

Oral presentation | 13 Semiconductors : 13.6 Nanostructures, quantum phenomena, and nano quantum devices

📅 Sun. Sep 7, 2025 1:30 PM - 6:15 PM JST | Sun. Sep 7, 2025 4:30 AM - 9:15 AM UTC | 📍 N401 (Lecture Hall North)

[7p-N401-1~16] 13.6 Nanostructures, quantum phenomena, and nano quantum devices

Toshihiro Nakaoka(Sophia Univ.), Ryuichi Ohta(Hokkaido Univ.), Takayuki Hasegawa(Osaka Inst. of Tech.), Satoshi Hiura(Hokkaido Univ.)

量子井戸・超格子、量子細線、量子ドットなどの半導体ナノ構造を対象としたテラヘルツ発生・検出、キャリアダイナミクス、スピン・発光制御、デバイス作製。講演奨励賞受賞記念講演。

1:30 PM - 1:45 PM JST | 4:30 AM - 4:45 AM UTC

[7p-N401-1] Terahertz wave generation originating from miniband structures in semiconductor superlattices

○Takayuki Hasegawa¹, Tomoki Den¹, Akira Fujimoto¹ (1.Osaka Inst. Technol.)

1:45 PM - 2:00 PM JST | 4:45 AM - 5:00 AM UTC

[7p-N401-2] Terahertz Field Sensors Using Electro-Optic Effect in a Semiconductor Microcavity: Theoretical Study on the Frequency Dependence of Phase-Shift Signal

○Takahiro Kitada¹, Yukihiro Harada², Toshiyuki Kaizu³, Yasuo Minami⁴, Osamu Kojima⁵, Takashi Kita², Osamu Wada⁶ (1.NIT of Matsue, 2.Grad. Sch. of Eng., Kobe Univ., 3.UEC, 4.Nihon Univ., 5.Chiba Inst. Tech., 6.Kobe Univ.)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[7p-N401-3] Effects of free carriers on difference-frequency-mixing signal under exciton resonant excitation condition in a GaAs/AlAs multiple quantum well

○Jiaming Xu¹, Osamu Kojima¹, Matthew Steer², Richard Hogg^{2,3} (1.Chiba Inst. Tech., 2.Univ. Glasgow, 3.Aston Univ.)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[7p-N401-4] Effects of strain on polarization characteristics of exction photoluminescence in a GaSb/AlGaSb multiple quantum well grown on Si substrate

○Daiki Yamaguchi¹, Osamu Kojima¹, Kouichi Akahane² (1.Chiba Inst. Tech., 2.NICT)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[7p-N401-5] [The 58th Young Scientist Presentation Award Speech] Spatial Mapping of Quantum Dot Ensemble Dynamics Across Multiple Timescales Using Remote Dual-Comb Asynchronous Optical Sampling

○Gen Asambo^{1,2}, Riku Shibata^{1,2}, Yushiro Takahashi^{1,2}, Kouichi Akahane³, Shinichi Watanabe^{1,2}, Junko Ishi-Hayase^{1,2} (1.Keio Univ., 2.Keio CSRN, 3.NICT)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[7p-N401-6] Electric field control of circular polarization oscillation characteristics in InGaAs quantum dots tunnel-coupled with a GaNAs quantum well

○Shunsuke Sakano¹, Hiroto Kise¹, Junichi Takayama¹, Akihiro Murayama¹, Satoshi Hiura¹ (1.IST, Hokkaido Univ.)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[7p-N401-7] Bias voltage dependence of circularly polarized luminescence properties of InGaAs quantum dots sandwiched between GaNAs quantum wells

○Kyota Nakadate¹, Hiroto Kise¹, Ayano Morita¹, Junichi Takayama¹, Akihiro Murayama¹, Satoshi Hiura¹
(1.IST, Hokkaido Univ.)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[7p-N401-8] Effects of nitrogen layer on photoreflectance spectra in GaAs crystals including InAs quantum dots

○Osamu Kojima¹, Tomoya Inoue², Takashi Kita² (1.Chiba Inst. Tech., 2.Kobe Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[7p-N401-9] Wavelength Control and Defect-Free InGaN Nanoplatelets via Selective Etching and Regrowth

○(DC)Qingyuan Han¹, Wentao Cai², Jia Wang^{2,3}, Yuta Ito¹, Yuta Furusawa², Haitao Wang², Heajeong Cheong^{1,2,4}, Markus Pristovsek², Yoshio Honda^{2,3,4}, Hiroshi Amano^{2,3,4} (1.Dept. Electronics, NU, 2.IMaSS, NU, 3.IAR, NU, 4.DTSIC, NU)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC

[7p-N401-10] Selective-area MOVPE of InGaAs core-multishell nanowires on thin SOI layer and fabrication of vertical gate-all-around tunnel FETs

○(M1)Kai Fujimoto^{1,2}, Keita Taniyama^{1,2}, Yuki Azuma^{1,2}, Ryosei Uchida^{1,2}, Junichi Motohisa^{1,2}, Katsuhiro Tomioka^{1,2} (1.Hokkaido Univ., 2.RCIQE)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

4:30 PM - 4:45 PM JST | 7:30 AM - 7:45 AM UTC

[7p-N401-11] Fabrication of InP crystal phase transition heterojunction vertical transistor

○Ryosei Uchida^{1,2}, Yuki Azuma^{1,2}, Keita Taniyama^{1,2}, Junichi Motohisa^{1,2}, Katsuhiro Tomioka^{1,2}
(1.Hokkaido Univ., 2.RCIQE)

4:45 PM - 5:00 PM JST | 7:45 AM - 8:00 AM UTC

[7p-N401-12] Electron transport through single InAs colloidal quantum dots

○Kenji Shibata¹, Tomoki Takiguchi¹, Akira Sato¹, Yuto Sasaki¹, Tomohiro Otsuka² (1.Tohoku Inst. Tech., 2.RIEC, Tohoku Univ.)

5:15 PM - 5:30 PM JST | 8:15 AM - 8:30 AM UTC

[7p-N401-13] Impurity Ion Doping into Si Quantum Dots

○Kazumasa Yonetsu¹, Tomohisa Mizuno¹ (1.Kanagawa Univ.)

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

[7p-N401-14] Optical Properties of SiO_x Thin Films Containing Si Quantum Dots and Electrical Characterization of MIS Devices

○Toshiya Kondo¹, Hiroshi Katsumata¹ (1.Meiji Univ.)

5:45 PM - 6:00 PM JST | 8:45 AM - 9:00 AM UTC

[7p-N401-15] Carrier relaxation dynamics in green InGaN / GaN quantum dots

○Reiho Ozaki¹, Yuto Nakama¹, Riku Iwasaki¹, Atushi Tackeuchi¹, Shulong Lu², Xue Zhang², Wenxian Yang² (1.Waseda Univ., 2.SINANO)

6:00 PM - 6:15 PM JST | 9:00 AM - 9:15 AM UTC

[7p-N401-16] Quantitative Analysis of Electron Spin Relaxation Time in Bulk GaAs

○Satoshi Iba¹, Yuzo Ohno^{1,2} (1.AIST, 2.Univ. of Tsukuba)

半導体超格子におけるミニバンド構造に起因したテラヘルツ波発生

Terahertz wave generation originating from miniband structures in semiconductor superlattices

大阪工大工 長谷川 尊之, 田 智樹, 藤元 章

Osaka Inst. Technol., Takayuki Hasegawa, Tomoki Den, and Akira Fujimoto

E-mail: takayuki.hasegawa@oit.ac.jp

フェムト秒レーザー照射による半導体結晶からのテラヘルツ波発生は、半導体の構造や励起条件に依存して多様な特性を示す。半導体超格子を対象としたテラヘルツ波発生に関する研究では、ブロッホ振動が盛んに調査されてきた。ブロッホ振動は、ミニバンドを形成するための包絡波動関数の共鳴トンネル効果が電場印加によって破綻する条件下で生じる。本研究では、ミニバンドが形成されている半導体超格子のテラヘルツ波発生に焦点を置いて、発生特性とその機構について調査した。

試料は、分子線エピタキシー法により作製された $(\text{InAs})_1/(\text{GaAs})_m$ 超格子 ($m=5, 10, 30$) である。テラヘルツ波時間波形の測定は、モード同期 Ti:sapphire レーザー (~80 fs) を光源とし、電気光学サンプリング法を用いて、室温、乾燥空気下で測定した。試料の電子状態の観測は、光変調反射分光法を用いて行った。

図 1 は、 $m=10$ の試料における 100 K での光変調反射スペクトルの測定結果である。1.4 eV (1.9 eV) 付近に観測される信号のエネルギーは、ミニバンドの Γ 点 (π 点) での光学遷移エネルギーの計算結果と一致しており、本試料でミニバンドが形成されていることを示している。また、スペクトルの解析から、内部電場の存在を示すフランチ・ケルディッシュ振動が現れていることも確認された。

図 2 は、 $m=10$ の試料における励起光強度 40 mW でのテラヘルツ波時間波形の測定結果である。テラヘルツ波の振幅は励起光強度にほぼ比例しており、光励起キャリアの寄与が示唆された。上述したように、本試料ではミニバンドが形成されており、かつ内部電場が存在している。このことから、観測されたテラヘルツ波は、光励起されたキャリアが内部電場によってミニバンド内を高速に輸送されることで発生しているものと考えられる。講演では、試料依存性も含めてテラヘルツ波発生特性を議論する。

