

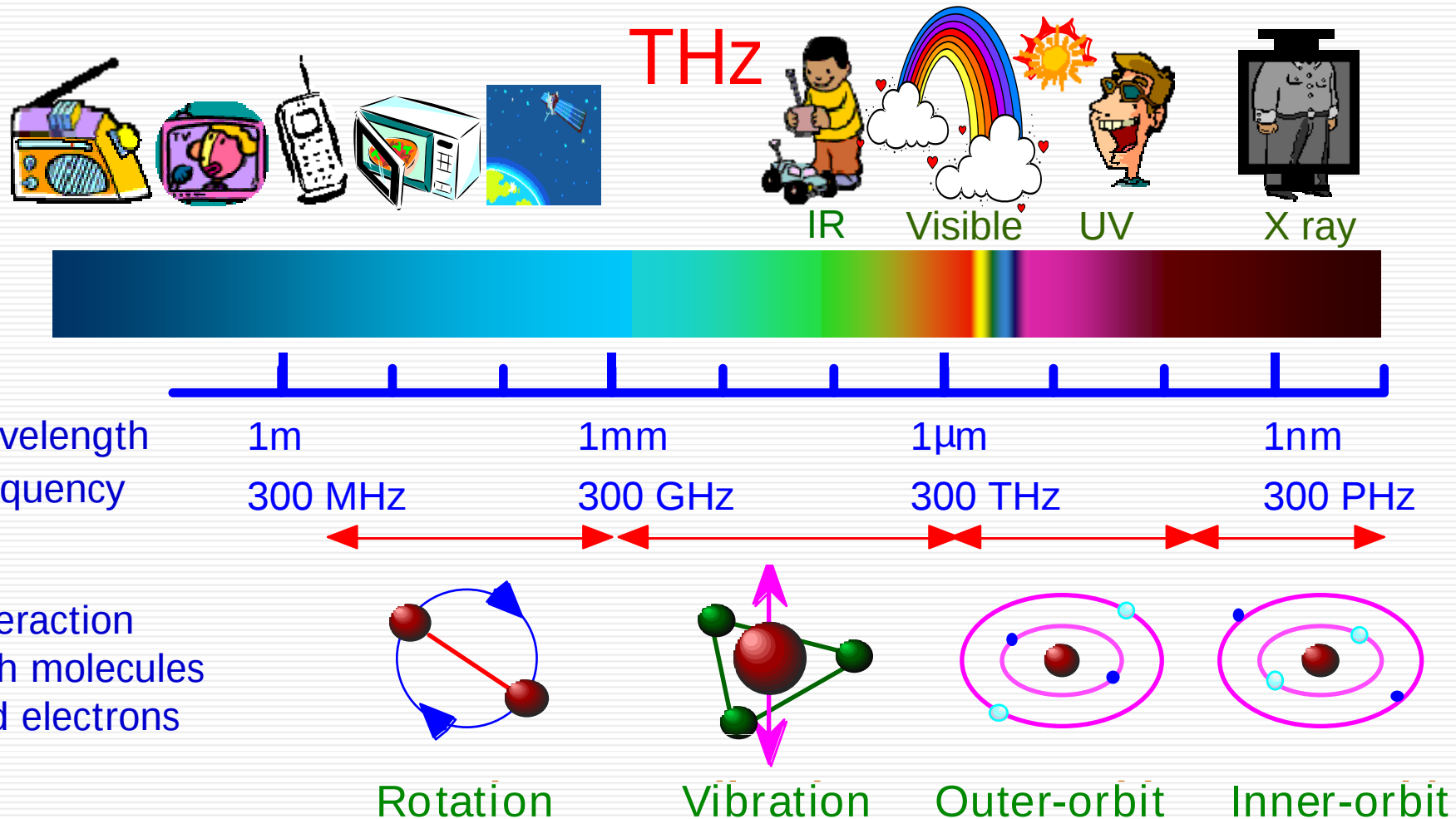
2次元プラズモン共鳴効果を利用した 室温動作高効率テラヘルツ帯フォトミキサーの 研究開発

課題番号: (041410001)

■ 総務省戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) プログラム

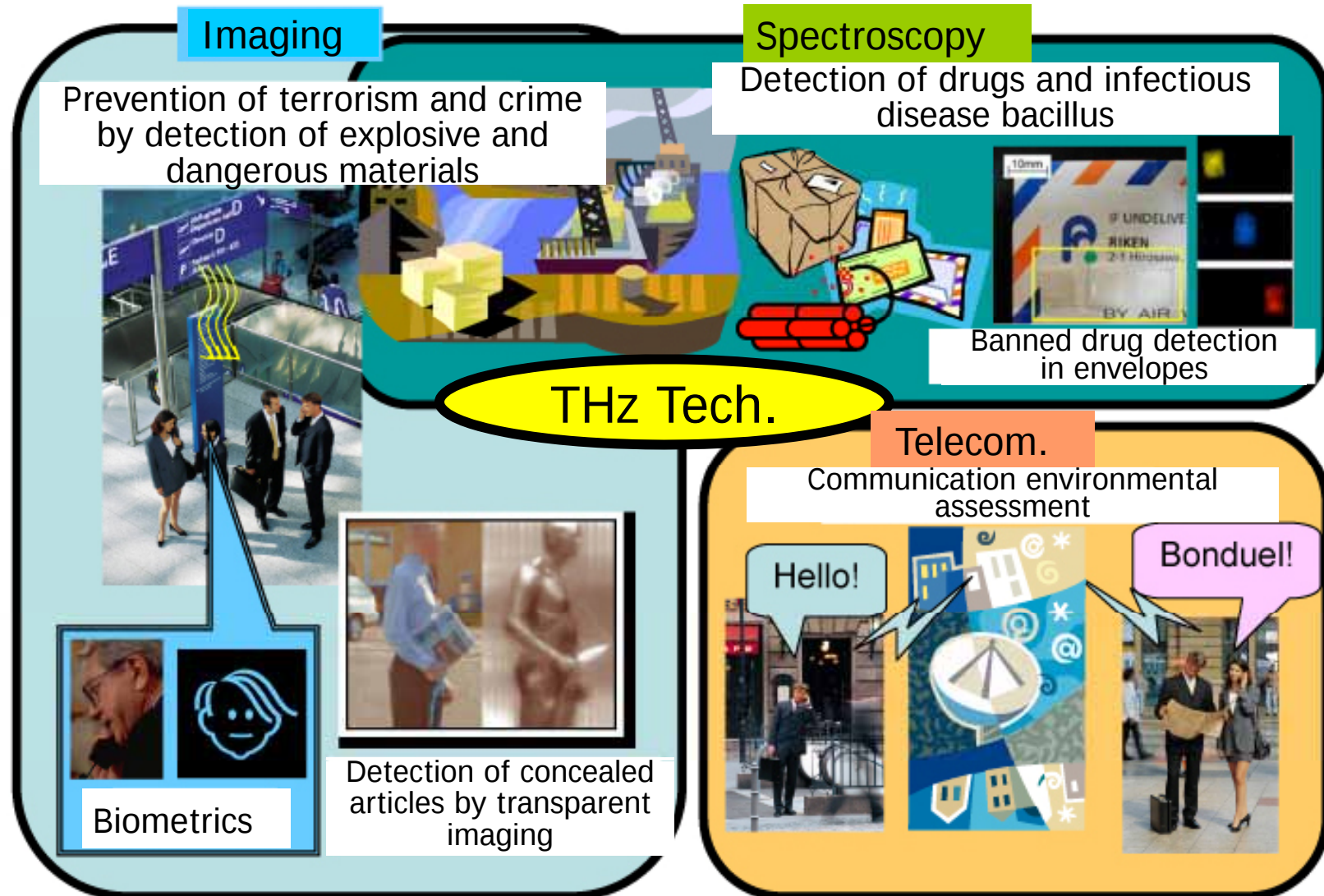
- 特定領域重点型研究開発
- 研究期間: 2004 年4月 ~ 2008年3月
- 研究代表者:
尾辻 泰一 (東北大学 電気通信研究所)
- 共同研究者:
佐野 栄一 (北海道大学 量子集積エレクトロニクス研究センター)
浅野 種正 (九州大学大学院 ステム情報科学研究院)
末光 哲也 (東北大学 電気通信研究所)

