

総務省 戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE)
特定領域重点型研究開発(情報通信新機能・デバイス技術)
「スピン注入トルクを用いた超高速非線形素子の開発」

研究代表者

鈴木 義茂： 大阪大学大学院基礎工学研究科(物質創成専攻物性物理工学領域)教授

研究分担者

中谷 亮一： 大阪大学大学院工学研究科(マテリアル生産科学専攻)教授

前原 大樹： キヤノンアネルバ株式会社研究員

研究期間 平成 17 年度～平成21年度

謝辞

総務省および評価委員の皆様

湯浅 新治： 産業技術総合研究所ナノスピントロニクス研究センター センター長

福島 章雄： 同副センター長

久保田 均： 同チーム長

恒川 孝二： キヤノンアネルバ株式会社課長

Djayaprawira David : 同部長

共同研究者

大阪大学大学院基礎工学研究科(物質創成専攻物性物理工学領域)

関 剛斎 研究員(当時)

Deac Alina 研究員(当時)

水口 将輝 助教(当時)

野崎 隆行 助教

戸田 順之 修士課程学生(当時)

和田 朋之 修士課程学生(当時)

升方 康智 修士課程学生

石橋 翔太 修士課程学生

山根 健量 修士課程学生(当時)

富田 博之 博士課程学生

大阪大学大学院工学研究科(マテリアル生産科学専攻)

野村 光 助教

遠藤 恭 助教

松村 勇佑 修士課程学生(当時)

キヤノンアネルバ株式会社研究員

永峰佳紀 研究員

研究の背景

1937 クライストロン(バリアン 米)

1957 江崎ダイオード(日)

1963 ガンダイオード(米)

1985 巨大磁気抵抗効果(GMR) (仏・独)

2003 スピントランスファースター発振器(Kiselev 米)

2004 強磁性論理演算素子の提案(中谷他 日)

2004 Fe/MgO/Fe接合における巨大な
トンネル磁気抵抗効果(TMR) (湯浅 日)

2005 FeCoB-MgO強磁性トンネル接合の発明
(キヤノンアネルバ, 産総研 日)

2005 強磁性トンネル素子が検波器となる
ことを発見(Tulapurkar, 鈴木 日)

2005 総務省プロジェクト開始

Binary logic gates by ferromagnetic nanodots

S. Anisul Haque, Masahiko Yamamoto*, Ryoichi Nakatani, Yasushi Endo

Department of Materials Science and Engineering, Frontier Research Center, Graduate School of Engineering, Osaka University, Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

LETTERS

Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions

SHINJI YUASA^{1,2,*}, TARO NAGAHAMA¹, AKIO FUKUSHIMA¹, YOSHISHIGE SUZUKI¹ AND KOJI ANDO¹

¹Nanoelectronics Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba, Ibaraki 305-8565, Japan
²PRESTO, Japan Science and Technology Agency, Kanagashi, Saitama 352-0292, Japan

*e-mail: yuasa@nri.aist.go.jp

The tunnel magnetoresistance (TMR) effect in magnetic tunnel junctions (MTJs)^{1,2} is the key to developing magnetoresistive random-access memory (MRAM), magnetic sensors and novel programmable logic devices³⁻⁵. Conventional MTJs with an amorphous aluminium oxide tunnel barrier, which have been extensively studied for device applications, exhibit a magnetoresistance ratio up to 70% at room temperature⁶. This low magnetoresistance seriously limits the feasibility of spintronic devices. Here, we report a giant MR ratio up to 180% at room temperature in single-crystal Fe/MgO/Fe MTJs. The origin of this enormous TMR effect is coherent spin-polarized tunnelling, where the symmetry of electron wave functions plays an important role. Moreover, we observed that their tunnel magnetoresistance oscillates as a function of tunnel barrier thickness, indicating that coherency of wave functions is conserved across the tunnel barrier. The coherent TMR effect is a key to making spintronic devices with novel quantum-mechanical functions, and to developing gigabit-scale MRAM.

The MR ratio is defined as $(R_{\text{AP}} - R_{\text{P}})/R_{\text{P}}$, where R_{P} and R_{AP} are the tunnel resistance when the magnetizations of the two electrodes are aligned in parallel and antiparallel, respectively. The Fe(001)/MgO(001)/Fe(001) MTJs are theoretically expected to exhibit an extremely high MR ratio due to coherent tunnelling^{7,8}. When the coherency of electron wave functions is conserved during tunnelling, only conduction electrons whose wave functions are totally symmetrical with respect to the barrier-normal axis are connected

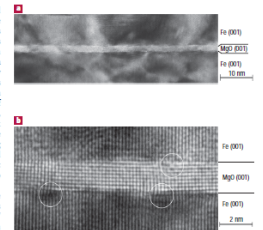


Figure 1 TMR images of a single-crystal MTJ with the Fe(001)/MgO(001)/Fe(001) structure. (a) is a magnification of the vertical axis and (b) is a magnification of the horizontal axis.

APPLIED PHYSICS LETTERS 86, 092502 (2005)

230% room-temperature magnetoresistance in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions

David D. Djayaprawira,¹ Koji Tsunekawa, Motonobu Nagai, Hiroki Maehara, Shinji Yamagata, and Naoki Watanabe

Electronic Device Equipment Division, Anelva Corporation, 5-8-1, Jotsuya, Fuchu-shi, Tokyo 183-8508, Japan

Shinji Yuasa,¹ Yoshishige Suzuki,¹ and Koji Ando

Nanoelectronics Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba, Ibaraki 305-8568, Japan

Vol 43871 November 2005 doi:10.1038/nature04207

NATURE

LETTERS

Spin-torque diode effect in magnetic tunnel junctions

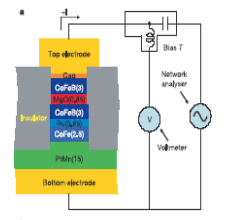
A. A. Tulapurkar^{1,2,*}, Y. Suzuki^{1,2,3}, A. Fukushima^{1,2}, H. Kubota^{1,2}, H. Maehara⁴, K. Tsunekawa⁴, D. D. Djayaprawira¹, N. Watanabe⁴ & S. Yuasa^{1,2}

There is currently much interest in the development of 'spin-torque' devices, in which harnessing the spins of electrons (rather than just their charges) is anticipated to provide new functionalities that go beyond those possible with conventional electronic devices. One widely studied example of an effect that has its roots in the electron's spin degree of freedom is the torque exerted by a spin-polarized electric current on the spin moment of a nanometre-scale magnet. This torque causes the magnetic moment to rotate^{1,2} at potentially useful frequencies. Here we report a very different phenomenon that is also based on the interplay between spin dynamics and spin-dependent transport, and which arises from unusual diode behaviour. We show that the application of a small radio-frequency alternating current to a nanometre-scale magnetic tunnel junction³⁻¹¹ can generate a measurable direct-current (d.c.) voltage across the device when the frequency is resonant with the spin oscillations that arise from the spin-torque effect: at resonance (which can be tuned by an external magnetic field), the structure exhibits different resistance states depending on the direction of the current. This behaviour is markedly different from that of a conventional semiconductor diode¹², and could form the basis of a nanometre-scale radio-frequency detector in telecommunication circuits.