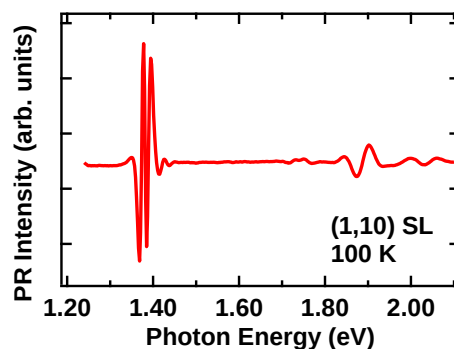


Fig. 1

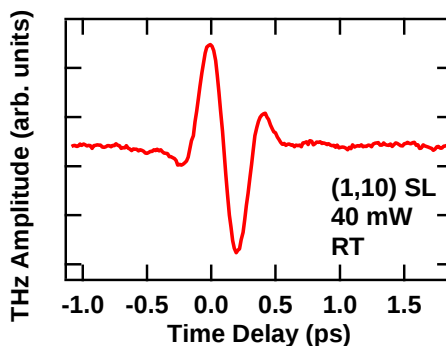


Fig. 2

半導体光共振器中での電気光学効果を利用したテラヘルツ電界センサ： 位相差信号の周波数依存性

Terahertz Field Sensors Using Electro-Optic Effect in a Semiconductor Microcavity:
Theoretical Study on the Frequency Dependence of Phase-Shift Signal

松江高専¹, 神戸大院工², 電通大³, 日大生産工⁴, 千葉工大工⁵, 神戸大⁶

○北田 貴弘¹, 原田 幸弘², 海津 利行³, 南 康夫⁴, 小島 磨⁵, 喜多 隆², 和田 修⁶

NIT of Matsue¹, Grad. Sch. of Eng., Kobe Univ.², UEC³, Nihon Univ.⁴, Chiba Inst. Tech.⁵,

Kobe Univ.⁶, °T. Kitada¹, Y. Harada², T. Kaizu³, Y. Minami⁴, O. Kojima⁵, T. Kita², O. Wada²

E-mail: kitada.takahiro@matsue-ct.ac.jp

GaAs 系のヘテロ多層膜で構成する微小光共振器中での電気光学 (EO) 効果を利用した高感度のテラヘルツ (THz) 電界センサの開発に取り組んでいる。近年の THz 計測システムでは、光導電型の発生・検出素子が広く用いられるが、光通信波長 1.5 μm 帯のレーザ光を使ったシステムを考えた場合、検出素子に用いる狭ギャップ半導体に特有の高い暗電流が問題になる。一方、THz 波照射による EO 効果を用いた検出方法では、複屈折による位相差を信号として検出するため暗電流の問題にはさらされないが、十分な位相差信号を得るための比較的長い光路長が必要になる。我々は、微小光共振器中での光電場増強と長い光子寿命に着目し、面直入射においても十分な位相差信号を得る素子構造を検討している。前回、有効的に EO 効果を利用できる結晶面方位[1]と検出する位相差信号の共振器 Q 値依存性[2]について報告したが、位相差信号は、直流電界のモデルで計算していたため、周波数特性についてはよく理解できていない。今回、交流電界による EO 効果で生じる位相差信号を計算し、その周波数依存性を評価した。

波長 1.5 μm に共振モードが生じる GaAs/AlAs 多層膜光共振器 (共振器層厚は 3λ) について計算を行った。EO 効果で物質の屈折率が角周波数 ω_s の正弦波で時間変化する場合、入射した光は ω_s の間隔で側波をもつようになり、そのフーリエ係数は第一種ベッセル関数で記述できる。そこで、角周波数が $\omega_0 - m\omega_s$ (m は整数) である共振器内の電磁場を $2n+1$ 個の進行波と後退波で展開し、境界での電場と磁場の連続条件から $(4n+2) \times (4n+2)$ の伝達マトリックスを構築した。ここで、 ω_0 は EO 効果がない場合の共振モードの角周波数である。 $n=10$ として求めた伝達マトリックスから各周波数成分の振幅透過係数を求め、位相差信号を計算した。図 1 に 3 つの異なる Q 値をもつ光共振器について計算した位相差信号の周波数依存性を示す。 Q 値は DBR 膜の積層数で変化させ、共振器層の EO 係数は GaAs バルク結晶よりも 3 桁大きいと仮定した。低い周波数領域では Q 値が高いほど大きな位相差信号が得られるが、周波数が高くなると信号強度は低下し、 Q 値に依存しなくなる。位相差信号は、 $m = \pm 1$ の側波でほぼ決定づけられており、その周波数間隔が共振モードのスペクトル幅よりも大きくなるためである。

[1] 北田他, 第 72 回応用物理学会春季講演会, 17a-K302-3 (2025).

[2] 原田他, 第 72 回応用物理学会春季講演会, 17a-K302-4 (2025).

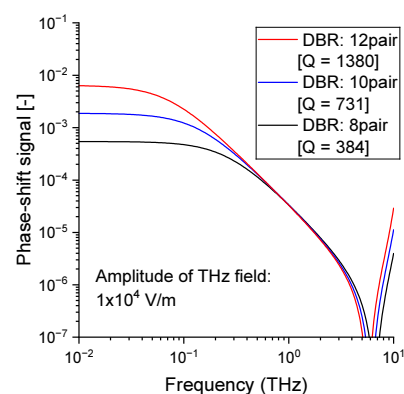


Fig.1: Frequency dependence of the phase-shift signal.

GaAs/AlAs 多重量子井戸における励起子共鳴励起条件下での 差周波混合信号に対する自由キャリアの効果

Effects of free carriers on difference-frequency-mixing signal under exciton resonant
excitation condition in a GaAs/AlAs multiple quantum well

千葉工大院工¹, Univ. Glasgow², Aston Univ.³ ○許 家銘¹, 小島 磨¹, Matthew Steer²,
Richard Hogg^{2,3}

Chiba Inst. Tech.¹, Univ. Glasgow², Aston Univ.³, ○J. Xu¹, O. Kojima¹, M. Steer², R. Hogg^{2,3}

E-mail: s24p4014gt@s.chibakoudai.jp

差周波混合によるテラヘルツ電磁波発生に関する研究において、GaAs/AlAs 多重量子井戸における励起子共鳴励起条件での結果[1]では、発生効率と比べて観測されるテラヘルツ電磁波の強度はナノワットレベルであり、非常に微弱である。そのため、強度を増強させる取り組みを行ってきたが[2,3]、大幅に増強させることはできていない。そこで、本研究ではその原因として励起光源に連続波レーザーを使用していることに起因する自由キャリアの生成を考え、自由キャリアの影響を抑制して信号強度を増強させることを目指したので、その結果について報告する。

試料には n^+ 型 GaAs 基板上的 pin 構造に埋め込まれた GaAs/AlAs 多重量子井戸を用いた[2]。井戸幅と障壁層幅はどちらも 7.25 nm であり、量子井戸周期数は 30 である。図 1(a)は差周波混合信号の測定系の模式図であり、二つのレーザーの光を結合光ファイバで重ねて試料に照射し、後方散乱方向に発生するテラヘルツ電磁波を検出した。光チョップパ1は信号を検出するために使用しており、ロックイン増幅器と同期させている。光チョップパ2はレーザー光を遮断し、自由キャリアを緩和させるために使用した。また、照射する光強度は可変 ND フィルタで制御した。光チョップパ2を 200 Hz とした場合の信号強度に対して、周波数を増加させた場合の信号強度の比をプロットした結果が図 1(b) である。励起光強度が小さい順にそれぞれ、非線形性が観測され始める強度、中間的な強度、および飽和に近い強度である。なお、テラヘルツ電磁波の周波数は 9.11 THz である。すべての励起光強度において信号強度比は、周波数の増加にともない概ね増加している。これは、イオン化された励起子が自由キャリアとして量子井戸内に蓄積されることを抑制したことに起因すると考えられる。

謝辞: 科研費 25K01270

[1] O.Kojima et al., Phys. Rev. Applied **10**, 044035 (2018).

[2] K. Sakaue et al., Optics Express **29**, 24387 (2021).

[3] O. Kojima, et al., Optics Express **30**, 11789 (2022).

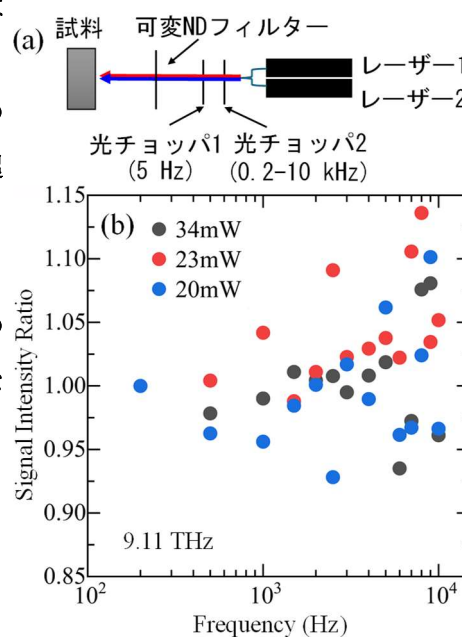


Fig.1 (a) Optical setup. (b) Frequency dependence of signal intensity ratio.

Si 基板上の GaSb/AlGaSb 多重量子井戸における励起子発光の偏光特性に対する歪みの効果

Effects of strain on polarization characteristics of exciton photoluminescence in a GaSb/AlGaSb multiple quantum well grown on Si substrate

千葉工大院工¹, 情報通構² ○山口 大輝¹, 小島 磨¹, 赤羽 浩一²

Chiba Inst. Tech¹, NICT² ○D. Yamaguchi¹, O. Kojima¹, K. Akahane²

E-mail: s20A4159TC@s.chibakoudai.jp

GaSb は光通信波長帯における光デバイスの一つとして注目されているが、実際の応用を考えた場合、格子整合基板の利用が困難であることから、Si 基板上に成長した量子井戸構造が提案されている[1]. Si と GaSb の格子不整合率は約 10%であることから GaSb 量子井戸には格子不整合歪みが加えられていると考えられ、電子状態もこの歪みの影響を受けると考えられる[2, 3]. そこで今回我々は、Si 基板上に作製された GaSb 多重量子井戸の発光スペクトルの様々な偏光依存性を測定し、歪みが励起子発光に与える効果を明らかにすることを目的に研究を行ったのでその結果について報告する.

