

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号： 32660
 研究種目： 基盤研究 (C)
 研究期間： 2009~2011
 課題番号： 21560365
 研究課題名（和文） 超高速光・電子融合デバイス

研究課題名（英文） Ultra-high speed opto-electronic devices

研究代表者

高梨 良文 (Takanashi Yoshifumi)
 東京理科大学・基礎工学研究科・教授
 研究者番号：30318224

研究成果の概要（和文）： InAs に近い組成の InGaAs をチャンネルとする歪 HEMT を試作した。ネットワークアナライザで高周波特性を評価したところ、ゲート長が 0.1 μm のトランジスタで電流遮断周波数として 200GHz を超える特性を得た。また、InGaAs をチャンネルとする歪 MSM-PD を試作した。L&S が 0.2/0.6 μm の MSM-PD について、フェムト秒レーザを用いて光応答を評価したところ、20 psec 以下の高速応答を得た。以上の優れた特性は、チャンネルに電子速度が大きい InAs を用いたことにより説明できる。また、チャンネル厚が 10 nm と薄層にも拘わらず、1 を超える Responsivity（光感度）を得た。歪 HEMT と同一基板上に歪 MSM-PD を作製すれば超高速の OEIC を実現することが可能であり、高速・広帯域光通信システムへの応用が期待される。

研究成果の概要（英文）： We have fabricated HEMT's with a strained InGaAs, whose mole fraction is close to that of InAs, as the channel have been fabricated and characterized high-frequency performances using a network analyser. HEMT's with the gate length of 0.1 μm exhibited a current cut-off frequency (f_T) ranging over 200 GHz. We have also fabricated MSM-PD's with a strained InGaAs channel and characterized the optical response using a fiber laser with a bandwidth of 400 femtoseconds. MSM-PD's with a L&S of 0.2/0.6 μm exhibited a pulse width less than 20 psec. This is because the strained InGaAs has a relatively high drift velocity of electrons. In addition, these MSM-PD's exhibited a responsivity more than one regardless of the channel width as thin as 10 nm. In this way, ultra-high speed OEIC's can be realized by simultaneously fabricating MSM-PD's and HEMT's on the same epitaxial wafer. Therefore, an application of these MSM-PD's to high-speed OEIC's for use in broad-band optical communication systems is expected.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	4,100,000	1,230,000	5,330,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：電子デバイス・集積回路

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

現代の情報通信を支える基本技術は、光技術とミリ波技術である。光の周波数は 100 THz であり、光ファイバーを用いた光通信技術を利用すれば、低損失で超高速・大容量の信号の伝送が可能となる。光技術とミリ波技術を融合すれば、従来のミリ波技術のみでは成し得なかった、高機能の新技术分野を開拓することができる。このためには、光受信系の高速化が不可欠であり、フォトダイオードと電子デバイスを集積した高速 OEIC の実現が期待されている。

2. 研究の目的

背景で述べたように、高度情報通信を実現するために超高速 OEIC の実現が求められている。このためには、同じ材料でかつ同じ層構造を有する電子デバイスと光検出器を同時に作製する必要がある。候補となる材料として InAs に着目した。その理由は以下の通りである。

(1)電子ドリフト速度が大きく、超高速で動作する電界効果トランジスタ (HEMT) を実現できる。

(2)狭バンドギャップであるために Auger 再結合確率が大きく、少数キャリアである正孔の再結合時間が短いため、高速の PD に適している。

そこで、受光デバイスとして InAs をチャンネルとする超高速・高利得の歪 InAs 系 MSM-PD を開発し、光信号を MSM-PD で電気信号に変換してこれを同じ基板上に作製した超高速 InAs 系 HEMT で増幅する超高速 OEIC の実現を狙いとしている。

3. 研究の方法

歪 InAs/InGaAs 系 HEMT (PHEMT) で OEIC を実現しようとする、チャンネル厚が ~10 nm と薄いため PD の量子効率 は 1% 以下となる。両者が要求する膜厚が異なることが OEIC の研究の進展を妨げている。本研究では、上記難題を克服するため、新しい原理に基づく超高速・高光利得の歪 InAs チャンネル MSM-PD (PMSM-PD) を開発する。このための要素技術およびデバイス物理は下記の通りである。