We performed experiments on a magnetic tunnel junction (MTJ) in the structure Si (substrate)/PdMn (15 nm)/CoFe (2.5 nm)/Ru (0.85 nm)/CoFeB (3 nm)/MgO (0.85 nm)/CoFeB (3 nm); see Fig. 1a.

magnetization^{13,14}. The power was measured by a spectrum analyser, by passing a d.c. current of 1 mA using a bias T.

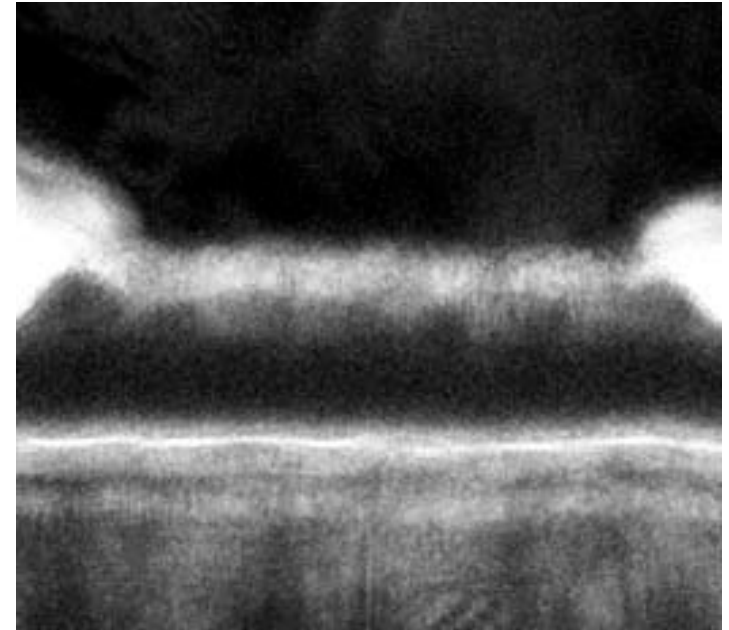
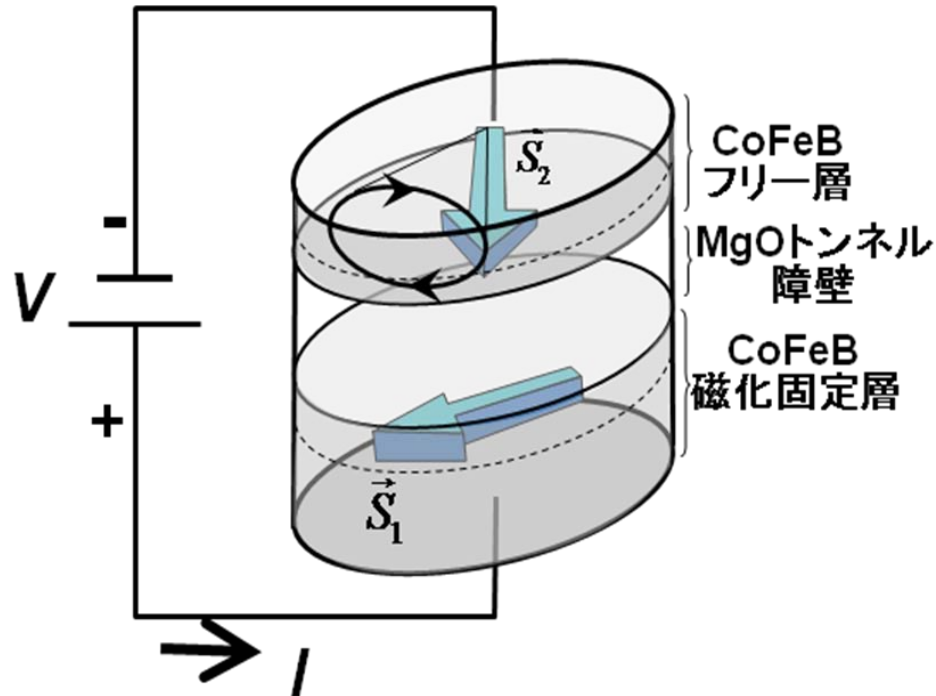
The radio frequency (r.f.) response of the MTJ was first tested using a network analyser. The results obtained showed evidence of magnetic resonance excited by r.f. current (results not shown).



