスの散乱光である。レーザー発振閾値は0.63 pJ/ μm^2 であった。図3(b)に赤点で、各励起密度におけるパルス幅と遅延時間を示す。最短パルス幅は、励起密度2.15 pJ/ μm^2 において13 psとなり、出力強度は12.7 pJ/Facet、ピーク強度は1 Wとなった。図2(b)は対数プロットである。利得スイッチパルスの立ち上がりが単一指数関数型になっている事がわかる。図3(a)左軸に赤点で立ち上がりの時定数を示す。この結果とシングルモードレート方程式を用いて、励起直後の利得を見積もった(図3(a)右軸)。初期利得値は励起密度に対してサブリニアに増加し、1200 cm^{-1} に収束した。

各励起密度で得られた初期利得を線形内挿し、シングルモードレート方程式で時間波形を計算した結果を図3(b)に青線を示す。計算結果は測定結果を再現する。次に、利得飽和の原因を調べるため、熱平衡状態を仮定して自由電子近似利得計算を行った。図3(a)に青実線で計算結果を示す。2次元状態密度の飽和利得は 4600 cm^{-1} で測定値 1200 cm^{-1} の約4倍となり、測定結果を説明できない。そこで、図3(a)にキャリア温度500 K、1000 Kで計算した結果を青破線と鎖線で示す。励起密度が増加するとキャリア温度の上昇によって利得が抑制されると解釈できる。

キャリア加熱現象を実験で調べるため、自然放出光の過渡スペクトル測定を行った。図4に、励起から50 ps後の瞬時自然放出光スペクトルを示す。励起密度 $0.6 \text{ pJ}/\mu\text{m}^2$ と $5.6 \text{ pJ}/\mu\text{m}^2$ は、発振閾値密度と利得飽和密度に相当する。高エネルギー領域の裾野をボルツマン分布でフィットしてキャリア温度を見積もると、500 Kと1000 Kとなった。励起密度が高くなると、励起初期において優位なキャリア温度の上昇が見られ、本解釈をサポートする結果となった。

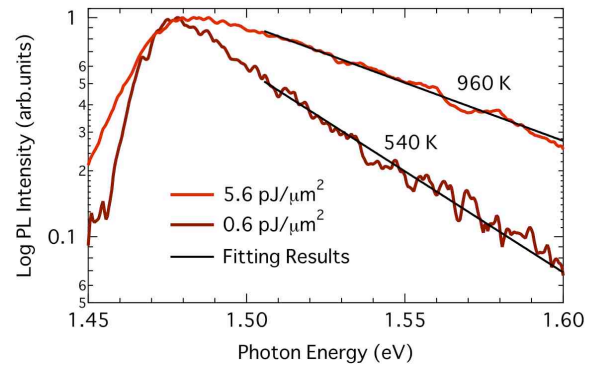


図4. 励起から50 ps後の瞬時自然放出光スペクトル。

励起密度 $3 \text{ pJ}/\mu\text{m}^2$ 以上の高励起領域では、時間分解スペクトル中に複雑な明暗構造が現れた。この現象はシングルモードレート方程式では説明できない。分極やバンド内のキャリアダイナミクスを含めた考察が必要である事がわかった。

第3章後半では、GaAsバルクレーザーの利得スイッチング実験結果について述べる。内容については、雑誌等で刊行予定のため、非公開とする。

第4章では、総括と展望について述べる。