

# 長波長歪量子井戸半導体レーザーにおける温度特性の解析

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/16413">http://hdl.handle.net/2297/16413</a>

氏名	東 敏 生
生年月日	
本籍	石川県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第434号
学位授与の日付	平成13年9月28日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	長波長歪量子井戸半導体レーザーにおける温度特性の解析
論文審査委員(主査)	山田 実(工学部・教授)
論文審査委員(副査)	高宮 三郎(工学部・教授) 清水 立生(工学部・教授) 森本 章治(工学部・教授) 桑村 有司(工学部・講師)

## 学 位 論 文 要 旨

### Abstract

Temperature insensitivity is one of the most important characteristics for optical sources in access network system. However, it is known that present long wavelength semiconductor lasers made of *GaInAsP/InP* materials show poor temperature dependence. Recently several new material systems are developed for a temperature insensitive optical source. In this thesis, we experimentally investigated the temperature dependence of the threshold current in two kinds of lasers, such as *GaInAsP/InP* and *AlGaInAs/InP* strained quantum well lasers, to analyze the physics of the improved temperature sensitivity in *AlGaInAs/InP* lasers. Moreover, the temperature dependence of oscillation wavelength is also studied for the two kinds of lasers.

It was found that the decrease of the Auger recombination current causes the improved temperature dependence of threshold current in *AlGaInAs/InP* lasers.

The temperature dependence of the oscillation wavelength is determined by the compensation between the bandgap wavelength shift and the band filling effect. Therefore, the trade-off relationship appears between the temperature dependences of threshold current and oscillation wavelength. However, the trade-off relationship is limited within the same material system. Unfortunately, *AlGaInAs/InP* lasers show large temperature dependence of bandgap wavelength, resulting in temperature sensitive oscillation wavelength.

### 1. はじめに

近年光通信システムのアクセス系への展開が検討されてきている。光アクセス系システムでは低コスト性が要求されるため、高価な温度制御装置を用いることはできない。従って、光源である半導体レーザーには良好な温度特性が必要となる。1990年台にはレーザー特性の温度特性を改善するために新しい長波長材料系が研

究、開発され、従来のGaInAsP/InP材料系に比べて良好な温度依存性が実現されている。そこで、既存のGaInAsP/InP材料系と新しく開発されたAlGaInAs/InP材料系の2種類の長波長歪量子井戸半導体レーザにおける温度依存性を実験的に解析を行い、温度依存性改善のメカニズムを考察した。また、ほとんど詳細な解析が行われてきていなかった発振波長の温度依存性についても解析した。

## 2. 解析方法

実験では、同じ1.3- $\mu\text{m}$ 帯のGaInAsP/InP歪量子井戸レーザとAlGaInAs/InP歪量子井戸レーザを用いて、種々の特性を2つの材料系のレーザの間で比較し、温度特性改善のメカニズムを解析した。

半導体レーザの発振しきい値電流の温度依存性は光学利得の温度依存性で決定される。そこで、最初に光学利得の温度依存性を測定し、温度依存性を決定している利得パラメータを特定した。次に、その温度依存性を支配する利得パラメータに材料依存性が生じる物理メカニズムについて、以下に示す実験により解析した。

- (1) 広い温度範囲 (100K~400K) における発振しきい値電流の絶対温度依存性の測定
- (2) 自然放出光強度の電流依存性の測定
- (3) 発振しきい値電流の静水圧依存性の測定

これらの実験により室温近傍における発振しきい値電流を構成する電流成分の分離を行った。

半導体レーザにおける発振波長の温度依存性も利得特性の温度依存性によって決定される。そこで、発振波長の温度係数を利得パラメータを用いて表し、温度依存性の決定機構を明らかにするとともに、材料依存性についても評価した。

## 3. 発振しきい値電流の温度依存性

### (1) 利得特性の温度依存性の評価

最初に、利得特性の温度依存性を測定することより、発振しきい値電流の温度依存性を利得パラメータによって表した。図1に利得特性の温度依存性の測定結果を示す。いずれの材料系のレーザも同様な温度依存性を示していることがわかる。この場合、発振しきい値電流の温度依存性を表す特性温度 $T_0$ は、次式で与えられる。

$$T_0 = T_{jr} \left( 1 - \frac{J}{G_0} \frac{\partial \alpha_i}{\partial J} \right) \quad (1)$$

