

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560047

研究課題名(和文)半導体レーザーにおけるアクティブMMI現象による縦モード干渉の研究とその応用

研究課題名(英文) Longitudinal interference based on active MMI phenomena on semiconductor laser diode and its application

研究代表者

浜本 貴一 (Hamamoto, Kiichi)

九州大学・総合理工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：70404027

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、提案者らが世界で初めて見出したアクティブMMI現象をもちいた新しい半導体レーザーに関して、初めてその縦モード干渉を検討したものである。研究成果として以下の成果を得ている。(1) SMSR～40dBの室温単一モード発振(世界初)と、そのメカニズム。(2) 縦モード干渉に基づくフォトン・フォトン共鳴現象の発見と、それに基づく高速変調(3dB帯域17.2GHz)の実験的実証。  
以上の成果により、新たな通信用半導体レーザーの基礎を確立した。

研究成果の概要(英文)：This research is based on active-MMI, that was a phenomenon firstly found by us, and has attempted to investigate on longitudinal interference. As a result, we could successfully achieved the following results; (1) Single wavelength emission with sufficient SMSR of around 40dB on CW operation without using grating (world first) and the mechanism, (2) First observation of photon-photon resonance by using longitudinal interference phenomenon, and high speed modulation based on the phenomena, successfully.

We believe that these results contribute to open up a new window of novel laser diode technology for future high speed communication system.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：アクティブMMI 縦モード干渉 単一波長 フォトン・フォトン共鳴

### 1. 研究開始当初の背景

最近、アクティブ MMI レーザーの単一波長発振に関する研究開発が世界の研究機関で活発化している。これは、能動光導波路における自己多モード光干渉現象の実証以来、低消費電力型半導体レーザーを始め、新しい能動光デバイスが次々に提案されるものの、横モード（光振幅）干渉に関する研究開発が主体で、縦モード（光波長）の自己干渉現象による“単一波長室温連続発振”が極めて難しかったためである。

(\*)補足：現在実用化されている光通信システムでは、多波長分散による雑音を避ける為、“単一波長発振”は重要な性能指標である。これまで、半導体レーザー内に、導波路とは別に“グレーティング層”を別途加工形成する必要のある“分布帰還型半導体レーザー”が、凡そ 30 年前に提案され、実用化されている。構造が複雑、発振波長制御が難しい、波長可変が困難、などの課題がある。）

この背景のもと、代表者の研究 Gr は 2011 年 7 月、世界で初めて、縦モード干渉を利用したアクティブ MMI レーザーの単一波長室温連続発振に成功した。上述のように、縦モード干渉現象に基づく単一波長室温連続発振には成功したが、その結果は偶然得られた面が否定できず、明確な縦モード干渉メカニズムは推論の域を出ていない。従って、単一波長室温連続発振条件は、必ずしも明らかにはなっていない。ここを明らかにしない限り、アクティブ MMI 現象の学術的内容が進展したとは言えないばかりか、工業的応用についても、デバイス設計指針が不明確であるなど、将来の実用化にとっても不十分な状態であるからである。一方、発振波長制御については、縦モード干渉メカニズムの検討結果を基に制御構造を検討すれば十分実現可能と考えられ、応用用途が更に広がるものと期待されるためである。

### 2. 研究の目的

上記の背景のもと、縦モード干渉に基づくアクティブ MMI 現象において、(1)単一波長室温連続発振条件（縦モード干渉条件）、(2)発振波長制御（所望の波長で発振するための制御構造検討）、以上の 2 点の解明を本研究の目的とした。

### 3. 研究の方法

アクティブ MMI 現象に基づく縦モード干渉が実証された非対称ハイメサ構造(図 1 参照)を用い、その単一波長室温連続発振条件の明確化を試みた。

MMI 現象に基づく縦モードの光干渉現象を発現させるメカニズムをとっては、同一共振器内に異なる複数の共振構造を構成し、両干渉条件を選択的に満たす縦モードが単一波長室温連続発振に寄与する、というモデルが現時点では有力である。従って、既に単一波長室温連続発振を実現した構造において、共

