

一般セッション(口頭講演) | 13 半導体：13.6 ナノ構造・量子現象・ナノ量子デバイス

📅 2025年3月17日(月) 13:30 ~ 16:00 📍 K302 (講義棟)

[17p-K302-1~8] 13.6 ナノ構造・量子現象・ナノ量子デバイス

中岡 俊裕(上智大)、太田 竜一(NTT)

◆ 注目講演

13:30 ~ 14:00

[17p-K302-1]

[第3回ダイバーシティ&インクルージョン賞 女性研究者研究業績賞 受賞記念講演] ナノ構造半導体の輸送現象解明およびスピン軌道相互作用の電気制御の研究

○高瀬 恵子¹ (1.農工大)

◆ 奨励賞エントリー

14:00 ~ 14:15

[17p-K302-2]

半導体超格子ミニバンド中の電子伝導における運動量緩和過程の影響

○前田 凧¹、朱 翔宇¹、ベスコン マーク²、長井 奈緒美¹、黒山 和幸¹、平川 一彦¹ (1.東大生研・ナノ量子機構、2.マルセイユ大IN2MP)

◆ 奨励賞エントリー ◆ 英語発表

14:15 ~ 14:30

[17p-K302-3]

Chiral terahertz photocurrent in quantum point contact/quantum dot-split ring resonator coupled systems in the quantum Hall regime

○(D)Jing Huang¹, Kazuyuki Kuroyama¹, Jinkwan Kwoen¹, Yasuhiko Arakawa¹, Kazuhiko Hirakawa¹ (1.Univ. of Tokyo)

◆ 英語発表

14:30 ~ 14:45

[17p-K302-4]

Electron temperatures in double well quantum cascade cooling structures (IV)

○(P)Xiangyu Zhu¹, Gueric Etesse², Marc Bescond^{1,2}, Gerald Bastard³, Naomi Nagai¹, Kazuhiko Hirakawa¹ (1.IIS/LIMMS, UTokyo, 2.IM2NP-CNRS, AMU, 3.Ecole Normale Superieure)

◆ 奨励賞エントリー

15:00 ~ 15:15

[17p-K302-5]

デュアルコム非同期光サンプリングによる量子ドット集合体の低温下ポンププローブ信号空間マッピング

○阿讃坊 元^{1,2}、柴田 理来¹、高橋 雄士郎^{1,2}、赤羽 浩³、渡邊 紳^{1,2}、早瀬 潤子^{1,2} (1.慶大理工、2.慶大 CSRN、3.NICT)

◆ 奨励賞エントリー ◆ 英語発表

15:15 ~ 15:30

[17p-K302-6]

Spectral-Dependent Performance of Colloidal PbS Quantum Dot Epitaxially-Connected Superlattice Photodetectors

○(D)Dadan Suhendar¹, Ricky Dwi Septianto^{2,1}, Satria Zulkarnaen Bisri^{1,2} (1.Tokyo Univ. Agri. & Tech, 2.RIKEN CEMS)

◆ 英語発表

15:30 ~ 15:45

[17p-K302-7]

Fabrication of vertically aligned Si nanowires and nanotubes structures by top-down methods

○(M1)Bowen MA^{1,2}, Jevasuwan Wipakorn¹, Naoki Fukata^{1,2} (1.NIMS, 2.Univ. of Tsukuba)

15:45 ~ 16:00

[17p-K302-8]

シリカコート量子ドットの光子源としての特性改善とプレーナー配置技術の開発

○城詰 大翔¹、プリブル 一生¹、池田 征弥¹、吉國 希望¹、向井 剛輝¹ (1.横浜国大院理工)

ナノ構造半導体の輸送現象解明および スピン軌道相互作用の電気制御の研究

Studies on transport phenomena and

electrical control of spin-orbit interaction of semiconductor nanostructures

農工大工 ○高瀬恵子

Tokyo Univ. of Agriculture and Tech.

E-mail: takase@go.tuat.ac.jp

スピン軌道相互作用は電子スピンと電子の軌道角運動量を結合させる量子相対論的效果であり、III-V 属半導体ではその効果が大きいことが知られている。スピン軌道相互作用を電氣的に制御してスピン回転やスピン反転を引き起こすことは、スピン FET やスピン量子ビット、トポロジカル量子コンピュータへの応用の点で注目されている。本講演では、III-V 属半導体ナノワイヤから作製した様々な構造の電界効果トランジスタにおいて、ラッシュバ型スピン軌道相互作用を低ゲート電圧で非常に大きく制御することで、従来報告された二次元量子井戸や量子ワイヤをしのぐ巨大スピン軌道相互作用の実現に成功した私たちの研究 [(1)-(4)] について報告する。これらの一連の研究成果は、将来的な低消費電力・ナノスケール・スピン FET の実現に大きく貢献する。

