

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 25 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：2010 年度～2012 年度

課題番号：22560346

研究課題名（和文） III-V 族化合物半導体 MOSFET の量子補正シミュレーション

研究課題名（英文） Quantum Corrected Simulation of III-V MOSFETs

研究代表者

藤代 博記 (FUJISHIRO HIROKI)

東京理科大学・基礎工学部・教授

研究者番号：60339132

研究成果の概要（和文）：

量子補正モンテカルロシミュレーションを用いて、各種 III-V 族化合物半導体をチャネルとするプレーナおよびダブルゲート構造の MOSFET の特性を解析した。InGaAs は電子有効質量 m^* が小さいために注入速度 v_{inj} が大きい、合金散乱とドレイン領域からの再注入により平均速度 v_s が減少し、かつゲート容量 C_g が小さいために電子濃度 n_b が低い。GaAs は Γ - L 谷間のエネルギー差が小さいために L 谷内の伝導が起こり、 n_b は高いが v_{inj} が減少する。InP は m^* が大きいために v_{inj} は小さいがドレイン領域からの再注入が起こり難く、逆に C_g が大きいために n_b が高い。結果として、InP で最も大きい I_{ds} が得られることを示した。III-V 族化合物半導体チャネルの高速性の指標として、各種チャネル材料の HEMT の遮断周波数 f_T を見積もった。

研究成果の概要（英文）：

The ability of the nano-scale MOSFETs with various III-V channel materials is investigated by using the quantum-corrected Monte Carlo (MC) simulation. The InGaAs channel shows the largest injection velocity v_{inj} , because of the smallest electron effective mass m^* . However, the average velocity v_s is decreased by the alloy scattering and the electron reinjection from the drain. Meanwhile, the gate capacitance C_g is smallest, and then the electron density n_b becomes smallest. In the GaAs channel, the L valley conduction occurs because of the narrow Γ - L valley separation. Then, n_b becomes larger, but v_{inj} becomes smaller. The InP channel shows the smallest v_{inj} because of the largest m^* . However, the electron reinjection is less pronounced. Meanwhile, because of the largest C_g , n_b becomes largest. Eventually, the InP channel shows the largest drain current I_{ds} . The cutoff frequency f_T of the nano-scale HEMTs with various III-V channel materials is also estimated as an indicator of high-speed capability.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

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：III-V MOSFET・III-V 族化合物半導体・量子補正モンテカルロシミュレーション・
バリスティック伝導・量子輸送・CMOS ロードマップ

1. 研究開始当初の背景

(1) VLSI を構成する Si MOSFET はこれまで微細化により特性向上が図られてきた。しかしデバイスサイズがいわゆる「ナノ領域」に入った当時、ロードマップ上の仕様とデバイス特性との間に生じるギャップを埋めるための「テクノロジーブースター」が強く求められていた。電子の有効質量 m^* が小さい InGaAs や InSb 等のナローバンドギャップ III-V 族化合物半導体を MOSFET のチャネルに用いる新たな試みは、これらの材料が示す Si や $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ を凌駕する高い電子移動度により、ドレイン電流を増加させる手段として、急速に現実味を帯びてきていた。一方、 m^* が小さいナローバンドギャップ III-V 族化合物半導体は状態密度 DOS が小さく、また微細化されたデバイスでは DOS キャパシタンスが支配的となるために、高い電子濃度を得るためには不利であるとも考えられた。以上のことから、より統一的な視点で、幅広く III-V 族化合物半導体のロジックデバイスへの適合性を検討する必要があった。

(2) 化合物半導体チャネルに関する研究はロジックデバイスとしてだけでなく、次世代のサブミリ波帯、THz 帯応用の基幹デバイスとしても重要であり、その波及効果は大きいと考えられた。

2. 研究の目的

(1) CMOS ロードマップの更なる延長を目指して、電流駆動能力の向上等の観点から、各種 III-V 族化合物半導体のロジックデバイスへの適合性を理論的に検討し、ポスト Si デバイスとして真に有望なチャネル材料および構造を明らかにすることを目的とした。