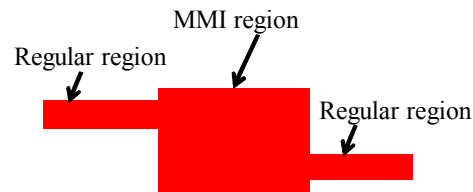


図 1. 非対称 MMI 構造の概要図。

振構造を複数種類変化させることで、単一波長室温連続発振条件を明確化できると考えられる。

また明確化された単一波長発振条件を前提とし、異なる発振波長を与える構造を検討するとともに、その性能検討も進めることで本研究を進めた。

### 4. 研究成果

本研究では、それまでの研究を更に発展させ、縦モード干渉による

(1)単一波長発振のメカニズムの解明及び発振波長制御

という当初の目的にとどまらず、更に

(2)フォトン・フォトン共鳴現象に基づく高速変調動作

を多モード干渉型半導体レーザーにおいて初めて見出したので、以下成果として報告する。

#### 4-1. 単一波長発振のメカニズム及び発振波長制御

本研究で得られた単一波長発振メカニズムが、MMI 領域での縦モード干渉による内部共振とキャビティモード共振の複合共振によるものであることを以下説明する。図 2 に拡大した非対称型アクティブ MMI レーザーのスペクトルを示す。中心となる 0 次ピーク (1562 nm) の両隣に 1 次ピークが確認され、さらにその外側に 2 次ピークが見受けられる。この時の 2 次ピークは 1 次ピークよりも高い出力を得ていることから、複合共振がスペクトルに関与していることが確認できる。さらに、0 次ピークから、1 次ピークまでの間隔  $\Delta\lambda_1$  は 1.1 nm、また、0 次ピークから、2 次ピークまでの間隔  $\Delta\lambda_2$  は 2.1 nm である。また、キャビティモード共振によるピーク間隔 (FSR) は、キャビティ長  $L_{total} = 315 \mu\text{m}$  であることから、ブラッグ条件より  $FSR_1 = 1.2 \text{ nm}$  である。このとき、 $\lambda_0 = 1562 \text{ nm}$ 、 $n_r = 3.2$  で計算している。同様に内部共振モードは、 $L_{half} = 170 \mu\text{m}$  から  $FSR_2 = 2.2 \text{ nm}$  である。以上より、発振スペクトルから読み取られるそれぞれのピーク間隔はデバイス内での複合共振による縦モード干渉に対応し、単一波長発振が得られたことが確認された。このように、2 つのキャビティ長を制御することで単一波長発振が得られ、かつ発振波長が比較的容易に制御できることが分かり、本半導体レーザーの有用性が明らかになった。

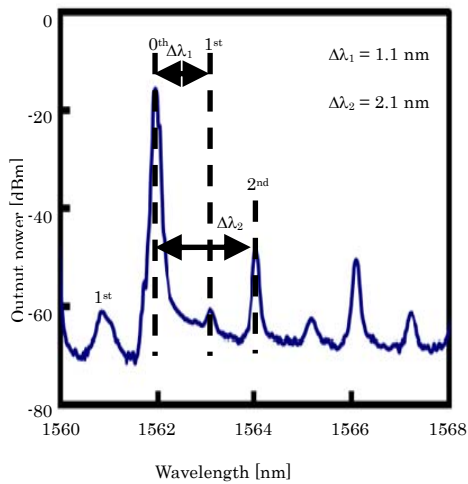


図 2. 発振スペクトル拡大図

#### 4-2. 高速変調動作と光子・光子共鳴

更なる成果として、本研究遂行中に光子・光子共鳴現象が得られることを初めて見出し実証した。縦モード干渉に基づけば、光子・光子共鳴現象は、主励起領域内の2つの縦モードが相互に干渉することにより生じ、このピークにより直接変調帯域幅を増加させることが可能となる。

図3には、光子・光子共鳴現象による光子間緩和振動ピークが得られていることを示す。まず、6GHz付近には通常の緩和振動が表れている。通常の半導体レーザーであれば、この周波数より大きくなるとレスポンスが徐々に低下し、高速変調動作は不可能となる。しかしこのレーザーでは、光子間緩和振動ピークが16GHz付近に現れていることが分る。これにより、通常の緩和振動よりも変調周波数を高くしてもレスポンスは極端に落ちることなく、3dB周波数帯域として17.2GHzが得られていることが世界で初めて確認された。

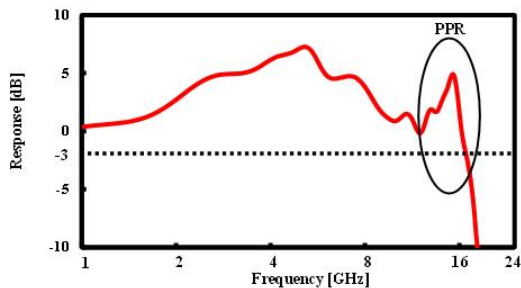


図 3. 小信号周波数応答特性

光子・光子共鳴現象は、本半導体レーザー構造では縦モード干渉に基づいているため、工学的に制御が可能で、今後構造検討を進めれば、100GHz以上の周波数帯域が得られる可能性が示唆される。本研究を更に

