

# 半導体スピントロニクス実用化最大の問題

## 「室温動作の壁」を突破！

情報技術のブレークスルーとなる世界最高性能の半導体スピン増幅を実現

情報科学研究所電子材料学研究室

准教授

樋浦諭志（発表者）

博士1年

佐藤紫乃

技術職員

高山純一

教授

村山明宏

# 発表の流れ

1. 自己紹介、研究室紹介
2. 高度情報化社会の課題、次世代の電子・光技術について
3. 電子スピンと光の情報変換とは
4. 今回の研究成果について
5. 今後の研究展開、将来展望、まとめ

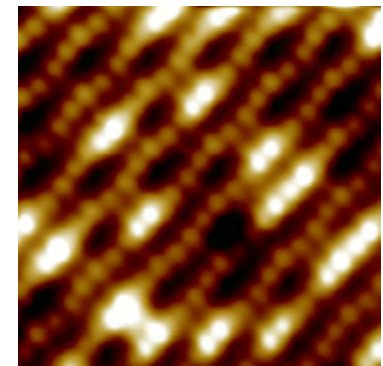
名前：樋浦 諭志（ひうら さとし）  
年齢：31歳（平成元年生まれ）  
出身：北海道石狩市



経歴（博士後期課程以降）

2014年4月～2016年12月 北海道大学 大学院情報科学研究科 博士後期課程

研究課題：酸化鉄 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ の原子レベルでの電子物性の研究  
(人類最古の磁石、次世代のエレクトロニクス材料)