テラヘルツとは？

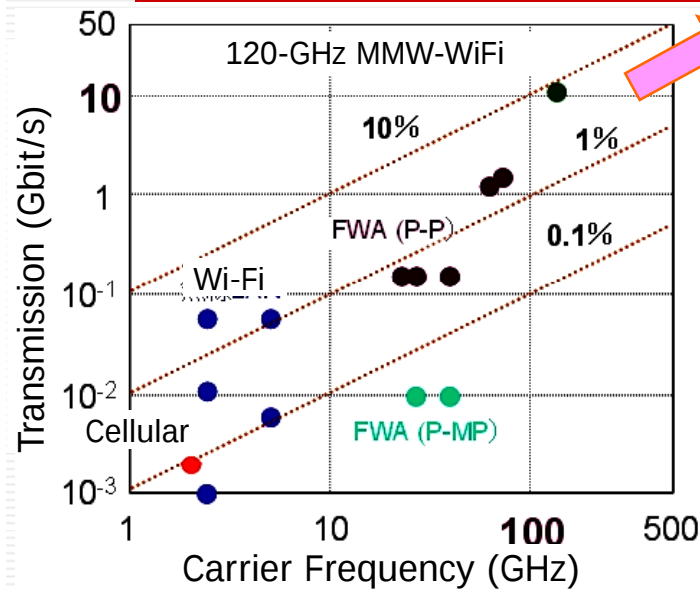


未来を拓くテラヘルツ・テクノロジー

Courtesy of Terahertz Technology Trend Investigation Committee, MIC, Japan



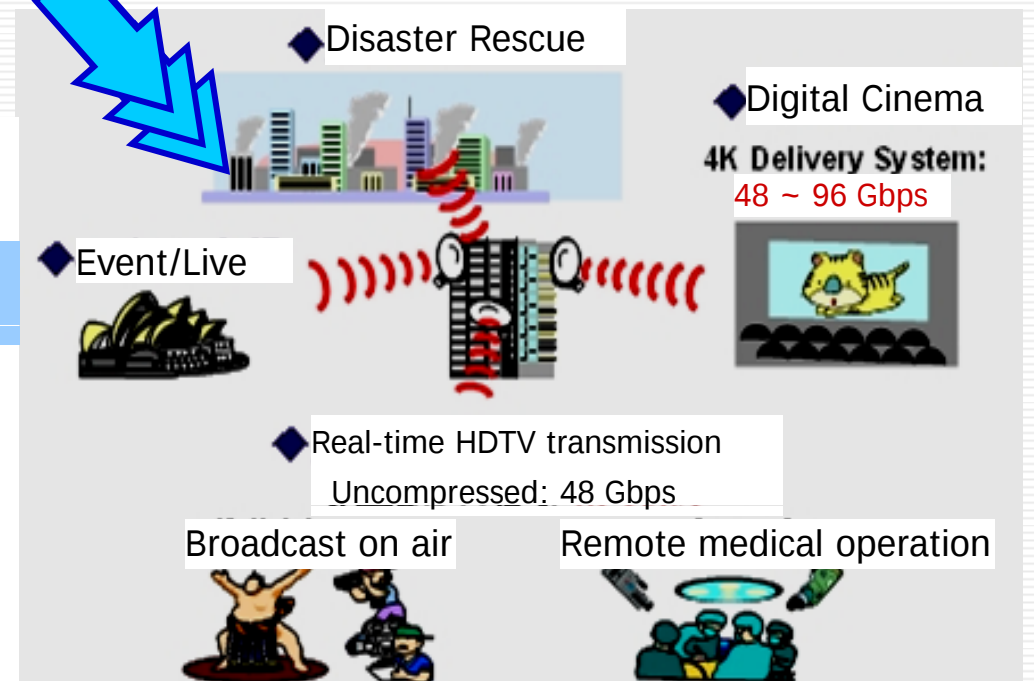
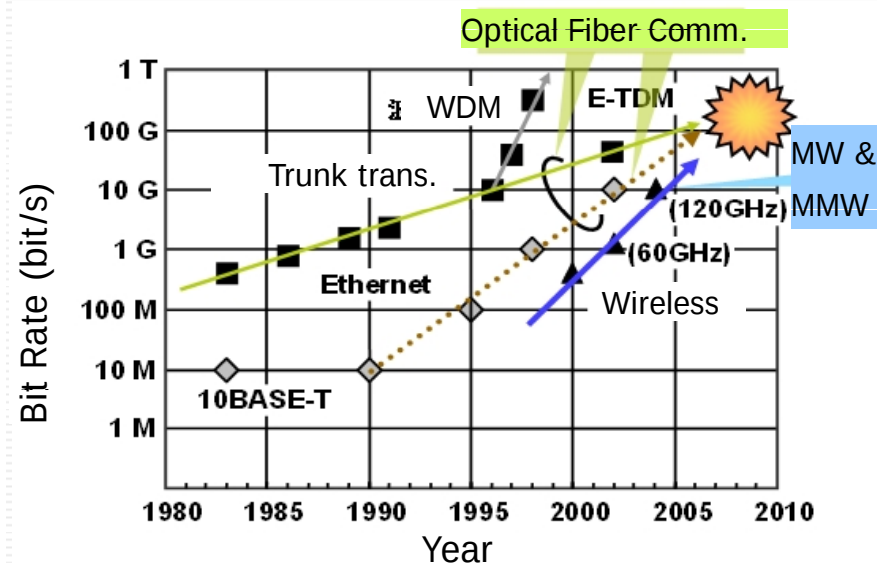
テラヘルツ帯無線通信技術のニーズ



