

# 強磁性ナノ狭窄構造薄膜を用いた スピントロニクスデバイスの提案

今村裕志

産業技術総合研究所・ナノシステム研究部門

佐橋政司、土井正晶、三宅耕作

東北大学大学院工学研究科

# 講演内容

強磁性ナノ狭窄構造薄膜(ナノサイズの磁壁)を用いた  
2種類のスピントロニクスデバイスについて紹介します。

## 高密度磁気記録(ハードディスク)用再生ヘッド

東芝、東北大学、産総研

NEDO ナノテクチャレンジ(H19 – H 21)

## ナノメートルサイズのマイクロ波発振素子

東北大学、産総研

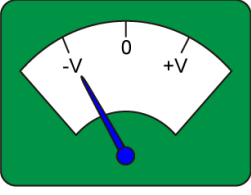
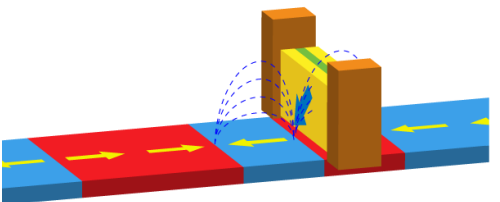
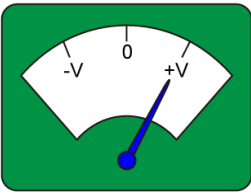
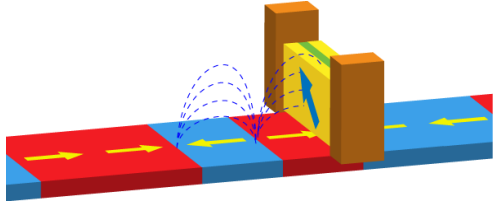
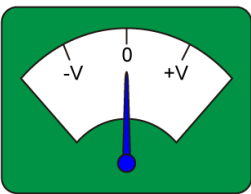
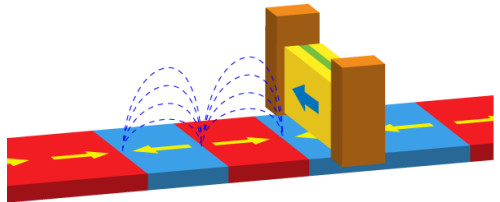
NEDO 省エネルギー革新技術(H21 – H 23)

応用例:

積層LSIチップ間の無線通信、ナノマシンの制御、  
ナノセンサー

# ハードディスク再生ヘッド

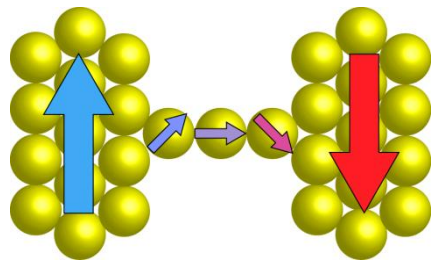
## 磁気記録再生の原理



## 再生ヘッドの種類

名称	構造	磁気抵抗の起源
CIP-GMR		界面散乱
CPP-GMR		スピン蓄積
TMR		トンネル効果
DWMR		磁壁散乱 スピン蓄積

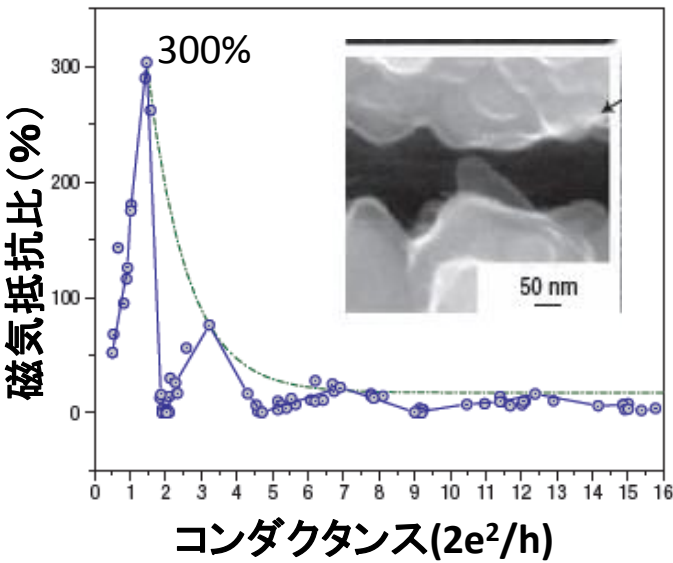
# 強磁性原子細線を用いた磁気抵抗素子



1999年以降、強磁性原子細線を用いた磁気抵抗素子の研究が盛んに行われている。

## 長所

- サイズが小さくなれば磁気抵抗は増大する。原子細線では300%もの大きなMRを示す。
- 金属のみで構成されるので、面積抵抗は小さい。



Chopra et al., NatureMaterials(2005)

## 短所

構造的に不安定である。  
(室温で2、3分間しか安定ではない。)

# 強磁性ナノ狭窄構造薄膜

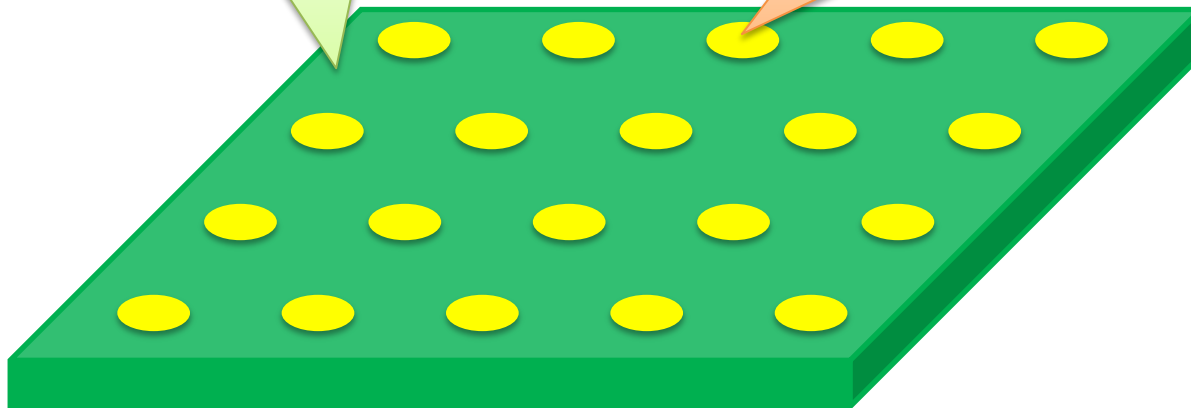
強磁性原子細線は大きな磁気抵抗効果を持つことが分かったが、デバイスとして使うには構造の安定性に問題がある。



東芝と東北大によって、金属ナノワイヤーを絶縁体中に作成する技術が開発された。

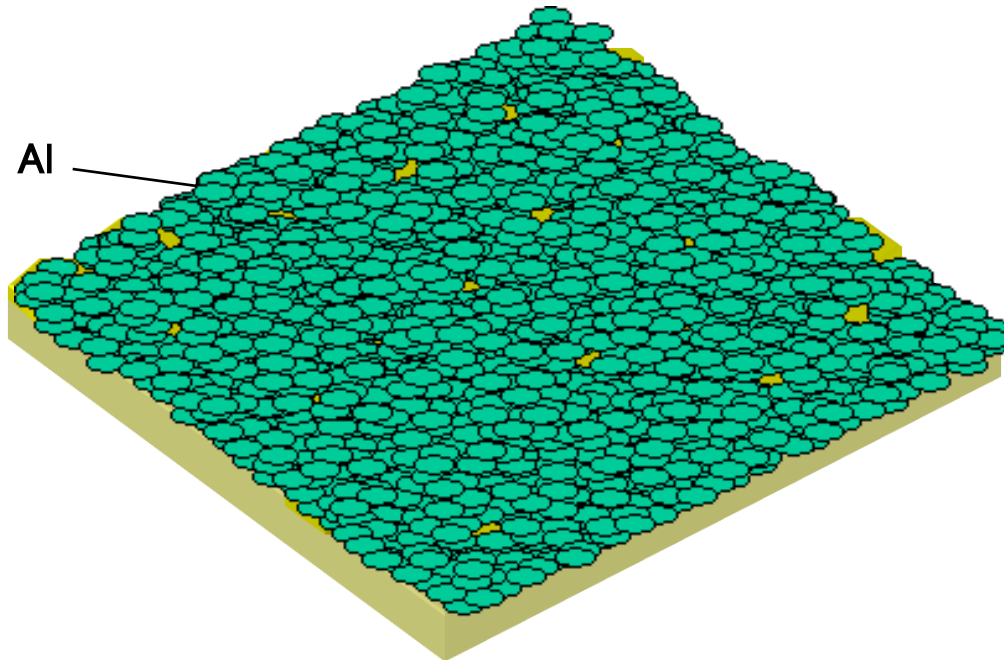
酸化物絶縁体(AIO)

