

見学方法： 見学予約フォームより予約を行ってください

予約フォーム：<https://forms.gle/6dRmUPakNyGnzXDq8>

沈 研究室

場所： 東6号館 506, 508, 509, 510, 517号室

HP：<http://www.shen.es.uec.ac.jp/index.htm>

[Qing Shen \(沈 青\) - Google Scholar](#)



Email:
shen@pc.uec.ac.jp

安価・高効率な次世代太陽電池と発光デバイスの実現へ

半導体ナノ構造の創製と太陽電池・発光デバイス（LED）への応用

半導体量子ドットを用いた

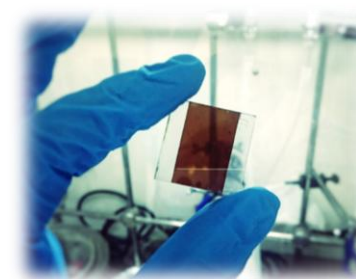
「次世代太陽電池」と「発光デバイス（LED）」の作製

評価と高効率化へのメカニズムの解明

半導体ナノ材料の「光エネルギー変換基礎過程」の評価

有機太陽電池の作製・評価・高効率化へメカニズムの解明

太陽電池



高速レーザー分光

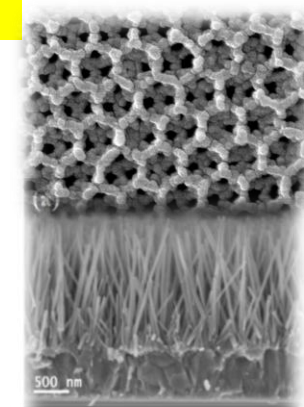


量子ドット

(約100%の発光量子収率)



ナノ構造



構成

教授 沈 青
名誉教授 豊田 太郎

特任准教授 1 名, 博士 8 名, 修士 6 名, 卒研生 3 名



半導体ナノ材料と次世代太陽電池

電気通信大学 基盤理工学専攻 光工学プログラム

沈 青 研究室

[Qing Shen \(沈 青\) - Google Scholar](#)



今後50年間の人類のトップ10の問題

Prof. Richard Errett Smalley (1996年ノーベル化学賞受賞)
リチャード・エレット・スモーリー教授：

1. Energy (エネルギー)

2. Water

3. Food

4. Environment (環境)

5. Poverty

6. Terrorism and War

7. Racism

8. Disease

9. Education

10. Population



2021	~ 7.9	Billion People (79億)
2050	~ 9	Billion People (90億)

Source: R. E. Smalley. *Future Global Energy Prosperity: The Terawatt Challenge*.
MRS Bulletin. June 30th, 2005, 412–417.



今後50年間の人類のトップ10の問題

Prof. Richard Errett Smalley (1996年ノーベル化学賞受賞)

リチャード・エレット・スモーリー教授：

1. **Energy (エネルギー)** → 再生エネルギー
2. Water
3. Food
4. **Environment (環境)** → クリーンエネルギー
5. Poverty
6. Terrorism and War
7. Racism
8. Disease
9. Education
10. Population

太陽電池



2021	~ 7.9	Billion People (79億)
2050	~ 9	Billion People (90億)

Source: R. E. Smalley. *Future Global Energy Prosperity: The Terawatt Challenge*.
MRS Bulletin. June 30th, 2005, 412–417.



太陽電池について

結晶シリコン系太陽電池（第1世代）

- 高純度・単結晶原材料
- 製造プロセス（高温）
- シリコン原料の不足

↓ 半導体材料の低減 – 安価な太陽電池へ

薄膜系太陽電池（第2世代）

(Cu(In,Ga)Se₂、CdTe、薄膜Si)

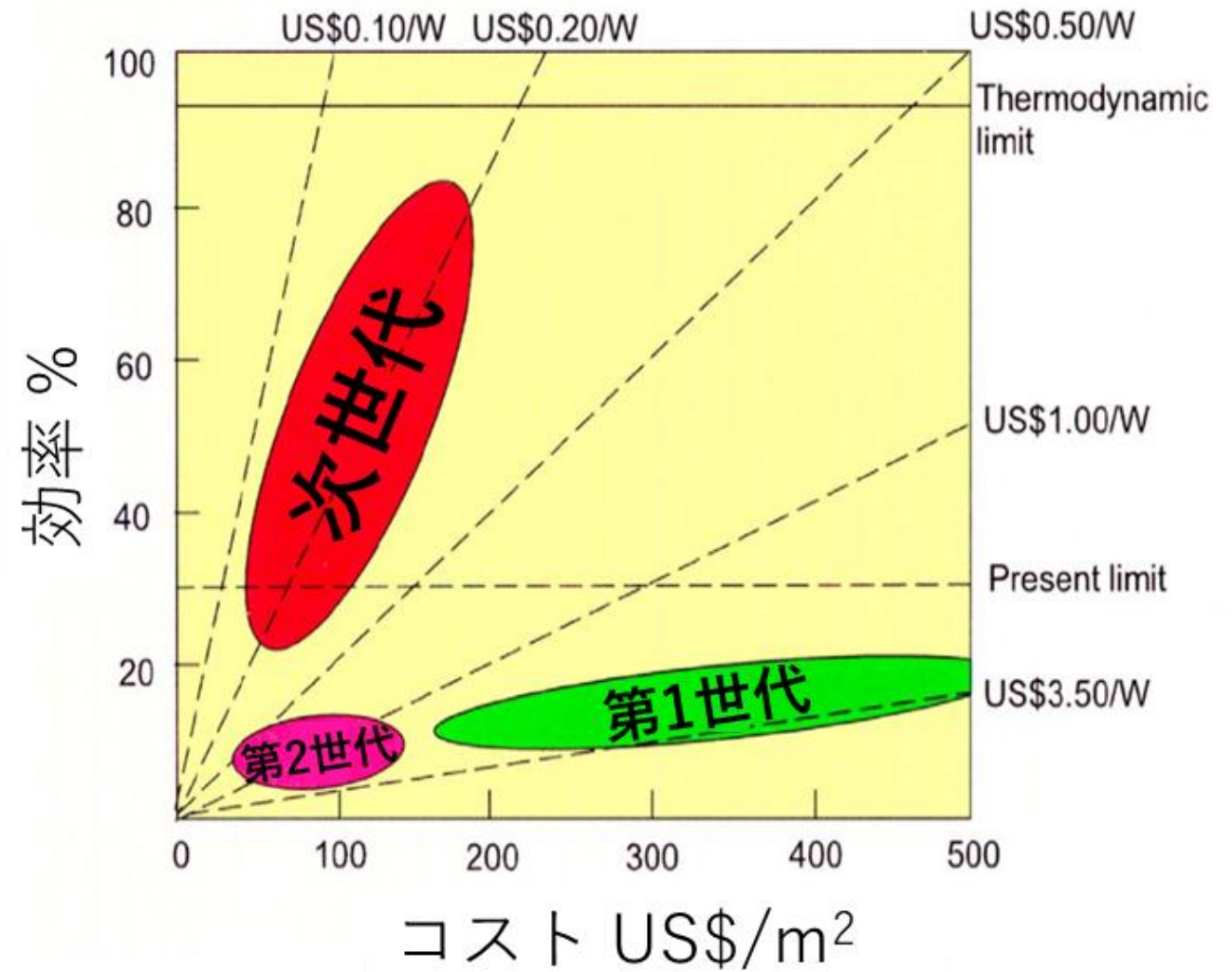
- レアメタル（インジウム(In)、テルリウム(Te))
- 高真空プロセス

↓ 安価かつ効率の向上へ

次世代太陽電池

- 1.量子ドット（ナノ結晶）太陽電池
- 2.ペロブスカイト太陽電池
- 3.ハイブリット型太陽電池

低コスト化、高効率化

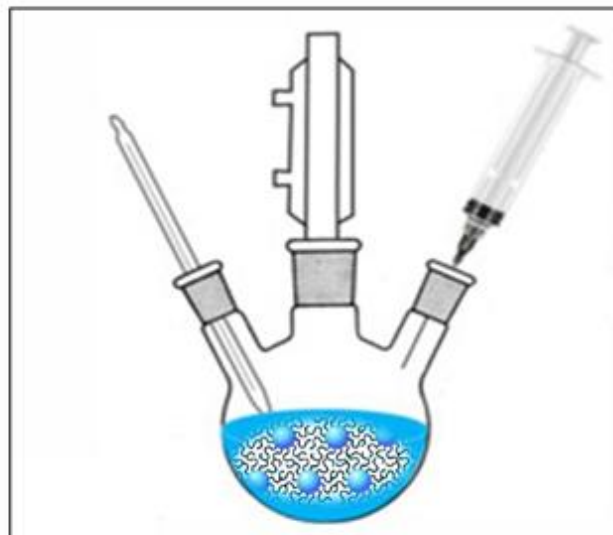


量子ドット(QD) 半導体ナノ結晶

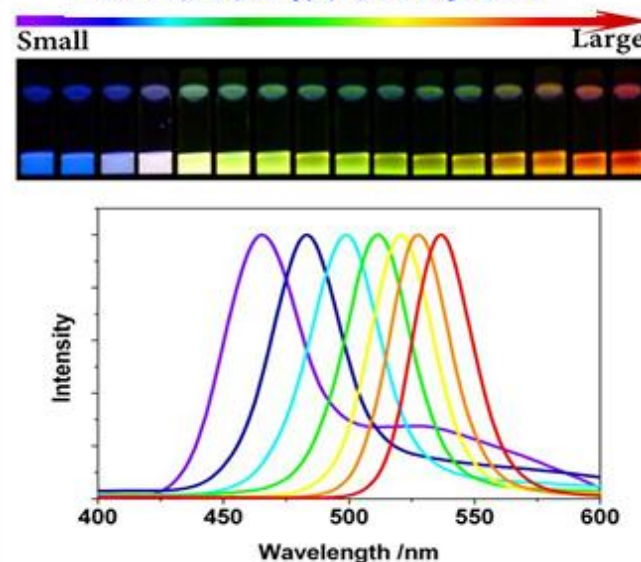
- 溶液法で簡単に作製可能(コロイド量子ドット) ➡ **低コスト**
- サイズが**数～数10 nm**の半導体結晶 (**1 nm: 10^{-9} m = 10億分の1メートル**)
- サイズの変化によって、光吸収と発光領域が制御できる(**量子サイズ効果**)
- 1個の光子の吸収によって多数の電子が励起される可能性
(**多重励起子生成:MEG**) ➡ **バルク材料の太陽電池よりエネルギー変換効率増大可能(最大理論効率:44%)¹ ➡ 高効率**