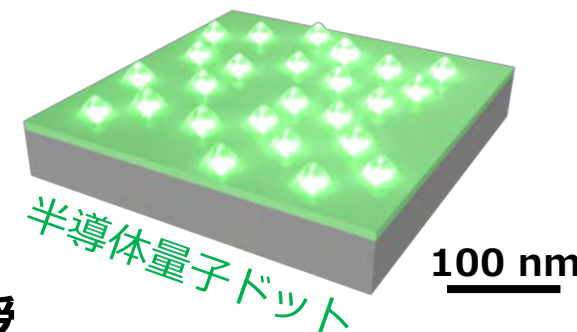


1 nm

※丸い粒は鉄原子

2017年2月～2020年2月 北海道大学 大学院情報科学研究院 助教

研究課題：半導体量子ドットのスピン機能の開拓と光デバイス応用



100 nm

2020年3月～ 北海道大学 大学院情報科学研究院 テニユアトラック准教授

※北海道大学独自の「**アンビシャステニユアトラック制度**」に採択

2021年4月～ JST創発的研究支援事業に採択（本学から7名採択）

研究課題：ナノ量子光スピン機能の開拓による光電スピントロニクスの創成



創発的研究支援事業  
Innovation Oriented Research for disruptive Science and Technology

## 研究室のメンバー

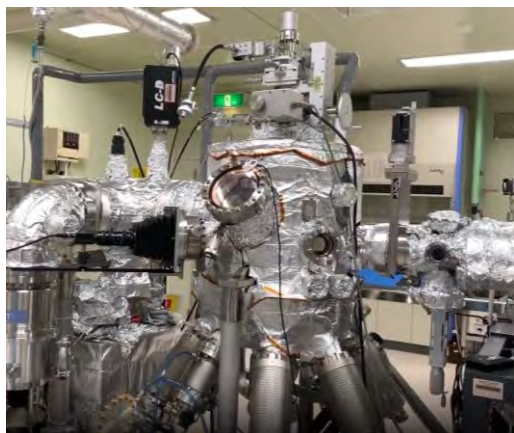
教職員：村山教授、菅原准教授、樋浦准教授、高山技術職員

学生：博士課程2名、修士課程7名、学部生5名

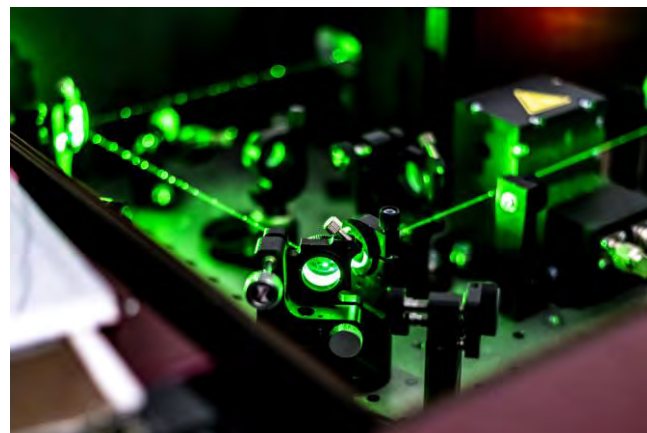
## 研究内容：

電子と光の情報変換（光電変換）に必要な「**半導体ナノ材料**」の

結晶成長



光学的評価



光デバイス応用

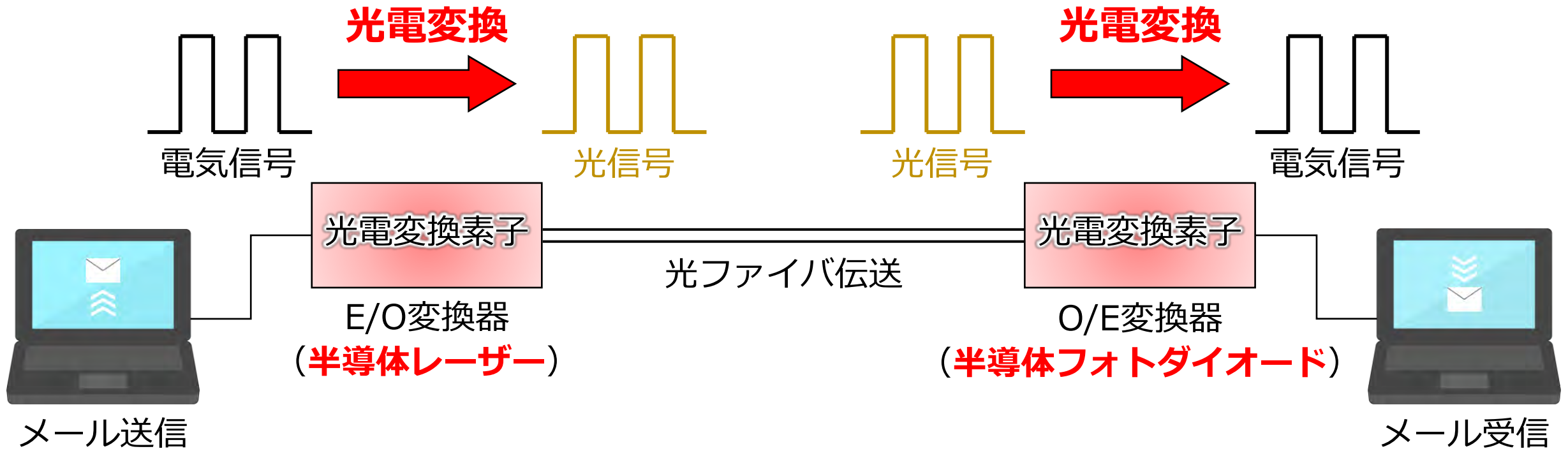




光電変換：電気信号を光信号に、あるいは光信号を電気信号に変換すること

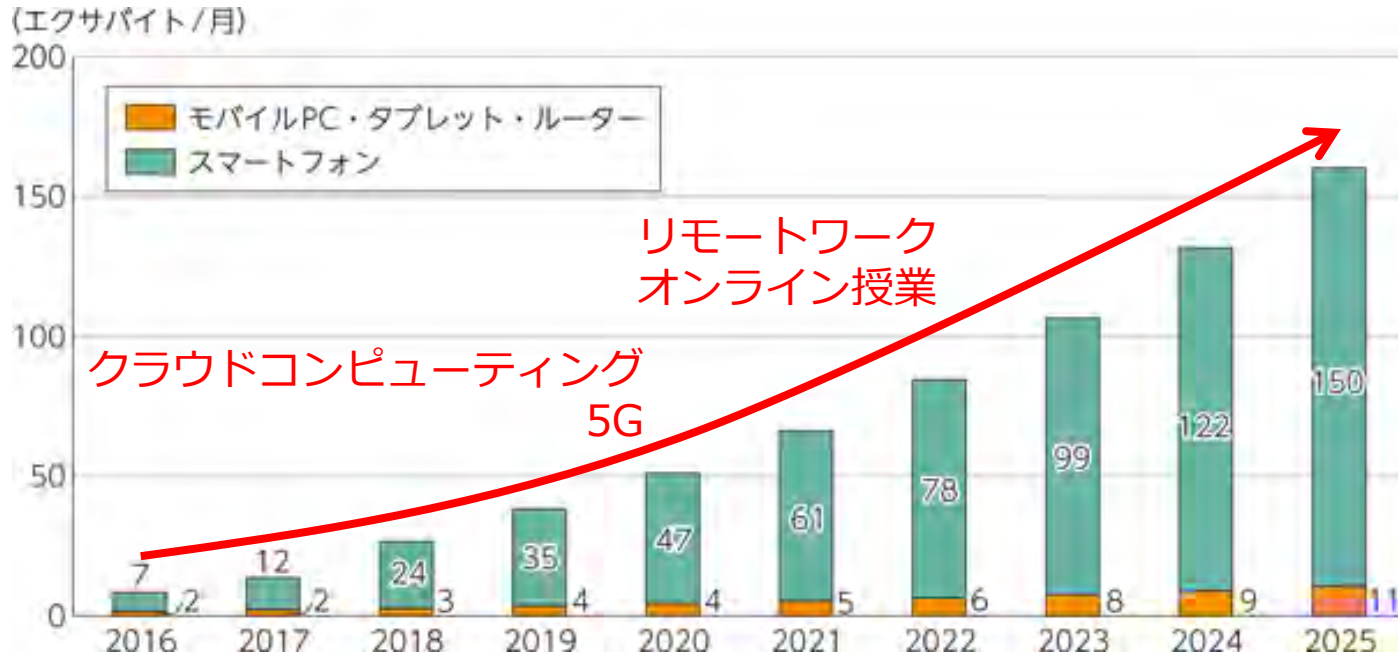
## 光通信における光電変換

(電子メール送受信の例)



