

# 高輝度円偏光軟X線を用いた 内殻MCD顕微分光

大阪大学基礎工学研究科  
今田 真

SPring-8を用いたXMCD顕微分光

— 磁区構造観察

— 単結晶磁性多層膜における交換結合振動と磁化容易方向転移

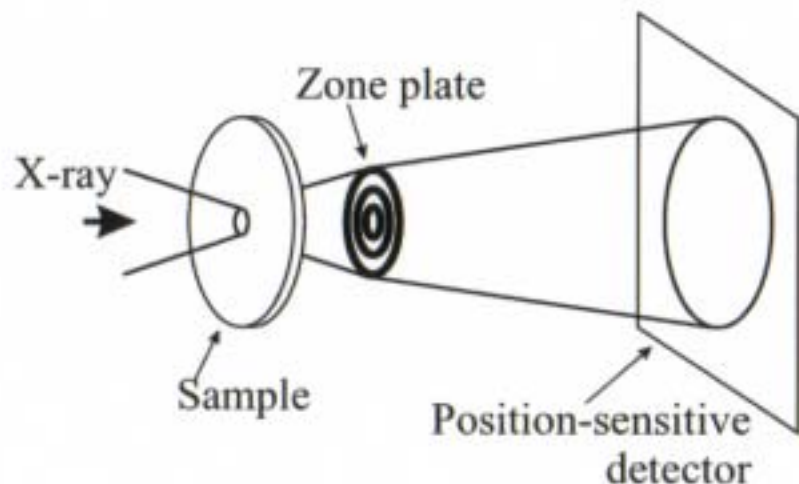
今後PEEMが何に威力を発揮するか

— SPELEEMの利用 例:量子ドットの顕微XPS・UPS

# 放射光利用のナノ分光手法

## 軟X線結像法

### ゾーンプレート

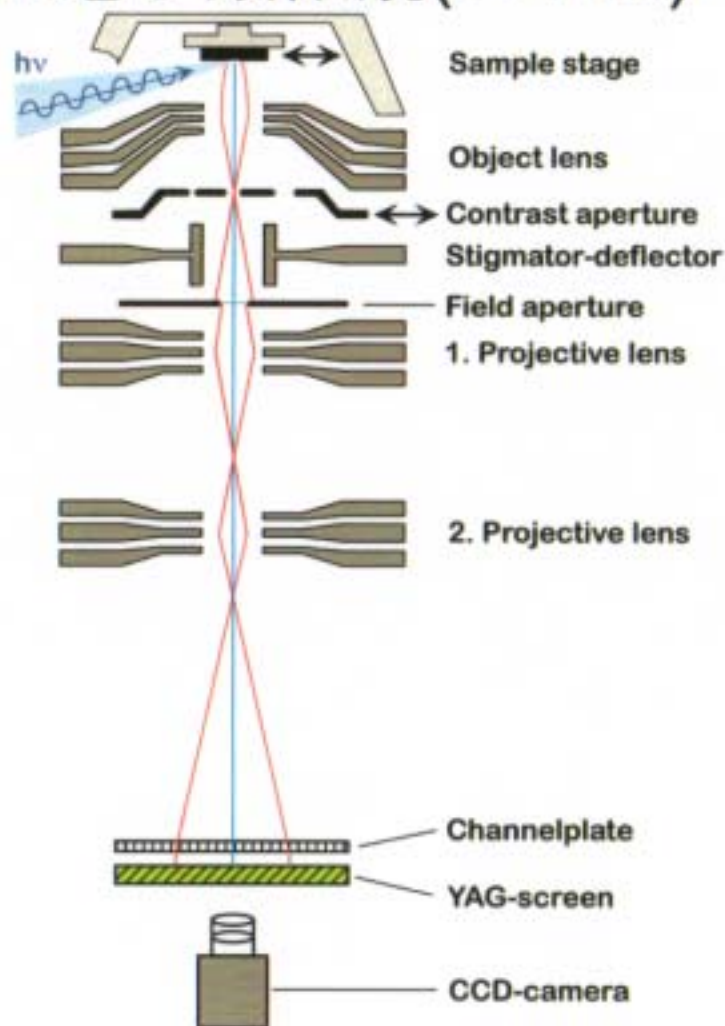


空間分解能

~20nm (両手法とも)

## 光電子結像法

### 光電子顕微鏡(PEEM)



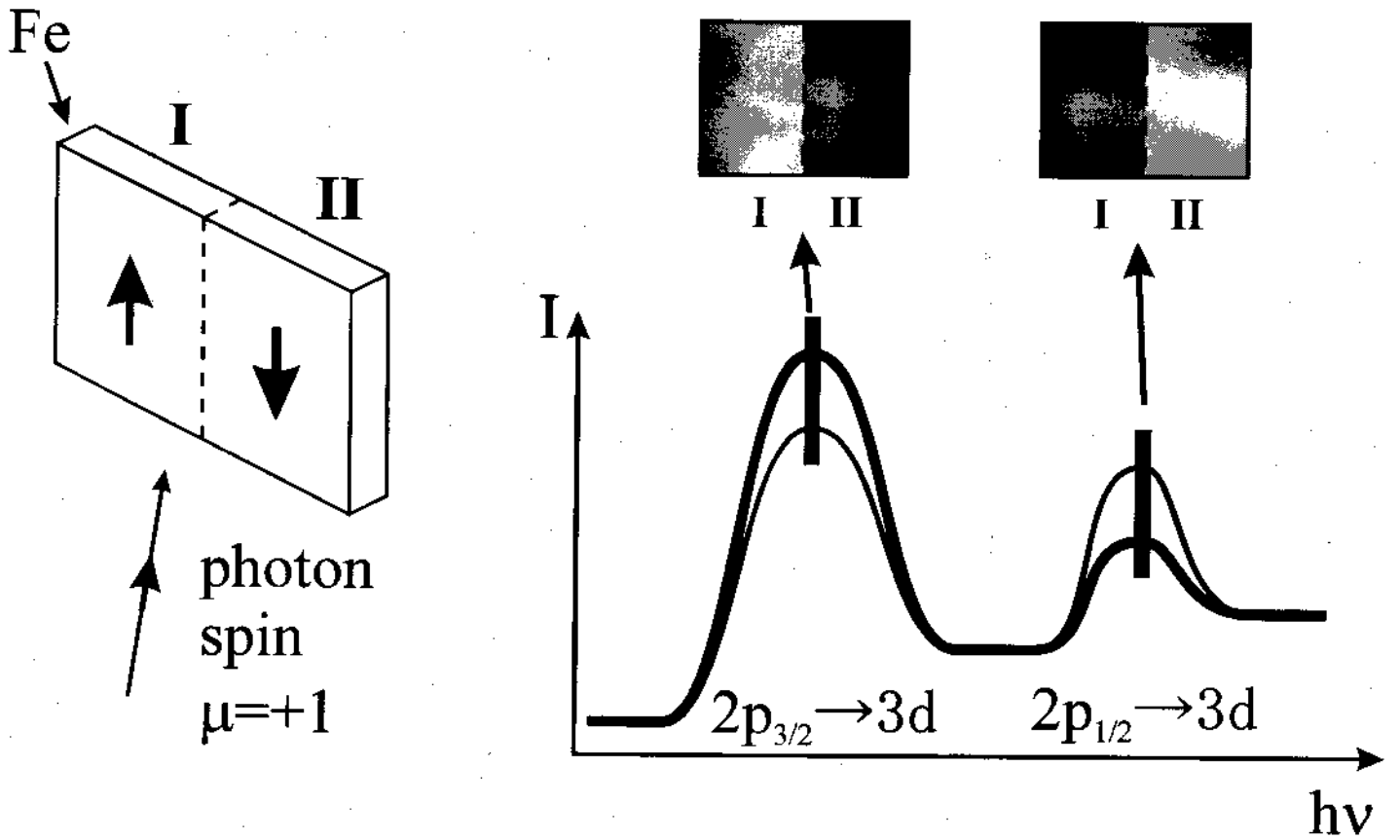
# 軟X線磁気円二色性(XMCD)顕微分光

## XMCD顕微分光とは

- 磁区構造を元素選択的に求められる
- スピン・軌道磁気モーメントのマッピングを行える  
(磁気光学総和則の利用)

## 単結晶磁性数層膜の研究

- Ni/Fe/Co<sub>3</sub>層膜におけるfcc的Fe層を通じた交換結合振動
- Co/Ni 2重楔形2層膜における磁化容易方向転移(面内 $\leftrightarrow$ 垂直)と異方性エネルギー

