

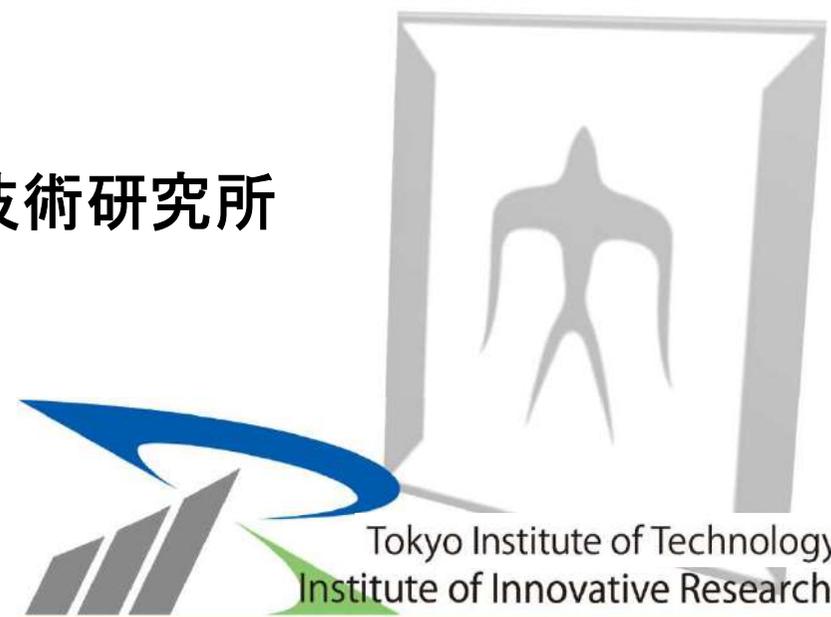
2019年度数理物質科学研究科
研究科修了生によるオムニバス講座

結晶工学、スピントロニクスから生体観察へ ～半歩ずつ異分野へ～

東京工業大学
科学技術創成研究院 未来産業技術研究所
西沢 望

2003年 筑波大学数理物質科学研究科
2008年

入学
修了

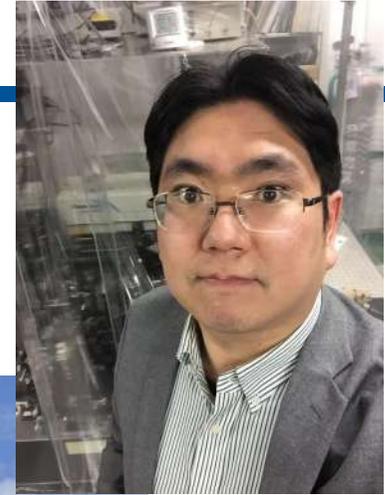


1. はじめに

西沢 望(にしざわ のぞみ):41歳

国立大学法人 東京工業大学

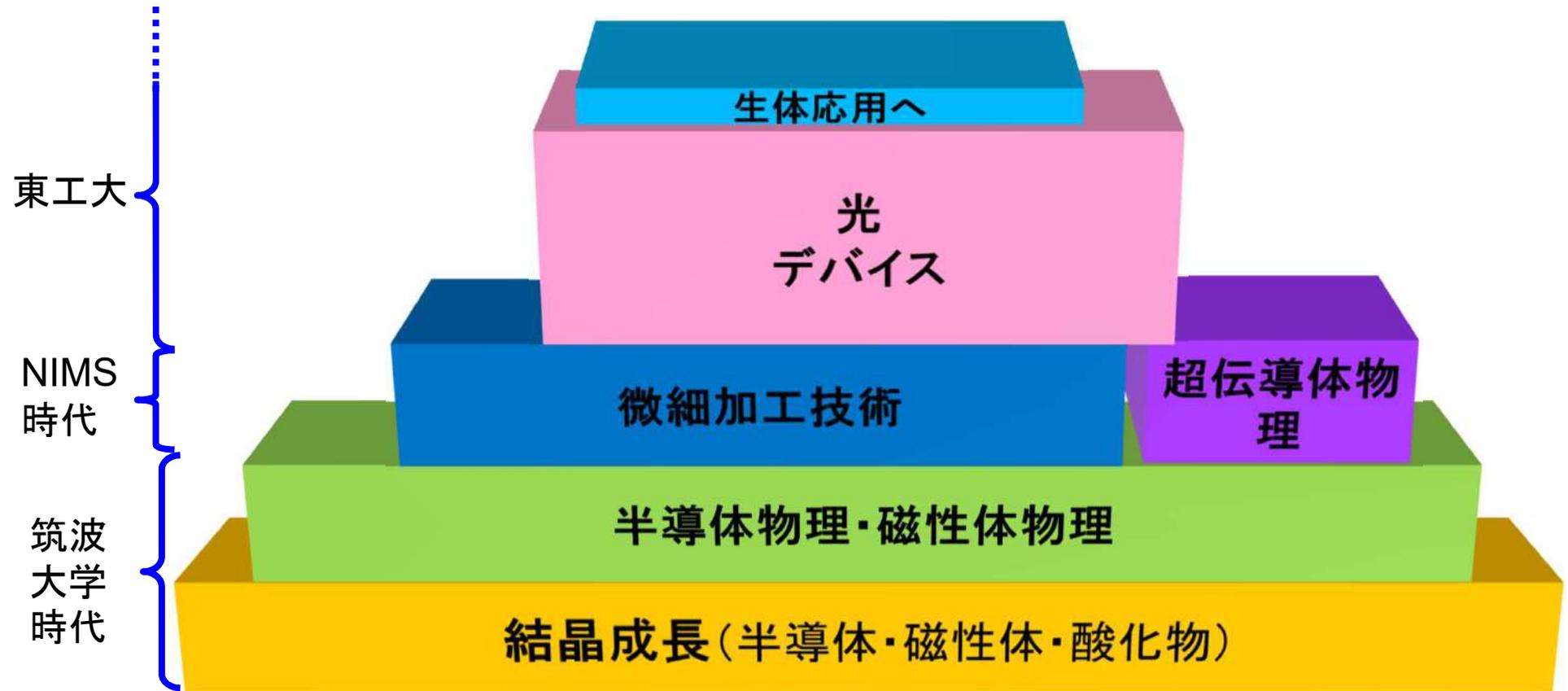
科学技術創成研究院 未来産業技術研究所 助教



1. Outline of my research

FY		
2003 2008	筑波大学大学院 数理物質科学研究科 物性・分子工学専攻 瀧田・黒田研究室(喜多研究室) → 黒田研究室 2008年3月 工学博士号 取得 [研究内容] (Zn,Cr)Teにおける荷電不純物ドーピングによる強磁性特性の制御	
2009 2010	独立行政法人 物質・材料研究機構 国際ナノアーキテククス研究拠点(MANA) ポスドク研究員 [研究内容] 超伝導体/強磁性半導体 接合を用いたスピン偏極電流検出デバイスの開発	
2010 2019 現在	国立大学法人 東京工業大学 像情報工学研究所 研究員 (2010-2012) 特任助教 (2013-) 未来産業技術研究所 助教 (2018-) [研究内容] <ul style="list-style-type: none"> • 円偏光発光デバイスの多機能化と室温動作実現 • 円偏光によるがん診断技術の構築 	

1. Outline of my research

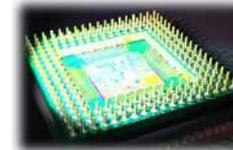


Spintronics

固体中の電子が持つ電荷とスピンの両方を半導体をベースとしたデバイス内で応用することを目指す

半導体デバイス
(電荷)

磁性体デバイス
(スピン)



伝導 ↓ スピン
スピントロニクス
Spintronics



2. 研究の歩み

1. 【筑波大学】

強磁性半導体(Zn,Cr)Te

2. 【NIMS】

超伝導体/強磁性半導体接合

3. 【東工大】

円偏光発光デバイスの多機能化と
室温動作実現

4. 【現在】

円偏光がん診断ツールの開発

2-1 強磁性半導体

スピン源材料

磁性体 \rightarrow (スピン偏極電子) \rightarrow 半導体

効果的に注入できない

↓
強磁性半導体 (半導体に磁性元素を微量に添加)

90' III-V族半導体ベース強磁性半導体

p -(In,Mn)As (1992)

$T_C = \sim 35$ K

p -(Ga,Mn)As (1996)

$T_C = \sim 180$ K

00' 室温以上で強磁性を発現する磁性半導体の探索

強磁性 常磁性

Temp. \rightarrow

キュリー温度(T_C)
= 強磁性上限温度

(Zn,Cr)Te

$T_C = 300$ K (Cr = 20%)

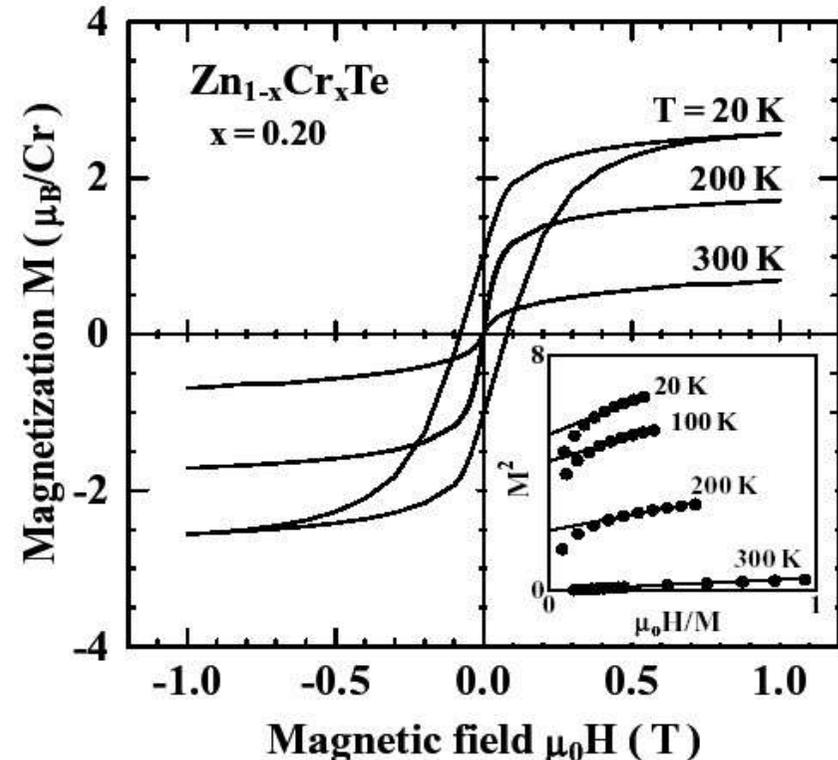
\rightarrow 高抵抗 (半絶縁性)

H. Saito *et al.*, PRL **90**, 207202 (2003)

Motivation

低抵抗(低Cr濃度)領域での(Zn,Cr)Teの
室温強磁性発現を目指す

- キャリアドーピングによる強磁性制御
- 結晶中のCr分布
- 磁気光学効果



2-1 強磁性の制御

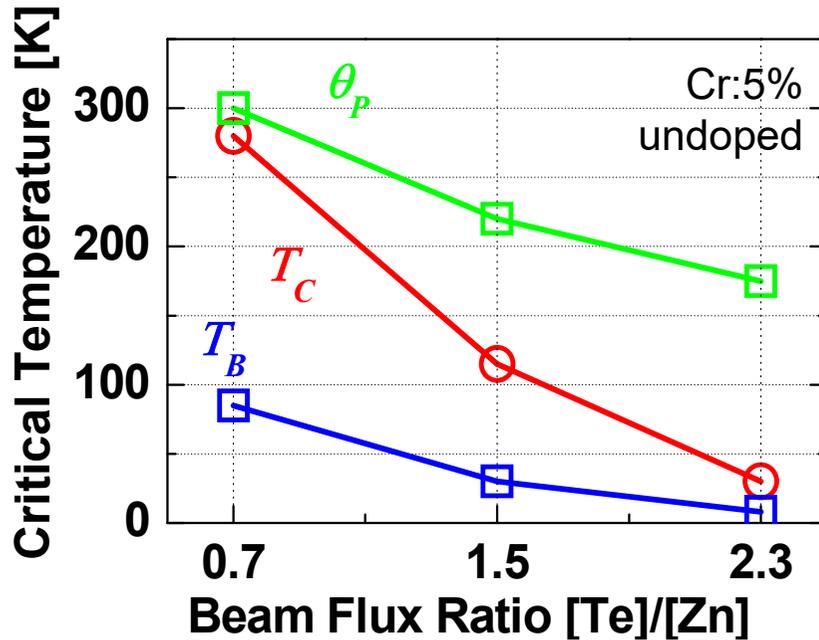
Carrier control

A) 結晶中の欠損制御
B) キャリアドーピング

(VI/II比)

(donor: Iodine, acceptor: Nitrogen)

A) 結晶中の欠損制御



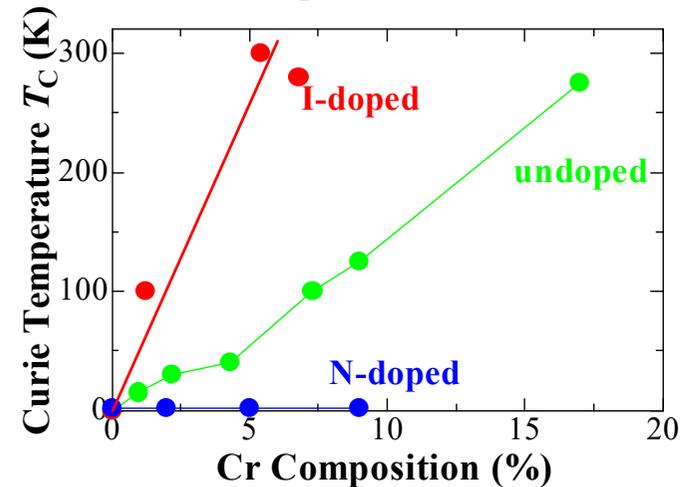
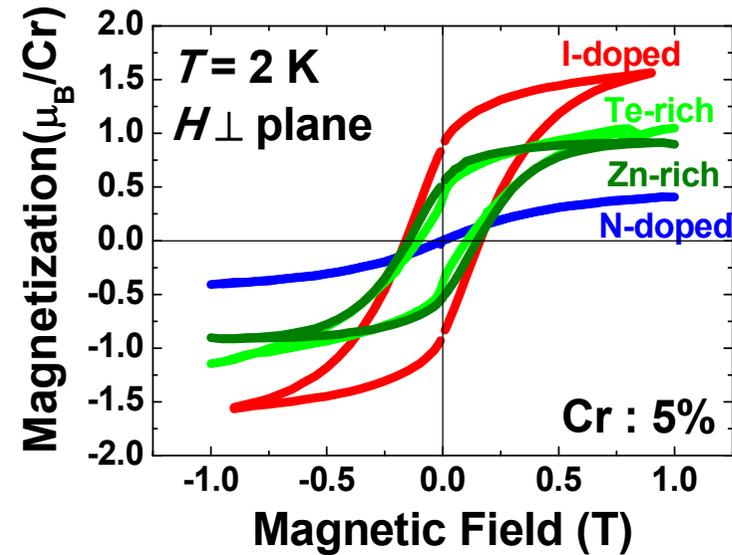
Te-rich → 抑制