¹Nozik A. J., et al., *J. Appl. Phys.* 2006, **100**, 074510

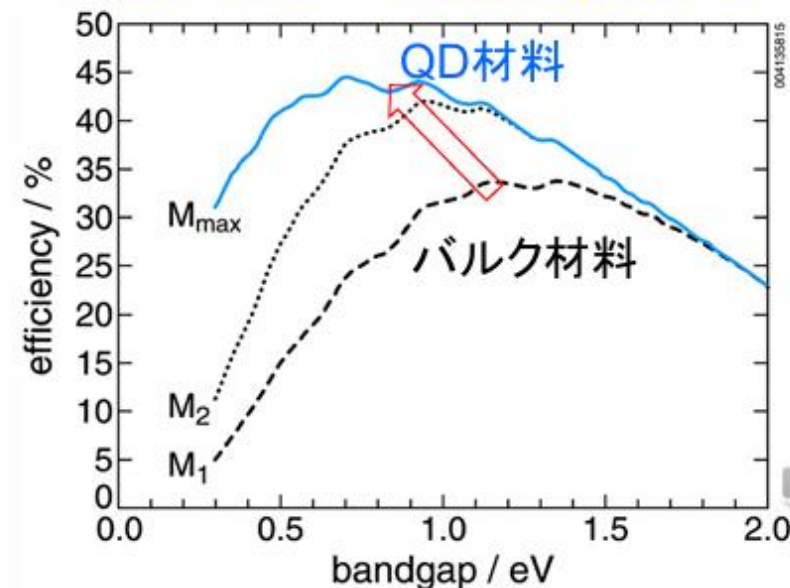
簡便に作製可能



QDのサイズによる吸収と発光領域の変化



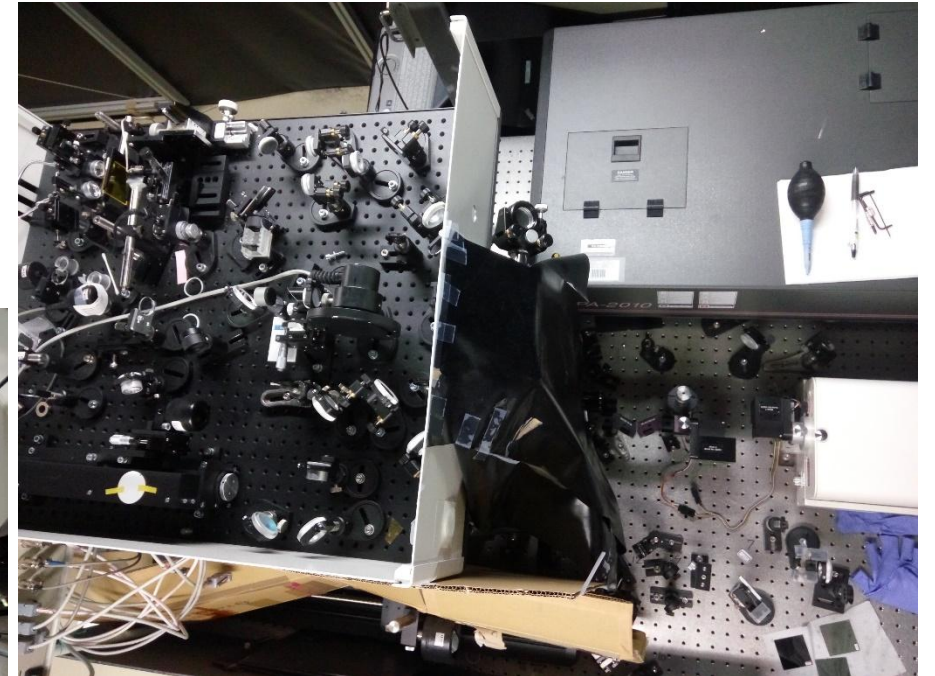
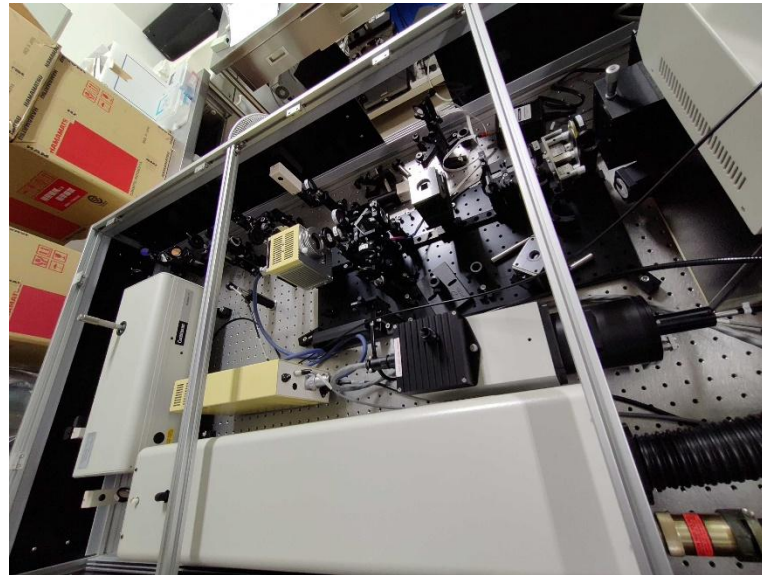
太陽電池の理論変換効率¹



様々なレーザー分光装置



Nanosecond



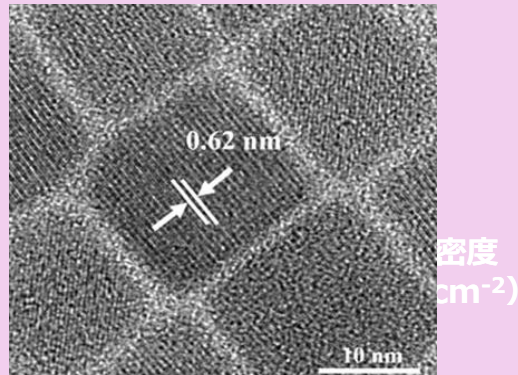
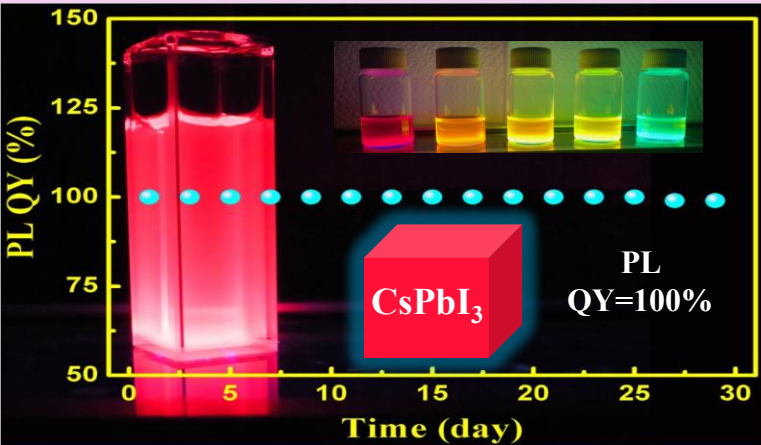
Picosecond



沈研究室の研究成果

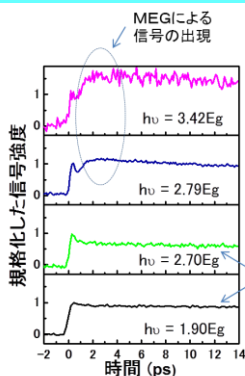
★新しいQD材料と膜の開発：

世界最高レベルの低欠陥・高品質コロイド量子ドットの作製法を開発し、発光量子収率約100%の量子ドットの作製に初めて実現



★鍵となるメカニズムの解明：

独自のレーザー分光法により、量子ドットの多重励起子生成(MEG)過程の観察に初めて成功



Chem. Phys. Lett., Vol. 542, pp. 89-93, 2012



JSTと電通大共同でのプレスリリース

【2012年6月27日 日刊工業新聞】

【Laser Focus World Japan 2012年7月号、p. 10】

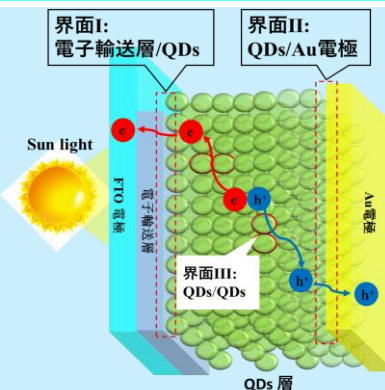
【2012年6月27日 朝日新聞デジタル】

【2012年7月2日 日経産業新聞】

【2012年7月6日 科学新聞】

MEG型量子ドット太陽電池(効率44%以上)を実現するための重要な基礎データ！

系統的な光励起キャリアダイナミクスの評価に関する基礎研究より、量子ドット太陽電池の変換効率向上のボトルネックを解明した。

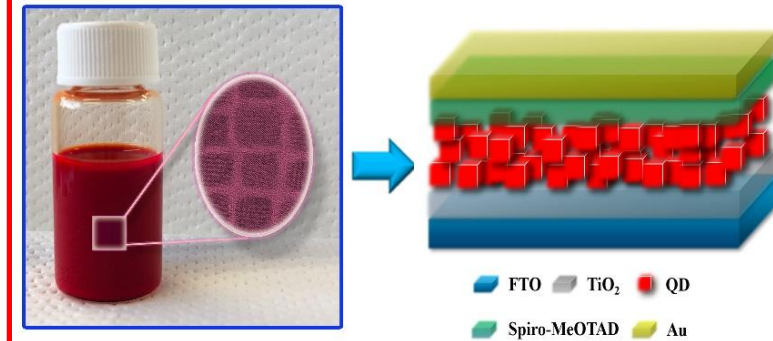


- (1) Appl. Phys. Lett., 2007, 91, 023116
- (2) Nanoscale, 2015, 7, 5446
- (3) J. Energy Chem., 2015, 24, 712
- (4) J. Mater. Chem. A, 2015, 3, 9308
- (5) PCCP., 2017, 17, 6358
- (6) J. Phys. Chem. Lett., 2018, 9, 294
- (7) J. Phys. Chem. Lett., 2018, 9, 3598

QD/QD界面での再結合は一番のボトルネック！

★太陽電池デバイスの開発：

コロイド量子ドット太陽電池デバイスの作製には、世界トップレベルの実績



- (1) J. Am. Chem. Soc., 2016, 138, 4201
- (2) ACS Appl. Mater. Interfaces., 2017, 10, 26142
- (3) ACS Energy Lett., 2020, 5, 3224

- (1) 特願2017-137392
- (2) ACS Nano, 2017, 11, 10373 (引用回数: 506)
- (3) J. Am. Chem. Soc., 2017, 139, 16708 (引用回数: 208)

共同研究の実績

1. 産学連携

- 2014年～ 京セラ（株）会社と共同研究
- 2015年～ 日東電工（株）会社にて技術指導
- 2016年～ LGイノテック株式会社に技術指導
- 2017年～ トヨタ自動車株式会社と共同研究
- 2020年～ 花王株式会社と共同研究