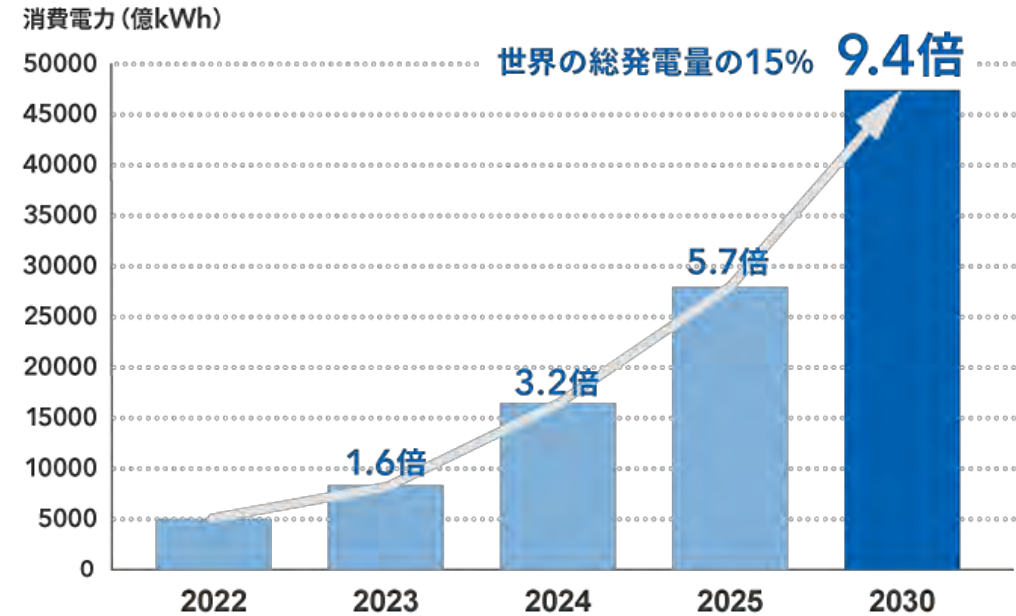
## 高度情報化社会の急速な進展（ビッグデータ、人工知能、IoTの台頭）

### モバイル経由でのデータ通信量の推移（国内）



(出典) 総務省 令和2年版 情報通信白書

### データセンターの消費電力予測（世界）



(出典) TDK

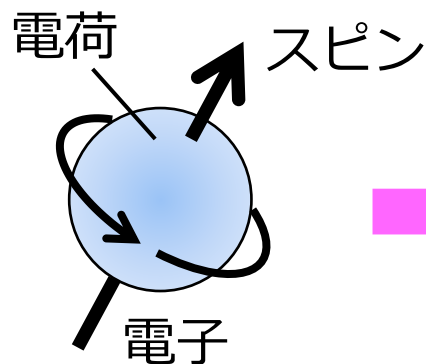
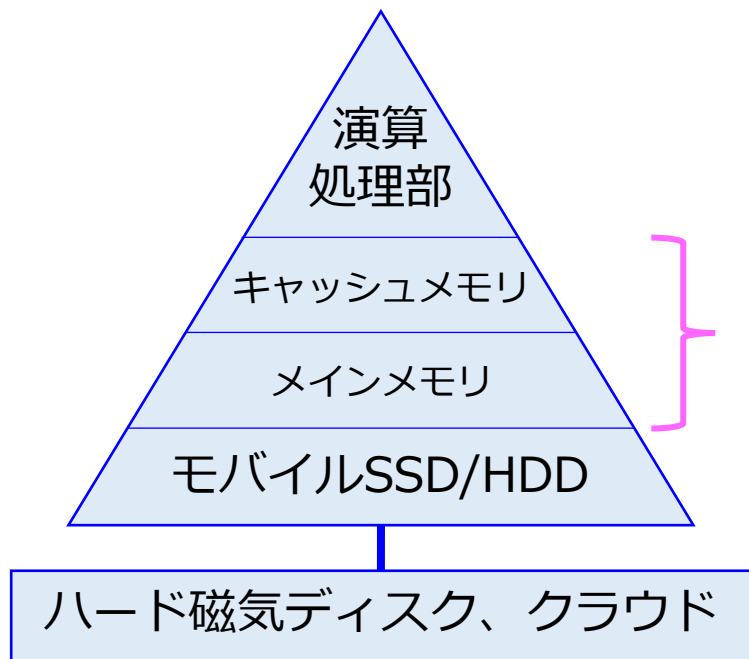
## 情報社会を支える情報システムの消費電力の削減が急務の課題

## 現在のエレクトロニクス

電子の電荷を情報キャリアに用い、  
「揮発性」(電源オフで記憶情報が損失)

待機電力・動作電力ともに大きい

## 現在のコンピュータ



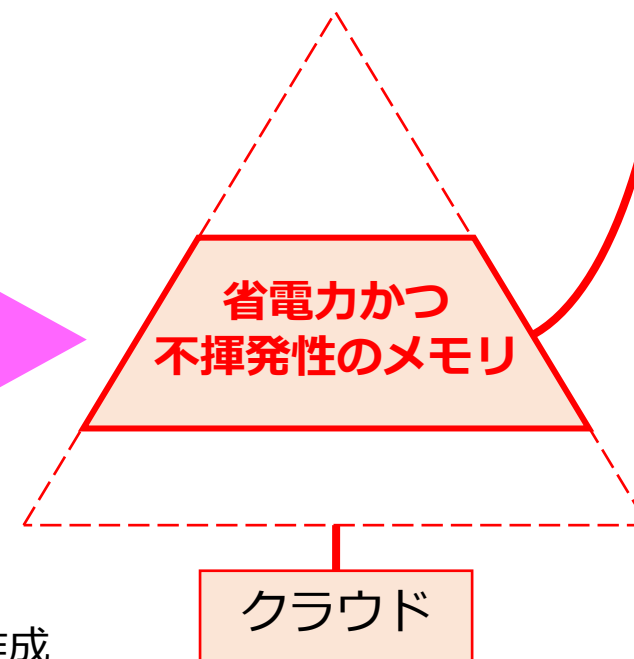
(出典) 内閣府ImPACT資料を基に作成

## スピントロニクス

電子のスピンを情報キャリアに用い、  
「不揮発性」(電源オフで記憶情報が保持)

待機電力ゼロ・動作電力1/100

## 将来のコンピュータ





NTTが提唱するIOWN構想\*

将来技術

光技術による「伝送」  
電子技術による「処理」

従来技術

光伝送の短距離化

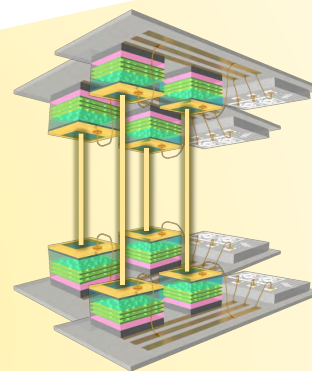
光と電子回路の融合による  
「光電融合型の情報処理」



光ファイバ伝送  
(>1 km)



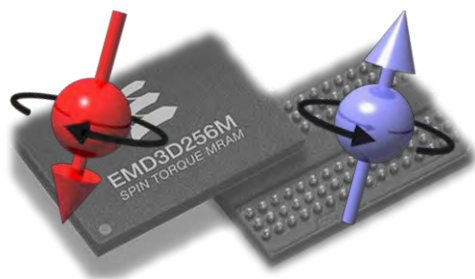
データセンタ光伝送  
(数m~数100m)



チップ間・  
チップ内光伝送  
(<1 mm)

\*光技術を電子技術に融合した「光電融合型」のチップを実用化し、発信元から受信先までの  
**全ての通信を「光」**でつなぐ「オールフォトンクス・ネットワーク」を構築する構想  
(NTT、ソニー、米インテルを主要メンバーとした大型プロジェクト)

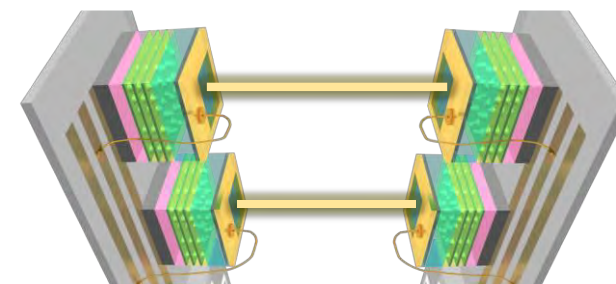
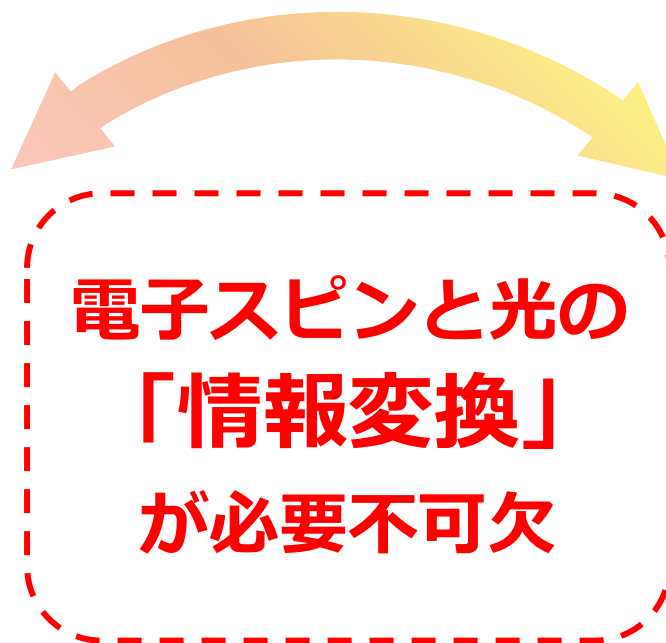
(出典) NTTとJSTの共同発表資料を基に作成