ここで、 $T_{jr}$ は材料を透明にするために必要な電流密度 $J_{tr}$ の特性温度、 $G_0$ は電流軸を自然対数軸でとった場合の利得の傾き、 $\alpha_i$ は内部損失を表している。図1より、特性温度 $T_0$ は材料を透明にするために必要な電流密度 $J_{tr}$ の温度依存性によってほぼ決まっており、材料依存性もこの特性温度 $T_{jr}$ の差に起因していることがわかる。

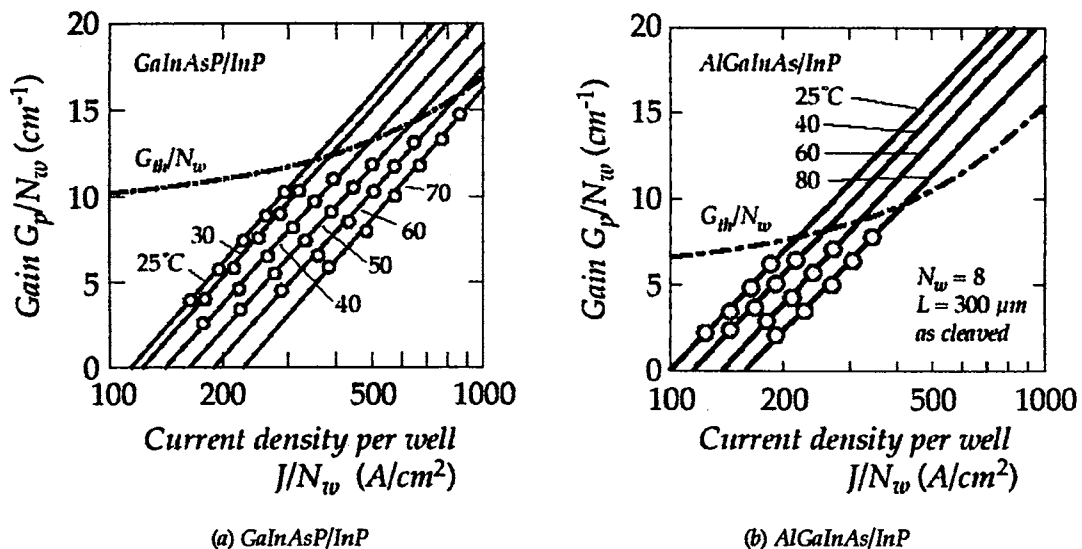


図1 利得特性の温度依存性

(2) 材料依存性の物理メカニズム

A. 発振しきい値電流の絶対温度依存性の測定

量子井戸半導体レーザにおいて発振しきい値電流の発光再結合電流成分が絶対温度に比例する。この関係を用いて、100K~400Kの広い温度範囲において発振しきい値電流の絶対温度依存性を測定することにより、室温近傍における発光再結合電流成分の割合を見積もった。図2に測定結果を示す。低温領域では、発光再結合電流成分が支配的であるために、いずれの材料系においても、発振しきい値電流が絶対温度に比例して増加していることがわかる。温度を上昇していくと、ある温度から急激に発振しきい値電流が絶対温度に対して非線形に増加しはじめる。低温領域での線形領域から外挿することにより、室温近傍における発光再結合電流成分を見積もった。その結果、GaInAsP/InP歪量子井戸レーザでは、室温近傍において発光再結合電流成分が50%以下になっているのに対し、AlGaInAs/InP歪量子井戸レーザでは70%程度が発光再結合電流成分になっていることがわかった。図3に特性温度 $T_0$ の絶対温度依存性の測定結果を示す。発振しきい値電流が絶対温度に比例する場合、特性温度 $T_0$ が絶対温度 $T$ に等しくなることが知られている。AlGaInAs/InP歪量子井戸レーザでは、220Kまで $T_0=T$ の関係が保持されている。そして、室温近傍においても温度依存性の小さい発光再結合電流成分の割合が大きいため、高い特性温度が実現されていることがわかる。