2. 国際連携実績

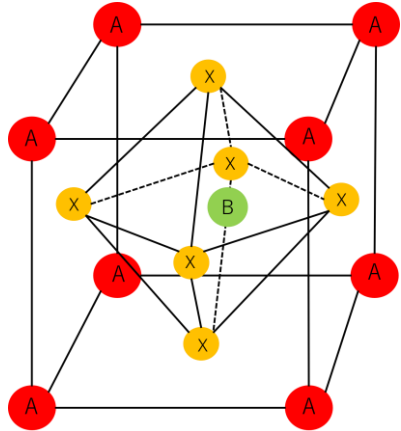
以下の大学と共同研究を行っている。すでに多数の共著学術論文を発表した。

- 1 スペインの Jaume I大学 Juan Bisquet教授
- 2 中国のEast China University of Science and Technology Zhong Xinhua教授
- 3 香港のCity University of Hong Kong Andrey Rogach 教授
- 4 フランスFonctions Optiques pour les Technologies de l'information Jacky Even 教授
- 5 オーストラリア Queensland University of Technology Wang Hongxia 教授



FAPbI₃ ペロブスカイト量子ドット(PQD)インクの光物性評価と太陽電池への応用

研究背景



ペロブスカイト構造: ABX₃

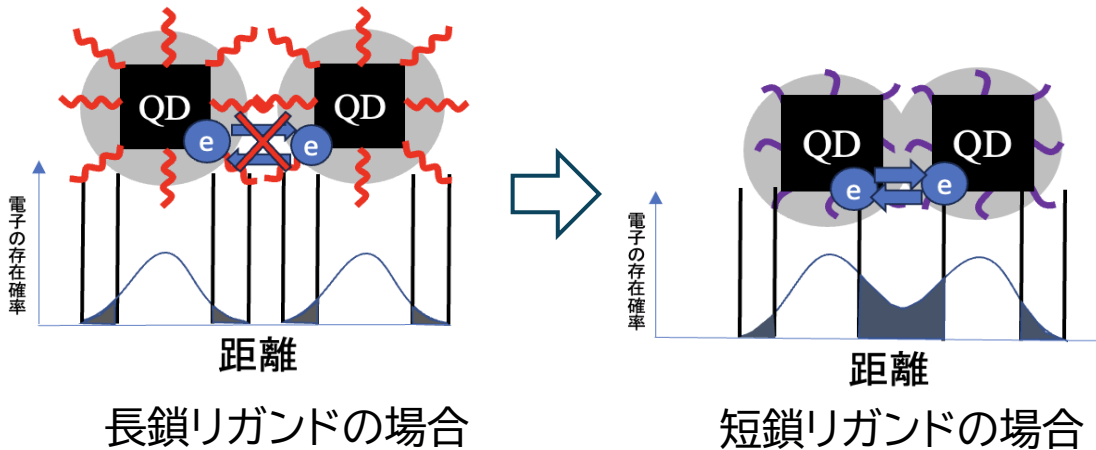
PQD太陽電池の特徴

利点

- ・シリコン系太陽電池より**低コスト**での製造が可能
- ・多重励起子生成により**理論変換効率44%**[1]

課題点

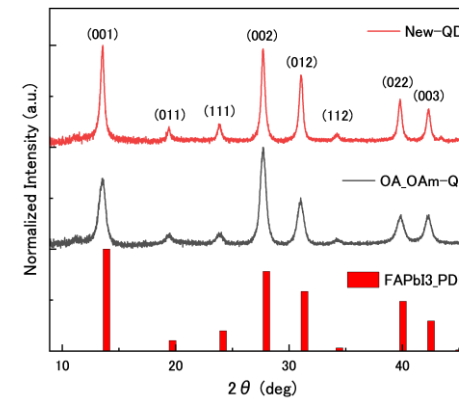
- ・変換効率が他の太陽電池と比較して低い(19.1%)
→特に**電流値**が低い



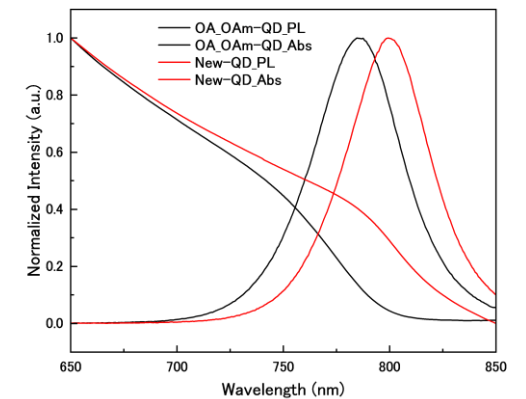
太陽電池として活用するためには**長いリガンドから短いリガンドへ**と交換する必要がある

研究結果

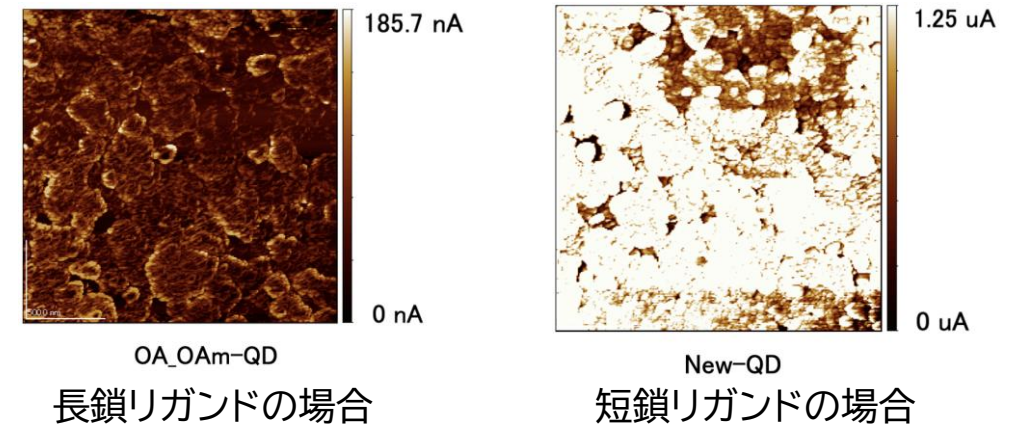
XRD(粉末X線回折法)



発光・吸収スペクトル

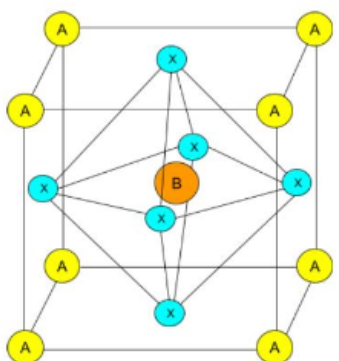


c-AFM(導電性AFM)



短いリガンドに置換することで**10倍以上**導電性が向上

セシウムスズ臭素量子ドット(CsSnBr_3QD)の作製と太陽電池へ向けた評価



ペロブスカイト構造 … ABX_3 の組成

Aサイト: 有機物($\text{FA}(\text{CH}(\text{NH}_2)_2)$ など), Csなど

Bサイト: 金属(Pb, Snなど)

Xサイト: ハロゲン(I, Brなど)^[1]

金属ハロゲン化ペロブスカイト量子ドットは高い吸収係数を持ち、
光電変換効率が期待される⇒より発電できる太陽電池が作れる
最高効率19.1%^[4]

Bサイトに
使う金属

鉛
Pb

ペロブスカイト量子ドット太陽電池は、
現状鉛(Pb)を用いることで高効率を目指せる
しかし鉛は人体や環境に有害である^[3]

錫
Sn

スズ(Sn)は低毒で結晶構造に歪みが少ない
単接合太陽電池の理論変換効率は33.7 %^[5]
しかし容易に酸化される⇒使えない
現状太陽電池としての応用はほぼない^[3]

各サイトで物質を選ぶことにより、
バンドギャップを調節できる^[2]

CsSnBr_3QD はワイドバンドギャップを持つ鉛フリー量子ドット

↑ 赤色発光/吸収ができる

CsSnBr_3 量子ドットを用いた論文はほぼ無い



CsSnBr_3QD



紫外線に
当てた様子

[1] <https://enecoat.com> エネコートテクノロジーズ ペロブスカイト太陽電池の構造と発電メカニズム

[2] AI 予測最適化技術による超高効率 量子ドット/ペロブスカイト太陽電池の 逆設計およびデバイスの作製と評価 斯波 廣大

[3] Thomas J. "Engineering Stable Lead-Free Tin Halide Perovskite Solar Cells: Lessons from Materials Chemistry" Advanced Materials, vol. 35, no. 25, pp. 2206684, 2022

[4] National Laboratory of the Rockies Best Research-Cell Efficiency Chart <https://www.nrl.gov/pv/cell-efficiency>

[5] "Hot carrier solar cells and the potential of perovskites for breaking the Shockley-Queisser limit"

CsPbBr₃ペロブスカイト量子ドットの超低温合成と青色LEDデバイスへの応用

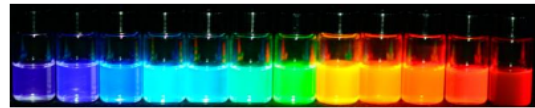
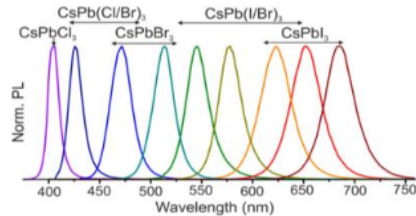
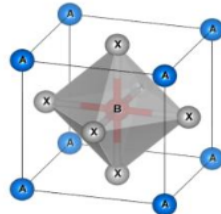
電気通信大学大学院 安井 慶人
指導教員 沈 青

量子ドットと呼ばれる半導体ナノ構造を応用したLEDデバイスは、優れた発光特性や簡易な合成方法により世界的な注目を集めている。私はその中でも、「ペロブスカイト構造」を持つ材料から合成される量子ドットに焦点を当てて研究を進めている。

1. 背景

ハロゲン化鉛ペロブスカイトとは

- ・ APbX₃ (X=I, Br, Cl) の結晶構造を持つ (右図)
 - ・ ハロゲン比の調整による発光特性の制御が可能
 - ・ 溶液プロセスによる合成・デバイス作製が可能
- 次世代ディスプレイへの応用などが期待



▲CsPbX₃の発光スペクトルと発光写真[1]

LEDデバイスの課題と従来の解決策

赤、緑に比べ、青色LEDの光電変換効率は著しく低い。[2]