(2) 化合物半導体チャネルの高速性の指標として、遮断周波数 f_T を決定するメカニズムと、性能限界を明らかにすることにより、次世代のサブミリ波帯、THz 帯応用の基幹デバイスの開発に資することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 「ナノ領域」のデバイス特性をシミュレーションするためには、キャリアの量子力学的効果や縮退効果、歪みバンド構造などを厳密に再現することのできるシミュレータの開発が不可欠である。そこで、本研究の目的に合わせて量子補正モンテカルロ (MC) シミュレータの高度化を実施した。

(2) 上記シミュレータを用いて、各種チャネル材料のプレーナおよびダブルゲート (DG) 構造の III-V 族化合物半導体 MOSFET (III-V MOSFET) の特性を解析した。

(3) 上記シミュレータを用いて、各種チャネル材料および構造の高電子移動度トランジスタ (HEMT) の特性を解析した。

4. 研究成果

(1) InGaAs MOSFET の電子輸送特性の解析
プレーナ構造の InGaAs MOSFET のボトルネック平均電子速度 v_s のボトルネック電子濃度 n_b 依存性を解析した結果、ゲート長 L_g を短縮するほど電子の逆方向散乱が減少し、 v_s がバリスティック電子速度に近づくが、一方 n_b が高くなると、逆に v_s が減少してしまう現象を見出した (図 1)。これは ON 状態では InGaAs のドレイン電流 I_{ds} に対する優位性が失われてしまうことを示している。

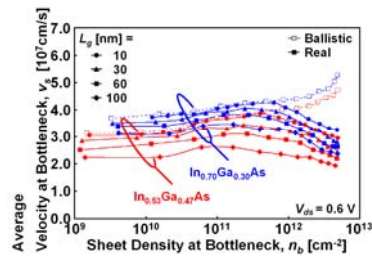


図 1 v_s の n_b 依存性 (In 組成比: 0.53, 0.70)

そこで逆方向散乱係数 R をチャネル領域 R_c とドレイン領域 R_d に分離して調べた結果、高 n_b での v_s の減少は、主にドレイン領域からチャネルへの電子の再注入によるものであり、この再注入は L_g を短縮するほど顕著になることが明らかとなった (図 2)。

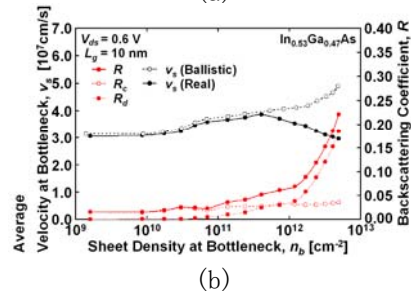
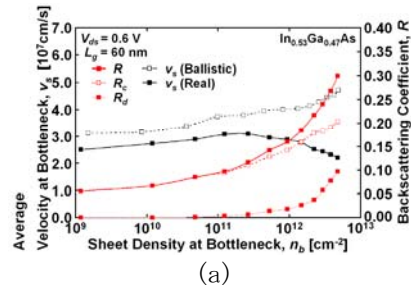


図 2 v_s , R , R_c , R_d の n_b 依存性

(a) $L_g=60$ nm (b) $L_g=10$ nm

InGaAs は状態密度が小さいためにボトルネックが縮退しやすく、またチャネル内の散乱が少ないために、ボトルネックからチャネルに注入された高エネルギー電子の多くは、ドレイン領域で非有極性光学フォノン散乱 (NPOP) により L 谷に遷移し、蓄積する。その一部が再び Γ 谷に遷移してチャネルに再注