(1)InAs/InGaAs/InAlAs エピタキシャル成長 InAs は InP 基板と格子整合していない。結晶内に歪みを蓄え転位の発生を防ぐには臨界膜厚以下に成長しなくてはならない。Matthews 理論によると、InAs の臨界膜厚は約 5nm である。また、InP 基板を用いる理由は、半絶縁性であり高周波デバイスに最適であること、光通信用 1.55 μm レーザ光に透明で

あることである。

(2)高周波測定技術

①帯域 50GHz のネットワークアナライザを用いて S-parameter を測定し、H-parameter に変換してトランジスタの電流利得および遮断周波数 (f_T) を見積もる。

②帯域 400fs のフェムト秒レーザおよび Sampling Oscilloscope (帯域 50GHz) を用いてフォトダイオードの光信号の応答を評価する。しかし、光の究極応答特性を評価するには、電気的特性で確立されているような予測方法がないので、EO サンプリング測定法を用いて直接的に評価する必要がある。

(3)電子状態

臨界膜厚以下の InAs 量子井戸構造を作製しても、電子が井戸内に閉じ込められるか否かは重大関心事である。これを解明するために、電子の分布も考慮して Schrödinger 方程式を自己無撞着に解く。また、InAs では、エネルギーバンドの非放物線性を考慮する。

4. 研究成果

(1)素子構造および実験方法

試作した PHEMT 及び PMSM の構造を図 1(a)、SEM 画像を図 12(b)に示す。結晶層は Fe をドーピングした半絶縁性 InP 基板上に有機金属相成長法 (MOCVD) で成長させた。チャンネル層には InAs に近い組成の $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ を用いた。この組成を選択した理由は、臨界膜厚が大きく結晶品質の良いチャンネル層が得られ、かつ InAs に近いので大きな電子速度が期待できるからである。電子供給層には Si をドーピングした $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ を用いた。本来ならば電子走行層と電子供給層の間にスペーサ層を用いるが、電子走行層の 2 次元電子ガス濃度を上げるために設定しなかった。PHEMT のゲート長及びゲート幅はそれぞれ 0.1 μm 、80 μm である。また PMSM のライン及びスペース幅はそれぞれ 0.2 μm 、0.6 μm であり、受光面積は 20 x 30 μm^2 である。

①PHEMT の評価：半導体パラメータアナライザを用いて静特性を測定した。

ネットワークアナライザ (HP8510C) を用いて 45 MHz ~ 50 GHz における S パラメータを測定し、H パラメータ変換を行うことで電流利得 H21 の周波数依存性を導出し、H21 が $1/f^2$ で減衰すると仮定して遮断周波数 f_T を見積もった。また、コールド FET 法を用いて真性成分の抽出し、寄生容量と浮遊回路要素の決定を行った。

②PMSM-PD の評価：半導体パラメータアナライザを用いて静特性を測定した。

フェムト秒パルスレーザ (波長 1.55 μm 、パルス幅 400 fs、繰り返し周波数 75 MHz、平均パ

ルスパワー 2.2 mW) を試料の裏面から照射し、デジタルコミュニケーションアナライザ (HP83480A) を用いて出力電圧 V_{out} の時間依存性を測定した。

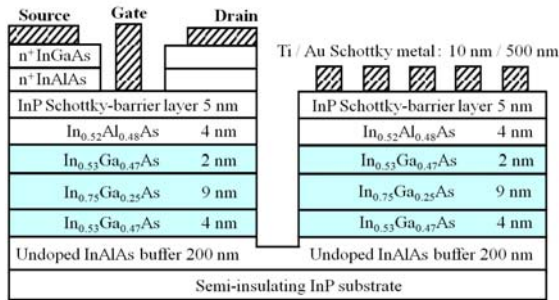


図 1(a) PHEMT と PMSM の断面構造

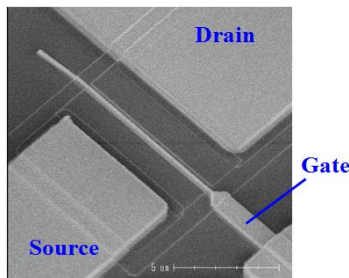


図 1(b) PHEMT の SEM 写真

(2) 結果及び考察

① PHEMT の測定結果

図 2(a) に PHEMT のドレイン I-V 特性、図 2(b) に相互コンダクタンス (G_m) 特性を示した。FET として正常に動作し、 G_m の最大値は 26.22 mS であり、しきい値電圧 V_{TH} は 0.38V であった。