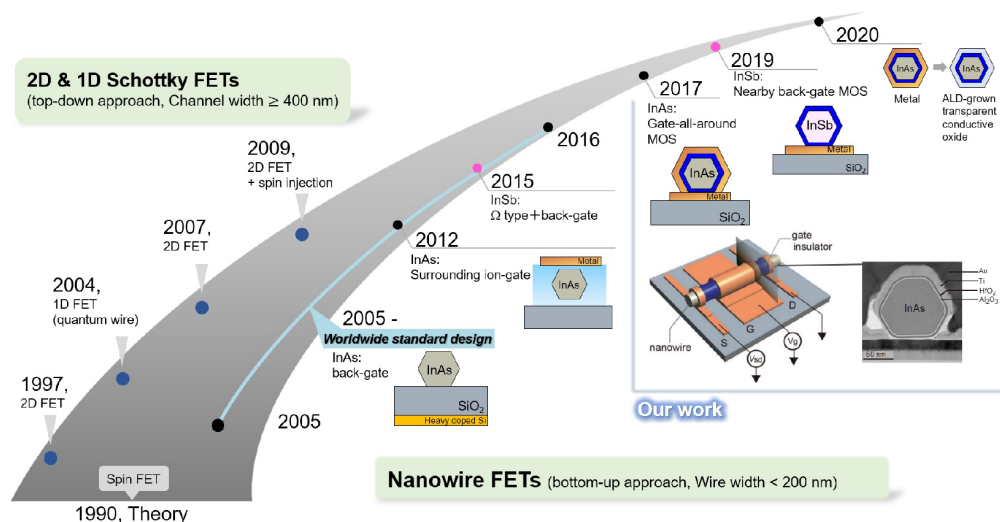


Fig. 1. スピン軌道相互作用の電気制御の研究の歴史。2017年以降は私たちの研究成果である [(4)参照]。

参考文献

- (1) K. Takase et al., Sci. Rep. 7, 930 (2017)., 高瀬恵子、佐々木智 : 応用物理 87, 678 (2018).
- (2) K. Takase et al., Appl. Phys. Express 12, 117002 (2019). (Open access)
- (3) K. Takase et al., Appl. Phys. Lett. 119 013102 (2021). (Editor's Pick)
- (4) 高瀬恵子 et al., : 表面と真空 64, 118, (2021)、日本女性科学者の会学術誌, 21, 30, (2021).

半導体超格子ミニバンド中の電子伝導における運動量緩和過程の影響

Impact of momentum relaxation processes on electron transport in Semiconductor Superlattices

¹東大生研・ナノ量子機構、²マルセイユ大 IN2MP ^{○1}前田 凧、¹朱 翔宇、²ベスコン・マーク、

¹長井 奈緒美、¹黒山 和幸、¹平川 一彦

¹IIS・INQIE, Univ. of Tokyo, ²IN2MP, Aix-Marseille Univ.

^{○1}Nagi Maeda, ¹Xiangyu Zhu, ²Marc Bescond, ¹Naomi Nagai, ¹Kazuyuki Kuroyama, ¹Kazuhiko Hirakawa

E-mail: nagi@iis.u-tokyo.ac.jp

近年、テラヘルツ(THz)ギャップを克服すべく、半導体テラヘルツ (THz) 発振素子の研究が盛んに行われている。THz 帯域へのアプローチの一つとして、Esaki と Tsu により半導体超格子(SL)中の電子のブロッホ振動を利用した発振器が提案されて50年以上経過している[1]。この間、ブロッホ振動の観測やブロッホ利得の確認[2]などが行われたが、実際に発振素子を作製するために SL にドーピングを行うと、ブロッホ利得が発生する負性微分コンダクタンス(NDC)領域で高電界ドメインが発生するため SL 内部の印加電圧が不均一になるという問題が発生し、ブロッホ発振器は未だに実現されていない。本研究では、電子デバイスとしてのブロッホ発振素子を実現に向けて、基底ミニバンド幅を同一としつつ、井戸幅をわずかに変化させた4つのSL試料(sample 1-4)の電気伝導特性を精密に調べた。

本研究で用いた試料は、分子線エピタキシー法により GaAs 層と Al_{0.4}Ga_{0.6}As 層を交互に100周期積層したSL構造であり、 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ のSiドーピングを行った。試料を $36 \times 36 \text{ mm}^2$ のメサ構造へ加工し、室温で電流密度-電圧(J - V)特性の測定を行った。表1に成長したSL試料の井戸幅 L_w 、バリア幅 L_b 、周期 d 、基底ミニバンド幅 Δ を示す。ミニバンド中を伝導する電子の電流密度はボルツマン方程式[3]から与えられ、

$$J = env_p \frac{\frac{E}{E_c}}{1 + \left(\frac{E}{E_c}\right)^2 \left(1 + \frac{\tau_e}{\tau_m}\right)} \quad (1)$$

