

機関番号：17401

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360144

研究課題名（和文） 超高速集積回路用電流注入型赤外発光素子の試作と原理実証

研究課題名（英文） Fabrication of injection-type infrared light emitting devices for high-speed integrated circuits and investigation of the light emission mechanism

研究代表者

中村 有水（NAKAMURA YUSUI）

熊本大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：00381004

研究成果の概要（和文）：

超高速集積回路の実現に向けてシリコン基板上における光伝送技術を開発するため、未開発である発光素子に関して新たな素子構造を提案・試作した。それは希土類添加のシリコン酸化膜発光層をP型・N型ワイドギャップ半導体の電流注入層で挟んだ構造である。希土類添加の酸化物に対する電流注入は、技術的にも学術的にも未開拓な分野であるが、本新規構造を用いた発光素子を試作し、室温で電流注入による $1.5\mu\text{m}$ 帯の赤外発光を観測することに成功し、さらに発光が10V程度の低電圧から得られることを実証した。

研究成果の概要（英文）：

It is important to establish optical interconnection technology for high-speed integrated circuits. We have proposed and developed a new light emitting device, which is composed of an Er-doped oxide layer sandwiched by wide bandgap semiconductors. Using the devices, we have successfully observed infrared electroluminescence at wavelength of  $1.5\mu\text{m}$  from low operation voltage of 10V at room temperature.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
2009年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2010年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：電気・電子材料、シリコンフォトリソグラフィ、赤外発光素子

## 1. 研究開始当初の背景

近年、集積回路は高速化が進み、動作周波数は4GHzに達しようとしている。さらなる超高速化のため、現在足かせとなっている電気配線を用いた信号伝送の諸問題を解決する必要がある。電気配線における問題点としては、クロストーク、表皮効果による抵抗値の増大、またそれによる伝送遅延などが挙げ

られる。そこで注目されているのが、集積回路内における光伝送技術であり、シリコンフォトリソグラフィという新分野である。これは、シリコン基板上に発光素子、変調素子、導波路、受光素子などを配置して光による信号伝送を目指すものであるが、発光素子に関しては未熟な状況である。その理由は、シリコンが間接遷移型の材料であり、発光強度が極めて

弱いことに起因する。そこで、シリコン基板上にⅢ-V族半導体を基板貼付する方法なども試みられているが、歩留まりやコスト面で難点がある。最も有望なのは、シリコン基板上に形成可能な薄膜材料による発光素子の作製であり、希土類のエルビウム(Er)を添加した材料が有望視されている。Erは、光通信の増幅用デバイス(Er添加光ファイバ増幅器、EDFA)として既に実用レベルで使用されている希土類であり、光励起で波長 $1.5\mu\text{m}$ の赤外光を放出する。この波長は、シリコンフォトニクスで用いられるシリコン導波路にも最適の波長であるため、現在、Erを添加したシリコン酸化膜が活発に研究されているが、実用に耐える電流注入型の発光素子は未開発である。

Erを添加したシリコン酸化膜( $\text{SiO}_x$ )を用いた電流注入型発光素子としては、イタリアのグループが報告しているが、まだ実用には至っていない[1]。彼らの素子は、P型及びN型SiでEr添加 $\text{SiO}_2$ を挟んだ構造であり、狭いバンドギャップの電流注入層(Si)から広いバンドギャップの発光層( $\text{SiO}_2$ )に、トンネル効果でキャリアを注入するため、高い動作電圧(数十ボルト)が必要となり、また $\text{SiO}_2$ 中の電荷蓄積による絶縁破壊のため素子寿命が短い。そこで、我々は $1.5\mu\text{m}$ 帯発光素子の実現に向けて、これまでEr添加 $\text{SiO}_x$ ( $X\sim 1.3$ )について研究してきた[2~5]。この材料は、直接遷移型材料であるGaSb量子井戸と比較して一桁低いだけの高い発光強度を示しており、発光材料として有望である。また、この材料は上述のEr添加 $\text{SiO}_2$ (バンドギャップ： $8\sim 9\text{eV}$ )とは異なり、光学的バンドギャップが約 $2\text{eV}$ と小さく、電流注入に適している可能性が高い。そこで本研究では、これらの研究成果をベースとして、新型の電流注入型発光素子を提案・試作する。

#### [参考文献]

- [1] M. E. Castagna et al., Materials Science and Engineering B, Vol. 105, pp. 83-90, 2003.
- [2] 吉田 武史, 他, 第7回 IEEE 広島支部学生シンポジウム論文集, pp. 56~57 (2005). (最優秀研究賞を受賞)
- [3] D. Miyawaki, et al., Proceedings of International Symposium on Contemporary Photonics Technology 2007, G-26, pp. 115-116, Tokyo, Japan.
- [4] Y. Naka, et al., Proceedings of IEEE 4<sup>th</sup> International Conference on Group IV Photonics 2007, WP16, Tokyo, Japan.
- [5] 中村有水, 中良弘, 宮脇大介, 吉田武史, 特願 2006-131186, 平成 18 年 5 月 10 日出願.