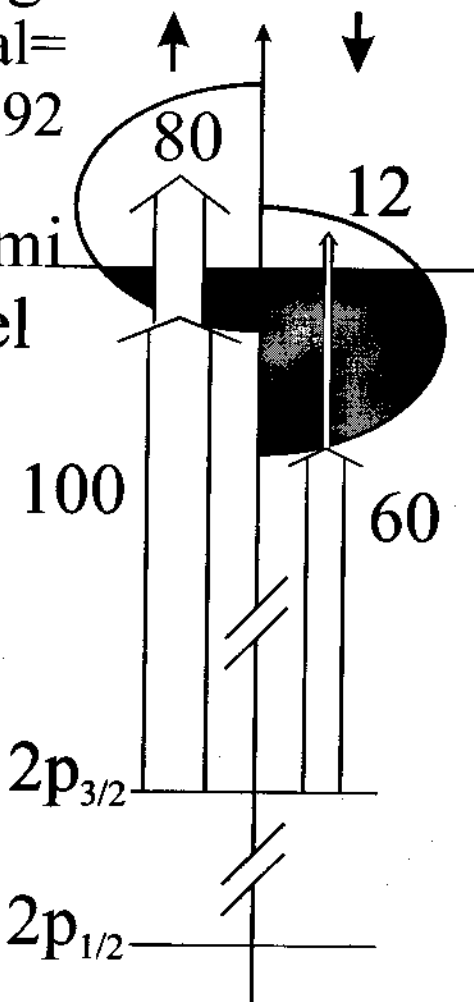


At  $2p_{3/2}$  peak

in region I

Total = 92

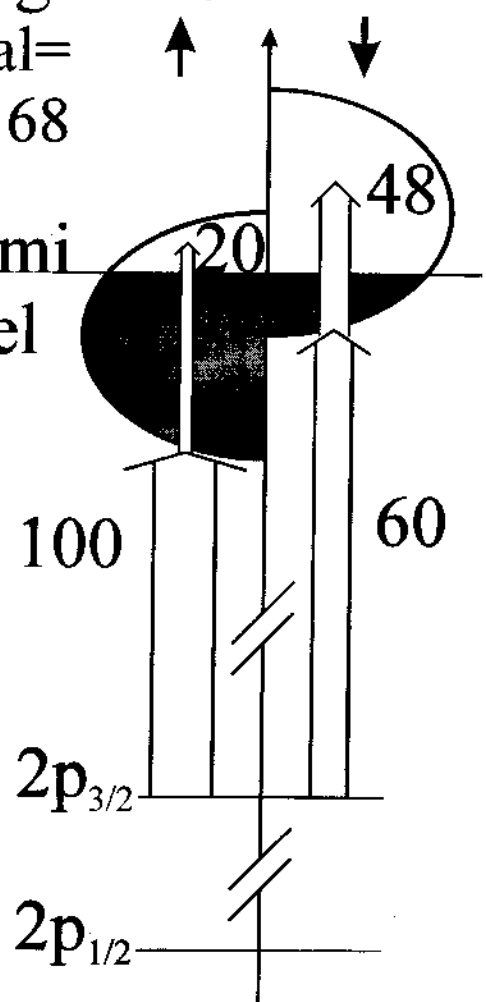
Fermi level



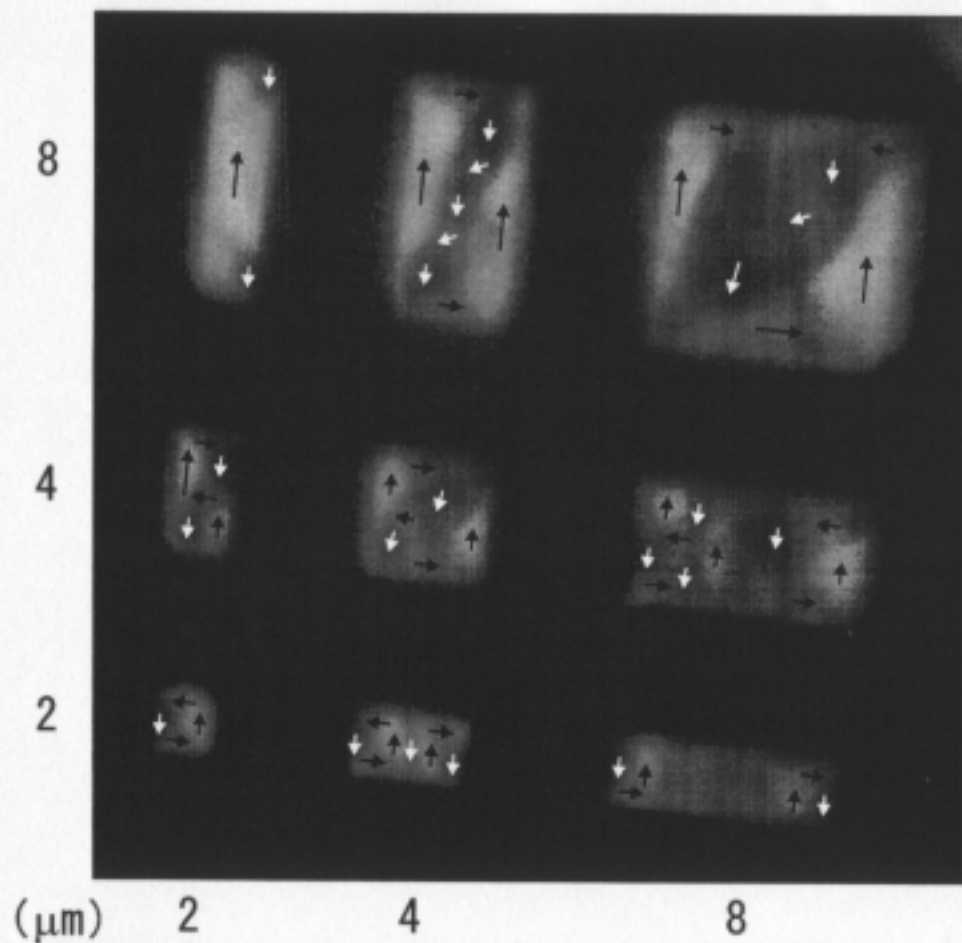
in region II

Total = 68

Fermi level



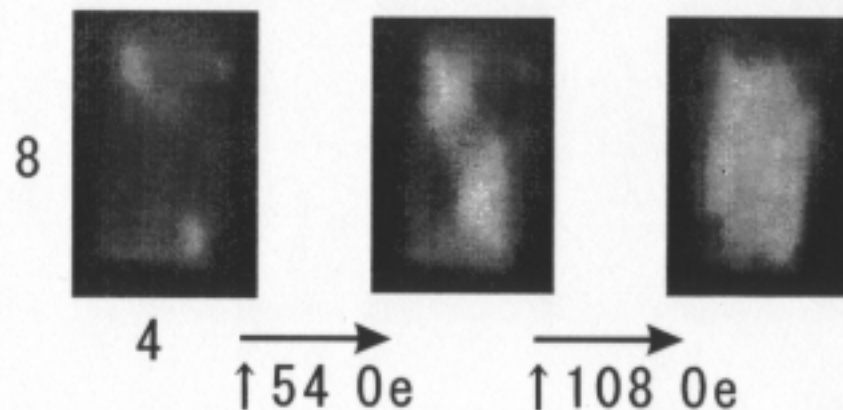
大きさ、縦横比の異なる正・長方形  
(As made)



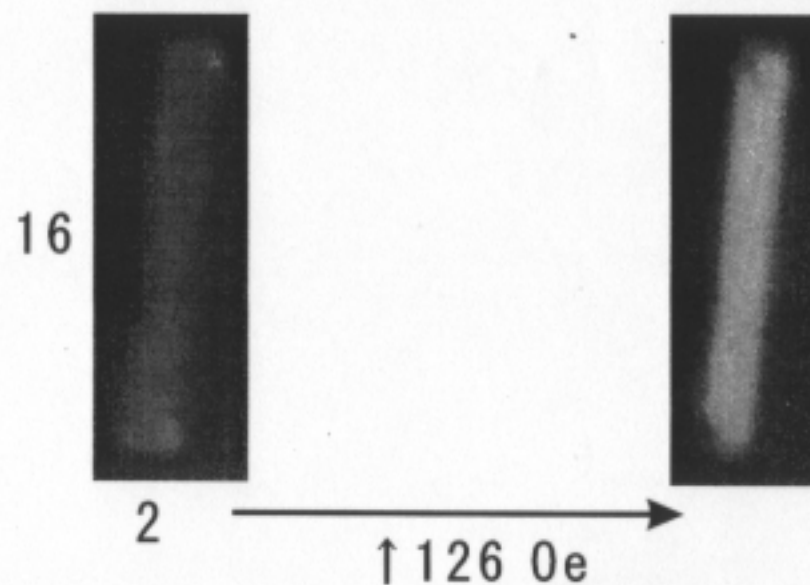
- ・ 漏れ磁場を減らす数パターンの磁区構造が見られる。
- ・  $180^\circ$  または  $90^\circ$  磁壁に近い磁壁が主である。
- ・ ある時点で(上向きの)磁場がかかったと推測される。