である。 τ_e , τ_m はそれぞれエネルギー緩和時間と運動量緩和時間、 \hbar は還元プランク定数、 J は電流密度、 e は電荷素量、 $v_p = \Delta d/2\hbar$ は最大電子速度、 $E_c = \hbar(1/\tau_e + 1/\tau_m)/ed$ はNDC発生時の臨界電界、 n は電子密度、 E は印加電界である。式(1)を高電界ドメイン発生以下の電圧の J - V 特性にフィッティングを行うことで、エネルギー緩和時間と運動量緩和時間を得ることができる。図1に井戸幅に対する sample 1-4 の室温における運動量緩和時間を示す。単一量子井戸において、運動量緩和時間は界面ラフネス散乱によって井戸幅 L_w の6乗に比例して変化することが知られているが[4]、本研究では、多数の量子井戸が結合した系であるSLにおいても、運動量緩和時間が井戸幅 L_w の6乗に比例して変化することを明らかにした。本講演では、以上の結果に加え、緩和時間の温度依存性およびNDCの発生と緩和機構との関係についても報告する。

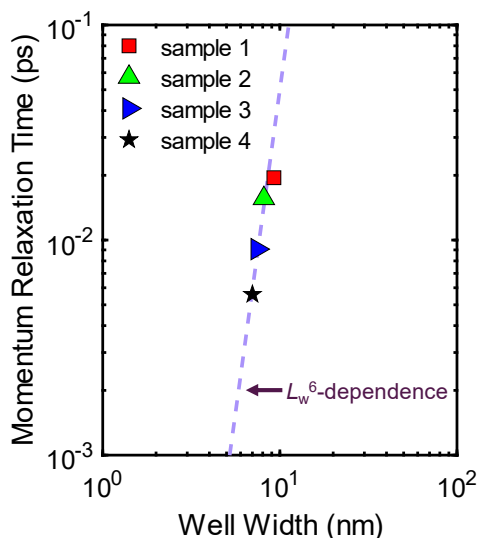


図1. 超格子の井戸幅に対する運動量緩和時間の依存性

ことが知られているが[4]、本研究では、多数の量子井戸が結合した系であるSLにおいても、運動量緩和時間が井戸幅 L_w の6乗に比例して変化することを明らかにした。本講演では、以上の結果に加え、緩和時間の温度依存性およびNDCの発生と緩和機構との関係についても報告する。

[1] L. Esaki and R. Tsu, IBM J. of Res. and Develop. 14, 61 (1970). [2] N. Sekine and K. Hirakawa, Phys. Rev. Lett. 94 057408 (2005). [3] J. Grenzer, et al., Semicond. Sci. and Technol. 13, 733 (1998). [4] H. Sakaki, T. Noda, K. Hirakawa, M. Tanaka, T. Matsusue, Appl. Phys. Lett. 51, 1934 (1987).

表1 sample 1-4 の超格子構造と基底ミニバンド幅

	L_w nm	L_b nm	d nm	Δ meV
sample 1	9.25	0.75	10.00	37
sample 2	8.13	1.13	9.26	38
sample 3	7.45	1.50	8.95	35
sample 4	7.00	1.58	8.58	38

Chiral terahertz photocurrent in quantum point contact/quantum dot-split ring resonator coupled systems in the quantum Hall regime

(D)黄靖¹, 黒山 和幸¹, 權 晋寛¹, 荒川 泰彦¹, 平川 一彦¹

the Univ. of Tokyo¹

E-mail: jhuang@iis.u-tokyo.ac.jp

Electrical detection of strong coherent light-matter interaction using a quantum point contact (QPC) has been realized recently, which provides new ways for realizing ultrastrong coupling (USC) [1] and investigating quantum transport under the influence of cavity field [2]. However, the physical processes underlying this electrical detection method have not been fully understood, especially the origin of terahertz (THz) photocurrent in the USC regime [3]. Here we investigate THz-induced photocurrent in a coupled QPC-split ring resonator (SRR) system fabricated on a GaAs heterostructure wafer with a two-dimensional electron gas (2DEG) and report the dependence of the photocurrent on the polarities of a source-drain bias applied to the QPC and a magnetic field, as shown in Fig. 1. The photocurrent spectra in the middle and right panels of Fig. 1 show an anti-crossing between the cyclotron resonance of 2DEG and the resonance mode of the SRR. We show that the polarity of the THz photocurrent near the anti-crossing region depends only on the direction of the perpendicular magnetic field, indicating its chiral nature. Such a chiral photo-response does not result from electron heating or rectification, and it is successfully explained by nonequilibrium edge channel transport via light-matter interaction, through which the generation of Landau polaritons changes the electrochemical potential of the edge channels.

