

Tokyo Institute of Technology 

2020年度  
物性物理フロンティア  
物性物理学の基礎と最先端研究  
**スピントロニクス**

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



Outline 2/96

**午前**

1. 自己紹介
2. スピントロニクス
  1. 半導体とは(復習)
  2. 磁性体とは(復習)
  3. スピントロニクス
    - A. 金属スピントロニクス
    - B. 半導体スピントロニクス
      - B-1. 磁性半導体
      - B-2. トンネルバリア
      - B-3. 光学的スピン検出

**午後**

3. スピンフォトンクス
  1. 光によるスピン操作
  2. スピンLED
    - \* 偏光とは
      - A) 室温における純粋円偏光発光
      - B) 偏光極性の電気的変調
  3. スピンPD
4. スピンフォトンクスの応用
  - 円偏光によるがん検出
5. まとめとレポート課題

3/96

1. 自己紹介

1. はじめに 4/96

西沢 望(にしざわ のぞみ): 43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




東京工業大学 すずかけ台キャンパス 5/96



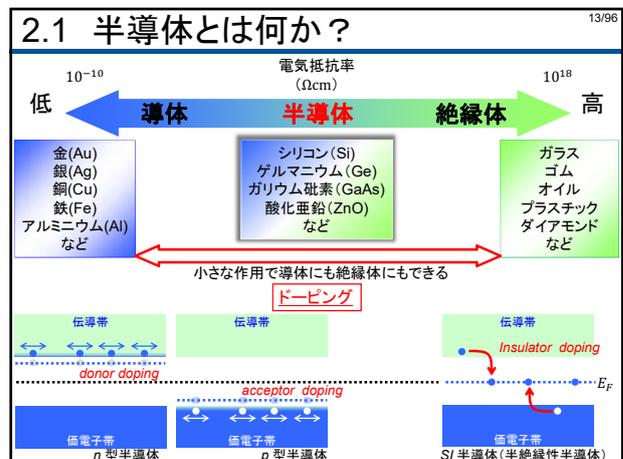
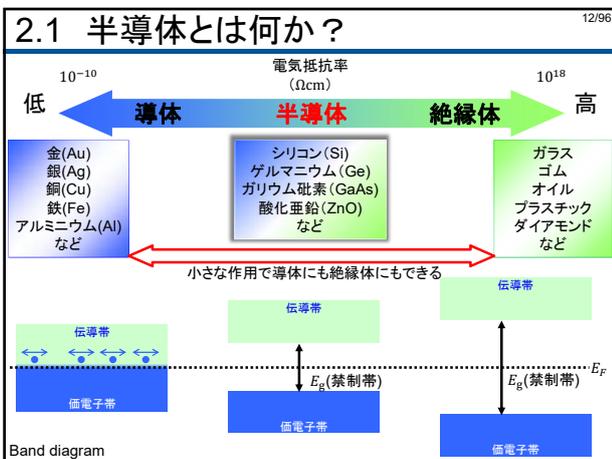
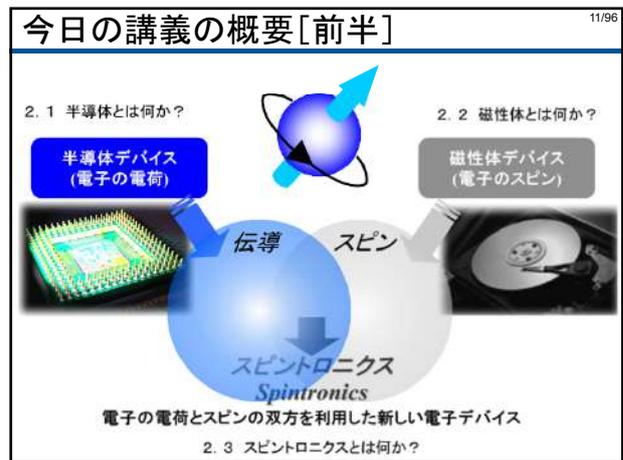
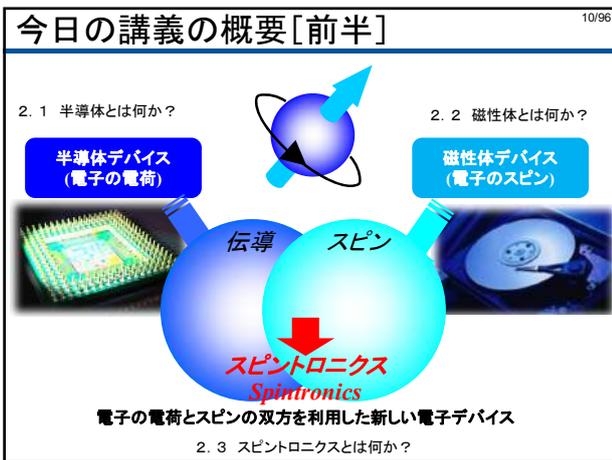
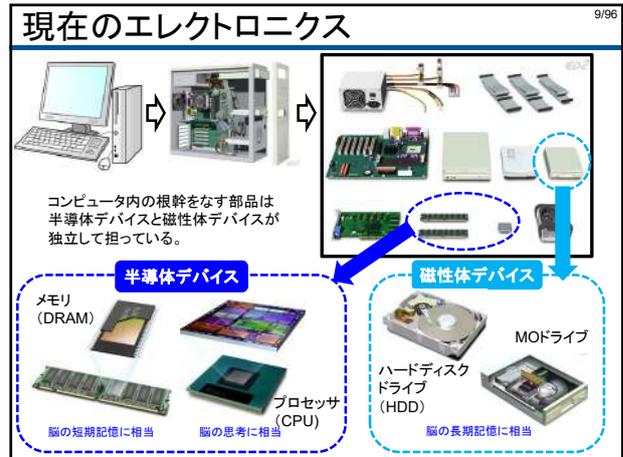
1. Outline of my research 6/96