Zn-rich → 増強

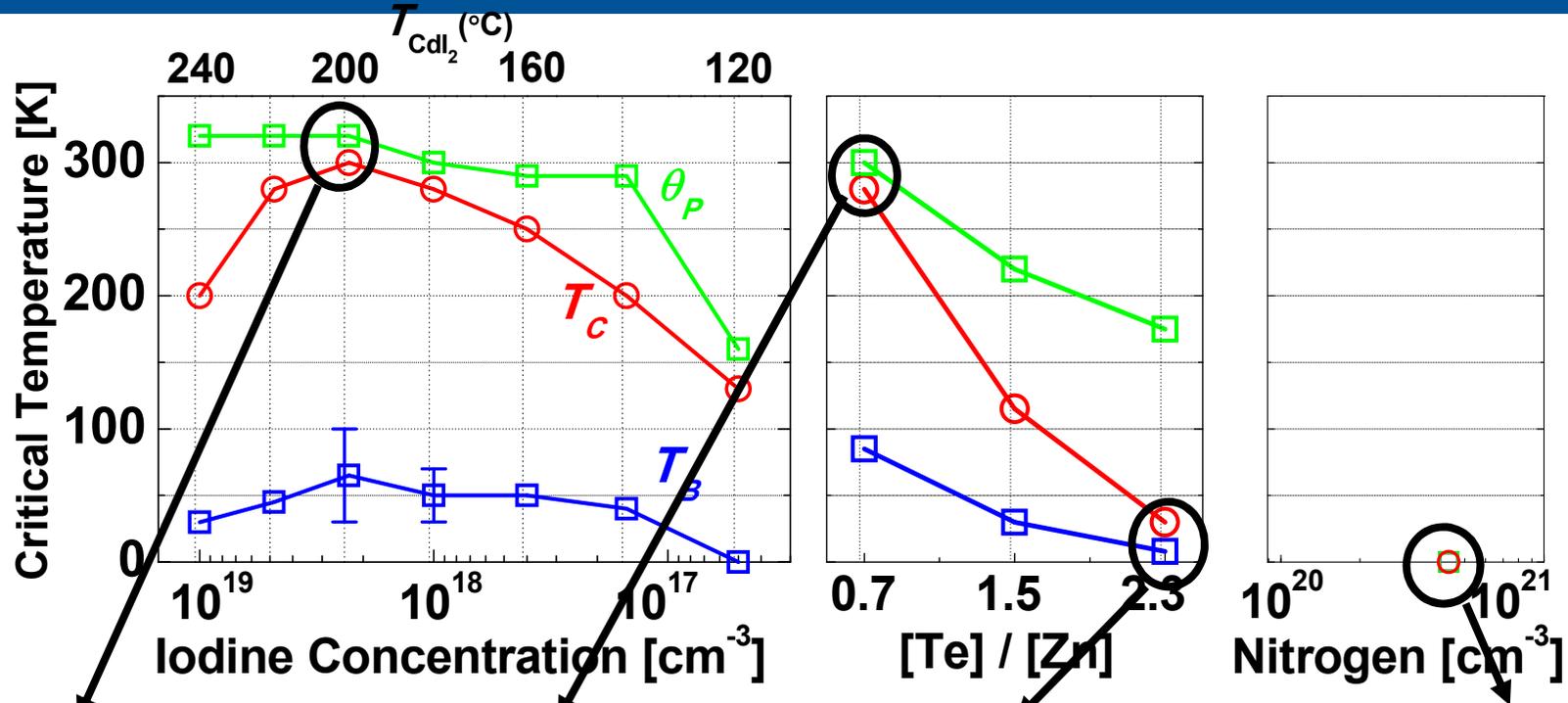
N-doping → 抑制 ($T_C < 2K$)

I-doping → 増強 (High $T_C \sim RT$)

B) キャリアドーピング



2-1 Cr distribution

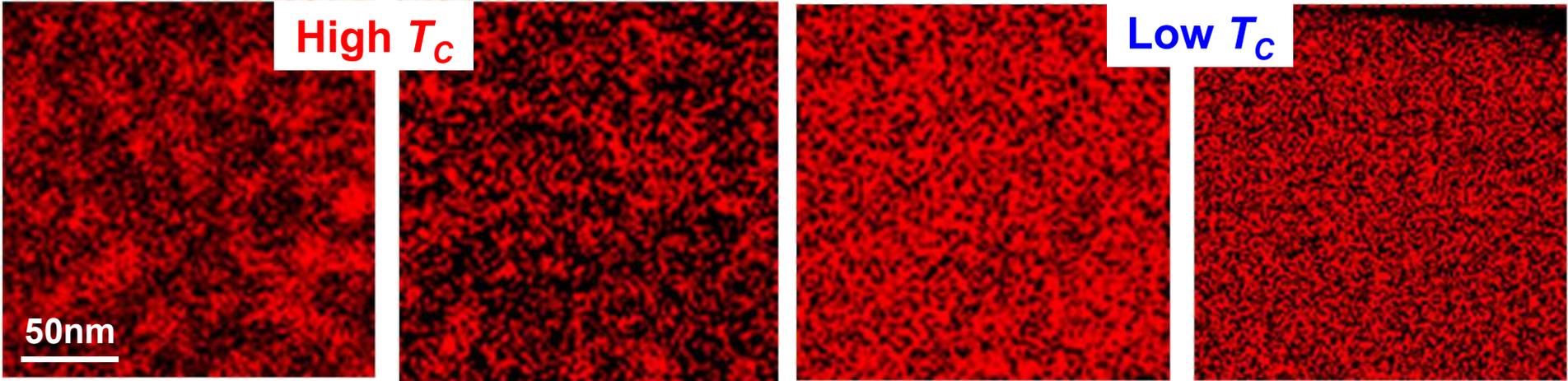


I-doped

undoped(Zn-rich)

undoped(Te-rich)

N-doped



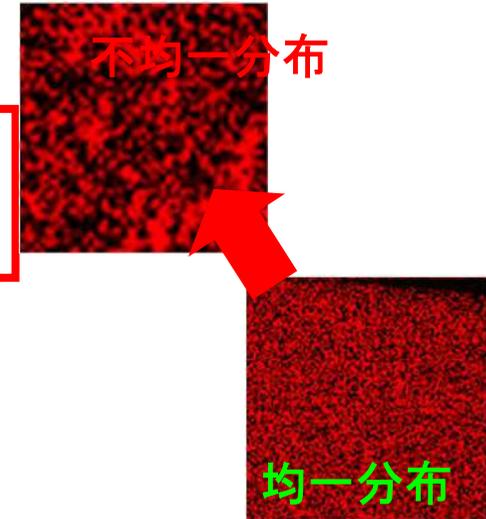
不均一

均一

2-1 Summary

(Zn,Cr)Teにおける強磁性制御

I-doped (Zn,Cr)Te
undoped (Zn,Cr)Te grown in Zn-rich condition



強磁性増強

不均一分布 → 強磁性クラスターの形成

Cr 価数 → Cr ions間の相互作用 → 分布

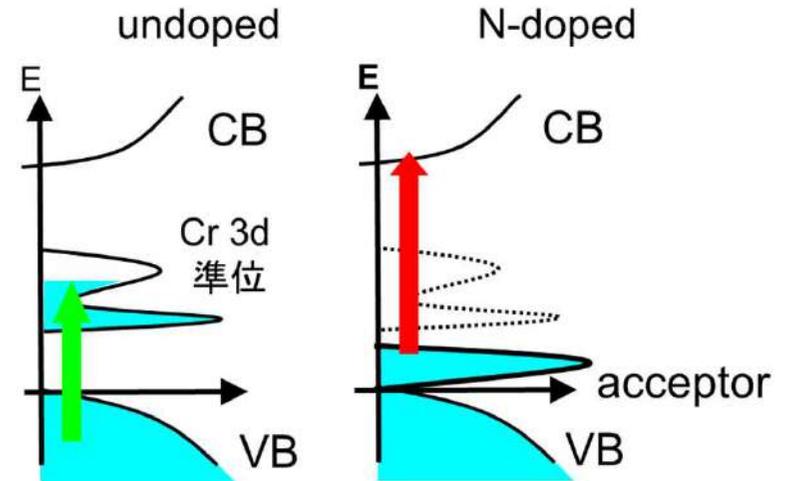
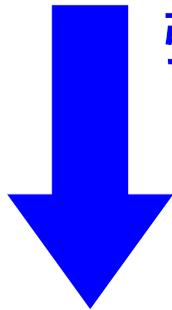
undoped (Zn,Cr)Te grown in Te-rich condition

強磁性抑制

Cr3d準位の状態密度の減少

Nドーピングによるd-電子の減少

N-doped (Zn,Cr)Te



Next step (Tsukuba → NIMS)



【分野】

- 同じ分野で同じことをしてもつまらない
 - しかし、全く違う分野に行くのも大変
- 半歩だけ外に出よう

[(磁性)半導体 + 他分野材料]



半導体・磁性体



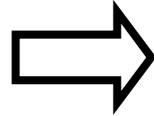
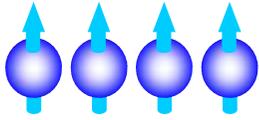
【技術】

- やったことのない、汎用性の高い技術が身につくところに行こう
 - その次に行った時にいろいろできる技術
- 微細加工技術、顕微鏡技術など

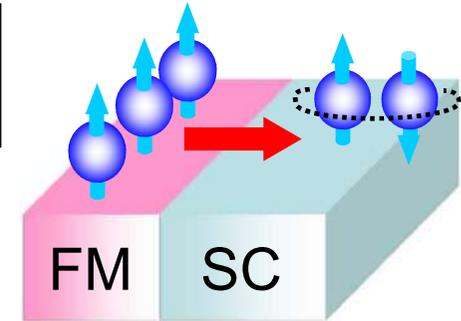
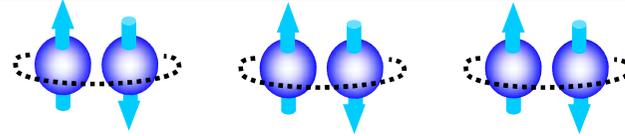
2-2 超伝導体へのスピン注入

与えられたテーマ

強磁性金属
(スピン偏極電子)



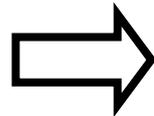
超伝導体
(クーパー対: 反平行スピン対)



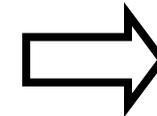
超伝導性の減衰 (逆近接効果)の実験的検出

(問題点) 磁性体/超伝導帯 直接接合 → 界面近傍の強磁性が損失 (近接効果)

強磁性半導体



常伝導体(半導体)



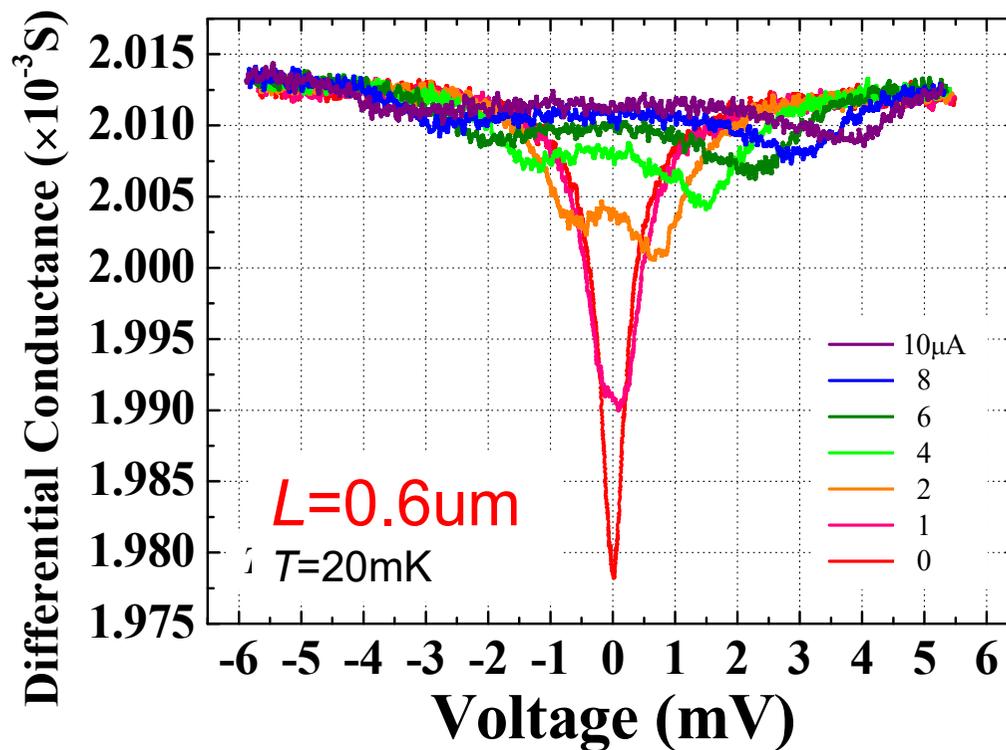
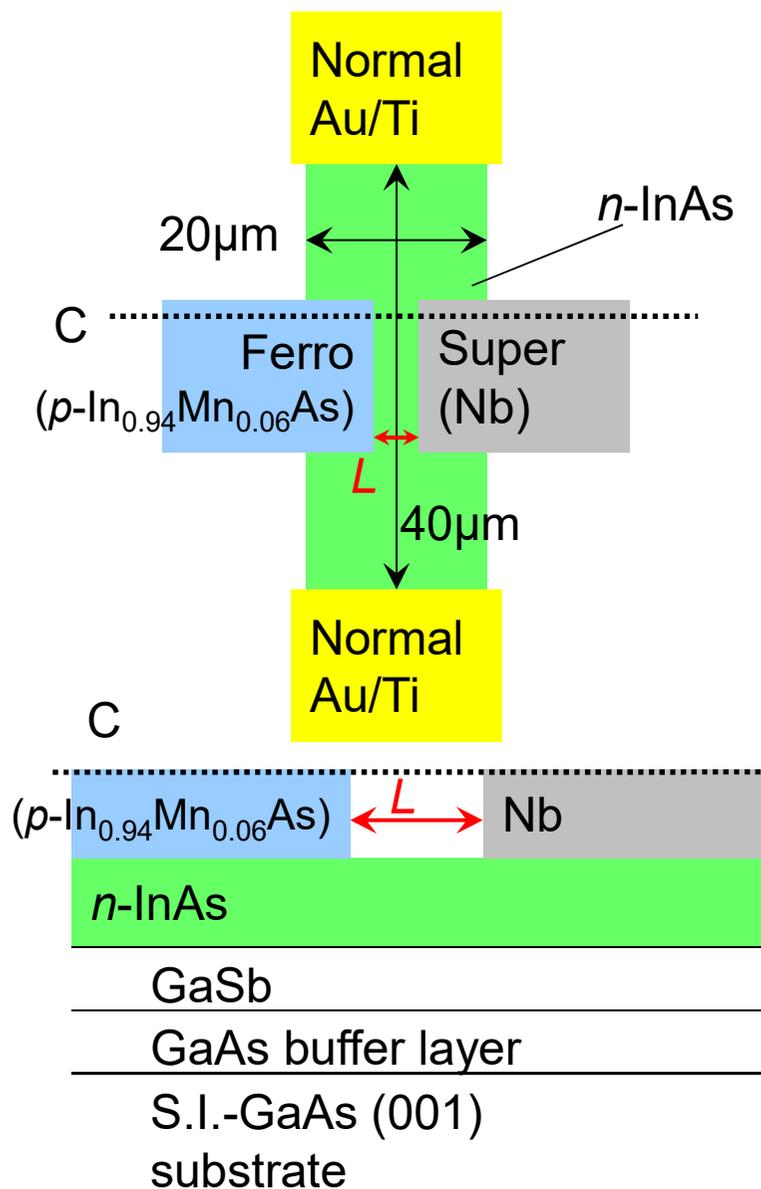
超伝導体

→ InMnAs / InAs / Nb junction

研究目的

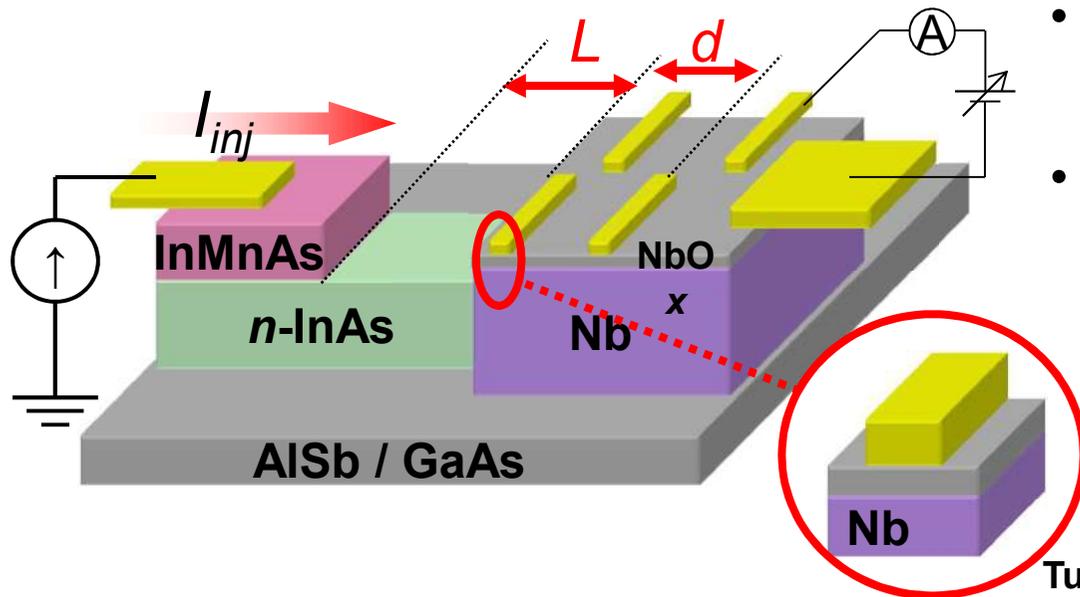
- 逆近接効果の実験的検出

2-2 Previous study



Au-Au電極間の微分コンダクタンス
 ⇒ Nbのギャップを反映したDip構造
p-InMnAs → Nb スピン偏極電流注入
 ⇒ Dipが減衰

2-2 Sample Structure



- 東工大 宗片研で結晶成長
InMnAs/InAs ヘテロ構造を作製
- 筑波大 野村研、NIMSで微細加工
Nbおよび電極作製

L (InMnAs-Nb)