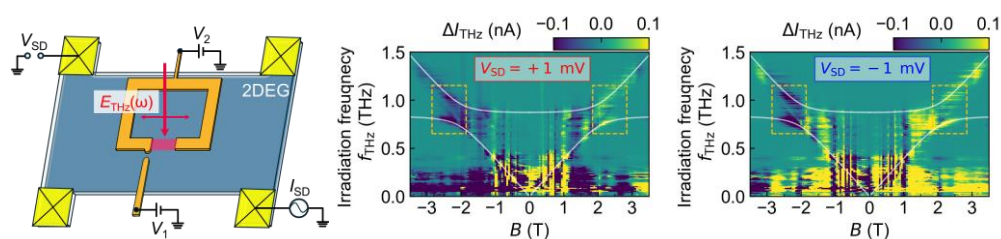


Fig.1 Schematic of QPC-SRR coupled system and colormap of THz-induced photocurrent at different magnetic fields and THz frequencies.

References:

- [1] Kuroyama, K., et al. *Physical Review Letters* 132.6 (2024): 066901.
- [2] Paravicini-Bagliani, Gian L., et al. *Nature Physics* 15.2 (2019): 186-190.
- [3] Kuroyama, K., et al. *Nano Letters* 23.24 (2023): 11402-11408.

二重量子カスケード冷却構造中の電子温度 (IV)

Electron temperatures in double well quantum cascade cooling structures (IV)

東大生研・LIMMS¹、IM2NP エクス・マルセイユ大学²、エコールノルマルスーパーリア³○朱翔宇¹、ゲリック・エテッセ²、マーク・ベスコンド^{1,2}、バスタード・ジェラルド³、長井奈緒美¹、平川一彦¹IIS/LIMMS, Univ. of Tokyo¹, IM2NP-CNRS, AMU², Ecole Normale Supérieure³○Xiangyu Zhu¹, Gueric Etesses², Marc Bescond^{1,2}, Gerald Bastard³, Naomi Nagai¹, Kazuhiko Hirakawa¹

E-mail: zxy@iis.u-tokyo.ac.jp

Managing rapid increase in thermal power densities associated with device miniaturization is a major technological challenge. Development of new efficient cooling technologies is therefore urgently required for future progress in electronics. Solid-state cooling devices can be one answer, owing to their high efficiency and compatibility for integration. To achieve efficient cooling, we have been working on semiconductor double barrier heterostructures to utilize sequential thermionic cooling effect [1,2].

In this work, we have studied a double quantum well (QW) structure as a model system for the quantum cascade cooling (QCC) structure. The structure consists of two 5 nm-thick $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ QWs with different Al compositions ($x = 0.1$ for QW1 and $x = 0.2$ for QW2) sandwiched by $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ or $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ barriers (see Fig. 1(a)). As an electron cascades through the double QW structure, it can absorb multiple phonons, which can improve the cooling efficiency, when compared with a single QW structure. The tall $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ barriers are designed to block above-barrier thermal current from QW1 and the emitter, making the sequential cascading transport dominant.

The QCC structure we investigate is shown in Fig. 1(a). PL spectra from bulk n-GaAs, QW1, and QW2 were analyzed and electron temperatures (T_e 's) in the respective layers were determined as a function of V (Fig. 1(b) and 1(c)) [3].

We observe electron cooling effect in both QWs with anti-correlated oscillatory behavior, showing characteristic features at $V = \sim 0.2$ V/ ~ 0.4 V/ ~ 0.6 V. From the band structure expected from Fig. 1(a), we have found that the correlated oscillation in T_e between in QW1 and QW2 is qualitatively explained by LO phonon-assisted transition process between quantized states E1 (QW1) & E2 (QW2). The anti-correlated oscillatory feature in QW2 is weak at 300K (see Fig. 1(b)), but becomes much more pronounced at lower temperatures (see Fig. 1(c)). Significant sequential transition and electron cooling effect are observed at 150K, which is well explained by NEGF calculations. More details will be discussed in the presentation.