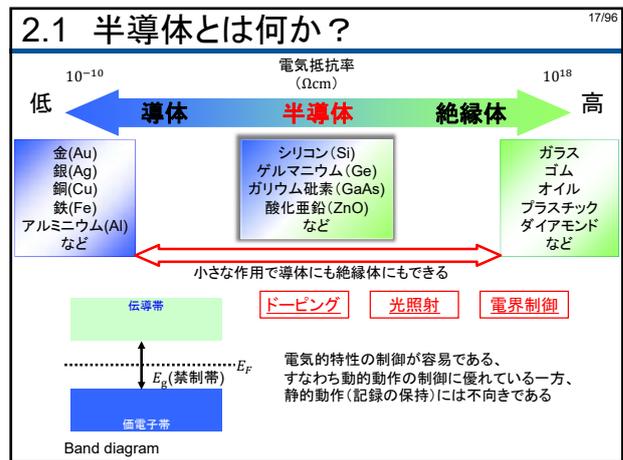
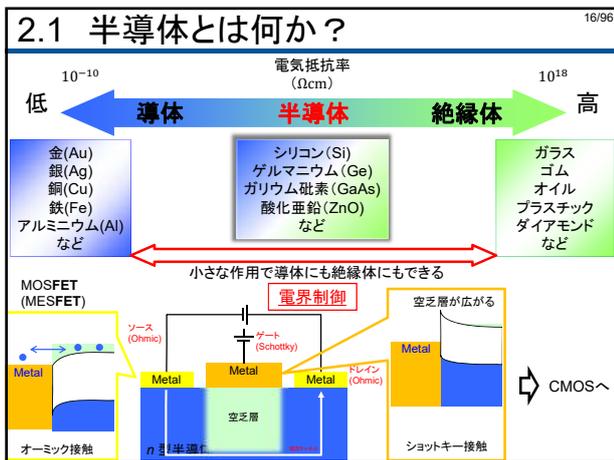
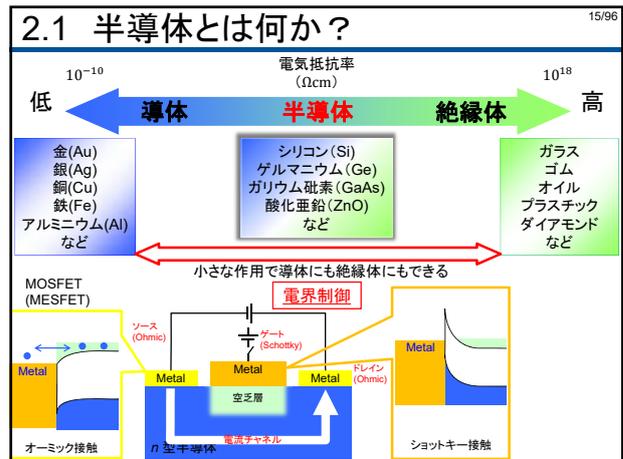
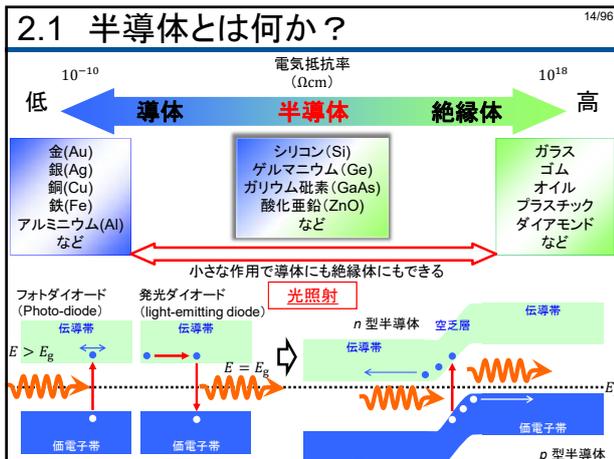
FY	Research Content	Institution
2003   2008	筑波大学大学院 数理物質科学研究科 物性・分子工学専攻 瀧田・黒田研究室(喜多研究室) → 黒田研究室 2008年3月 工学博士号 取得 [研究内容] 磁性半導体(Zn,Cr)Teにおける 荷電不純物ドーピングによるスピン特性の制御	
2009   2010	独立行政法人 物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究所 [研究内容] 超伝導体における スピントロニクスを用いたスピン偏極電流検出デバイスの開発	
2010   2020 現在	国立大学法人 東京工業大学 未来産業技術研究所 研究員 (2010-2012) 特任助教 (2013-) 未来産業技術研究所 助教 (2018-) [研究内容] • 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	

Spintronics

8/96

## 2. スピントロニクス





### 今日の講義の概要 [前半]

18/96

2.1 半導体とは何か？

半導体デバイス (電子の電荷)

2.2 磁性体とは何か？

磁性体デバイス (電子のスピン)

伝導, スピン

スピントロニクス Spintronics

電子の電荷とスピンの双方を利用した新しい電子デバイス

2.3 スピントロニクスとは何か？

### 2.2 磁性の基礎

19/96

磁石って何？ なんて方位磁石は北を向くのか？ なぜ砂鉄はくっつくの？

電子の“スピン”のもつ磁気モーメントによる

磁気モーメント  $\vec{\mu} = \mu_0 JS \vec{n}$

電荷  $e$  による電流は  $-e \left( \frac{\omega}{2\pi} \right)$  なので、

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{-e\omega}{2\pi} \right) r^2 \pi = -\frac{\mu_0 e \omega r^2}{2}$$

一方で、角運動量  $\vec{\ell} = \vec{r} \times \vec{p}$  は  $\ell = r(mv) = m\omega r^2$  なので

$$\mu = -\frac{\mu_0 e}{2m} \ell$$

と書ける

電子は原子核の周りを回っている (Bohrの原子模型)

電子の質量:  $m$ , 円運動の半径:  $r$ , 角速度:  $\omega$

## 2.2 スピンと磁気モーメント

量子力学的には、電子の運動は量子化され、角運動量は離散的な値しか取れない。  
 $\ell \rightarrow \hbar \ell$  ( $\ell = 0, 1, 2, \dots$ )  $\ell$ : 軌道角運動量子数

軌道磁気モーメントは  $\mu = -\frac{\mu_0 e \hbar}{2m} \ell$

$\frac{\mu_0 e \hbar}{2m} = 1.165 \times 10^{-29} [\text{Wb} \cdot \text{m}]$   
 $= 9.273 \times 10^{-24} [\text{emu}]$   
 $\equiv \mu_B$  : ボーア磁子

となる。

電子の公転ではなく自転を考えると  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [\text{N/A}^2]$   
 $e = 1.6 \times 10^{-19} [\text{C}]$   
 $m = 9.1 \times 10^{-31} [\text{kg}]$   
 $\hbar = 1.05 \times 10^{-34} [\text{J} \cdot \text{s}]$

スピン磁気モーメントは  $\mu = -\frac{\mu_0 e \hbar}{2m} s$  ( $s = \pm \frac{1}{2}$ )  $s$ : スピン角運動量子数  
 と書くことができる。

Fe, Ni, Coなどやその合金では軌道磁気モーメントの寄与はほとんどゼロとなり、スピン磁気モーメントのみが残る。これが磁性の起源である。

しかし、電子はそもそも自転なんてしているのだろうか？

## 2.2 Bohrモデル

Bohr model

Solar system

仮に電子が上向きに自転しているとする。  
 電子の表面の速度を  $v_s$  とすると、スピン磁気モーメントは

$e = 1.6 \times 10^{-19} [\text{C}]$   
 $m_e = 9.1 \times 10^{-31} [\text{kg}]$   
 $\hbar = 1.05 \times 10^{-34} [\text{J} \cdot \text{s}]$   
 $r = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} = 2.8 \times 10^{-15} [\text{m}]$