図 3 に電流利得 H_{21} の周波数依存性を示す。遮断周波数 f_T は 200 GHz を超えた。一方、コールド FET 法を用いて解析すると、真性の電流利得遮断周波数 $f_{T, int}$ は 400 GHz 以上であった。実測される f_T が小さい理由を明らかにするために、S パラメータを Y パラメータに変換して、その周波数依存性から Gate-Drain 間容量 CGD が Gate-Source 間容量 CGS を見積もった。この結果、CGD が CGS の約半分に近いことが判明し、これが理由であることが分かった。今後、構造設計とプロセス手法を改善することで真性特性に近づけることは可能である。

② PMSM-PD の測定結果

図 4 に PMSM-PD の I-V 特性を示した。光電流 I_{ph} は Anode 電圧 (V_A) の増加と共に増加し 2.0 V 付近で飽和し、さらに電圧を上げると急激に増加している。Responsivity (I_{ph}/P_{opt}) の結果を図 5 に示した。Responsivity の最大値は $V_A = 6.0$ V において 5.16 W/A となった。チャンネル層が 15 nm と薄

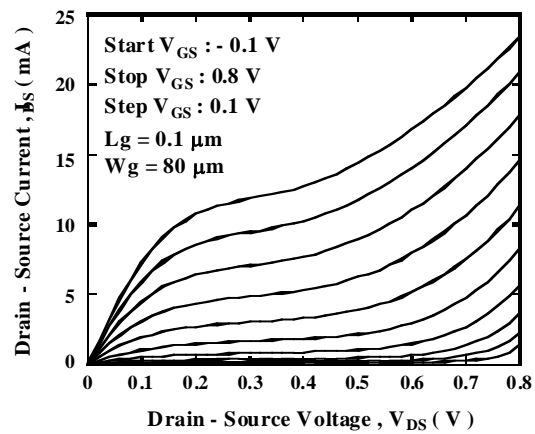


図 2(a) PHEMT のドレイン I-V 特性

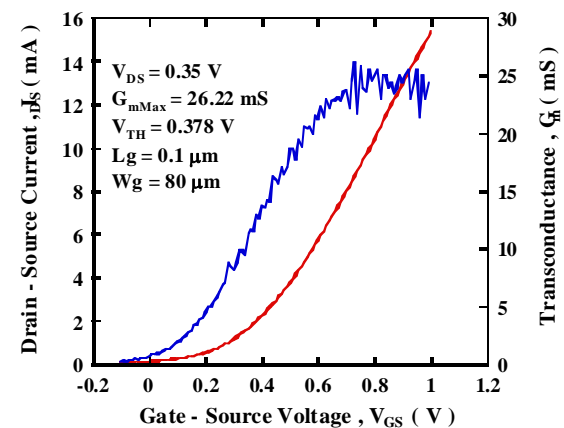


図 2(b) PHEMT の G_m 特性

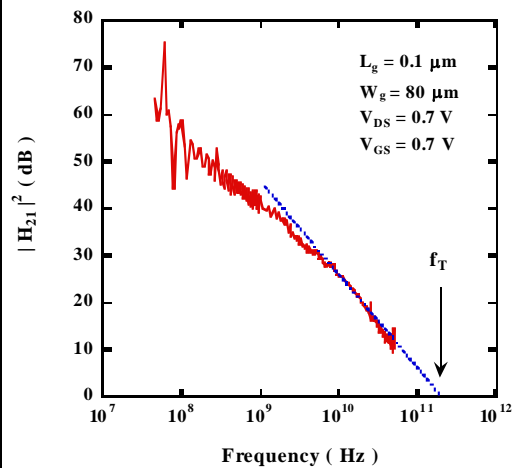


図 3 PHEMT の電流利得 H_{21} 特性

いのかかわらず利得が 1 を超える結果となった。通常のフォトダイオードのように、Responsivity が 1 次光電流に起因しているとすると、 $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ の光吸収係数や外部量子効率を正確に見積もり評価すると、Responsivity は高々 0.015 A/W 程度である。高 V_A 領域で Responsivity が急増しているのは、今後理論検討が必要であるが、用いた $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ は狭ギャップエネルギーバンド