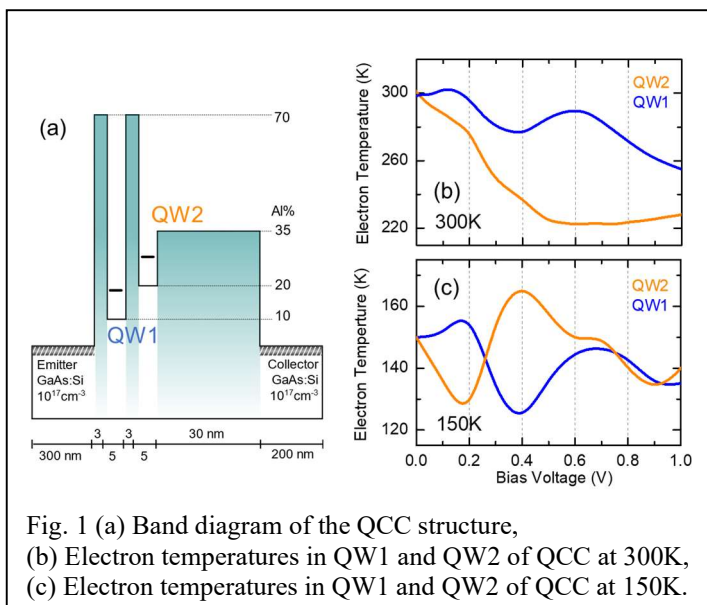


Fig. 1 (a) Band diagram of the QCC structure, (b) Electron temperatures in QW1 and QW2 of QCC at 300K, (c) Electron temperatures in QW1 and QW2 of QCC at 150K.

References

- [1] A. Yanguis, M. Bescond, T. Yan, N. Nagai, K. Hirakawa, *Nature Commun.* **10**, 4504 (2019).
- [2] X. Zhu, M. Bescond, G. Bastard, K. Hirakawa, et al., *Phys. Rev. Appl.* **16**, 064017 (2021).
- [3] X. Zhu, C. Salhani, G. Etesses, K. Hirakawa, et al., *Phys. Rev. Appl.* **22**, 034012 (2024).

デュアルコム非同期光サンプリングによる 量子ドット集合体の低温下ポンププローブ信号空間マッピング

Pump-Probe Signal Mapping of a Quantum Dot Ensemble under Cryogenic Conditions Using Dual-Comb Asynchronous Optical Sampling

慶大理工¹, 慶大 CSRN³, NICT³○(B4)阿讃坊 元^{1,2}, (M2)柴田 理来¹, (M2)高橋 雄士郎^{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. Shibata¹, Y. Takahashi^{1,2}, K. Akahane³, S. Watanabe¹, 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を保ちながら 2,3 桁計測時間を短縮できる。我々と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から、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信号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によって QD 集合体のポンププローブ信号空間マッピングに初めて成功した。その結果、100 ps 以内で減衰する速い振動と、1.5 ns 程度で緩和する遅い信号を各測定点で観測することができた。

【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 伝送を行った。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、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サンプル表面上で走査した (Fig. 1(b))。QD 集合体の一つ一つの QD は楕円状であることから、励起子準位が長軸 $[\bar{2}33]$ 方向と短軸 $[0\bar{1}\bar{1}]$ 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^* を、遅い緩和からポピュレーション緩和時間 T_1 を求めた。

【結果】

QD 集合体の速い緩和・遅い緩和信号のマッピング結果を(Fig. 2)に示す。縦 2 mm、横 2 mm 方向に異なる点におけるポンププローブ信号の観測に成功した。1 測定点あたりにかかる積算時間は 0.22 s であった。仮に 100×100 点をマッピングしても積算時間のみを考えると 37 分程度となる。この手法は QD 集合体以外の試料に対する光学測定にも用いることができると期待される。より計測点を増やした場合の結果についても報告を行う予定である。

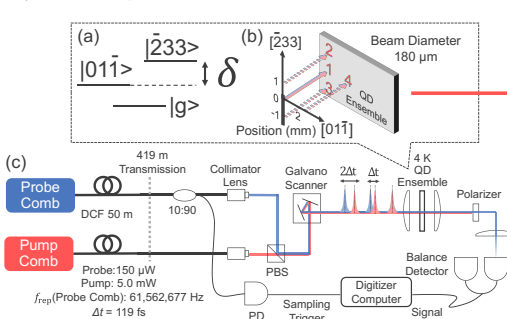


Fig. 1 (a)QD 内励起子エネルギー分裂
(b)ガルバノスキャナによる走査 (c)光学系

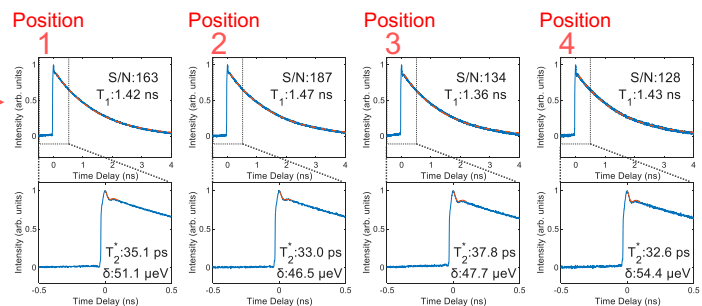


Fig. 2 各位置での S/N, ポピュレーション緩和時間 T_1 , 不均一位相緩和時間 T_2^* ,エネルギー分裂 δ

【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).