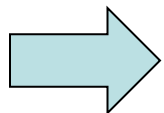
1. 高周波用トンネル磁気抵抗素子

今回、開発した素子

1. 高周波用トンネル磁気抵抗素子



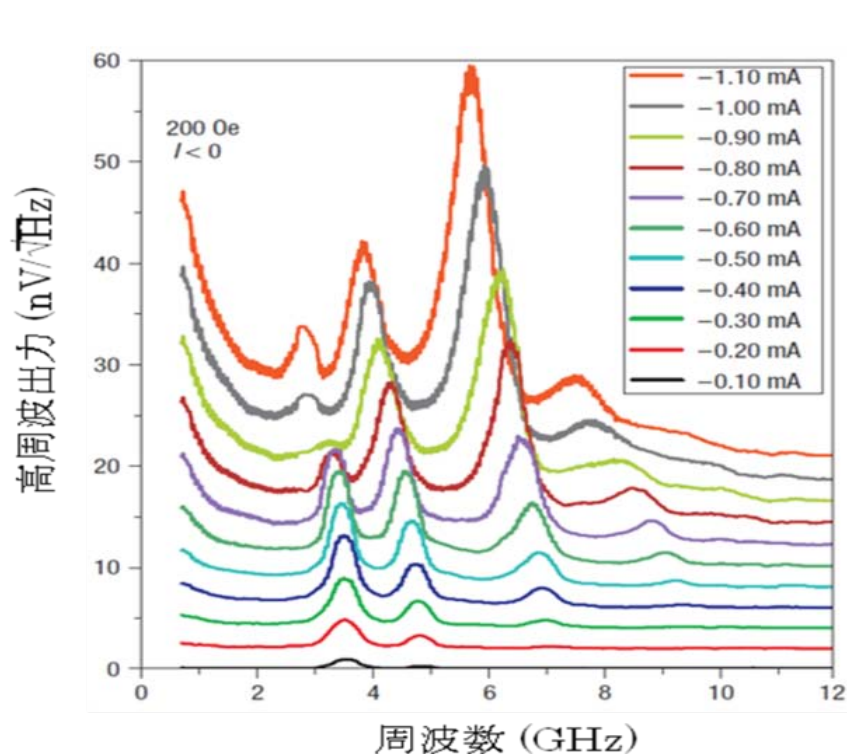
- ・磁気抵抗効果：磁極の相対角で抵抗値が変わる
- ・スピントランスファー効果：電流で磁極が運動する



a. これらの効果を利用した高周波素子の原理の実証

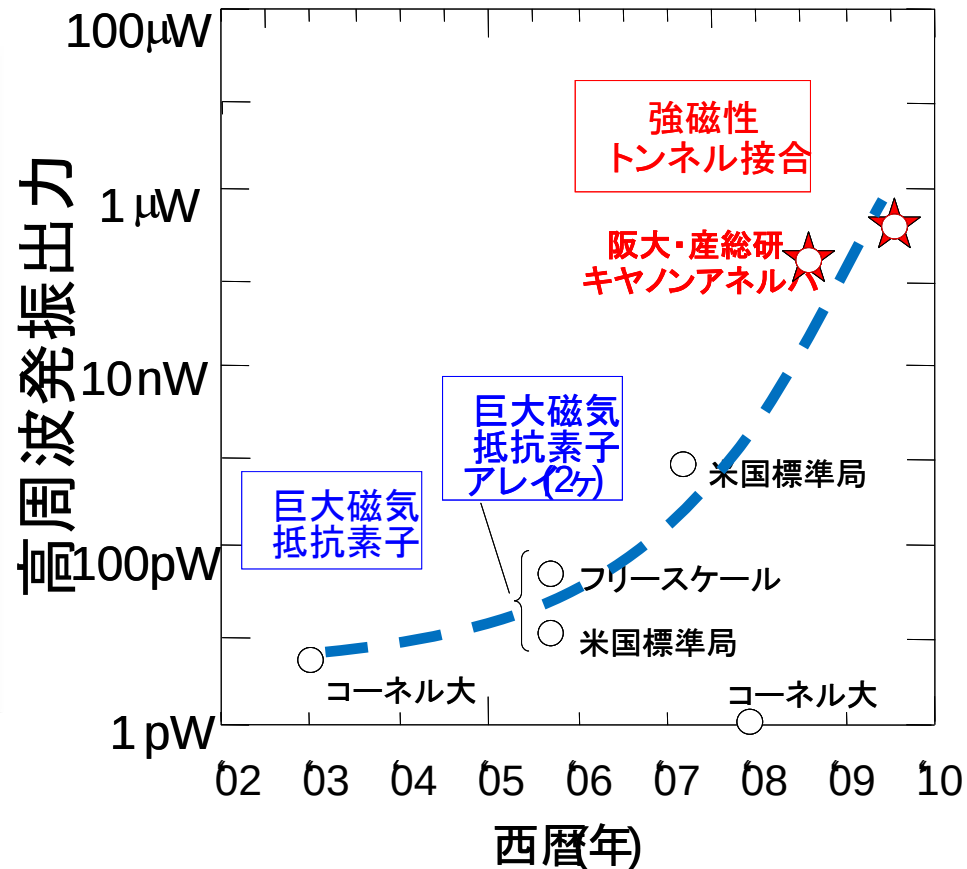
b. 高周波用トンネル接合トンネル素子のプロセス技術の開発

(i-1) 高周波の発振 (発振出力の増大)