金属伝導パス(CoFe)



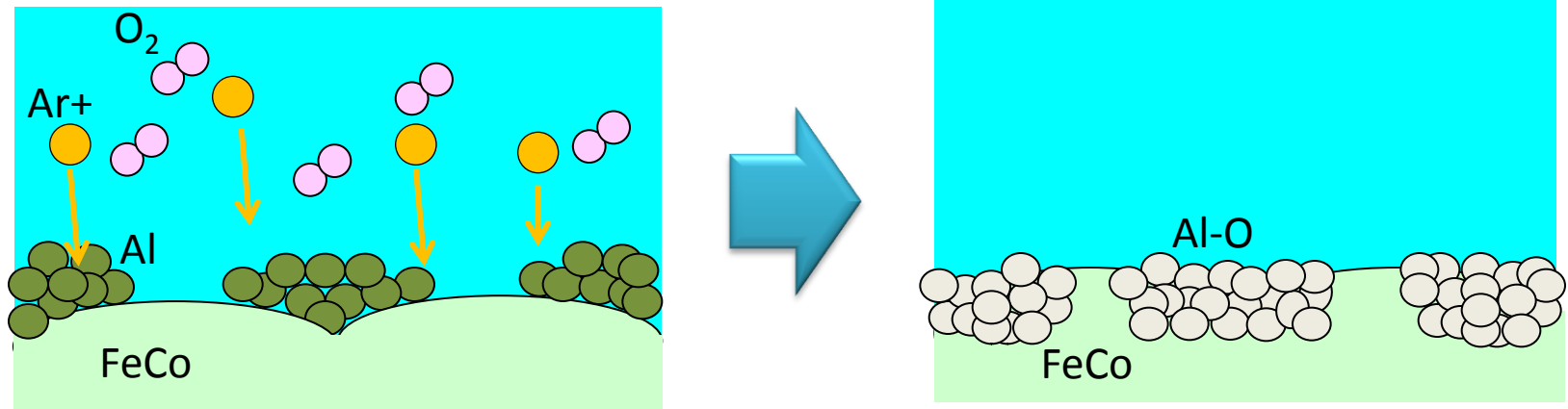
# 強磁性ナノ狭窄構造薄膜の作製方法

**Alはテラス端へ移動**  
(表面エネルギーの減少)



# イオンアシスト酸化

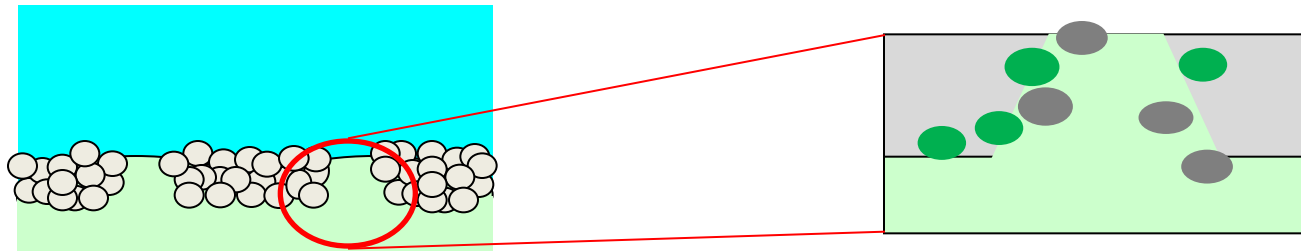
Ar<sup>+</sup> イオンを照射しながら酸化を行う。



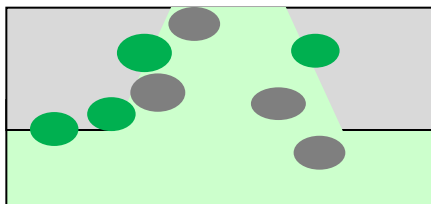
Alの優先酸化により、FeCo結晶粒の中央に  
ナノメートルサイズの導電チャンネルが形成される。

# ポスト熱処理

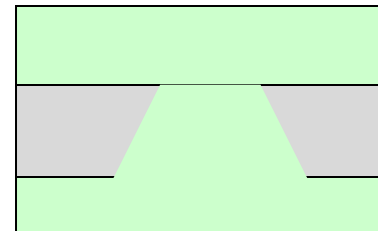
ポスト熱処理を行うことにより、導電チャネル中の酸化物クラスタや絶縁体中の金属クラスタを取り除き、きれいな導電チャネルを作成。