磁化反転過程

閉じた磁区構造(vortex)を經由



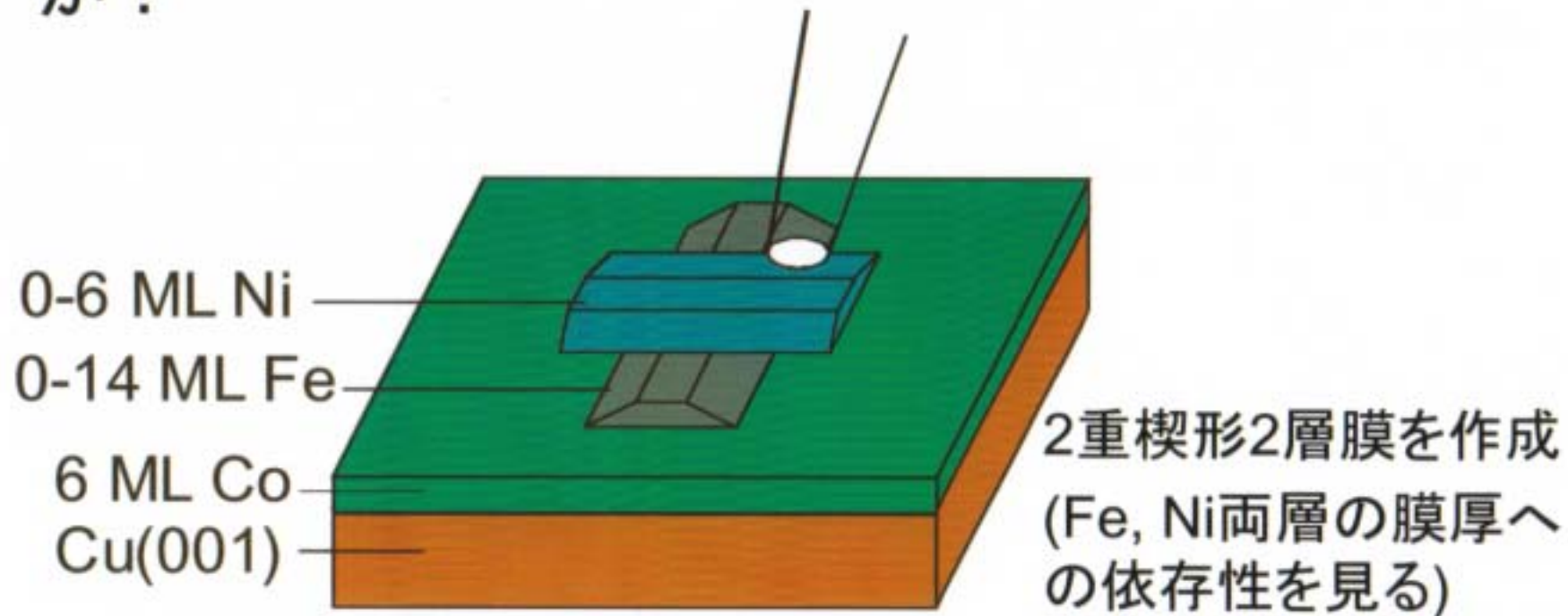
一気に磁化反転



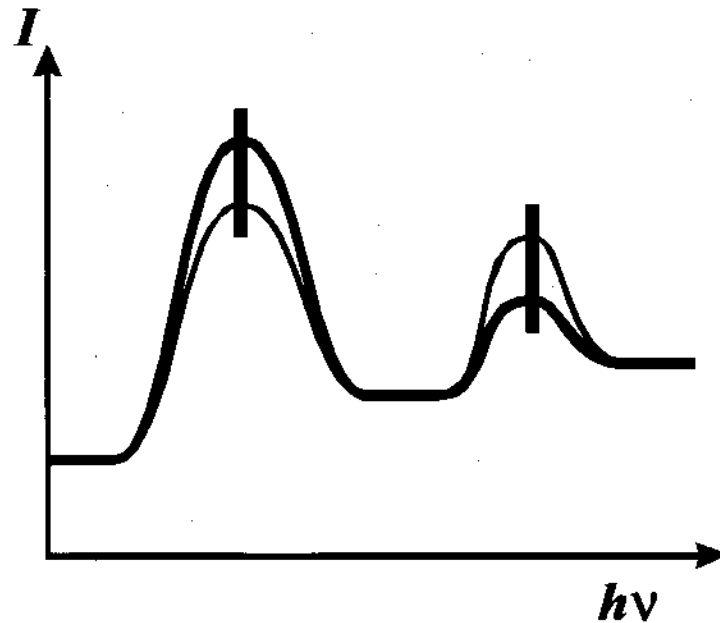
# fcc的Fe層を通じた交換結合振動

(J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom., 109 (2000) 249.)

