

平成 21 年 4 月 20 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18360037

研究課題名（和文）電子ビームを用いた光・ミリ波増幅器の開発

研究課題名（英文）Development of Optical and Millimeter-wave Amplifier Utilizing Electron Beam

研究代表者

山田 実（YAMADA MINORU）

金沢大学・電子情報学系・教授

研究者番号：80110609

研究成果の概要：本研究は、真空中に電子銃と光あるいはミリ波が伝播できる誘電体導波路を配置し、導波路表面から真空中に染み出した光やミリ波の一部を、電子銃から出射した電子ビームで励振し、光あるいはミリ波の発生や増幅を行う装置の開発を目指しているものである。光については、波長  $1.5 \mu\text{m}$  付近で提案している原理での発光を観測し、発光のメカニズムを詳細に解析できた。ミリ波については、放射の兆候は見られたが明確な結果を得るには至らなかった。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	9,300,000	2,790,000	12,090,000
2007年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2008年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：量子エレクトロニクス

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、 応用光学・量子光工学

キーワード：電子ビーム、光増幅器、ミリ波増幅器、レーザ、チェレンコフレーザ、光放射、電磁波放射、量子電子工学

## 1. 研究開始当初の背景

レーザは光エレクトロニクスにおける主要な能動素子であり、光通信や光記録技術の発展を支えてきた。しかし、レーザは光の増幅方向が前進波と後退波で可逆であり、出射端側から光を入れても増幅してしまう。この可逆性の為、レーザを論理演算に使ったり、多機能に集積化することが原理的に困難である。また、レーザの動作波長は、材料のエネルギー準位で定まるので、新しい波長のレーザを作るためには、新しい材料の開発する必要がある。

これらの原理的問題を解決するため、当該研究者らは 1999 年に、真空中を走行する電子ビームと高屈折率の誘電体導波路による「一方向性光増幅器」を理論的に提案し、その後、実証実験を試みてきた。本研究を開始する前の段階で、光増幅と見られる現象を観測していたが、再現性が悪く、実験装置や実験方法の改良が必要であった。また、同じ原理でのミリ波増幅器の実験も行ってきたが、増幅作用のデータを得るには至らず、実験装置や方法の工夫が必要であった。

## 2. 研究の目的

電子ビームと誘電体導波路を用いた構成による、光増幅器やミリ波増幅器を開発することである。

## 3. 研究の方法

提案している光増幅器の基本構成を図1に示す。真空チャンバー中に電子銃と誘電体導波路を配置する。導波路中を伝播する光（電磁波）は導波路の屈折率が高いため伝播速度が遅くなる。また、光（電磁波）の一部は真空中に染み出している。この導波路表面に沿って電子銃で放射された電子ビームを走行させる。電子ビームと光（電磁波）の速度が一致した時、電子ビームの運動エネルギーにより光（電磁波）が放射されたり、増幅される。

この動作原理は、マイクロ波からX線までの全電磁波領域に適用でき、誘電体導波路の厚さなどの設計により、増幅される周波数が定まる。本研究では、屈折率が3.5付近のSiやGaAsの半導体を導波路として用い、30~40KVに加速した電子ビームで光とミリ波の放射や増幅の実験を行った。

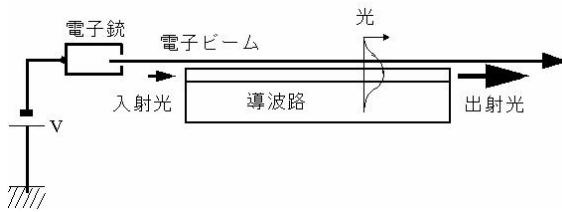


図1 電子ビームと誘電体導波路を用いた光（電磁波）増幅器の基本構成

## 4. 研究成果

### (1)光増幅の試み

誘電体導波路としては、集積回路用のSOI (Silicon On Insulator) 基板を流用し、最上部のSi層（層厚  $0.32\ \mu\text{m}$ ）をコア層とした。この導波路に真空チャンバー外部から光ファイバで波長  $1.5\ \mu\text{m}$  のレーザ光を導入して導波路に入射させた。