試料には、分子線エピタキシー法で(001)Si 基板上に作製した GaSb/AlGaSb 多重量子井戸を用いた. 井戸幅と障壁層幅はそれぞれ 10 nm と 20 nm であり、量子井戸周期数は 5 である[1]. 図 1(a)は室温で励起光の偏光方向を変えて測定した発光スペクトルである. 図中の HH と LH は、それぞれの発光ピークが重い正孔励起子と軽い正孔励起子に起因することを示している. 光方向に対してスペクトル形状はほとんど変化しないが[110]で励起した場合に強度が低下している. そこで、重い正孔励起子発光の強度の励起方位依存性を、励起光強度が 10 mW と 20 mW の場合についてプロットした結果が図 1(b)である. どちらの励起光強度においても[110]で発光強度が強く、これは歪みによって波動関数に異方性が生じているためと考えられる. また、発光強度の比は 10 mW で 39%であるのに対し、20 mW で 21%となった.このことは、励起子の緩和レートにおいても異方性があることを示唆していると考えられる.

謝辞: 科研費 25K01270

- [1] K. Akahane et al., JJAP **44**, L15 (2005).
 [2] O.Kojima et al., APEX **16**, 051102 (2023).
 [3] O. Kojima et al., JJAP **64**, 011005 (2025).

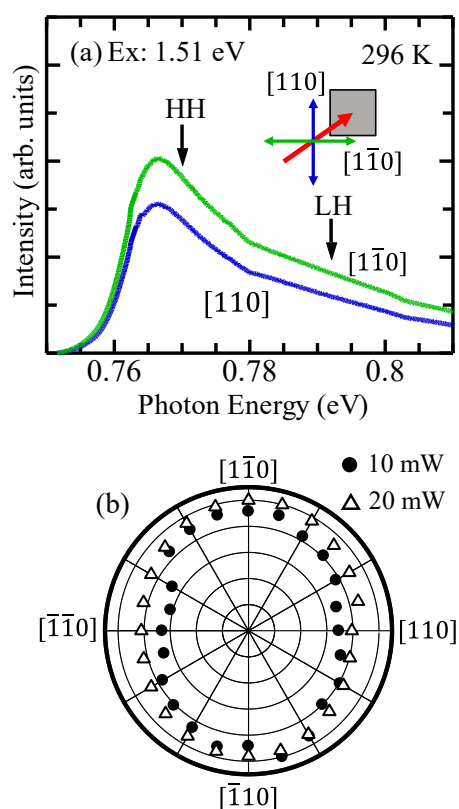


Fig. 1(a) Photoluminescence spectra. (b) Excitation-direction dependence of photoluminescence intensity.

伝送デュアルコム非同期光サンプリングによる 量子ドットダイナミクスのマルチ時間スケール空間マッピング Spatial Mapping of Quantum Dot Ensemble Dynamics Across Multiple Timescales Using Remote Dual-Comb Asynchronous Optical Sampling

慶大理工¹, 慶大 CSRN³, NICT³

○(M1)阿讃坊 元^{1,2}, (D)柴田 理来^{1,2}, 高橋 雄士朗^{1,2},
赤羽 浩一³, 渡邊 紳一^{1,2}, 早瀬 潤子^{1,2}

Keio Univ.¹, Keio CSRN², NICT³

○G. Asambo^{1,2}, R. Shibata^{1,2}, Y. Takahashi^{1,2}, K. Akahane³, S. Watanabe^{1,2}, and J. Ishi-Hayase^{1,2}

E-mail: ragfai9@keio.jp

【背景・目的】

異なる繰り返し周波数を持つ 2 つの光周波数コムにより遅延時間を自動的に掃引するデュアルコム非同期光サンプリング(ASOPS)は, 超高速分光において機械式時間掃引を不要にし, パルス幅程度の時間分解能と 10 数 ns 程度の長い測定時間範囲を両立しながら, 2,3 桁計測時間を短縮できる. 電通大のグループとの共同研究により自己形成 InAs 量子ドット(QD)集合体に対するポンププローブ ASOPS は実証された^[1]が, 光コムと低温設備の両立が難しかったことが一因となり, 低温試料に対してのポンププローブ ASOPS は未実証であった. また QD 集合体には作製条件の不均一性によって物性にも空間不均一性が存在するが, 従来手法では 1 測定点の測定に長い時間を要することから, 複数の測定点で測定を行うことによる不均一性の評価は難しかった. 本研究では, 大学内の別の棟で生成した光コムを 419 m ファイバ伝送することで低温設備と光コムを両立し, 低温 QD 集合体に対するポンププローブ ASOPS を初めて実証した. また ASOPS によって短縮された測定時間を活かし, 複数の測定点で測定を行うことで, QD 集合体のポンププローブ信号空間マッピングに成功した. その結果, 100 ps 以内に減衰する速い振動と, 1.5 ns 程度の遅い緩和を各測定点で観測し, 441 地点のダイナミクスと物性パラメータをわずか 30 分で明らかにすることができた.

【方法】

本研究で用いた 2 つの光コムは Er 添加ファイバレーザを光源とし, 48 分を超える安定同期が報告されている^[2]. また ASOPS におけるトリガーレス計測が実証されている^{[2],[3]}. この光コムを低温設備の備わった別の棟の実験室まで 419 m 伝送した. 2 つの光コムを同軸とし, 4 K に冷却された QD 集合体に集光した. 透過光のうちポンプ光を偏光子で除き, プローブ光のみを検出した(Fig. 1(c)). パルス間隔が Δt 異なる 2 つの光コムを用いて入射時間差を掃引し, 透過光強度変化を観察した. ガルバノスキャナにより入射位置を試料表面上で走査した (Fig. 1(b)). QD 集合体は歪の異方性から, 励起子準位が長軸[233]方向と短軸[011]方向で分裂している(Fig. 1(a)). ポンプ光の偏光を 2 方向からずらすことで現れる減衰振動(量子ビート^[4])の周波数からこのエネルギー分裂 δ を, 減衰の速さから不均一位相緩和時間 $T_{2\text{sub}}^*$ を, 遅い緩和からポピュレーション緩和時間 T_1 を, 遅延時間 0 の信号強度から透過光強度変化 $\Delta T/T$ のピークをそれぞれ求めた.

【結果】

各地点での速い振動と遅い緩和信号から求めた物性パラメータのマッピング結果を Fig. 2(a-d)に示す. 試料 1×1 mm 内の 21×21 地点で数 ps の分解能を保ちつつ, 15 ns までの広い時間範囲でのポンププローブ信号の観測にわずか 30 分で成功し, 量子ドットの局所的な物性の違いを明らかにした. 1 測定点あたりの積算時間は 2.6 s であった. 機械式時間掃引では, 同様の計測に 1 測定点あたり 40 分, 441 地点で 12 日以上要することから, 既存手法では困難だった計測を ASOPS によって実証できたといえる. 本手法は量子ドット以外の様々な物質の持つ ns・ps ダイナミクスの空間的なマッピングに適用できると期待できる.

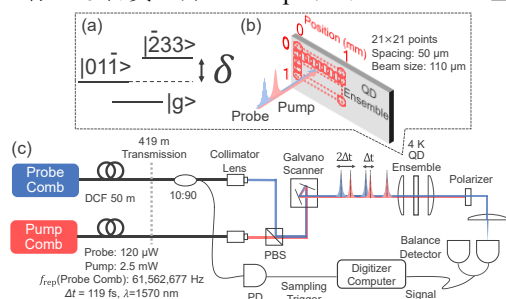


Fig. 1 (a) QD 内励起子エネルギー分裂, (b) ガルバノスキャナによる走査, (c) 光学系

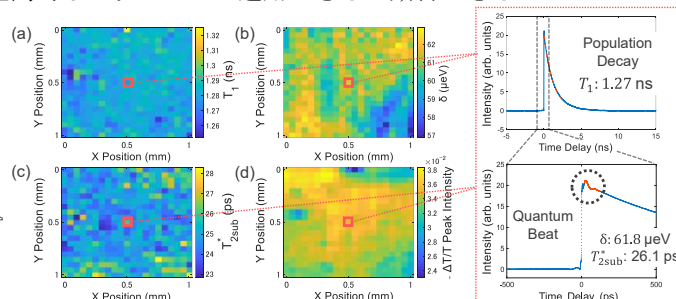


Fig. 2 各位置でのポピュレーション緩和時間 T_1 (a), エネルギー分裂 δ (b), 不均一位相緩和時間 $T_{2\text{sub}}^*$ (c), $\Delta T/T$ のピーク (d), (0.5 mm, 0.5 mm) における 15 ns までの波形 (e), ± 500 ps の範囲の波形 (f).

【謝辞】 本研究は MEXT Q-LEAP (No. JPMXS0118067246), JST CREST (Nos. JPMJCR24A5, JPMJCR19J4), 科研費 (Nos. JP23H01471, JP24K21743), 慶大次世代研究プロジェクト推進プログラム, 慶大 CSRN の支援を受けて行われた. 量子ドットサンプルは NICT 先端 ICT デバイスラボにて作製された.

[1] A. Asahara *et al.*, Appl. Phys. Express, **13**, 062003 (2020).
[3] D. Nishikawa *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **94**, 063003 (2023).

[2] M. Okano *et al.*, Opt. Express, **30**, 39613 (2022).
[4] E.O. Gobel *et al.*, Phys. Rev. Lett., **64**, 1801 (1990).

GaNAs 量子井戸とトンネル結合した InGaAs 量子ドットにおける円偏光度振動特性の電界制御

Electric field control of circular polarization oscillation characteristics
in InGaAs quantum dots tunnel-coupled with a GaNAs quantum well

北大院情報科学 ○坂野 駿介, 木瀬 寛都, 高山 純一, 村山 明宏, 樋浦 諭志

Faculty of Information Science and Technology, Hokkaido Univ.