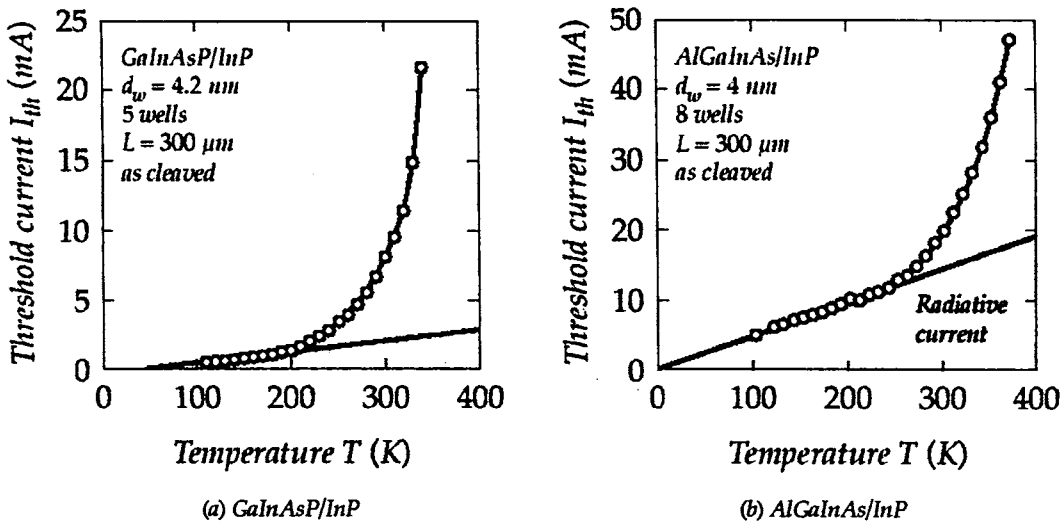


図2 広い温度範囲での発振しきい値電流の絶対温度依存性

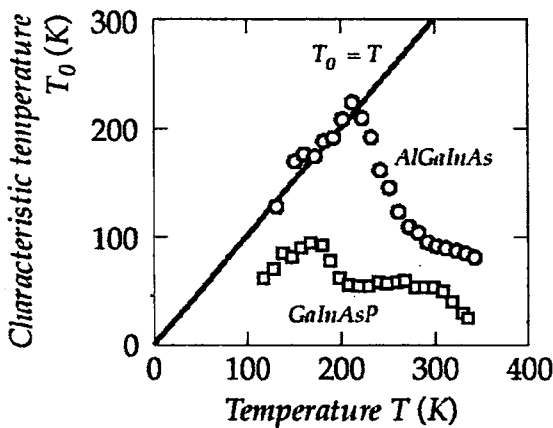


図3 特性温度 $T_0$ の絶対温度依存性

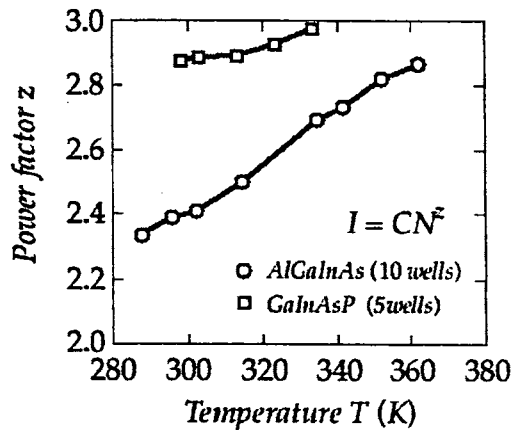


図4 冪乗係数 $z$ の絶対温度依存性

### B. 自然放出光強度の電流依存性の測定

次に、室温近傍における発振しきい値電流の電流成分を調査するために、発振しきい値電流以下での自然放出光強度の電流依存性の測定を行った。注入電流 $I$ と注入キャリア密度 $N$ の関係式は、電流範囲を限定した場合、次式で与えられる。