## スピントロニクス

- ・待機電力の不要化
- ・高速かつ無限の書き換え耐性

**情報記憶**      **金属強磁性体**

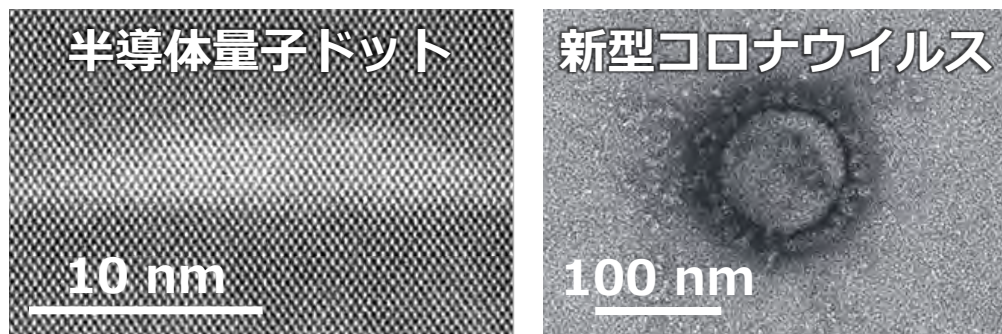


## 電子回路の光配線

- ・電気配線の発熱の問題を解決
- ・光技術の利点  
(大容量通信、三次元化)

**情報伝送**      **半導体**

**膨大な情報処理と消費電力負担を支える次世代の情報技術**



原子1個の大きさ: ~0.1 nm

## 半導体量子ドット

1982年に東京大荒川教授が提唱（日本発のナノ材料）

**超低消費電力の実用光デバイス材料**

**※2011年に量子ドットレーザーが実用化**

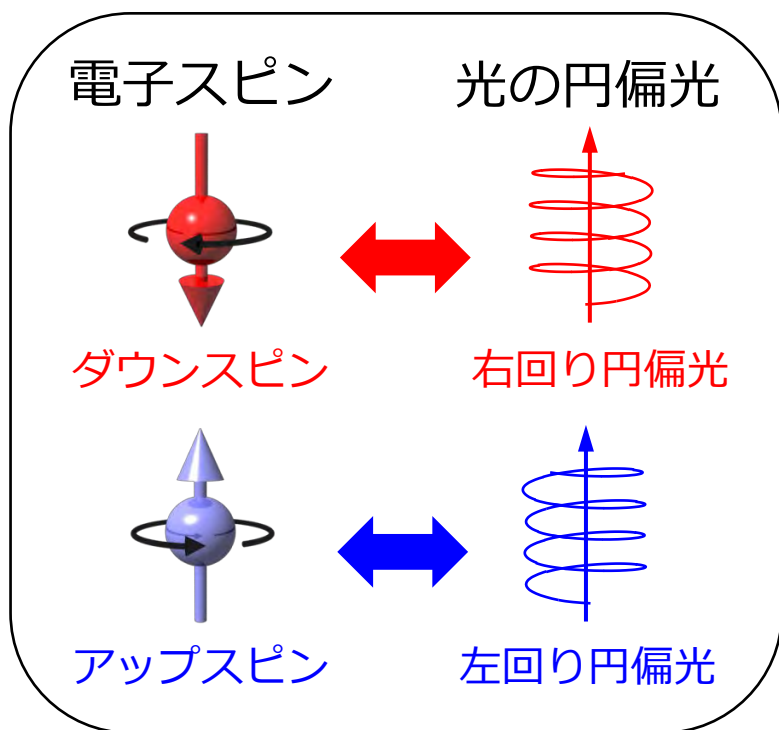
発光において**電子のスピン情報を保持**し、  
光のスピン状態である**円偏光\***に転写

\*光は振動しながら進むが、その振動がらせん状に円を描く光



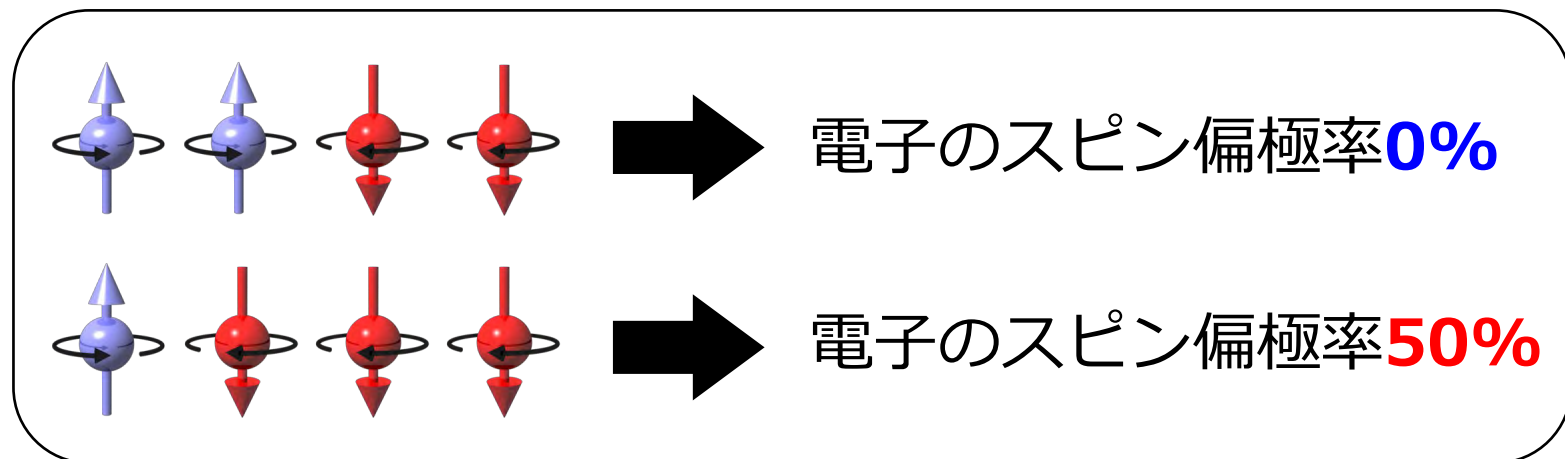
**半導体量子ドットは電子スピンと光の情報変換媒体として有望**

電子のスピンの情報 = 2つのスピンの電子数の偏り (電子のスピンの偏極率)