本研究開始時に問題となっていたのは、a) 電子ビームに対する導波路の位置と角度の微調整が出来なかった。b) 光ファイバを接続する時の接着剤などによる炭素が導波路表面に吸着され、導波路が直ぐに汚染されてしまう。c) 導波路幅を狭くして横幅方向の伝播モード数を減らす必要がある。などであった。a)については、本研究費で真空対応微動ステージを購入し、c)については、高周波スパッタ装置に  $\text{CF}_4$  ガスを導入して、幅  $1\ \mu\text{m}$  の導波路が作製できるようになった。しかし、c)の課題が解決できず、平成19年度から実験方法を次項に変更した。

### (2)光放射の実測と動作理論の改良

光ファイバ接続による誘電体導波路への入射を止め、電子ビームによる光放射の可否を測定した。平成19年7月に光放射を観測できた。この放射はチェレンコフ放射の1種であるが、光領域では世界最初である。

導波路内での光分布と伝播速度の違いから、放射光スペクトルは図2のように加速電圧によって変化し、その変化は図3のように

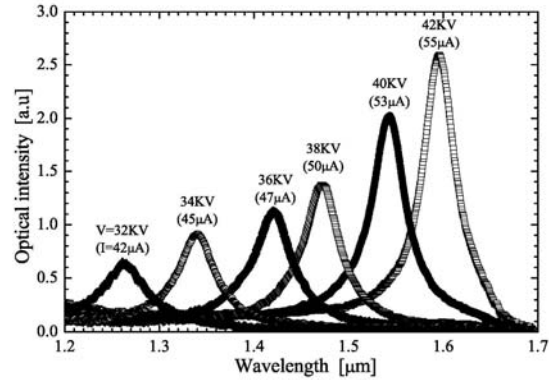


図2 光放射スペクトル

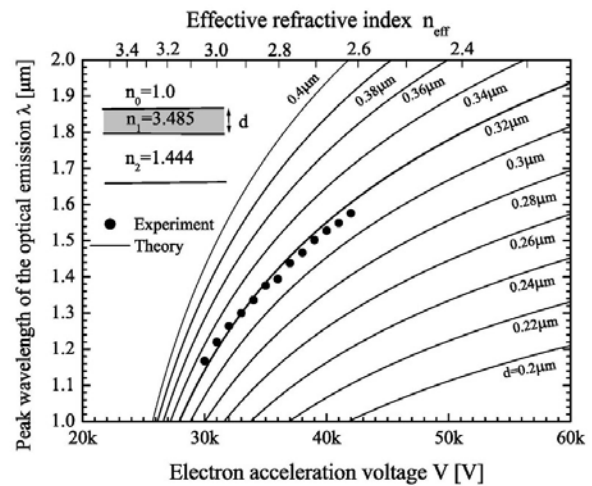


図3 電子加速電圧と放射光波長の関係

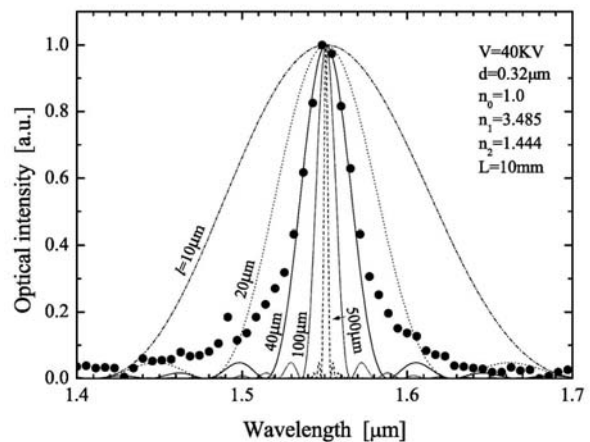


図4 放射光スペクトルからの電子波コヒーレンス長の推測

理論計算とよく一致した。また、放射スペクトルの広がり幅から、理論で仮定していた電子波動のコヒーレンス長が約  $40\mu\text{m}$  であることが判った。一方、電子ビームの電流値から電子密度を算出した結果、電子と電子の間隔は約  $40\mu\text{m}$  であり、真空中ではコヒーレンス長と電子間距離が一致していることが判った。

この電子波動のコヒーレンス長に対し、光の波長は充分短い、ミリ波の波長ははるかに長い。

走行する電子ビームと電磁波との相互作用は、チェレンコフ放射や進行波管などの動作理論として研究されているが、それらは電子を空間的な点電荷として扱って古典論である。一方、当該研究者らは電子を波動として扱った量子論に基づき動作理論を展開してきている。今回での研究の結果、ミリ波領域には古典論が適用できるが、光領域では古典論ではなく、量子論を適用しなければならないことが明確になった。つまり、走行する電子ビームと電磁波との相互作用は、光とミリ波とは違った理論となるべきであることが判った。現在、両者を統合する理論構築を進めている。