自由表面状態(In-Situ)でポスト熱処理

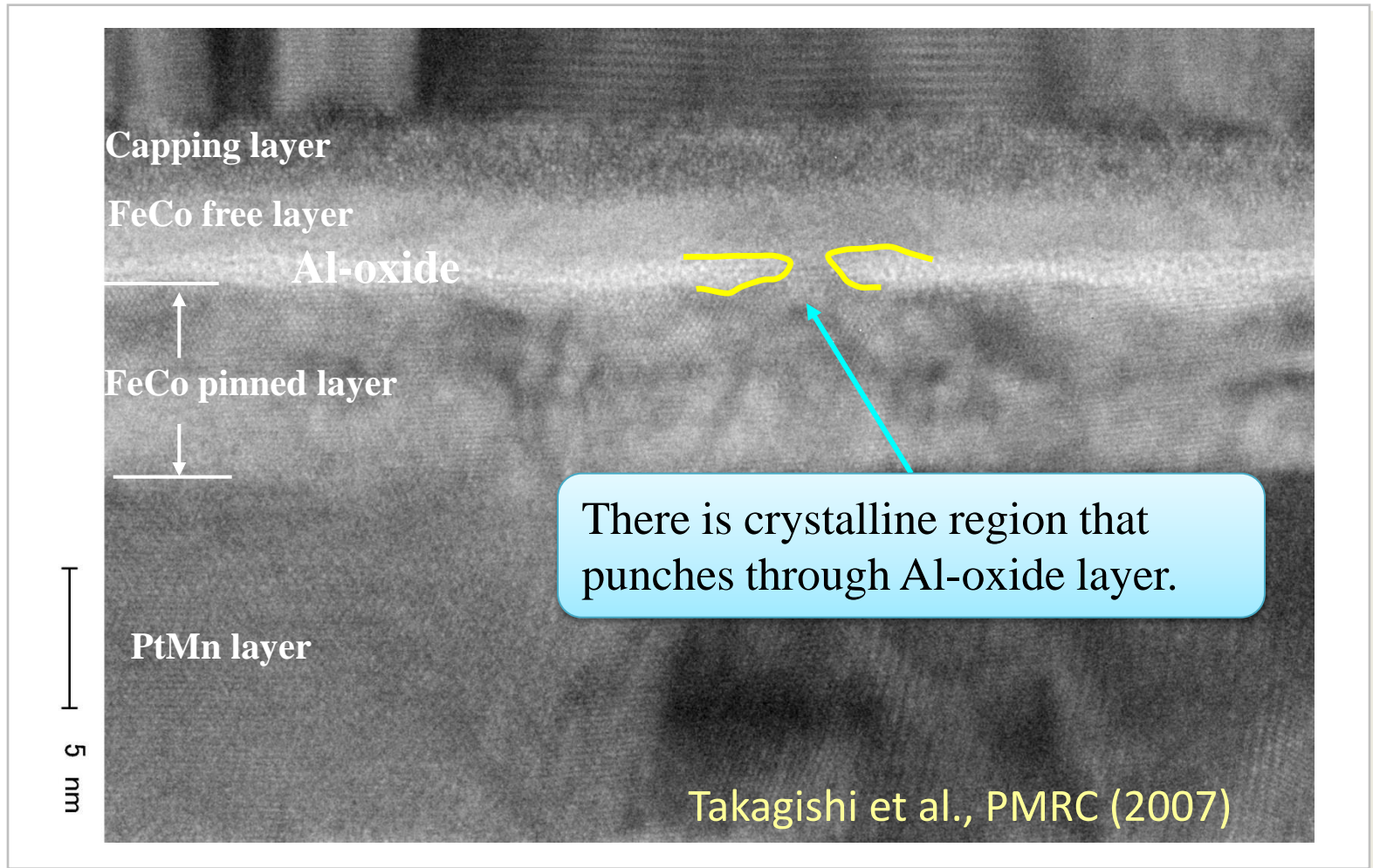


上部強磁性電極成膜





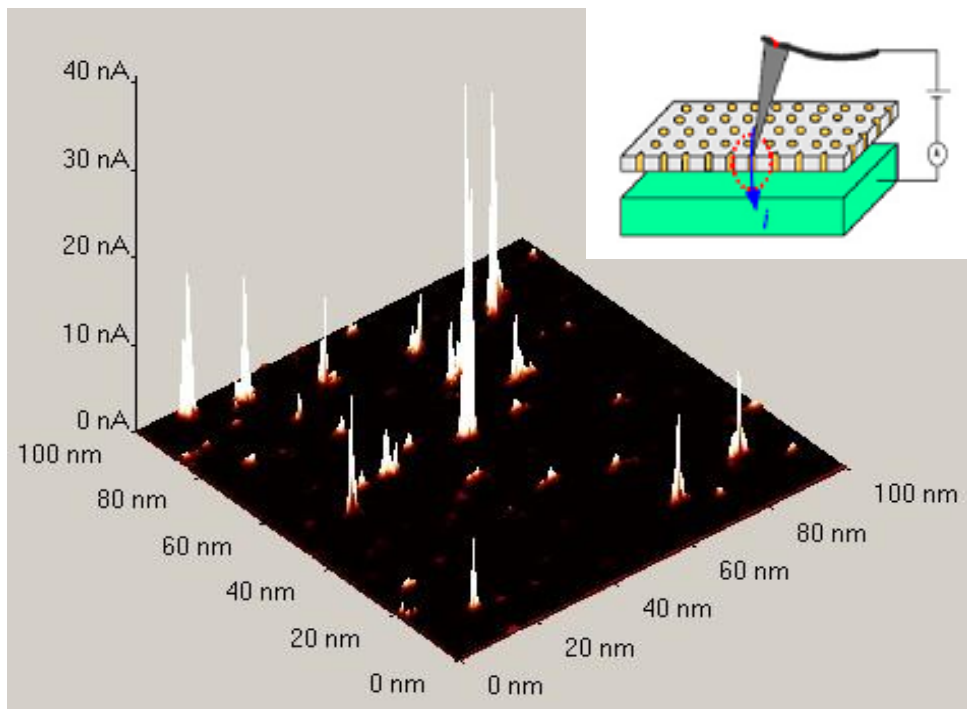
# TEM Image



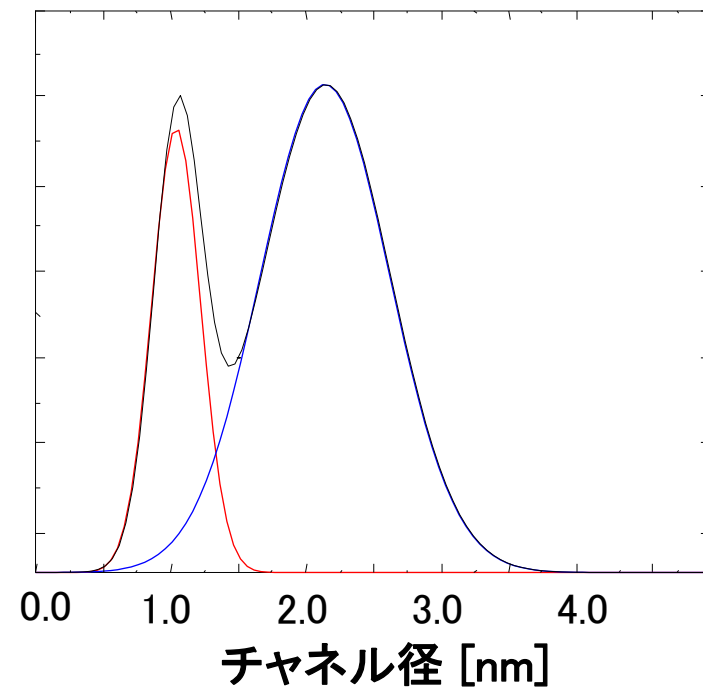
電流狭窄領域の幅は約 2 nm.

# チャンネル径の分散

## Conductive-AFM 3D電流像

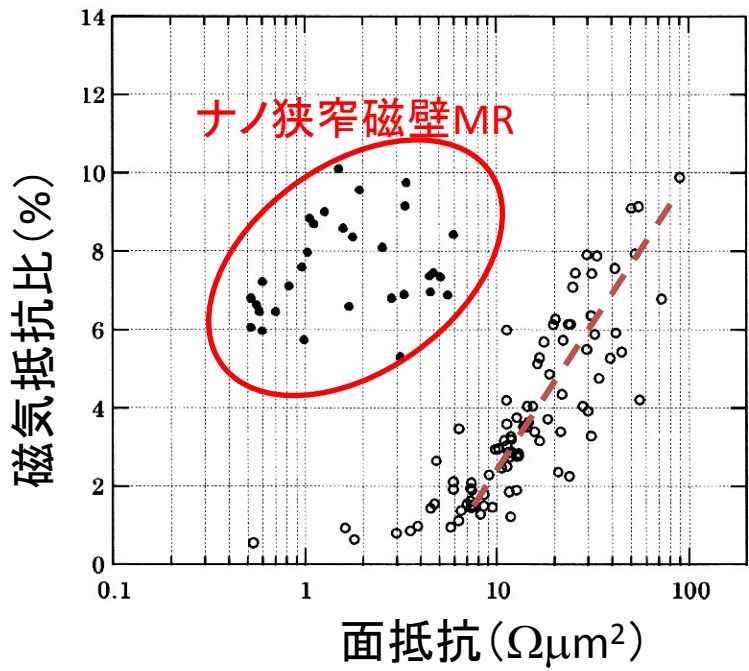
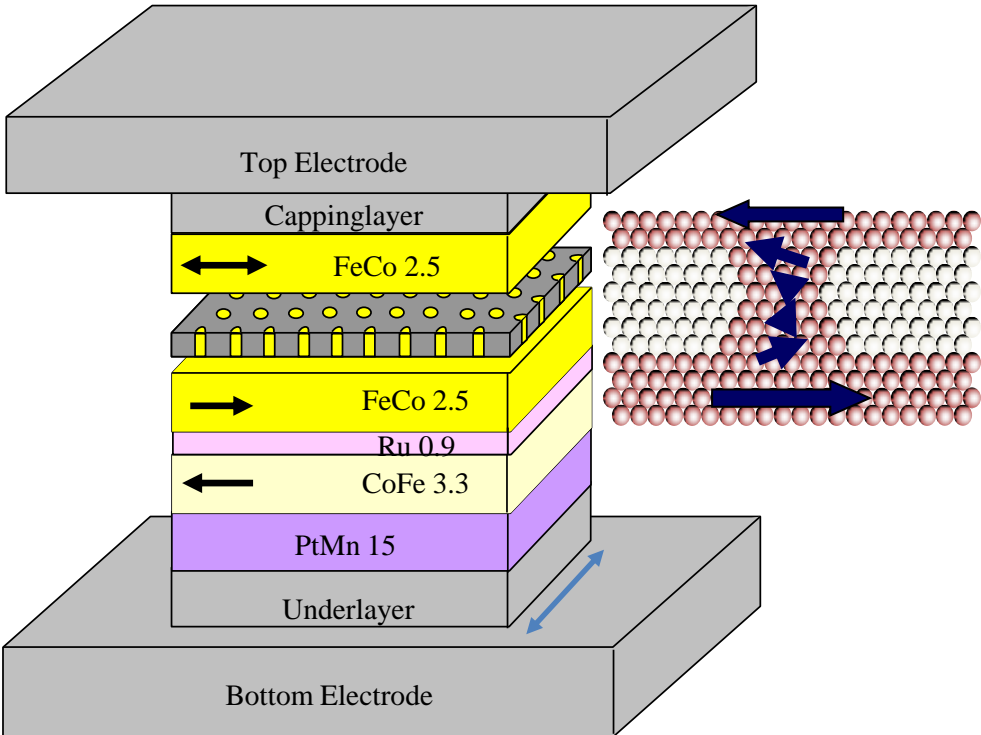