発展させれば、世界最高性能の高速半導体レーザーが実現できるものと期待される。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- (1) Yasuhiro Hinokuma, Yutaka Chaen, Haisong Jiang, Takuma Hagio, Seiki Nakamura, Akio Tajima, and Kiichi Hamamoto, "Single Wavelength Emission by Using Novel Asymmetric Configuration for Active Multi-mode Interferometer Laser Diodes", *IEICE Electronics Express (ELEX)*, Vol. 9, No. 18, pp. 1448-1453, Sep. 2012
- (2) Yasuhiro Hinokuma, Zhipeng Yuen, Teppei Fukuda, Takahira Mitomi, and Kiichi Hamamoto, "Single-Wavelength Emission by Using 1 x N Active Multi-Mode Interferometer Laser Diode," *IEICE Transactions on Electronics*, Vol.E96-C, No.11, pp.1413-1419, Nov. 2013
- (3) Mohammad Nasir Uddin, Takaaki Kizu, Yasuhiro Hinokuma, Kazuhiro Tanabe, Akio Tajima, Kazutoshi Kato, and Kiichi Hamamoto, "Split pump region in 1.55μm InGaAsP/InP asymmetric active multi-mode interferometer laser diode for improved modulation bandwidth," *IEICE Transactions on Electronics*, Vol. E97-C, No. 7, pp. 781-786, July 2014
- (4) Mohammad Nasir Uddin, Takaaki Kizu, Yasuhiro Hinokuma, Bingzhou Hong, Akio Tajima, Kazutoshi Kato, and Kiichi Hamamoto, "High intrinsic modulation bandwidth InGaAsP/InGaAsP 1.55μm asymmetric active multimode interferometer laser diode by using split pump configuration," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 53, 08MB09, July 2014
- (5) Kiichi Hamamoto and Haisong Jiang, "Active-MMI devices: concept, proof, and recent progress", *Journal of Physics D: Applied Physics*, accepted, 2015

[学会発表] (計 1 4 件)

【国際会議発表】

- (1) Yasuhiro Hinokuma, and Kiichi Hamamoto, "Single Wavelength Emission by Using Asymmetric Active MMI LD", *Technical Digest of The 9th International Symposium on Novel Carbon Resource Sciences (NCRS, Fukuoka, Japan)*, P-67, pp. 130, 3<sup>rd</sup> Nov. 2012