### (3) ミリ波増幅の試み

ミリ波の場合は波長が数 mm なので、厚さ 1.5mm の GaAs バルク半導体を導波路とし、入射側に OSM コネクターを付けて真空チャンバー外部から同軸ケーブルで 40GHz 程度のマイクロ波を入射させ、その増幅作用の測定を試みた。しかし、電子ビームが導波路に接触すると屈折率が変化し、ミリ波の定在波の状況が変化するので、直接に増幅作用を測定することが困難であった。そこで、平成 19 年度の後半からは、次項のようなミリ波放射の測定を試みた。

### (4) ミリ波放射の観測

ミリ波の場合も、電磁波入射を止め、電子ビームによる電磁波発生の観測を試みた。ミリ波放射での最大の課題は、導波路に沿って走行する電子ビームが、導波路に吸引され数 cm しか走行できないことであった。導波路の上にスリットも設けることにより、10cm 程度は走行させる方法を開発した。しかし、放射電磁波は雑音に埋もれており、明確なデータを得ることができなかった。現在は、導波路の幅を電子ビーム幅に一致させる構造を開発中である。

なお、米国のある研究機関で、我々と類似の方法により THz 帯での電磁波放射が観測された。その実験に用いられた電子ビームの電流値は、我々の設備のものより 2 桁大きい。我々も、電子ビームの電流を大きくできれば、ミリ波発生を実証できるであろう。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① Y. Kuwamura, M. Yamada, R. Okamoto, T. Kanai, and H. Fares, "Optical emission from a high-refractive-index waveguide excited by a traveling electron beam", J. Appl. Phys., Vol.104, No.103105, pp.1-10, 2008, 査読有  
<http://dspace.lib.kanazawa-u.ac.jp/dspace/handle/2297/12581>
- ② M. Ahmed and M. Yamada, "Effect of intensity noise of semiconductor lasers on the digital modulation characteristics and the bit error rate of optical communication systems", J. Appl. Phys., Vol.104, No.013104, pp.1-7, 2008, 査読有  
<http://dspace.lib.kanazawa-u.ac.jp/dspace/handle/2297/11555>
- ③ M. Ahmed and M. Yamada, "Noise Associated with Microwave Intensity Modulation of Semiconductor Lasers", PIREs Online, Vol.4, No.1, pp.106-110 2008, 査読有
- ④ M. Ahmed and M. Yamada, "Influence of External-cavity Length on the Route-to-chaos of Semiconductor Lasers under Optical Feedback", PIREs Online, Vol.4, No.1, pp.46-50, 2008, 査読有
- ⑤ M. Ahmed, M. Yamada and S. W. Z. Mahmoud, "Analysis of semiconductor laser dynamics under gigabit rate modulation", J. Appl. Phys., Vol.101, No. 033119, pp.1-9, 2007, 査読有  
<http://dspace.lib.kanazawa-u.ac.jp/dspace/handle/2297/3727>
- ⑥ M. Ahmed, S. W. Z. Mahmoud and M. Yamada, "Numerical Analysis of Optical Feedback Phenomenon and Intensity Noise of Fiber-Grating Semiconductor Lasers", International J. of Numerical Modeling, Vol.20, pp.113-132, 2007, 査読有  
<http://dspace.lib.kanazawa-u.ac.jp/dspace/handle/2297/6596>
- ⑦ M. Yamada, K. Saeki, E. Teraoka and Y. Kuwamura, "Reduction of the intensity noise by electric positive and negative feedback in blue-violet InGaN semiconductor lasers," IEICE Trans. Electron. Vol. E89-C, No.6, pp. 858-860, 2006, 査読有.