## 2.2 磁性体

“スピン”(磁気モーメント)の集合体

原理的にはすべての物質が磁性を示す  
 → 大部分のスピンは打ち消し合う

閉殻となっていない3d軌道(遷移元素)や4f軌道(希土類元素)では、余ったスピンのよりマクロな磁気モーメント(磁性)を持つ。  
 実際には、結合状態や血漿中での配列により磁性は大きく変化する。

**磁性体の種類**

- 常磁性: 外部磁場を印加したときのみ磁化が出現する物質
- 強磁性: 外部磁場を印加しなくても磁化が一樣に現れる物質
- 反強磁性: 反平行な2種類のスピンの交互に配列(全体でゼロ)
- フェリ磁性: 反平行な2種類のスピンの交互に配列(全体で有限)

## 強磁性体

遷移金属では順にd電子が増加するため、 $5d_{5/2}$ が最大となるはずだが、実際には、半分程度。d電子が自由電子として多くの原子に共有されるため

**Bethe-Slater curves**  
 原子磁気モーメントを揃えようとする相互作用の大きさ

**Slater-Pauling curves**  
 3d遷移金属および合金の原子1個あたりの磁気モーメントの大きさ

Fe:  $\sim 2.5 \mu_B$   
 Co:  $\sim 1.7 \mu_B$   
 Ni:  $\sim 0.6 \mu_B$

CrやMnが単体では強磁性体にならないのはなぜだろうか？

磁気モーメントの位置関係(結晶構造)や距離(結合長さ)によって平行と反平行でどちらが安定化が変わる

## (強)磁性体の特徴

**ヒステリシス(履歴現象)**

**磁区構造と異方性**

直前の磁化状態を記録できる( $M_r$ )  
 磁区: いくつかの方向を向いた磁化を持つ領域  
 磁壁: 磁区と磁区の境界 磁気モーメントが回転

**磁気異方性**

特定の結晶軸、構造方向を向きやすい性質  
 磁化容易軸と磁化困難軸

**磁気抵抗効果**

磁化の向きと電流の向きに応じて抵抗が変化(ただし数%)

## HDDの原理

読み出し

書き込み

Approx. 1Mビット

### 今日の講義の概要 [前半]

26/96

2.1 半導体とは何か?

半導体デバイス  
(電子の電荷)

2.2 磁性体とは何か?

磁性体デバイス  
(電子のスピン)

伝導      スピン

**スピントロニクス**  
*Spintronics*

電子の電荷とスピンの双方を利用した新しい電子デバイス

2.3 スピントロニクスとは何か?

### 2.3 スピントロニクス

27/96

**<金属スピントロニクス>**

- 1988 GMRの発見
- 1995 室温TMRの発見
- 1998 GMRヘッドの実用化
- 1999 スピン注入磁化反転
- 2001 非局所スピン注入
- 2003 スピン注入自動発振
- 2004 TMRヘッドの実用化
- 2005 金属ナノ粒子のスピン緩和
- 2006 MRAMの実用化
- 2007 MgO-TMRヘッドの実用化

**<半導体スピントロニクス>**

- 1990 スピンFETの提案
- 1992 強磁性半導体InMnAsの創製
- 1996 強磁性半導体GaMnAsの創製
- 1999 スピン注入の光学的検出 (Spin-LED)
- 2000 強磁性の電圧制御
- 2002 光による磁化誘起
- 2004 スピン注入磁化反転
- 2004 電流による磁壁駆動
- 2005 スピンホール効果
- 2005 スピン歳差運動の電氣的制御
- 2007 スピン注入の電氣的検出
- Siへのスピン注入・検出

依存伝導      スピン      キャリヤ      誘起磁性

**スピントロニクス**

磁化制御      スピン注入現象      電流

トポロジカル      ドット

### A. 金属スピントロニクス

28/96

#### 巨大磁気抵抗効果 (Giant Magneto-Resistance) GMRの発見

Albert Fert

Peter Gruber

PRL 61 2472 (1988), 2007年ノーベル物理学賞

(Fe 30 Å / Cr 10 Å)<sub>n</sub>

(Fe 30 Å / Cr 12 Å)<sub>n</sub>

(Fe 30 Å / Cr 9 Å)<sub>n</sub>

PRB 39 4828 (1989)

電気伝導へのスピンの影響は小さいと考えられていた

それまでの常識を超える  
**磁気抵抗変化**

### A. 金属スピントロニクス

29/96

#### 巨大磁気抵抗効果 (Giant Magneto-Resistance) GMR

各層厚は数nm

強磁性 (F1)

非磁性体 (N)

強磁性 (F2)

F1とF2の磁化の向きが**平行**  
→ 抵抗 **小**

電子が散乱されにくい

F1とF2の磁化の向きが**反平行**  
→ 抵抗 **大**

電子が散乱されやすい  
→ 抵抗が増大

### A. 金属スピントロニクス

30/96

NIMS スピントロニクス材料研究拠点HPより

#### スピントラップ型GMR

反強磁性体

ピン層

フリー層

片方(ピン層)の磁化方向を反強磁性体でピン留め

フリー層の磁化方向に依存した磁気抵抗が得られる

#### Giant Magnetoresistance (GMR)

high resistance      low resistance

Current Perpendicular to Plane (CPP)

high resistance      low resistance

Current In Plane (CIP)

magnetic recording media

Hard disk drive (HDD)

HDDの高感度リードヘッドとして利用される。感度の上昇によりビットサイズの面密度が加速度的に増加

### A. 金属スピントロニクス

31/96

#### トンネル磁気抵抗効果 (Tunnel Magneto-Resistance) TMRの発見

非磁性金属の代わりに絶縁体を挿入した構造によりGMRより大きい効果

強磁性

絶縁体

強磁性

産総研 東大 浦清氏 宮崎教授

CoFeB/MgO/CoFeB

MgO Barrier

AlOx Barrier

400

300

200

100

0

1994 1996 1998 2000 2002 2004 2006

### 2.3 スピントロニクス

**<金属スピントロニクス>**

- 1988 GMRの発見
- 1995 室温TMRの発見
- 1998 GMRヘッドの実用化
- 1999 スピン注入磁化反転
- 2001 非局所スピン注入
- 2003 スピン注入自動発振
- 2004 TMRヘッドの実用化
- 2005 金属ナノ粒子のスピン緩和
- 2006 MRAMの実用化
- 2007 MgO-TMRヘッドの実用化

**<半導体スピントロニクス>**

- 1990 スピンFETの提案
- 1992 強磁性半導体InMnAsの創製
- 1996 強磁性半導体GaMnAsの創製
- 1999 スピン注入の光学的検出 (Spin-LED)
- 2000 強磁性の電圧制御
- 2002 光による磁化誘起
- 2004 スピン注入磁化反転
- 2004 電流による磁壁駆動
- 2005 スピンホール効果
- 2005 スピン歳差運動の電気的制御
- 2007 スピン注入の電気的検出
- Siへのスピン注入・検出