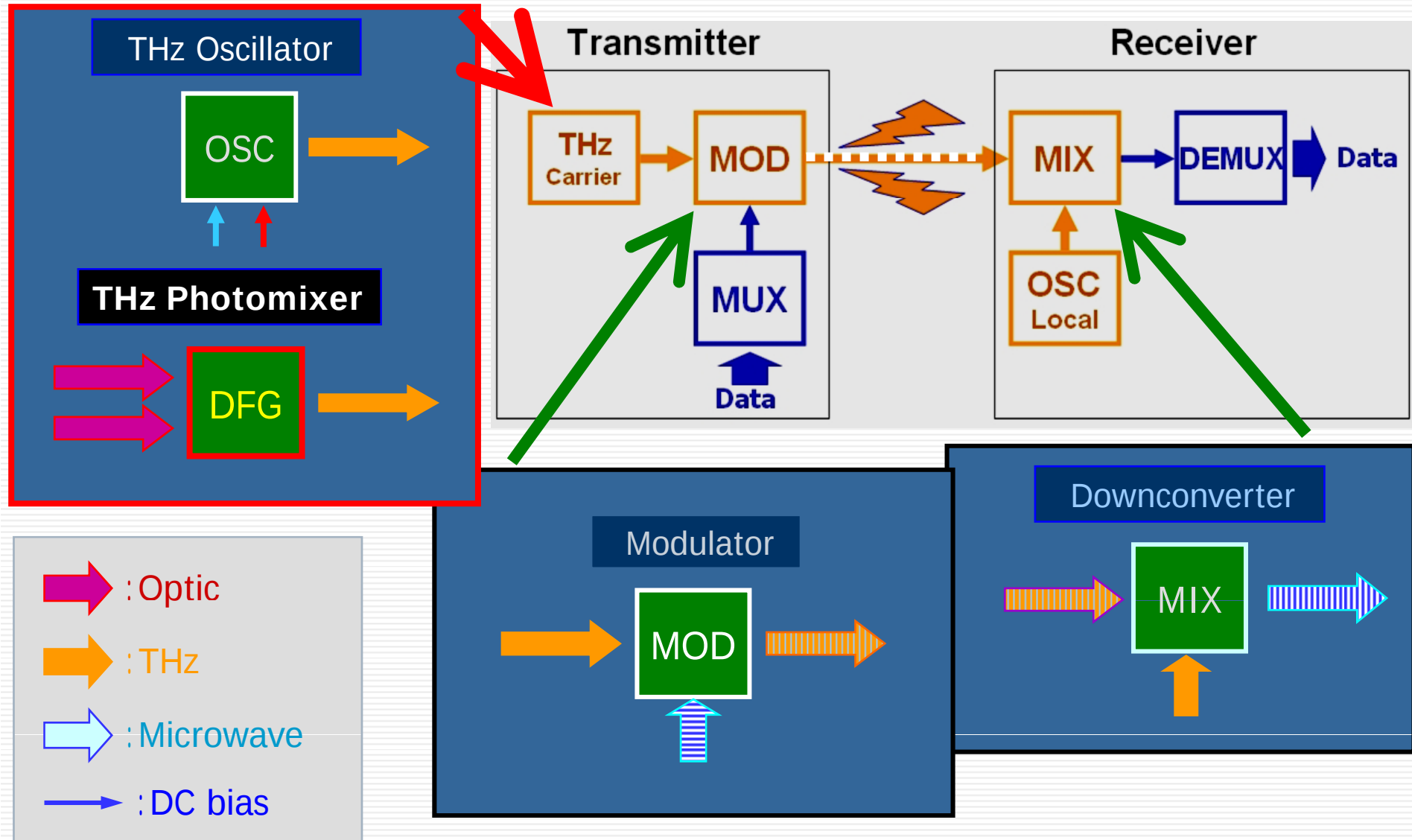
(Courtesy: Terahertz Technology Trend Investigation Committee, MIC, Japan)
(<http://kids.yahoo.co.jp/docs/event/expo2005>)

Super Hi-Vision

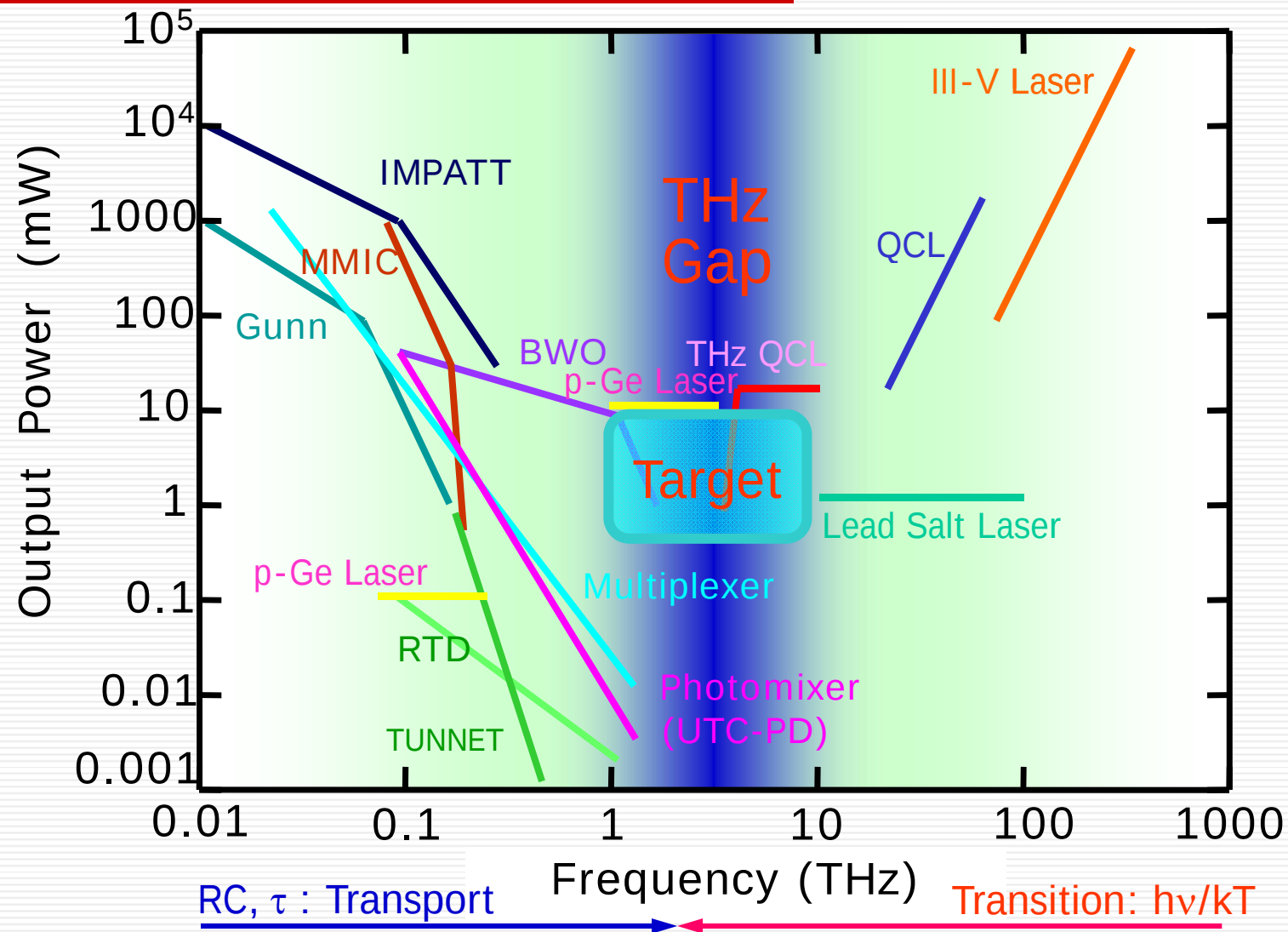
- Available in 2025
- Scanning lines >4000
- Uncompressed at **48Gbps**
- Carrier freq. **~500GHz**