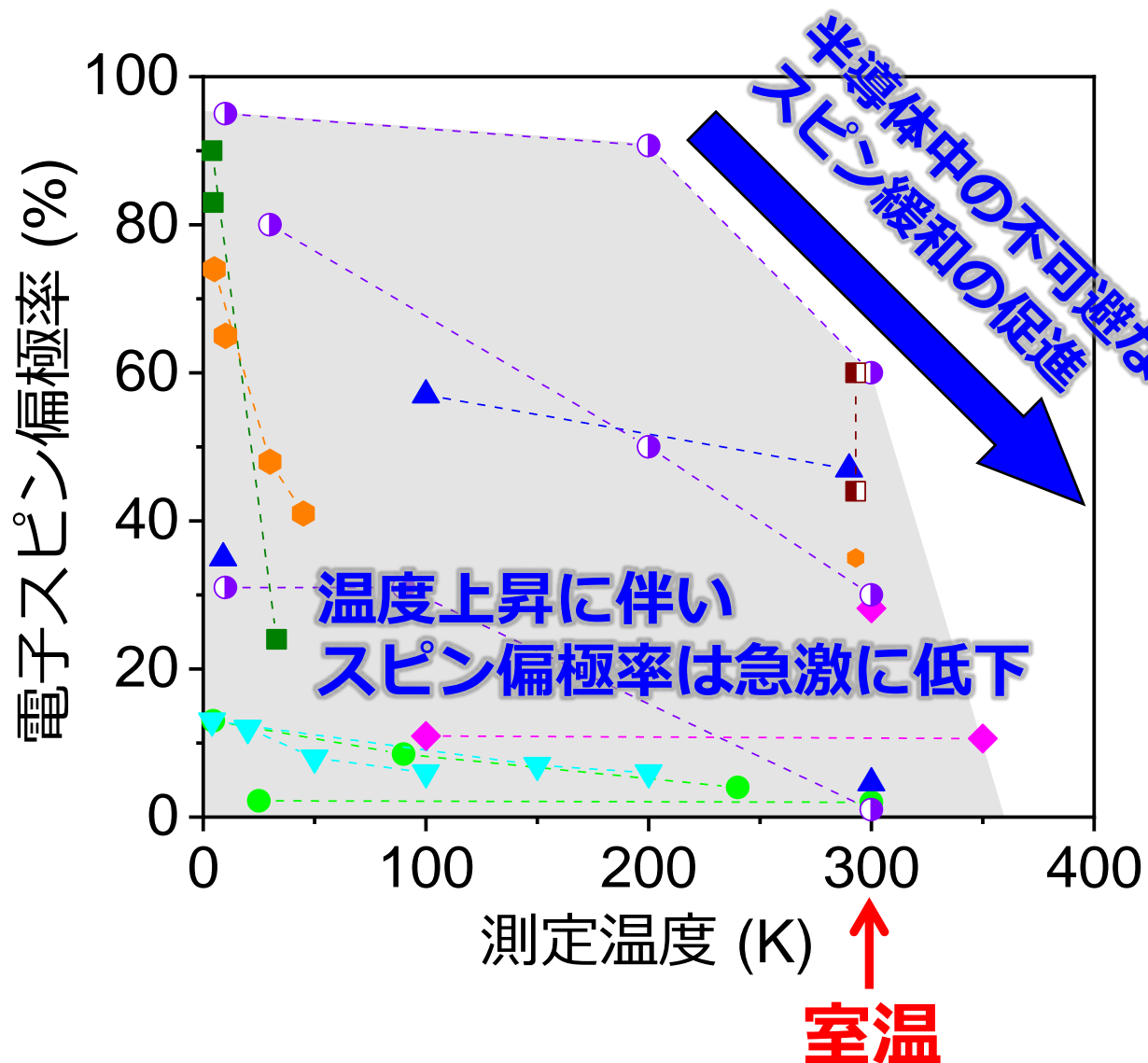


$$\text{電子のスピンの偏極率} \frac{N_{\downarrow} - N_{\uparrow}}{N_{\downarrow} + N_{\uparrow}} = \text{光の円偏光度} \frac{I_{\sigma+} - I_{\sigma-}}{I_{\sigma+} + I_{\sigma-}}$$