## チャンネル径の分散



1~3nm径の導電チャンネルが分布。

# 実際の素子構造と磁気抵抗比

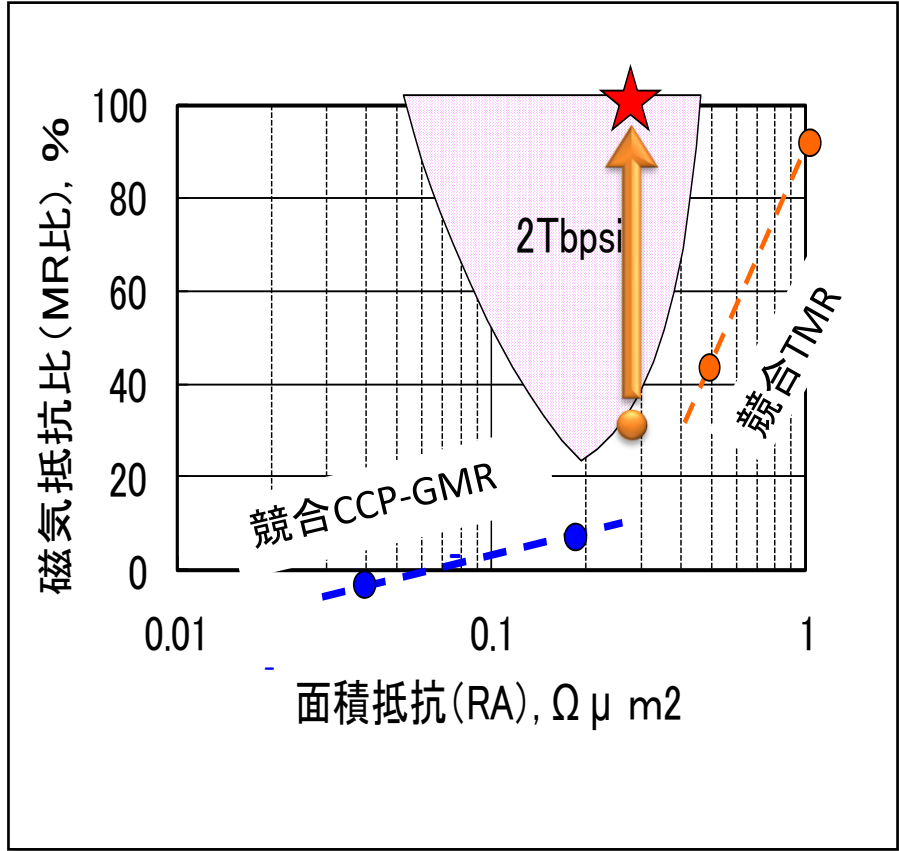
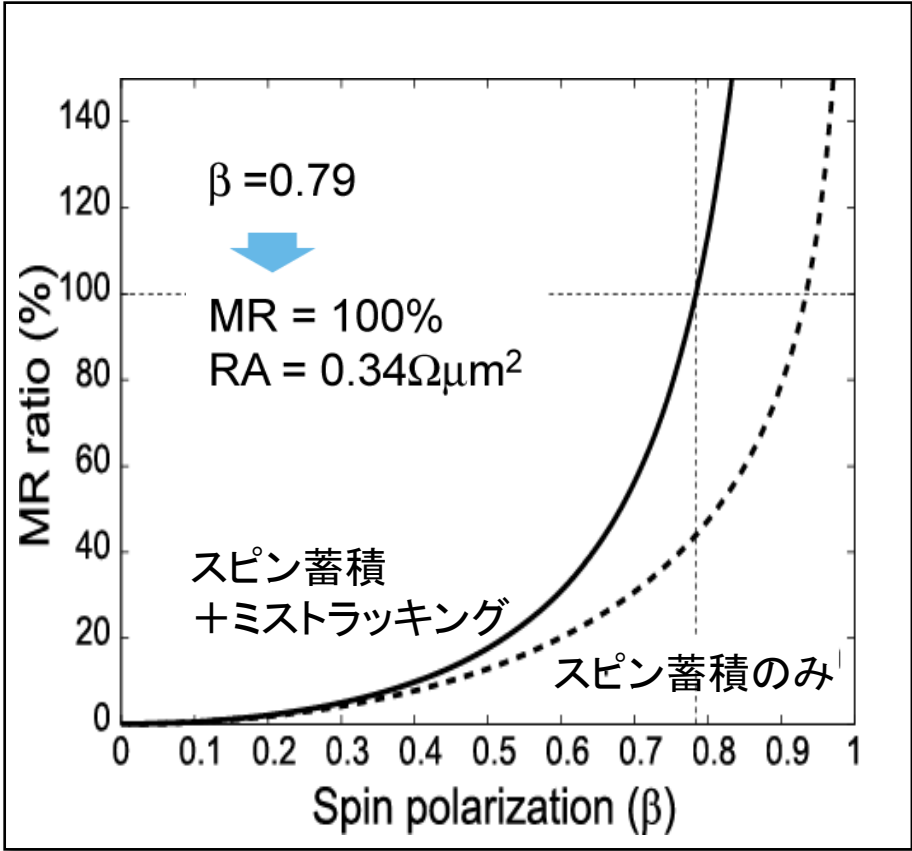


Fuke et al., IEEE Trans. Magn. (2007)

- 2007年 室温で10%の磁気抵抗比を観測
- 2010年 室温で30%の磁気抵抗比を観測。

# 磁気抵抗のシミュレーション結果 (スピン分極率依存性)

厚さ幅ともに2nmの理想的な磁壁を閉じ込めた系でのシミュレーション



- $\beta=0.65$  (CoFe) ならば MR=40%。
- $\beta>0.79$  の材料でナノ狭窄構造が作製できれば MR>100%。

# ナノ磁壁を使ったマイクロ波発振器

ナノマシンやナノセンサーにマイクロ波を使った高速無線通信機能を持たせたい。



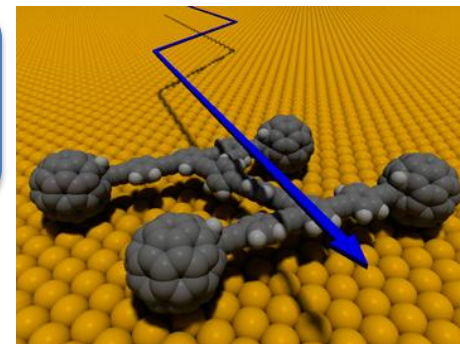
従来技術で作製したマイクロ波発振器はミリメートルサイズと大きい。



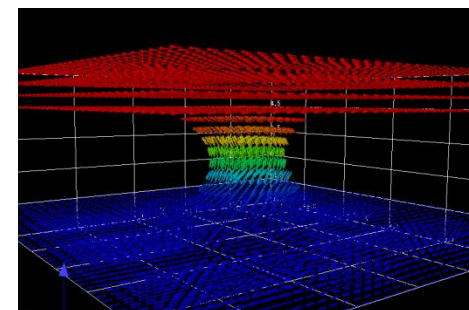
新しい動作原理を持つナノスケールのマイクロ波発振器の開発が必要。



ナノ狭窄磁壁の電流誘起スピンドYNAMICSを使えば、ナノスケールのマイクロ波発振器が実現可能。



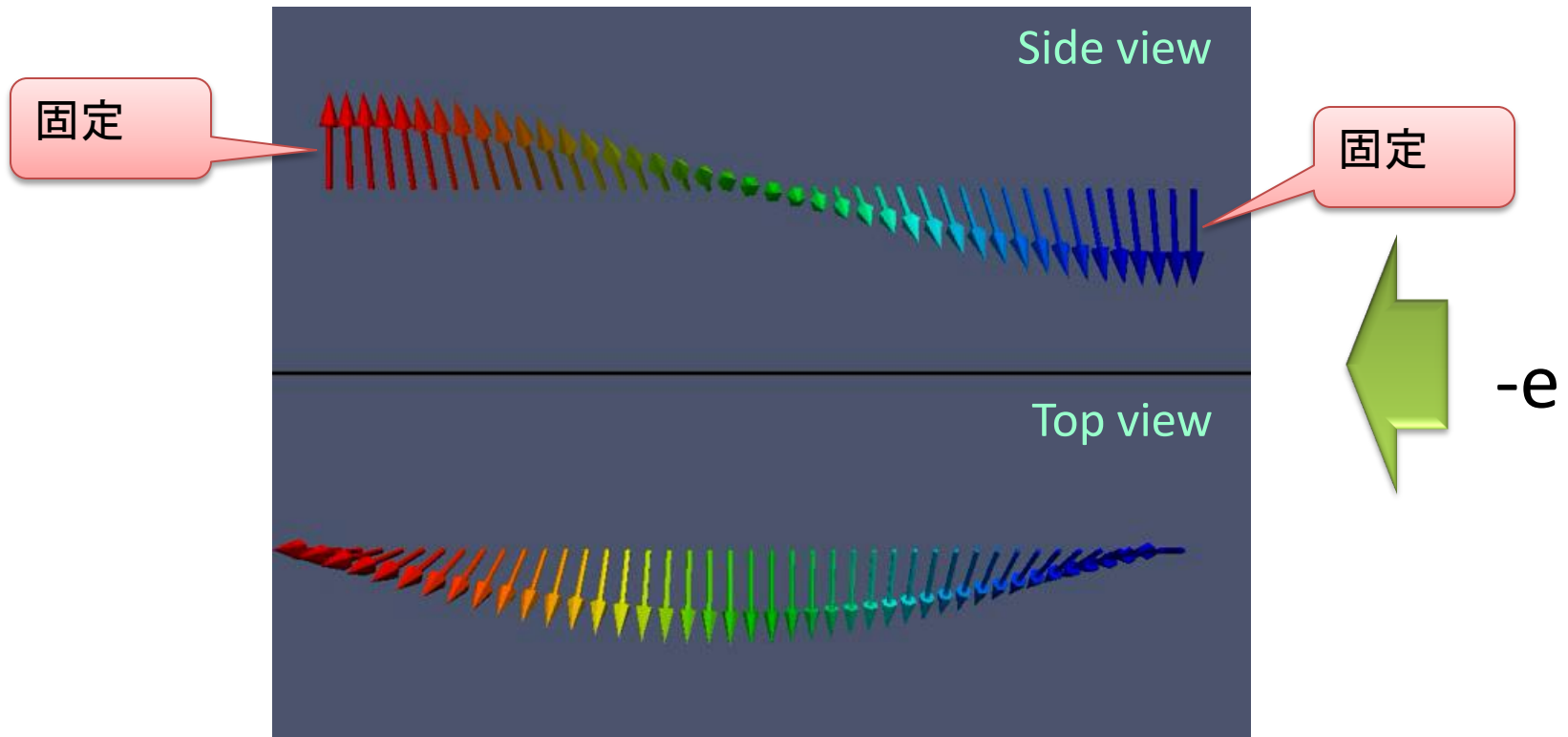
©Y.Shirai, Rice Univ.