テラヘルツ通信デバイスに要求される機能



テラヘルツギャップ



(Courtesy of Terahertz Technology Trend Investigation Committee, MIC, Japan)

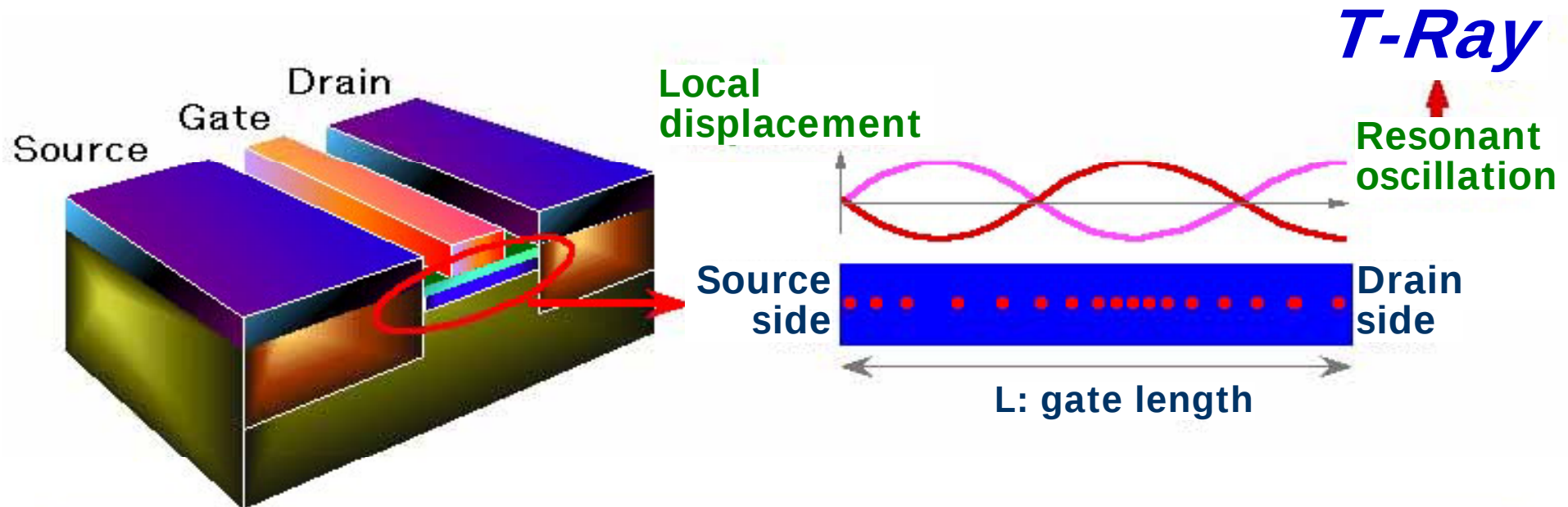
本研究の目的と目標

- 本研究は、テラヘルツ帯コヒーレントCW電磁波の発生・制御機能を有する集積化が可能なデバイス技術を開拓することを目的として、
- 半導体2次元電子システムのプラズモン共鳴励振と電磁波結合モード輻射を動作原理とする新規な室温動作高効率テラヘルツフォトミキサーを開発する。
- 2重回折格子型ゲート電極構造と縦モード共振器構造を特徴とするオリジナルな素子構造を導入することにより、電磁波放射効率の格段の向上を果たす。
- 1～10THzの周波数チューナビリティと10mW級の放射電力の実現を目指す。

2次元電子系によるプラズモン共鳴

(M. Dyakonov and M. Shur, PRL 71, 1993.)

Electron plasma can make resonant oscillation in submicron FET's!