$N_{\downarrow}$ : ダウンスピン・アップスピンの電子数  $I_{\sigma\pm}$ : 右回り・左回りの円偏光発光強度



電子のスピンの情報を光情報に高効率に変換するには  
半導体中の電子のスピンの偏極率を高める必要がある



## 電気的スピン注入の先行研究

- 希薄磁性半導体/半導体
- 金属強磁性体/半導体
- ▲ 金属強磁性体/絶縁体/半導体
- ▼ ホイスラー合金/半導体
- ◆ 酸化物磁性体/半導体

## 光スピン注入の先行研究

- ◆ 半導体量子ドット
- 二次元遷移金属ジカルコゲニド
- 希薄窒化ガリウムヒ素

## スピンスピン情報の“損失”

スピンスピン緩和：スピンスピン偏極は時間とともに失われる

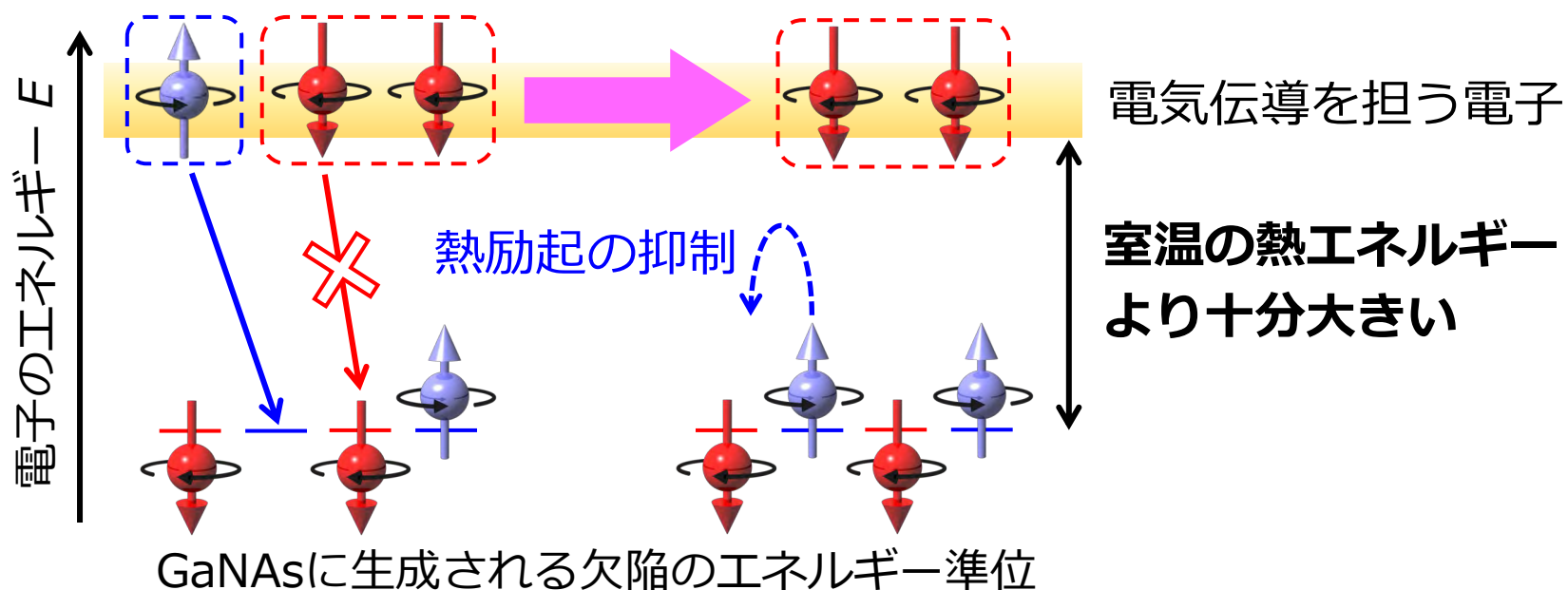


## 希薄窒化物半導体\*(GaNAs)の室温スピン増幅

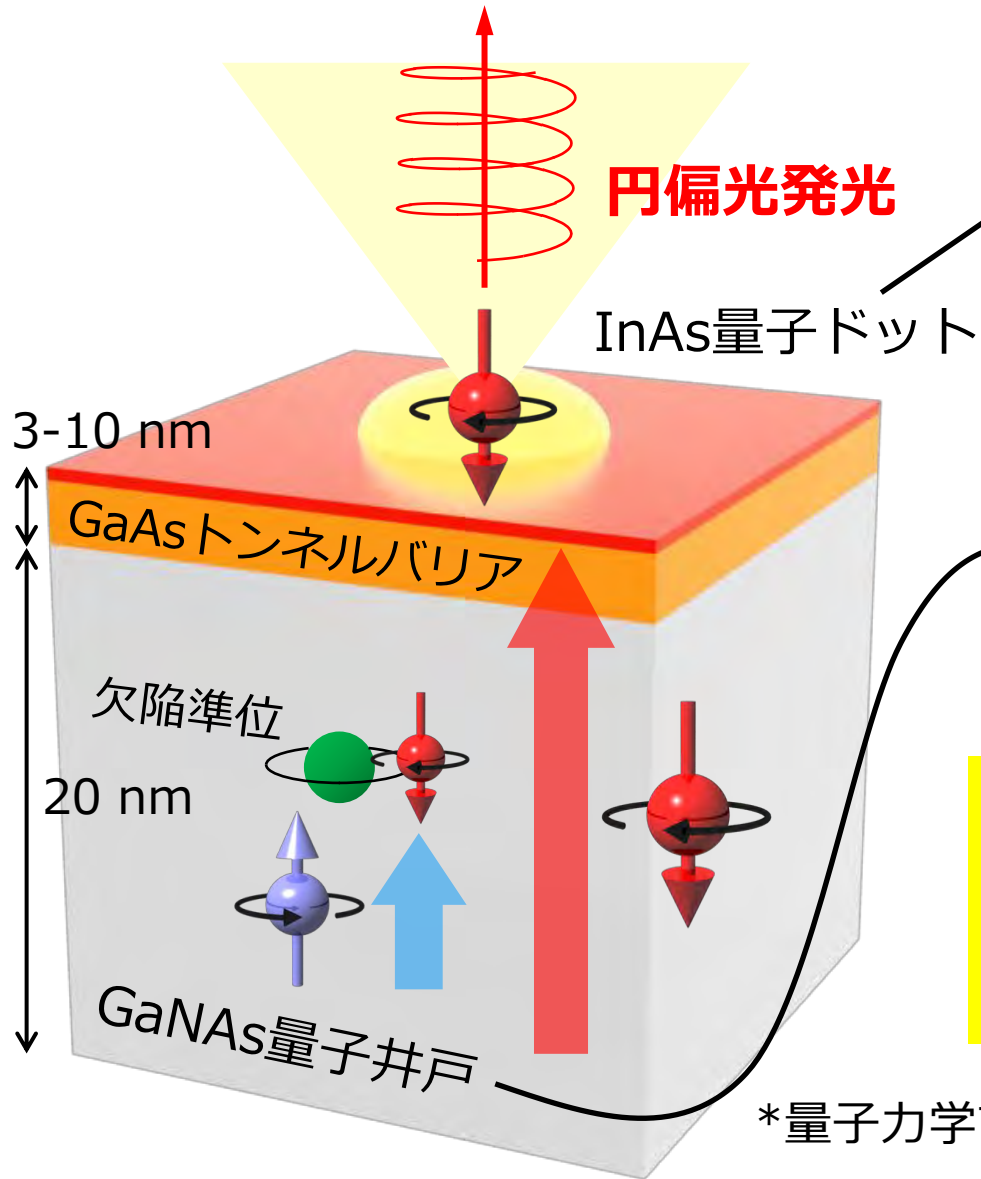
\*数%程度の窒素を導入した半導体

※海外共同研究グループであるスウェーデンのリンショープン大の発見：*Nature Materials* 8, 198 (2009).