- fcc的Fe膜はある膜厚領域でバルクは非強磁性
- 非強磁性層を挟んだ強磁性層間で見られる交換結合振動が、この非強磁性Fe膜を通して起こるか？



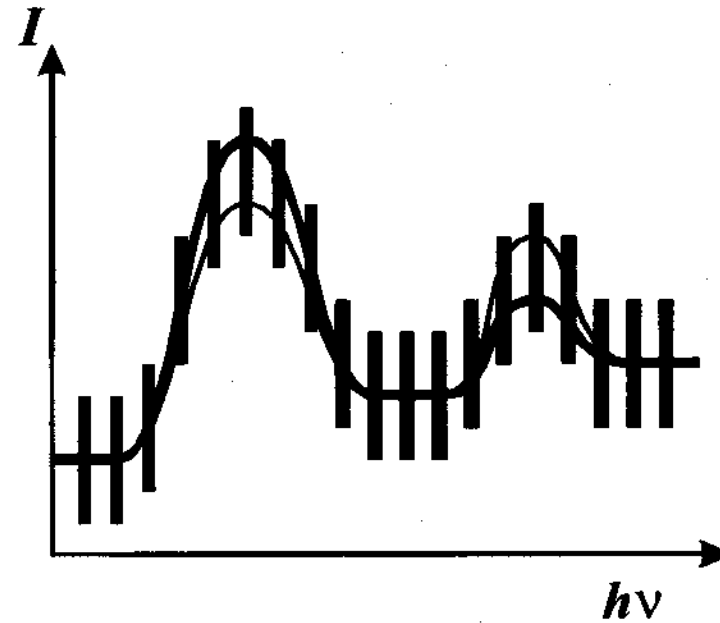
- 1 or 2点のエネルギーで観測



## 顕微鏡

磁区構造が見える

- 吸収領域全体の多数のエネルギーで観測

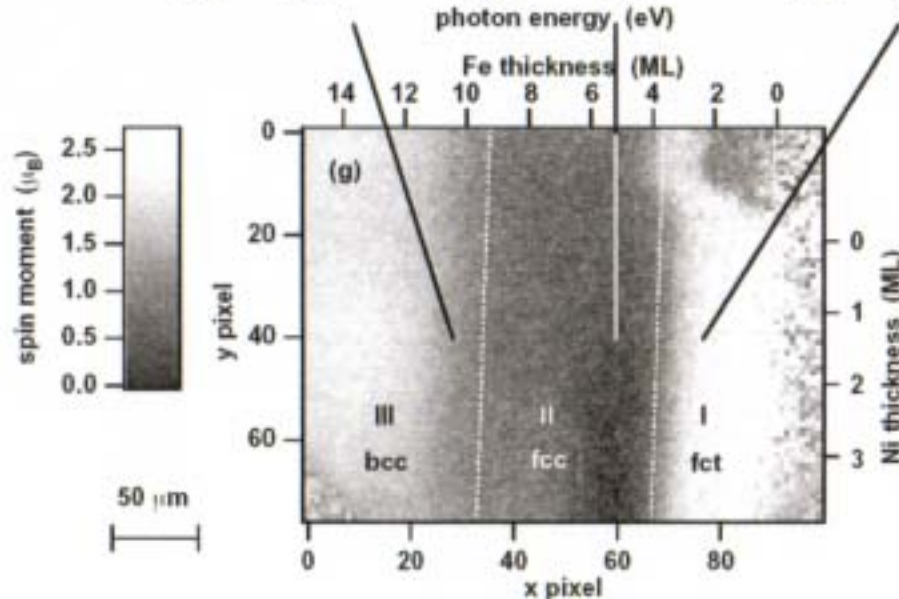
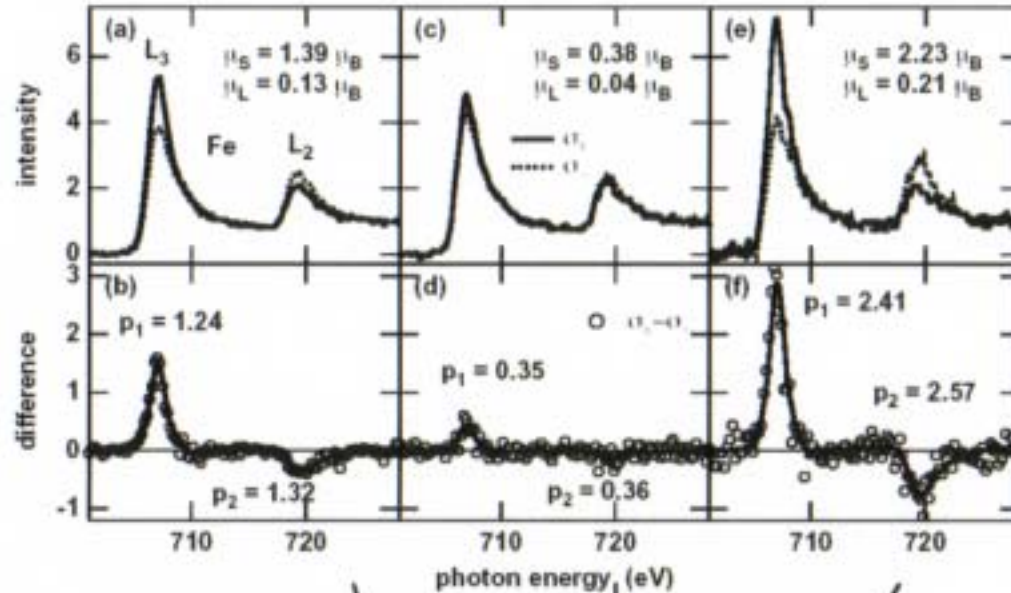


## 顕微分光

電子状態の空間依存性がわかる

# スピン・軌道磁気モーメントのマッピング

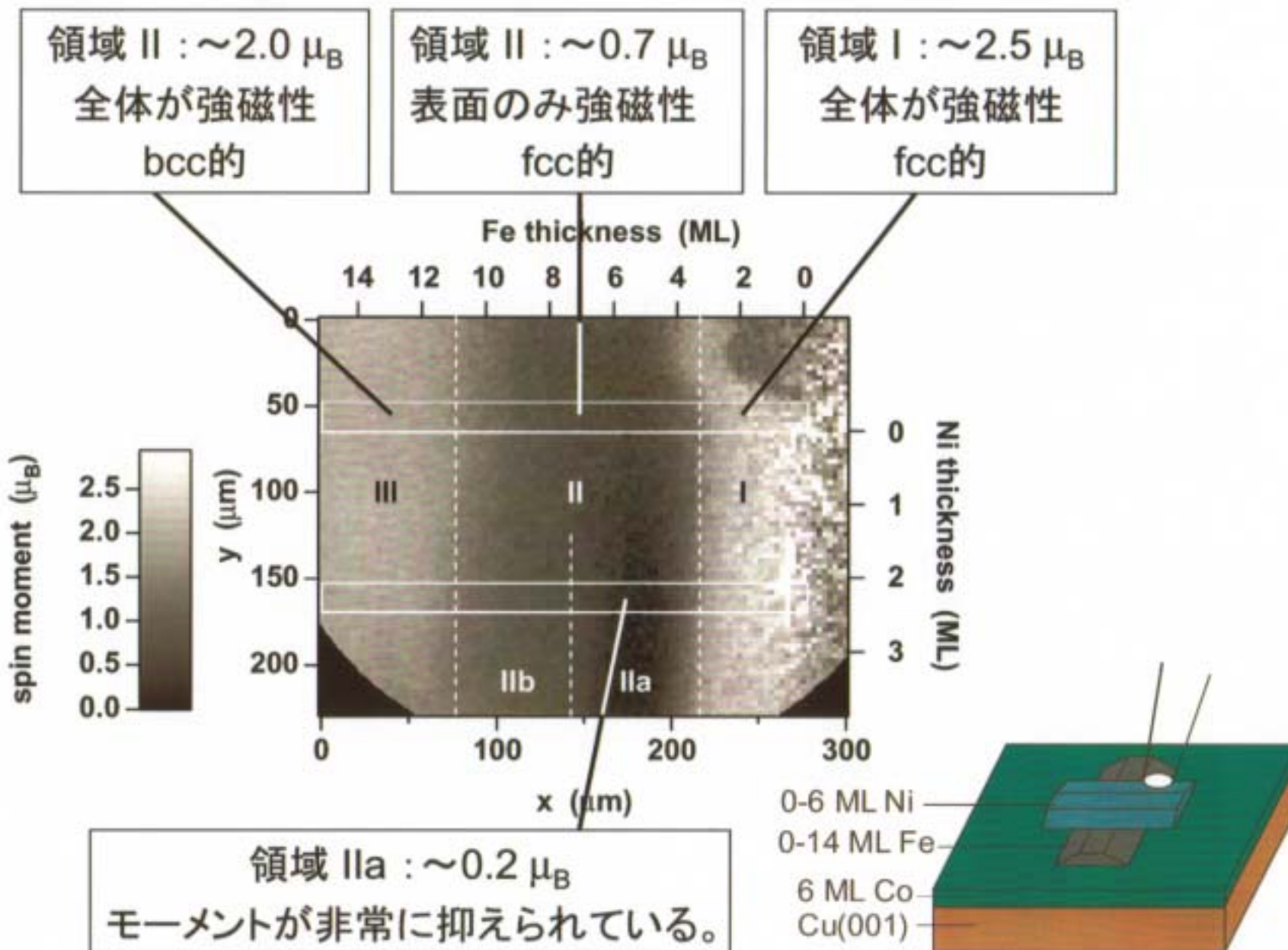
1. 光エネルギーを変えながら2次電子強度分布を測定する。
2. 各点で得られたスペクトルに磁気光学総和則を適用し、スピンおよび軌道磁気モーメント( $\mu_S$ ,  $\mu_L$ )を見積もる。
3. スピン・軌道磁気モーメントの分布を画像化する。