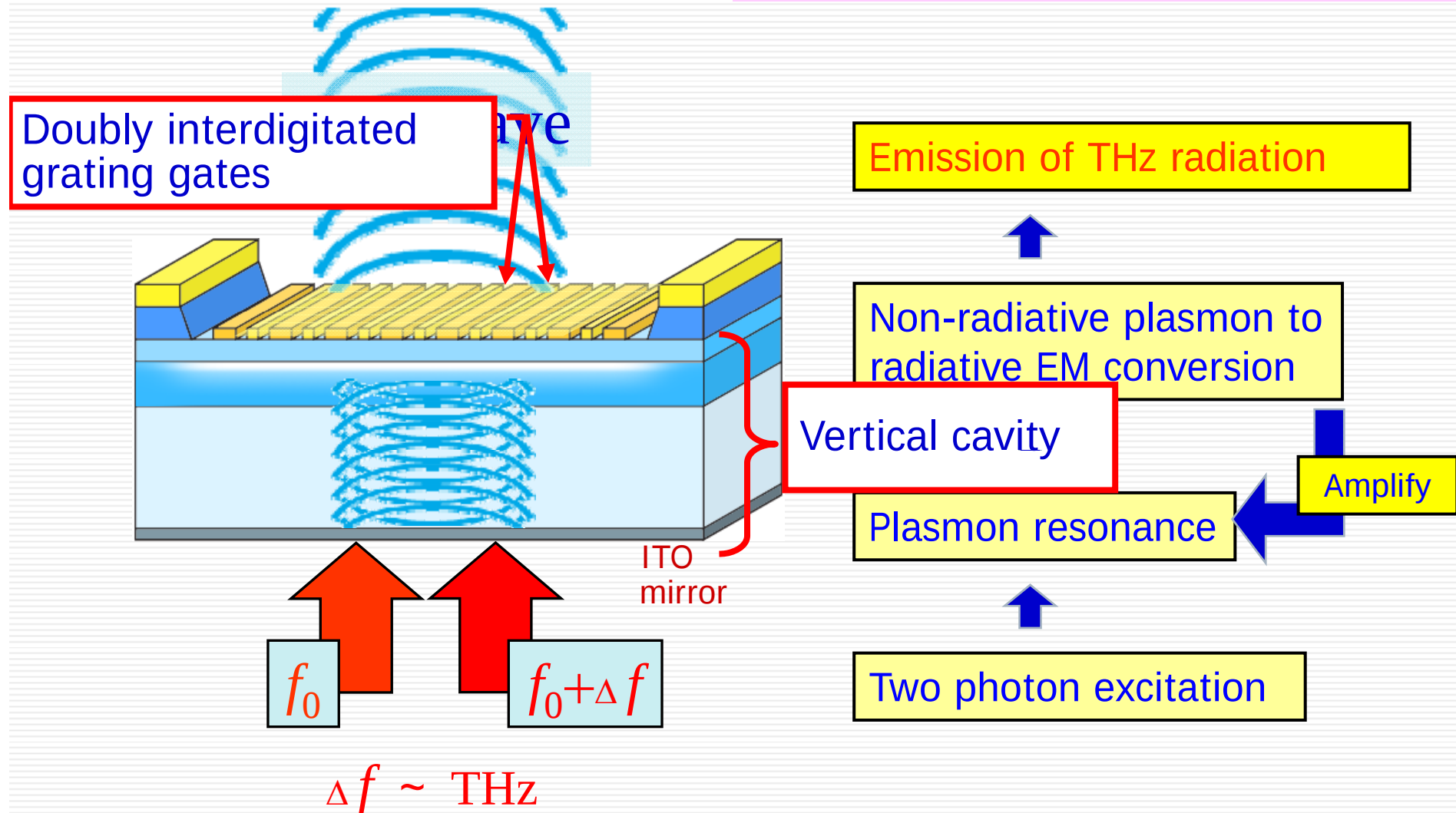


$$f_{\text{resonance}} \approx \sqrt{\frac{qV_g}{m}} \cdot \frac{n}{4L} > 1 \text{ THz}$$

q: electron charge
m: electron effective mass
V_g: gate-source bias

2重回折格子ゲートと縦型共振機構を有する 新構造テラヘルツフォトミキサー

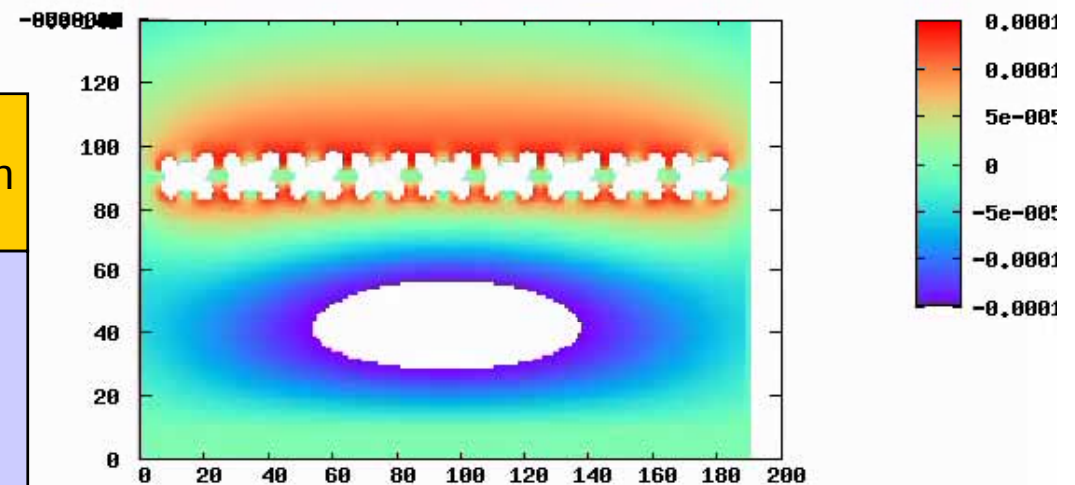
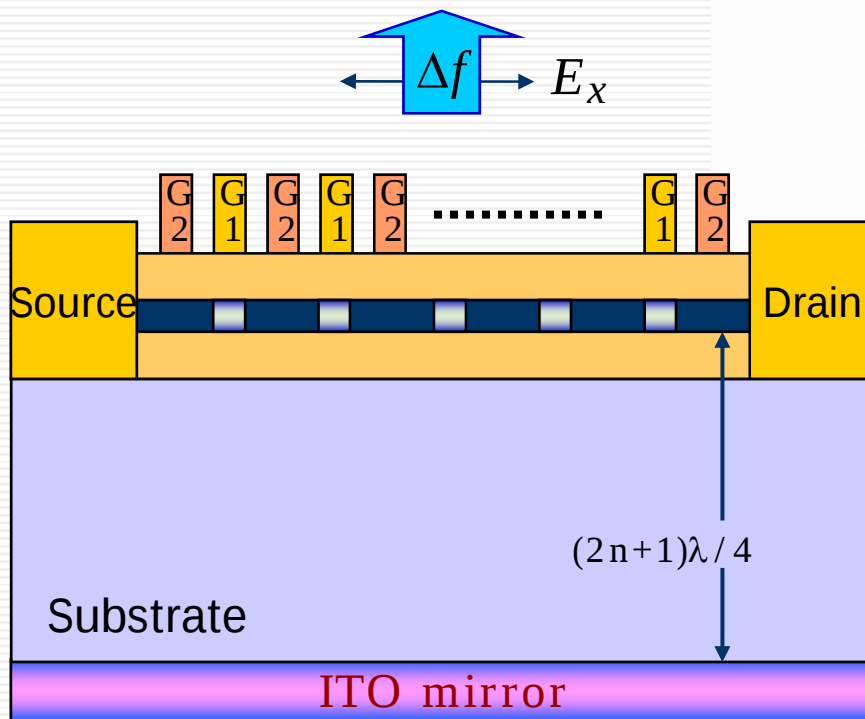
(T. Otsuji et al., *Optics Express* **14**, 4815(2006))



テラヘルツ電磁波放射のFDTDシミュレーション

(T. Otsuji et al., *Optics Express* **14**, 4815(2006))