## 2. 研究の目的

本申請で提案する電流注入型発光素子は、「P型及びN型のワイドギャップ半導体でEr添加 $\text{SiO}_x$ を挟んだ構造」であり、既に特許出願済みである[5]。この新型素子構造では、広いバンドギャップ( $3\sim 4\text{eV}$ )を有するキャリア注入層から、狭い光学的バンドギャップ(約 $2\text{eV}$ )のEr添加 $\text{SiO}_x$ 発光層へキャリアが注入されるため、低電圧動作および素子の長寿命化が期待できる。

## 3. 研究の方法

電流注入型赤外発光素子を実現するため、本研究の目標としているN型およびP型ワイドギャップ材料でEr添加 $\text{SiO}_x$ を挟んだ構造を形成するが、本研究では、主に図1に示すN型二酸化スズ( $\text{SnO}_2$ )/Er添加 $\text{SiO}_x$ /P型窒化ガリウム(GaN)の3層構造を有する素子の作製を行い、電流注入による赤外発光を確認する。ここで、P型GaNを用いたのは、既に十分なキャリア密度を有するエピ基板が準備可能なためである。また、これと並行して、他の酸化物のP型化に関しても、研究を行う。

発光素子の作製方法は、以下の通りである。まず、サファイア基板上に形成されたP型GaN層(膜厚： $5\mu\text{m}$ 、正孔濃度： $10^{17}\text{cm}^{-3}$ 程度)を準備した。第二層として、エルビウム(Er)と一酸化珪素( $\text{SiO}$ )をるつぼ加熱により同時に真空蒸着しEr添加 $\text{SiO}_x$ 層を形成した。なお、基板温度は室温で、Er濃度は1%(体積%)であり、膜厚は10, 30, 100, 300nmの4種類である。また、第一層であるGaN層に電極を形成するため、第二層のEr添加 $\text{SiO}_x$ 層は基板上に選択的に形成している。第三層のN型 $\text{SnO}_2$ 層も $\text{SnO}_2$ 材料のるつぼ加熱により真空蒸着で形成した。この際、蒸着中の基板温度は $400^\circ\text{C}$ であり、膜厚は200nmである。また、N型 $\text{SnO}_2$ 層は直径2mmで、円状に選択的に形成された。その後、Erの光学的活性化と $\text{SnO}_2$ 層の結晶化のため、酸素中で $550^\circ\text{C}$ 、1時間のアニール(熱処理)を行った。最後に、P型GaN層とN型 $\text{SnO}_2$ 層にオーミック電極を形成した。P型GaN層に対しては30nmのニッケル(Ni)と80nmの金(Au)を真空蒸着し、N型 $\text{SnO}_2$ 層に対してはインジウム(In)を半田状にして付けた。

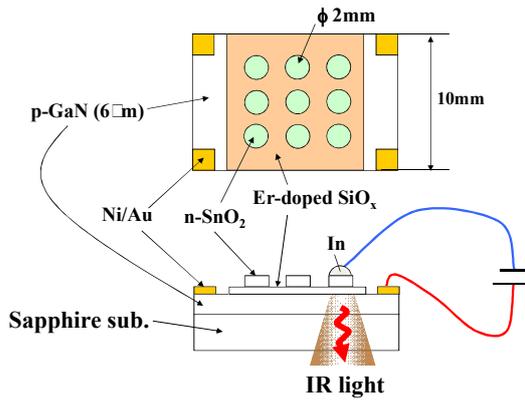


図1 赤外発光素子の構造図

#### 4. 研究成果

##### 【主な実験結果】

以下に、主要な実験結果を示す。

上記の方法で作製した発光素子に、電源・測定器などに接続し、試料からの発光を分光器を通して光検出器で室温において測定した。なお、試料に流した典型的な電流密度は、 $0.3 \text{ Acm}^{-2}$ である。図2に測定したスペクトルの結果を示す。波長約  $1.53 \mu\text{m}$  に発光ピークが見られ、光励起発光の実験における発光ピーク波長と同等のため、これは  $\text{Er}^{3+}$  イオンからの発光である。図3 (a) に電流-電圧特性を、図3 (b) に発光強度-電圧特性を示す。図3 (b) より、発光の閾値が 10V 程度の低電圧であることが示された。