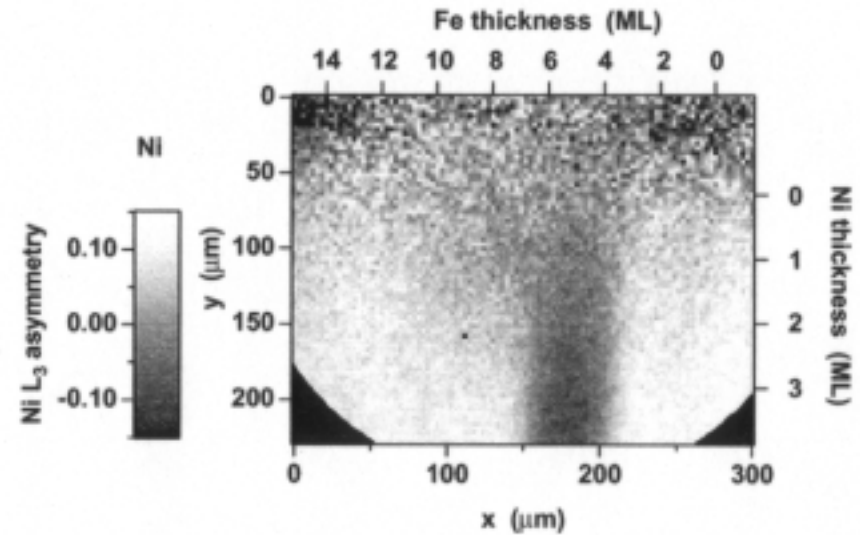
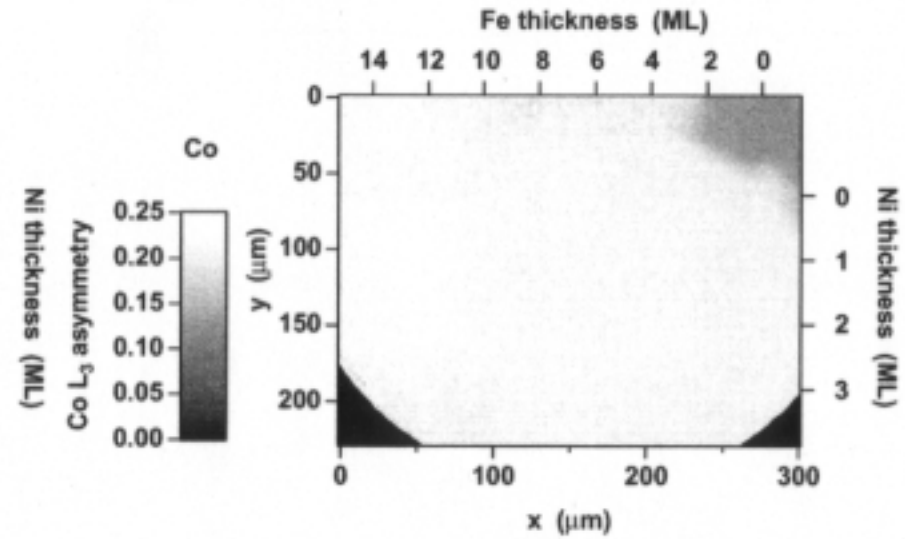
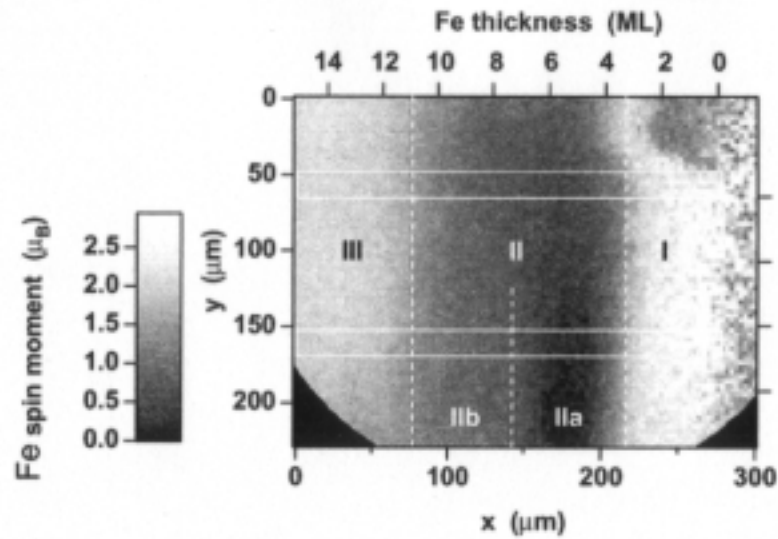


分光的側面のフル活用



# Feのスピンの磁気モーメント

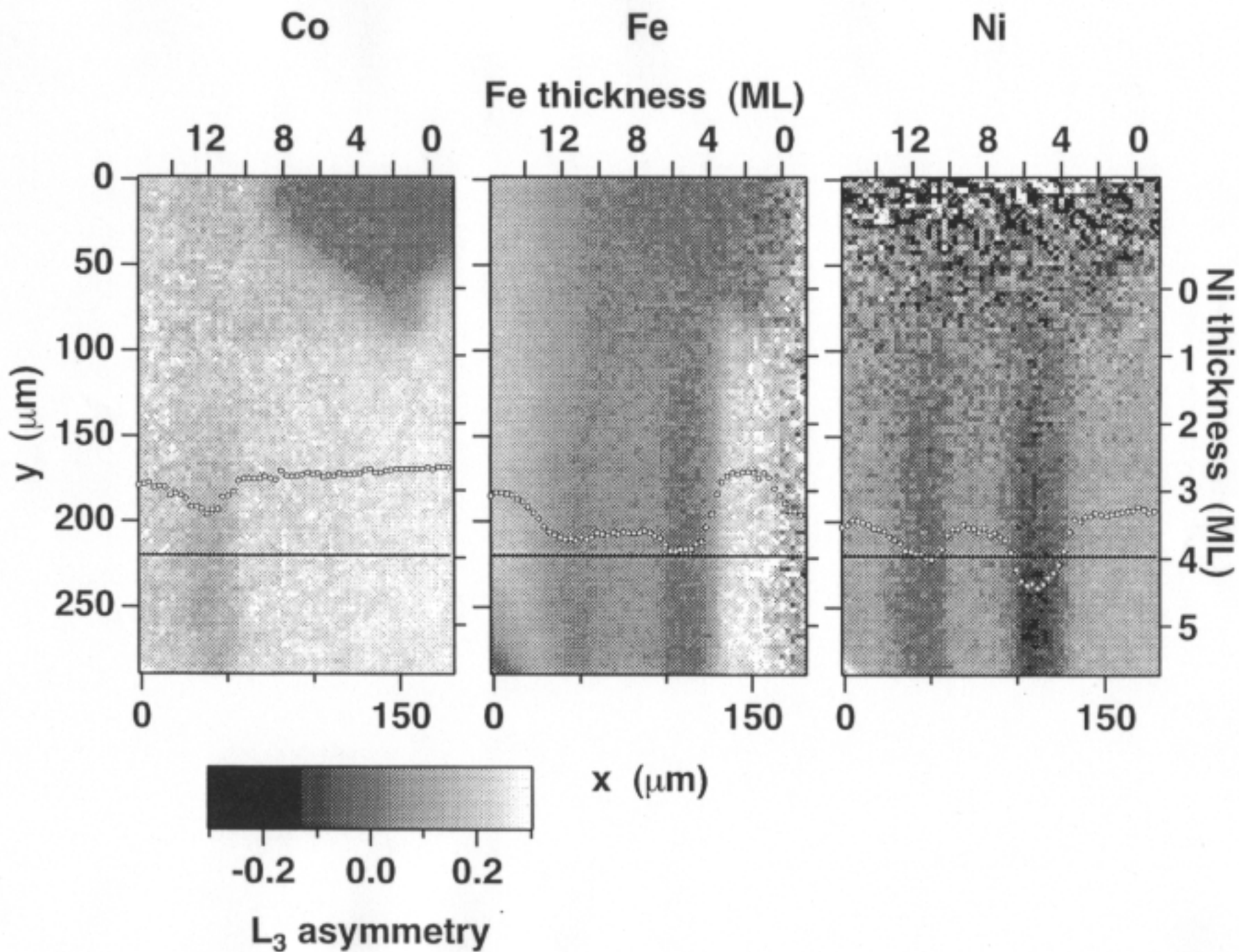




•CoモーメントとNiモーメント  
領域 IIa で反強磁性的  
それ以外では強磁性的

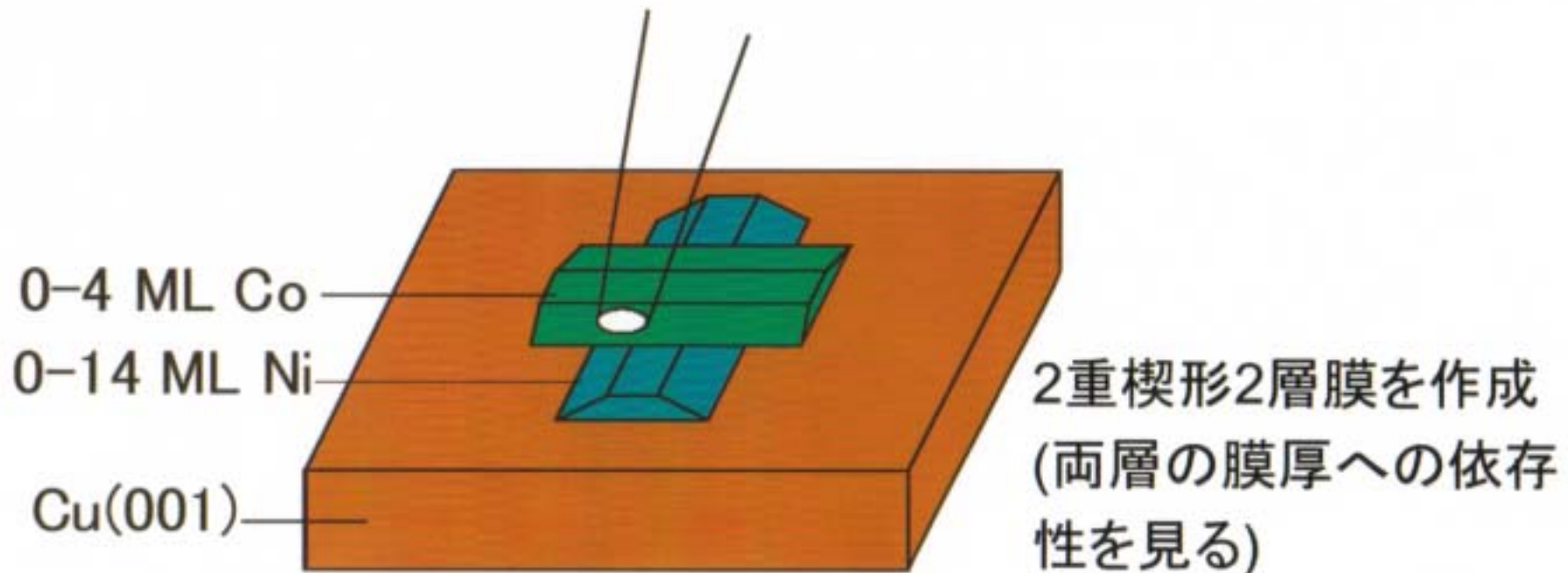
1. IIa→IIbで「反強磁性→強磁性」と変化している。
2. IIa, IIb ではFe膜のバルクは非強磁性的