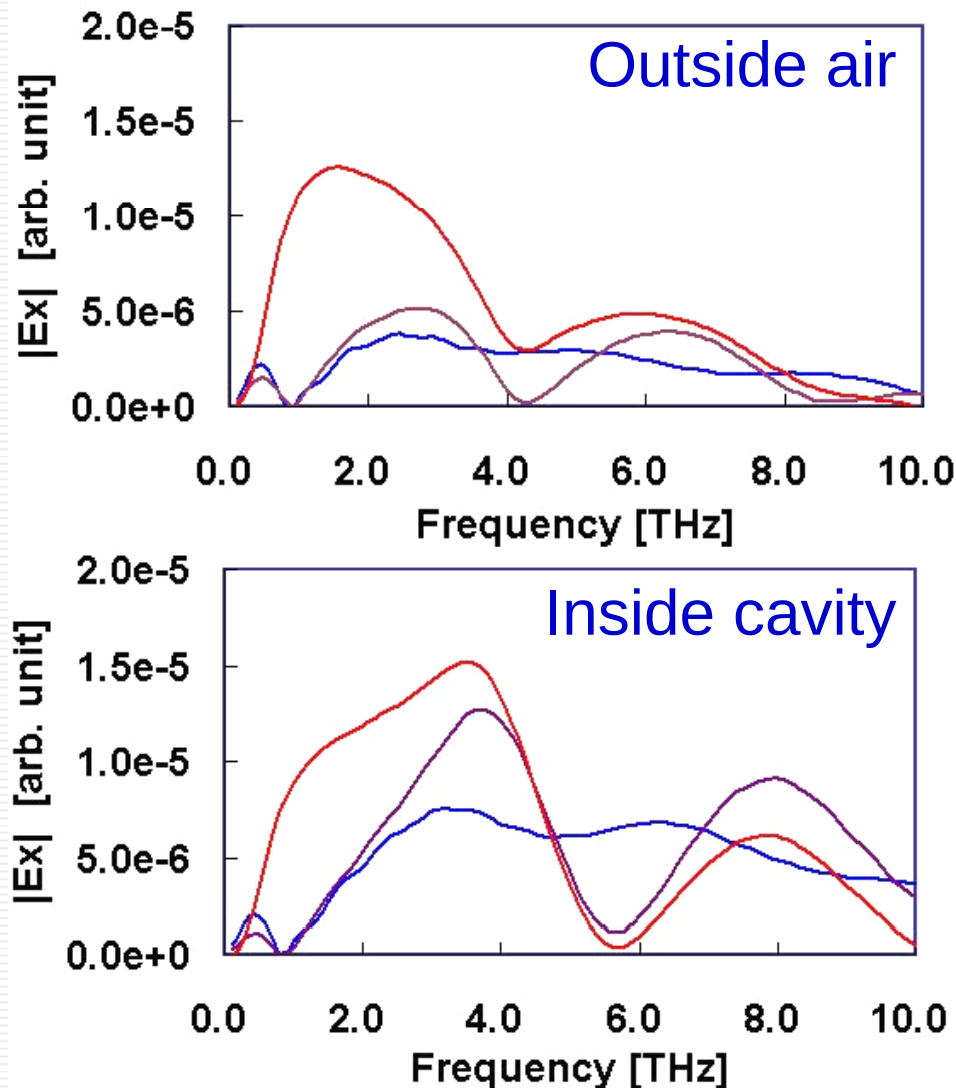
CW excitation at 5.1 THz



E_x distribution in x - z plane

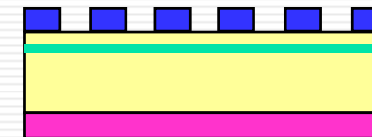
新構造導入による テラヘルツ電磁波放射特性の改善効果

(T. Otsuji et al., Optics Express **14**, 4815(2006))



$$\begin{aligned}\omega_{p1} &: 1.27 \text{ THz} \\ \omega_{p2} &: 3.42 \text{ THz} \\ \omega_L &: 3.42 \text{ THz}\end{aligned}$$

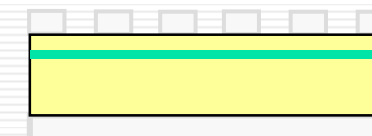
— w/ mirror, gate



— w/ mirror, w/o gate



— w/o mirror, gate



帯域と量子効率の理論限界

(T. Otsuji et al., *Optics Express* **14**, 4815(2006))

- Excitation bandwidth limited by photoresponse:

$$i_{ph}(t) = \frac{Pe\eta_{IB}}{h\nu} \left[\left(1 + \frac{m^2}{2}\right) + 2m \cdot \frac{1 - e^{-i\omega_m\tau_d}}{i\omega_m\tau_d} \cdot e^{i\omega_m t} \right]$$

$$\Rightarrow f_{-3dB} \approx 10 \text{ THz}$$

- Saturation of incident power:

$$P_{in-sat} = \frac{n_{ph-sat} h\nu}{\eta_{IB} \tau_{ph}} \approx \mathbf{O[10 \text{ kW/cm}^2]}$$

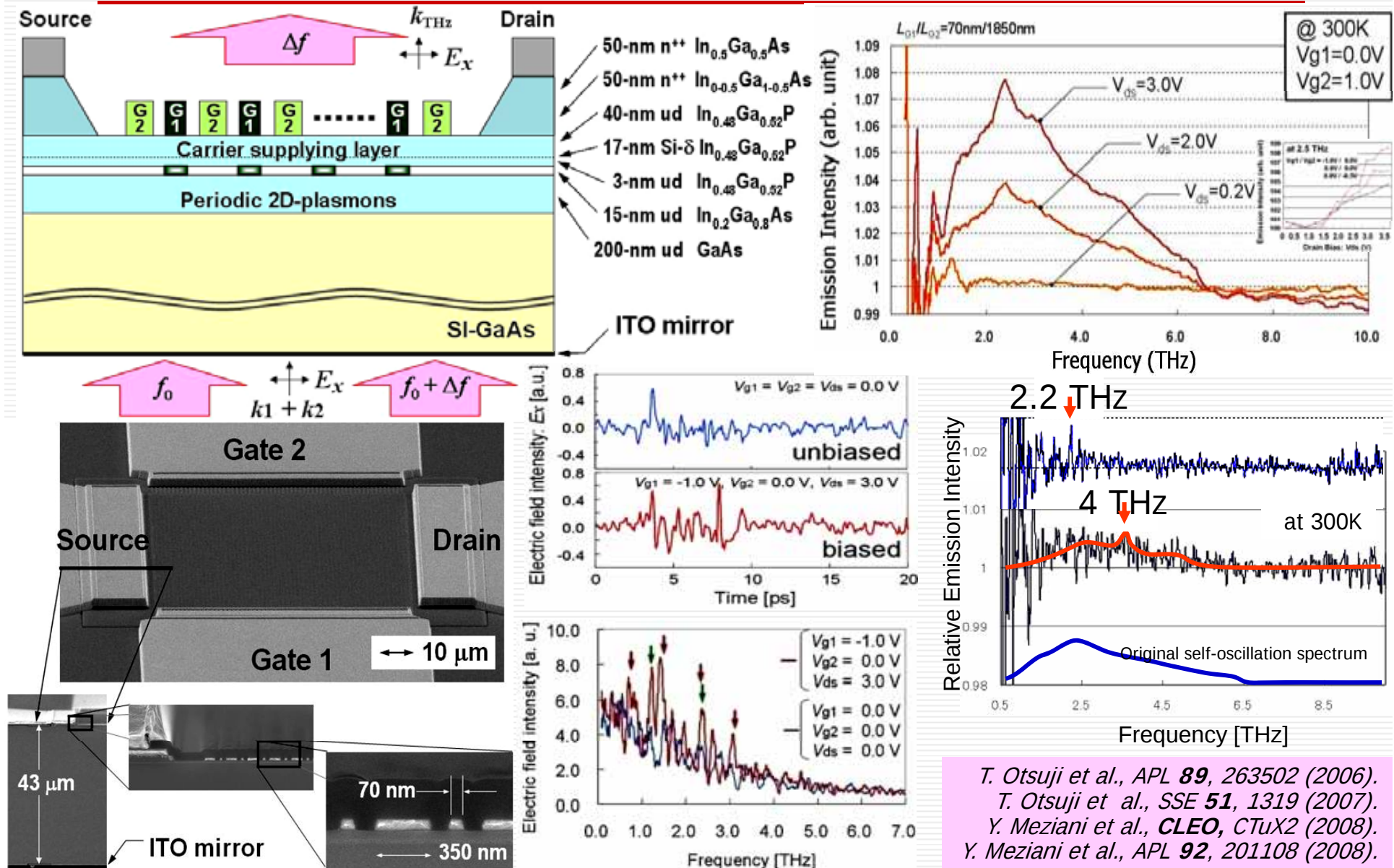
- Open-loop maximum-available radiation power:

$$P_{out-sat} \approx G \cdot Z_{air} \cdot j_{p-sat}^2 \approx \mathbf{O[10 \text{ W/cm}^2]}$$