Nature Physics 2008

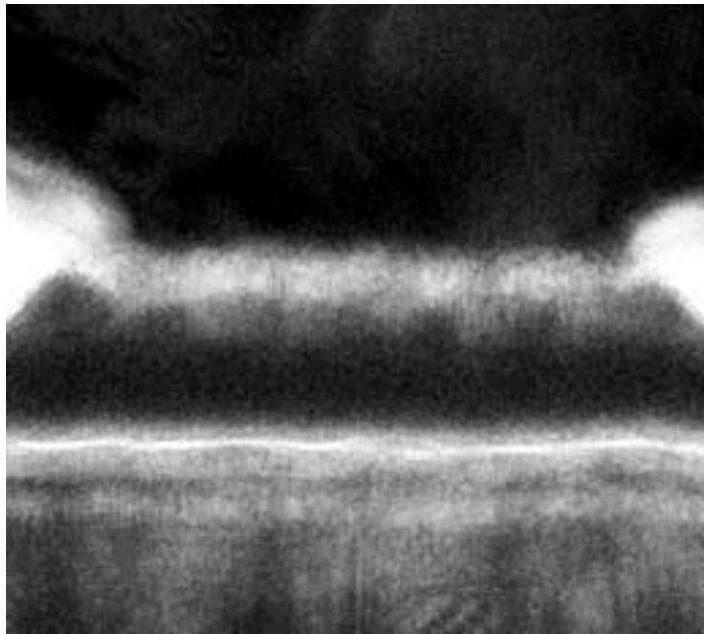
トンネル磁気抵抗素子の
スピン移行発振に世界で初めて成功



スピン移行発振器出力の年次推移

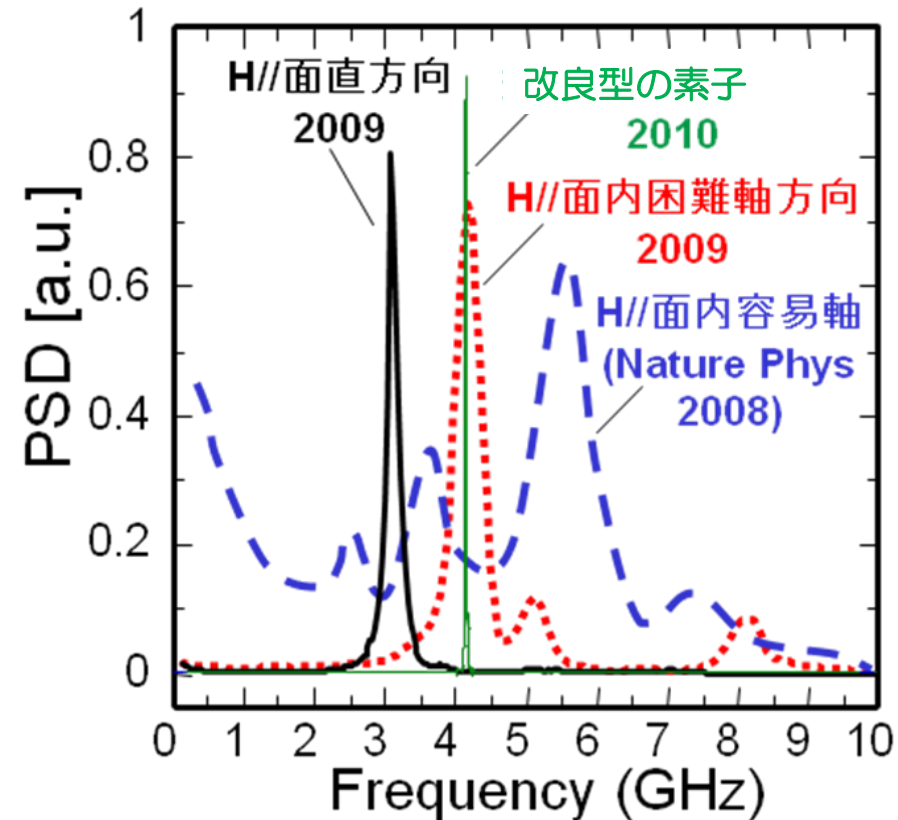
当初の10000倍の発振出力を実現

(i-2) 高周波の発振 (Q値の改善)



← ~60nm →

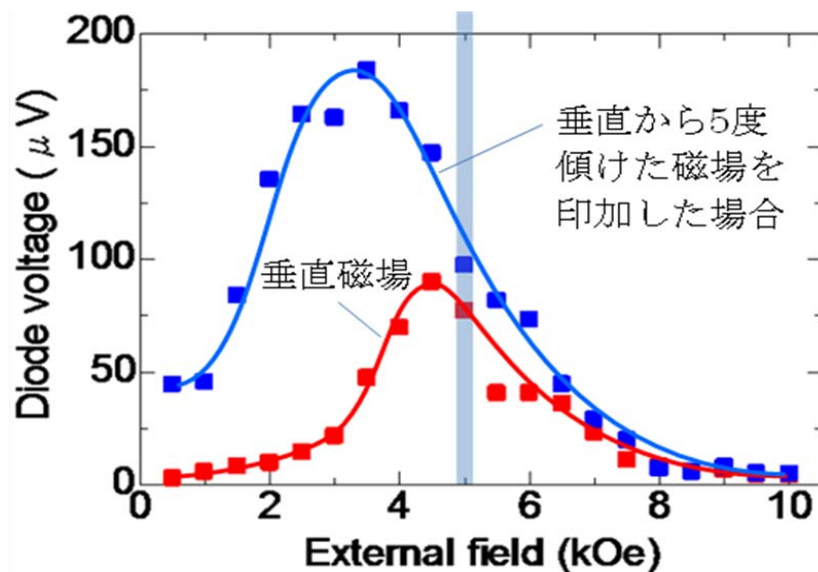
改良型の素子断面TEM像



発振スペクトル純度の改善

発振の純度を約100倍に改善

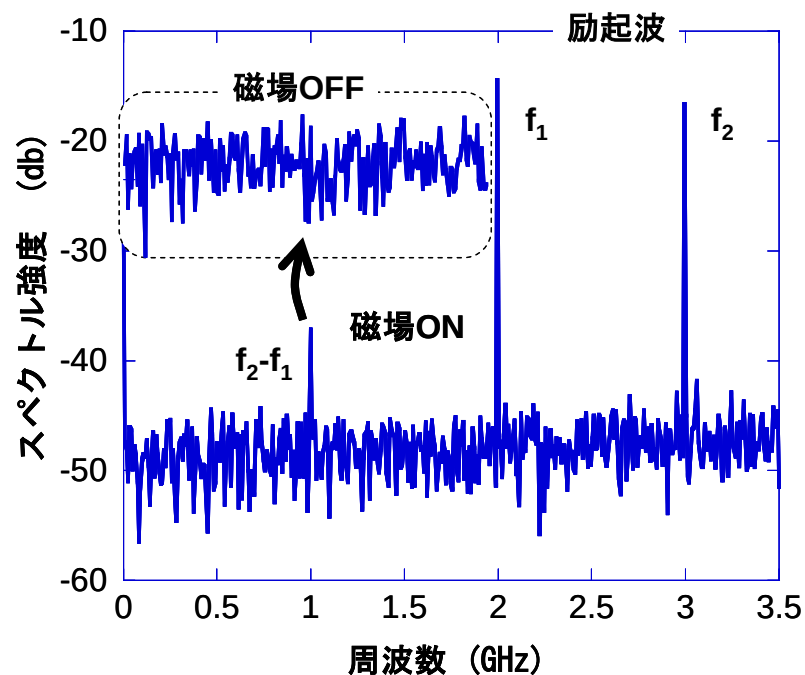
(ii) 高周波の検波



検波感度を当初の約20倍に増大
(170mV/mW)