$$I = CN^2 \quad (2)$$

一方、自然放出光強度 $P_{sp}$ は発光再結合電流成分に比例すると考えられることより、次式で表される。

$$P_{sp} \propto eVB N^2 \quad (3)$$

ここで、 $B$ は発光再結合係数である。式(2)および式(3)より、冪乗係数 $Z$ は次式で表される。従って、自然放出光強度の電流依存性を測定することにより、注入電流と注入キャリア密度の関係を与える冪乗係数 $Z$ を測定することができる。

$$z = 2 \frac{\ln(I)}{\ln(P_{sp})} \quad (4)$$

発光再結合電流成分が支配的な場合、冪乗係数 $Z$ は2をとる。一方、オージェ再結合電流が支配的な場合、冪乗係数 $Z$ は3となる。図4に、冪乗係数 $Z$ の測定結果を示す。 $GaInAsP/InP$ 歪量子井戸レーザでは室温近傍で $Z=2.9$ となっているのに対し、 $AlGaInAs/InP$ 歪量子井戸レーザでは $Z=2.4$ 程度になっている。この測定結果からも、 $AlGaInAs/InP$ 歪量子井戸レーザでは、発光再結合電流成分の割合が大きいため温度特性が改善されていることがわかる。

### C. 発振しきい値電流の静水圧依存性の測定

温度依存性が大きい電流成分としてオージェ再結合電流がある。発振しきい値電流におけるオージェ再結合電流成分の割合を評価するために、発振しきい値電流の静水圧依存性実験を行った。半導体に等方的な圧力(静水圧)を印加した場合、バンドギャップエネルギーが増加する。オージェ再結合過程は、バンドギャップが広がるほど確率が低くなり、オージェ再結合電流成分が低減される。従って、静水圧印加による発振しきい値電流の変化を測定することにより、オージェ再結合過程が支配的かどうかを確認できる。図5に $AlGaInAs/InP$ 歪量子井戸レーザにおける発振エネルギーの静水圧依存性の測定結果を示す。静水圧印加により、発振エネルギーが増加していることが確認できる。この傾きはこれまでに報告されている $GaInAsP/InP$ 歪量子井戸レーザにおける測定結果と同程度である。図6に、発振しきい値電流の静水圧依存

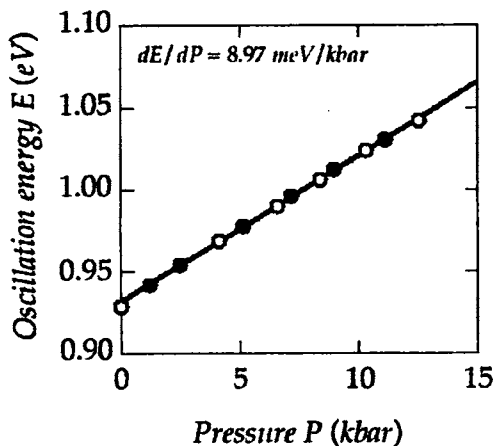


図5 発振エネルギー $E$ の静水圧依存性

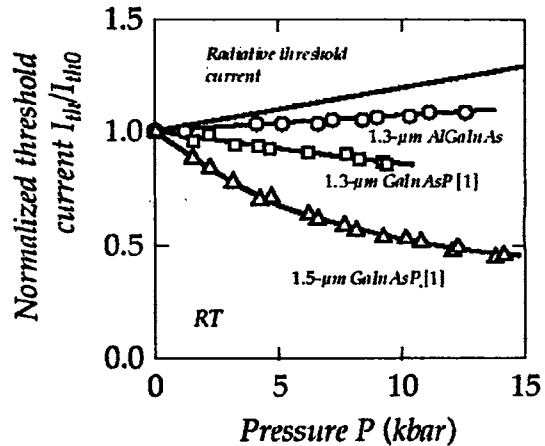


図6 発振しきい値電流の静水圧依存性

性の測定結果を示す。GaInAsP/InP歪量子井戸レーザの測定結果は、Surrey大学のグループで測定された結果を引用した[1]。1.3- $\mu\text{m}$ 帯および1.55- $\mu\text{m}$ 帯GaInAsP/InP歪量子井戸レーザでは、静水圧印加にともない発振しきい値電流が大きく低減されオージェ再結合電流の影響が大きいことがわかる。一方、1.3- $\mu\text{m}$ 帯AlGaInAs/InP歪量子井戸レーザでは、静水圧印加により発振しきい値電流が増加している。この結果より、AlGaInAs/InP歪量子井戸レーザでは、オージェ再結合電流の割合が減少していることが明らかになった。