### B. 半導体スピントロニクス

**スピントロニクスFETの提案**

S. Datta and B. Das, APL 56 665 (1990).

- ソースとドレインが強磁性体で形成されるFET
- ソースから注入されたスピン電子は半導体中に注入され、ドレインへ流れる
- ゲート電極による電界によりスピンの向きを調節させることができる
- ドレインの磁性の向きに応じて抵抗が変化する

**実現のための課題**

- 強磁性体から半導体へのスピン電子の注入
- 半導体中のスピンの制御
- 半導体から強磁性体へのスピン注入 (検出)

スピンを非磁性体の半導体中に注入し、制御するのは難しい

- 磁性半導体の研究
- トンネルバリアの研究
- 光によるスピン検出

### B-1. 磁性半導体

→ 半導体自身に磁性をもたせればよい

**磁性半導体** 半導体中に磁性元素を微量に添加することにより半導体的性質と磁性的性質を併せ持つ材料系

III-V族半導体ベース強磁性半導体

- $\rho$ -(In,Mn)As  $T_C \sim 35$  K (H. Munekata et al., PRL 63, 1849 (1989))
- $\rho$ -(Ga,Mn)As  $T_C \sim 180$  K (H. Ohno et al., APL 69, 363 (1996))

(a) S. Koshihara et al., PRL 78, 4617 (1997)      D. Chiba et al., Science 301, 943 (2003)

### B-1. 磁性半導体

**キャリア誘起強磁性**

ドーパしたMn同士が相互作用によってスピンを揃えるのではなく、キャリア(ホール)を介してスピンの揃う

A. H. MacDonald et al., Nature Materials 4, 195 (2005).

正孔濃度を変化させることで、光学的、電気的に磁性の制御が可能

光や電気によって容易にキャリア変調 → 磁化の歳差運動を制御する事が可能

Y. Hashimoto et al., PRL 100, 067202 (2008).

### B-1. 磁性半導体

**高 $T_C$ の磁性半導体探索**

理論: (Ga,Mn)N, ZnO:TM, TiO<sub>2</sub>:Co, (Ga,Cr)N, (Zn,Cr)Te, CdMnGeP<sub>2</sub>

実験: Sonoda et al., Kawasaki et al., Tabata et al., Kawasaki et al., Asahi et al., Saito et al., Satoh et al.

$T_C > RT$

(Zn, Cr)Te

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

S. Kuroda and N. Nishizawa et al., Nat. Mat. 6, 440 (2007)

### B-2. トンネルバリア

なぜ強磁性金属/半導体接合ではスピンの注入できないのか

→ 金属と半導体の伝導度の差が非常に大きいことが原因

**電気伝導度不整合 (Conductivity mismatch)** という

各スピンを流れるPathが並列回路を組んでいると流れる電流の偏極度Pは

$$P = \beta \frac{\rho_{FM}}{\rho_{SC}} \frac{2}{2\rho_{FM} + (1 - \beta^2)\rho_{SC}}$$

ただし  $\frac{1}{P} = \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\beta^2}$

$\beta = \frac{\rho_T - \rho_L}{\rho_T + \rho_L}$

$P = \frac{J_T - J_L}{J_T + J_L}$

と書くことができる

$\frac{\rho_{FM}}{\rho_{SC}} \sim 10^{-3}$ なので、 $\beta = 0.9$ であっても $P \sim 0.1\%$

$\beta = 0.5$ とすると $P \sim 0.01\%$

ほとんど流れない

金属と半導体の間に極薄のトンネルバリアを挿入する (半導体界面に形成されるSchottky Barrierもしくは非常に薄い酸化膜)

$$P \approx \beta \frac{\rho_{FM}}{\rho_{FM} + \rho_T + \rho_{SC}} + \gamma \frac{\rho_T}{\rho_{FM} + \rho_T + \rho_{SC}}$$

$\rho_{FM} \sim 10^{-7}$

$\rho_{SC} \sim 10^{-3}$ なので、第1項はほぼ無視でき、Pは $\gamma$ に依存する

$\rho_T \sim 10^2$

スピンの依存したトンネル確率 $\gamma$ を持つトンネルバリアを介せば、スピンは効率的に注入できる

### B-3. 光学的スピン検出

39/96

スピン注入を確認、検証する光学的な方法として発光の円偏光度を測定する方法が確立された

電子系(磁性材料) スピン偏極電子 → 角運動量 → 光学系 円偏光 (CPL)

光デバイス

**Spin-polarized emitting diodes (Spin-LED)**

強磁性体 + 半導体LED 構造 → 円偏光発光

スピン偏極電流注入

Active layer

光学選択則

Tokyo Tech

### B-3. Spin-LED

40/96

半導体中に注入されたスピンの偏極度を発光の円偏光度として評価することができる

$P_{opt} \propto P_{spin}$

$\eta = \frac{P_{spin}}{P_{FM}} = \frac{P_{circ}}{P_{FM}}$

Ohno et al. Nature 402 790 (1999)

43/96

### 3. スピノフォニクス

### スピノフォニクス

44/96

スピン(磁性)と光の相互作用

磁性(スピン) ↔ 相互作用 ↔ 光

- 光によるスピン操作
  - 光 → 熱 → 磁性(スピン)
  - 光 → 角運動量 → 磁性(スピン)
  - 光 → キャリア → 磁性(スピン)

超高速制御、低作用制御
- スピン偏極電子による円偏光の創出
  - 磁性(スピン) → 角運動量 → 光

Time scales and stimuli in magnetism  
A. V. Kimel, 11<sup>th</sup> MMM/Intermag conf., 2010.

### 3.1 光によるスピン操作

45/96

熱 → 磁性(スピン)

角運動量 → 磁性(スピン)

光

- 熱により磁化の制御を容易にする
- 磁性転移温度の変調 (熱アンスト磁化反転) → HDDの書き込み、MOディスク
- 角運動量を持つ光(偏光)を照射 → 磁化反転

Niの反磁性の熱による制御

Normalized remanence vs Δt (ps)

E. Beaurepaire, et al. PRL 76, 4250 (1996).

Before exposure, After exposure

M<sup>+</sup>, M<sup>-</sup>, Ni<sup>+</sup>, Ni<sup>-</sup>

C. D. Stanciu, et al. PRL 99, 047601 (2007).

### 3.1 光によるスピン操作

46/96

光 → キャリア → 磁性(スピン)

- 光照射によりキャリア濃度を変調が起因
- フェリ磁性体では一方のスピンへの選択励起により低励起制御が可能
- 磁性半導体の場合はキャリア誘起強磁性のため低励起による制御(非熱的な過程)が可能

フェリ磁性

Y. Hashimoto et al. Phys. Rev. Lett. 100, 067202 (2008)



### \* 円偏光の極性の定義

53/96

楕円偏光 (elliptically polarized light)  
楕円偏光のうち、電界ベクトルEの軌跡が円形になるものを特別に円偏光と呼ぶ。  
円偏光には右回りと左回りがあり、

一般的には、「(光源を背にして)波の法線方向を向いている静止した観測者にとって時間とともに時計方向に回転する」円偏光を右円偏光と定義する。

問題:  
下の図で表された円偏光はそれぞれ右回りか、左回りか?