Shunsuke Sakano, Hiroto Kise, Junichi Takayama, Akihiro Murayama and Satoshi Hiura

E-mail: sakano.shunsuke.k0@elms.hokudai.ac.jp

近年、電子スピン偏極状態に加えて電子スピン位相状態の光電変換を活用した情報伝送が注目されている。磁場中では電子スピンの歳差運動を中心に歳差運動するため、周期変動するスピン極性を発光円偏光度(CPD)の振動に転写できる。ここで、CPD は円偏光フォトルミネッセンス(PL)強度 $I_{\sigma\pm}$ を用いて $CPD = (I_{\sigma+} - I_{\sigma-}) / (I_{\sigma+} + I_{\sigma-})$ と定義される。先行研究では、GaNAs 量子井戸(QW)と InGaAs 量子ドット(QD)のトンネル結合構造試料に横磁場を印加することで、GaNAs の伝導電子スピンの歳差運動を反映した QD の CPD 振動が報告されている[1]。これを踏まえ、我々は前回、GaNAs の膜厚や励起スピン密度によって GaNAs の局在準位におけるスピン占有度を変化させて CPD の振動周波数を制御できることを報告した[2]。本研究では、外場による制御に向けて、GaNAs QW と InGaAs QD のトンネル結合構造試料に電界を印加し、局在準位のスピン占有度をバイアス電圧で調整した際の発光円偏光度の振動特性を調べた。

図 1(a)に本研究の試料構造を示す。*p*-GaAs(100)基板上にプラズマ支援分子線エピタキシー法を用いて試料を作製し、標準的な微細加工技術を用いて表面に電極を作製した。測定には試料面内方向に磁場を印加しながらの時間分解円偏光 PL を用いた。図 1(b)に磁場を 0.25 T、印加電圧を 0.0 V と -2.0 V とした際の室温での CPD の時間変化とフィッティング結果を示す。フィッティング関数は先行研究[3]を参照した。この結果から、印加電圧により CPD の振動周波数が変化していることがわかる。0.0 V では GaNAs の局在準位のスピン占有度が高く、量子ドットの発光に寄与する伝導電子への局在スピンの歳差運動の影響は無視できる。一方、-2.0 V を印加すると局在準位のスピン占有度は減少し、伝導電子のスピン状態にその局在スピンの歳差運動が反映されている可能性がある。

References:

- [1] Y. Huang et al., Nat. Photonics **15**, 475 (2021).
- [2] 坂野駿介他, 2024 年第 85 回応用物理学会秋季学術講演会, 16p-B2-6 (2024).
- [3] I. A. Akimov et al., Phys. Rev. B **80**, 081203(R) (2009).

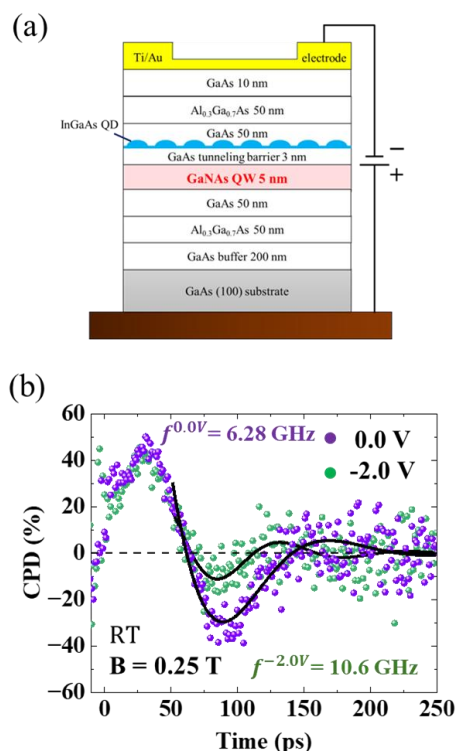


Fig. 1 (a) Schematic of GaNAs-QD sample structure. (b) CPD time profiles at a magnetic field of 0.25 T with applied bias voltages of 0.0 and -2.0 V.

GaNAs 量子井戸で挟まれた InGaAs 量子ドットの円偏光発光特性の印加電圧依存性

Bias voltage dependence of circularly polarized luminescence properties of InGaAs quantum dots sandwiched between GaNAs quantum wells

北大院情報科学 ○中館 恭太, 木瀬 寛都, 森田 彩乃, 高山 純一, 村山 明宏, 樋浦 諭志

Faculty of Information Science and Technology, Hokkaido Univ.

K. Nakadate, H. Kise, A. Morita, J. Takayama, A. Murayama and S. Hiura

E-mail: nakadate.kyota.f4@elms.hokudai.ac.jp

III-V族半導体量子ドット(QD)は3次元量子閉じ込め効果により、高い発光効率と長いスピン寿命を持つため、スピン機能光デバイスの活性層として注目されている[1]。我々はこれまでに QD 活性層に対して2種類の電子スピン注入層を持つ電界効果型光スピンデバイスを作製し、電界によってスピン注入層を切り替えることで QD の発光円偏光度(CPD)の制御を実証した[2]。なお、CPD は円偏光発光強度 $I_{\sigma\pm}$ を用いて $(I_{\sigma+} - I_{\sigma-}) / (I_{\sigma+} + I_{\sigma-})$ で定義され、QD の電子スピン偏極度を反映する。しかし、実用上重要な室温ではスピン注入層でのスピン緩和が速くスピン注入層の切り替えは実現できていない。そこで、本研究では400°Cの低温成長で導入される欠陥準位が少数個スピンを選択的に捕獲することで、室温で伝導電子のスピン偏極を増幅できる希薄窒化 GaNAs 量子井戸(QW)[3]で QD を挟んだ試料を作製し、円偏光発光特性の印加電圧依存性を調べた。

図 1(a)に本研究で作製した試料構造を示す。In_{0.5}Ga_{0.5}As QD の上下に400°C(LT)成長の GaNAs QW を用いた試料(LT-LT)と、下部は400°C、上部は480°C(HT)で成長した GaNAs QW を用いた試料(LT-HT)の2種類を作製した。試料はプラズマ支援分子線エピタキシー法により半導体層を成長し、微細加工により電極を作製した。室温で電界を試料の成長方向(z 方向)に印加しながら円偏光フォトルミネッセンス(PL)測定を行った。図 1(b),(c)にそれぞれ負バイアス電圧、正バイアス電圧を印加した際の QD 活性層近傍におけるバンド構造の模式図を示す。図 1(d)に0 V での PL 強度を1とした規格化 PL 強度と CPD の電圧依存性を示す。+0.6 V において LT-LT 試料では規格化 PL 強度がわずかに減少したが、LT-HT の試料では1.2 倍に増加した。また、CPD は LT-HT 試料に比べて LT-LT 試料では負バイアス電圧の減少に伴って大きく増加した。これらの結果から、LT-HT 試料では正バイアス印加時には高温成長によってスピン増幅機能を持たない HT-GaNAs からの電子注入が増加し、スピン偏極の増幅に伴うキャリア捕獲と CPD の向上が抑制されたと考えられる。

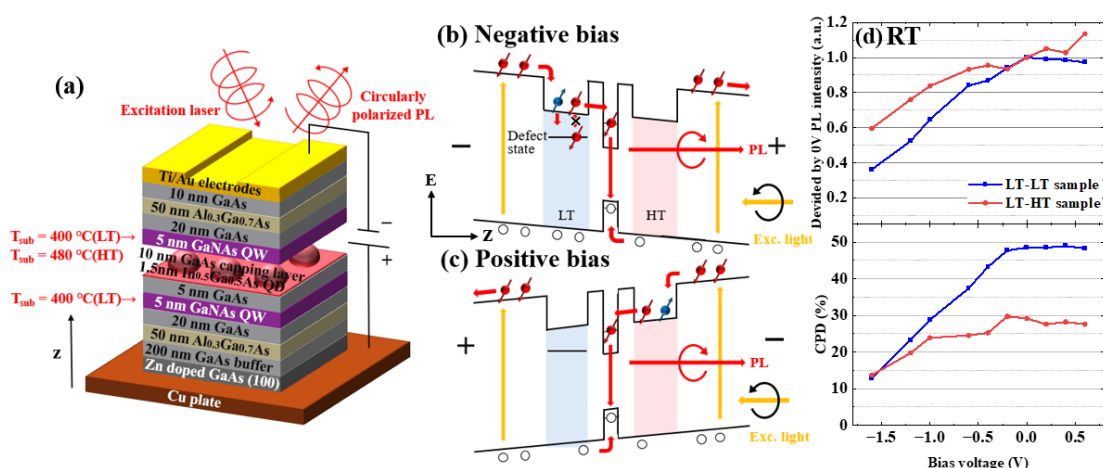


Fig. 1(a) Schematic of GaNAs QW-InGaAs QD sample structure. Schematic of band structure between 20-nm-thick GaAs layers with application of (b) negative bias and (c) positive bias. (d) Normalized PL intensity (blue: LT-LT, red: LT-HT) and corresponding CPD of InGaAs QDs at room temperature (RT).

References:

- [1] K. Etou et al., Phys. Rev. Appl. **19**, 024055 (2023). [2] H. Kise et al., Appl. Phys. Lett. **122**, 232405 (2023). [3] F. Zhao et al., J. Phys.: Condens. Matter, **21**, 17421 (2009).