入し、逆方向電流を形成することが分かった。

(2) 各種チャンネル材料のMOSFETの特性比較次に、チャンネル材料をInGaAs, GaAs, InPとしたDG構造のIII-V MOSFETの特性比較を行った(表1)。 I_{ds} はInP, InGaAs, GaAsの順に大きな値を示した(図3)。そこで I_{ds} を n_b と v_s に分離して解析を行った。まず n_b はGaAs, InP, InGaAsの順に大きな値を示した(図4)。またGaAsは Γ -L谷間のエネルギー差が小さいために、電子がL谷を占有した(図4)。したがって、 n_b の大きさは m^* の大きい順となっており、 m^* が大きいほどゲート容量 C_g が大きいことが確認された。

Material	In _{0.53} Ga _{0.47} As	GaAs	InP	
Effective Mass [m_0]	Γ	0.042	0.063	0.080
	L	0.258	0.560	0.250
Energy difference between Γ and L [eV]	0.55	0.29	0.54	

表1 各種チャンネル材料の物性値

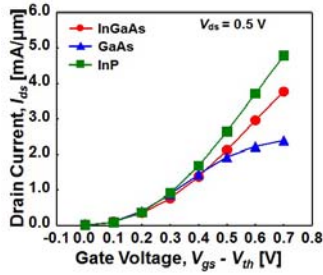


図3 I_{ds} の V_{gs} 依存性 ($L_g=30$ nm)

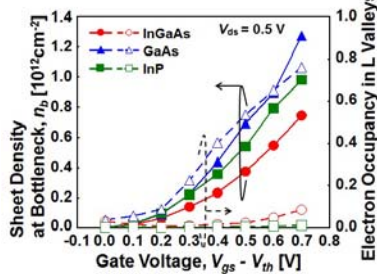


図4 n_b とL谷占有率の V_{gs} 依存性

一方、低い V_{gs} での v_s はInGaAs, GaAs, InPの順に大きな値を示した(図5)。これは m^* の小さい順となっており、 m^* が小さいほど注入速度 v_{inj} が大きいことが確認された。しかしながらInGaAsとGaAsでは、 V_{gs} が増加するほど v_c が減少した(図5)。InGaAsでは、主に合金散乱による R_c の増加と、ドレイン領域からの電子の再注入による R_d の増加が見られた。GaAsでは、L谷の占有による v_{inj} そのものの減少が見られた。一方、InPは R_c が低く、またDOSが大きいために電子のL谷への遷移が抑制され、結果として R_d の増加も抑制された。