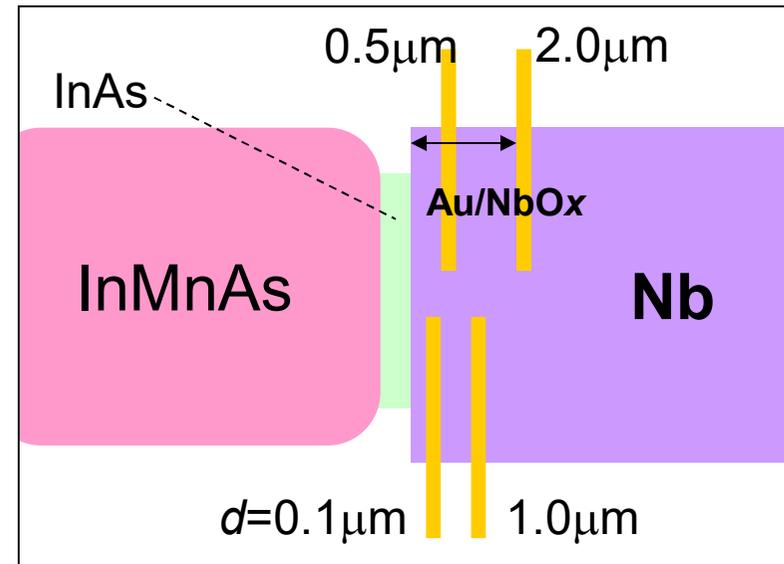
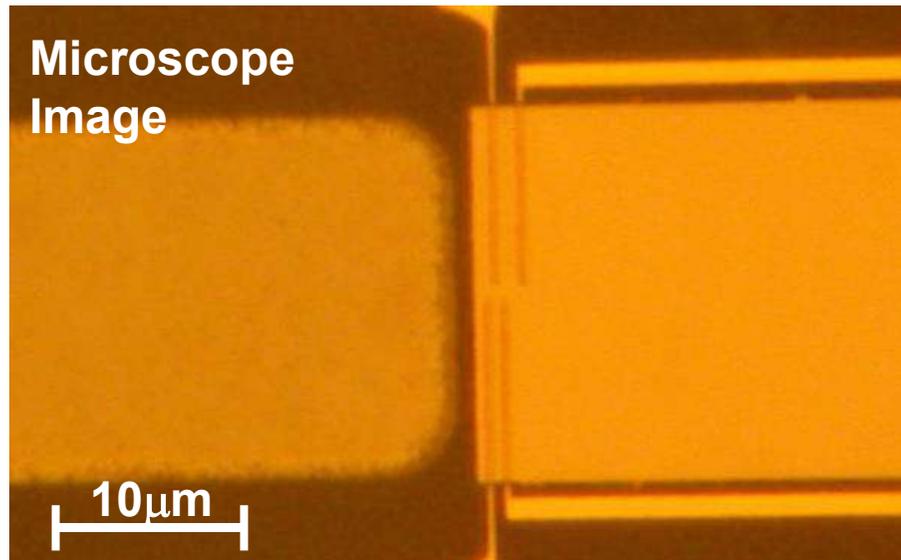
$1.0\mu\text{m}, 5.0\mu\text{m}, 10.0\mu\text{m}$

d (InAs/Nb interface-Probes)

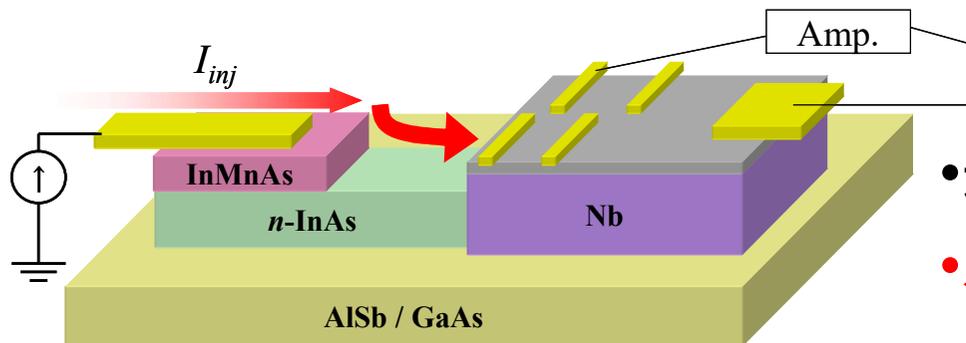
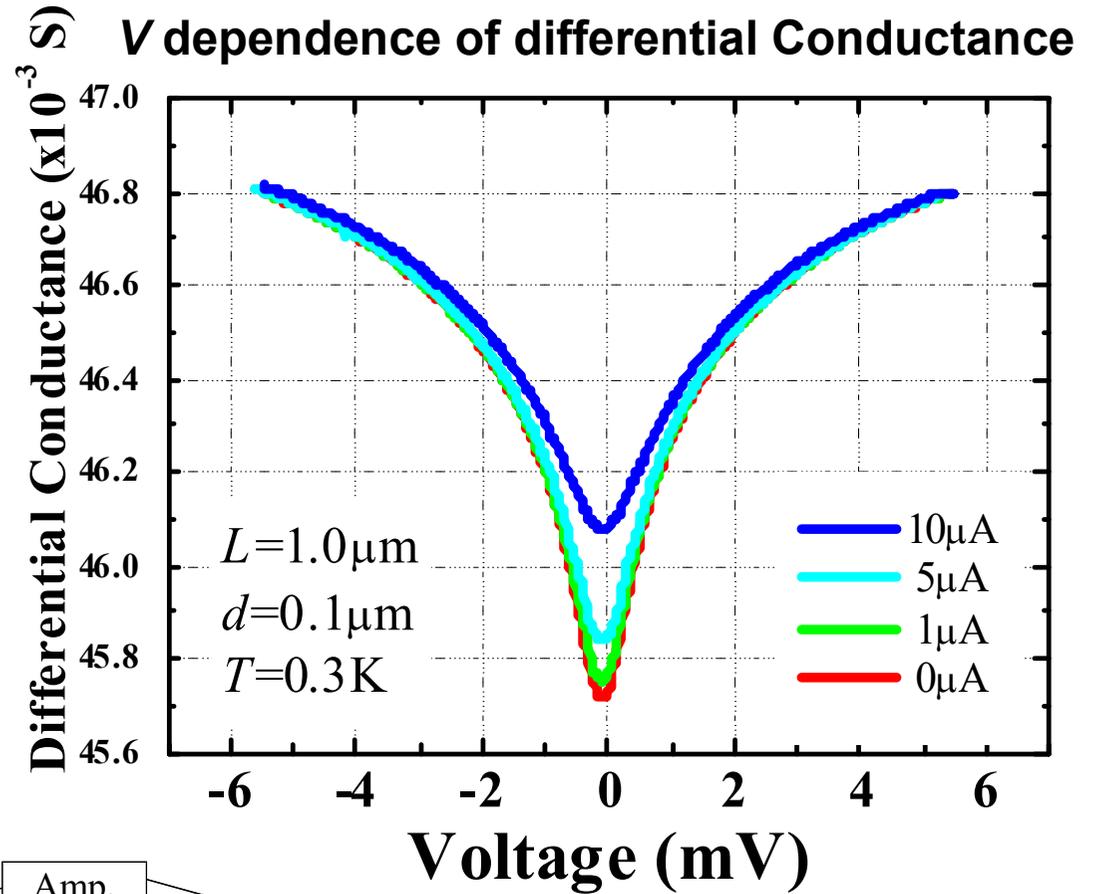
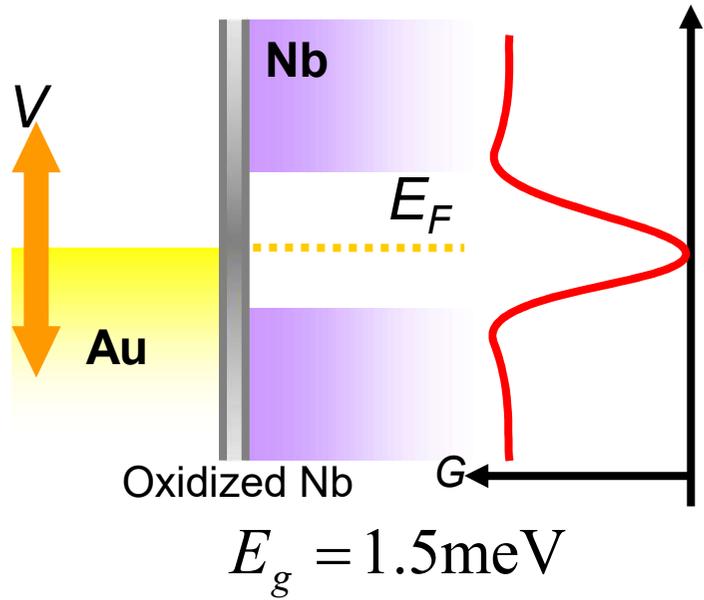
$0.1\mu\text{m}, 0.5\mu\text{m}, 1.0\mu\text{m}, 2.0\mu\text{m}$

$I_{inj} = 0\mu\text{A} \sim 10\mu\text{A}$

Tunnel Junction



2-2 Differential Conductance



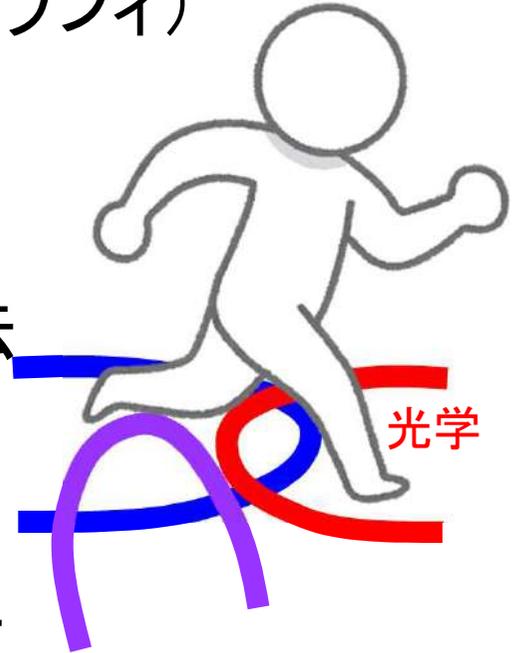
- 逆近接効果の実験的検出に成功
- スピン検出に成功
- スピン拡散長の見積もり

Next step (NIMS → TITECH)



【身につけた技術】

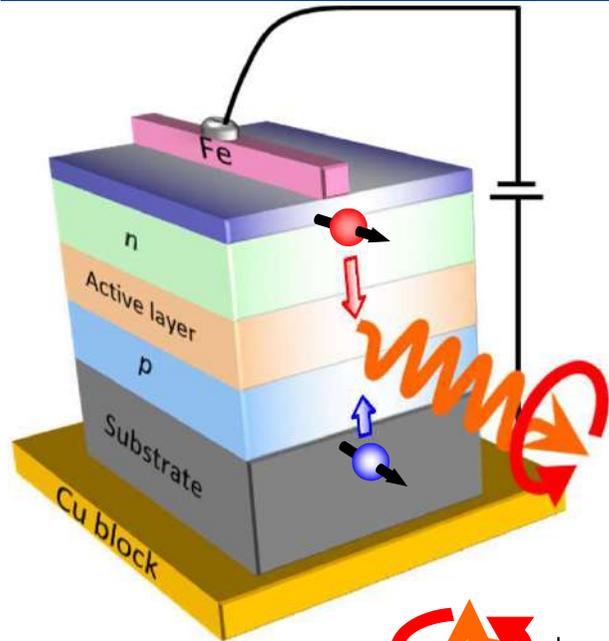
- 微細加工技術(電子線・光リソグラフィ)
- スパッタによる金属製膜
- 極低温実験(希釈冷凍機)
- III-V族系の磁性半導体の成長法
(磁性半導体の本家 東工大 宗片研にて)



【次の分野】

- 微細加工をSpintronicsで活かす
→ 電気伝導の人たちが皆やってる
- 電気ではないデバイス → **光デバイス!**
(そういえば東工大 宗片研の他のグループがやってた)

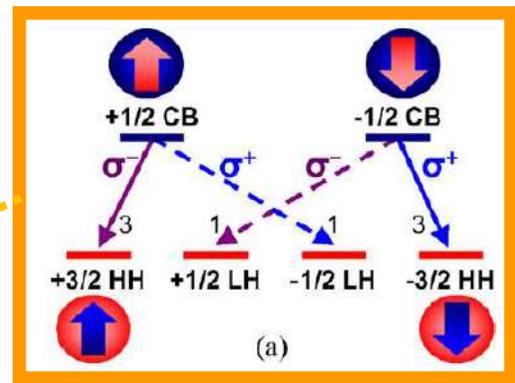
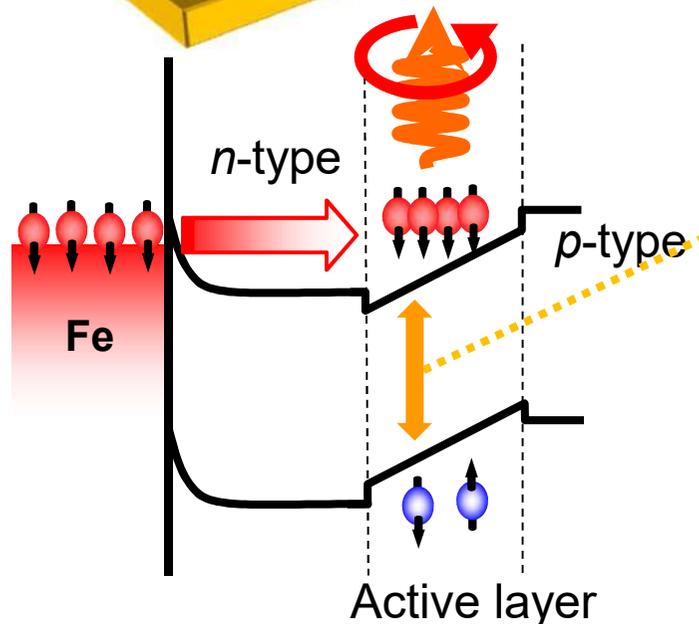
2-3. Spin-polarized light emitting diodes ^{16/52}



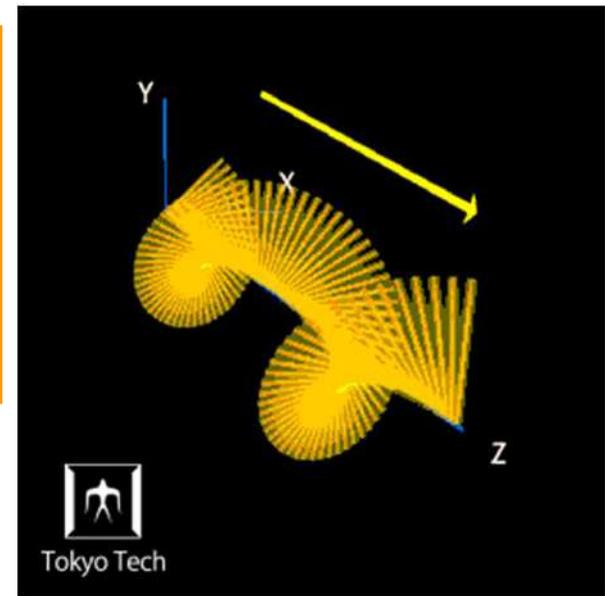
Spin-polarized emitting diodes (Spin-LED)