InAs 量子ドット層を含む GaAs 結晶の光変調反射スペクトルに対する窒素層導入効果

Effects of nitrogen layer on photoreflectance spectra in GaAs crystals including InAs quantum dots

千葉工大工, 神戸大院工^A ○小島 磨, 井上 知也^A, 喜多 隆^A

Chiba Inst. Tech, Kobe Univ.^A ○O. Kojima, T. Inoue^A, T. Kita^A

E-mail: osamu.kojima@p.chibakoudai.jp

InAs 量子ドット成長後に量子ドットを窒素層で覆うと、GaAs キャップ層への In の拡散が抑制されるため[1]、量子ドットの形状の変化に起因する偏光特性の変化が報告されている[2]。また、結晶表面に超短パルスレーザーを照射した際に放射されるテラヘルツ電磁波の信号の位相が反転するエネルギーが、窒素層によって変化することも報告されている [3, 4]。これらの結果から、GaAs キャップ層の光学特性は InAs 量子ドットによる歪みだけでなく、挿入される窒素層によっても変化していると言える。そこで今回我々は、GaAs キャップ層に対する窒素層の導入効果について光変調反射スペクトル測定の結果から議論することを目的に研究を行った。

試料には、分子線エピタキシー法で GaAs 基板上に作製した InAs 量子ドットを用いた。量子ドットを窒素で覆った試料に加え、比較のために量子ドットと窒素層の間に 2 nm の GaAs スペース層を挿入した試料と、窒素層を含まない参照試料を用いた。なお、すべての試料において、量子ドット層は 1 層である。図 1 は室温で測定した各試料の光変調反射スペクトルである。すべての試料で、破線で示す GaAs のバンドギャップエネルギー近傍で信号が観測されている。ここで、1.35 eV の信号は参照試料でのみ観測されている。このエネルギーは wetting layer のエネルギーであり、発光励起スペクトルではすべての試料で観測されている[4]。このことから、窒素層の存在のために、表面電場の変調が wetting layer に届かなくなったと考えられる。また、フランツケルディッシュ振動の周期が窒素層を含む試料で小さくなっていることは、表面電場が小さくなっていることを示唆している。このような変化が、GaAs 層におけるキャリアダイナミクスに影響を与えていると考えられる。

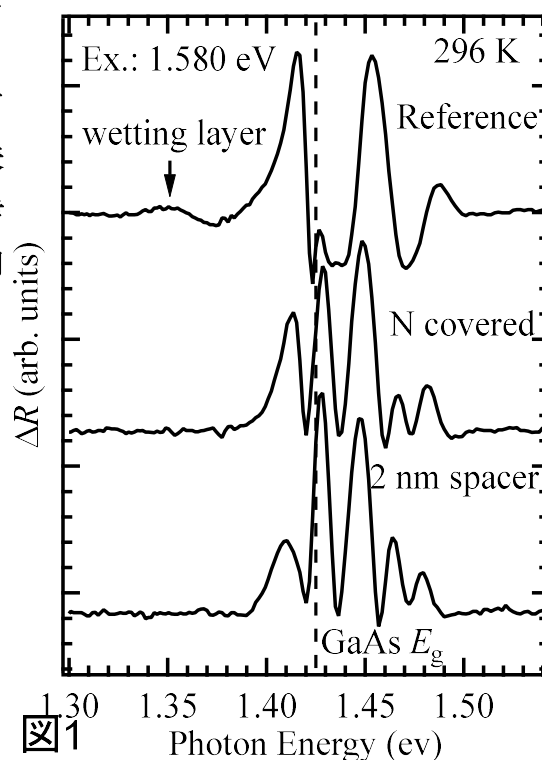
謝辞: 科研費 25K01270

[1] T. Kita et al., Appl. Phys. Lett. **83**, 4152 (2003).

[2] T. Inoue et al., J. Appl. Phys. **104**, 103532 (2008).

[3] O. Kojima et al., J. Phys. D **51**, 305102 (2018).

[4] O. Kojima et al., OSA Continuum **2**, 1621 (2019).



InGaN ナノプレートレットの選択的エッチングおよび再成長による波長制御と欠陥軽減化

Wavelength Control and Defect-Free InGaN Nanoplatelets via Selective Etching and Regrowth

名大電子¹, 名大 ImaSS², 名大高等研究院³, 名大 D センター⁴

○(D)韓 青原¹、蔡 文トウ²、王 嘉^{2,3}、伊藤 佑太¹、古澤 優太²、王 海濤²、鄭 惠貞^{1,2,4}、

Markus Pristovsek²、本田善央^{2,3,4}、天野浩^{2,3,4}

Dept. Electronics, NU¹, ImaSS, NU², IAR, NU³, DTSIC, NU⁴

○Qingyuan Han¹, Wentao Cai², Jia Wang^{2,3}, Yuta Ito¹, Yuta Furusawa², Haitao Wang², Heajeong

Cheong^{1,2,4}, Markus Pristovsek², Yoshio Honda^{2,3,4}, Hiroshi Amano^{2,3,4}

E-mail: han.qingyuan.n2@s.mail.nagoya-u.ac.jp

Simultaneously achieving RGB emission layers via a single MOVPE growth remains challenging. In this study, we achieved six distinct wavelengths within an area of $150\ \mu\text{m} \times 150\ \mu\text{m}$ through selective height control of nanoplatelets by a single regrowth process.

Specifically, high-quality InGaN nanoplatelets were initially grown by MOVPE, followed by selective wet and dry etching to adjust their thicknesses step-by-step. Afterward, a collective regrowth was performed. As a result, nanoplatelets with varying In compositions and defect-free c-plane surfaces were successfully formed, enabling wavelength control from 400 nm to 540 nm. The morphology and surface quality of the nanoplatelets were confirmed via AFM and SEM observations, while the wavelength variations were evaluated using CL measurements. These results demonstrate that our method provides a promising pathway toward high-efficiency, monolithically integrated full-color μLEDs .

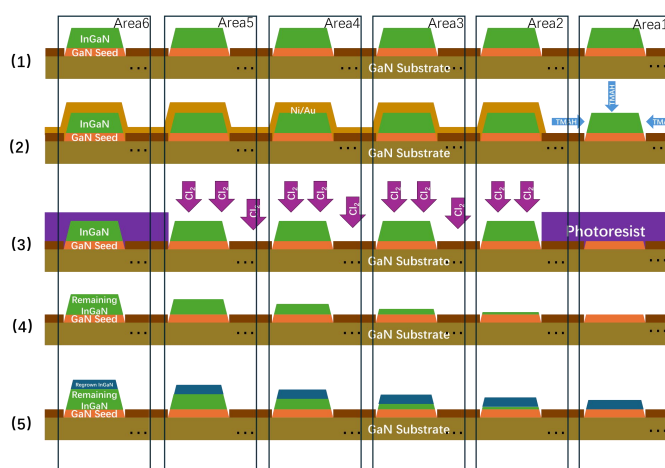


Figure Schematic illustration of the process flow for Areas 1 to 6, representing a unit area of our monolithically integrated wavelength-tailored pseudo-substrate. Each area is designed with a specific target thickness and indium incorporation. Wet etching is applied to Area 1, while dry etching is sequentially performed on Areas 2 to 5. A single-step InGaN regrowth is then performed across Areas 1 to 6, enabling region-specific indium incorporation

薄膜 SOI 上の InGaAs コアマルチシェルナノワイヤ選択成長 と縦型ゲートオールアラウンドトンネル FET の作製

Selective-area MOVPE of InGaAs core-multishell nanowires on thin SOI layer and fabrication of vertical gate-all-around tunnel FETs

北海道大学情報科学院および量子集積エレクトロニクスセンター¹

○(M1) 藤本 開¹, 谷山 慶太¹, 東 佑樹¹, 内田 凌聖¹, 本久 順一¹, 富岡 克広¹

Graduate School of Information Science and Technology and RCIQE, Hokkaido Univ.¹

K. Fujimoto¹, K. Taniyama¹, Y. Azuma¹, R. Uchida¹, J. Motohisa¹, K. Tomioka¹

E-mail: fujimoto.kai.g6@elms.hokudai.ac.jp

電界効果トランジスタ(FET)の微細化技術は、短チャネル効果やリーク電流の増大により、高性能化と低消費電力化の両立が困難になりつつある。また、FET の熱拡散に基づくキャリア輸送機構は、駆動電圧を決定するサブスレッショルド係数(SS)に最小物理限界(60 mV/桁)を与え、低電圧化が困難となる。この物理限界を回避し急峻な SS を実現するトランジスタ素子として、トンネル FET(TFET)が有望であり、我々はこれまでに Si 上の III-V 族化合物半導体ナノワイヤ(NW)チャネルの縦型 Gate-All-Around(VGAA)-TFET 素子を実証してきた[1]。本研究では、回路応用へ向けて、Silicon on Insulator(SOI)(111)面上の InGaAs/InP/AlInAs/ δ -doping/AlInAs/InGaAs 変調ドープ型コアマルチシェル(core-multishell : CMS) NW 選択成長と VGAA-TFET 素子を作製したので報告する。

実験では、厚さ 700 nm の SOI 層を有した p-SOI(111)基板に、熱酸化膜を 20 nm 形成し、電子線リソグラフィ、ドライ・ウェットエッチングで開口部を形成した。次いで、選択成長法[1]により InGaAs/InP/AlInAs/ δ -doping/AlInAs/InGaAs 変調ドープ型 CMS NW を作製した。VGAA-TFET 素子構造の作製は、文献[1]と同様の作製工程を用いた。

図 1(a),(b)に InGaAs/InP/AlInAs/ δ -doping/AlInAs/InGaAs CMS NW の模式図と選択成長結果を示す。図 1(b)に示すように、InGaAs コア NW は、高さ 190 nm の Zn パルスドープ層(n^+ 層)、高さ 90 nm の Si ドープ層(n 層)、高さ 420 nm の Sn パルスドープ層(n^+ 層)を有しており、 $\{-110\}$ 垂直ファセット上に InP/AlInAs/ δ -doping/AlInAs/InGaAs マルチシェル層を形成した。マルチシェル層の膜厚は、それぞれ 3.0 nm (InP), 4.5 nm (AlInAs), 4.5 nm (δ -doping), 6.0 nm (AlInAs), 12 nm (InGaAs)であった。この変調ドープ層は、図 1(c)に示すように、ゲート電圧(V_G)を印加することで NW チャネル内に二次元電子ガス(2DEG) が生成される。図 1(d)に作製した VGAA-TFET の伝達特性を示す。図 1(d)から、n-InGaAs/p-SOI 接合界面に対して、逆バイアス条件でドレイン電流が変調されており、InGaAs/Si 界面のトンネル輸送によるスイッチング特性が得られたことが分かる。閾値電圧(V_{TH})は 0.50 V であり、 $V_G - V_{TH} = 0.25$ V の時、 $I_D = 10^{-12} - 10^{-9}$ A/ μ m の範囲で測定された SS は平均 110 mV/dec と、60 mV/dec を上回った。これは素子内の直列抵抗に起因すると考えられる。急峻な SS を実現するには、接触抵抗を接合抵抗とチャネル抵抗よりも低くする必要があるが、本素子では、ドレイン及びソースにおける接触抵抗が支配的となり、SS 劣化の要因となった。当日は、TFET 素子構造およびチャネル設計の最適化と素子特性の改善方法の関係について議論する。