のため衝突イオン化による自己増幅が起きていると考えられる。いずれにせよ、試作したMSM-PDの光利得は100を超えることが分かった。

図6にPMSM-PDの出力電圧 V_{out} の時間依存性を示した。PMSM-PDの光電流 I_{ph} をデジタルコミュニケーションアナライザの 50Ω の入力抵抗を介して電圧に変換している。 V_A を増加させるにつれて長い裾引き成分は減少し急峻なスペクトルピークとなった。長い裾引き成分は正孔のAnodeからCathodeへ向かう走行時間に起因すると考えられる。 V_A を増加させるに従い正孔のドリフト速度は増加するので急峻なスペクトルピークとなった。図7に図6から求めた半値幅(FWHM)の結果を示した。 V_A を増加させるに従い半値幅は減少していき、 $V_A=6.0$ Vでは18 psecに収束した。しかし、この値はオシロスコープの帯域に近いため実際にはさらに小さな値となった可能性がある。今後、EOサンプリングなどによる直接測定で究極特性を明らかにしていく必要がある。

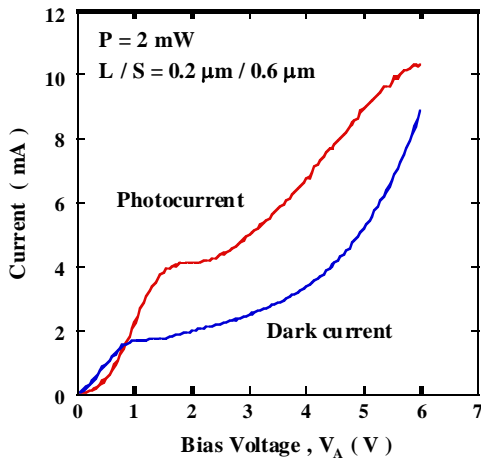


図4 PMSM-PDのI-V特性

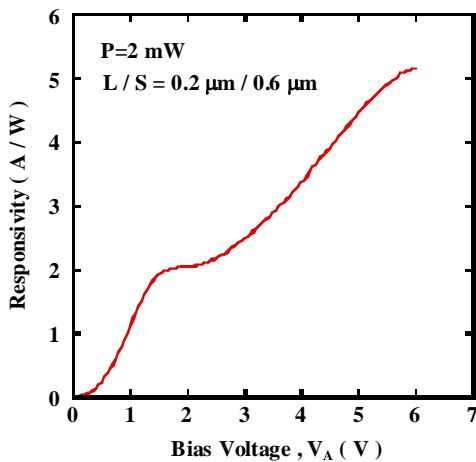


図5 Responsivity特性

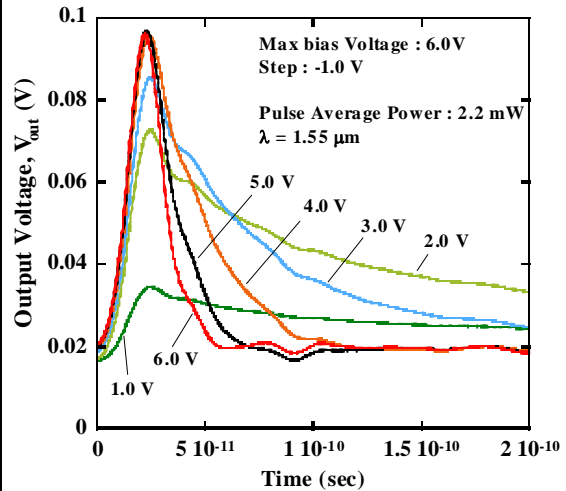


図6 PMSM-PDの出力電圧の時間依存性

(3) 量子井戸構造の電子物性

厳密な量子力学に基づき、HEMT構造における2次元電子ガス(2DEG)の量子状態を解析する手法を確立した。InAsのように小さなバンドギャップエネルギーを有する半導体では、エネルギーバンドの非放物線性が考慮されなくてはならない。上記理論にエネルギーバンドの非放物線性を厳密に取り込むことに初めて成功した。計算例を図8に示す。これにより、歪InAs系HEMTの動作解析やICの厳密なシミュレーションが可能となった。