強磁性金属 + 半導体LED 構造 → 円偏光発光

スピン偏極電流注入

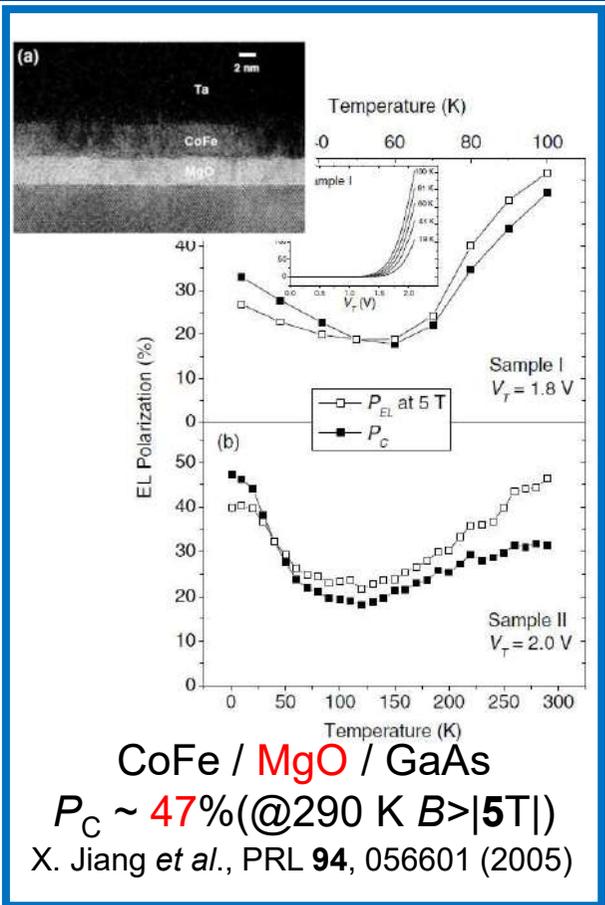
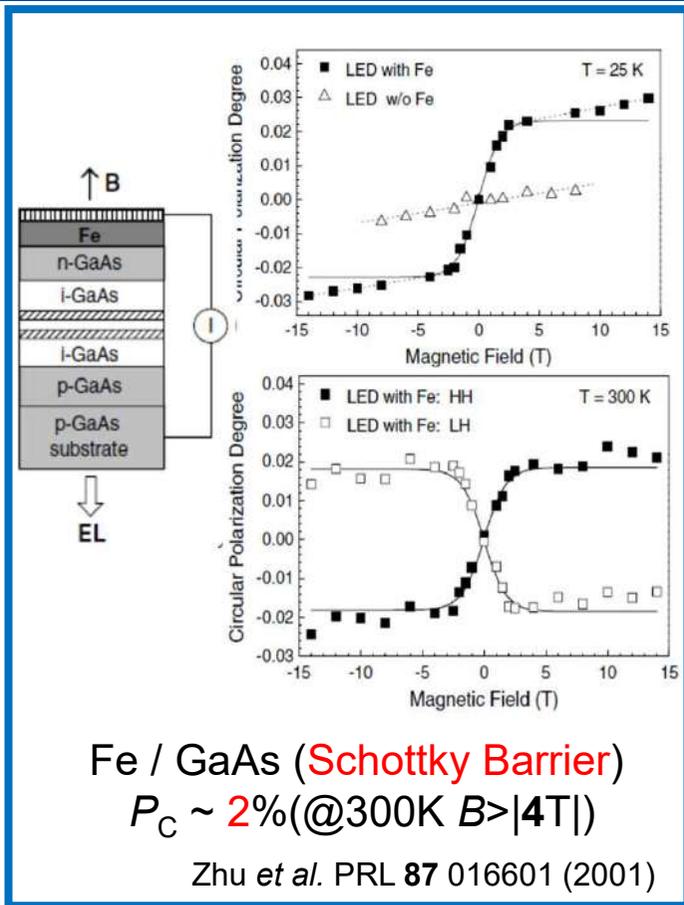
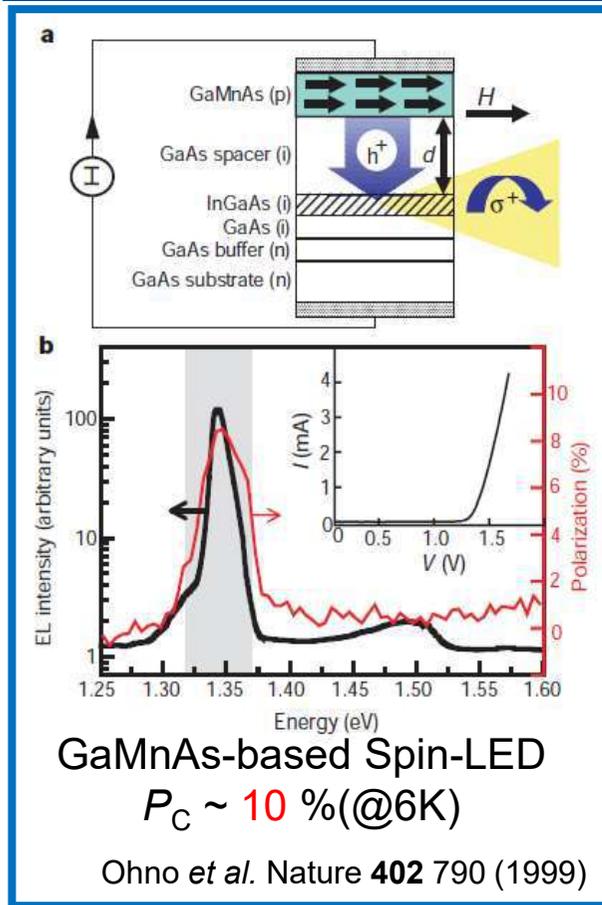


Optical selection rule



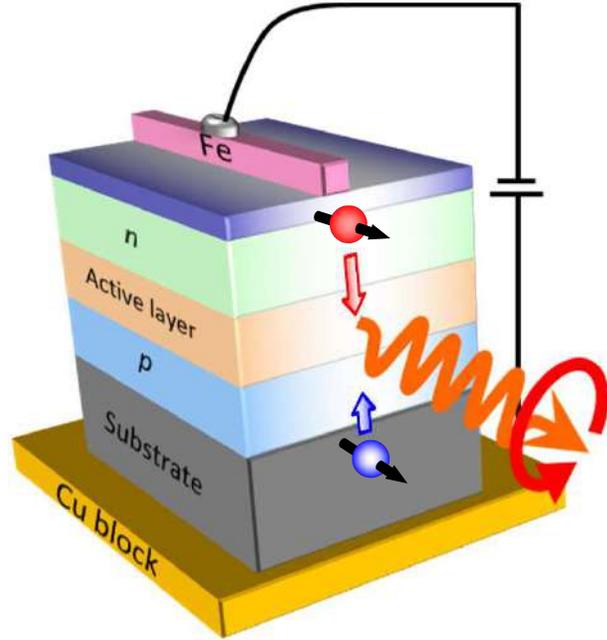
与えられたテーマ: Spin-LEDを実用光源に引き上げて新たな光技術を形成しよう

2-3. Spin-LED as a CPL source



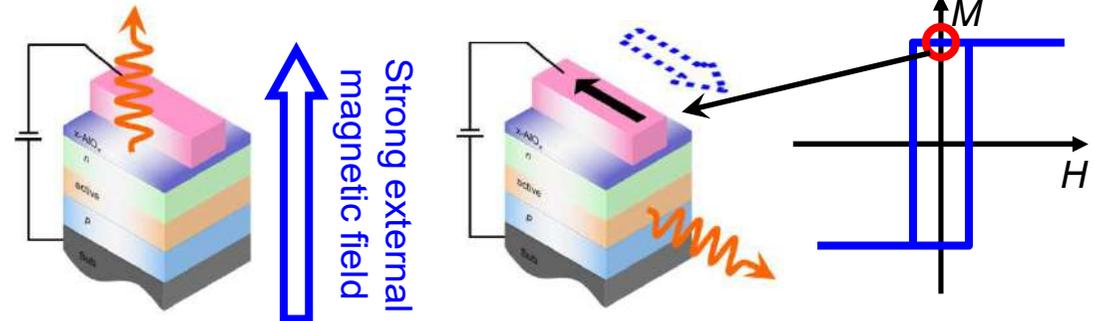
- ☺ 小型化、集積化可能な素子
- ☹ 外部磁場もしくは他の励起光源を必要とする
- ☹ 低温でも円偏光度が低い
- ☹ 高速で円偏光の極性を切り替え、任意の円偏光度を得ることができる

2-3. Spin-LED for applications



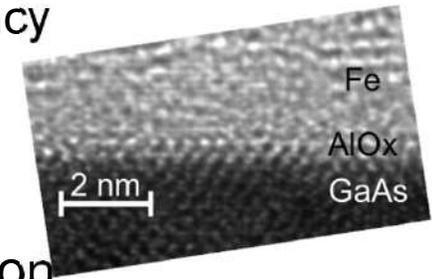
1. 磁場や電場などの外部印加の必要ない素子
 2. 高い円偏光度で発光する素子
 3. 電氣的に円偏光の極性を切り替えることができる素子
- 室温動作する素子

1. Operation without applying external magnetic field

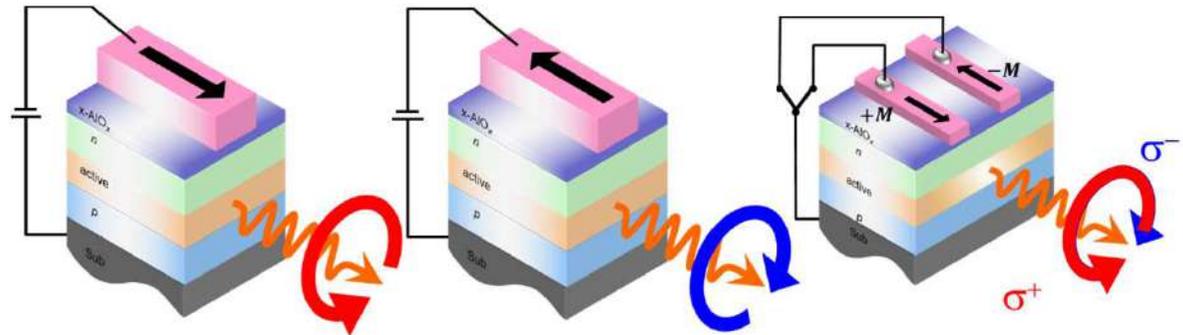


2. High polarization at room temperature

- High spin-injection efficiency
- Crystalline tunnel barrier



3. Helicity selectivity of CPL emission



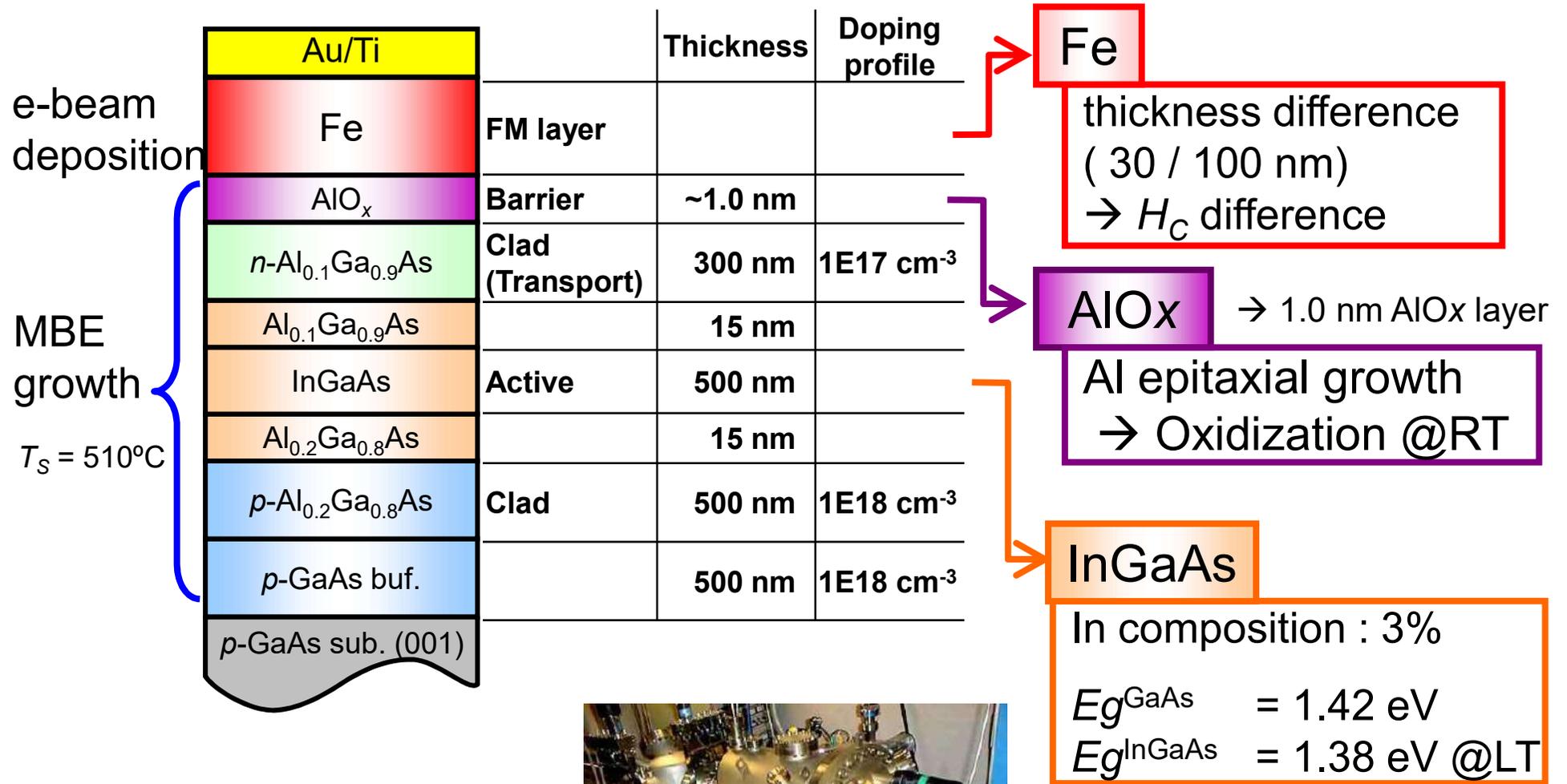
苦悩の3年間

2010年から2012年の3年余り、全く結果が出なかった

- MBEで成長したLEDがそもそも光らない
 - 長年、学生がMBEを整備、品質が劣化
 - MBEの基本的な整備から
- Schottky barrierのスピンの偏極率が低い
 - トンネル伝導させる必要がある
 - AlOxトンネルバリアをMBEで作ろう
- 磁性体MnSbのMBE成長がうまくいかない
 - AlOx上ならばMBEで作る必要がない
 - Feに切り替え

MnSb
n^+ -GaAs
n -Al _{0.1} Ga _{0.9} As
Al _{0.1} Ga _{0.9} As
GaAs
Al _{0.2} Ga _{0.8} As
p -Al _{0.2} Ga _{0.8} As
p -GaAs buf.
p -GaAs sub. (001)

Sample Preparation



Molecular beam epitaxy

Oxide film on GaAs

N. Nishizawa *et al.*, JAP **114**, 033507 (2013).^{21/52}
N. Yokota *et al.*, JAP **118**, 163905 (2015).

1. High density of interface state (D_{it})
2. High temperature oxidation method
→ Not available for III-V SCs
Group-V elements (As or P) have high vapor pressures

[typical D_{it} values]