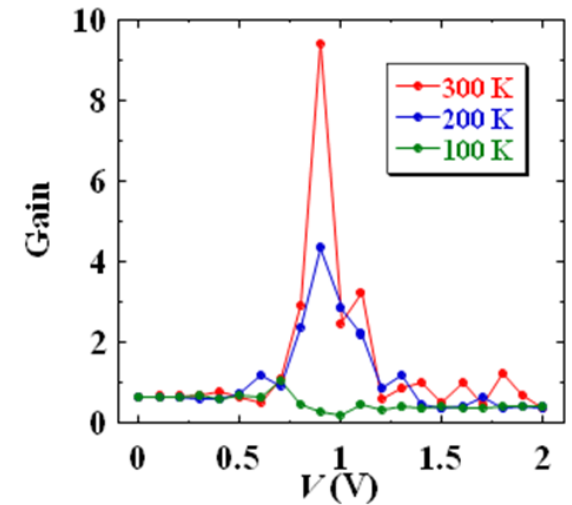
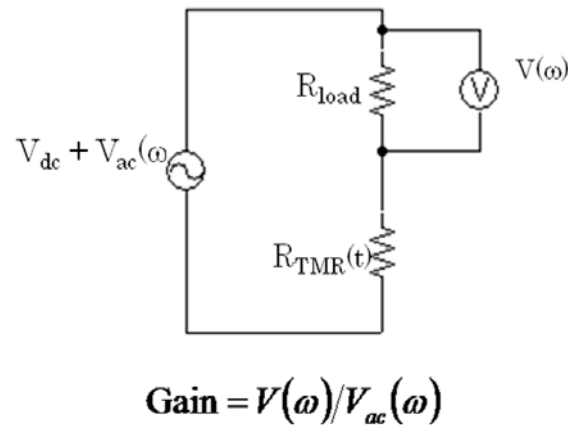
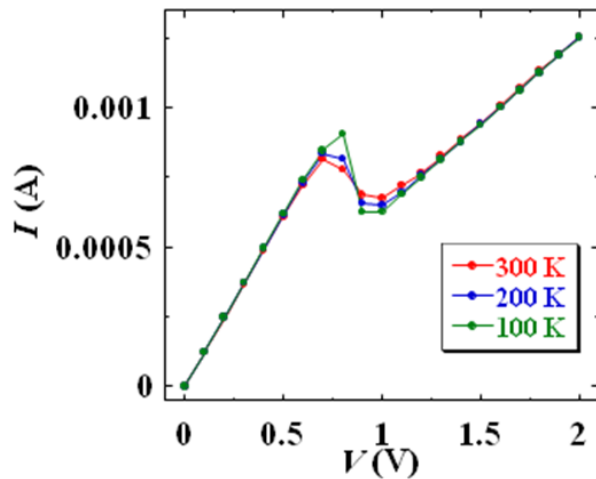
半導体ダイオードの500 mV/mWにせまる

(iii) 周波数変換作用の実証



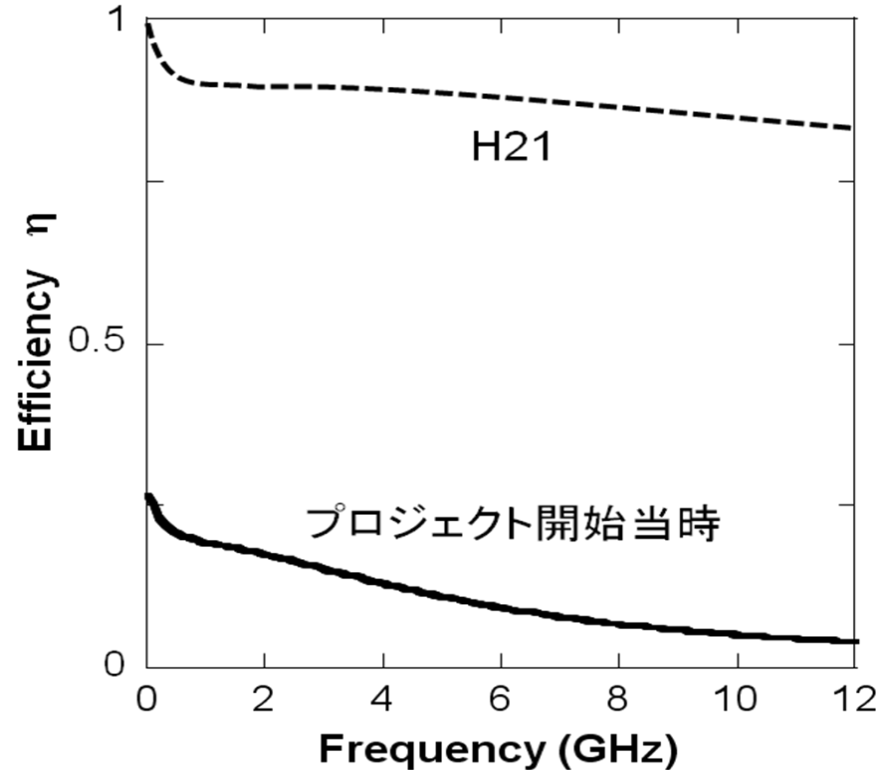
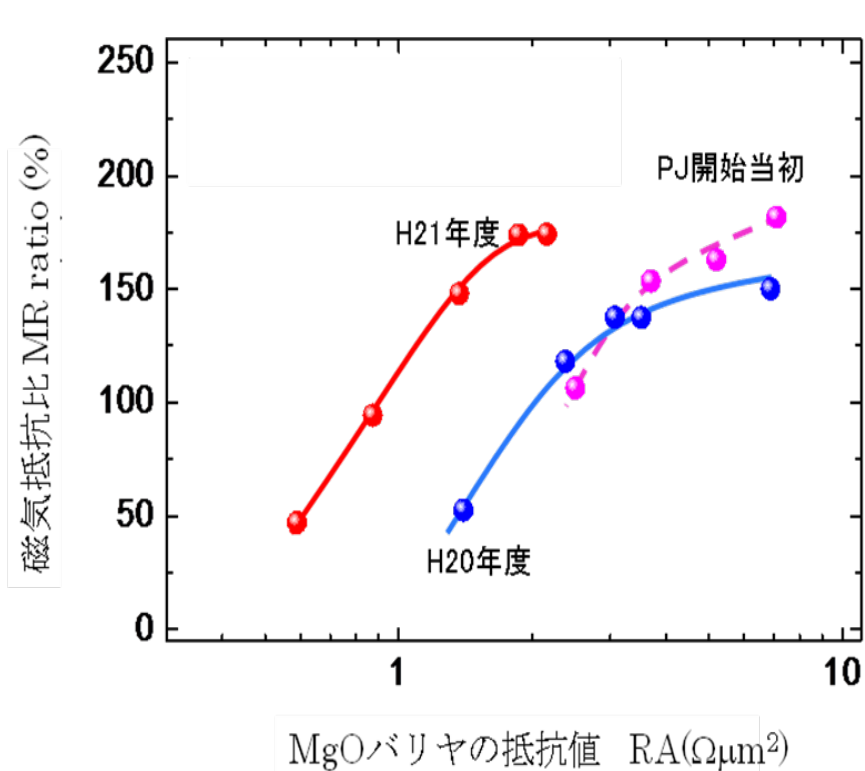
通倍・周波数変換作用を実証