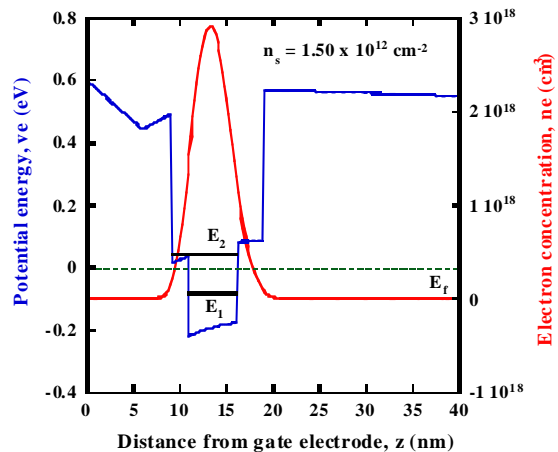


図8 InAsチャンネルの量子状態

(4) 結言

本研究により同一基板上に作製したPHEMT及びPMSM-PDに於いて、それぞれ期待された通りの特性を確認できた。PHEMTについては優れた真性 f_T が予測され、実用デバイスとして用いるには寄生容量や浮遊回路要素の低減が課題であることが分かった。一方、PMSM-PDではピコ秒オーダーの光応答が得られた。物理メカニズムは未解決であるが、利得が100以上となり超高速OEIC実

現に向けて可能性が開けた。

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 12 件)

- ① Yuta Koreeda, Yutaka Endo, Kouichi Sato, Kenya Yoshizawa, Yui Nishio, Hirohisa Taguchi, Tsutomu Iida and Yoshifumi Takanashi, Characteristics of PHEMTs and MSM photodetectors simultaneously fabricated on same epitaxial wafer with In_{0.75}Ga_{0.25}As/InGaAs channel layer, PHYSICA STATUS SOLIDI (C) 9, 357-360 (2012). 査読有
- ② T. Sakamoto, T. Iida, S. Kurosaki, K. Yano, H. Taguchi, K. Nishio, and Y. Takanashi, Thermoelectric Behavior of Sb- and Al-Doped n-Type Mg₂Si Device Under Large Temperature Differences, JOURNAL OF ELECTRONIC MATERIALS 40, 629-634 (2011). 査読有
- ③ Takahisa Ando, Hirohisa Taguchi, Kazuya Uchimura, Miho Mochiduki, Tsutomu Iida and Yoshifumi Takanashi, Dependence of Optical Response Time on Gate-to-Source Voltage for InAlAs/InAs/InGaAs Pseudomorphic High Electron, Extended Abstracts of the 2010 International Conference on Solid State Devices and Materials, 856-857 (2010). 査読有
- ④ Hirohisa Taguchi, Yasuyuki Oishi, Takahisa Ando, Kazuya Uchimura, Miho Mochiduki, Mitsuhiro Enomoto, Tsutomu Iida, and Yoshifumi Takanashi, Ultrafast Optical Response of InAlAs/InAs/InGaAs Pseudomorphic High Electron Mobility Transistors, Japanese Journal of Applied Physics 49, 04DF03-1 -4 (2010). 査読有
- ⑤ T. Nemoto, T. Iida, J. Sato, Y. Oguni, A. Matsumoto, T. Miyata, T. Sakamoto, T. Nakajima, H. Taguchi, K. Nishio, and Y. Takanashi, Characteristics of a pin-fin structure thermal-to-electric uni-leg device using a commercial n-type Mg₂Si source, JOURNAL OF ELECTRONIC MATERIALS 39, 1572-1578 (2010). 査読有
- ⑥ T. Sakamoto, T. Iida, J. Sato, A. Matsumoto, Y. Honda, T. Nemoto, J. Sato, T. Nakajima, H. Taguchi, and Y. Takanashi, Thermoelectric characteristics of commercialized Mg₂Si source doped with Al, Bi, Ag and Cu, JOURNAL OF ELECTRONIC MATERIALS 39, 1708-1713 (2010). 査読有
- ⑦ Y. Honda, T. Iida, T. Sakamoto, S. Sakuragi, Y. Taguchi, Y. Mito, T. Nemoto, T. Nakajima, H. Taguchi, K. Nishio, and Y. Takanashi, Direct thermal-to-electric energy conversion material of

environmentally-benign Mg₂Si synthesized using wasted Si sludge and recycled Mg alloy, Materials and Devices for Thermal-to-Electric Energy Conversion (Mater. Res. Soc. Proc. Vol.1218) 1218, Z05-17-1-6 (2010). 査読有