- (2) Yasuhiro Hinokuma, Takaaki Kizu, Mohammad Nasir Uddin, and Kiichi Hamamoto, “CW Single Wavelength Emission @RT on Active-MMI LD”, Proceedings of The 14<sup>th</sup> Cross Straights Symposium on Energy and Environmental Science and Technology, o2-1-2, pp. 35-36, 19<sup>th</sup> Feb. 2013
- (3) Takaaki Kizu, Yasuhiro Hinokuma, Mohammad Nasir Uddin, and Kiichi Hamamoto, “SMSR Improvement on Single Wavelength Active-MMI LD”, Proceedings of The 14<sup>th</sup> Cross Straights Symposium on Energy and Environmental Science and Technology, p2-1-1, pp. 163-164, 19<sup>th</sup> Feb. 2013
- (4) Mohammad Nasir Uddin, Takaaki Kizu, Yasuhiro Hinokuma, Akio Tajima, Kazutoshi Kato, and Kiichi Hamamoto, “Resonance frequency enhancement by using splitted pumping region active multi-mode interferometer laser diode,” Technical Digest of 18th OptoElectronics and Communications Conference / Photonics in Switching (OECC/PS 2013, Kyoto, Japan), TuPK-7, 2<sup>nd</sup> Jul. 2013
- (5) Mohammad Nasir Uddin, Takaaki Kizu, Yasuhiro Hinokuma, Kazuhiro Tanabe, Akio Tajima, Kazutoshi Kato, and Kiichi Hamamoto, “First deomstration of high intrinsic modulation bandwidth (26.4GHz) in active multimode interferometer laser diode by using split pumping configuration”, Technical Digest of The 18<sup>th</sup> Microoptics Conference (MOC 2013, Tokyo, Japan), H17, pp. 72, 29 Oct. 2013
- (6) Mohammad Nasir Uddin, Hon Bingzhou, Akio Tajima, Kazutoshi Kato and Kiichi Hamamoto, “First Observation of Photon-Photon Resonance in Active Multimode Interferometer Laser Diode,” Proceedings of European Conference on Integrated Optics / Micro Optics Conference (ECIO-MOC 2014, Nice, France), Th 4a R07, 26<sup>th</sup> June 2014
- 【国内学会発表】
- (1) 日隈康裕、茶田豊、姜海松、木津昂明、萩尾拓真、中村誠希、田島章雄、浜本貴一、”非対称アクティブ MMI による単一波長レーザー発振”、電子情報通信学会技術報告、Vol. 112, No. 98, LQE2012-16 , pp. 13-16, 2012.6.22 (機械振興会館、港区)
- (2) 浜本貴一、”高次モード光源用多モード光干渉(MMI)導波路”、電子情報通信学会第二種研究会資料、EXAT2013-3, pp. 12-20, 2013.8.22 (北海道大学、札幌市)
- (3) Mohammad Nasir Uddin, Takaaki Kizu, Yasuhiro Hinokuma, Akio Tajima, Kazutoshi Kato, and Kiichi Hamamoto, “Demonstration of Resonance Frequency Enhancement Effect by Using Split Pumping Region in Active Multi-mode nterferometer Laser Diode”, 電子情報通信学会技術報告, Vol. 113, No. 263, OPE2013-121, pp. 127-130、2013.10.25 (門司港・海峡ロマンホール、北九州市)
- (4) Mohammad Nasir Uddin, Hong Bingzhou, Takuya Kitano, Akio Tajima, Kazutoshi Kato, and Kiichi Hamamoto, “Photon-Photon Resonance in Active Multimode Interferometer Laser Diode,” 2014 年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集、C-4-6, 2014.9.23 (徳島大学、徳島市)
- (5) 浜本貴一、”マルチモードを利用した光集積回路”、電子情報通信学会第3回集積光デバイスと応用技術研究会予稿集、IPDA13-23, pp. 89-96、2014.1.31(鬼怒川温泉ホテル、日光市)
- (6) Mohammad Nasir UDDIN, Takaaki KIZU, Yasuhiro HINOKUMA, Hong BINGZHOU, Akio TAJIMA, Kazutoshi KATO, and Kiichi HAMAMOTO, “Demonstration of Split Pump Configuration in Active MMI-LD for The Realization of High Intrinsic Modulation Bandwidth”, 2014 年春季電子情報通信学会総合大会エレクトロニクス講演論文集 1、C-3-69、pp. 224、2014.3.21 (新潟大学、新潟市)
- (7) Mohammad Nasir Uddin, Hong Bingzhou, Takuya Kitano, Akio Tajima, Kazutoshi Kato, and Kiichi Hamamoto, “Photon-Photon Resonance in Active Multimode Interferometer Laser Diode”, 2014 年秋季電子情報通信学会ソサイエティ大会エレクトロニクス講演論文集 1、C-4-6、2014.9.23 (新潟大学、新潟市)
- (8) Mohammad Nasir UDDIN, Hong BINGZHOU, Takuya KITANO, Akio TAJIMA, Kazutoshi KATO and Kiichi HAMAMOTO, “Bandwidth Enhancement by Coupling to Higher Order Resonances in Active Multimode Interferometer Laser Diode,” 電子情報通信学会技術報告,

〔図書〕（計 0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1件）

名称：半導体レーザー  
発明者：浜本 貴一  
権利者：国立大学法人 九州大学  
種類：特許  
番号：特願 2011-055902  
出願年月日：2011年3月14日出願  
国内外の別：国内および国外

○取得状況（計 0件）

〔その他〕

【表彰】

- (1) 2013年IEEE福岡支部学生研究奨励賞  
（第13回）, 2014年2月21日受賞  
Mohammad Nasir Uddin, Takaaki  
Kizu, Yasuhiro Hinokuma, Akio  
Tajima, Kazutoshi Kato, and Kiichi  
Hamamoto, “Resonance frequency  
enhancement by using splitted  
pumping region active multi-mode  
interferometer laser diode,” Technical  
Digest of 18th OptoElectronics and  
Communications Conference /  
Photonics in Switching (OECC/PS  
2013, Kyoto, Japan), TuPK-7, 2nd Jul.  
2013

【その他の講演】

- (1) 浜本貴一、”マルチモード多重のための  
光デバイス—モード変換素子、及び光  
モードスイッチ—”、応用物理学会金沢  
支部講演会（金沢大学角間キャンパス、  
金沢市）、2013.10.21
- (2) Kiichi Hamamoto, “Recent progress  
on opto-electronic devices utilizing  
multi-mode”, 2013.11.11(Hanyang  
Univ., Kyongido, Korea)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

浜本 貴一 (HAMAMOTO, Kiichi)  
九州大学・大学院総合理工学研究院・教授  
研究者番号：70404027