従来の解決策→CsPb(Cl/Br)の組成制御

- ・ 2元素の偏りによる相分離
 - ・ 2元素の極性差によるイオン移動
- <欠陥の原因> X=単元素で改善可能

量子ドットの特性を利用した新しい解決アプローチ

量子ドット…数nm～10nm程度の半導体ナノ結晶

- ・ 量子サイズ効果による発光特性の制御が可能
- ・ 狭い量子井戸構造による鋭く高効率な発光特性
- ・ コロイドの自己成長による簡便な合成方法

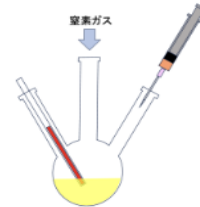
→CsPbBr₃量子ドットを低温環境で合成し、青色発光(455～460nm) 発光を達成した論文はほぼない

2. 目的

小さな量子ドットの合成には結晶成長を遅らせる必要がある

HOT INJECTION法

温度	高
歴史	従来型
結晶	大



本実験での合成法[3]

温度	低
歴史	新規法
結晶	小

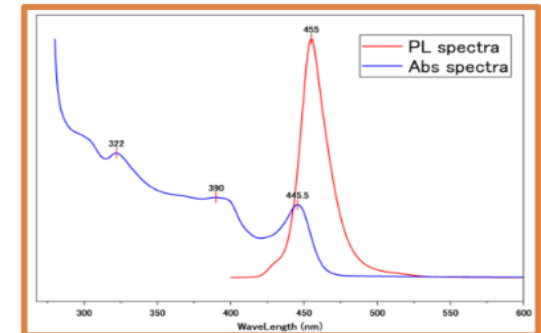


液体窒素を用いて460nm発光のCsPbBr₃量子ドットを合成・発光特性評価をし、LEDデバイスへの応用を目指す

4. 結果と考察

吸収・発光スペクトル

液体窒素環境下で合成した試料は、**455 nm付近に鋭い青色発光**を示し、目的としていた青色発光を持つ**CsPbBr₃量子ドットの合成に成功した**。また、合成条件の最適化により、絶対PL量子収率は**最大96 %**を記録



▲CsPbBr₃の発光・吸収スペクトル

5. まとめ・今後の展望

量子ドットの更なる改良

製膜後の材料変化や光学特性の長期的な維持が課題となっているため、量子ドットの周りに結合させる**不活性配位子（リガンド）**や**合成・精製・製膜工程の最適化**を検討していきたい。

量子ドットのLEDデバイス化

実際に**デバイス化**することでLEDとしての効率を検証し、実用化への指針をより具体的に示していきたいと考えている。

[1] L. Protesescu, et al., Nano Lett., 15, 3692–3696 (2015).

[2] K.B. Lin, et al., Nature, 562, 245 (2018).

[3] J. Cao, et al., Adv. Optical Mater., 9, 2100300 (2021).

[4] G. Almeida, et al., ACS Nano, 12, 1704–1711 (2018).

スズ系ペロブスカイト量子ドット太陽電池の開発

シリコンの限界を超える：地球環境に配慮した超軽量・柔軟な次世代デバイス

⚠ 地球温暖化と設置場所の限界

- **温暖化への対策急務**：温室効果ガス削減のため、火力発電からクリーンな再生可能エネルギーへの円滑な移行が最優先課題。
- **シリコン型設置の限界**：現行の主流であるシリコン太陽電池は「重く硬い」ため、山地や丘陵地が約7割を占める日本国内では適地が飽和状態。
- **環境負荷の高い製造**：シリコン原料の精錬・加工には、極めて高い温度と圧力を必要とするため製造時の炭素排出も課題。

✔ ペロブスカイト×量子ドットの融合

- **柔軟かつ超軽量**：インクによるコーティングが可能。ビル壁面、耐荷重の低い屋根、車など多様な場所への設置が実現。
- **量子ドットによる高安定化**：ナノテクノロジーの導入で、従来の弱点だったハロゲンイオン拡散による早期の劣化を防止。
- **スズ (Sn) 代替による環境優位性**：これまでのペロブスカイト電池の難点だった「有害な鉛」を、毒性のない「スズ」へ完全置換。

🧪 高純度合成と世界初の成果

1 CsSnI₃量子ドットの合成

>

2 リガンド交換により高濃度インク作製

世界初 無鉛スズ系ペロブスカイト量子ドットにおいて、**世界初となる発電の確認**に成功。

🌱 カーボンニュートラル実現への展望

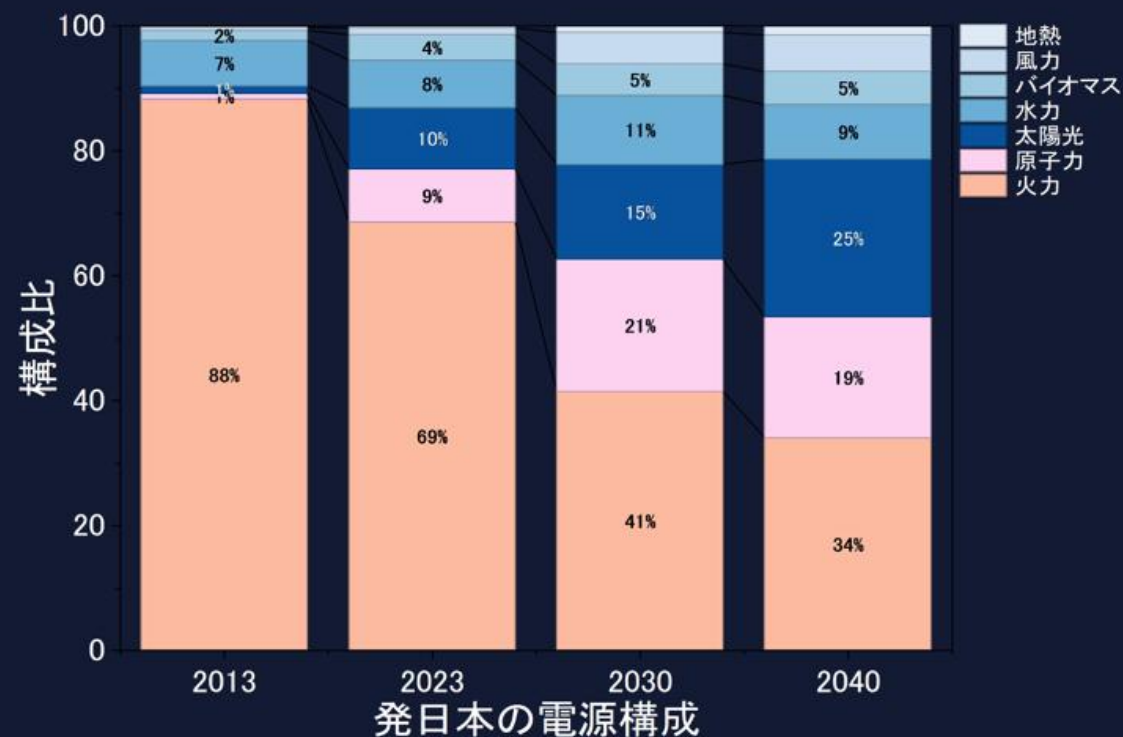
- **デバイス構造の最適化**：結晶品質のさらなる向上と電荷輸送層との界面制御を推進し、光電変換効率の最大化を図る。
- **国産エネルギー基盤**：日本の狭小環境や都市型インフラに適した「次世代国産太陽電池」として、実用的な量産モデルを確立。
- **クリーン社会の先導**：革新的な発電技術を実装し、日本が目指す2050年完全カーボンニュートラル社会の達成を力強くリード。

スズ系ペロブスカイト量子ドット太陽電池の開発

シリコンの限界を超える：地球環境に配慮した超軽量・柔軟な次世代デバイス

⚠ 地球温暖化と設置場所の限界

- ・ **温暖化への対策急務**：温室効果ガス削減のため、火力発電からクリーンな再生可能エネルギーへの円滑な移行が最優先課題。
- ・ **シリコン型設置の限界**：現行の主流であるシリコン太陽電池は「重く硬い」ため、山地や丘陵地が約7割を占める日本国内では適地が飽和状態。
- ・ **環境負荷の高い製造**：シリコン原料の精錬・加工には、極めて高い温度と圧力を必要とするため製造時の炭素排出も課題。



スズ系ペロブスカイト量子ドット太陽電池の開発

シリコンの限界を超える：地球環境に配慮した超軽量・柔軟な次世代デバイス

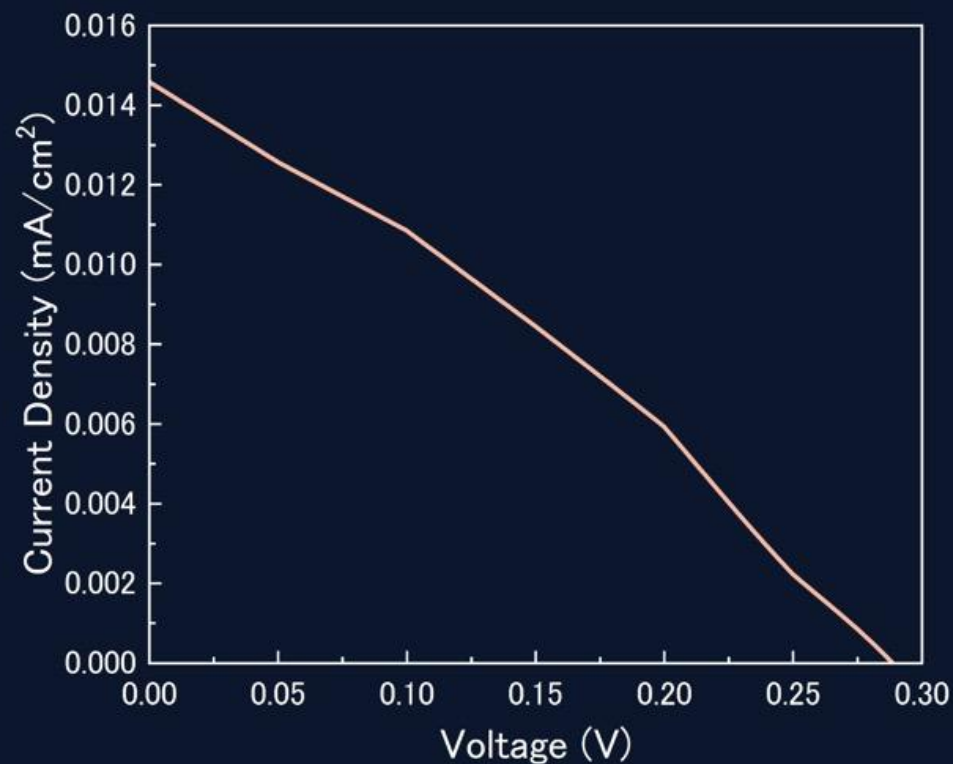
🔬 高純度合成と世界初の成果

① CsSnI₃量子ドットの合成

>

② リガンド交換により高濃度インク作製

世界初 無鉛スズ系ペロブスカイト量子ドットにおいて、**世界初となる発電の確認**に成功。



背景 有機太陽電池

有機半導体材料を利用して光を電気に変換するデバイスであり現在の最高効率**は20.1%**を達成[1]

◎主な利点

- ・ **軽量** → 屋根の重量制限を考慮しなくてよい
- ・ **柔軟性** → 様々な形状に対応出来る
- ・ **低コスト** → 安価で大規模生産が可能

△主な課題

- ・ **効率** → シリコン系の太陽電池(26.1%)に比べて低い
- ・ **耐久性** → 時間とともに劣化しやすい

↓ 実用化に向けて...