(iv) 負性抵抗による高周波増幅の原理の解明



高周波の増幅作用をあきらかにした

(v)高周波用トンネル接合トンネル素子のプロセス技術の開発



インピーダンスマッチングが可能な
高周波用低抵抗トンネル接合膜を開発

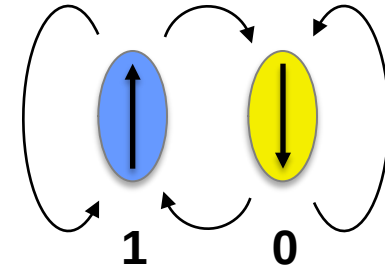
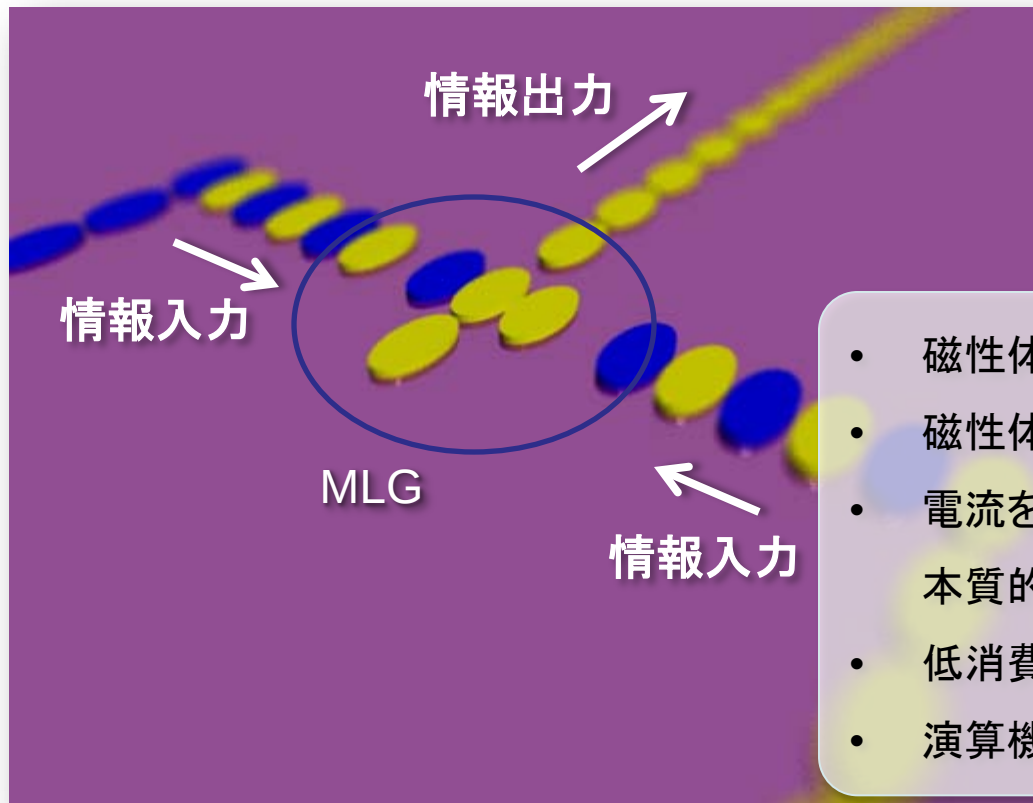
インピーダンスマッチングにより
素子の効率を当初の約8倍に改善

Siテクノロジーに適合した成膜プロセス
配線層などの上にも作成可能な、下地を選ばない成膜プロセス

2. 磁性論理演算素子

磁性論理演算素子

Magnetic Logic Gate (MLG)[1]

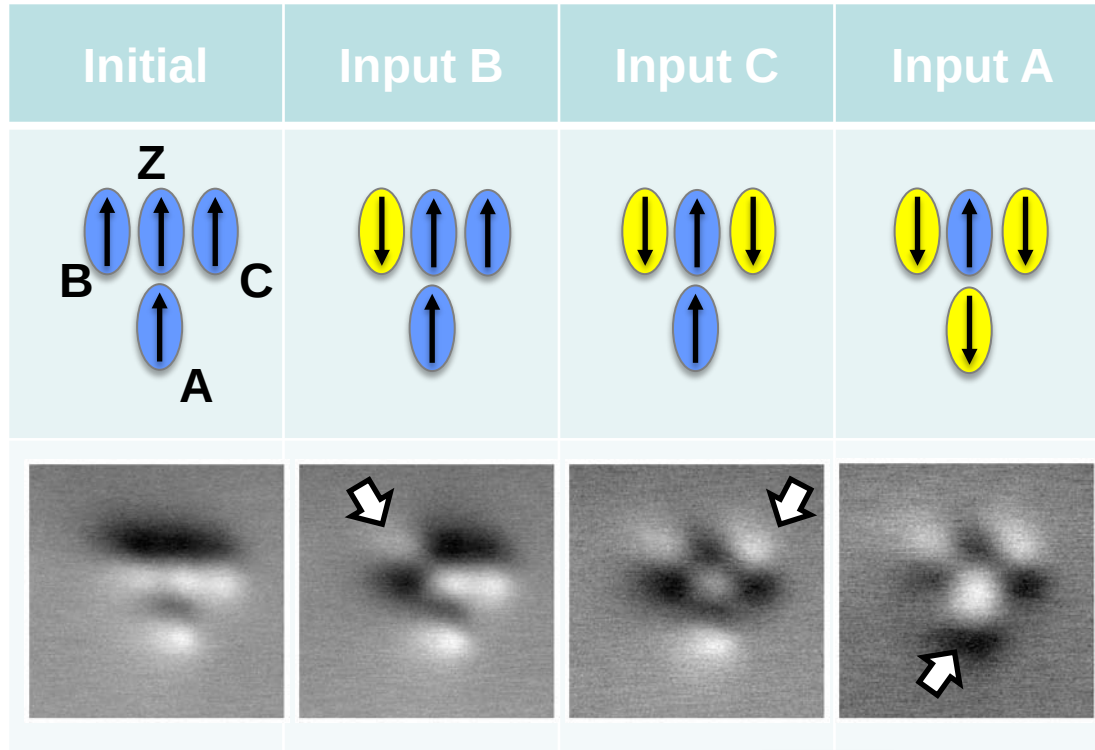


- 磁性体の磁化の向きで情報を保持
- 磁性体間の磁気的な相互作用を利用して演算
- 電流を用いないため従来のエレクトロニクスとは本質的に異なる新規デバイス
- 低消費電力・不揮発性
- 演算機能を持つインテリジェンスメモリ