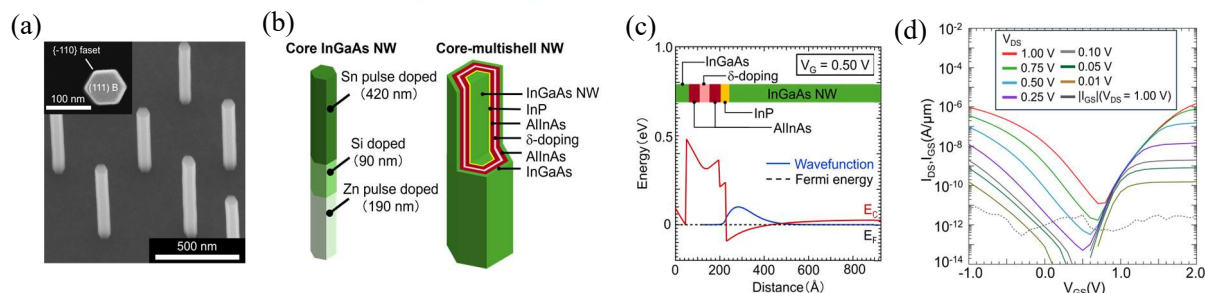


Figure 1. (a) SEM image of InGaAs CMS NWs. (b) Illustration of InGaAs/InP/AlInAs/ δ -doping/AlInAs/InGaAs CMS NW. (c) Band diagram of the InGaAs CMS NW at $V_G = 0.50$ V using the one-dimensional Poisson-Schrödinger equation. (d) Transfer characteristic of the VGAA-TFET.

参考文献

[1] K. Tomioka *et al.*, IEDM Tech. Dig. pp. 429 (2020).

InP ナノワイヤ構造相転移ヘテロ接合縦型トランジスタの作製

Fabrication of InP crystal phase transition heterojunction vertical transistor

¹ 北海道大学大学院情報科学院および量子集積エレクトロニクス研究センター

内田 凌聖¹, 東 佑樹¹, 谷山 慶太¹, 本久 順一¹, 富岡 克広¹

Graduate School of Information Science and Technology and RCIQE, Hokkaido Univ¹

Ryosei Uchida¹, Yuki Azuma¹, Keita Taniyama¹, Junichi Motohisa¹, Katsuhiro Tomioka¹

E-mail: uchida.ryosei.b0@elms.hokudai.ac.jp

【はじめに】半導体における構造相転移は、結晶構造中の準安定相を安定化し単結晶構造にすることができる。InP ナノワイヤ(NW)の場合、安定構造が閃亜鉛鉱型構造(ZB)であるが、特異な条件で成長することで、準安定構造のウルツ鉱型結晶相(WZ)が単結晶構造になる[1]。このような構造相転移材料の利点として、バンド構造が間接遷移型から直接遷移型へ変化できる他、同一材料だけでヘテロ接合構造を作製できる点がある。また、この構造相転移ヘテロ接合界面は、Type-II 型のバンド不連続性を示すことが報告されている[2]。本発表では、WZ 構造 InP ナノワイヤを有機金属気相選択成長法(MOVPE 選択成長法)で成長し、InP 基板 (ZB 構造) との接合界面で形成される構造相転移ヘテロ接合のショットキー障壁を縦型ゲートオールアラウンド(VGAA)トランジスタに応用し評価したので報告する。

【実験】スパッタリングによって SiN を 20 nm 堆積した n 型 InP (111) A 基板に、電子線リソグラフィと反応性イオンエッチング、ウェットエッチングによって円形状のマスク開口パターンを形成した。InP NW は原料に Diethylzinc (DEZn)、Trimethylindium (TMIn)、Tetraethyltin (TESn)、シラン(Silane: SiH₄)、Tertiarybutylphosphine (TBP)を用いて、成長温度 660°C、供給 V/III 比 18 で MOVPE 成長を行った。作製した InP ナノワイヤに対し、原子層堆積法によりゲート酸化膜(Hf_{0.8}Al_{0.2}O)を 10 nm、スパッタリング法によりゲート電極(W)を 200 nm 成膜した。次に、ベンゾシクロブテン(BCB)ポリマーのスピンコーティング、反応性イオンエッチングによりゲート電極とゲート酸化膜をエッチングし、ゲート構造を作製した。最後にドレイン電極(Ti/Pd/Au)、ソース電極(Ni/Ge/Au/Ni/Au)を蒸着し VGAA トランジスタ構造を作製した。

【結果】図 1 に選択成長した InPNW の SEM 像を示す。図から、へき開面{-110}面に対し、30°回転した垂直ファセット面が形成されたことから、InP NW は垂直{-211}ファセット面と(111)A で囲まれた六角柱構造を有したウルツ鉱(wurtzite)型結晶構造になることが分かる。作製した InP ナノワイヤは、図 2 に示すように、i 層 (〜540nm) / n 層 (〜200 nm) / n+層 (〜600nm) の縦接合構造をもつ。図 3 に今回作製した InP 構造相転移ヘテロ接合による VGAA トランジスタの伝達特性を示す。図から、ドレイン電流がゲート電界で変調されるスイッチング特性が得られた。これは構造相転移ヘテロ接合界面のショットキー障壁の電界変調がスイッチング動作に寄与していると考えられる。サブスレッショルド(SS)係数は 97 mV/dec であり、閾値電圧は-0.25 V、ゲートリーク電流は 10⁻¹³–10⁻¹⁰ A/μm であった。伝達特性から、VDS の増加とともに SS 係数が増加する傾向が得られた。これは VGAA 直下の i 層の長さが十分ではないと考えられる。当日は i 層の長さとの素子特性の関係についても議論する。

参考文献

[1] Y. Kitauchi *et al.*, Nano Lett., **10**, 1699-1703 (2010).

[2] A Jash *et al.*, ACS Photonics, **10**, 3143-3148 (2023).

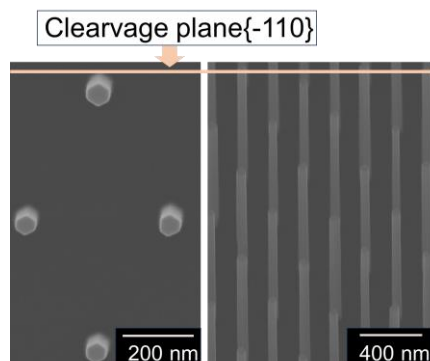


図 1. SEM image showing wurtzite InP NW array

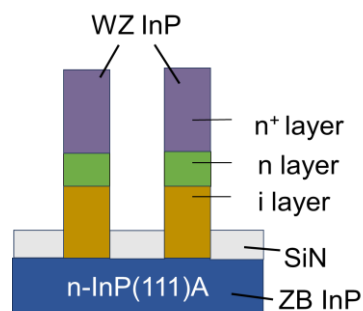


図 2. Schematic illustration of InP NW structure.

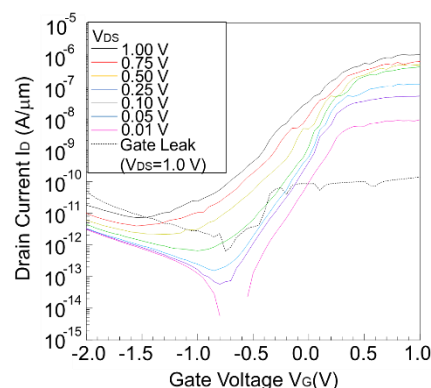


図 3. $I_{DS} - V_{GS}$ curve of vertical InP NW-FET.

単一 InAs コロイド量子ドットトランジスタにおける電気伝導特性

Electron transport through single InAs colloidal quantum dots

東北工大¹, 東北大通研²

○柴田憲治¹, 滝口智稀¹, 佐藤明¹, 佐々木悠人¹, 大塚朋廣²

Tohoku Inst. Tech.¹ and RIEC, Tohoku Univ.²

°K. Shibata¹, T. Takiguchi¹, A. Sato¹, Y. Sasaki¹, and T. Otsuka²

E-mail: kshibata@tohotech.ac.jp

コロイド量子ドット (CQD) は直径数ナノメートルの非常に小さな半導体結晶であり、近年特に光デバイスへの応用が期待されている。砒化インジウム (InAs) CQD は赤外領域で幅広く発光・吸収波長を制御できる有望な光電変換材料であり、デバイス応用に向けて CQD 間のキャリア伝導の理解と制御が重要な課題となっている。InAs 量子ドットにおける電気伝導特性は、これまでナノワイヤ系や GaAs 中に埋め込まれた自己組織化量子ドットに対して行われてきた一方で、CQD については、CQD アセンブリを含めても研究例は少ない状況にあり、単一 InAs CQD に対する報告例はない。我々はこれまで PbS CQD のキャリア伝導を単一 CQD レベルで明らかにしてきた[1]。本発表では、同様の手法を InAs CQD に適用することで、単一 InAs CQD の低温・磁場中における詳細な電気伝導特性を観測したので、その結果を報告する。

図 1 に素子構造を示す。単一 CQD に電氣的にアクセスするためのナノギャップ金属電極はフィードバック通電断線によって形成し、その上から市販のオレイン酸キャップ InAs CQD 溶液を滴下することでナノギャップ電極近傍に CQD を分散させた。また、p 型 Si 基板をバックゲートとして用いることで素子はトランジスタ構造となっている。図 2 に直径 6 nm の単一 InAs CQD 素子において $T = 4$ K で観測されたクーロン安定化ダイアグラムを示す。明瞭なクーロンダイヤモンドが観測され、素子が単一電子トランジスタとして動作することが分かった。また、クーロンダイヤモンドの大きさが電子数によって大きく変化する様子が観測され、小さなクーロンダイヤモンドのサイズから素子の帯電エネルギーは~50 meV と決定された。

当日の発表では、伝導特性の CQD サイズ依存性や、キャリアタイプの特定、磁場中での伝導特性などについて報告する。

[1] K. Shibata et. al., Nature Commun. 14, 7486 (2023).