さらなる**効率及び安定性**の向上が必要不可欠である

効率及び安定性向上のための**指針**



◎ 光吸収量の増大

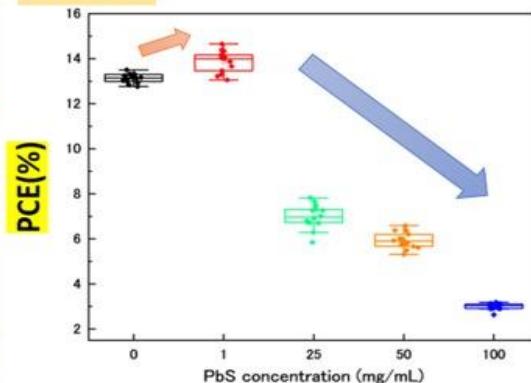
→ 効率の向上

◎ エネルギー準位を調整することが出来る

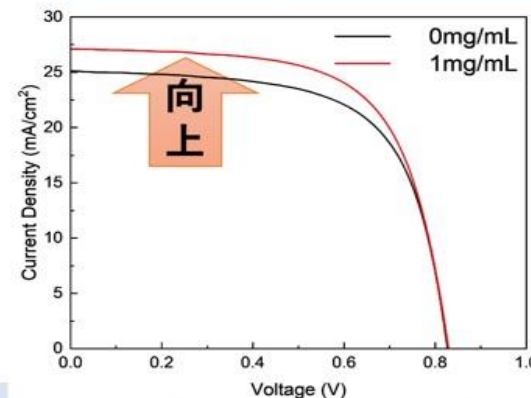
↓ これらの効果を期待して...

PbS量子ドットを新たな層として導入

結果



PbS量子ドットの濃度とエネルギー変換効率の関係



電流電圧特性

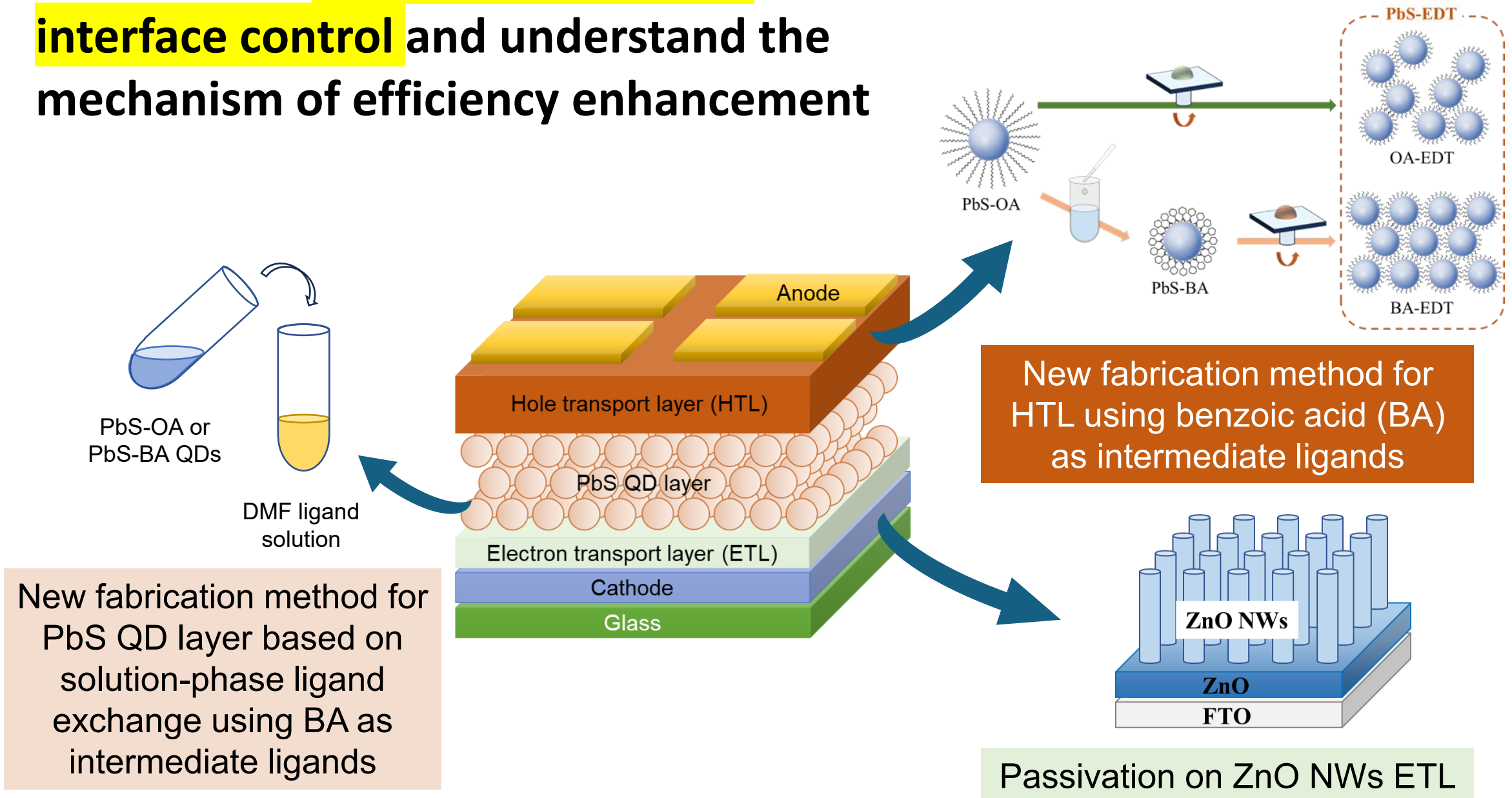
濃度を1mg/mLとしたデバイスはPCEが**1%以上**向上

適切な膜厚のPbS量子ドットは**デバイスの性能を向上させる可能性が示唆された**

今後の課題 & 予定

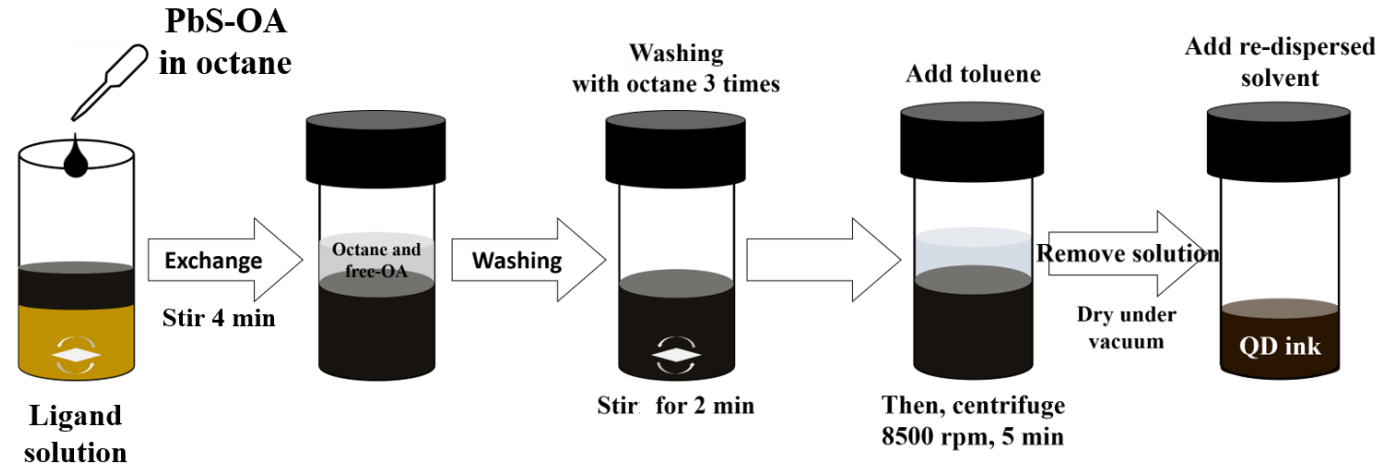
- ・ 光に対する安定性への影響について検証
- ・ 他の有機材料を用いてデバイスを作製

Improve the charge collection by interface control and understand the mechanism of efficiency enhancement



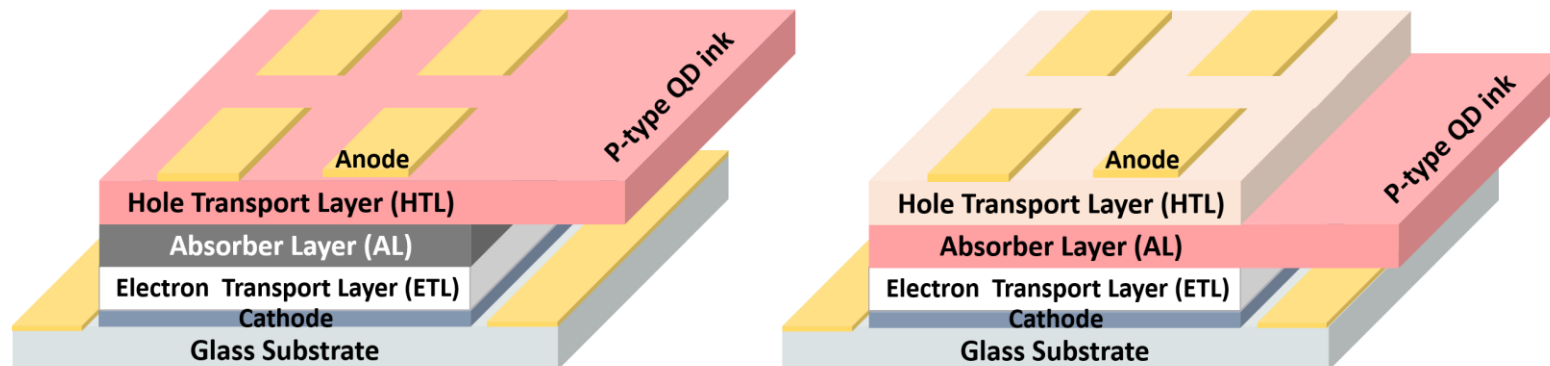
Synthesis P-type PbS Quantum Dots for Solar Cell Applications

Exchange long-ligand (OA) to short-ligand (mixing halide ligand; $\text{PbI}_2/\text{SnI}_2$) by a solution-phase ligand exchange method