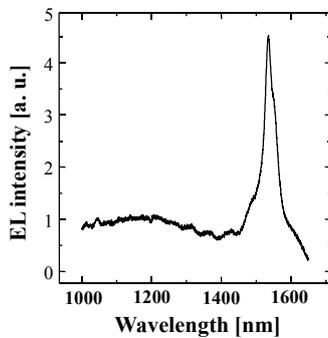


図2 発光素子の赤外発光スペクトル

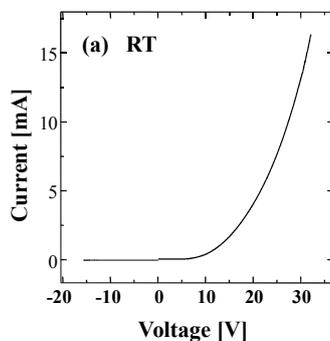


図3 (a) 発光素子の電流-電圧特性

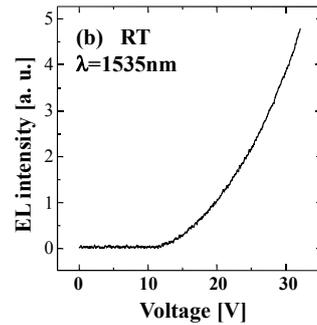


図3 (b) 発光素子の発光強度-電圧特性

##### 【研究成果】

3年間の研究の結果、以下の成果が得られた。

(1) N型およびP型の広いバンドギャップ材料として、それぞれ酸化スズ ( $\text{SnO}_2$ ) と窒化ガリウム ( $\text{GaN}$ ) を用い、N型  $\text{SnO}_2/\text{Er}$  添加  $\text{SiO}_x/\text{P}$  型  $\text{GaN}$  の3層構造を有する発光素子を形成し、電気特性を調べたところ、整流特性が得られた (図3 (a))。

(2) 本発光素子を用いて、発光特性を室温で測定したところ、電流注入により  $1.5 \mu\text{m}$  帯の赤外発光を観測することに成功し、さらに発光の閾値が 10V 程度の低電圧であることが示された。

(3) 本発光素子の発光メカニズムを調べたところ、発光層 ( $\text{Er}$  添加  $\text{SiO}_x$ ) の厚さが 10~30nm の場合は、電流注入による衝突励起に基づいた発光が支配的であることが判明した。一方、厚さが 100~300nm の場合は、P型  $\text{GaN}$  に到達した電子が正孔と再結合し紫外光を発生し、この紫外光が  $\text{Er}$  添加  $\text{SiO}_x$  層の  $\text{SiO}_x$  を光励起し  $\text{Er}$  を発光させたと思われる。

(4) 本発光素子の電流注入発光の長時間動作試験により、10時間動作させたところ、発光強度は開始時の 80% に低下した。この結果から、発光寿命はこれまでの報告より長くなったが、本研究の発光層母材である  $\text{SiO}_x$  層は、電流を流すことにより僅かに劣化すると思われる。

(5) 上記の素子劣化の結果から、 $\text{SiO}_x$  層は絶縁体ではないが、長時間の電流注入には不向きであることが分かったため、劣化の無い新しい材料として  $\text{Er}$  添加  $\text{SnO}_2$  を開発し、光励起により  $1.5 \mu\text{m}$  帯の赤外発光を観測することに成功した。母材である  $\text{SnO}_2$  は透明導電膜にも使用されているため、電流注入による素子劣化は無いものと期待される。

(6) 酸化亜鉛や酸化スズ等の酸化物に関してP型化を試み、ゼーベック効果によりP型化を確認した。

### 【研究成果のまとめ】

N型およびP型ワイドギャップ材料でEr添加SiO<sub>x</sub>発光層を挟んだ新しい素子構造を形成し、電流注入による実験から室温で1.5μm帯の赤外発光を観測することに成功した。また、この発光素子は10V程度の低電圧閾値を有することが判明し、本素子構造の有用性が示された。

### 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2件)

- ① 中良弘, 曾根田真也, 中野誠一, 疋田創, 住吉猛, 土屋昌弘, 中村有水, "エルビウム添加シリコン酸化膜を用いた電流注入型赤外発光素子の低電圧化", 電子情報通信学会論文誌C, Vol. J93-C, No. 8, pp. 264-265, 2010, 査読有り.
- ② Y. Naka, N. Yamamoto, M. Kishi, D. Miyawaki, T. Yoshida, T. Minami, K. Ito, M. Tsuchiya, and Y. Nakamura, "Optical Characterization and X-ray Photoelectron Spectroscopy of Erbium-Doped Silicon Suboxide Infrared Emitting at 1.5 μm", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 47, No. 12, pp. 8871-8873, 2008, 査読有り.