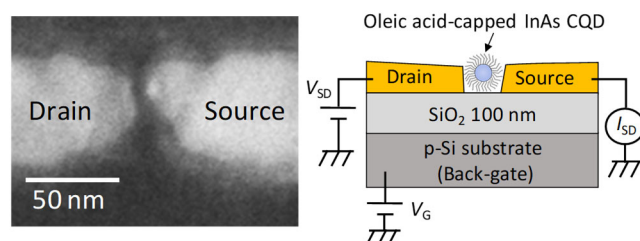


図 1: (左図) 単一 InAs コロイド QD トランジスタの SEM 写真。(右図) 素子の断面模式図と配線図。

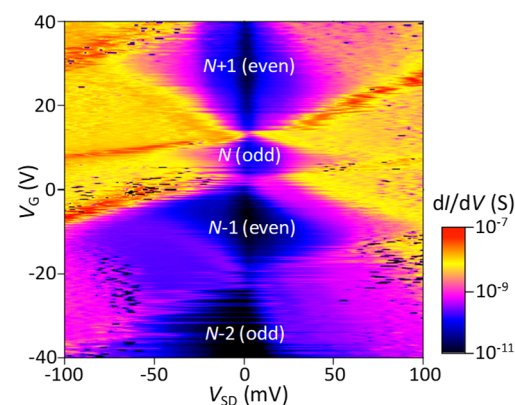


図 2: 単一 InAs CQD トランジスタにおいて観測されたクーロン安定化ダイアグラム。

Si 量子ドットへの不純物イオンドーピング

Impurity Ion Doping into Si Quantum Dots

神奈川大理, °米津和正, 水野智久

Kanagawa Univ, K. Yonetsu and T. Mizuno

r202470079mi@jindai.jp

1. 序論

Si 酸化膜中へのホットイオン注入により, 酸化膜内に Si 量子ドット (Si-QD) を形成できることが報告されている[1]. しかし, Si-QD への不純物イオンドーピングの可否, 及びその特性への影響に関しては未だ十分に解明されていない.

本研究では, Si-QD への P^+ イオンドーピングについて議論する.

2. 実験

酸化膜厚 180 nm の Si 基板に 600 °C でホット Si^+ イオン注入 (ドーズ量 $3 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$) を行い, その後, 800 °C で P^+ イオン注入を実施した. この時形成された Si 量子ドットの平均粒径は約 2.5 nm であり, 面密度は約 $2.3 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ であった[1]. P^+ 注入条件は加速エネルギー 66 keV, ドーズ量 (D_P) $1.0 \sim 9.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ とした. その後, ポスト N_2 アニール (温度 1000 °C, 時間 5 分) を行った.

図 1 の D_P に対する, 1 つの Si-QD 内に含まれる P 原子数 N_P は, 以下の式により見積もった.

$$N_P = V_{QD} \times C_P$$

ここで V_{QD} は Si-QD の体積, P^+ のピーク濃 C_P は SRIM シミュレーション[2] によって求めた. 本研究においては, QD 当たり 1–8 個の P 個数 (濃度換算 $1 \sim 10 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$) に相当することがわかる.

3. 結果

図 2(a) に PL スペクトルの D_P 依存性を示す. P^+ ドーズ量の増加に伴い PL ピークエネルギーが低エネルギー側へシフトし, バンドギャップナローイング効果が確認された[3]. 図 2(b) は PL ピークエネルギーの D_P 依存性を示す. D_P の増大と共に, PL ピークエネルギーは低下し, バンドギャップナローイング効果が増大しているのがわかる. 従って, QD への P ドーパントが実証された.

また, HAXPES による $P1s$ スペクトルでは, P–O, P–Si, および P–P の 3 つの結合状態が確認された. 特に, P–Si 結合の存在は, P 原子のドーピングが成立していることを裏付けている.

4. 結論

Si 量子ドットでも P^+ イオンドーピングが実現し, バンドギャップ・ナローイング効果が確認された.

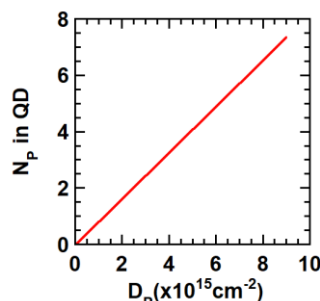
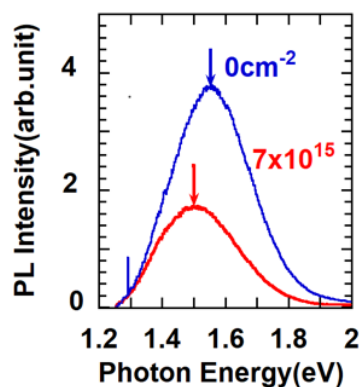
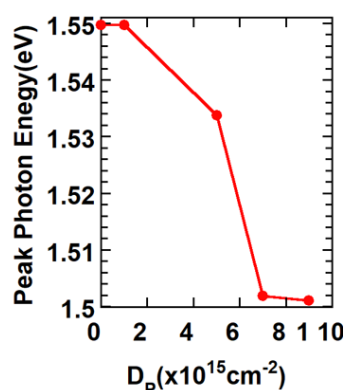


図 1 Si-QD 中の P^+ 原子数の D_P 依存性.



(a)



(b)

図 2 (a) PL スペクトルの D_P 依存性. 青 $D_P = 0 \text{cm}^{-2}$, 赤 $7.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$. (b) PL ピークエネルギーの D_P 依存性.

文献: [1] T. Mizuno et al., JAP **133**, 145703 (2023). [2] J. F. Ziegler, <http://www.srim.org>. [3] T. Mizuno et al., JJAP **54**, 04DC05 (2015)

Si 量子ドット含有 SiO_x 薄膜の光学特性および MIS デバイスの電気的特性評価

Optical Properties of SiO_x Thin Films Containing Si Quantum Dots and Electrical Characterization of MIS Devices

明大理工, °近藤 利哉, 勝俣 裕

Meiji Univ., °Toshiya Kondo, Hiroshi Katsumata

E-mail: ce241037@meiji.ac.jp

【はじめに】

Si 量子ドット (Si quantum dot: Si-QD) を用いた太陽電池は、光起電力デバイスの変換効率を向上させると期待されている[1]。屋内用光起電力素子 (Indoor Photovoltaic: IPV) に適した材料のバンドギャップは、約 1.8~2.0 eV と報告されている[2]。Si-QD は結晶粒径によりバンドギャップが制御できるため、IPV に適した材料設計が可能と考える。本研究では、スパッタリング成膜時における Si チップ/SiO₂ ターゲットの面積比を変化させることで、Si-QD 含有 SiO_x 薄膜の物性評価を行うとともに、同薄膜を用いた光起電力デバイスの作製およびその電気的特性の評価を行った。

【実験方法】

SiO₂ ターゲット (4N, $\phi 101.6 \times t 5$ mm) 上に、Si チップ 1 (5N, $10 \times 10 \times t 1$ mm) と Si チップ 2 (5N, $5 \times 5 \times t 1$ mm) を同心円状に配置し、c 面サファイア基板の上に RF マグネトロンスパッタ法を用いて、厚さ (t) 700-800 nm の Si 添加 SiO_x 複合薄膜を成膜した。Si チップと SiO₂ ターゲットの面積比 (r_a) は、 $r_a = 0.00$ 、0.10、0.20 の 3 通りとした。成膜後、赤外線ランプ加熱装置を用いて、Ar 雰囲気中にて熱処理温度 (T_a) 1000°C で、熱処理時間 (t_a) 30 min または 60 min の熱処理を行った。薄膜の評価方法として X-ray diffraction (XRD)、光透過、Photoluminescence (PL) 法等を用いた。

また、n 型 Si(100) 基板 ($\rho = 3-5 \Omega \cdot \text{cm}$) 上に同薄膜 ($t = 100$ nm) を成膜し、薄膜表面には楕円および点電極を形成するためにメタルマスクを用いて、Al ($t = 300$ nm) または ITO ($\text{In}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2 = 90:10 \text{ wt\%}$, $t = 100$ nm) を成膜した。Si 基板裏面に正方形 Al 電極 ($t = 300$ nm) を蒸着して MIS デバイスを作製し、I-V (暗所および白色 LED 照射下)、C-V、およびインピーダンス測定を行った。

【結果および考察】

Fig. 1 に異なる r_a で作製した試料の PL スペクトルを示す。Fig. 1 より、 $r_a = 0.10$ の試料では 800 nm 付近に Si-QD に起因する PL ピークが観測されたが、 $r_a = 0.20$ ではその PL 強度が著しく低下し、明瞭な PL ピークは確認されなかった。これは $r_a = 0.20$ の試料において、粒径の大きな QD が主に形成され、間接遷移型が支配的になったと示唆される。Fig. 2 に異なる r_a で成膜した薄膜を用いた MIS デバイスの J-V 特性を示す(主プロットは暗所、インセットは白色 LED 照射下の原点付近)。インセットに注目すると、 $r_a = 0.20$ で作製したデバイスでは、J-V 特性が負電流側に大きくシフトし、短絡電流密度 ($-1.39 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$) および開放電圧 ($1.76 \times 10^{-3} \text{ V}$) が観測された。

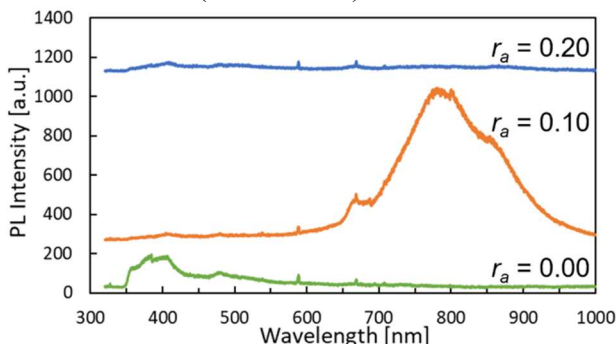


Fig. 1 PL spectra for samples prepared with different r_a .