以上より IIa→IIb の変化は非強磁性膜を通じた交換結合振動と予想される。



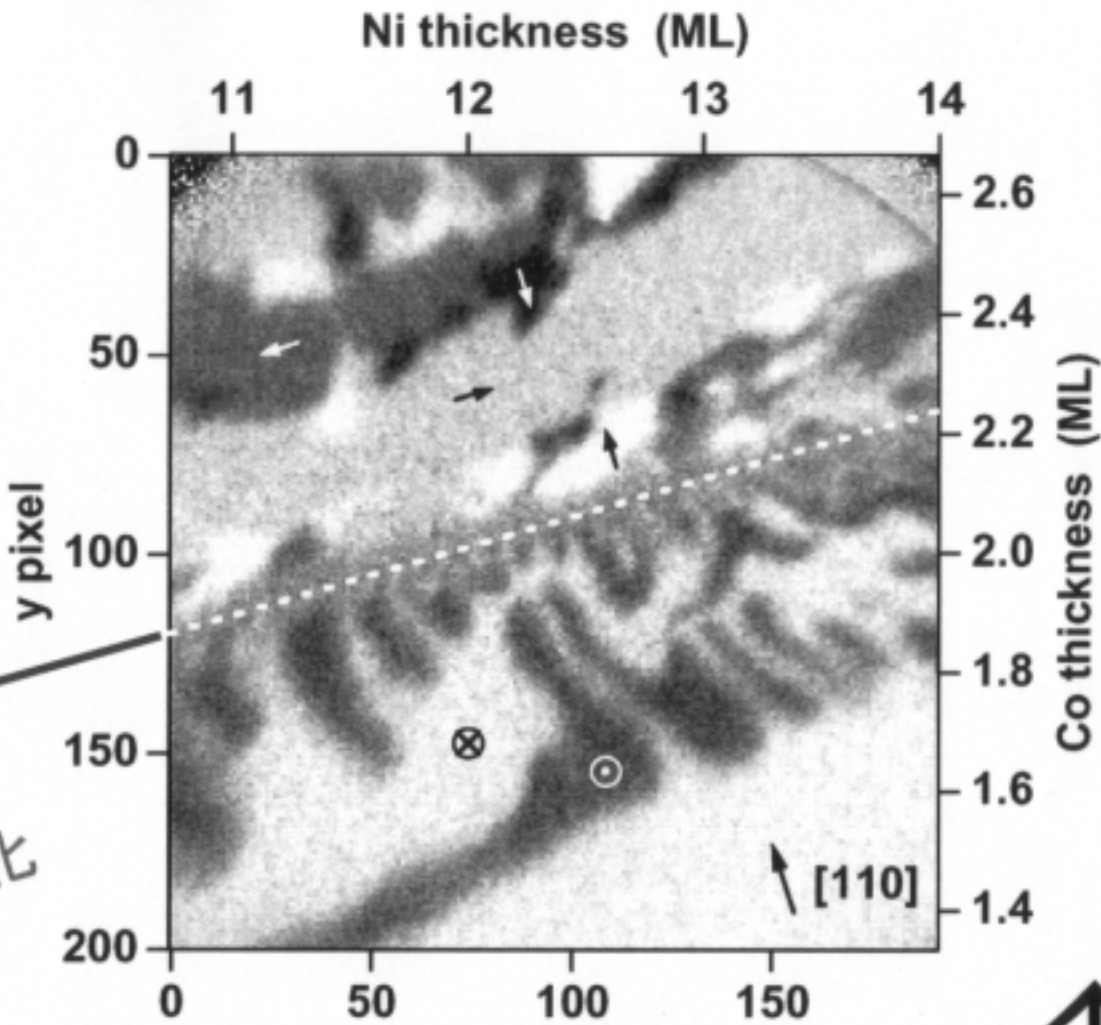
# Co/Ni 単結晶2層膜の磁化容易方向転移 (Phys. Rev. B 62 (2000) 3824.)