Spectral-Dependent Performance of Colloidal PbS Quantum Dot Epitaxially-Connected Superlattice Photodetectors

Dadan Suhendar¹, Ricky Dwi Septianto^{2,1}, Satria Zulkarnaen Bisri^{1,2}

Tokyo Univ. Agri. & Tech¹, RIKEN CEMS²

E-mail: satria-bisri@go.tuat.ac.jp

Colloidal quantum dots (CQDs) present a breakthrough to overcome the limitations of conventional photodetector materials. This class of materials can absorb broad spectra of photon energies and minimize energy losses associated with phonon generation during charge relaxation. CQDs feature tunable band gaps, enabling precise control over light absorption across various wavelengths. Additionally, they exhibit a phenomenon known as multiple exciton generation (MEG), allowing high-energy photons to produce multiple charge carriers¹, thereby significantly enhancing quantum efficiency compared to traditional materials. However, the relatively modest charge carrier mobility and poor air stability of CQDs pose substantial challenges to developing high-performing photodetector devices. Recently, our group found that epitaxially connected QD superlattices demonstrated high electron mobility values, suggesting the potential for delocalized band transport in electronic minibands². Nevertheless, the existence of charge multiplication and the capability to detect a broad spectrum of photon energies from this high carrier mobility and the potential of delocalized transport remains uncertain, as the quantum confinement effect may be compromised.

Here, we present the tunable responsivity of epitaxially-connected quantum dots superlattice (QDSL) photodetector under irradiation of various wavelengths and demonstrate air-stable operation. To fabricate photodetectors consisting of a single monolayer of QD superlattice, we employed the Langmuir–Schaefer assembly technique in combination with precise QD facet control, similar to our previous reports^{2,3}. In order to enable performance measurement under atmosphere exposure, the photodetector devices were passivated using a PVDF-based block copolymer⁴ (Figure 1a). The use of this hydrophobic block copolymer prevented device degradation upon oxygen and moisture. The spectral response of the photodetector performance was measured using a pulsed supercontinuum laser with wavelengths selected through monochromator arrangements. Exposure to shorter wavelengths, which possess higher photon energy, yields larger responsivity values. These values are even higher than the device's responsivity when subjected to irradiation closer to the QD excitonic peak. This increased responsivity at shorter wavelengths can be attributed to the more significant number of photocarrier generation. Detailed measurement in this direction may unravel the possibility of observing MEG phenomena from the epitaxially-connected QD superlattices. These results provide a novel pathway for developing high-performance and stable QD-based photodetector devices for hyperspectral detection.

Reference:

1. C. Smith and D. Binks, *Nanomaterials*, 4, 19-45 (2014)
2. R. D. Septianto, S. Z. Bisri, et al. *Nat Commun.* 14, 2670 (2023)
3. The 85th JSAP Autumn Meeting, 2024 [16p-C301-7]
4. A. G. Shulga, S. Z. Bisri, et al. *Adv. Electron. Mater.* 2, 1500467 (2016)