#### 〔学会発表〕(計19件)

- ① 新田 貴史, 高山 和也, 森中 将嵩, 須惠 耕二, 中良弘, 中村有水, "真空蒸着及びミストCVDを用いて形成した酸化スズ薄膜のp型化に関する検討", 平成22年度応用物理学会九州支部学術講演会, 27Fp-4, 2010. 11. 27, 九州大学伊都キャンパス.
- ② 住吉猛, 疋田創, 木須光一郎, 中良弘, 中村有水, "赤外発光を有するEr添加SnO<sub>2</sub>薄膜のアニール条件最適化", 平成22年度応用物理学会九州支部学術講演会, 27Fp-5, 2010. 11. 27, 九州大学伊都キャンパス.
- ③ 小野 隆博, 後藤 雅典, 杉野 雅俊, 牧 雅俊, 須惠 耕二, 中良弘, 中村有水, "ミストCVD法による酸化亜鉛薄膜のP型化に関する検討", 平成22年度応用物理学会九州支部学術講演会, 27Fp-6, 2010. 11. 27, 九州大学伊都キャンパス.
- ④ 田中 俊洋, 中良弘, 中村有水, "テルビウム添加酸化スズ薄膜の緑色発光特性", 2010年秋季第71回応用物理学会学術講演会, 15p-ZJ-8, 2010. 9. 15, 長崎大学文教キャンパス.
- ⑤ M. Maki, M. Sugino, M. Goto, T. Ono, K. Sue, Y. Naka, Y. Nakamura, "Growth condition

dependence on thickness distribution of ZnO thin film formed by mist-CVD", The Proceedings of The 6th International Workshop on Zinc Oxide and Related Materials, G24, p268-269, 2010. 8. 6, Bayi Hotel, Changchun, China.

- ⑥ K. Kisu, T. Hikida, T. Sumiyoshi, Y. Naka, M. Tsuchiya, and Y. Nakamura, "1.5 μm Photoluminescence Properties of Er-doped SnO<sub>2</sub>", The Proceedings of The 37th International Symposium on Compound Semiconductors, TuP36, 2010. 6. 1, Takamatsu Symbol Tower, Kagawa, Japan.
- ⑦ R. A. Inyangat, K. Kisu, T. Tanaka, Y. Naka, Y. Nakamura, "Optical Properties of Europium-doped Tin dioxide", The 4th International Student Conference on Advanced Science and Technology, 2010. 5. 25, Ege University, Izmir, Turkey.
- ⑧ 中良弘, 山本 直克, 伊藤 功三郎, 高武 明真, 土屋昌弘, 中村有水, "エルビウム添加シリコン酸化膜を用いた光導波路の特性評価", 2010年春季第57回応用物理学関係連合講演会, 17p-P3-6, 2010. 3. 17, 東海大学湘南キャンパス.
- ⑨ 中良弘, 曾根田真也, 中野誠一, 疋田創, 住吉猛, 土屋昌弘, 中村有水, "電流注入によるEr添加Si酸化膜からの1.5μm赤外発光", 電子情報通信学会技術研究報告, OPE2009-168, pp. 41-45, 2009. 12. 18, 機械振興会館(東京都).
- ⑩ 後藤 雅典, 小野 隆博, 須惠 耕二, 中良弘, 中村有水, "ミストCVD法による無添加酸化亜鉛薄膜の形成と光学的評価", 平成21年度応用物理学会九州支部学術講演会, 22Aa-8, 2009. 11. 22, 熊本大学.
- ⑪ 住吉猛, 疋田創, 中野誠一, 曾根田真也, 高武 明真, 中良弘, 山本 直克, 土屋昌弘, 中村有水, "Er添加SiO<sub>x</sub>薄膜の赤外発光における内部量子効率測定と作製条件の最適化", 平成21年度応用物理学会九州支部学術講演会, 21Ca-1, 2009. 11. 21, 熊本大学.
- ⑫ 中野誠一, 曾根田真也, 高武 明真, 中良弘, 土屋昌弘, 中村有水, "Er添加Si酸化膜への電流注入による赤外発光", 平成21年度応用物理学会九州支部学術講演会, 21Ca-2, 2009. 11. 21, 熊本大学.
- ⑬ K. Kisu, K. Koyama, S. Soneda, A. Kotake, Y. Naka, M. Tsuchiya, Y. Nakamura, "Infrared photo-luminescence properties of Er-doped SnO<sub>2</sub>", The

Proceedings of The Workshop of Impurity Based Electroluminescent Devices and Materials (IBEDM-2009), Abstr#50, 2009.10.3, The Hotel Golden Bahia de Tossa & Spa, Tossa de Mar, Spain.