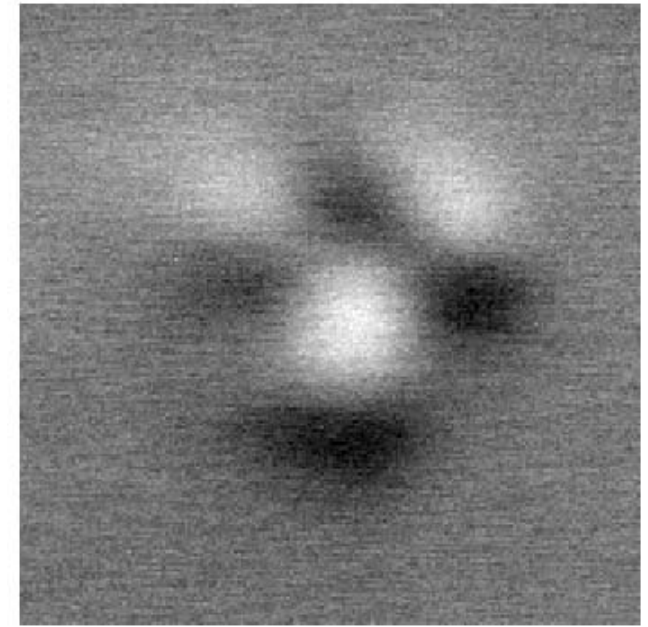
磁性論理演算素子による論理演算回路の模式図

[1] S. A. Haque, et al., J. Mag. Mag. Mat. 282 (2004) 380

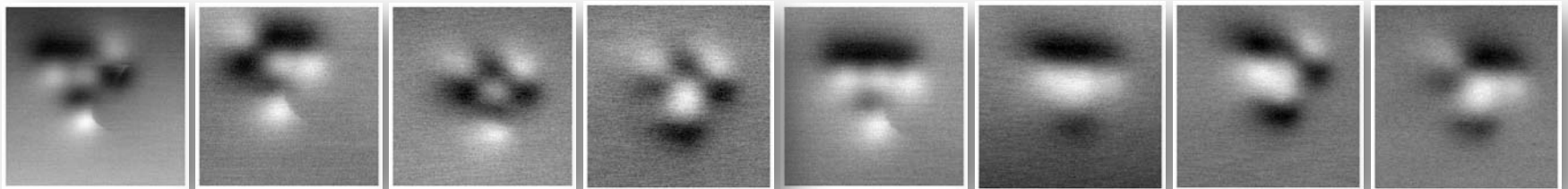
Magnetization Manipulation results



0 0 1 1

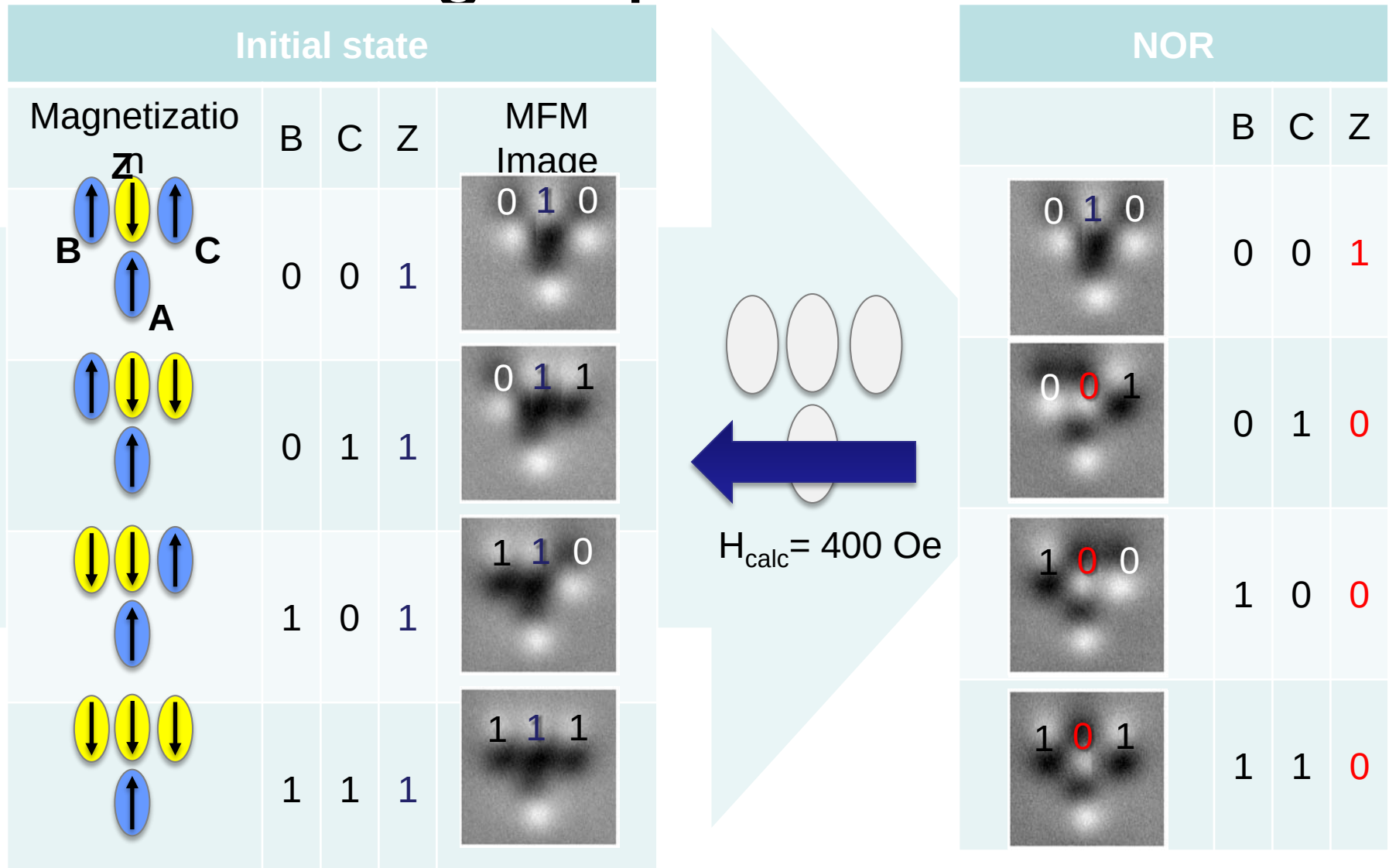


MFM image of magnetic logic gate



We succeed to write digital information dynamically to the individual d

NOR logic operation results

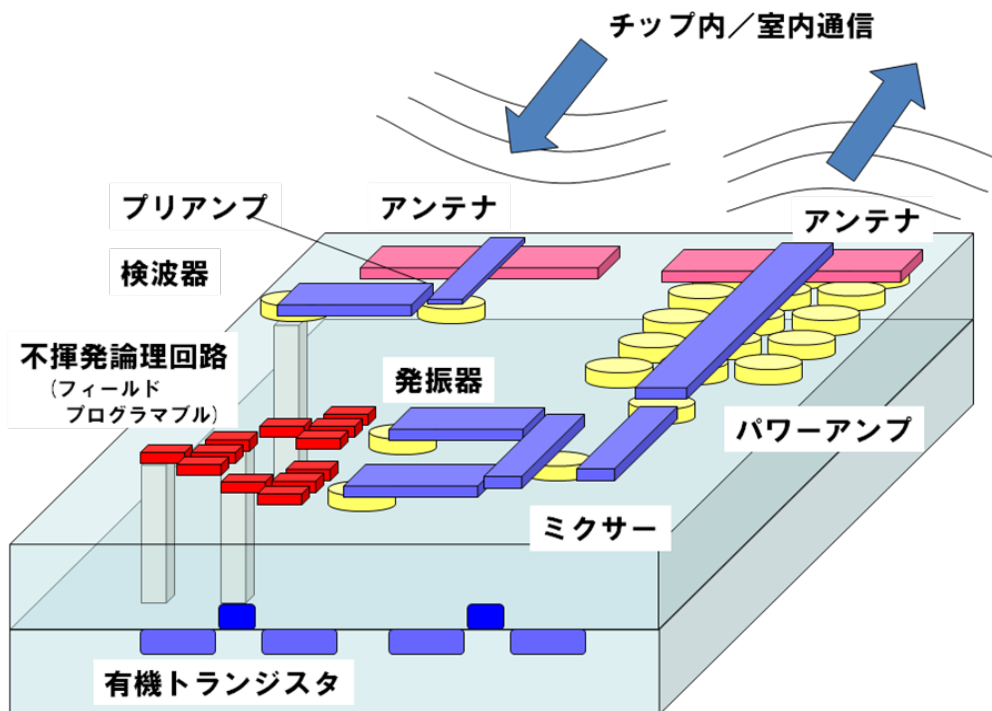


We succeed to perform dynamic NOR logic operation by single gate