解答:  
両方とも右回り円偏光  
静止系(左図)で書くと逆回りに見えるので注意!!

54/96

## 3.2 Spin-LED

### A) 室温における純粋円偏光発光

55/96

## 3.2 Spin-LED

### A) 室温における純粋円偏光発光

磁場を要さない円偏光発光

室温における高い円偏光度  
→ 高いスピン注入効率  
→ 結晶性トンネルバリア

### B) 偏光極性の電気的変調

円偏光発光の極性選択制

56/96

## 高スピン注入効率

N. Nishizawa et al., JAP 114, 033507 (2013)

半導体スピントロニクスにおいて室温で動作する素子の開発には成功していない

低いスピン注入効率が主因  
→ 極薄酸化トンネルバリアの挿入

先行研究における室温での円偏光度( $P_C$ )のチャンピオンデータ  
 $P_C = 0.3$  with  $B = 0.8$  T at RT  
G. Salis et al., APL 87, 262503 (2005)

III-V族化合物半導体系に適した高品質酸化トンネルバリア層が求められる

- 高い界面準位密度 ( $D_{it}$ )
- 高温酸化プロセス

→ III-V族化合物半導体においてはAsやPのV族元素の蒸気圧が高いため高温プロセスは使えない

[typical $D_{it}$ values]	
AlO <sub>x</sub> /GaAs	: $\sim 10^{13}$ cm <sup>-2</sup> eV <sup>-1</sup>
SiO <sub>2</sub> /Si	: $\sim 10^9 \sim 11$ cm <sup>-2</sup> eV <sup>-1</sup>

57/96

## 高品質トンネルバリアの作製

JAP 114, 033507 (2013)

GaAs上に高品質酸化物層を形成するためには

- 界面順位の低減  
→ 界面のダングリングボンド(未結合手)や欠陥の低減  
→ アルミニウム層をGaAs表面にエピタキシャル成長する  
→ アルミニウム層はGaAsと格子整合する
- 低温酸化プロセス  
→ 成膜後に室温で酸化プロセスを施す

Epitaxial growth of Al → Oxidation at RT

As stabilized surface on GaAs

室温で酸化することによって余剰な運動エネルギーを酸素原子に身えない  
→ 酸素原子とアルミニウム原子の置換やマイグレーションを低減

58/96

## 結晶性AlO<sub>x</sub>層

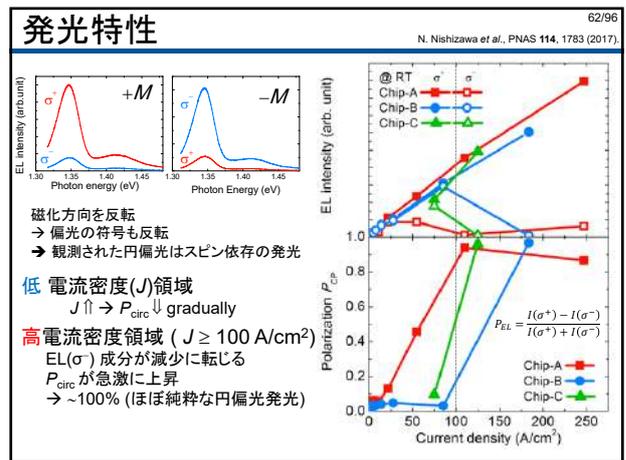
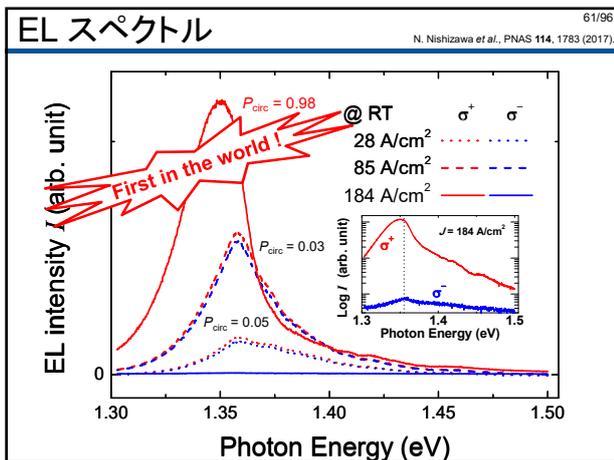
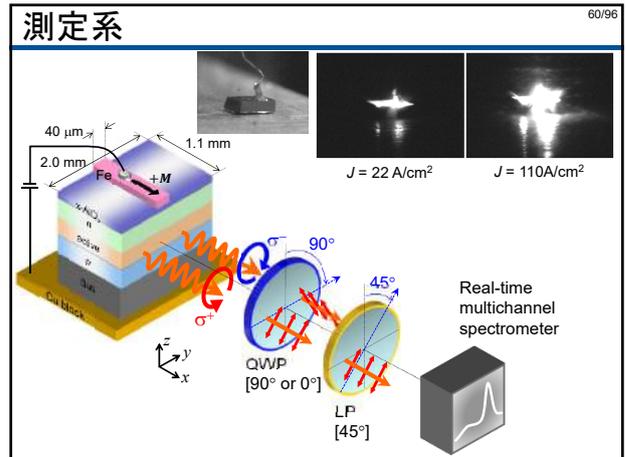
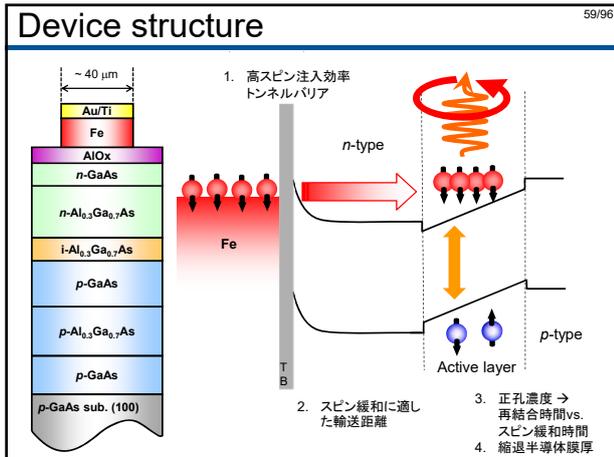
N. Nishizawa et al., JAP 114, 033507 (2013).  
N. Yokota et al., JAP 118, 163906 (2015).