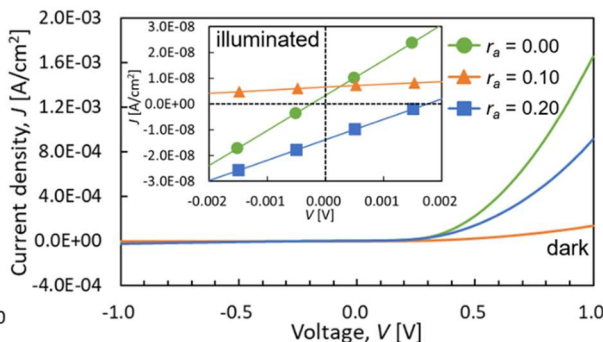


Fig. 2 J-V characteristics of MIS devices under dark conditions; inset shows the 0 V region under illumination.

[1] G. Shilpa et al., Materials Science for Energy Technologies, **6**, 533-546 (2023).

[2] Monika Freunek Muller, "INDOOR PHOTOVOLTAICS Materials, Modeling and Applications", Wiley-Scrivener Publishing, pp. 28-31 (2018).

緑色発光 InGaN/GaN 量子ドットのキャリア緩和ダイナミクス

Carrier relaxation dynamics in green InGaN / GaN quantum dots

早大先進理工¹, 蘇州ナノテク・ナノバイオニクス研究院, 中国科学院²

○尾崎 玲帆¹, 中間 優斗¹, 岩崎 陸¹, 竹内 淳¹, Shulong Lu², Xue Zhang², Wenxian Yang²

Waseda Univ.¹, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics (SINANO), Chinese Academy of Science.²,

○R. Ozaki¹, Y. Nakama¹, R. Iwasami¹, A. Tackeuchi¹,

Shulong Lu², Xue Zhang² and Wenxian Yang²

E-mail: kumareiho@akane.waseda.jp

InGaN は、優れた光学特性と可視光全域をカバーする発光スペクトルを持つため、固体照明や高密度光記録、フルカラーディスプレイといった用途における可視発光ダイオードおよびレーザーダイオードとして広く利用されている。特に InGaN 量子ドットは、InGaN 量子井戸と比べて高い発光効率や長波長での発光に優れており、今後の応用が期待されている。^{1,2} 本研究で用いた試料は、分子線エピタキシー法により作製した InGaN 量子ドットであり、室温での発光のピーク波長は緑色の 521 nm である。サファイア基板上的の GaN 層に n ドープした GaN をバッファ層として積層し、その上に 12 nm 厚の GaN バリア層を含む 3 周期の InGaN/GaN 量子ドット層を、Stranski-Krastanov (SK) モードにより自己組織化成長させた。SK モードによって形成された量子ドットは、サイズや形状、ドット間距離にばらつきが見られるため、発光スペクトルの広がりや発光効率の低下といった課題を抱えている。このため、発光特性やキャリア緩和過程の解明が重要となる。

本研究では InGaN 量子ドットの時間分解フォトルミネッセンス(PL)測定により、ドット間のトンネル効果によるキャリア移動を仮定したキャリア緩和過程の解析を行った。

時間分解 PL 測定により得られた PL 強度の時間変化を、次の二重指数関数で近似し、減衰時定数を求めた。

$$I = ae^{-t/\tau_1} + be^{-t/\tau_2}$$

それぞれ、 τ_1 は早い成分を、 τ_2 は遅い成分を表している。Fig.1 に 300 K, 励起波長 405 nm, 励起光強度 10 mW での PL スペクトルと PL 強度の減衰時定数の波長依存性を示す。発光のピーク波長は 521 nm であった。どちらの成分でも、波長と時定数は正の相関関係を持つことが分かる。これはエネルギー準位の高いドットからエネルギー準位の低いドットへキャリアが移動するトンネリングが起きているためと考えられる。

この PL 緩和挙動に対して、以下のレート方程式モデルを適用し、再結合時間 τ_r およびトンネル時間 τ_t をフィッティングによって算出した。³

$$\frac{dN_i}{dt} = -\frac{N_i}{\tau_r} - \sum_{j(<i)} \frac{N_i D_j}{\tau_t} + \sum_{(i<)j} \frac{N_j D_i}{\tau_t}$$

フィッティングして得られた再結合時間は 950 ps、トンネル時間は 200 ps であった。過去に当グループが異なる構造の InGaN 量子ドット(発光ピーク波長: 463 nm)に対して行った研究では、同様のモデルによる再結合時間は 70 ps、トンネル時間は 140 ps であった。⁴ 再結合時間が大幅に増加した要因としては、高い In 組成比の影響が考えられる。

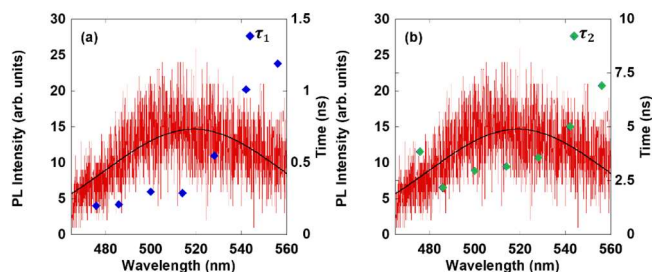


Fig.1 Wavelength dependence of the fast and slow recombination time components at temperature 300 K.

¹ X. Zhang, W. Yang, Z. Xing, H. Qiu, Y. Gu, L. Bian, S. Lu, H. Qin, U. Cai and Y. Suzuki. Crystals 11, 1312 (2021).

² X. Zhang, W. Yang, Z. Xing, H. Qiu, Y. Gu, L. Bian, S. Lu, H. Qin, Y. Cai, Y. Suzuki, S. Kaneko, Y. Matsuda, S. Izumi and Y. Nakamura. Nanomaterials 12, 800 (2022).

³ A. Tackeuchi, Y. Nakata, S. Muto, Y. Sugiyama, T. Usuki, Y. Nishikawa, N. Yokoyama and O. Wada. Jpn. J. Appl. Phys. 34, L1439 (1995).

⁴ K. Hasegawa, Y. Nakamura, K. Kitami, Y. Hirano, A. Tackeuchi, S. Lu, X. Zhang and W. Yang. the 83rd JSAP Autumn Meeting 20p-C401-1 (2022).

GaAs バルクにおける電子スピン緩和時間の定量的評価 Quantitative Analysis of Electron Spin Relaxation Time in Bulk GaAs

産総研ハイブリッド機能集積研究部門¹, 筑波大院数理²,

○揖場聡¹, 大野裕三^{1,2}

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)¹, Univ. of Tsukuba²

○Satoshi Iba¹, Yuzo Ohno^{1,2}

E-mail: s.iba@aist.go.jp

半導体中で電子スピンを保持できる時間（スピン緩和時間）を決定づけるメカニズムとして、これまでにさまざまなモデルが提案されてきた。中でも、代表的な III-V 族化合物半導体である GaAs バルクにおいては、室温で D'yakonov-Perel (DP) 機構が支配的であることが知られている [1]。DP 機構は、伝導帯における運動量依存のスピン分裂に起因して、電子がランダムなラーモア歳差運動を示すことでスピン緩和が生じるモデルである。このため、スピン分裂の大きさを示すドレッセルハウス係数と運動量緩和時間がスピン緩和時間に強く影響する。

これまでの先行研究では、理論式を用いた解析が主に行われてきたが、近年報告された信頼性の高いドレッセルハウス係数 ($\gamma_D = 10 \text{ eV}\text{\AA}^3$) [2] と比較して、約 2 倍大きな値が用いられていること、また、運動量緩和時間が過度に短く見積もられていることが課題である [3]。本研究では、想定される各種散乱機構を考慮して運動量緩和時間を詳細に評価した上でスピン緩和現象をシミュレーションすることで、実験で得られたスピン緩和時間を高精度に再現したので報告する。

運動量緩和時間の計算には、LO フォノン散乱、音響フォノン散乱、電子-電子散乱、および電子-正孔散乱を考慮した。また、各散乱機構を弾性散乱として取り扱い、電子スピン緩和時間の電子エネルギー依存性を評価した。さらに、実験値との比較を行うため、フェルミディラック分布を考慮して電子スピン緩和時間の期待値を算出した。

図 1 に、時間分解フォトルミネッセンス測定により室温で評価したアンドープ GaAs(001)基板の電子スピン緩和時間の光励起電子密度依存性と、 $\gamma_D = 10 \text{ eV}\text{\AA}^3$ を用いたシミュレーション結果を示す。実験結果と計算結果は良好に一致しており、本シミュレーション手法の妥当性を裏付けている。また、スピン緩和時間が電子密度 10^{17} cm^{-3} 台でピークを示す理由として、電子密度に対して正の傾向を示すラーモア歳差周波数と、負の傾向を示す運動量緩和時間とのバランスにより決定されていることが、計算から明らかとなった。

謝辞

本研究は科研費 24H00426, 24K01391 の助成を受けた。

参考文献

- [1] M. I. D'yakonov *et al.*, Sov. Phys. Solid State 13, 3023 (1972).
- [2] M. Kohda *et al.*, Semicond. Sci. Technol. 32, 073002 (2017).
- [3] S. Oertel *et al.*, Appl. Phys. Lett. 93, 132112 (2008).

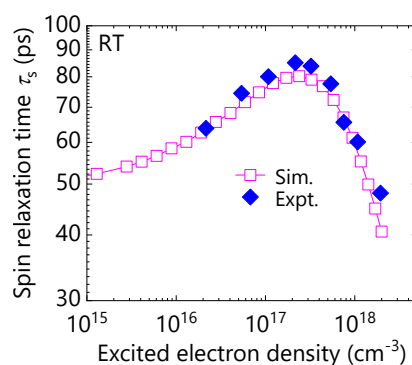


Fig. 1 Electron density dependence of electron spin relaxation time in undoped bulk GaAs at room temperature.