以上の結果に基づいて、チャンネル内の電子輸送モデルを提案した(図6)。また各種チャ

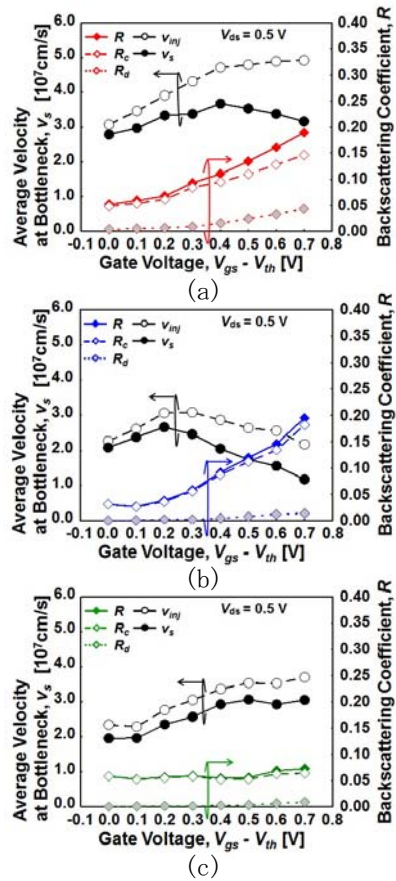


図5 $v_s, v_{inj}, R, R_c, R_d$ の V_{gs} 依存性 (a) InGaAs, (b) GaAs, (c) InP

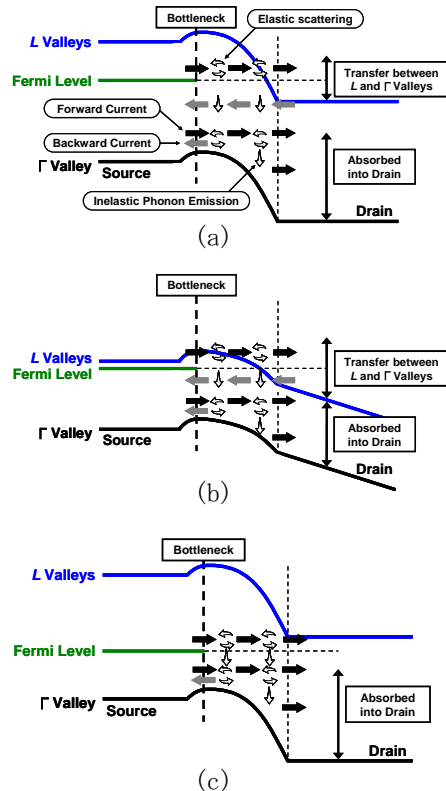


図6 電子輸送モデル (a) InGaAs, (b) GaAs, (c) InP

Material	I_{ds}	n_b	v_s	v_{inj}	R_c	R_d
InGaAs	○	○	○	◎	×	×
GaAs	×	◎	×	×	×	○
InP	◎	◎	○	○	○	○

表 2 各種チャネル材料の特性比較

ネル材料の特性比較をまとめた(表 2)。InGaAs は m^* が小さいために v_{inj} が大きいですが、合金散乱とドレイン領域からの再注入により v_s が減少し、かつ C_g が小さいために n_b が低い。GaAs は Γ - L 谷間のエネルギー差が小さいために L 谷内の伝導が起こり、 n_b は高いが v_{inj} が減少する。InP は m^* が大きいために v_{inj} は小さいがドレイン領域からの再注入が起こり難く、逆に C_g が大きいために n_b が高い。結果として、InP で最も大きい I_{ds} が得られることを示した。本研究の成果は III-V MOSFET の開発に重要な知見を与えるものである。

(3) 各種チャネル材料の HEMT の遮断周波数の解析

歪を考慮した量子補正 MC シミュレータを用いて、各種 HEMT (図 7) の遅延時間 τ 分布を求め、 f_T を見積もった。 τ 分布はフリッジによるソース遅延時間 τ_s 、ゲート遅延時間 τ_g 、電子の運動量緩和によるドレイン遅延時間 τ_d に分けられた。 τ_d は V_{ds} が高くなるほどドレイン側に広がって増加した。この結果は、 L_g の微細化に限界があり、 f_T の向上には低い V_{ds} から平均電子速度 v_s の高いチャネル材料が必要であることを示唆している。InSb チャネル(A)は低い V_{ds} から v_s が高く、高い f_T を示しており、THz デバイスとして有望であることが分かった(図 8)。