プロセス →  $\gamma$ -like AlO<sub>x</sub> layer

- Al エピタキシャル成長 (5.5Å)@室温  
バルクのAl層の表面自然酸化膜(不動型)の除去 → 4~6Å
- 10時間以上の酸化 (→ 7.0Å)  
室温で乾燥空気に暴露
- Alの追加成膜 (2.3Å)
- 10時間の酸化 (→ 3.0Å)

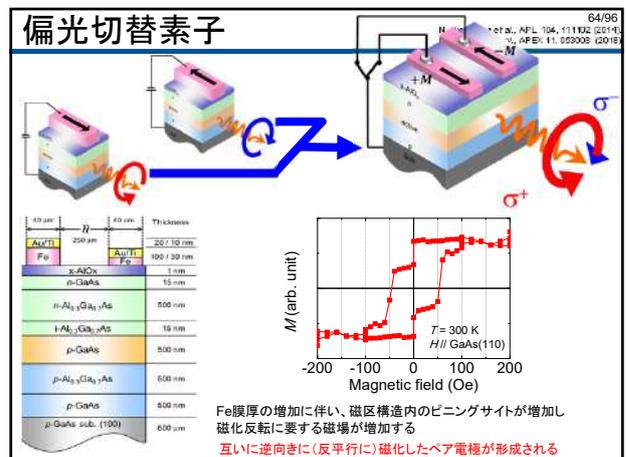
Al層は完全に酸化されているが、GaAs層は酸化されていない

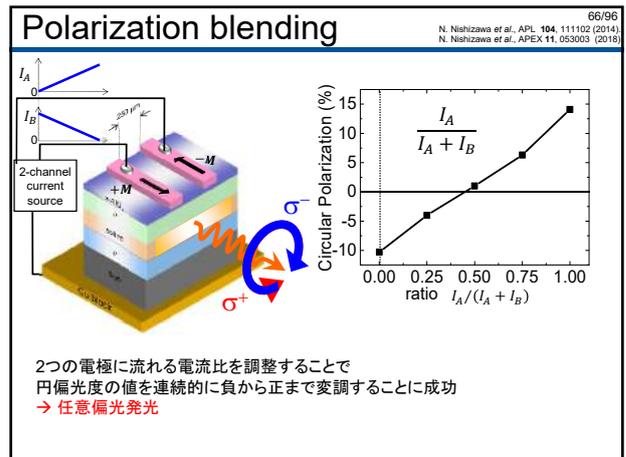
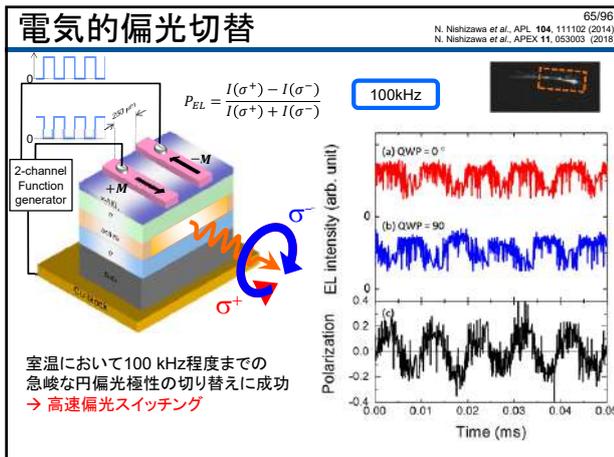
- 低界面準位密度  
 $D_{it} \sim 7 \times 10^{11}$  cm<sup>-2</sup>eV<sup>-1</sup> <<  $\sim 10^{13-14}$  (amorphous AlO<sub>x</sub>/GaAs)
- 電的一様性
- 界面におけるFeとGaAsの反応の抑制
- 高絶縁破壊電圧 ( $\sim 10^7$  V/cm)
- 高いスピン注入効率  
 $\eta \sim 63\%$  @ 6 K >> MgO/GaAs  
ALD-grown AlO<sub>x</sub>/GaAs



### 3.2 Spin-LED

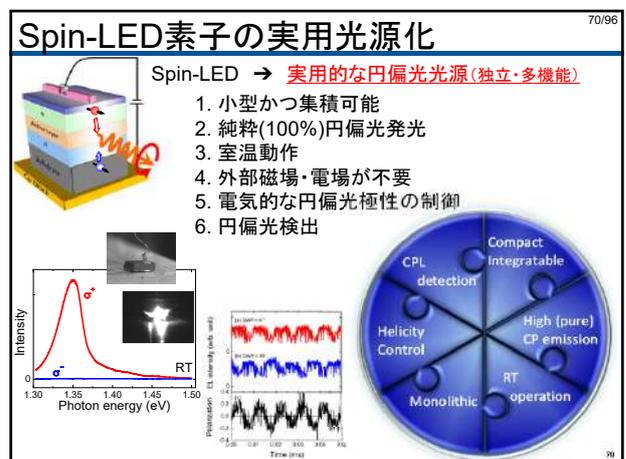
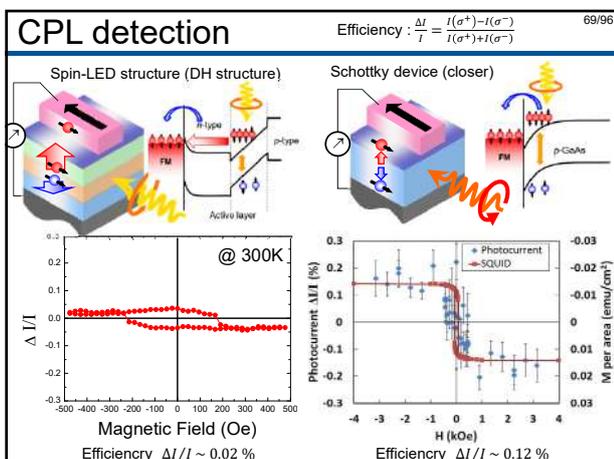
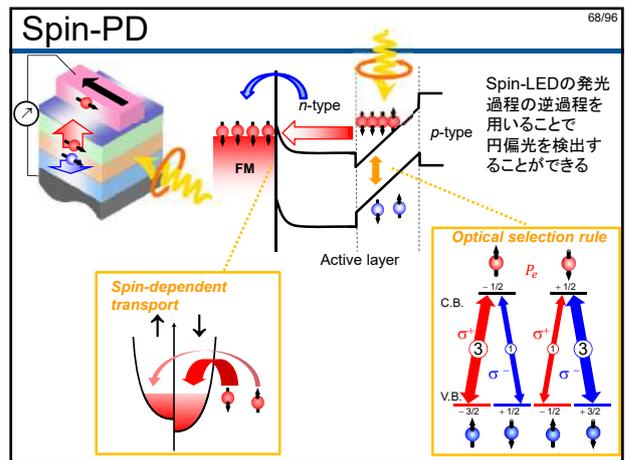
#### B) 偏光極性の電気的変調