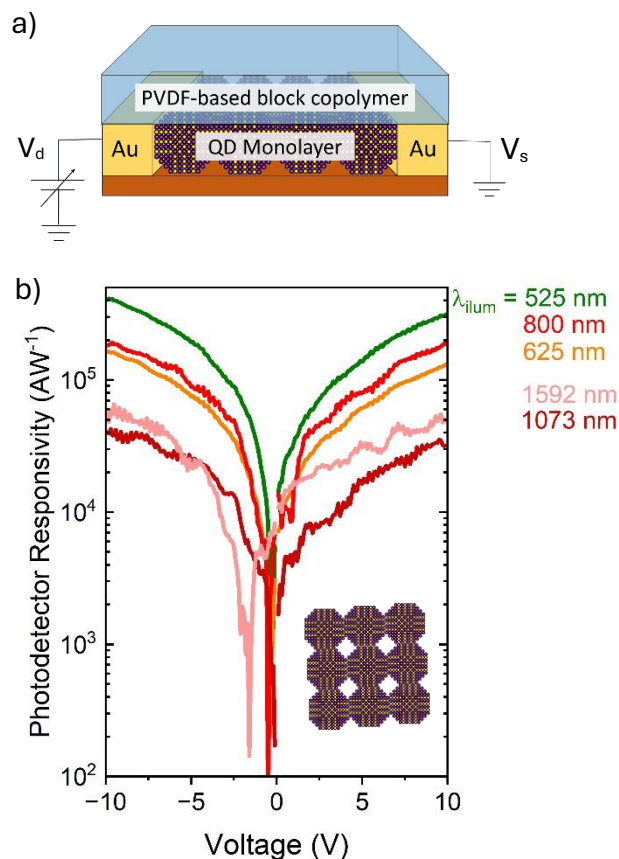


Figure 1. a) Schematic of photodetector device utilizing monolayer of epitaxially-connected quantum dot superlattice, and b) the photodetector responsivity in the different illumination wavelengths. The absorption peak of the PbS QD is $\lambda_{\text{abs}} = 1600$ nm.

Fabrication of vertically aligned Si nanowires and nanotubes structures by top-down methods

MA Bowen^{1,2}, Wipakorn Jevasuwan¹, Naoki Fukata^{1,2}

¹Research Center for Materials Nanoarchitectonics, National Institute for Materials Science, Tsukuba, Ibaraki, Japan

²Subprogram in Pure and Applied Science, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, Japan

Introduction

One-dimensional nanostructures such as nanowires (NWs), nanotubes (NTs) and nanoneedles (NNs) are extensively applied in biomedicine, including biosensors, drug delivery, and implantable medical devices^[1]. Silicon (Si) NWs, NTs and NNs, favored for their excellent biocompatibility and chemical stability^{[2][3]}, face limitations due to inadequate mechanical strength, which can lead to bending or breaking during fabrication and use^[2]. To address this, we have begun to fabricate Si NW and NT arrays using electron beam lithography. Ultimately, the goal is to ensure biocompatibility and strength by converting the Si surface to silicon carbide (SiC). These nanostructures are poised to surmount the mechanical weaknesses of Si nanostructures, offering superior solutions for biomedicine as shown in Fig. 1.

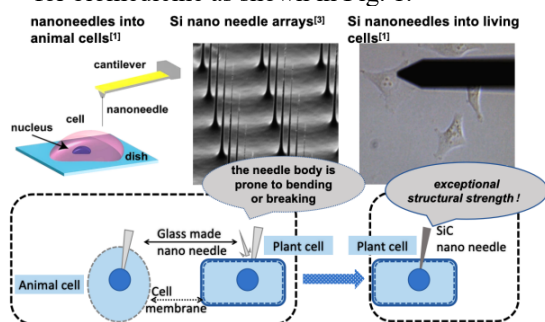


Fig. 1 Si and SiC NWs and NTs, integrating the exploration of SiC nanostructures.

Results

Si NW and NT arrays have successfully fabricated using electron beam lithography as shown in Figs. 2 and 3. The Si NW arrays exhibit high resolution, excellent aspect ratio, and good pattern uniformity and fidelity. However, there is

still room for improvement in the preparation of Si NTs. Consequently, an alternative fabrication method following the manufacture of Si NWs^[4] will be performed using an aluminum oxide (Al_2O_3) spacer to form Si NT arrays, where the wall thickness can be controlled by adjusting the thickness of the Al_2O_3 spacer. Additional experimental results and characterizations will be presented on-site at the conference.

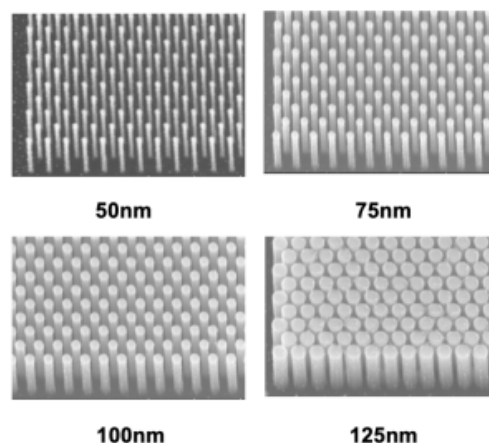


Fig. 2 Fabrication of Si NW arrays with various diameters.

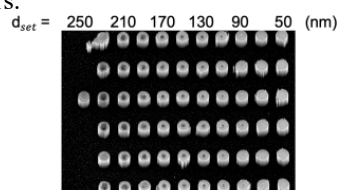


Fig. 3 Fabrication of Si NT array with fixed outer diameter of 350 nm, various inner diameters (d_{set}) of 50-250nm, and pitch of 20 nm.