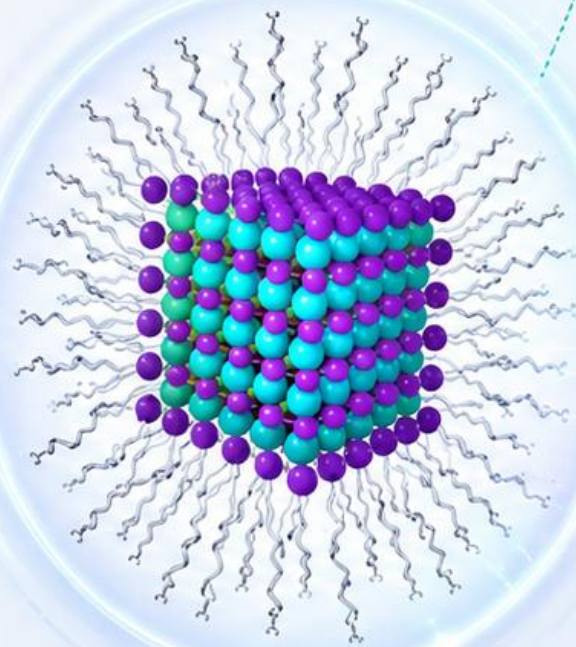
Purposes

- To turning n-PbS CQDs to p-PbS CQDs by mixing tin (II) iodide (SnI_2) into lead halide ligand solution
- Apply p-type QD ink to active layer and hole transport layer for quantum dot solar cells

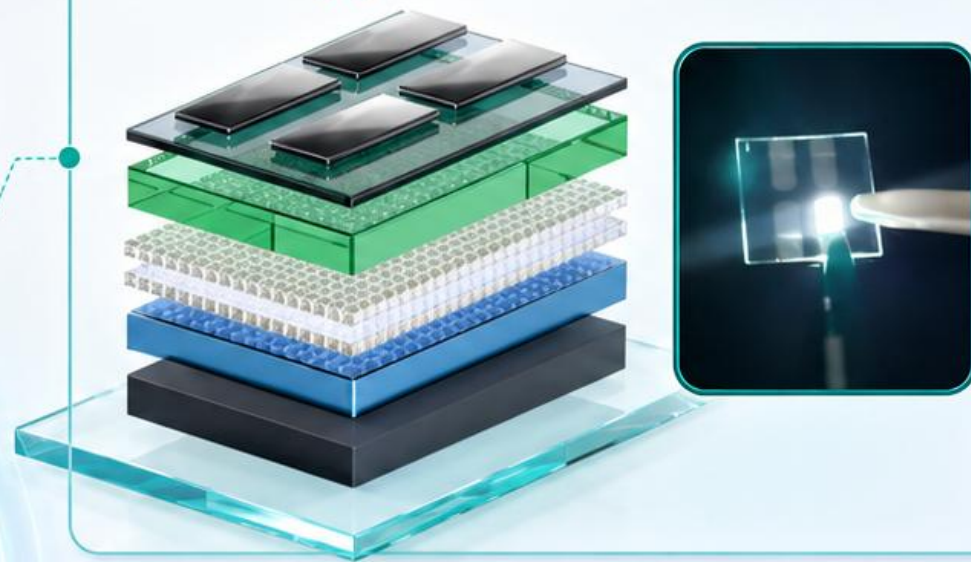


Synthesis and Applications of Perovskite Quantum Dots

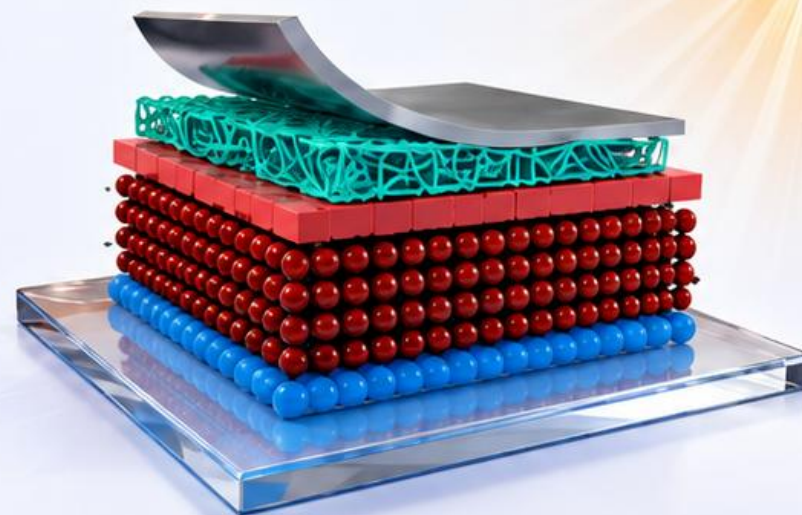
Quantum Dot Synthesis



LED Applications

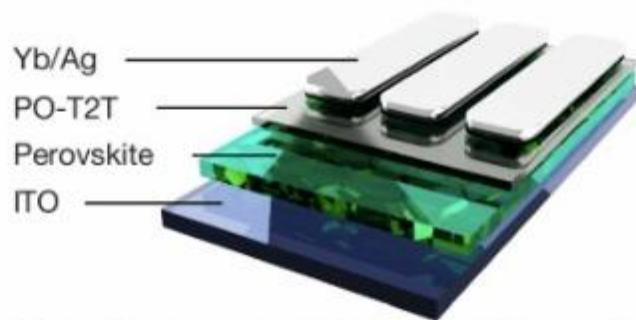


Solar Cell Applications



Achieved:

- 🏆 **Champion Efficiency**
- 🏆 **Champion Working Area**
- 🏆 **Champion Resolution**
- 🏆 **Champion Pixel Count**

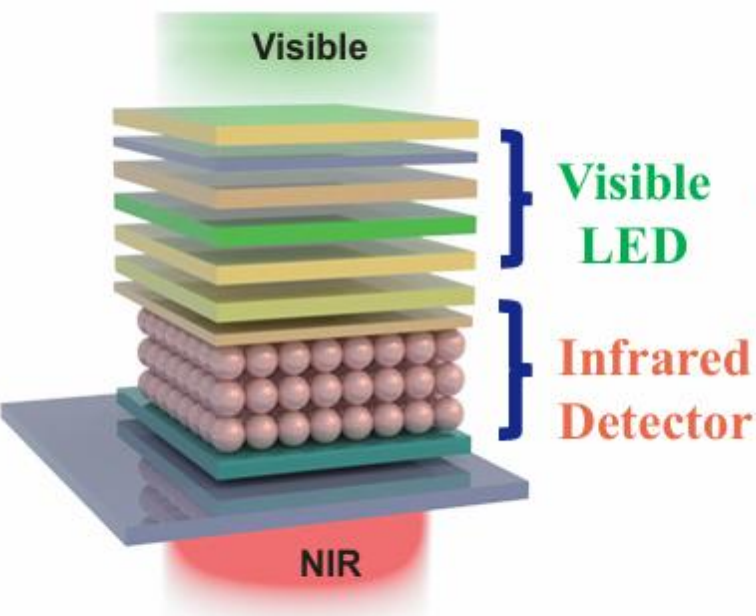


Hole-Transport-Layer-Free LED

Achieved: 🏆 First Applied to Red LEDs



**Ultrathin & High-Efficiency
AgBiS₂ Devices**

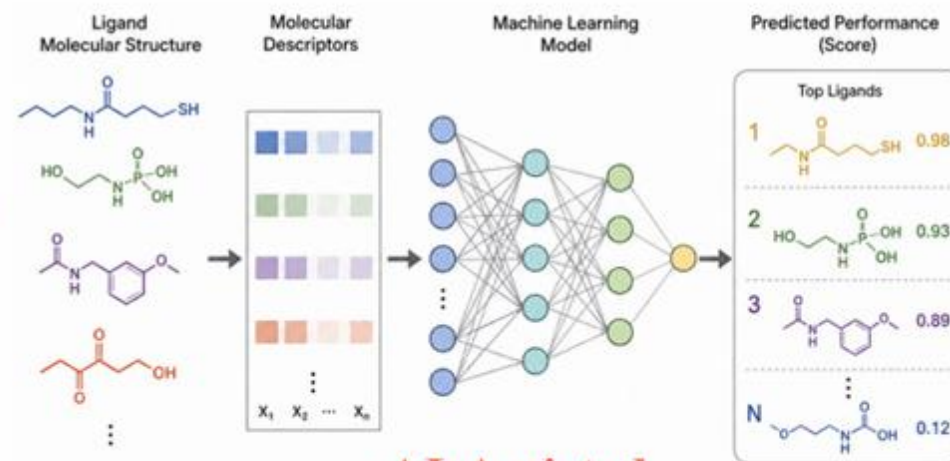


**Upconversion Device
Architecture**



**Synthesis of High-Quality
AgBiS₂ Quantum Dots**

Achieved: 🏆 Champion PL Lifetime



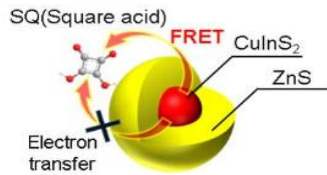
**AI-Assisted
Ligand Screening**

Synthesis and Photo-Physics of Quantum Dots

Photo-physics

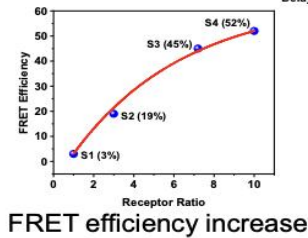
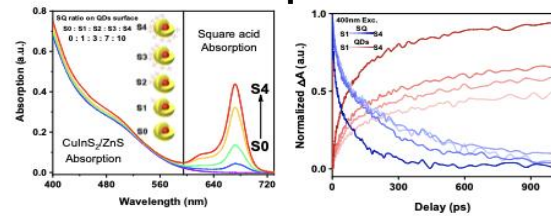
Non-radiative transfer

Förster

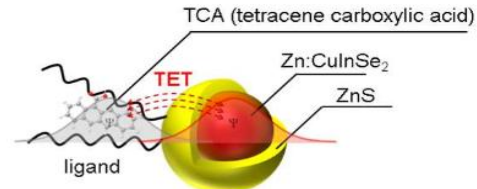


FRET Model

(Förster resonance energy transfer (FRET))

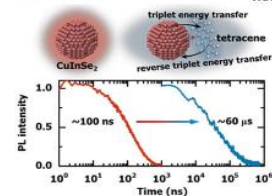
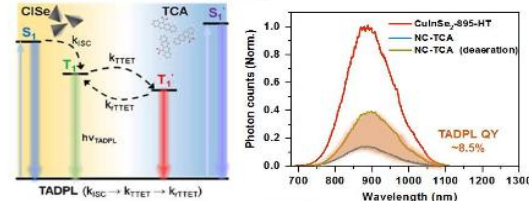