- 容易磁化方向 (面内 vs. 垂直) は応用上も重要
- 2層膜では両層が競合  
→ 磁化容易方向転移がおこる

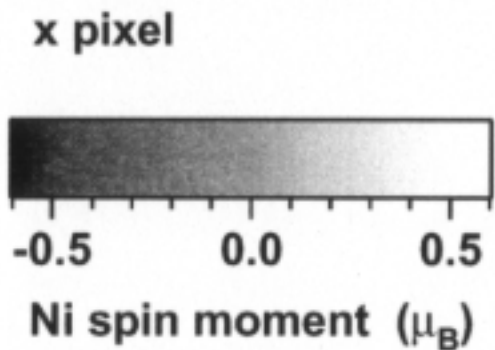


# Ni 3d スピン 磁気モーメント の分布

面内磁化  
↑  
↓  
垂直磁化

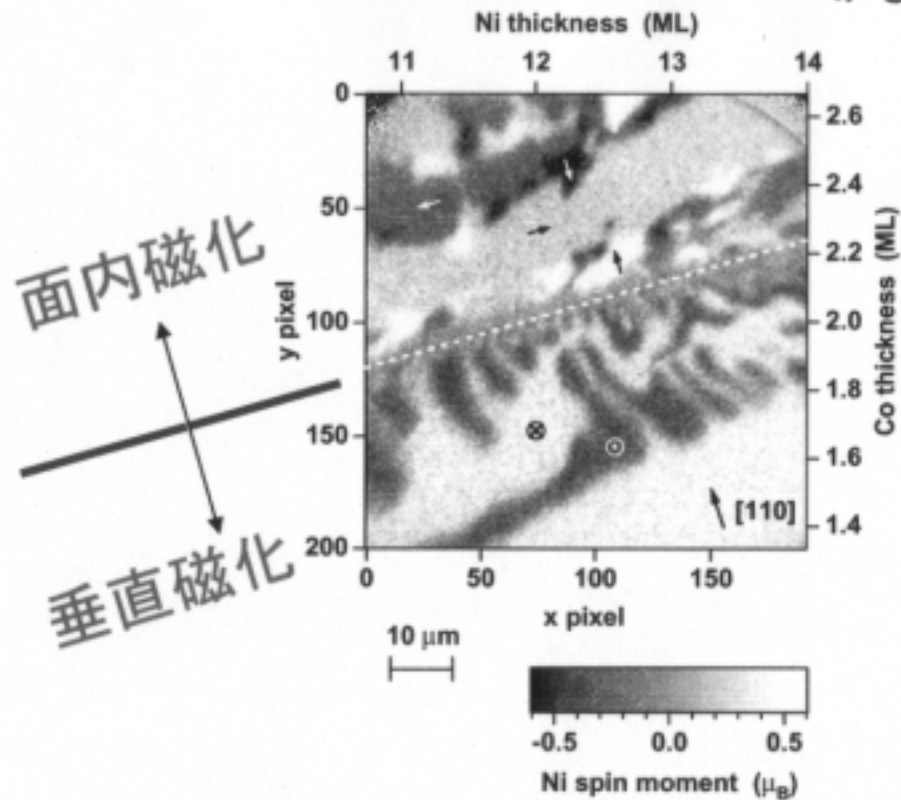


10 μm

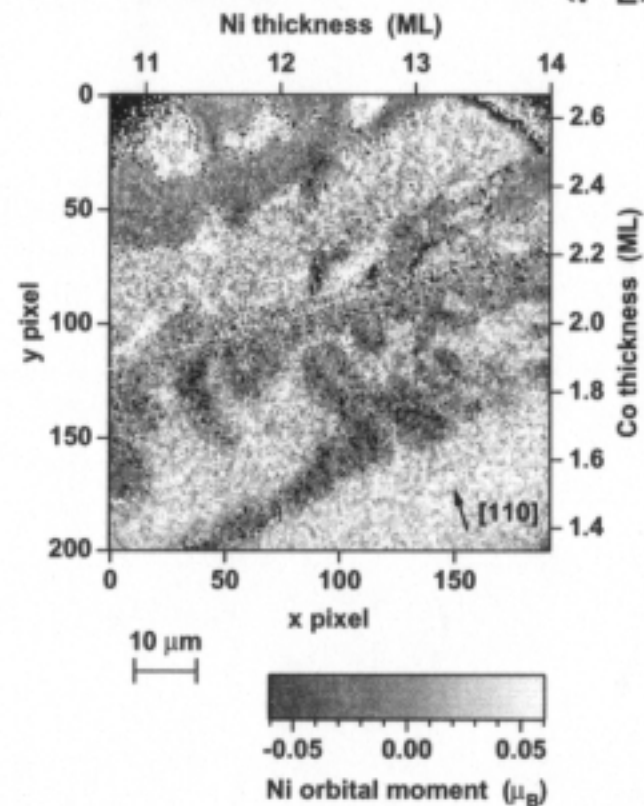


↑  
円偏光の  
入射方向

## スピン磁気モーメント( $\mu_S$ )



## 軌道磁気モーメント( $\mu_L$ )



Ni 3d スピン・軌道各磁気モーメントの大きさ:

スピン磁気モーメント:  $0.65 \mu_B$ , (面内、垂直磁化とも)

軌道磁気モーメント:  $0.034 \mu_B$ (面内),  $0.052 \mu_B$ (垂直)

磁気異方性エネルギー ([面内]-[垂直]) へのスピン軌道相互作用の寄与 =  $50\sim 90 \text{ meV/Ni原子}$

# 今後、PEEMは何に威力を発揮するか

真空紫外領域の光吸収の顕微分光 (含:円・直線二色性)

→磁性体、半導体、有機物などのナノ構造の研究

SPELEEM を用いたナノ領域光電子分光(顕微UPS,XPS)

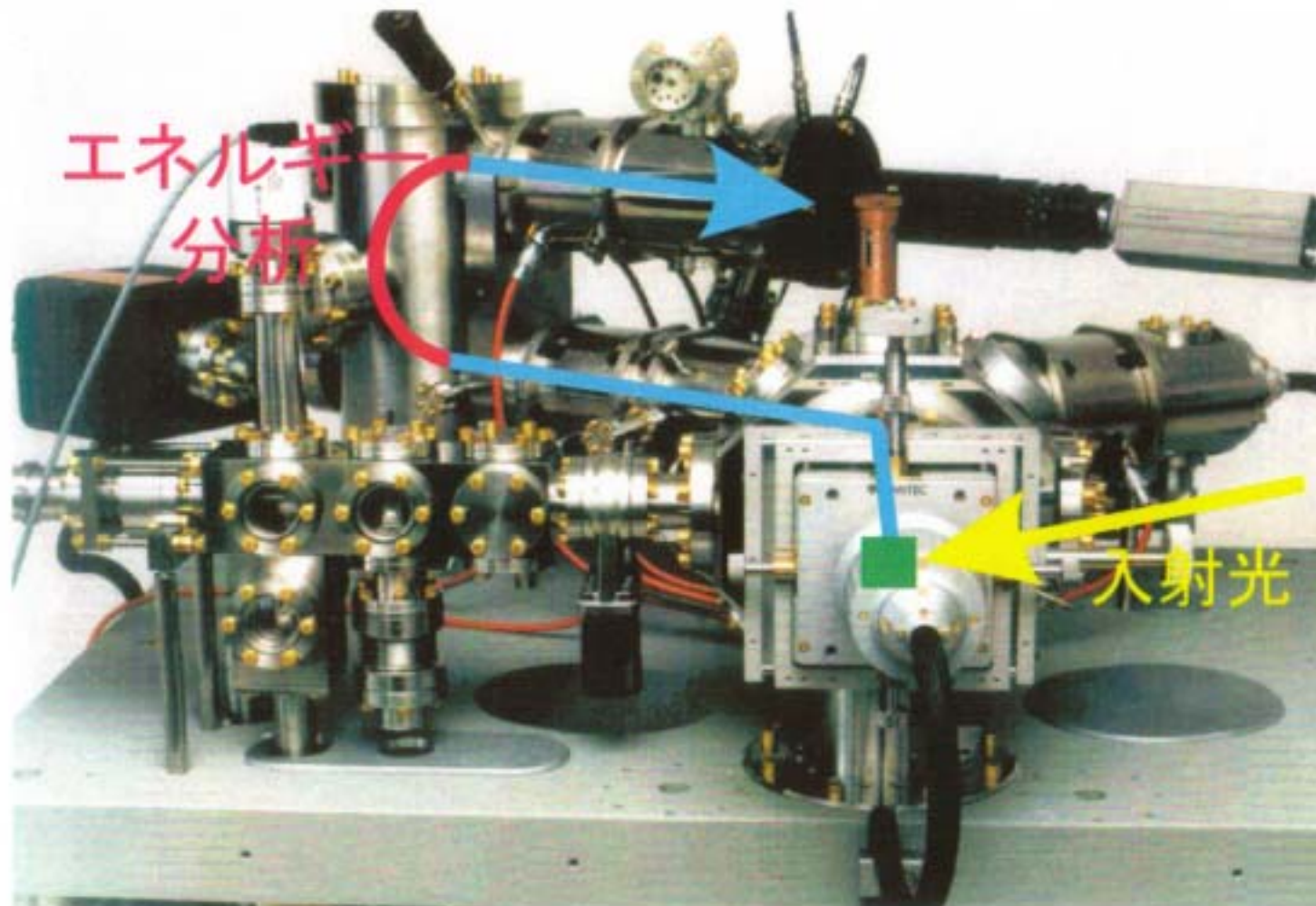
[放射光の光量, スポットサイズ, 励起断面積の問題]

[真空紫外レーザーの利用?]

低速電子線など光以外の励起源を用いた研究

SPELEEM (Spectroscopic photoemission and low-energy electron microscopy)