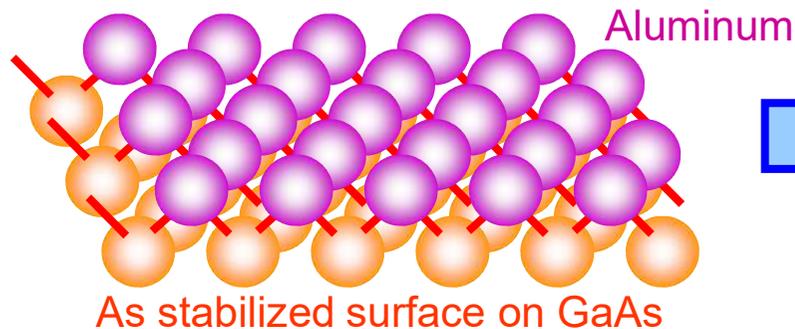
AlO_x/GaAs : $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{V}^{-1}$

SiO_2/Si : $\sim 10^{11} \text{ cm}^{-2}\text{V}^{-1}$

To obtain high quality oxide layer on GaAs

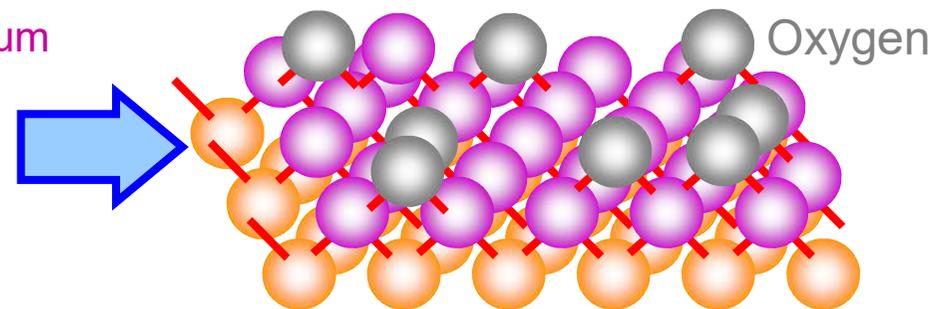
1. Reduce the density of interface state
→ Less dangling bonds and defects at the interface
→ Epitaxial growth of thin aluminum layer → Small lattice mismatch with GaAs
2. Low temperature oxidation process
→ Post-oxidation by exposed Al epilayer at RT

Epitaxial growth of Al



Decrease the dangling bonds
by covered with Aluminum mono-layer

Oxidation at RT

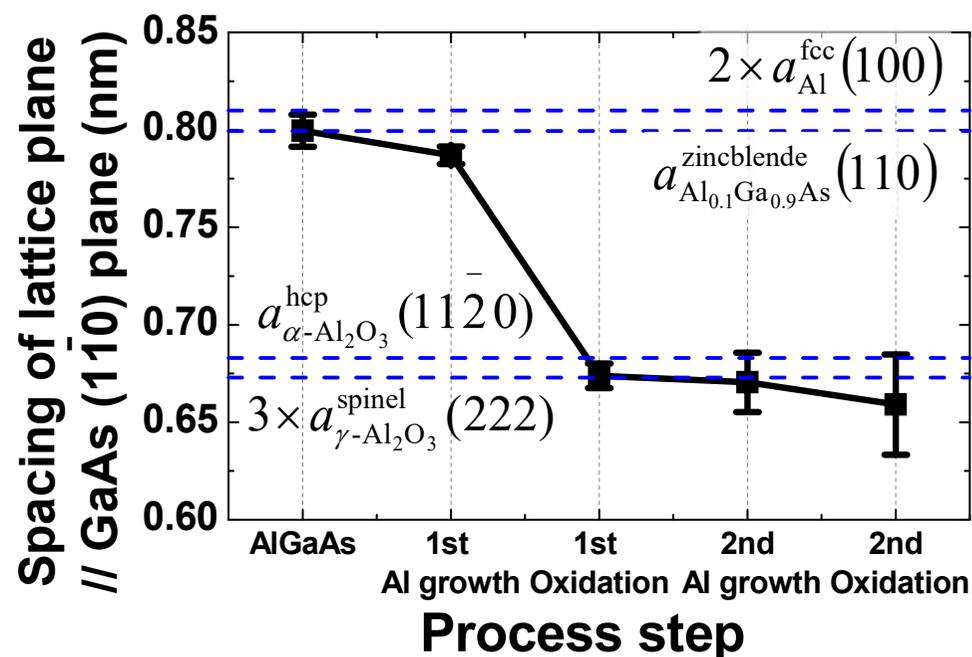
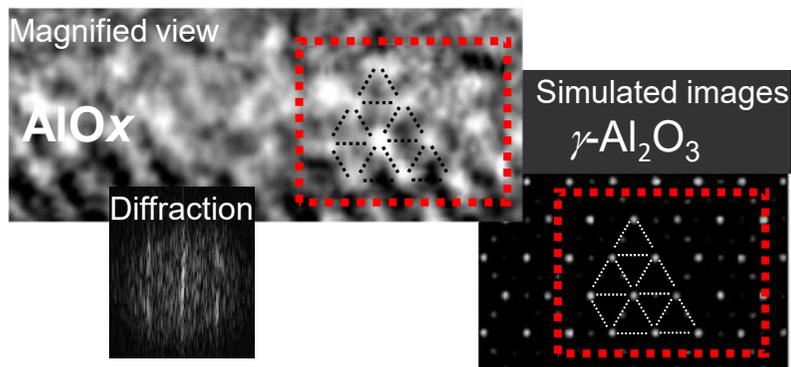
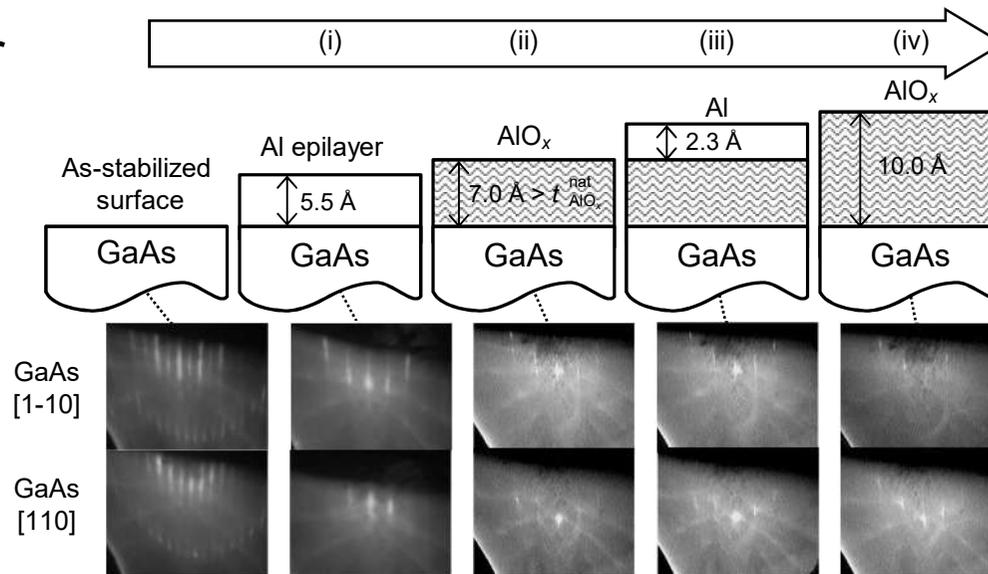


Suppression of migration and replacement by
not giving an extra kinetic energy to oxygen ions

Crystalline AlO_x

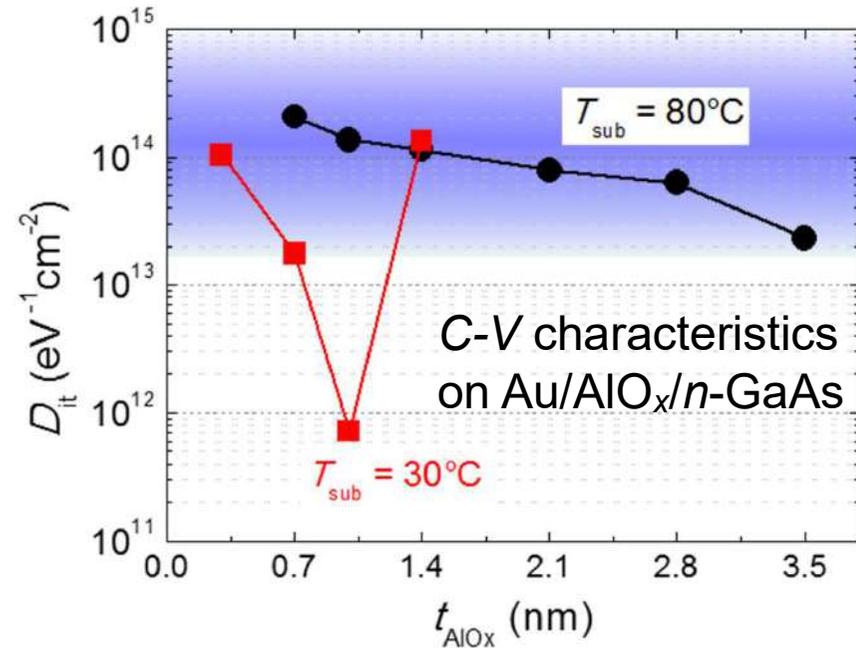
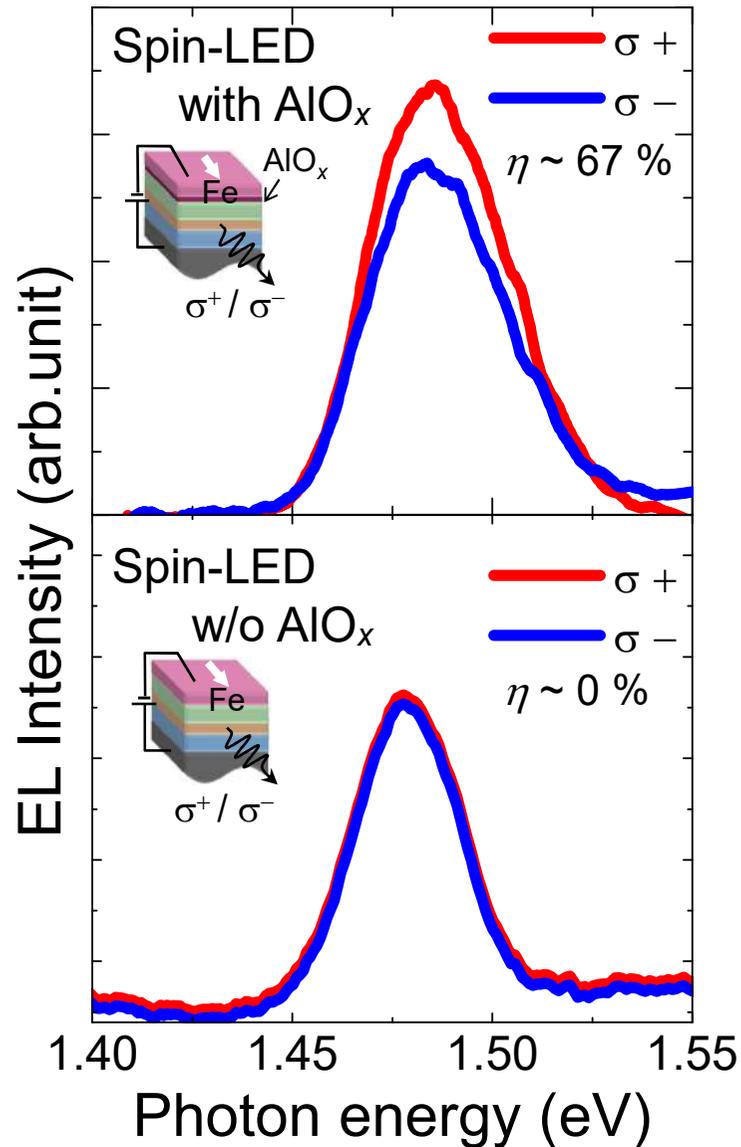
Process → Crystalline AlO_x layer

- i. Al **epitaxial** growth (5.5Å)
 @RT with low As back-pressure
 Thickness of natural oxidation layer
 on pure Al crystal → 4~6 Å
- ii. Oxidization for 10h. (→ 7.0Å)
 dry air of 1 atm. @RT
- iii. Al deposition (2.3Å)
- iv. Oxidization 10h. (→ 3.0Å)



Crystalline AlO_x

N. Nishizawa *et al.*, JAP **114**, 033507 (2013).^{23/52}
 N. Yokota *et al.*, JAP **118**, 163905 (2015).



Typical values of a-AlO_x / GaAs

1. High spin injection efficiency
 $\eta \sim 63\% @ 6\text{ K} > \text{MgO/GaAs}$
 ALD-grown AlO_x / GaAs
2. Low density of interface state
 $D_{it} \sim 7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1} \ll \sim 10^{13 \sim 14}$
 (amorphous AlO_x/GaAs)
3. Electrical uniformity
4. Depression of chemical reaction at interface
5. High breakdown voltage ($\sim 10^7 \text{ V/cm}$)

Toward RT operation

		Thickness	Doping profile
Au / Ti		20 / 10 nm	
Fe		100nm	
x-AlO _x		1 nm	
GaAs cap		15 nm	Si : 5E18 cm ⁻³
Clad		500 nm	Si: 1E17 cm ⁻³
		15 nm	
Active		500 nm	C : 1E18 cm ⁻³
Clad		500 nm	C : 1E18 cm ⁻³
		500 nm	C : 1E18 cm ⁻³
		600 μm	Zn : 1.3-2.0E19 cm ⁻³

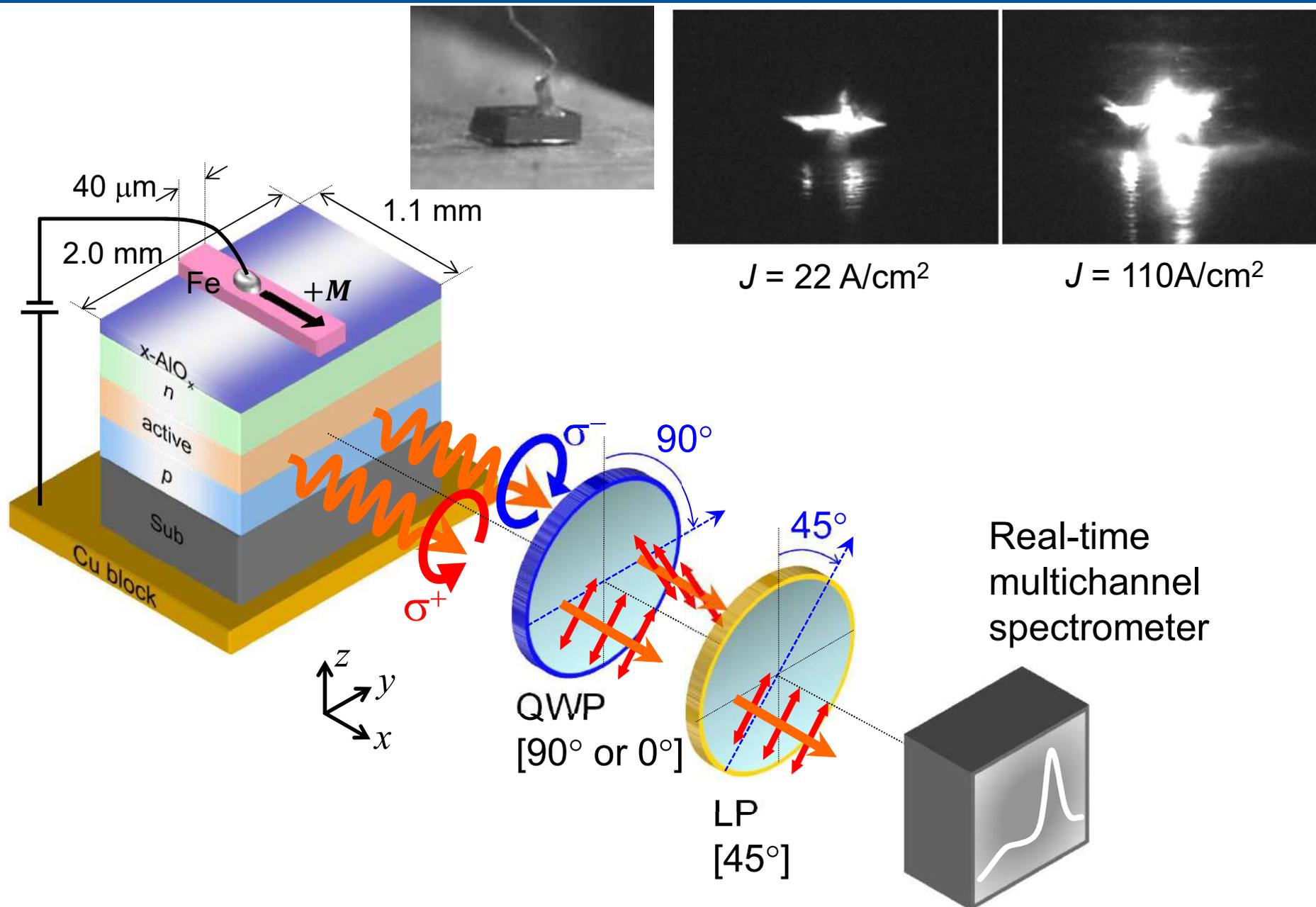
MBE and evaporations
Tokyo Tech (Japan)