- ⑧ Hirohisa Taguchi, Yasuyuki Oishi, Takahisa Ando, Kazuya Uchimura, Miho Mochiduki, Mitsuhiro Enomoto, Tsutomu Iida and Yoshifumi Takanashi, Ultra-Fast Optical Response by InAlAs/InAs/InGaAs Pseudomorphic High Electron Mobility Transistors, Extended Abstracts of the 2009 International Conference on Solid State Devices and Materials, 946-947 (2009). 査読有
- ⑨ Hirohisa Taguchi, Nobuhito Wakimura, Yugo Nakagawa, Tsutomu Iida, and Yoshifumi Takanashi, InAlAs/InAs/InGaAs pseudomorphic high electron mobility transistors exhibiting ultra-fast optical response, Physica status solidi (c) 6, 1386-1389 (2009). 査読有
- ⑩ Nobuhito Wakimura, Yugo Nakagawa, Hirohisa Taguchi, Tsutomu Iida, and Yoshifumi Takanashi, Materials Research Society Symposium Proceedings 1108, 2-8 (2009). 査読有
- ⑪ N. Fukushima, T. Iida, M. Akasaka, T. Nemoto, T. Sakamoto, R. Kobayashi, H. Taguchi, K. Nishio and Y. Takanashi, Thermoelectric properties of Sb-doped sintered Mg₂Si fabricated using commercial polycrystalline sources, Materials and Devices for Thermal-to-Electric Energy Conversion Mater. Res. Soc. Proc.1166, N03-21.1- N03-21.6 (2009). 査読有
- ⑫ T. Nemoto, T. Iida, Y. Oguni, J. Sato, A. Matsumoto, T. Sakamoto, T. Miyata, T. Nakajima and Y. Takanashi, Output power characteristics of Mg₂Si and the fabrication of a Mg₂Si TE module with a uni-leg structure, Materials and Devices for Thermal-to-Electric Energy Conversion Mater. Res. Soc. Proc.1166, N03-17.1-N03-17.6 (2009). 査読有

[学会発表] (計 6 件)

- ① Hirohisa Taguchi, Yuta koreeda, Yutaka Endo, kouichi Sato, Kenya Yoshizawa, Yui Nishio, Tsutomu Iida and Yoshifumi Takanashi, Characteristics of PHEMTs and MSM photodetectors simultaneously fabricated on the same epitaxial wafer with In_{0.75}Ga_{0.25}As/InGaAs channel layer, 38th International Symposium on Compound Semiconductors-ISCS, (ISCS2011, Berlin). 査読有
- ② 山崎陽一、是枝勇太、西尾結、遠藤裕、佐藤宏一、芳沢研哉、田口博久、高梨良文、In_{0.75}Ga_{0.25}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As 同一基板上に作製した PHEMT の周波数特性、第 72 回応報

物理学会学術講演会、(2011、山形大学) 査読有

③西尾結、是枝勇太、山崎陽一、渡邊亮、田口博久、高梨良文、

In0.75Ga0.25As/In0.53Ga0.47As 同一基板上に作製した PMSM-PD の応答特性、第 72 回応報物理学会学術講演会、(2011、山形大学) 査読有

④Takahisa Ando, Hirohisa Taguchi, Kazuya Uchimura, Miho Mochiduki, Tsutomu Iida and Yoshifumi Takanashi, Dependence of Optical Response Time on Gate-to-Source Voltage for InAlAs/InAs/InGaAs Pseudomorphic High Electron Mobility Transistors, 2010 International Conference on Solid State Devices and Materials, (SSDM2010, Tokyo Univ., 査読有

⑤是枝勇太、安藤貴寿、遠藤裕、佐藤宏一、吉澤研哉、田口博久、高梨良文、

InAlAs/InAs/InGaAs Pseudomorphic High Electron Mobility Transistors のゲートソース間電圧による光応答時間の依存性、第 71 回応用物理学会学術講演会、(2010、長崎大学) 査読有

⑥遠藤裕、安藤貴寿、是枝勇太、佐藤宏一、吉澤研哉、田口博久、高梨良文、

InAlAs/InAs/OnGaAs-PHEMT の直流及び高周波特性、第 71 回応用物理学会学術講演会、(2010、長崎大学) 査読有

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://zairyu.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高梨 良文 (TAKANASHI YOSHIFUMI)

東京理科大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：30453830

(2) 研究分担者

田口 博久 (TAGUCHI HIROHISA)

中京大学・情報理工学部・准教授

研究者番号：30453830

(分担者期間：平成 21 年 4 月～平成 23 年 3 月)

(3) 連携研究者

()

研究者番号：