©H.Imamura, AIST

# 磁壁の電流誘起スピンダイナミクス

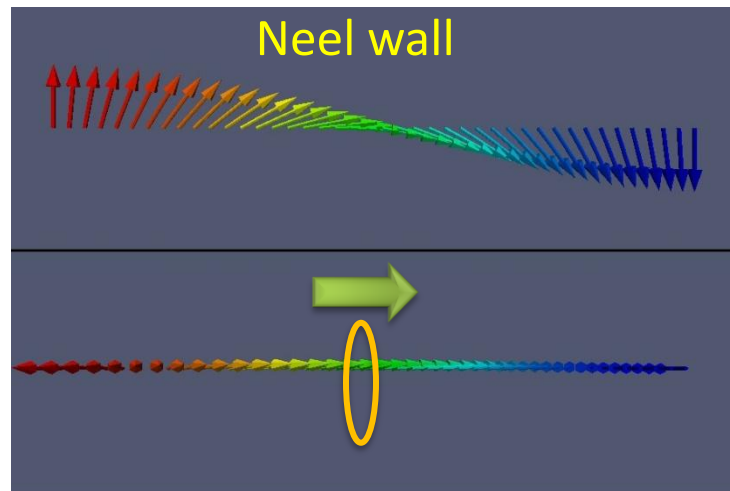
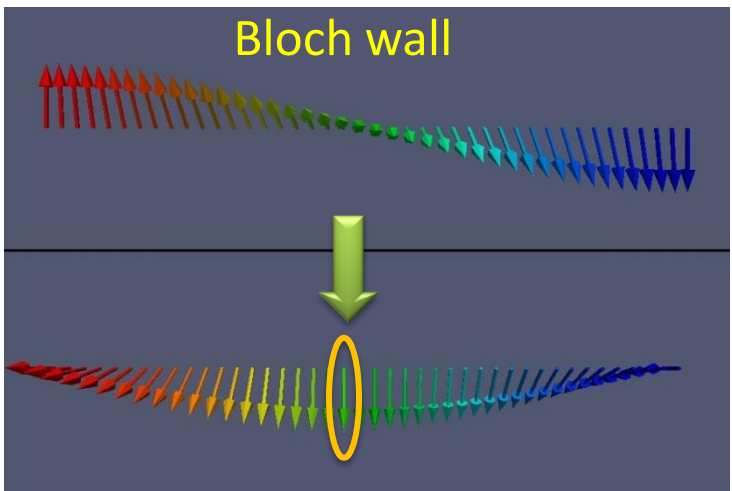
1次元-180° 磁壁に直流を流した場合のシミュレーション



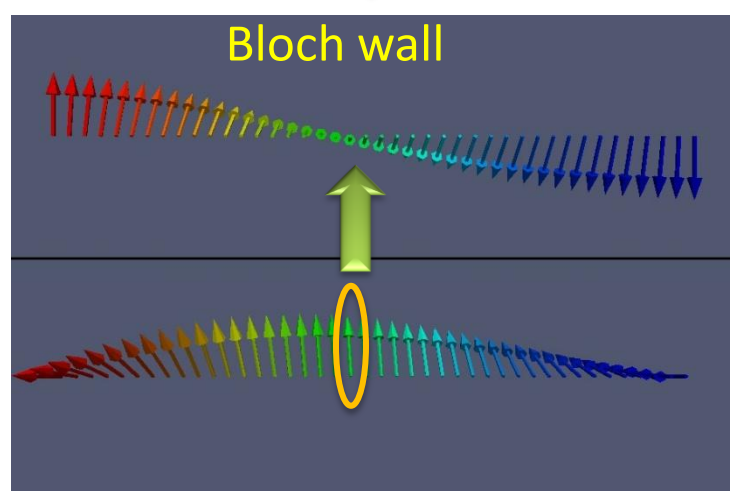
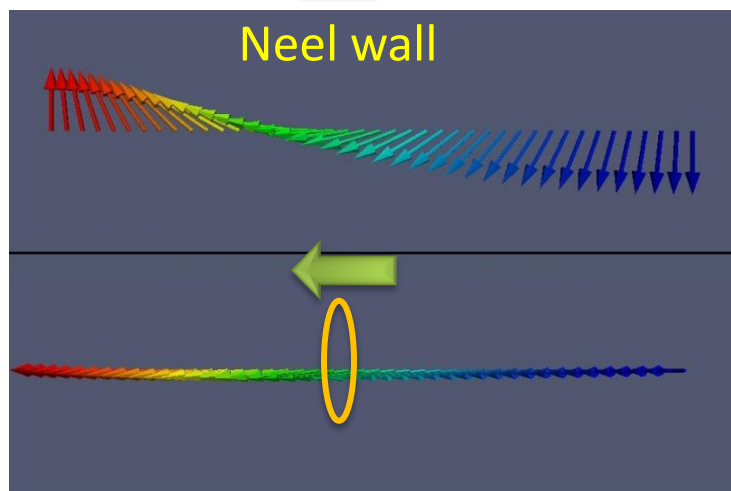
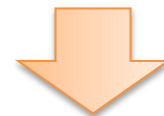
電流によってスピン角運動量が注入され、磁壁の圧縮と歳差運動が生じる。



# 歳差運動の詳細



歳差運動



# 磁壁型マイクロ波発振素子

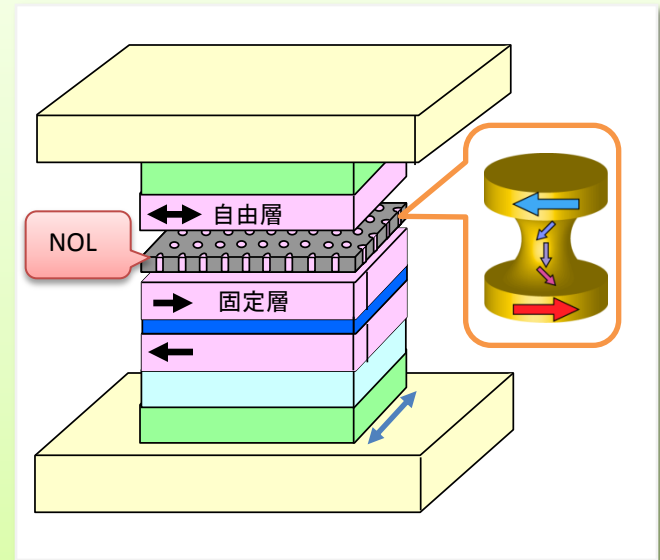
一次元磁壁の発振周波数は電流  $J$  に比例し、磁壁の厚さ  $L$  に反比例する。