### スピン偏極の増幅 (スピントラッキング効果)



**GaNAsは室温で電子のスピン偏極を増幅 (他の半導体には無い特性)**



**光電スピン変換層**：InAs量子ドット  
実用光デバイス材料、スピン偏極を保持

**スピフィルター層**：GaNAs量子井戸  
室温でスピン偏極を増幅

**GaNAsでスピン偏極を高めた電子を  
量子ドット発光層にトンネル\*注入**

\*量子力学で、エネルギー的に通常は超えられない障壁を粒子が通り抜ける現象

### 三者の研究の強みを結集

**リンショーピン大学**  
(スウェーデン)

研究全体の統括

光学測定

GaNAsの室温スピン増幅  
に関する豊富な知識と経験

**北海道大学**  
(日本)

**半導体中の電子スピンの動きを測定できる  
超高速光計測技術**

量子井戸から量子ドットへのトンネルスピン注入に関する豊富な知識と経験

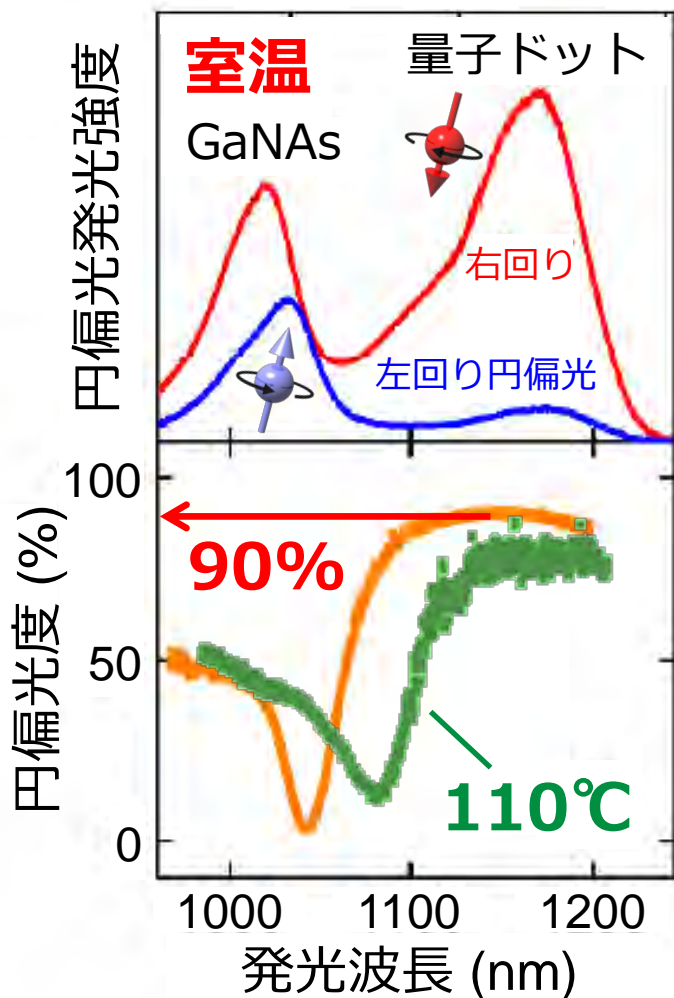
**タンペレ大学**  
(フィンランド)