- Open-loop quantum efficiency:

$$P_{out-sat} / P_{in-sat} \approx 10^{-3}$$

メタルゲート・GaAs系ヘテロ接合材料による 試作・評価結果：世界初の室温THz放射実現

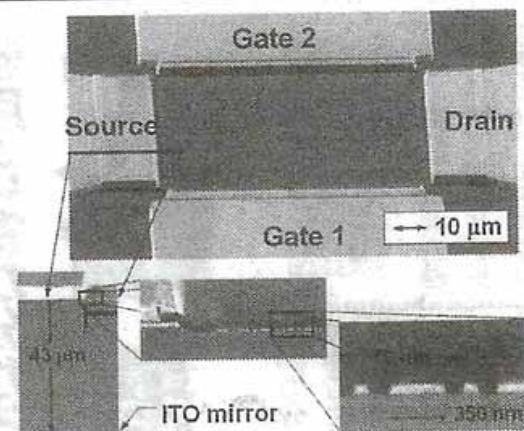


T. Otsuji et al., APL **89**, 263502 (2006).
T. Otsuji et al., SSE **51**, 1319 (2007).
Y. Meziani et al., CLEO, CTuX2 (2008).
Y. Meziani et al., APL **92**, 201108 (2008).

室温下でコヒーレントな プラズモンモードのテラヘルツ放射に初めて成功

日刊工業新聞 2006.06.28

業 新 聞 Business & Technology



テラヘルツ波

室温で放射成功

東北大
な ど プラズモン共鳴利用

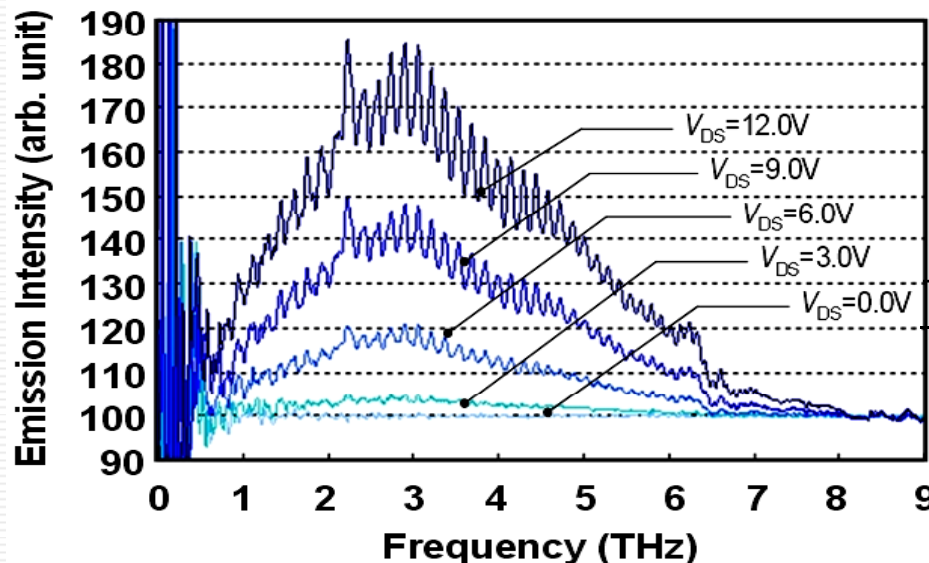
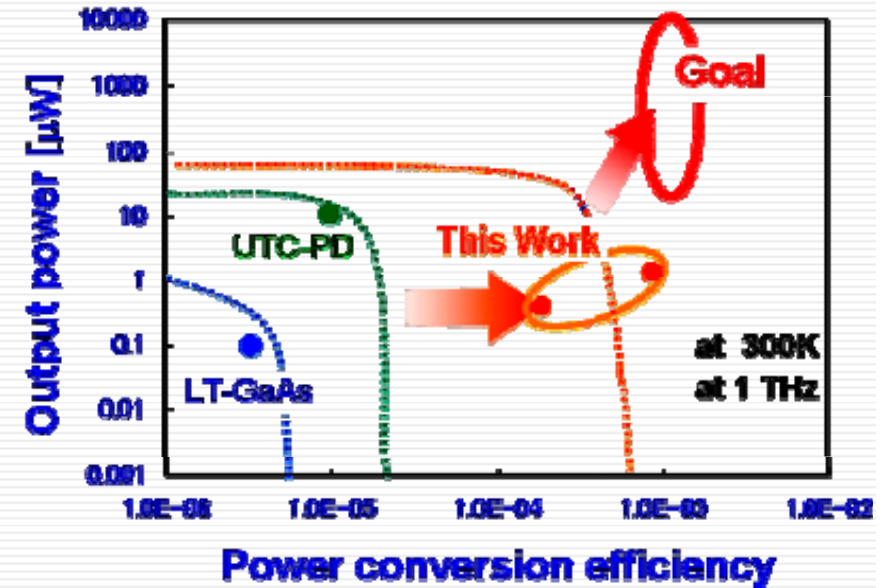
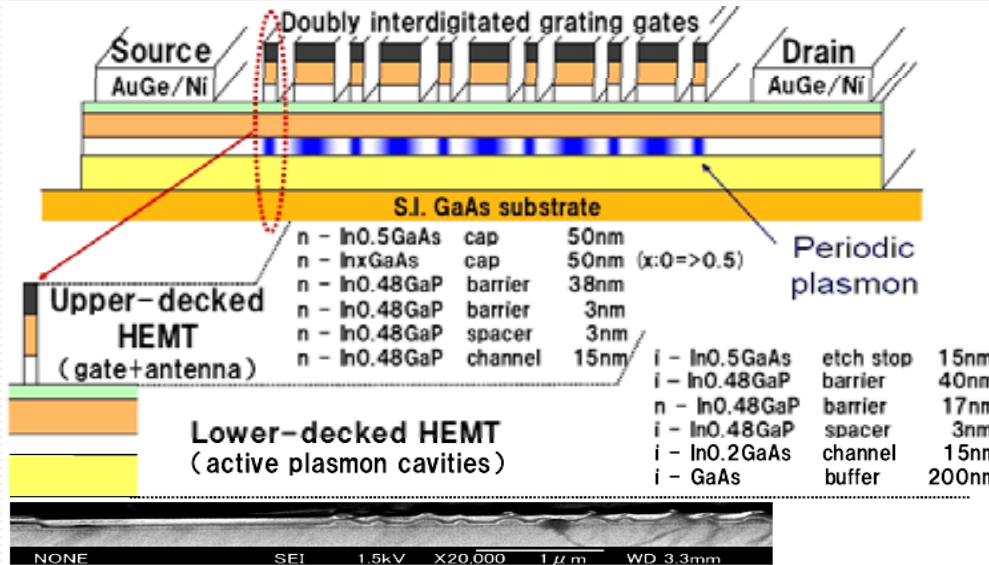
【仙台】東北大学電気通信研究所の尾辻泰一教授は、北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センターの佐野栄一教授らと共同で、プラズモン共鳴効果を利用した集積型テラヘルツ光源素子の電子顕微鏡写真