特長:光電子をエネルギー分析できる





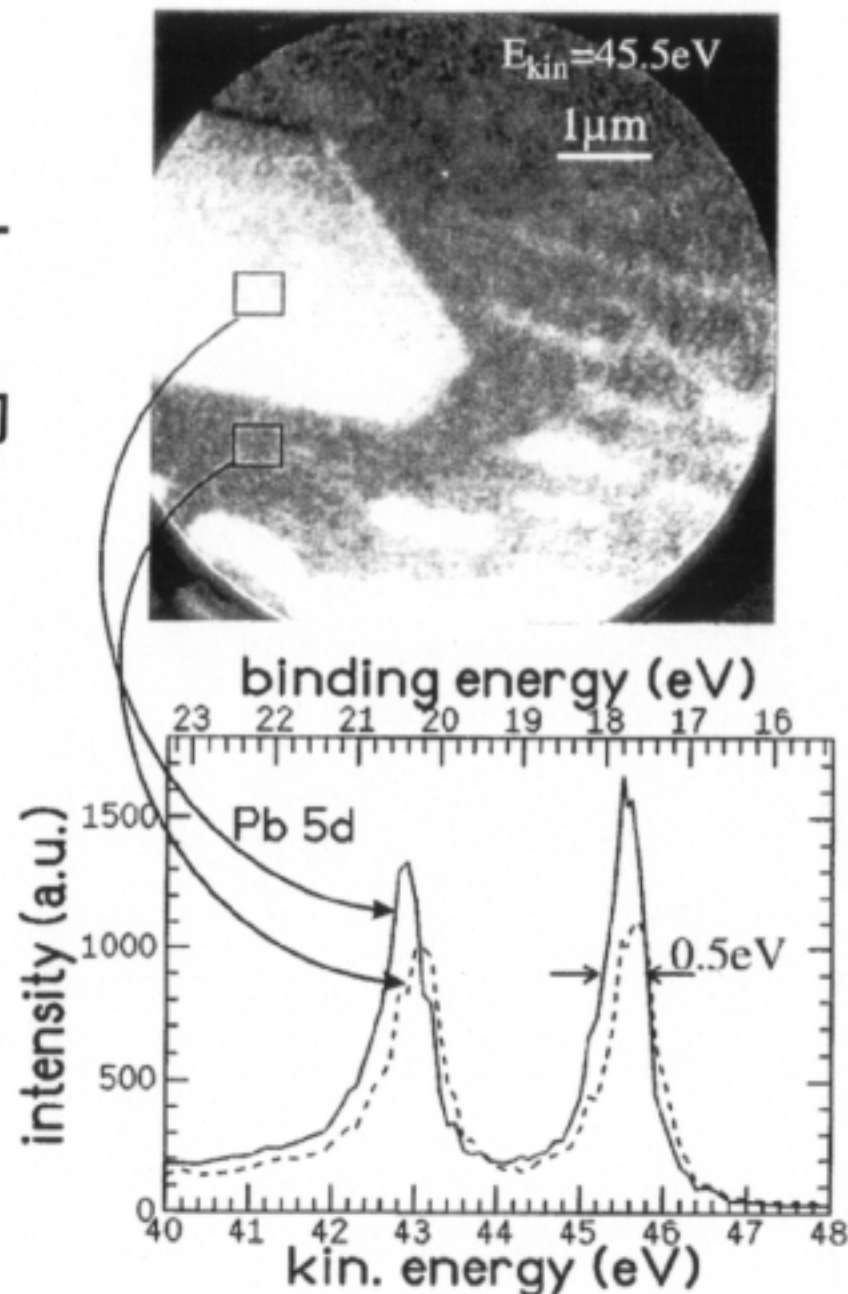
## 顕微PES・UPS

特定の運動エネルギーの光電子の強度分布を測定することを、運動エネルギーを変えながら繰り返す。

→視野中の任意の領域の光電子スペクトルが得られる。

エネルギー分解能：  
~ 0.3 eV

Bauer, J. Phys.: Condens. Matter, 13 (2001) 11391.



顕微XPS・UPSは

あらゆるナノ構造の電子状態を測定でき、  
ナノ構造の特性評価とその発現機構の解明  
につながる。

想定されるナノ構造：

半導体・磁性体・有機分子でできたデバイス

合金やセラミクスでできたナノマシン

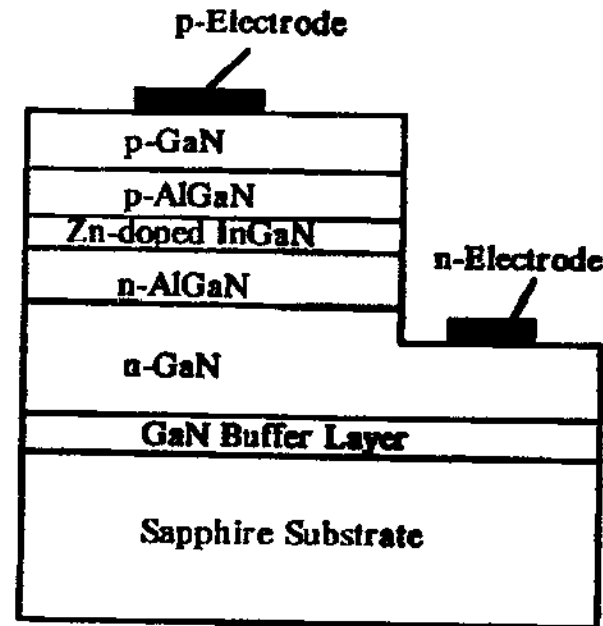
etc.

# Candela-class high-brightness InGaN/AlGaN double-heterostructure blue-light-emitting diodes

Shuji Nakamura, Takashi Mukai, and Masayuki Senoh

Department of Research and Development, Nichia Chemical Industries, Ltd., 491 Oka, Kaminaka, Anan, Tokushima 774, Japan

(Received 2 December 1993; accepted for publication 5 January 1994)



LEDの性能向上には  
電極における抵抗の  
低減が不可欠  
→metal contact 必要

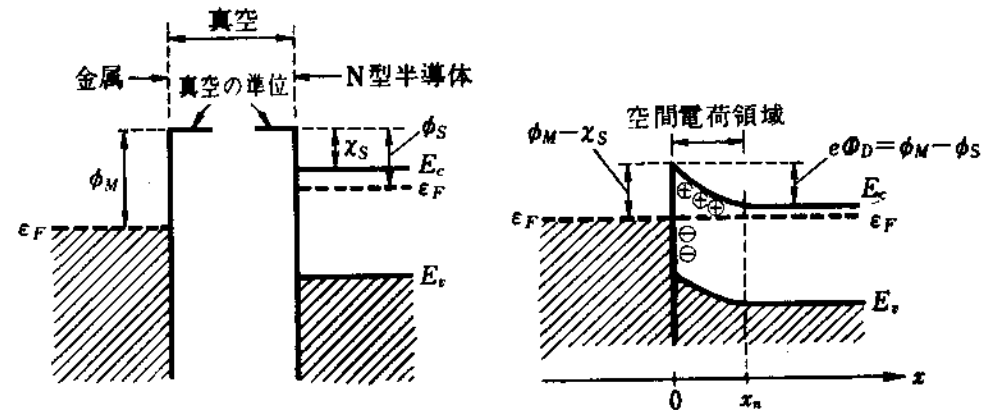
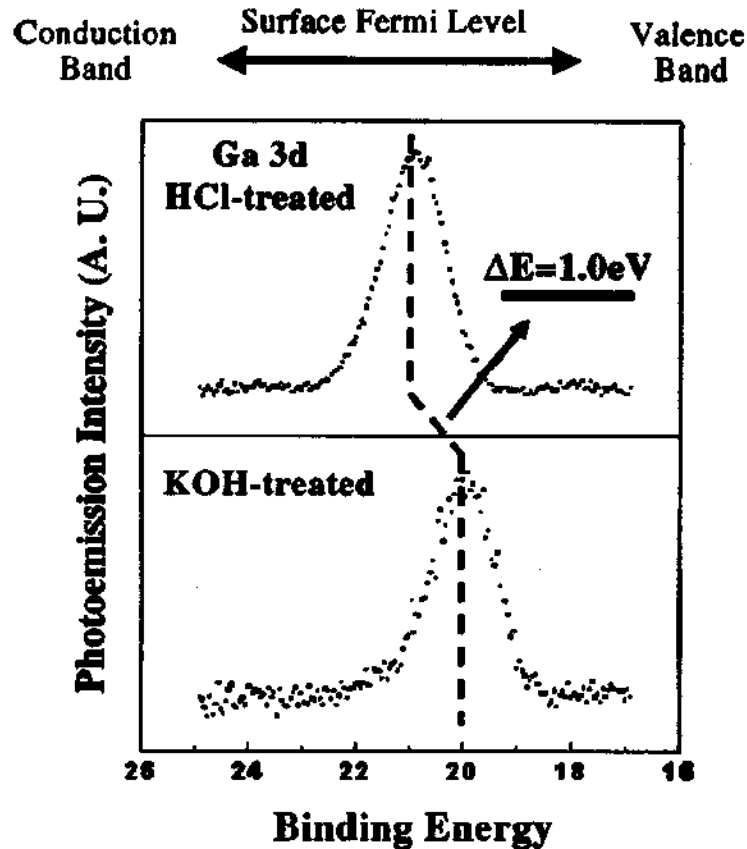
## 青色LEDの構造

FIG. 1. The structure of the InGaN/AlGaN double-heterostructure blue LED.

Shuji Nakamura et al., Appl. Phys. Lett. 64 (1994) 1687.

# p-GaN surface treatments for metal contacts

Jingxi Sun, K. A. Rickert, J. M. Redwing, A. B. Ellis, F. J. Himpsel, and T. F. Kuech, Appl. Phys. Lett., 76 (2000) 415-417.



(a) 金属とN型半導体の接触する前 (b) 金属とN型半導体の接触した後

図 5.15 金属とN型半導体とのショットキー接合のエネルギーバンド図

		As-received	HCl-treated	KOH-treated
n-GaN	Ga/N ratio	1.0	$3.0 \pm 0.1^{12}$	$0.52 \pm 0.26$
p-GaN	Ga/N ratio	1.0	$2.7 \pm 0.1^5$	$0.4 \pm 0.1^5$

- GaNでは、表面バンドベンディングはHCl処理とKOH処理で逆符号
- 符号より、ohmic接合にはn型はHCl処理が、p型はKOH処理がよい
- 選択エッチングにより、Ga/N比が変化(HCl:増大, KOH:減少)。

## 結論

- 放射光と光電子顕微鏡(PEEM)の組み合わせによる種々の顕微分光法は、量子ナノ構造研究に多大な貢献をすると予想される。
- このためには、光吸収顕微分光だけでなく、SPELEEMを利用した顕微UPSや、その他の励起源を用いた新しい顕微分光の開発を推進するべきである。