半導体試料作製

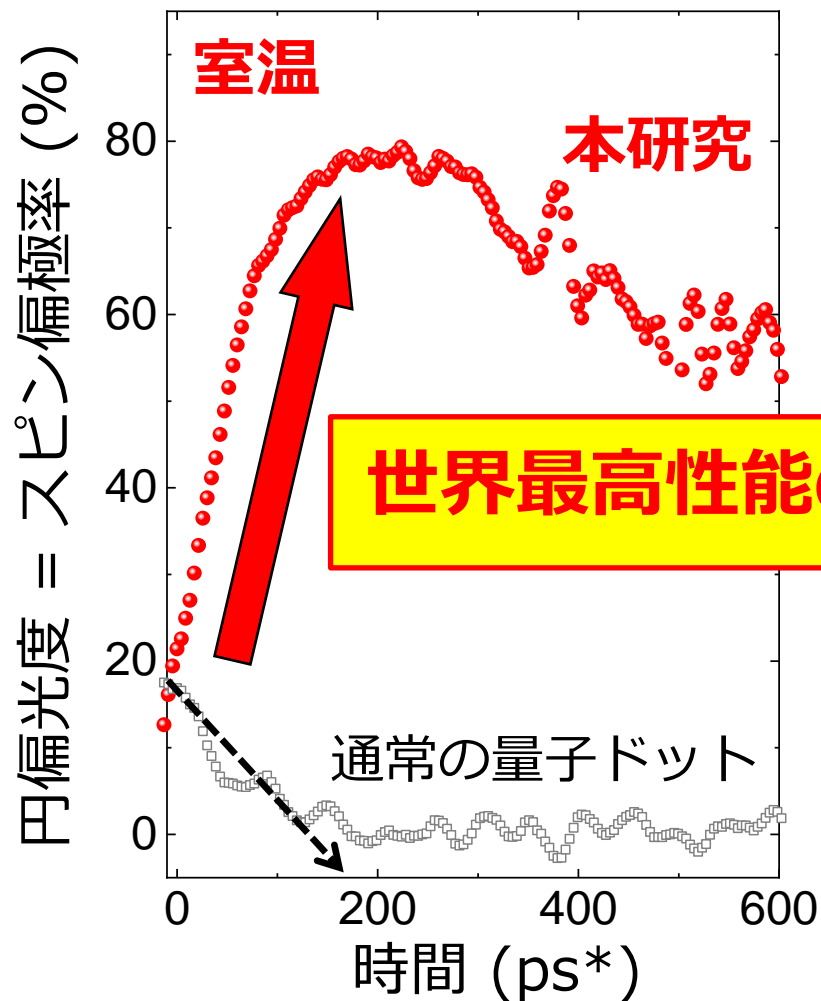
GaNAsの結晶成長に関する豊富な知識と経験



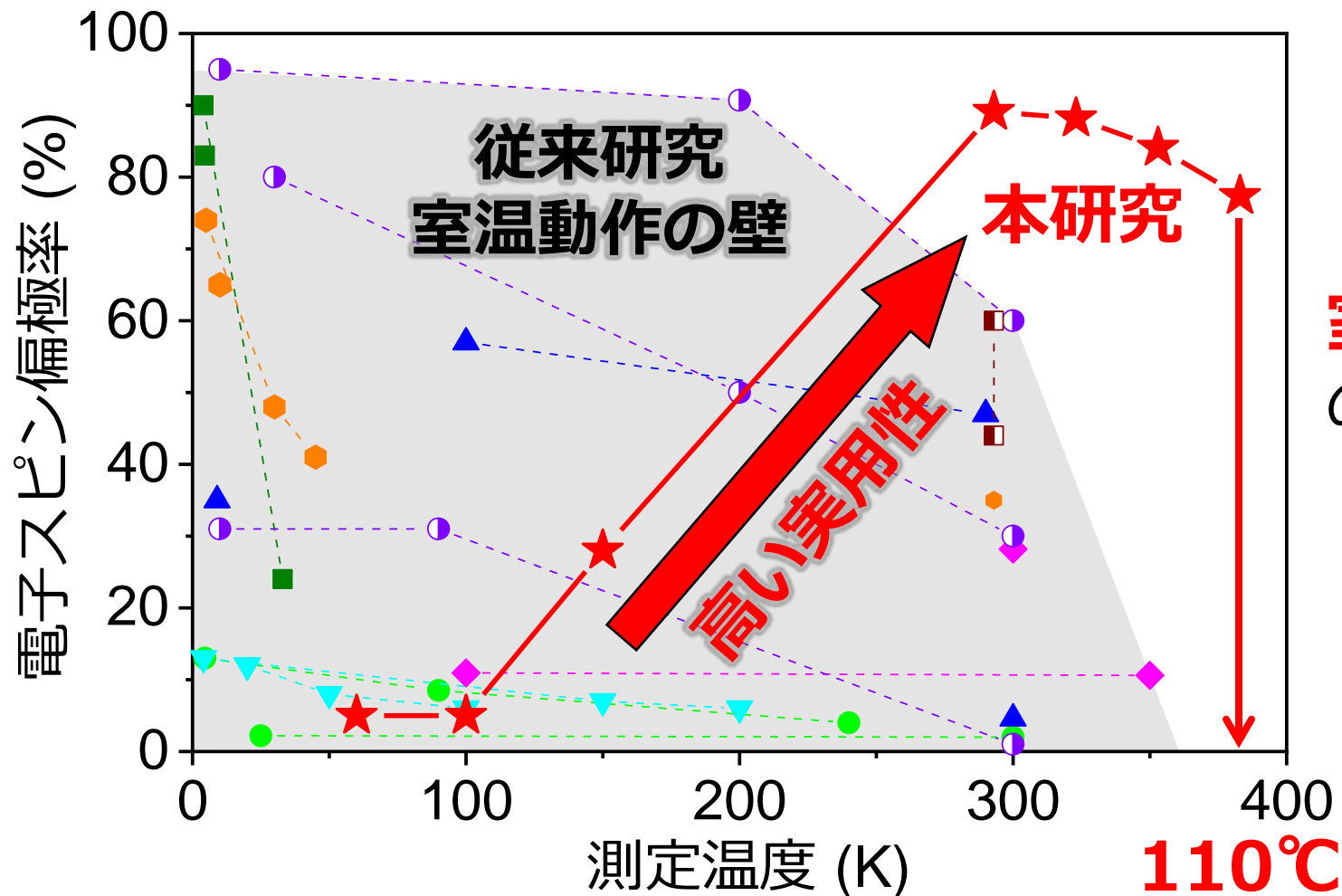
## 発光スペクトル



## スピン偏極率の時間推移



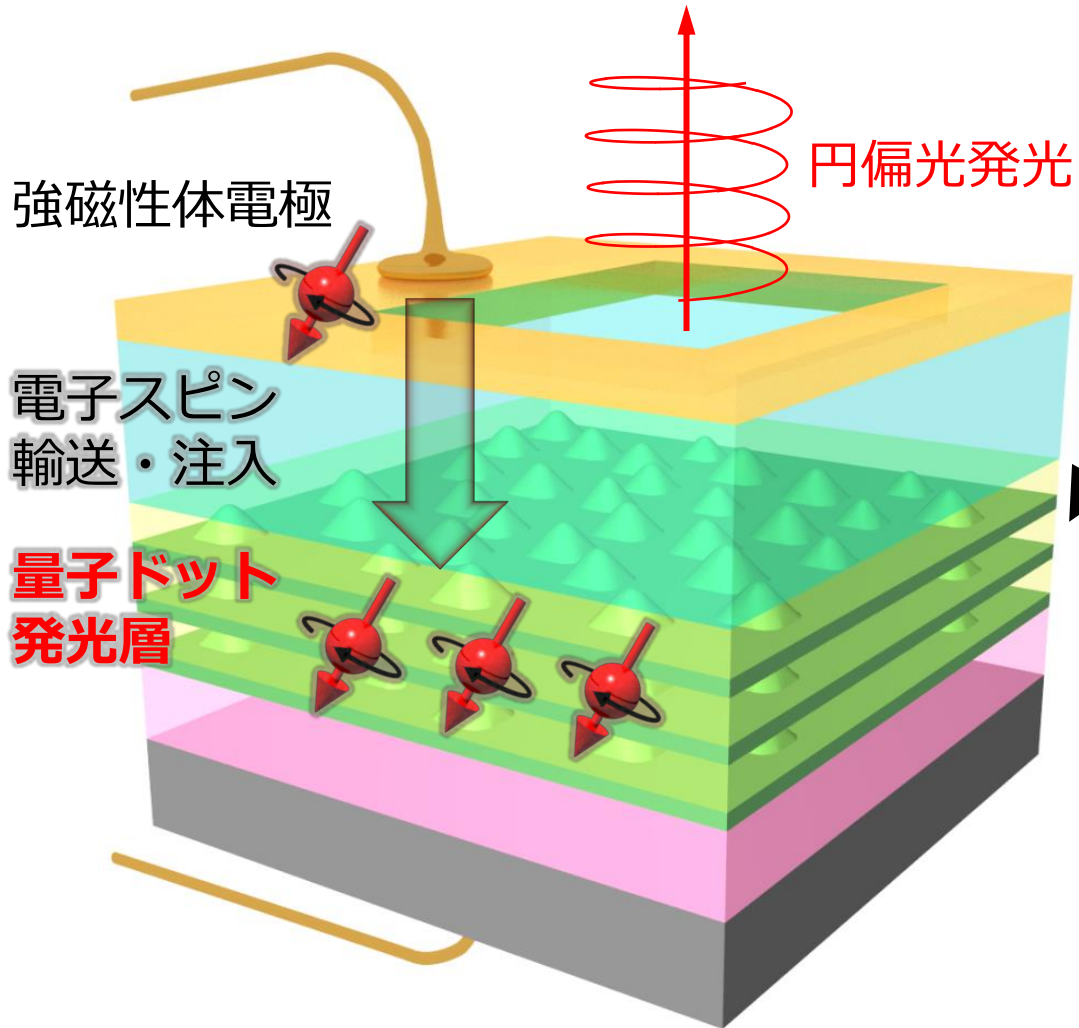
\*1 ps(ピコセカンド)は $10^{-12}$ 秒のこと。  
光は1 psの間に約0.3 mm進む。



**室温で90%、110°Cで80%**  
の前人未到のスピンの偏極率

**半導体スピントロニクス「室温動作の壁」を大きく突破**

## 半導体量子ドットを発光層に用いた スピントランジスタ発光ダイオード(LED)



スピントランジスタLEDの量子ドット発光層へ  
**電子スピントランジスタ増幅機能を搭載**

↓

スピントランジスタデバイス群（レーザー、  
フォトダイオードなど）へ展開

↓

**光電スピントランジスタ情報変換基盤の確立**

## 「低消費電力・高速・大容量・低遅延」の光電融合情報処理へ展開




**光電融合技術により社会を新たな次元へ発展**

# 半導体スピントロニクス「殻を破る」ブレークスルー技術を創出



Article | Published: 08 April 2021

**Room-temperature electron spin polarization exceeding 90% in an opto-spintronic semiconductor nanostructure via remote spin filtering**

Yuqing Huang , Ville Polojärvi, Satoshi Hiura, Pontus Höjer, Arto Aho, Riku Isoaho, Teemu Hakkarainen, Mircea Guina, Shino Sato, Junichi Takayama, Akihiro Murayama, Irina A. Buyanova & Weimin M. Chen 

Nature Photonics (2021) | Cite this article

2013 Accesses **135** Altmetric Metrics

**Altmetric Score 135** (5/19時点)  
(Web上での論文の話題度を示す指標)

**2021年のNature Photonics出版論文27編のうち 第2位** (1位は141)

## お問い合わせ先

北海道大学 大学院情報科学研究院  
電子材料学研究室  
樋浦 諭志

TEL/FAX : 011-706-6519

メール : [hiura@ist.hokudai.ac.jp](mailto:hiura@ist.hokudai.ac.jp)