

# 論文審査の結果の要旨

氏名 伊藤 隆

本論文では、GaAs 多重量子井戸半導体レーザーと GaAs バルク半導体レーザーを対象とし、それぞれの半導体レーザーを光励起利得スイッチ動作させた時に発生するパルス発光のパルス幅、遅延時間の光励起強度密度依存性を時間分解分光で計測し、その結果とシングルモードレート方程式による解析結果との比較から、フェムト秒からピコ秒領域での発光メカニズム解明について述べられている。また、光励起強度の増加に伴い、高エネルギー側の発光が増加し、高エネルギー側の成分を光学フィルターで抽出することにより超短パルス光発生が観測されることを初めて報告している。これらの内容は、光励起利得スイッチ動作した半導体レーザーでの超高速キャリアダイナミクスについて重要な知見を与えるものである。

本論文は、4つの章で構成されており、以下、その概要をまとめる。

第1章では、半導体レーザーの短パルス光発生の背景について、先行研究をまとめると共に、半導体レーザーでの光利得スイッチ現象について理論的説明を行い、本研究の意義、目的について述べている。

第2章では、実験方法について述べており、実験で用いた2種類の試料について説明した後、半導体レーザーを光励起利得スイッチ動作されるためのモード同期ファイバーレーザーについて述べている。

使用した試料は、リッジ型 GaAs<sub>3</sub> 周期量子井戸半導体レーザー(以降、量子井戸半導体レーザー)とスラブ型利得ガイド GaAs バルク半導体レーザー(以降、バルク半導体レーザー)で、それぞれの設計指針、作製方法について述べている。また、本論文の実験では、光励起利得スイッチ動作をさせるための励起用レーザーは、波長が 780nm で、サブピコ秒パルスで、かつ、十分な励起強度を確保するために、ファイバーレーザー光源を用いている。ファイバーレーザー光源は自ら設計、製作したもので、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、レーザー用光ファイバーの群速度分散を把握した上で、パルス幅 0.36p ピコ、繰り返し周波数 10MHz、パルスエネルギー 33nJ のモード同期レーザー光源を実現した。また、半導体レーザーからの発光は、モード同期レーザー光源に同期させたストリークカメラを用いて時間分解能数ピコ秒で測定している。

第 3 章では、利得スイッチ半導体レーザーでの短光パルスの発生メカニズムについて、実験結果とシングルモードレート方程式で計算される結果との比較を行い、本章の前半では量子井戸半導体レーザー、また、後半で、バルク半導体レーザーについて述べている。

光励起された量子井戸半導体レーザーからの発光に関しては、励起光密度が  $2.15\text{pJ}/\mu\text{m}^2$  以下の場合、発光のパルス幅、発光遅延時間は、光励起強度の増加に伴い短縮される現象を見出した。この現象のメカニズムを解明するために、本論文では、キャリア密度とキャリア温度に着目した。キャリアの緩和時間より十分短い発光の初期段階では、キャリア密度は励起光密度で決まる。一方、キャリア温度については、励起されたキャリア密度と発光の立ち上がり時間から算出される利得とキャリア温度を考慮に入れた利得のシングルモードレート方程式の結果との比較から見積もった。その結果、キャリア温度は、高密度励起ほど高温になり、これを考慮に入れたシングルモードレート方程式で計算される発光のパルス幅、遅延時間は、実験結果とよく一致した。この結果から、光励起利得スイッチ動作した半導体レーザーにおける、10 ピコ秒領域の発光特性は、発光による誘導放射によるキャリアの減少と共に、高密度光励起によるキャリア温度上昇で支配されると結論している。また、励起光密度が  $2.15\text{pJ}/\mu\text{m}^2$  以上では、発光スペクトラムに時間的振動が見られ、これについては、シングルモードレート方程式では説明ができず、今後の課題として残された。

第 3 章後半では、光励起されたバルク半導体レーザーからの発光について報告している。この発光特性においても、量子井戸半導体レーザーと同様に、励起強度に対して、発光時間、発光遅延時間の短縮が観測された。さらに、励起光密度が  $4.2\text{pJ}/\mu\text{m}^2$  以上では、発光の低エネルギー側成分は長い継続時間を持つ一方で、高エネルギー側成分に非常に短い発光が観測された。このような新奇的な振る舞いは、シングルモードレート方程式では説明できない。この高エネ

ルギー側の発光を光学フィルターによって抽出した後に自己相関信号波形を観測したところ、時間幅は 1.04 ピコ秒であった。パルス波形を  $\text{sech}^2$  型と仮定すると、パルス幅は 670 フェムト秒と算出された。このパルス成分は、共振器寿命の 3.4 ピコ秒よりも短くなっているという点で、従来の利得スイッチパルスとは発生機構が大きく異なっている。また、パルス幅や遅延時間が共振器のワンパス時間よりも短いため、この現象は共振器内で局所的に短パルスが発生していると考えられる。測定された利得スイッチパルス幅が共振器寿命よりも短くなるという振る舞いは、

- (1) 利得スイッチによる誘導放射
  - (2) 緩和による利得から吸収への高速な変化
- で定性的に説明できることを示した。

第 4 章では、本論文によって明らかにされた結論と今後の展望について述べられている。概ね  $2\text{pJ}/\mu\text{m}^2$  以下の光励起で光利得スイッチ動作をされた場合、10 ピコ秒から数 10 ピコ秒程度の発光が観測される。その時間的な振る舞いは、キャリア加熱効果を含めたシングルモードレート方程式で定量的に説明できることを示した。発光のパルス幅、遅延時間は、励起強度が大きくなるほど短縮される傾向を見出し、量子井戸半導体レーザーでは最短パルス幅が共振器寿命 3.4 ピコ秒よりも 3 倍以上長い 13 ピコ秒に収束した。これは、キャリア温度が、高密度励起ほど高温になり、利得が小さな値に飽和するためである。この飽和利得値がパルス幅を支配的に決めることを明らかにした。

これらの知見は、これまでの半導体レーザーに関する研究に関する長い歴史の中で意見が分かれていた共振器寿命よりも短い超短パルス発生へのアプローチに関して、適切な解釈と指針を示したものと言える。また、バルク半導体レーザーに  $4.2\text{pJ}/\mu\text{m}^2$  以上の励起光で高密度キャリアを生成すると、発光スペクトラムでは高エネルギー側の成分が増加し、また、光学的フィルターによって高エネルギー側の発光を測定すると、サブピコ秒の発光が確認された。このパルス成分は共振器寿命よりも短くなっており、従来の利得スイッチパルスの発生機構とは異なる新しい現象の発見といえる。共振器のワンパス時間よりもパルス幅や遅延時間が短いため、共振器内で時間的空間的に局在した超短パルスが発生していると考えられる。利得スイッチによる誘導放射と非平衡キャリアの超高速緩

和を制御することにより、共振器寿命よりも著しく短いパルスを発生できる事を示した。

半導体レーザーの研究は、これまで盛んに研究されてきたものの、未だに、未解明な点が多く残されている。このような状況で、本論文は、半導体レーザーにおいてさらなる短パルス化への指針と励起キャリアダイナミクスに関する有用な知見を与えるものである。よって、本研究の価値と独創性は十分と認められ、博士(理学)の学位論文としてふさわしい内容を持つものと認定し、審査員全員で合格と判定した。なお、本論文は、共同研究者らとの共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験の遂行や結果の解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士(理学)の学位を授与できると認める。