$L=2\text{nm}$ ,  $J=10^8\text{A/cm}^2$  ならば  $f$  1 THz

$$f \simeq \left( \frac{2\mu_B P}{\pi e \alpha M_s} \right) \cdot \frac{J}{L}$$

M. Franchin, PRB (2008)

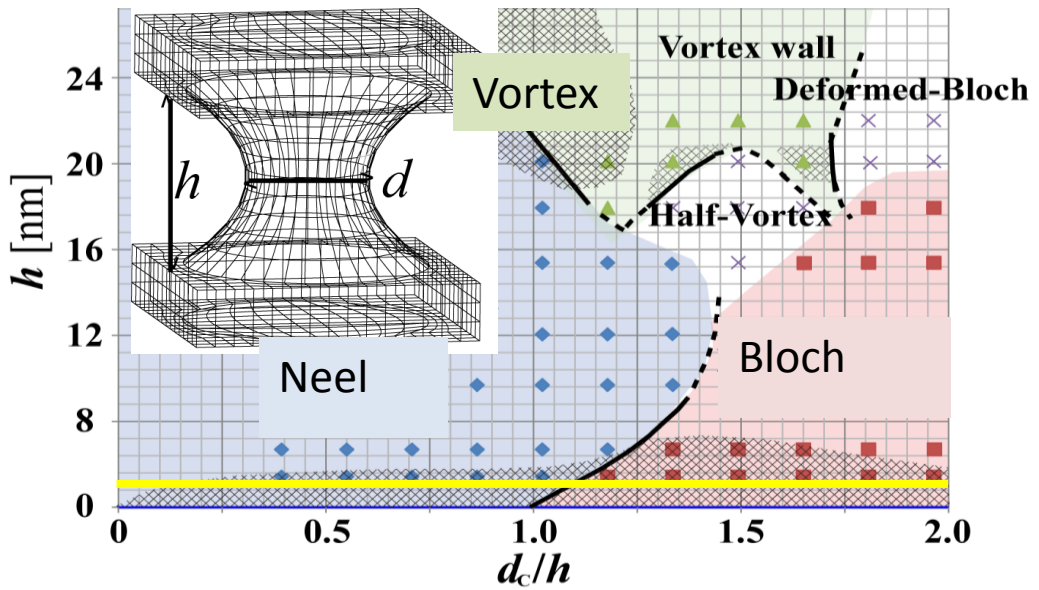
- 薄膜中のナノ狭窄磁壁に対して1次元モデルでの見積もりはどの程度正しいのか。
- 自由層と固定層の2種類の強磁性電極が存在する場合、発振の様子は電流方向に依存するのか。



シミュレーションにより発振挙動を明らかにする必要がある。



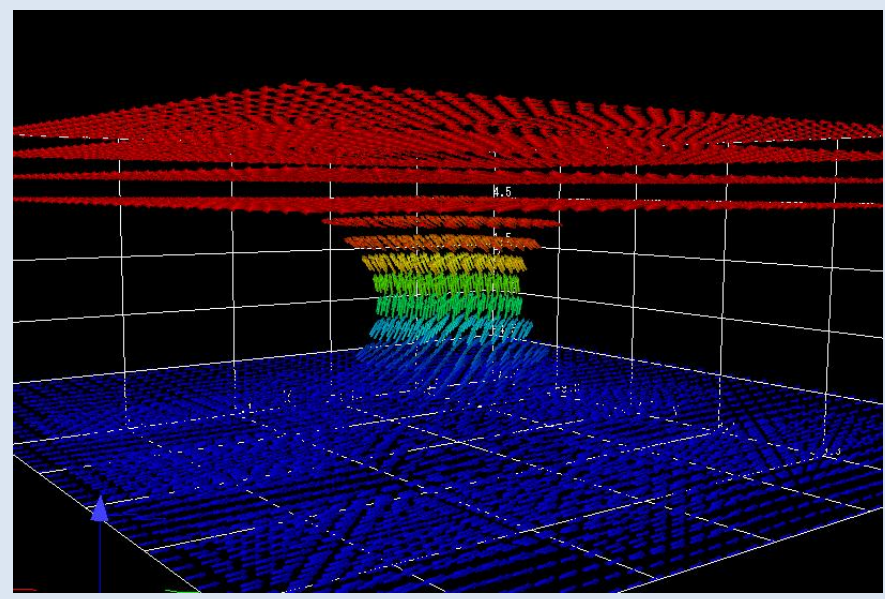
# 磁気構造のシミュレーション



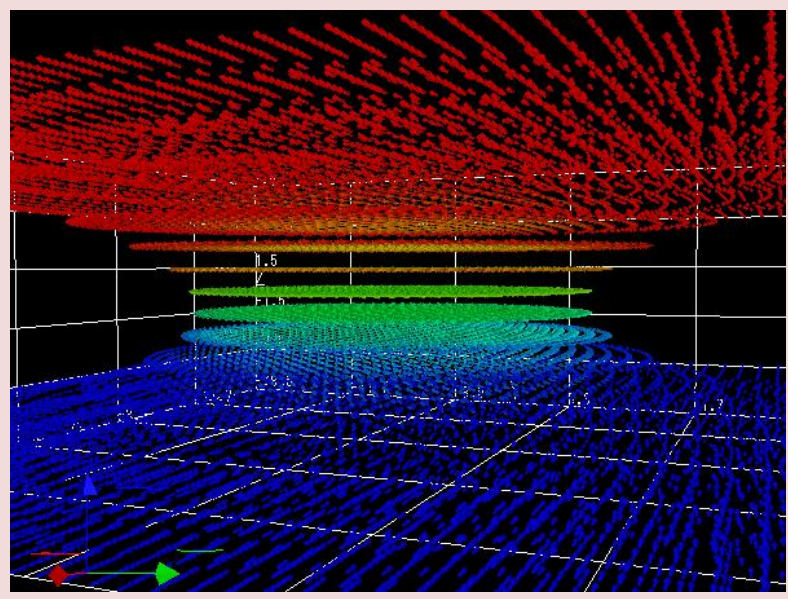
10nm 以下の膜厚であれば、Neel 磁壁とBloch 磁壁が安定。

影の付いた領域では、Neel磁壁とBloch磁壁の両方の構造がエネルギー極小となる。

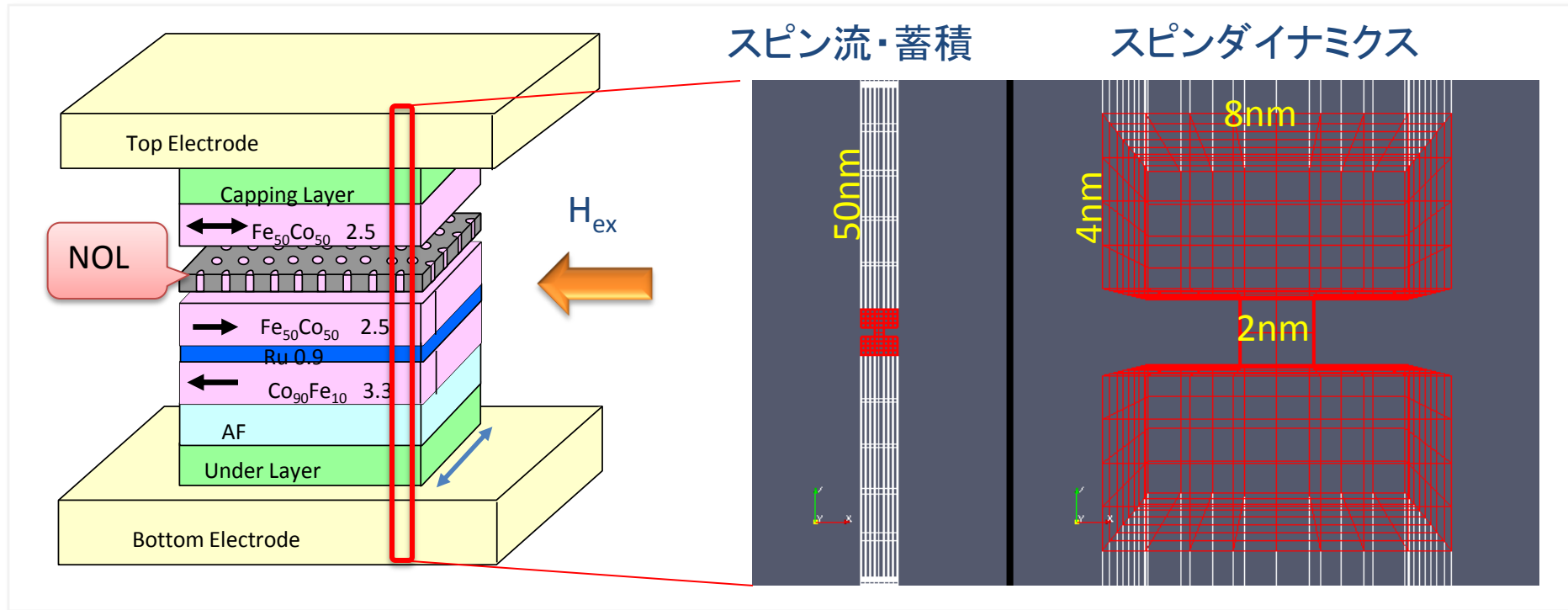
Neel磁壁.