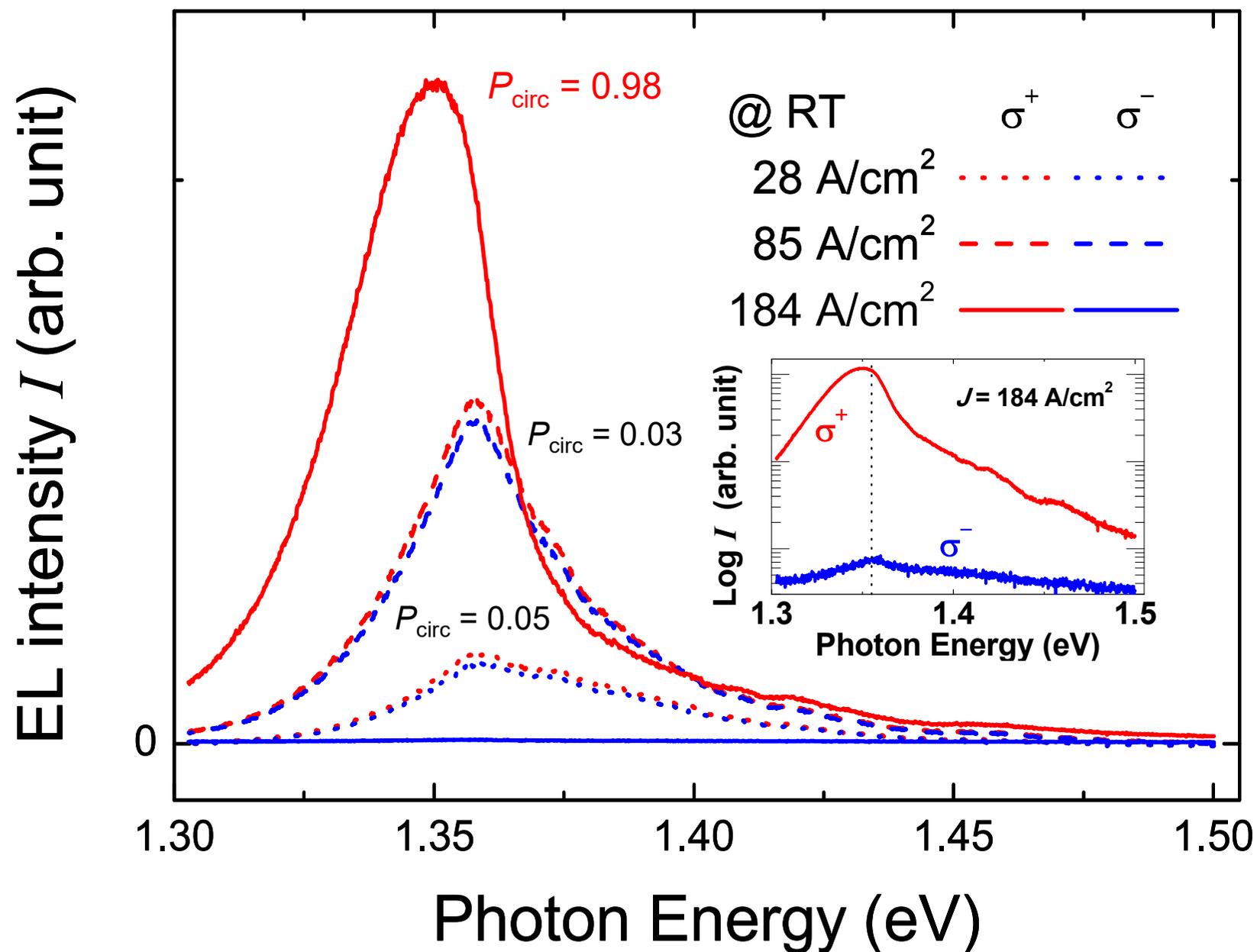
Efficient spin injection
★ MBE-grown x-AlO_x
(show the next for details)

N. Nishizawa *et al.*, APL 104, 111102 (2014)

MOVPE growth
Optowell. Co., Ltd. (Korea)

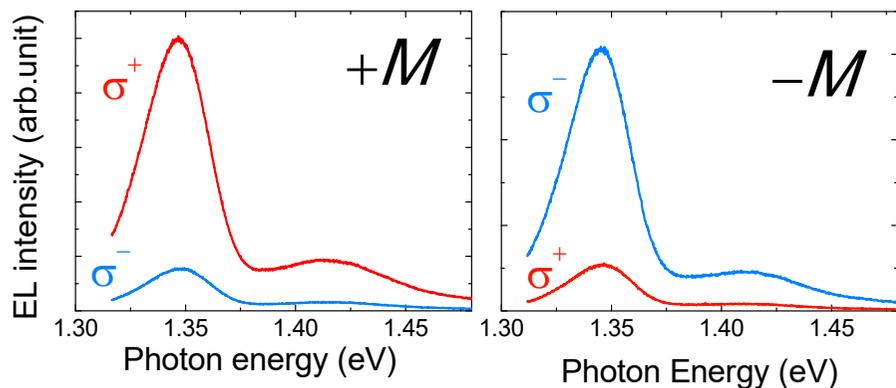
Optical set-up





Experimental summary

N. Nishizawa *et al.*, PNAS **114**, 1783 (2017).



Switching the direction of magnetization
 → Signs of polarization
 → Spin-dependent emission

low current density (J) region

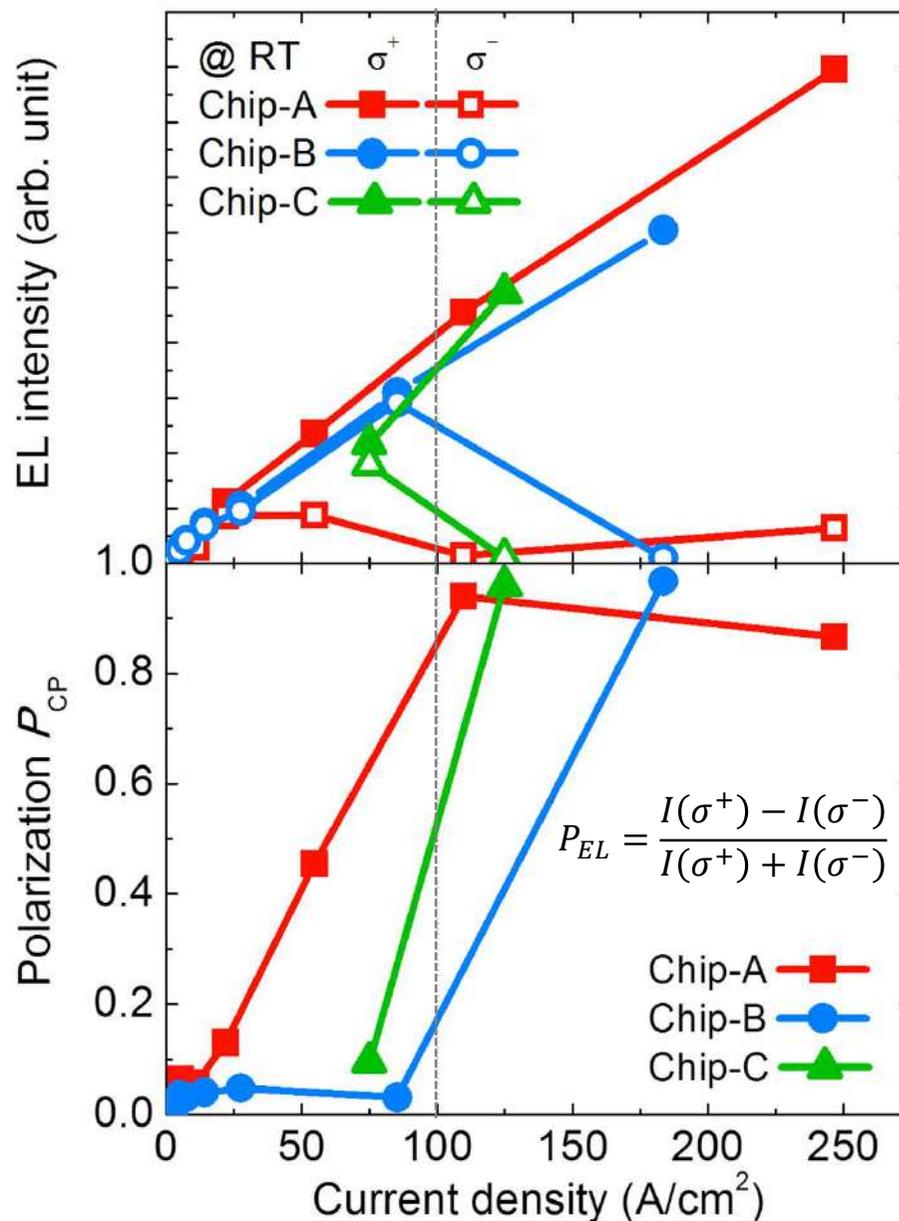
$P_{\text{circ}} \uparrow$ and then \downarrow gradually

high J region ($J \geq 100 \text{ A/cm}^2$)

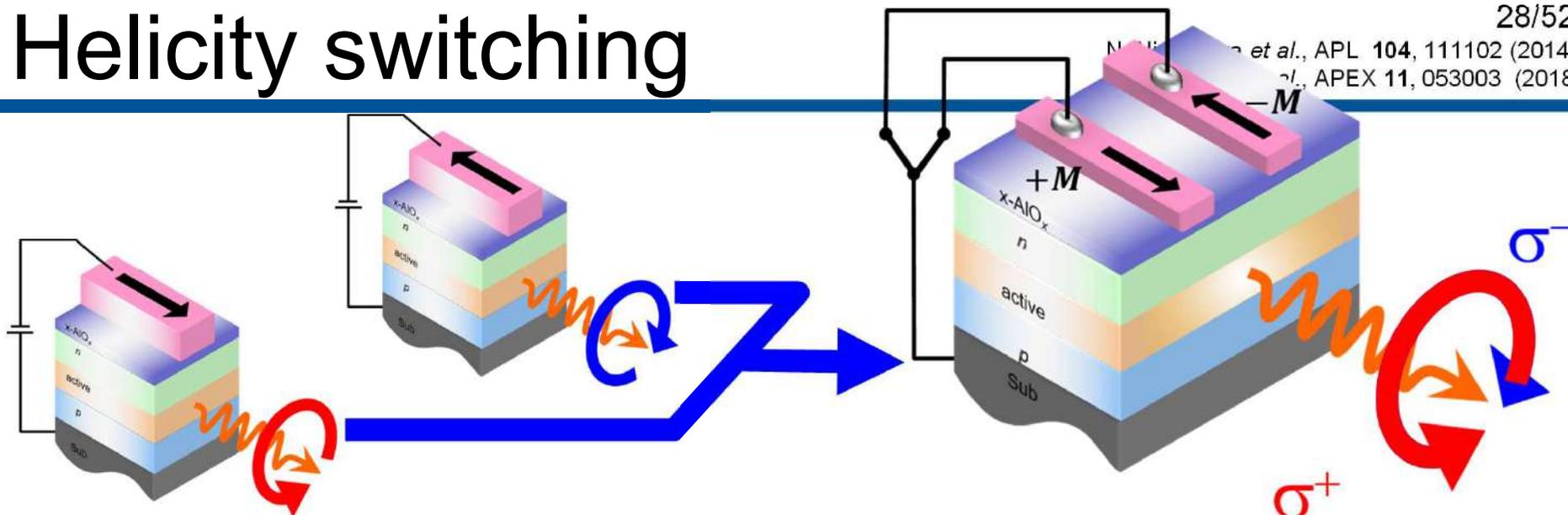
EL(σ^-) turns to decrease

P_{circ} increases abruptly

→ ~ 100% (spontaneous emission)

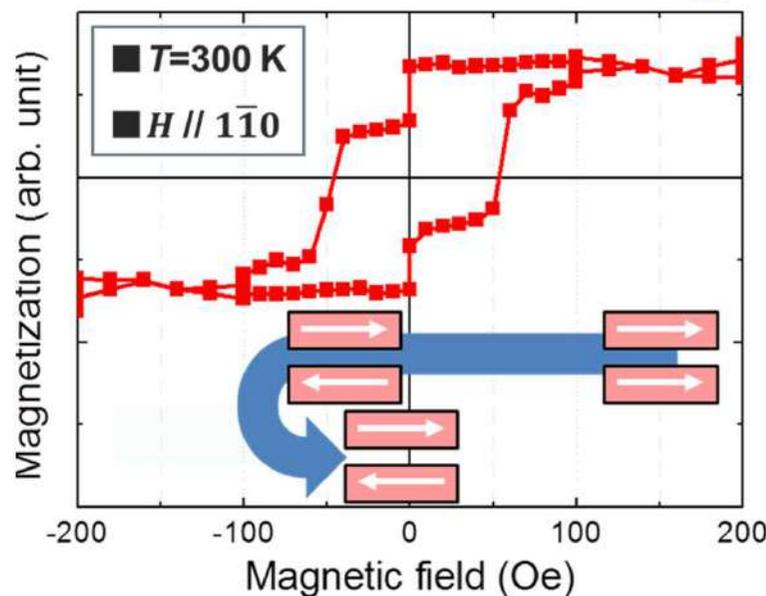


Helicity switching



Layer	Thickness
Au/Ti	20 / 10 nm
Fe	100 / 30 nm
x-AlOx	1 nm
n-GaAs	15 nm
n-Al _{0.3} Ga _{0.7} As	500 nm
i-Al _{0.3} Ga _{0.7} As	15 nm
p-GaAs	500 nm
p-Al _{0.3} Ga _{0.7} As	500 nm
p-GaAs	500 nm
p-GaAs sub. (100)	600 μm

Dimensions: 40 μm (left and right), 250 μm (center), 40 μm (right).