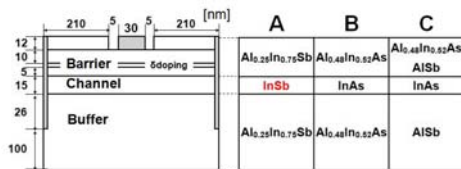


図 7 各種 HEMT のデバイス構造

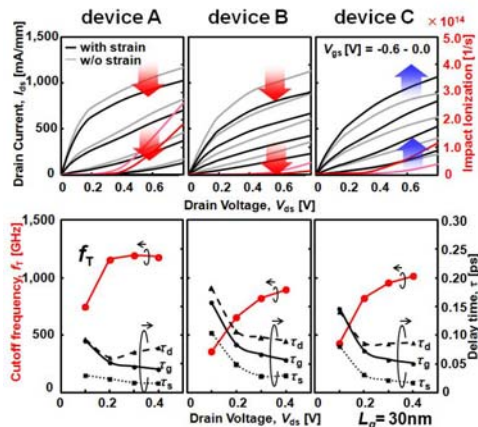


図 8 I_{ds} - V_{ds} 特性と f_T - V_{ds} 特性

(4) 今後の展望

- ① 本研究では III-V 族化合物半導体を n 型チャネルに用いた場合の特性について詳細な検討を行った。今後は p 型チャネルに適した III-V 族化合物半導体の探索と特性解析を行う。
- ② InSb HEMT の試作例はこれまで幾つか報告されているが、エピ成長が難しく、従来の InGaAs HEMT よりも特性が低い。今後は本研究による構造設計を基に、高性能な InSb HEMT の開発を目指す。

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 13 件)

- ① Y. Nagai, S. Nagai, J. Sato, S. Hara, H. I. Fujishiro, A. Endoh, I. Watanabe, and A. Kasamatsu, Comparative Study on Frequency Limits of Nanoscale HEMTs with Various Channel Materials, Proceedings of 25th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2013), 査読有, 2013, ThD2-4.
- ② A. Nishida, R. Ohama, S. Hara, and H. I. Fujishiro, Comparative Study on III-V Nanoscale DG MOSFETs with Various Channel Materials, Abstracts of 40th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2013), 査読有, 2013, MoPC-02-04.
- ③ J. Sato, Y. Nagai, S. Hara, H. I. Fujishiro, A. Endoh, and I. Watanabe, Analysis of Performances of InSb HEMTs Using Quantum-Corrected Monte Carlo Simulation, Proceedings of 24th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2012), 査読有, 2012, 237-240.
- ④ 永井 佑太郎, 佐藤 純, 原 紳介, 藤代博記, 遠藤 聡, 渡邊 一世, 量子補正モンテカルロ法による歪み InSb HEMT の遅延時間解析, 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, 112, 2012, 37-42.
- ⑤ T. Homma, K. Hasegawa, H. Watanabe, S. Hara and H. I. Fujishiro, Comparative Study on Nano-Scale III-V MOSFETs with Various Channel Materials Using Quantum-Corrected Monte Carlo Simulation, Physica Status Solidi C, 査読有, 9, 2012, 346-349. DOI:10.1002/pssc.201100275
- ⑥ S. Hara, F. Machida, J. Sato, H. I. Fujishiro, A. Endo, Y. Yamashita and I. Watanabe, Quantum-Corrected Monte