Bloch 磁壁



# マイクロ波発振のシミュレーション



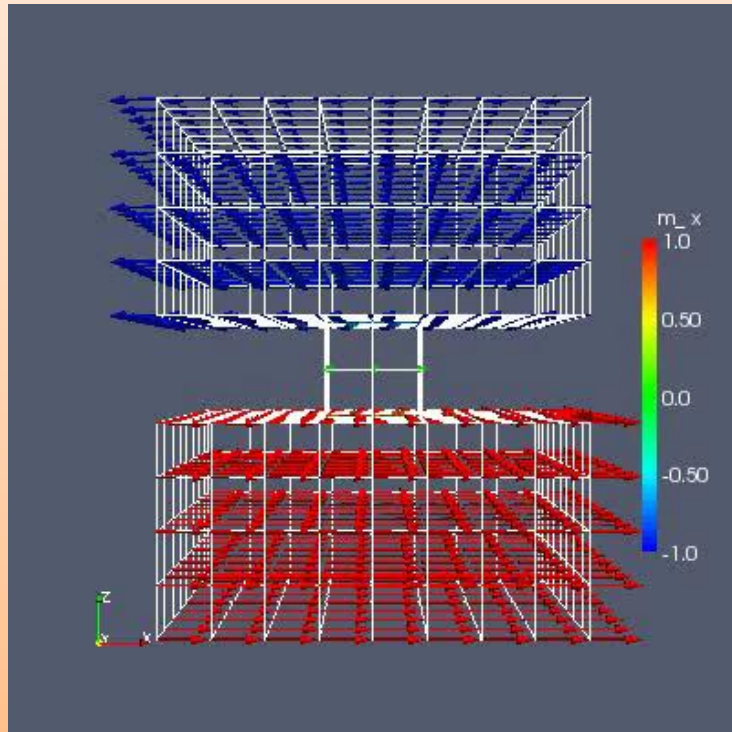
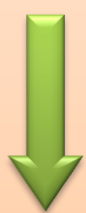
- スピン流・蓄積: 有限要素法を利用し拡散方程式を解く
- スピンドYNAMICS: FFTを利用しLLG方程式を解く
- スピントルクはスピン蓄積と磁化との交換相互作用により取り入れる

$$M_s = 8 \times 10^5 \text{ A/m}, \quad A = \text{Am}^2, \quad \alpha = 0.02, \quad P(\beta) = 0.65, \quad \lambda_s = 12 \text{ nm}, \quad H_{\text{ex}} = -10^4 \text{ Oe}$$

# 振動の電流方向依存性

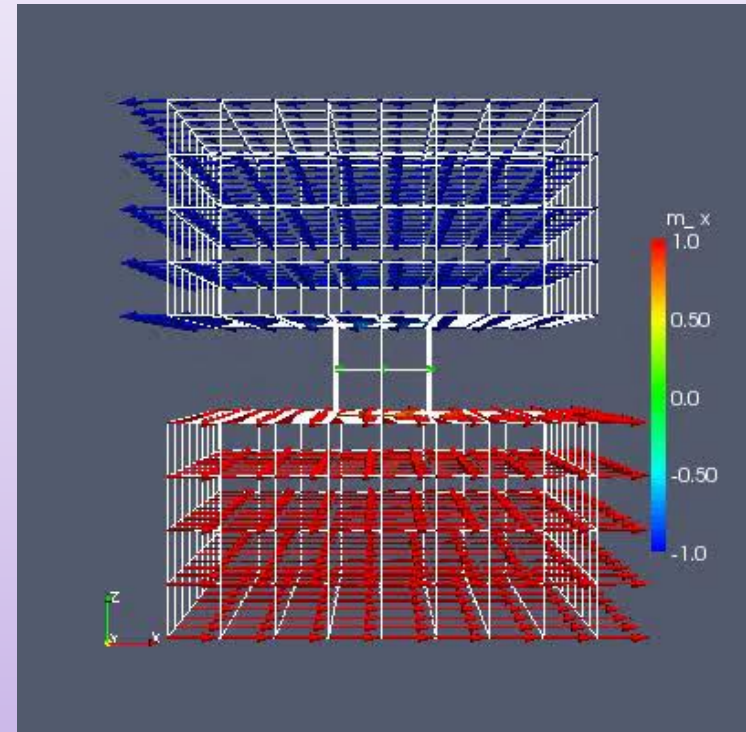
$$J = + 10^7 \text{ A/cm}^2$$

-e



$$J = - 10^7 \text{ A/cm}^2$$

-e

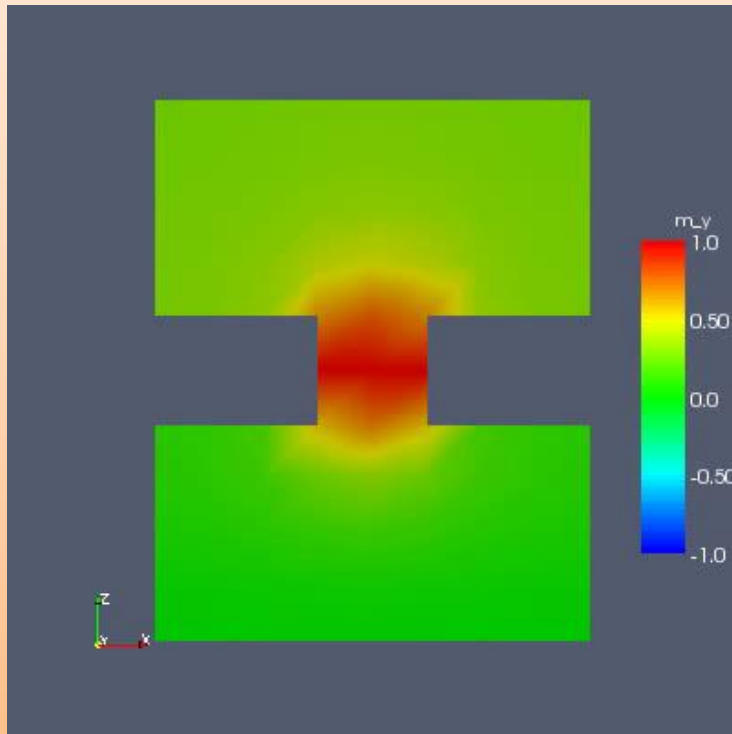
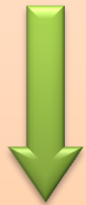


- どちらの電流方向でも振動の様子はNeel-Bloch振動である
- $J < 0$  では自由層の磁化も大きく振動する(振動は遅くなる)