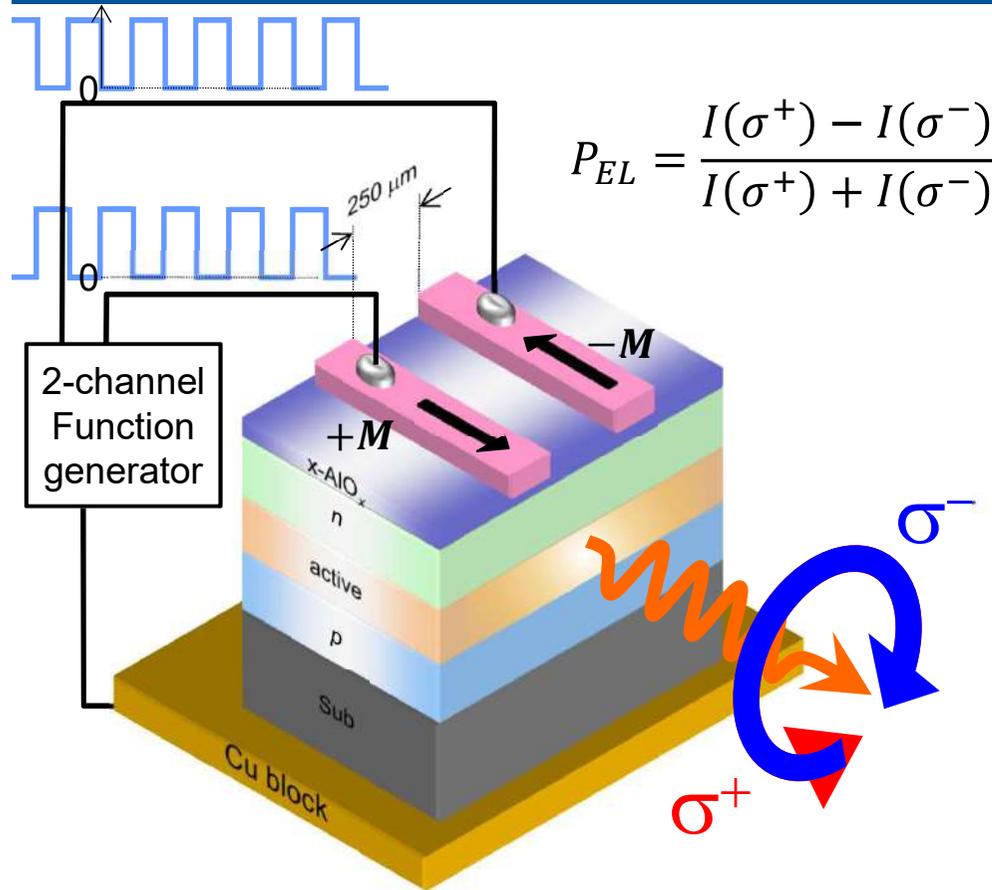


With the increase of the film thickness, the strength and broad distribution of pinning sites decrease

Anti-parallel magnetization configuration at remnant state

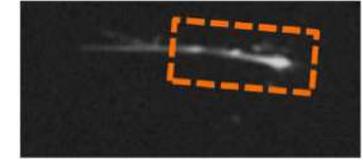
Electrical helicity switching

N. Nishizawa *et al.*, APL **104**, 111102 (2014).
N. Nishizawa *et al.*, APEX **11**, 053003 (2018).

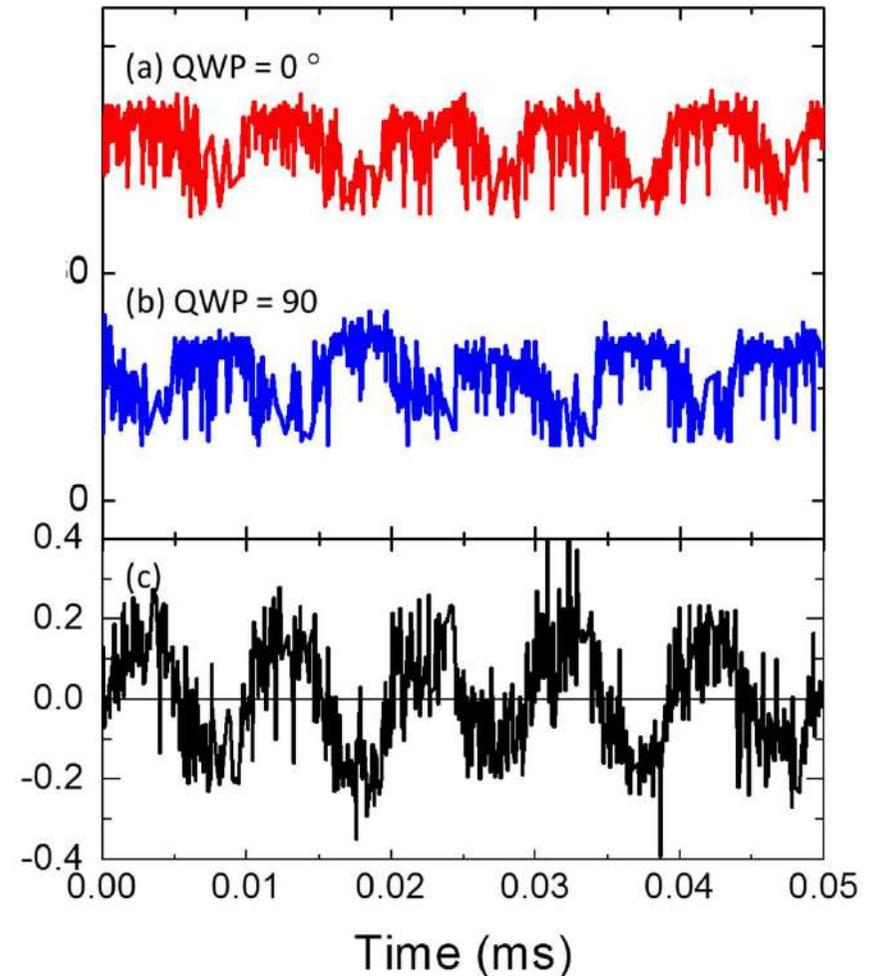


$$P_{EL} = \frac{I(\sigma^+) - I(\sigma^-)}{I(\sigma^+) + I(\sigma^-)}$$

100kHz

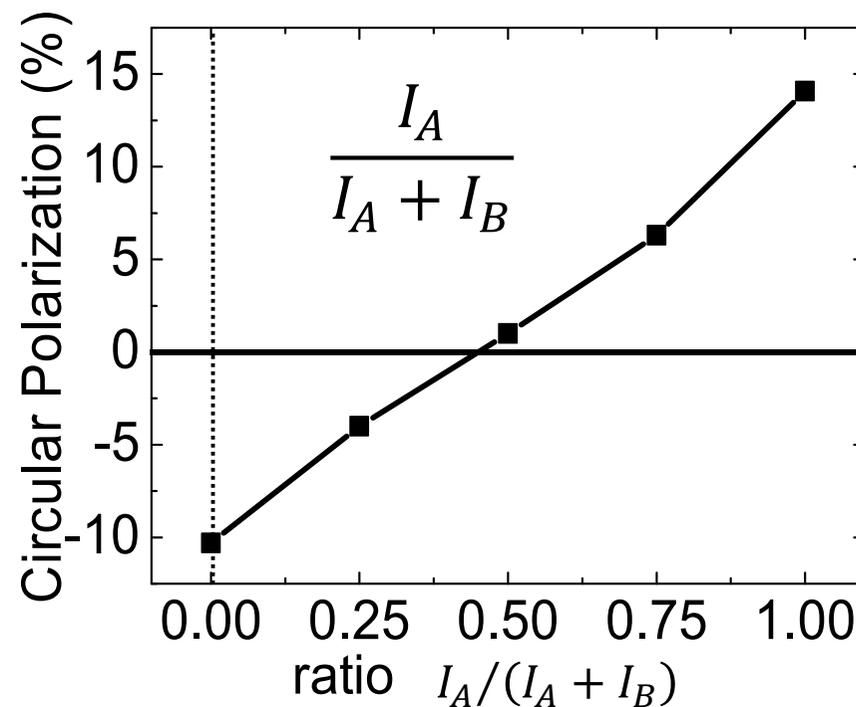
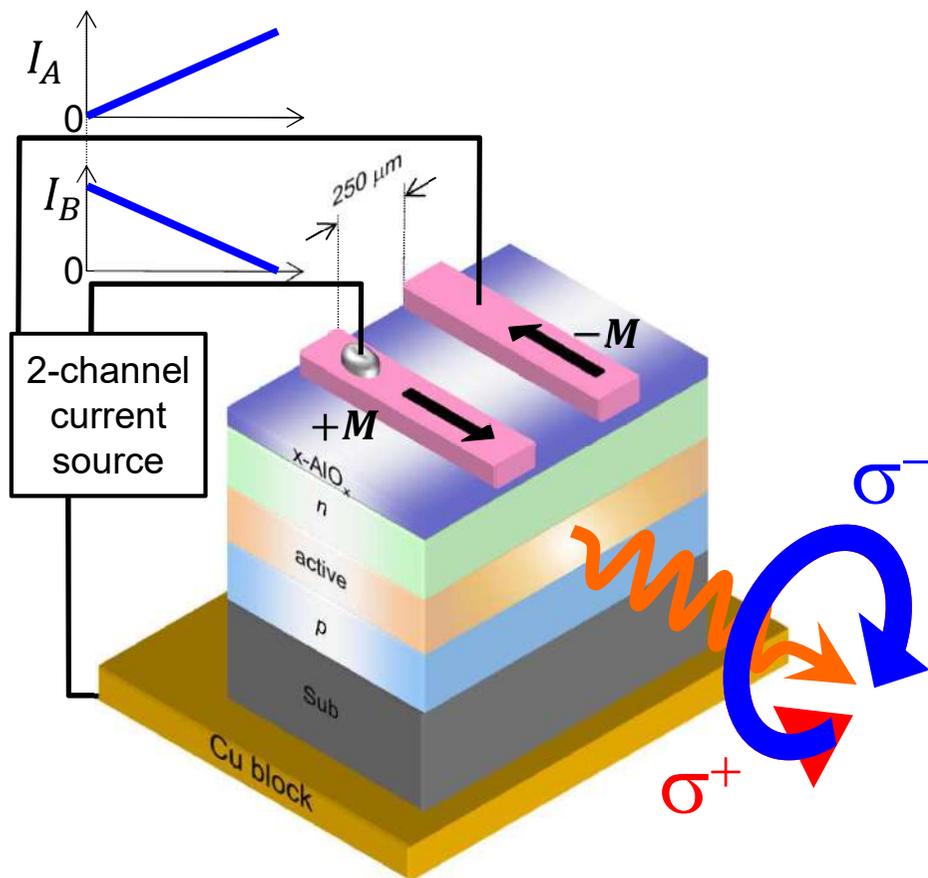


Polarization EL intensity (arb. unit)



We have successfully demonstrated electrical switching of circular polarized light up to 100 kHz at room temperature without using external magnetic fields.

Polarization blending



By simply tuning the currents ratio of two electrodes, value of circular polarization can be changed continuously between negative and positive helicities

→ Arbitrary polarization emission

Next step



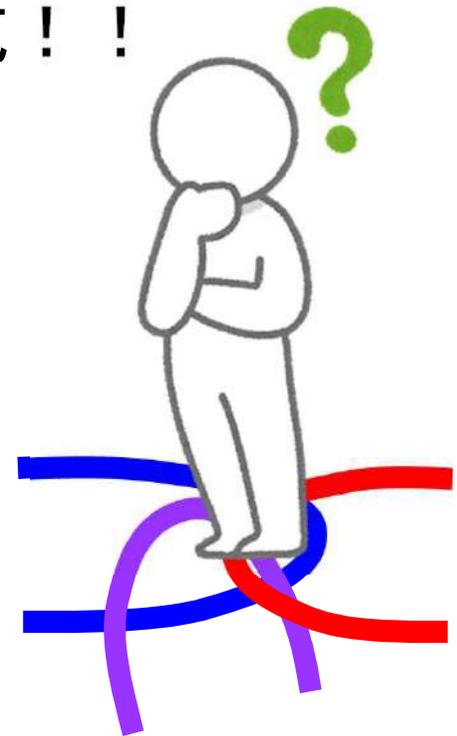
【達成できたこと】

- 無磁場下での円偏光発光
 - 室温で完全円偏光発光の実証（世界初！）
 - 円偏光極性の電氣的切り替えの実証
- 円偏光光源としては完成！！
ひとまず達成した！

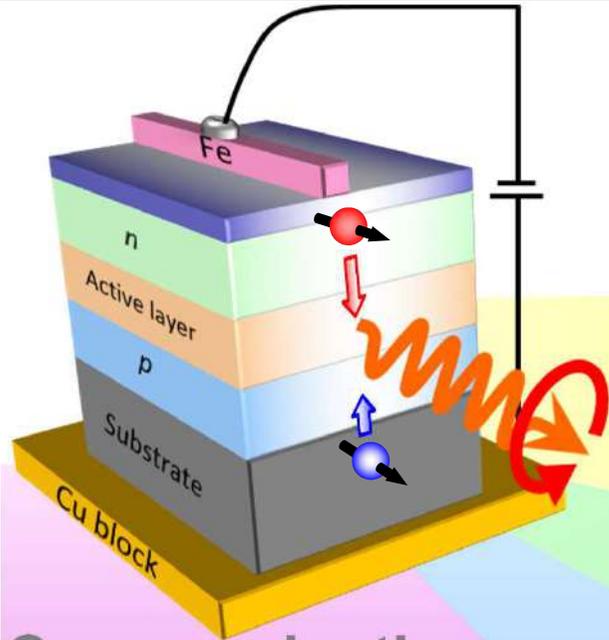
【次は自分独自の分野の形成へ】

デバイス拡張 or 応用？

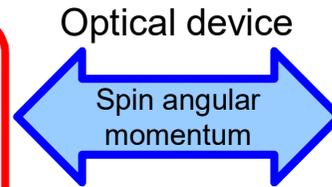
- もっと人に知ってもらうには？
- 既存の分野へ進むのではなく
新しい分野を作ろう



2-4. CPL applications

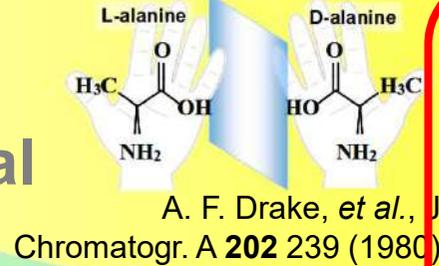


Electron system
(Magnetic materials)
Spin-polarized
electron



Optical device
Optical system
Circularly
polarized light
(CPL)

Biology
Medical
Chemical



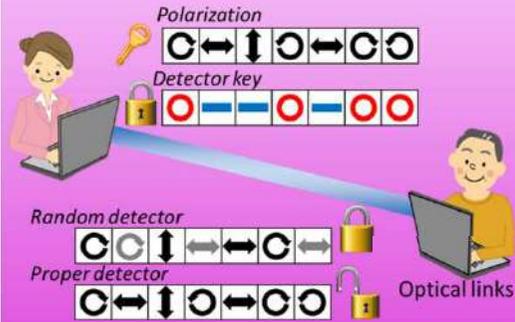
Cancer Diagnosis

B. Kunnen, et al. J. Biophotonics. **8** 317 (2015).

Display

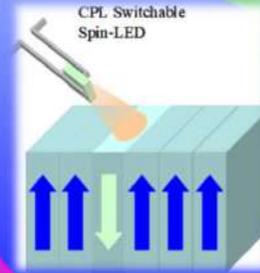
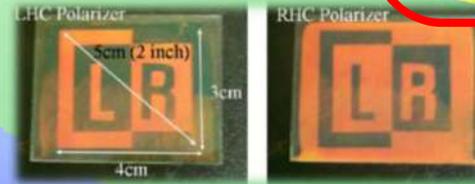
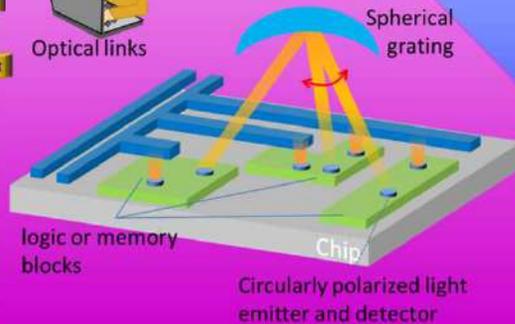
Recording

Communication

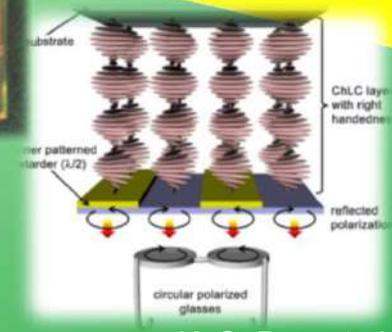


J. F. Sherson, et al., Nature **443** 527 (2006).

F. B. McCormick, et al., Applied Optics **29**, 1313 (1990).



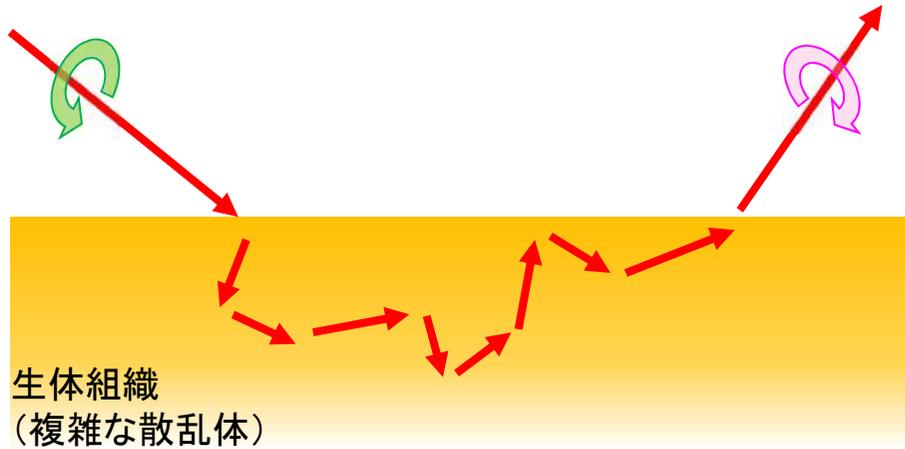
C. D. Stanciu et al., Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 047601.