- Carlo Simulation of InSb HEMTs Considering Strain Effects, Abstracts of 9th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM2011), 査読有, 2011, 41-42.
- ⑦ 佐藤 純, 町田 史晴, 原 紳介, 藤代 博記, 量子補正モンテカルロ法による歪み InAs HEMTの解析, 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, 111, 2011, 79-84.
- ⑧ F. Machida, H. Nishino, J. Sato, H. Watanabe, S. Hara and H. I. Fujishiro, Strain Effects on Performances in InAs HEMTs, Proceedings of 23rd International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2011), 査読有, 2011, 437-440.
- ⑨ T. Homma, K. Hasegawa, H. Watanabe, S. Hara and H. I. Fujishiro, Comparative Study on Nano-Scale III-V MOSFETs with Various Channel Materials Using Quantum-Corrected Monte Carlo Simulation, Abstracts of 38th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2011), 査読有, 2011, 469-470.
- ⑩ H. Watanabe, T. Homma, T. Takegishi, Y. Hirasawa, Y. Hirata, S. Hara and H. I. Fujishiro, Quantum-Corrected Monte Carlo Study of Nano-Scale InGaAs MOSFETs, Physica Status Solidi C, 8, 査読有, 2011, 306-309.
- ⑪ H. I. Fujishiro, H. Watanabe, T. Homma and S. Hara, Impact of Electron Rebound from Drain on Drive Current in Nano-Scale InGaAs MOSFETs, Proc. International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT2010), 査読有, 2, 2011, 1350-1352.
- ⑫ 本間 嵩広, 渡邊 久巨, 原 紳介, 藤代 博記, InGaAs-Channel MOSFETのキャリア輸送に関する理論的解析, 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, 110, 2011, 47-52.
- ⑬ H. Nishino, I. Kawahira, F. Machida, S. Hara and H. I. Fujishiro, Monte Carlo Study of Strain Effect on High Field Electron Transport in InAs and InSb, Proceedings of 22nd International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2010), 査読有, 2011, 156-159.
- [学会発表] (計 25 件)
- ① Y. Nagai, S. Nagai, J. Sato, S. Hara, H. I. Fujishiro, A. Endoh, I. Watanabe, and A. Kasamatsu, Comparative Study on Frequency Limits of Nanoscale HEMTs with Various Channel Materials, 25th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2013), 2013.5.23, 神戸.
- ② A. Nishida, R. Ohama, S. Hara, and H. I. Fujishiro, Comparative Study on III-V Nanoscale DG MOSFETs with Various Channel Materials, 40th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2013), 2013.5.20, 神戸.
- ③ H. I. Fujishiro, Quantum-Corrected Monte Carlo Analysis of Electron Transport in Nano-Scale III-V MOSFETs, BIT's 2nd Annual World Congress of Nanoscience and Nanotechnology (Nano-S&T 2012), 招待講演, 2012.10.26, Qingdao, China.
- ④ 西田 明央, 長谷川 慶, 原 紳介, 藤代 博記, InGaAs DG-MOSFETの駆動電流に及ぼすソース/ドレイン拡張領域の影響の解析, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2012.9.11, 富山大学.
- ⑤ 長谷川 慶, 西田 明央, 原 紳介, 藤代 博記, III-V DG-MOSFETの駆動電流に及ぼすソース/ドレイン形状の影響に関する理論的解析, 第73回応用物理学学会学術講演会, 2012.9.11, 愛媛大学.
- ⑥ J. Sato, Y. Nagai, S. Hara, H. I. Fujishiro, A. Endoh, and I. Watanabe, Analysis of Performances of InSb HEMTs Using Quantum-Corrected Monte Carlo Simulation, 24th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2012), 2012.8.27, University of California Santa Barbara, USA.
- ⑦ 永井 佑太郎, 佐藤 純, 原 紳介, 藤代 博記, 遠藤 聡, 渡邊 一世, 量子補正モンテカルロ法による歪み InSb HEMTの遅延時間解析, 電子情報通信学会 ED研究会, 2012.7.26, 福井大学.
- ⑧ 佐藤 純, 荒井 敦志, 町田 史晴, 原 紳介, 藤代 博記, 遠藤 聡, 渡邊 一世, InSb HEMTのデバイス特性に及ぼすラフネス散乱の影響, 第59回応用物理学関係連合講演会, 2012.3.18, 早稲田大学.
- ⑨ H. I. Fujishiro, Quantum-Corrected Monte Carlo Simulation of Nano-Scale III-V MOSFETs, BIT's 1st Annual World Congress of Nano-S&T (Nano-S&T 2011), 招待講演, 2011.10.23, Dalian, China.
- ⑩ 町田 史晴, 佐藤 純, 原 紳介, 藤代 博記, 遠藤 聡, 渡邊 一世, 歪みInSb HEMTのモンテカルロ解析, 第72回応用物理学学会学術講演会, 2011.8.29, 山形大学.