Dexter



Dexter Model

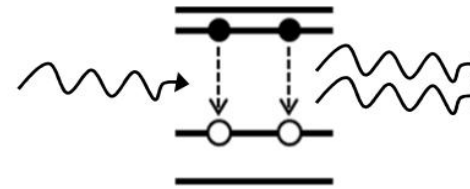
(Triplet Energy Transfer (TET))



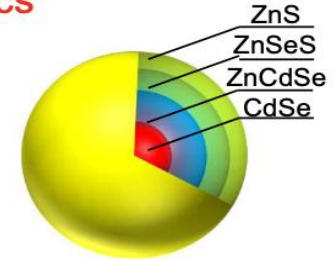
Thermally activated delayed photoluminescence

Quantum Dots lasing

Bi-exciton dynamics

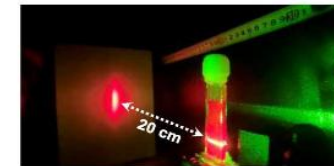
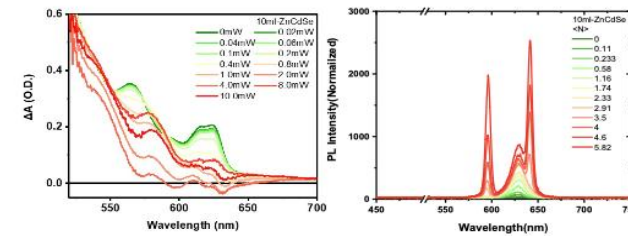


Amplified Spontaneous Emission (ASE)



Component gradient quantum dots (cg-QD)

Using cg-QD to study the ASE process



QDs-lasing

Chiral CsPbI₃ Nanoplatelets for Red Circularly Polarized LEDs

Hot-injection synthesis, ultrasonic post-treatment ligand exchange, surface coordination, and red circularly polarized electroluminescence

1

SYNTHESIS

Materials

Cs source



Cs₂CO₃

Cesium carbonate

Pb source



Pb(OAc)₂·3H₂O

Lead acetate trihydrate

I source



ZnI₂

Zinc iodide

OA / OAm / ODE



(liquids)



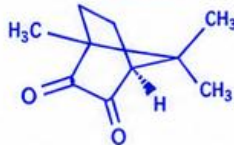
CsPbI₃
nanoplatelets

2

CHIRAL LIGAND INTRODUCTION AND ULTRASONIC LIGAND EXCHANGE

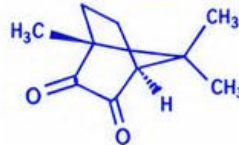
Chiral CAM ligand (R-/S-CAM)

S-CAM



(1S)-(+)-Camphorquinone

R-CAM



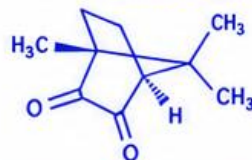
(1R)-(-)-Camphorquinone



Ultrasonic post-treatment
ligand exchange

Surface coordination

OA / oleate
→ Pb



OAm / oleylammonium
→ I

Pb site
I site



Ultrasonic post-treatment promotes
ligand exchange and surface coordination.

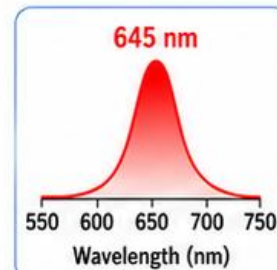
3

RED CIRCULARLY POLARIZED LED

Left circularly
polarized emission
(L-CPL)



Right circularly
polarized emission
(R-CPL)



LiF / Al
TPBi
Chiral CsPbI₃
NPL emissive
layer
PVK
PEDOT:PSS
Glass / ITO

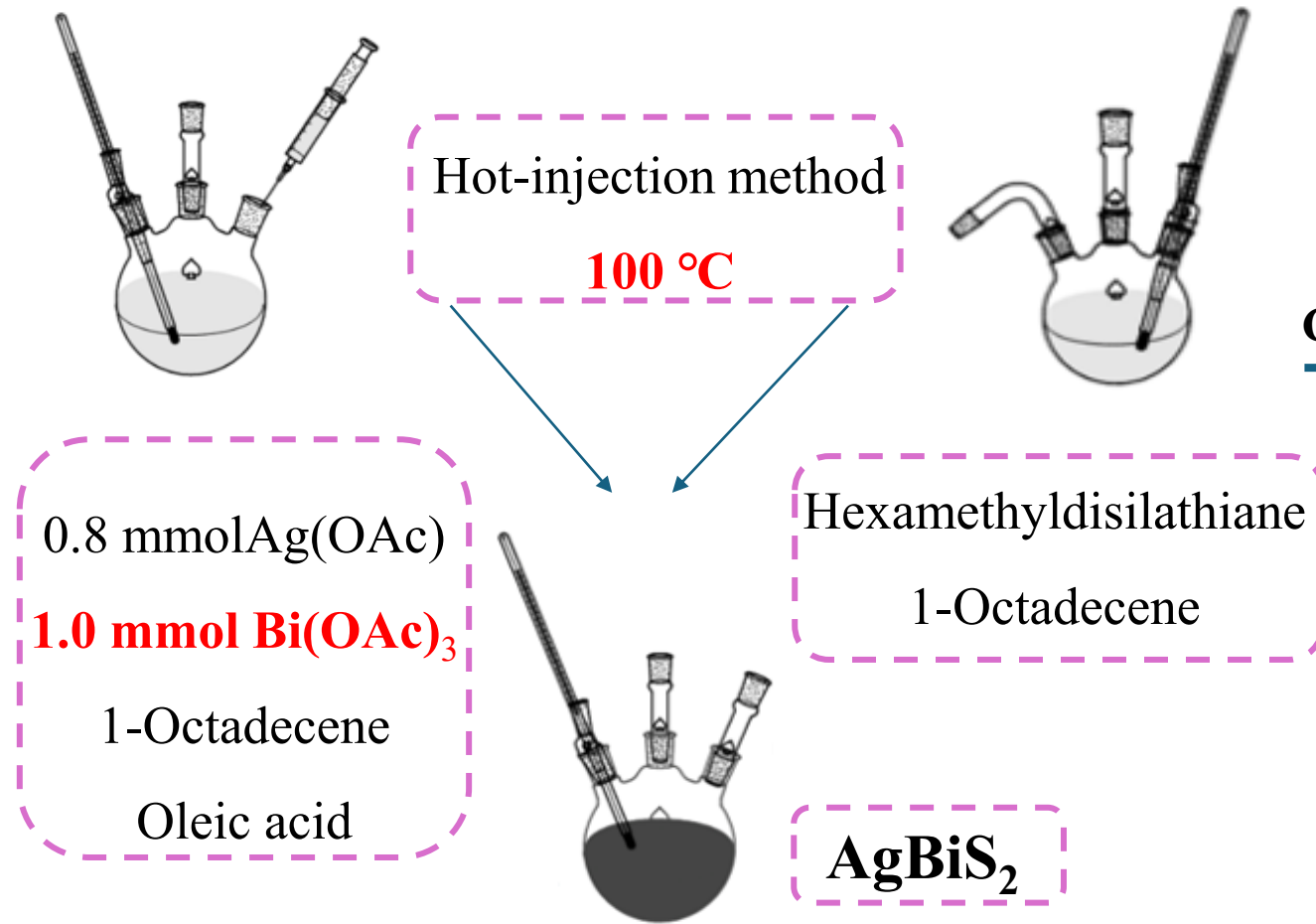


Hot-injection synthesis and ultrasonic chiral ligand exchange enable **surface coordination**
and **red circularly polarized electroluminescence** from chiral CsPbI₃ nanoplatelets.

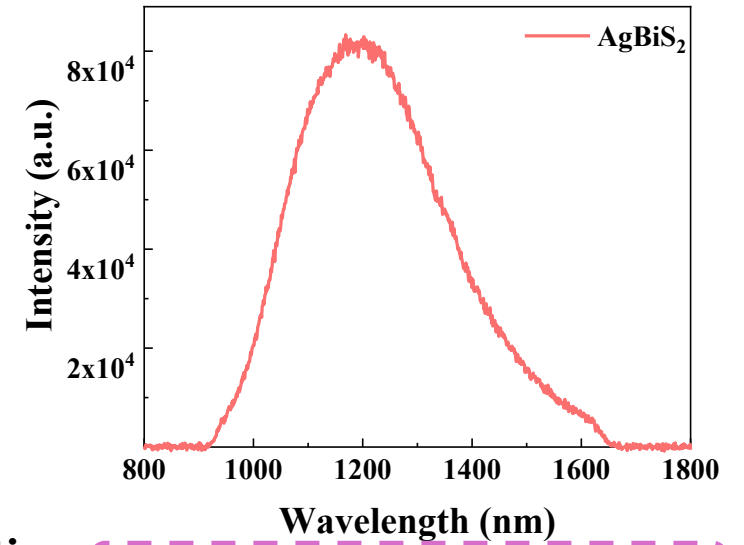
Research Topic: AgBiS₂ Quantum Dots

Research purpose:

To understand the **optical properties** and **carrier recombination processes** in AgBiS₂ QDs.