以上の実験結果により、現在広く用いられているGaInAsP/InP歪量子井戸レーザに比較して、AlGaInAs/InP歪量子井戸レーザでは、オージェ再結合電流の低減により発振しきい値電流の温度依存性が改善されていることが明らかになった。

#### 4. 発振波長の温度依存性

FP共振器型半導体レーザの発振波長は利得ピーク波長で決まる。そこで、利得ピーク波長の温度依存性および電流依存性を測定することにより、発振波長の温度依存性について実験的に考察した。図7に、GaInAsP/InP歪量子井戸レーザとAlGaInAs/InP歪量子井戸レーザにおける利得ピーク波長の測定結果を示す。いずれの材料系のレーザにおいても同様の傾向を示しており、温度上昇によるバンドギャップ波長の長波長シフトと電流注入による短波長シフトの兼ね合いにより発振波長の温度依存性が決まっていることがわかる。

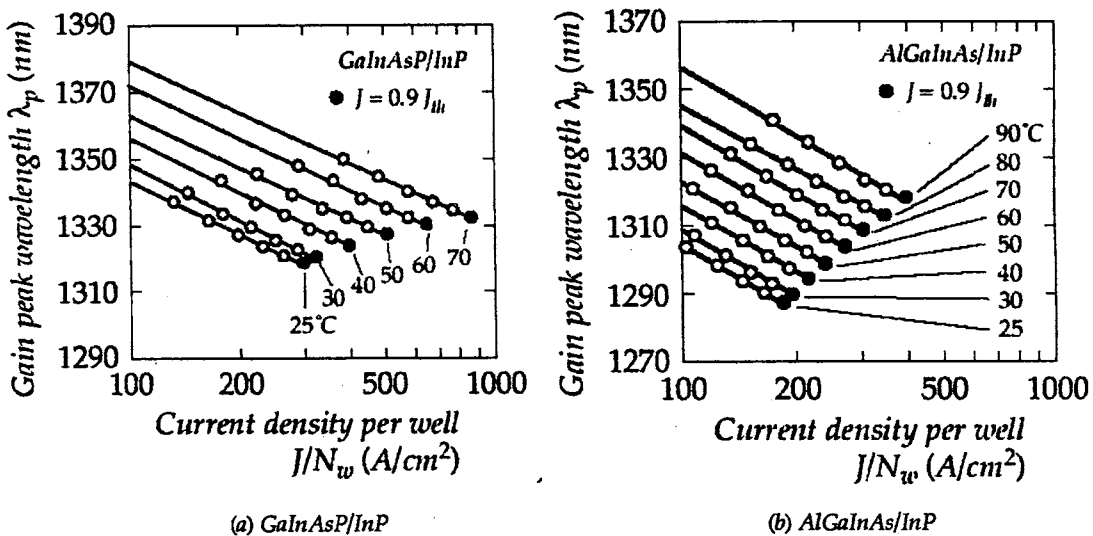


図7 利得ピーク波長の電流密度依存性

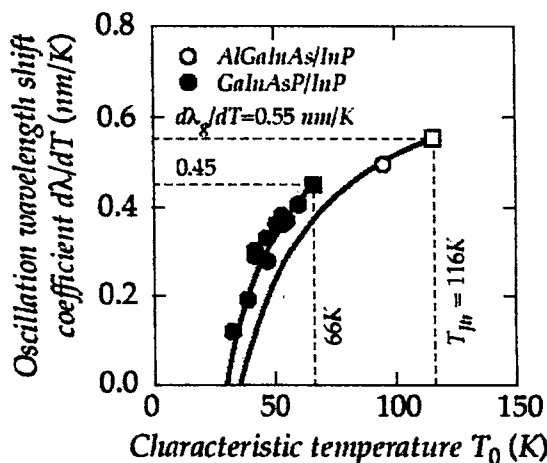


図8 発振波長の温度係数と特性温度のトレードオフ関係

この測定結果より、●で示されている発振波長の温度係数 $d\lambda/dT$ が次式で表される。

$$\frac{d\lambda}{dT} = \frac{d\lambda_g}{dT} - a_2 \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{tr}} \right) \quad (5)$$