67/96

### 3.3 Spin-PD (Spin-Photodiode)



71/96

## 4. スピンフォトリニクスの応用

72/96

## 2-4. CPL applications

73/96

## Spin-LED on 3D-Display

74/96

## Spin-LED on IOT

75/96

## Spin-LED on IOT

76/96

## 4. スピンフォトリニクスの応用

- 円偏光によるがん診断

### 生体組織における円偏光散乱

77/96

偏光(円偏光 / 直線偏光) → 散乱光の偏光状態

Mie 散乱

生体組織(複雑な散乱体) → 細胞核(散乱体)

→ 散乱体の大きさ、密度、分布  
→ 生体組織の構造、近接組織の差異の情報  
→ 腫瘍の検出や前がん病変の検出に有効

W. S. Bickel et al., PNAS 73, 486 (1976)  
V. Backman et al., IEEE J. Se. Top. Quantum Electron. 5, 1019 (1999)

散乱光の強度偏光度

散乱回数(number/mm)

Rayleigh 散乱

ka=1.19

ka=6.43

CPL

Mie 散乱

Linear polarized light (LPL)

Circularly polarized light (CPL)

### 円偏光散乱を用いたがん検出

78/96

光学配置

B. Kunenn et al., J. Biophotonics 8, 317-323 (2015)

Laser Diode, Mirror, HWP, CWP, Lens, Diaphragm, Polarimeter

Incident light (right elliptical vertical polarized light)

Huma lung tissue

ヒトの肺組織

tumour cellular component

lung (normal)

tumour generated fibrous tissue

tumour cellular component

Ellipticity (latitude of sphere): Cancer < Non-cancerous

### 生体内における非侵襲がん検出へ

79/96

円偏光発光ダイオード Spin-LED

内視鏡先端

生体内

円偏光散乱を用いたがん診断技術

Cancerous

Healthy

生体内がん診断技術の開発 (無染色、非侵襲、その場観察可能)

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

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

### Scattering mode

80/96

Rayleigh scattering ( $\lambda \leq a$ )

- 双極子は1つと見せる
- 当方的な散乱パターン
- 波長依存性

Mie scattering ( $\lambda > a$ )

- 複数の双極子 (異なる位相)
- 前方散乱が支配的となる → 複雑な散乱パターン
- 粒子径に敏感に変換する

### Light scattering by a single particle

81/96

$V(P) = 1$  (right-handed CPL)

$\lambda = 900 \text{ nm}$

Diameter of cell nucleus:  $a$

Parameters

Refraction factor of particle:  $n_{\text{particle}} = 1.59$

Refraction factor of medium:  $n_{\text{medium}} = 1.33$

Wavelength:  $\lambda = 900 \text{ nm}$

Data number: 1000

Scattered light intensity (logarithmic scale)

Degree of Circular polarization ( $V$ )

Small particle

$a = 0.1 \mu\text{m}$

Symmetric scattering

### Light scattering by a single particle

82/96

Rayleigh scattering like

Small particle

$a = 0.1 \mu\text{m}$

Symmetric scattering

Cell nucleus in Healthy tissue

$a = 5.9 \mu\text{m}$

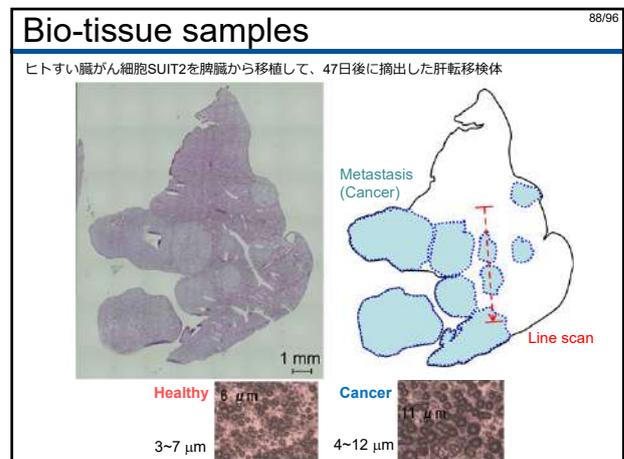
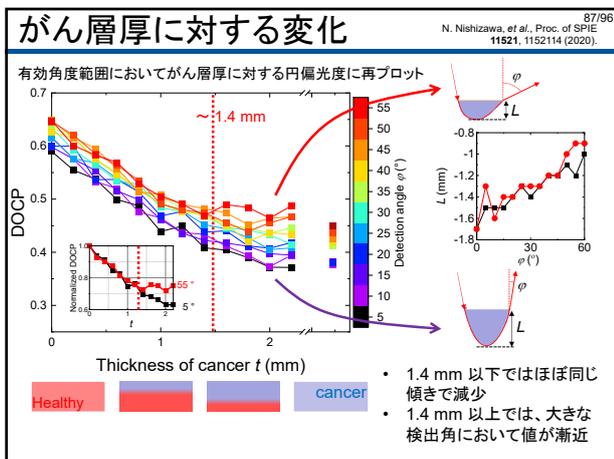
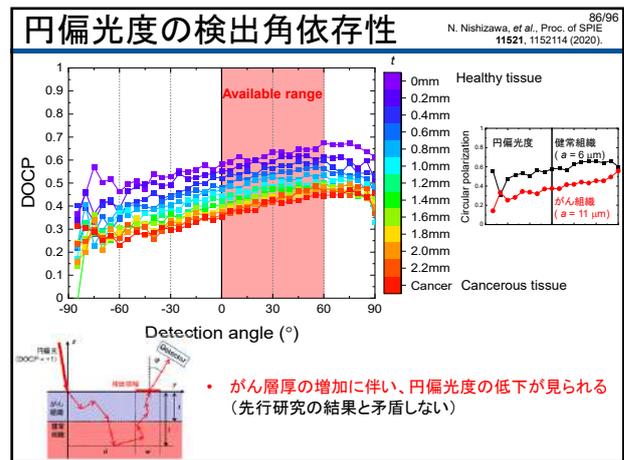
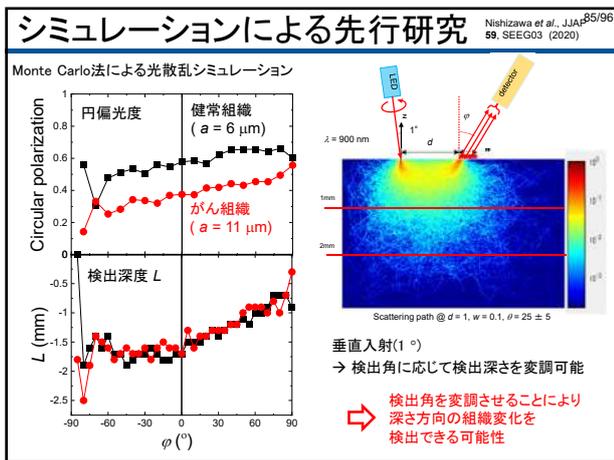
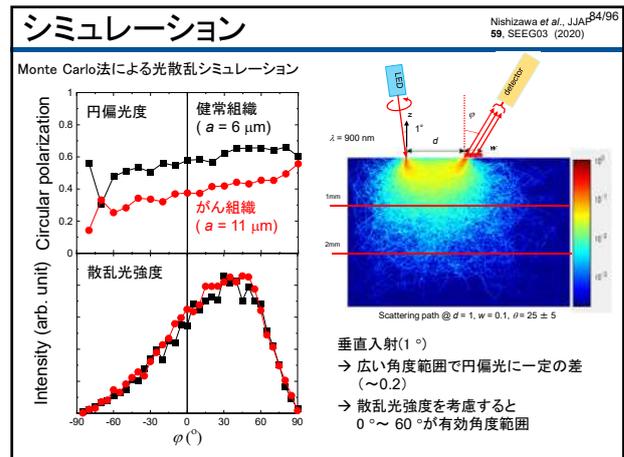
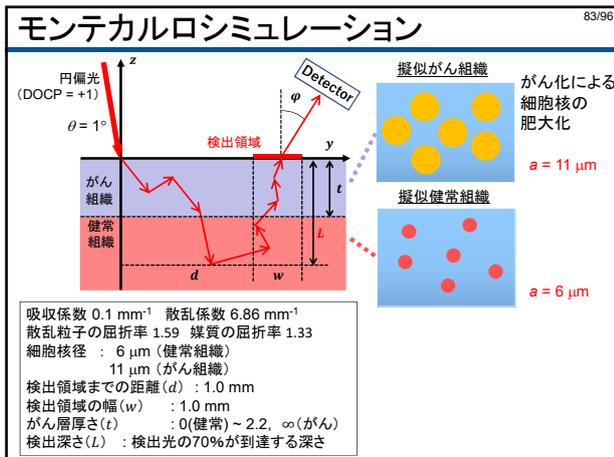
Forward scattering