K. S. Bae et al., Optics Express, **20** 6927 (2012).

2-4. CPL on Biology

偏光

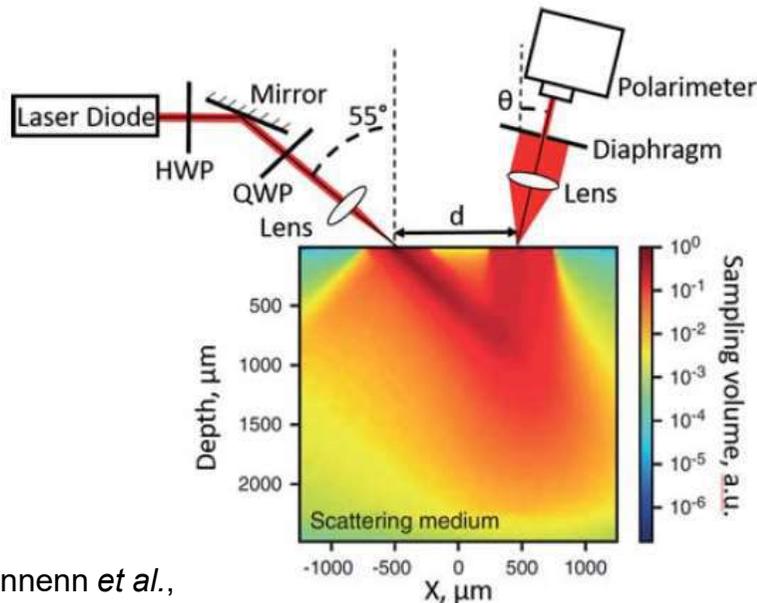


散乱光の偏光状態の変化

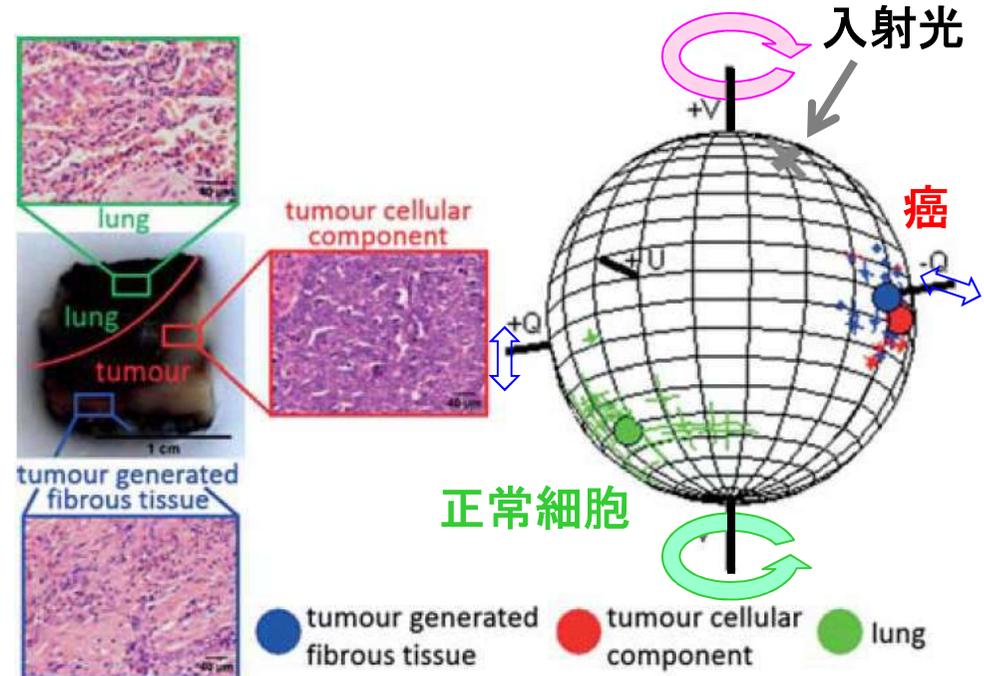
- 散乱体の大きさ、密度、分布
- 近接組織の構造の差異
- 経時変化
- 前癌病変(繊維状変化)の検出に有効

W. S. Bickel *et al.*, PNAS **73**, 486 (1976)

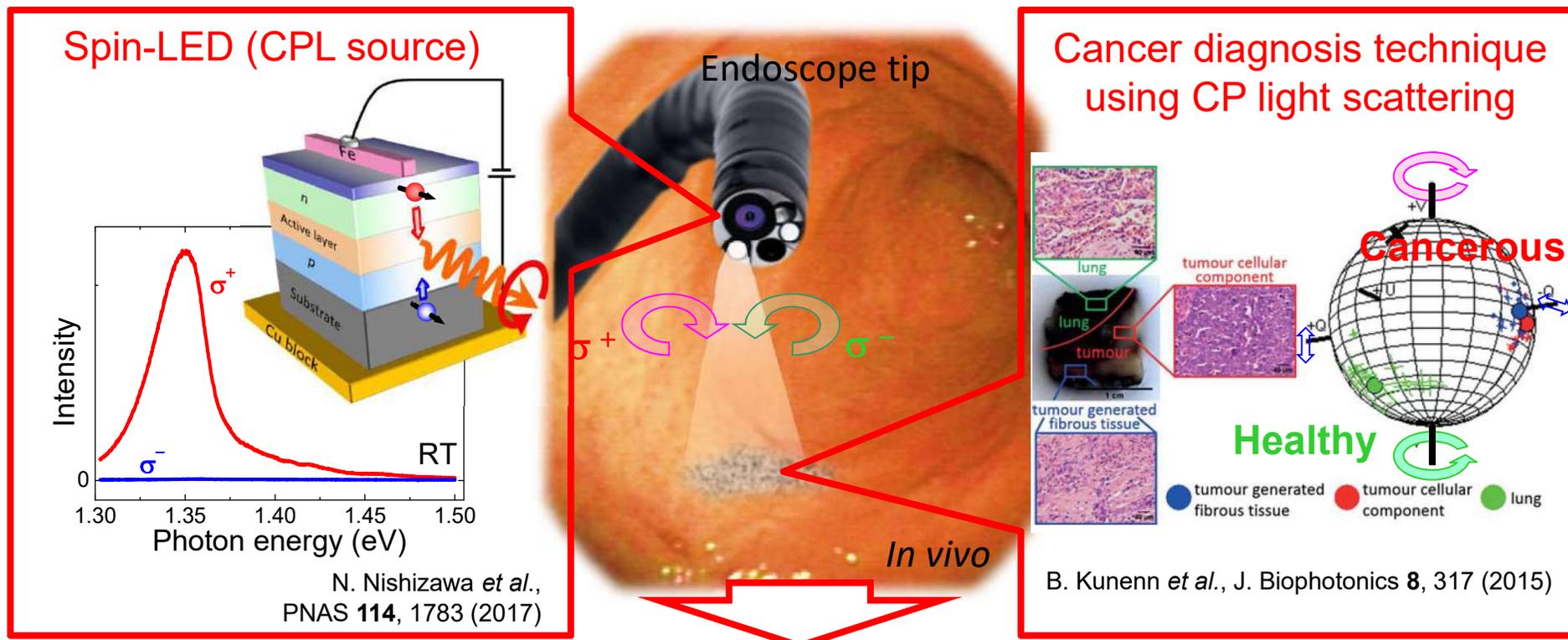
生体組織に対する円偏光検出



B. Kunnenn *et al.*,
J. Biophotonics **8**, 317–323 (2015)



2-4. Spin-LEDs for Cancer diagnosis



生体内における新たな癌診断技術
(非染色、非侵襲、その場観察)

3. 後輩たちへ

博士号とは

学士

修士

博士

プロの研究者



学科教習



博士号



プロのドライバーへ

博士とは、研究する人
研究とは、この世の誰も見つけていないことをみつける、
もしくは、この世にないものをあらしめること

博士号とは優秀な研究成果に与えられる褒賞ではなく、
研究を遂行する能力を身につけたことを表す資格

博士課程は、専攻分野について、**研究者として自立して研究活動を行い、又はその他の高度に専門的な業務に従事するに必要な高度の研究能力及びその基礎となる豊かな学識を養うことを目的とする。**

博士号とは

修士号 = 与えられたテーマの下で研究ができる
博士号 = テーマ自体を自分で探して研究を行える

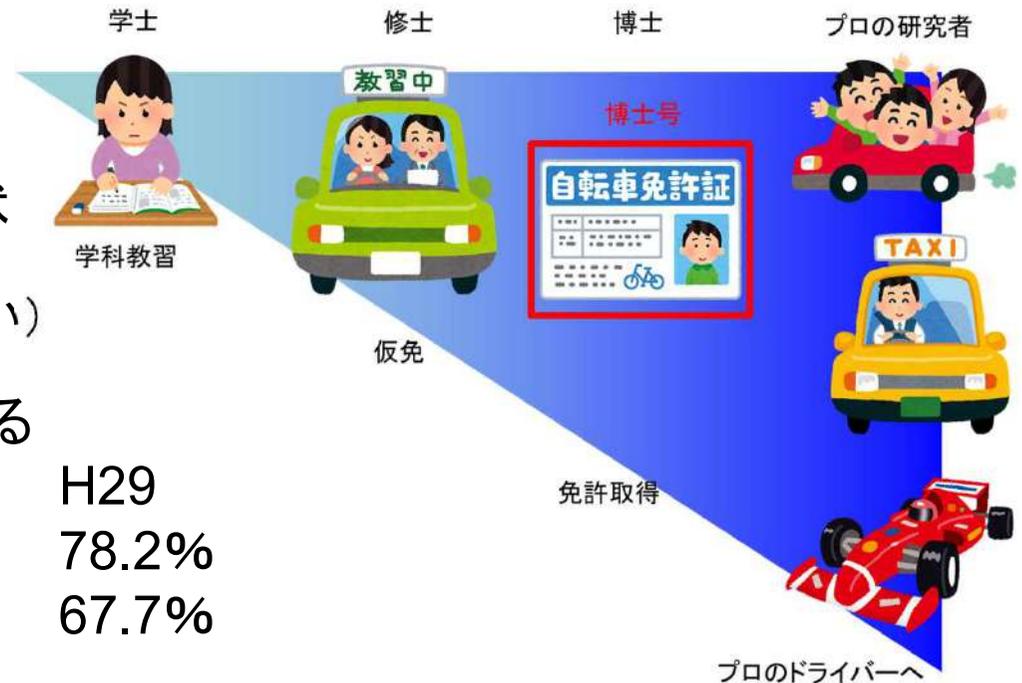
これまでの日本での認識



日本の社会または産業の標準的な考え方は、「欧米の真似事を改良・改善していく」

日本では2000年代までは
修士号(仮免)で1人前。
素質次第で会社では研究職へ就けた。

世界標準の認識(これからの日本)



しかし近年、外国資本の参入により
事情は一転。

修士号の研究者は軽んじられてしまう現状
が見えてきている。
(外資との合併企業では非常に肩身が狭い)

・ 今、日本の企業も変わりつつある

	H15		H29
・ 修士の就職率:	64.5%	→	78.2%
・ 博士の就職率:	54.4%	→	67.7%

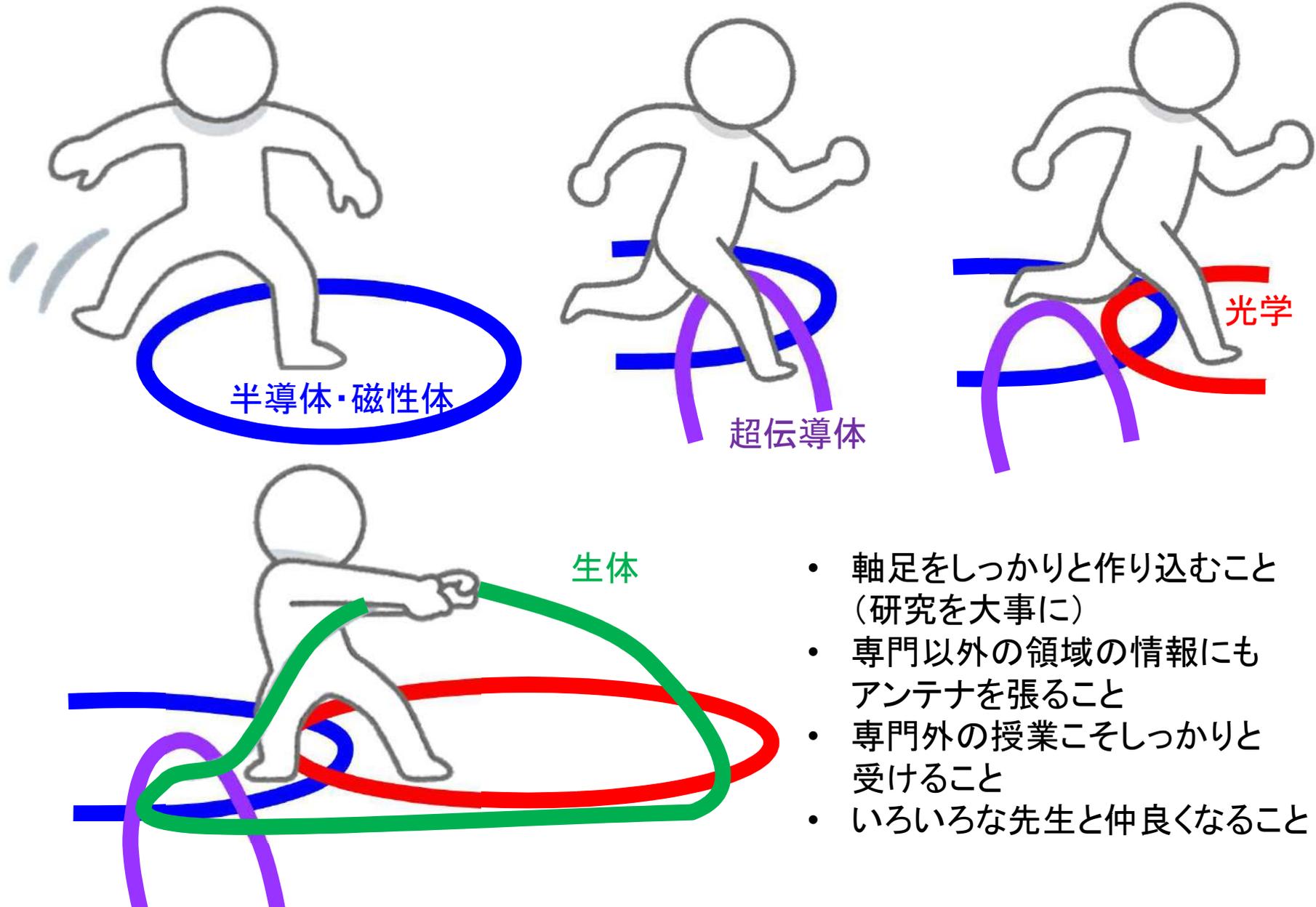
博士号とは

博士号取得者に求められる力

1. 未解決の問題の中から限られた期間内で解決可能なテーマを設定する力
2. 当然と思われていることや画期的な成果を疑ってみる批判的思考力。
3. 設定したテーマをどんな手法、プロセスで探究し、解決に導くかを自ら計画・実践するプロジェクトマネジメント能力。
4. 研究成果を論文にまとめるための論理的思考力。
5. 研究成果を学会という世界の専門家の集まる場で発表するプレゼンテーション能力。
6. 学会でのフィードバックを受けて、より高度な研究へと発展させていく、コミュニケーション力。
7. 専門という軸足をつくることにより、判断や振り返りなどが効率的にできるようになる力



軸足を中心に踏み込む



- 軸足をしっかりと作り込むこと
(研究を大事に)
- 専門以外の領域の情報にも
アンテナを張ること
- 専門外の授業こそしっかりと
受けること
- いろいろな先生と仲良くなること

ご清聴ありがとうございました