<http://dspace.lib.kanazawa-u.ac.jp/dspace/handle/2297/6987>

- ⑧ K. Matsuoka, K. Saeki, E. Teraoka, M. Yamada and Y. Kuwamura, “Characteristics of intensity noise in blue-violet InGaN Semiconductor lasers”, Proceedings of SPIE, Vol.6133, No. 61330P, pp.1-9, 2006 査読有
- [学会発表] (計 12 件)
- ① Hesham Fares・金井 猛志・松本 一平・桑村 有司・山田 実, 「Characterizations of Optical Emission from Dielectric Waveguide Utilizing Traveling Electron Beam」電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会、2009年5月22日(発表予定) 金沢
- ② 松岡顕二郎・永山大地・浜 卓也・桑村 有司・山田 実 「高周波重畳法および電氣的負帰還法の併用による半導体レーザーの雑音低減化」電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会、2009年5月22日(発表予定) 金沢
- ③ H. Fares, M. Yamada, Y. Kuwamura and M. Asada, “Two Models for Electro-Magnetic Wave Amplifier by Utilizing Traveling Electron Beam”, the 8th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, 2 Sept. 2008, Nottingham  
<http://dspace.lib.kanazawa-u.ac.jp/dspace/handle/2297/14389>
- ④ M. Yamada and Y. Kuwamura, “Optical Emitter and Amplifier by Utilizing Traveling Electron Beam”, 2008 International Nano-Optoelectronics Workshop, 9, Aug. 2008, 西湖  
<http://dspace.lib.kanazawa-u.ac.jp/dspace/handle/2297/12548>
- ⑤ H. Fares, M. Yamada, Y. Kuwamura and M. Asada, “Two Models for Electro-Magnetic Wave Amplifier by Utilizing Traveling Electron Beam”, 2008 International Nano-Optoelectronics Workshop, 9 Aug. 2008, 西湖
- ⑥ H. Fares, M. Yamada, Y. Kuwamura and M. Asada, “Two Models for Electro-Magnetic Wave Amplifier by Utilizing Traveling Electron Beam”, 電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会、2008年5月、福井
- ⑦ 金井猛志、岡本龍一、ヒシャム ファリス、桑村有司、山田実 「進行する電子による導波路からの光放射」、電子情報通信

学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会、2008年5月、福井

- ⑧ Y. Kuwamura, M. Yamada, R. Okamoto, T. Kanai, and H. Fares, “Observation of optical emission from high refractive index waveguide excited by traveling electron beam”, CLEO/QELS 2008, 5 May 2008, San Jose  
<http://dspace.lib.kanazawa-u.ac.jp/dspace/handle/2297/11860>
- ⑨ M. Ahmed and M. Yamada, “Noise Associated with Microwave Intensity Modulation of Semiconductor Lasers”, PIERS 2008 in Hangzhou, 28 March 2008, Hangzhou
- ⑩ M. Ahmed and M. Yamada, “Influence of External-cavity Length on the Route-to-chaos of Semiconductor Lasers under Optical Feedback”, PIERS 2008 in Hangzhou, 25 March 2008, Hangzhou
- ⑪ マルヤム フダ、寺岡栄治、山田実、桑村有司 「半導体レーザーにおける電氣的正負帰還による雑音低減化の広帯域化」電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会、2007年5月、金沢
- ⑫ 寺岡栄治、佐伯和司、山田実、桑村有司 「InGaN系青紫色半導体レーザーにおける電氣的正負帰還による雑音低減化」電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会、2006年5月、福井

[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

- ① 「光変調器および光復調器」、発明者：山田実、権利者：金沢大学学長、特許、出願番号：特願 2008-21644、出願日：平成 20 年 8 月 26 日、国内
- ② 「Semiconductor Laser Drive System and Semiconductor laser Driving Method」発明者：山田実、権利者：金沢大学学長、特許、出願番号：11/991000、出願日：2006.08.31、米国
- ③ 「半導体レーザーの駆動システムおよび半導体レーザーの駆動方法」、発明者：山田実、権利者：金沢大学学長、特許、出願番号：特願 2006-63168、出願日：平成 18 年 3 月 8 日、国内

[その他]

- ① 新聞記事掲載、「光通信 大容量化へ」北國新聞 2009年1月9日朝刊

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 実 (YAMADA MINORU)

金沢大学・電子情報学系・教授  
研究者番号：80110609

(2) 研究分担者（平成 18, 19 年度）  
桑村 有司（KUWAMURA YUJI）  
金沢大学・電子情報学系・講師  
研究者番号：10195612

飯山 宏一（IIYAMA KOICHI）  
金沢大学・電子情報学系・准教授  
研究者番号：90202837

(3) 連携研究者（平成 20 年度）  
桑村 有司（KUWAMURA YUJI）  
金沢大学・電子情報学系・講師  
研究者番号：10195612

飯山 宏一（IIYAMA KOICHI）  
金沢大学・電子情報学系・准教授  
研究者番号：90202837