- ⑭ Y. Nakamura, S. Soneda, S. Nakano, T. Hikida, T. Sumiyoshi, K. Kisu, Y. Naka, M. Tsuchiya, "Infrared electro-luminescence at 1.5  $\mu$  m from Er-doped SiO<sub>x</sub>" (**Invited talk**), The Proceedings of The Workshop of Impurity Based Electroluminescent Devices and Materials (IBEDM-2009), Abstr#25, 2009.10.2, The Hotel Golden Bahia de Tossa & Spa, Tossa de Mar, Spain.
- ⑮ 疋田 創, 住吉 猛, 中野 誠一, 曾根田 真也, 高武 明真, 中 良弘, 山本 直克, 土屋 昌弘, 中村 有水, "Er 添加 SiO<sub>x</sub> 薄膜の 1.5  $\mu$  m 発光における内部量子効率測定", 2009 年秋季第 70 回応用物理学会学術講演会, 30a-TC-4, 2009.9.10, 富山大学.
- ⑯ 木須 光一郎, 高山 和也, 曾根田 真也, 高武 明真, 中 良弘, 土屋 昌弘, 中村 有水, "Er 添加 SnO<sub>2</sub> 薄膜の赤外発光特性", 2009 年秋季第 70 回応用物理学会学術講演会, 30a-TC-5, 2009.9.10, 富山大学.
- ⑰ 中野 誠一, 曾根田 真也, 美並 聖, 高武 明真, 中 良弘, 山本 直克, 土屋 昌弘, 中村 有水, "Er 添加 Si 酸化膜を用いた電流注入による 1.5  $\mu$  m 赤外発光", 2009 年春季第 56 回応用物理学関係連合講演会, 30a-P4-27, 2009.3.30, 筑波大学筑波キャンパス.
- ⑱ K. Kisu, S. Soneda, A. Kotake, Y. Naka, N. Yamamoto, M. Tsuchiya, and Y. Nakamura, "1.5  $\mu$  m Photoluminescence from Conductive Er-doped SnO<sub>x</sub>", Extended Abstracts of the 2008 International Conference on Solid State Devices and Materials, P-8-4, pp. 558-559, 2008.9.25, Tsukuba International Congress Center, Ibaraki, Japan.
- ⑲ S. Soneda, T. Minami, K. Ito, A. Kotake, S. Nakano, Y. Naka, N. Yamamoto, M. Tsuchiya, and Y. Nakamura, "1.5  $\mu$  m Light Emission from Er-doped SiO<sub>x</sub> with Widegap Carrier Injection Layers", Proceedings of 5th International Conference on Group IV Photonics, WP26, 2008.9.17, Hilton Sorrento Palace, Sorrento, Italy.

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

①名称: 発光素子およびその製造方法、ならびに発光パネルおよび発光装置  
発明者: 中村 有水, 中 良弘, 田中 俊洋  
権利者: 熊本大学  
種類: 特許  
番号: 特願 2009-42539  
出願年月日: 平成 21 年 2 月 25 日出願  
国内外の別: 国内

②名称: 発光素子およびその製造方法  
発明者: 中村 有水, 中 良弘, 木須 光一郎  
権利者: 中村有水  
種類: 特許  
番号: 特願 2008-264614  
出願年月日: 平成 20 年 9 月 11 日出願  
国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村 有水 (NAKAMURA YUSUI)  
熊本大学・大学院自然科学研究科・教授  
研究者番号: 00381004

### (2) 研究分担者

土屋 昌弘 (TSUCHIYA MASAHIRO)  
独立行政法人情報通信研究機構・上席研究員  
研究者番号: 50183869

中 良弘 (NAKA YOSHIHIRO)  
熊本大学・大学院自然科学研究科・助教  
研究者番号: 30305007

山本 直克 (YAMAMOTO NAOKATSU)  
(H20 のみ)  
独立行政法人情報通信研究機構・第一研究部門新世代ネットワーク研究センター・研究員  
研究者番号: 60328523

### (3) 連携研究者

なし