References: [1] Penedo, M. et al. Sci Rep 11, 7756 (2021), [2] Notargiacomo, A., et al. (2002). Materials Science and Engineering: C, 19(1-2), 185-188, [3] Matsumoto, D. et al. Sci Rep 5, 15325 (2015), [4] Yong-Lie Sun, Wipakorn Jevasuwan, Naoki Fukata, Materials Today Nano, 28, 100547 (2024).

シリカコート量子ドットの光子源としての特性改善と プレーナー配置技術の開発

Improvement of characteristics as photon sources and development of planar arrangement techniques of silica-coated quantum dots

横浜国大院理工[○](M1)城詰 大翔, (M2)プリブル 一生, (M2)池田 征弥, (M1)吉國 希望, 向井 剛輝

Graduate School of Engineering Science, Yokohama National Univ.,

[○]H. Shirozume, I. Pribyl, S. Ikeda, N. Yoshikuni, K. Mukai

E-mail: mukai-kohki-cv@ynu.ac.jp

【はじめに】我々はコロイド型量子ドット(QD)を用いて、単一光子を用いた量子情報処理素子を作製することを提案している^[1]。コロイド型 QD は逆ミセル法によるシリカコーティングで、キャリアの量子状態を変化させずに見かけのサイズを大きくすることができる。その結果、ハンドリングが容易となり、単一光子放出器の光源や、任意のサイズの QD を任意の位置に配置する量子回路も実現できると考えている。しかし、QD をシリカコートすると、発光特性が劣化することが問題であった。今回我々は、発光効率が高く粒径の大きなシリカコート QD を作製する技術とシリカコート QD を正確に位置制御し配置する技術を構築したので報告する。

【実験】逆ミセル法のシリカ前駆体であるテトラエトキシシラン(TEOS)量や QD 量を変化させることでシングルコアのシリカコート PbS QD が作製できる条件を探索した。CdS シェルによってシリカコーティング時に PbS QD を保護することを試みた。逆ミセル法の条件の見直しによりシリカコート QD の粒径拡大を行った。シリカコート QD を配置するためのナノホールを配列したテンプレートをシリコン基板上に作製した。フォトルミネッセンス(PL)測定、及び透過型電子顕微鏡(TEM)観察による評価を行った。テンプレートは集束イオンビーム(FIB)装置により作製した。

【結果】逆ミセルを構成するための界面活性剤である IGEPAL CO-520 量、および QD 量や TEOS 量を調整し、シングルコアのシリカコート QD を得た。置換型、及び積層型の 2 通りの CdS シェルの形成を試みた。Fig.1(a)は PbS QD、Fig.1(b)は置換型で形成した PbS/CdS QD の逆ミセル法によるシリカコーティング前後の PL

スペクトルを示している。PbS QD を直接シリカコーティングした際には発光強度が約 1%まで低下したが、CdS シェルによってそれを 80%程度に改善することができた。また、シェル化した際ピーク波長が短波化した。これは PbS をバンドギャップの大きい CdS で覆ったことで量子閉じ込め効果が強まったためだと考えられる。

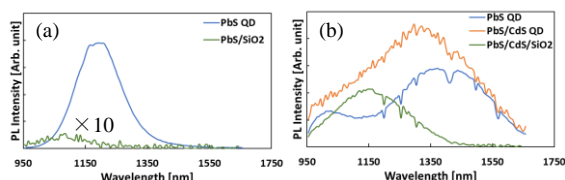


Fig. 1 PL spectra of (a)PbS QD, (b)PbS/CdS QD with or without silica shell

TEOS 量を 1 回 40 μ l とし数日間供給し続けることによってシリカコート QD の粒径の拡大を行った。Fig.2 は TEOS の供給日数とシリカコート QD の粒径の実測値、及びそれを供給量の 3分の1乗でフィッティングした結果を表している。5 日目まではシングルコアを保ったまま供給量に応じて粒径を拡大できた。

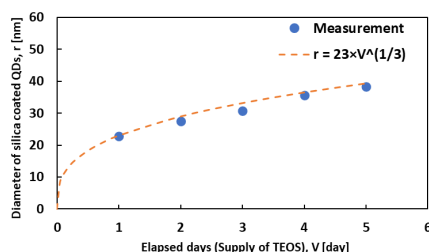


Fig. 2 Relationship between the number of days of TEOS supply and silica shell size

FIB 装置を用いて、シリコン基板上にアスペクト比 0.5 を持つ、直径 100 nm と直径 50 nm の 2 種類のナノホールを形成する技術を構築した。QD 配置の詳細は当日報告する。

【参考文献】

[1] K. Mukai et al., Jpn. J. Appl. Phys. 63, 02SP37 (2024).