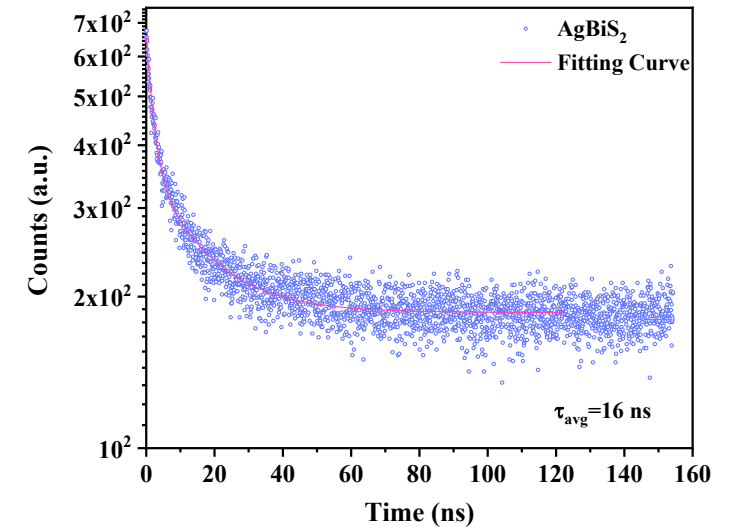


Synthesis process



Characterization

Photoluminescence spectrum

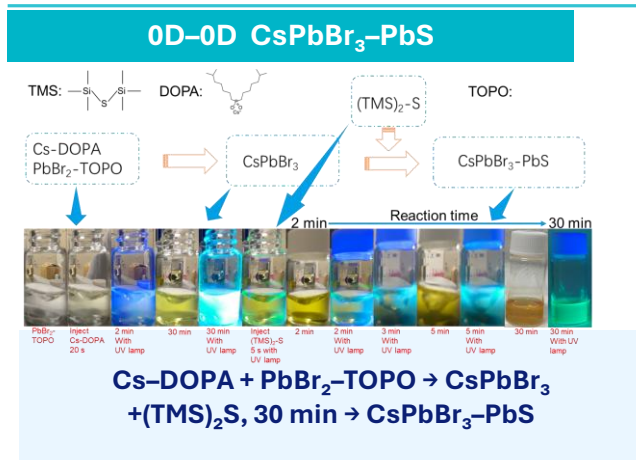


Time-Resolved Photoluminescence

Interface-Engineered CsPbBr₃ Nanocrystal Heterojunctions

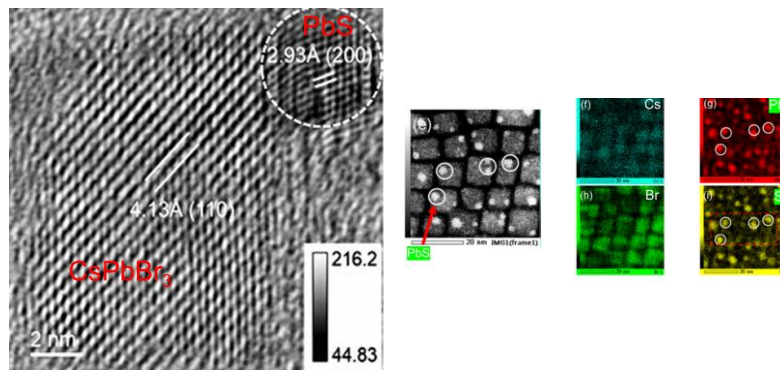
Room-temperature synthesis • atomic-scale verification • directional charge and energy transfer

Synthesis Route



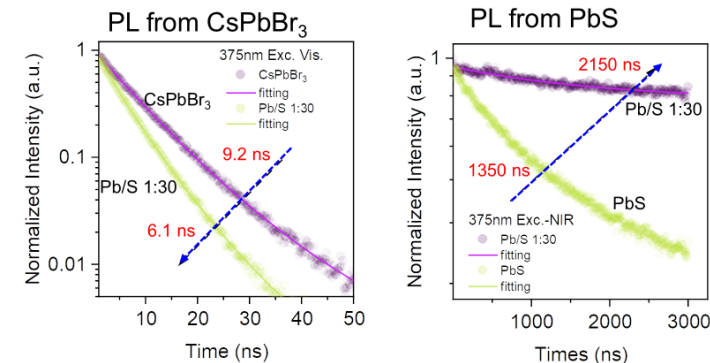
Sequential room-temperature construction

Atomic-Scale Evidence



EDS shows localized S-rich PbS domains on the CsPbBr₃ nanocrystal framework

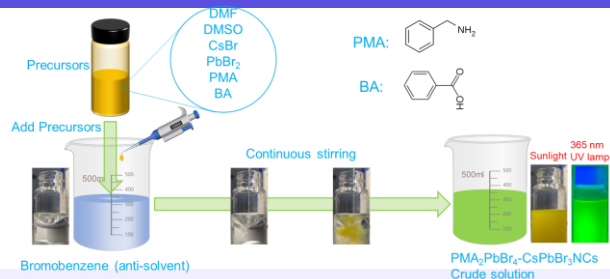
Photophysical Function



CsPbBr₃: 9.2 → 6.1 ns | PbS: 1350 → 2150 ns

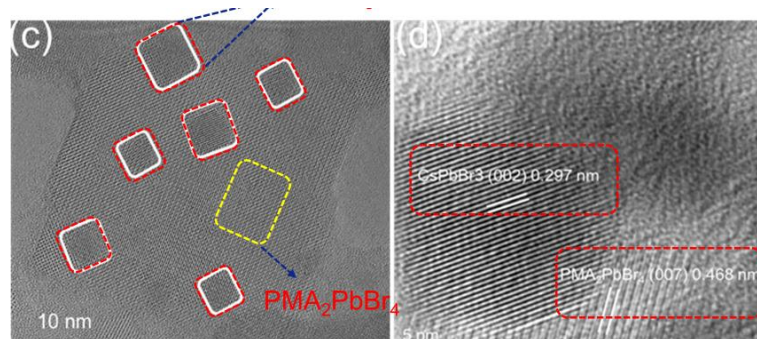
Carrier transfer from visible CsPbBr₃ states into neighboring NIR PbS domains.

2D-3D PMA₂PbBr₄-CsPbBr₃



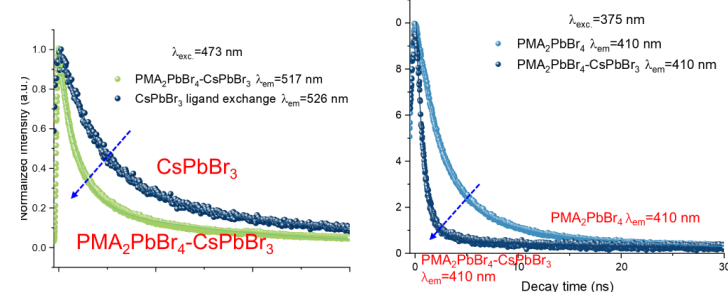
DMF/DMSO precursor injected into bromobenzene antisolvent under stirring

In-situ formation of horizontal 2D-3D heterojunctions



0.297 nm CsPbBr₃ (002) | 0.468 nm PMA₂PbBr₄ (007)

CsPbBr₃ nanocrystals embedded laterally within the PMA₂PbBr₄ matrix

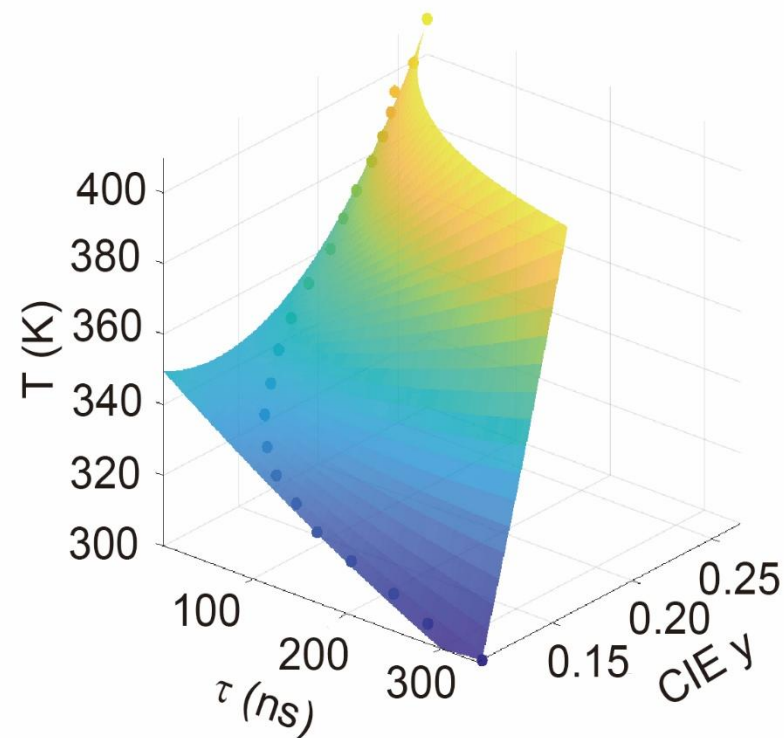
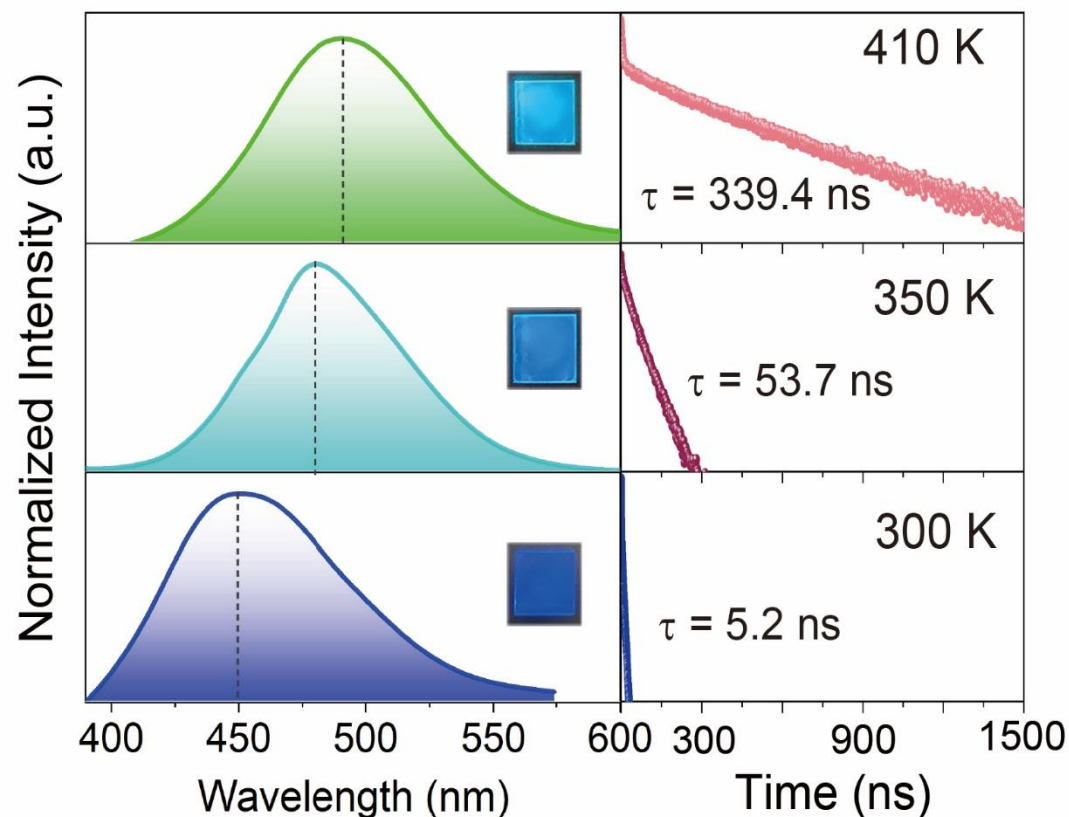


473 nm: hole transfer | 375 nm: energy/electron transfer

Excitation-selective coupling regulates charge separation and sensitized emission.

Research message: Solution-phase heterojunction engineering turns CsPbBr₃ nanocrystals from isolated emitters into interface-active platforms for NIR coupling and 2D-3D charge/energy transfer.

Surface and Excited-State Engineering of Tin-Based Perovskite Nanocrystals



Multi-Strategy Engineering of Temperature-Responsive Self-Trapped Excitons in Tin-Based Double Perovskite Nanocrystals Enables High-Sensitivity Fluorescence Thermometry