# 振動領域の広がり

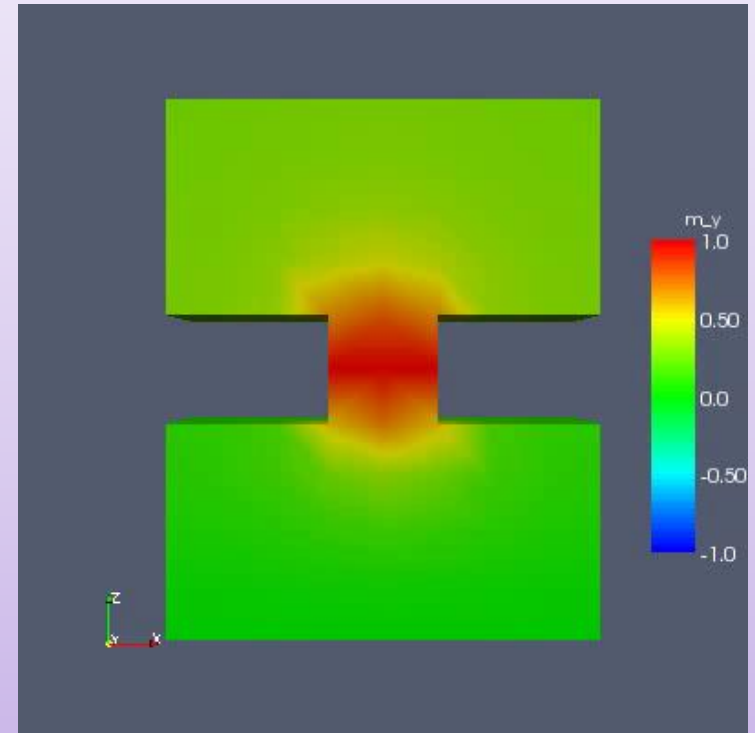
$$J = + 10^7 \text{ A/cm}^2$$

-e



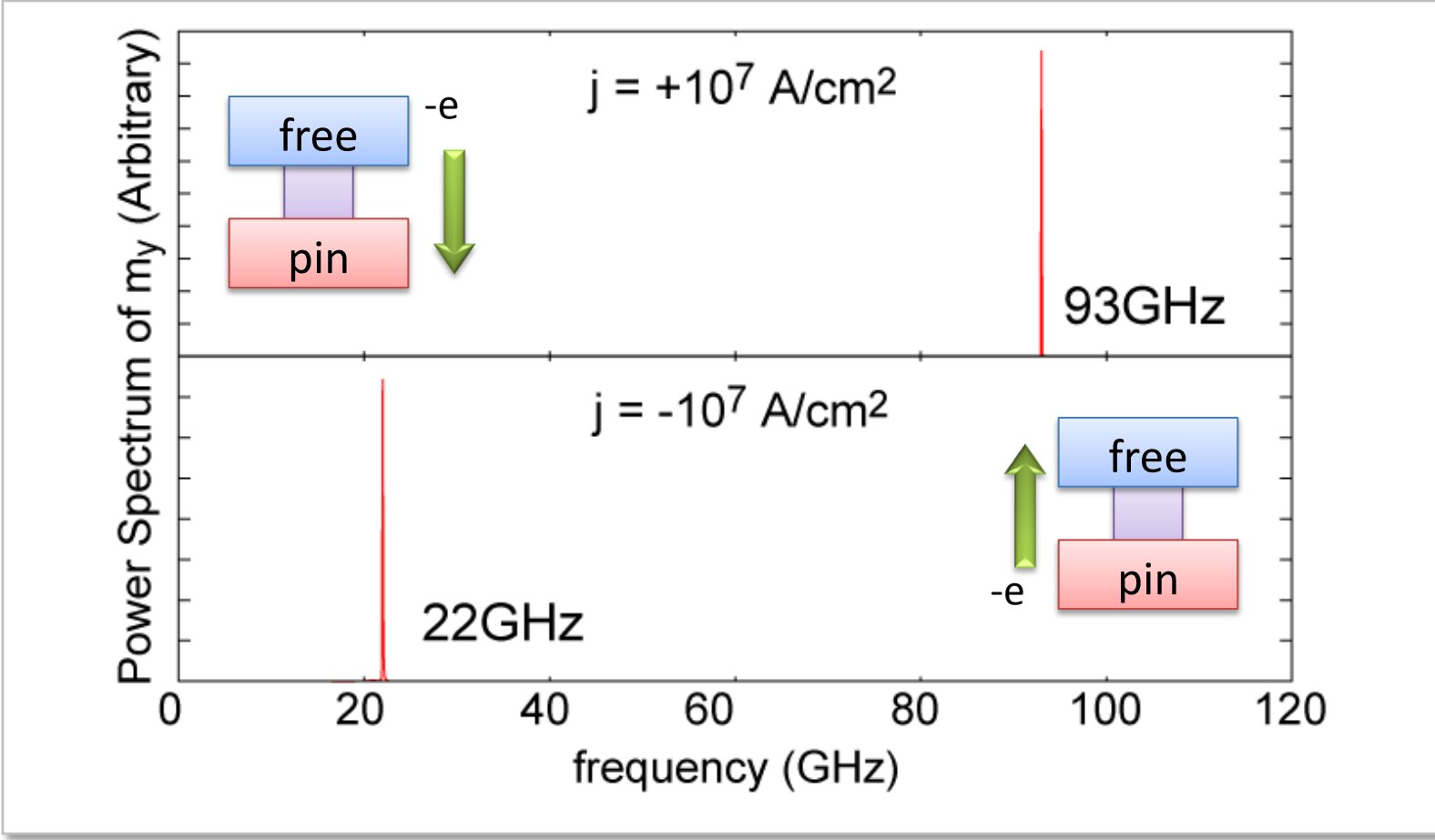
$$J = - 10^7 \text{ A/cm}^2$$

-e



- $J > 0$  では固定層側への磁壁のしみ出しは小さい
- $J < 0$  では自由層側への磁壁のしみ出しが大きい

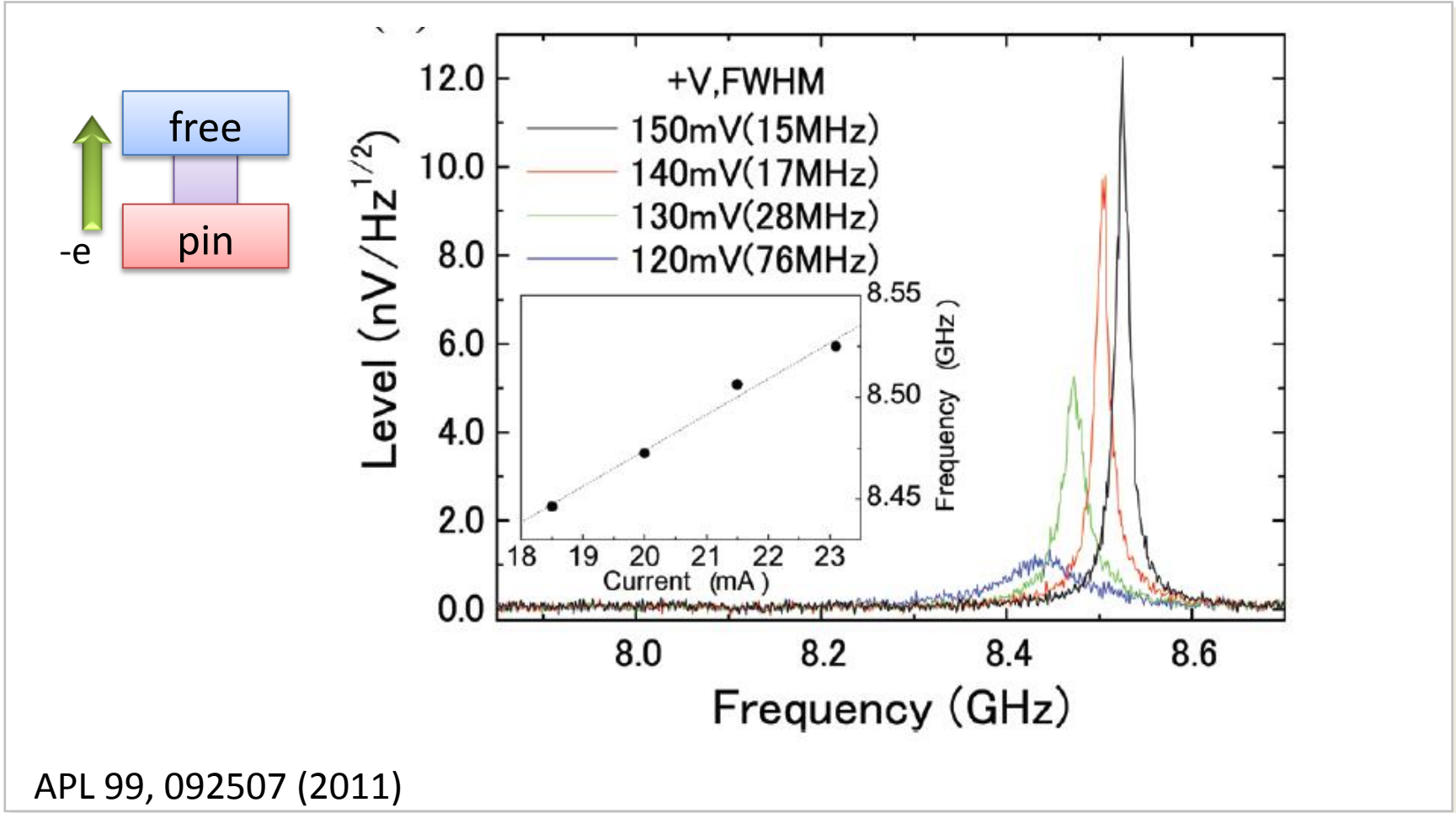
# 発振周波数の電流方向依存性



- $J < 0$ の振動は周波数は $J > 0$ の24%
- 高い発振周波数を得るためには固定層側での発振が必要。



# 東北大での実験結果



APL 99, 092507 (2011)

- 自由層側での8.5GHzのマイクロ波発振が確認されている。
- 周波数は電流と共に増加する。

# まとめ

- ナノ狭窄構造薄膜を利用することにより、ナノメートルサイズの磁壁を作成することができる。
- 低抵抗で高MR比の超高密度磁気記録読み出しヘッドへの応用が可能。
- ナノメートルサイズのマイクロ波発振器への応用が可能。
- 高い発振周波数を得るためには固定層側での発振が必要。
- 高出力発振のためには電気的な位相同期を行う必要がある。