Mie scattering

Cell nucleus in Cancerous tissue

$a = 11 \mu\text{m}$

Forward scattering



### Optical setup

89/96

$\lambda = 914 \text{ nm}$   
 $\text{DOCP} = \frac{S_3}{S_0}$

### $\theta$ and $\varphi$ dependence

90/96  $\lambda = 914 \text{ nm}$

#### 斜入射 ( $\theta$ 依存性)

#### 垂直入射 ( $\varphi$ 依存性)

- がん組織と健康組織間において明確な円偏光度差 → 細胞核の肥大化に起因
- 入射角と検出角の差が小さくなるとDOCP = -1に近づく  
→ 表面反射光(DOCP = -1)の影響が大きくなる
- $\theta > 55^\circ$  ~ Brewster角 → 円偏光の組織内への侵入が困難
- 一定の範囲内であれば角度や入射方向によらず一定の差  
→ 検出対象の傾斜や湾曲に対応可能

$\theta \leq 53^\circ, (\theta - \varphi) \geq 30^\circ$

### Line scan

Healthy: 91/96  
Cancer: C

斜入射: 面内分解能 0.6 mm  
 垂直入射: 面内分解能 0.3 mm

### 検出角依存性測定装置

JP patent application 2019-030856  
Nishizawa et al., JJAP 59, SEEG03 (2020)

92/96

1. 光源(Spin-LED)から患部に円偏光を照射  
 放物面鏡  
 検出器  
 円偏光光源 Spin-LED  
 患部表面  
 散乱光  $\theta(0 \sim 30^\circ)$   
 放物面鏡の焦点  
 射光のみが入射からの散乱光のみが  
 焦点距離がずれた場合でも同様に測定が可能  
 患部の傾斜にも一定の範囲内に対応可能 (実験より)  
 10倍模型

### Summary

93/96

<金属スピントロニクス> (GMR・TMR) → HDDヘッドへの応用  
 <スピントロニクス> (強磁性半導体) → スピン流へ  
 <半導体スピントロニクス> → スピン注入の光学的検出 (Spin-LED)  
 <スピンフォトンクス> → 光によるスピン操作  
 スピン偏極電子による円偏光の創出 (Spin-LEDの実用光源化) → 応用へ  
 Spin-LEDを用いた円偏光によるがん診断

### レポート課題

94/96

- Bohrの原子モデルにおいて電子が上向きに自転している仮定すると電子の表面の速度 $v_s$ が光速の70倍程度になってしまう、電子の自転というイメージは厳密には正しくないことを確かめよ。
- 強磁性金属と半導体の直接接合の2層流モデルにおいて流れる電流の偏極度 $P$ が以下の式で書かれることを導出せよ。
 
$$P = \beta \frac{\rho_{FM}}{\rho_{SC}} \frac{2}{2 \frac{\rho_{FM}}{\rho_{SC}} + (1 - \beta^2)}$$
 ただし  $\frac{1}{\rho_{FM}} = \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}$   
 $\beta = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$   
 $P = \frac{j_1 - j_2}{j_1 + j_2}$
- あなたが現在行っている研究について
  - 高校生に説明する程度の平易な用語のみを用いてあなたの研究テーマ、もしくは研究室の研究を説明しなさい。(様式、分量は自由)
  - その研究テーマに至るのに必要な基礎事項を列挙しそれらの関係性を示しなさい。

偏光によるがん診断研究  
 Spin-LED  
 スピンフォトンクス  
 スピントロニクス  
 半導体物性  
 強磁性物性

95/96

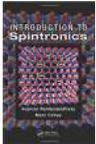
## レポート課題と講義資料について

- 前ページのレポート課題、講義資料については以下のサイトに掲載するので、適宜ダウンロードしてください。  
<http://www.munelab.first.iir.titech.ac.jp/Lecture-NN.html>

- 課題の提出方法  
 PDFで作成の上、以下のメールに送付してください。  
[nishizawa.n.ab@m.titech.ac.jp](mailto:nishizawa.n.ab@m.titech.ac.jp)
- 提出期限: 11/27(金) 17:00まで

96/96

## 参考文献

- 現代講座・磁気工学3  
 スピントロニクス 基礎編  
 (井上順一郎, 伊藤博介著)
 
- Introduction to Spintronics  
 (S. Bandyopadhyay, Marc Cahay)
 
- Semiconductor spintronics and quantum computation  
 (D.D. Awschalom, D. Loss, N. Samarth)
 
- スピントロニックデバイスの進展と応用  
 (西沢望)  
 電気学会論文誌・A, 基礎・材料・共通部門誌 Vol.140(No.3) p.113-118 (2020).  
[\[doi.org/10.1541/ieejfms.140.113\]](https://doi.org/10.1541/ieejfms.140.113)