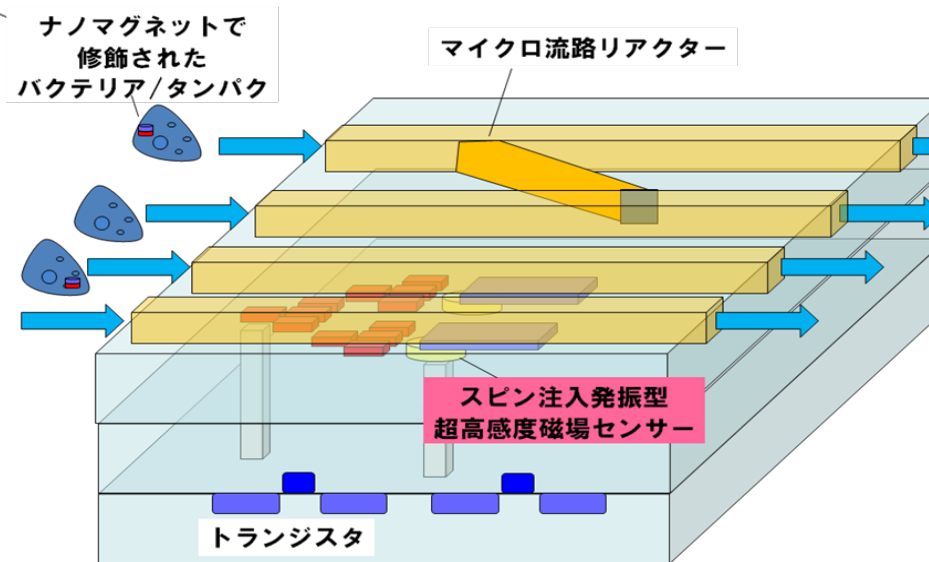
主な成果のまとめ

	発振出力	発振周波数 純度	検波感度	高周波の 増幅	論理演算
プロジェクト 当初の値	10～数10 pW (GMR)	Q=8 (MTJ)	10mV/mW @1～10 GHz	実施例なし	集積化可能な ものの実施例 なし
本プロジェクト 実証値	約0.5 μ W	Q=800	170 mV/mW @3.3 GHz	Gain～9 @100 MHz (実験+計算)	全ての 基本論理演算 を実証
本プロジェクト による向上	約10,000倍	約100倍	約17倍	初めてその可 能性を明らか にした	初めての 実証
今後達成可 能であろうと 考えられる 値・課題、	単一素子で 10 μ W程度. アレイ化によ り大出力可 能.	モードジャンプ を抑えること ができれば Q～20,000	半導体ダイ オード(～ 500mV/mW) を超える可能 性あり	Gain～10程度 @10 GHz程度	スピン注入な どによる情報 の書き込み技 術が必要.

本件研究成果の将来の 応用例



安価でフレキシブルな
プラスチック高周波回路



マイクロ流路に取り付ける
ナノ磁界センサー