- ⑪ 長谷川 慶, 本間 嵩広, 原 紳介, 藤代 博記, 各種チャンネル材料を用いた微細 III-V MOSFET の特性比較, 第72回応用物理学学会学術講演会, 2011.8.29, 山形大学.
- ⑫ S. Hara, F. Machida, J. Sato, H. I. Fujishiro, A. Endo, Y. Yamashita and I. Watanabe, Quantum-Corrected Monte Carlo Simulation of InSb HEMTs Considering Strain Effects, 9th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM2011), 2011.8.28, Nagaragawa Convention Center, Gifu.
- ⑬ 佐藤 純, 町田 史晴, 原 紳介, 藤代 博記, 量子補正モンテカルロ法による歪み InAs HEMT の解析, 電子情報通信学会 ED 研究会, 2011.7.29, 長岡技術科学大学.
- ⑭ F. Machida, H. Nishino, J. Sato, H. Watanabe, S. Hara and H. I. Fujishiro, Strain Effects on Performances in InAs HEMTs, 23rd International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2011), 2011.5.22, Berlin, Germany.
- ⑮ T. Homma, K. Hasegawa, H. Watanabe, S. Hara and H. I. Fujishiro, Comparative Study on Nano-Scale III-V MOSFETs with Various Channel Materials Using Quantum-Corrected Monte Carlo Simulation, 38th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2011), 2011.5.22, Berlin, Germany.
- ⑯ 佐藤 純, 町田 史晴, 西野 啓之, 原 紳介, 藤代 博記, InAs HEMT の歪効果に関する理論的研究, 電子情報通信学会総合大会, 2011.3, 東京都市大.
- ⑰ 町田 史晴, 佐藤 純, 西野 啓之, 原 紳介, 藤代 博記, InAs HEMT の歪効果に関するモンテカルロ解析, 第58回応用物理学関係連合講演会, 2011.3, 神奈川工科大.
- ⑱ 藤代博記, 量子補正モンテカルロ法による InGaAs MOSFET の電子輸送解析, 電気学会調査専門委員会「グリーンITにおける化合物半導体電子デバイス」研究会, 招待講演, 2010.11.12, 法政大学.
- ⑲ H. I. Fujishiro, H. Watanabe, T. Homma and S. Hara, Impact of Electron Rebound from Drain on Drive Current in Nano-Scale InGaAs MOSFETs, International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT2010), 2010.11.3, Shanghai, China.
- ⑳ 本間 嵩広, 渡邊 久巨, 原 紳介, 藤代 博記, InGaAs MOSFET の駆動電流に及ぼす電子後方散乱の影響の解析, 第71回応用物理学学会学術講演会, 2010.9.14, 長崎大学.
- 21 町田 史晴, 西野 啓之, 原 紳介, 藤代 博記, 格子整合系歪み InAs HEMT のモンテカルロ解析, 第71回応用物理学学会学術講演会, 2010.9.14, 長崎大学.
- 22 渡邊 久巨, 本間 嵩広, 原 紳介, 藤代 博記, InGaAs MOSFET の駆動電流に及ぼす電子後方散乱の理論的解析, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2010.9.15, 大阪府立大学.
- 23 本間 嵩広, 渡邊 久巨, 原 紳介, 藤代 博記, InGaAs-Channel MOSFET のキャリア輸送に関する理論的解析, 電子情報通信学会 ED 研究会, 2010.6.18, 北陸先端科学技術大学院大学.
- 24 H. Nishino, I. Kawahira, F. Machida, S. Hara and H. I. Fujishiro, Monte Carlo Study of Strain Effect on High Field Electron Transport in InAs and InSb, 22nd International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2010), 2010.6.2, Kagawa.
- 25 H. Watanabe, T. Homma, T. Takegishi, Y. Hirasawa, Y. Hirata, S. Hara and H. I. Fujishiro, Quantum-Corrected Monte Carlo Study of Nano-Scale InGaAs MOSFETs, 37th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2010), 2010.6.1, Kagawa.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.te.noda.tus.ac.jp/pub/labs/fujishiro/index-j.html>

http://www.tus.ac.jp/fac_grad/p/index.php?37a7

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤代 博記 (FUJISHIRO HIROKI)
東京理科大学・基礎工学部・教授
研究者番号：60339132

(2) 研究分担者

原 紳介 (HARA SHINSUKE)
東京理科大学・基礎工学部・助教
研究者番号：30434038