ここで、 $d\lambda_g/dT$ はバンドギャップ波長の温度係数である。 $a_2$ は電流注入による短波長シフトを表す係数であり、図7における傾きに対応する。図8に、式(5)より計算した結果と測定結果を示す。発振しきい値電流の温度依存性と発振波長の温度依存性にはトレードオフ関係が存在することがわかる。しかし、バンドギャップ波長の温度係数 $d\lambda_g/dT$ と特性温度 $T_{tr}$ は材料依存のパラメタであるために、材料が異なれば発振しきい値電流の温度依存性と発振波長の温度依存性を両立させることが可能である。しかし、AlGaInAs/InP歪量子井戸レーザでは、バンドギャップ波長の温度係数が大きいため、発振しきい値電流の温度依存性を改善した場合、発振波長の温度依存性がGaInAsP/InPレーザに比べて大きくなってしまふ。

## 5. まとめ

GaInAsP/InP材料系とAlGaInAs/InP材料系の2種類の長波長歪量子井戸半導体レーザにおける発振しきい値電流および発振波長の温度依存性を実験的に解析し、材料依存性に関する物理メカニズムを明らかにした。

本論文では、新しい材料系としてAlGaInAs/InP材料系のみを取り扱った。しかし、近年長波長半導体レーザとして、多くの新しい材料系が開発されてきている。今後、これらの新しい材料系においても同様の実験的解析し、材料としての実力を把握する必要と考えられる。また、光通信システムの普及に伴い、分布帰還型半導体レーザや変調器集積型DFBレーザなどのクーラーレス化に対する要求が強くなってくるものと考えられる。この場合、バンドギャップ波長の温度依存性が小さい材料系が極めて魅力的となる。このような新しい視点での材料系の開発が期待される。

## 参考文献

[1] A. F. Phillips, S. J. Sweeney, A. R. Adams, and P. J. A. Thijs, "The temperature dependence of 1.3- and 1.5- $\mu$ m compressively strained InGaAs(P) MQW semiconductor lasers," *IEEE J. Select. Topics in Quantum Electron.*, vol.5, No.3, pp.401-412, 1999

## 学位論文審査結果の要旨

提出された論文や資料に基づき、平成13年7月31日に第1回審査委員会、平成13年8月6日に口頭発表と最終審査を行った。

光ファイバ通信の光源として使われている半導体レーザでは、発振しきい値電流が小さく、また、発振しきい値電流や発振波長の温度による変動が小さい事が望まれる。歪量子井戸半導体レーザは、数nmの極薄多層構造によるエネルギー準位の削減効果と界面応力とにより、低発振しきい値電流を低減させている半導体レーザである。本論文では、既存のGaInAsP/InP材料系と、新たに開発されているAlGaInAs/InP材料系の2種類の長波長歪量子井戸レーザについて、発振しきい電流や発振波長の温度変化を定める因子を解明し、特性改善への設計指針を述べている。

半導体レーザの温度特性を定める物理的要因は、バンド構造におけるバンドギャップ(禁制帯幅)の温度変化と、フェルミレベルの注入電流依存性である。著者は、レーザ利得と注入電子密度との比例係数、レーザ利得が生じ始める注入電流密度、発振しきい値利得レベル、屈折率などのレーザの諸パラメータについて、その温度依存性や外部圧力依存性などを数多く測定し、温度依存性の物理的要因や電子遷移メカニズムの特定や抽出を行った。

本論文の研究は、半導体レーザの動作特性を独自の手法で解明し、その成果は光ファイバ通信分野での技術開発に貢献できるものである。したがって、博士(工学)の学位を受けることに値するものと判定した。