子を試作し、室温下でテラヘルツ帯電磁波を放射することに成功した。実用化されれば、長く未踏周波数領域とされてきたテラヘルツ帯を情報通信の中核として活用することが可能だという。

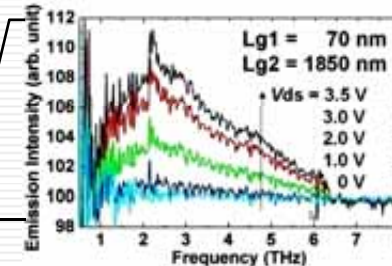
この成果を28日に米ペンシルベニア州で開催中のデバイス研究国際会議で発表する。テラヘルツ帯光源技術の開発はこれ



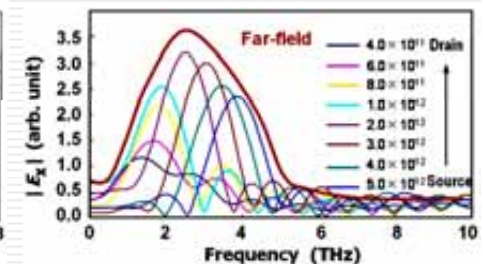
半導体ゲート格子電極の導入により 放射電力強度の1桁向上を実現



Conventional metal gate



Simulation reveals spectral broadening



T. Suemitsu et al., *DRC*, 157 (2007).
Y. Meziani et al., *CLEO*, CTuX2 (2008).
Y. Meziani et al., *APL* **92**, 201108(2008).
T. Nishimura et al., *DRC*, TBP (2008).

まとめ

■新原理・新構造2次元プラズモン共鳴型フォトミキサの開発

■GaAs系プロセスによる試作

■自励発振動作

- ✓ 広帯域 $BW = 0.5 \sim 6.5\text{THz}$
- ✓ μW オーダの室温放射
- ✓ 電力変換効率 $\eta = 10^{-3}$
- ✓ 従来比で $BW:3$ 倍、 $\eta:1$ 桁 $\uparrow$

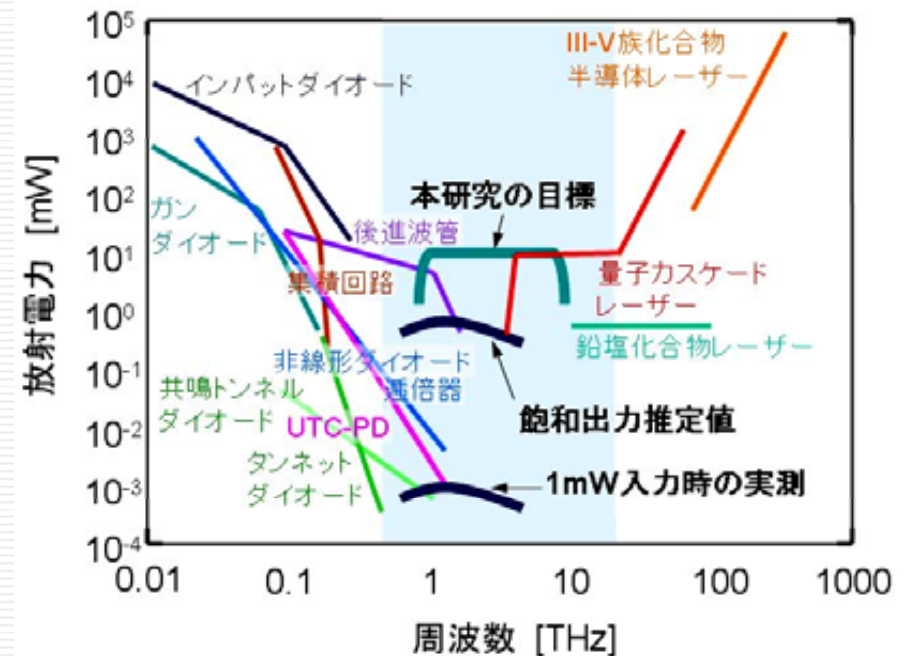
■フォトミキシング動作

- ✓ コヒーレントCW放射に至らず
- ✓ 光注入同期の兆候を確認

■10THz、mW級の目標達成に向けて

■超周期ゲート格子構造の導入, アレイ化の導入

■InP系材料の導入, アンテナ・導波路構造集積化



研究成果

Peer-Reviewed Papers

[1] V. Ryzhii, A. Satou, T. Otsuji, and M. Shur, "Plasma mechanisms of resonant terahertz detection in two-dimensional electron channel with split gates," J. Appl. Phys., Vol. 103, Iss. 1, pp. 014504-1-014504-6, (Jan. 2008)、被引用度数:0

[2] M. Meziani, M. Hanabe, T. Otsuji, and E. Sano, "Bolometric detection of terahertz radiation from new grating gates device," Physica Status Solidi (c), Vol. 5, No. 1, pp. 282-285, (Jan. 2008)、被引用度数:0

[3] A. El Fakir, R. Taouk, S. Bouhassira, E. Toppo, A. Yakovlev, V. Knap, J. Schuster, M. Meziani, T. Otsuji, A. Polsson, E. Mariani, S. Buljan, A. Shchegolev, Y. Chikilov, Ch. Gao, D. Theron, and A. Cappy, "Plasma oscillations in nanotransistors for room temperature detection and emission of terahertz radiation," Physica Status Solidi (c), Vol. 5, No. 1, pp. 282-285, (Jan. 2008)、被引用度数:0

[4] S. Taga, K. Inadune, and E. Sano, "Analysis of Smith-Purcell radiation in optical region," Optics Express, vol. 15, pp. 16221-16229, (Nov. 21st, 2007)、被引用度数:0

[5] T. Otsuji, Y. M. Meziani, M. Hanabe, T. Ishibashi, and E. Sano, "Emission of terahertz radiation from InGaP/InGaAs/GaAs grating-bicoupled plasmon resonant emitter," Solid State Electronics, Vol. 51, Iss. 10, pp. 1319-1327, (Oct. 2007)、被引用度数:0

[6] M. Hanabe, Y. M. Meziani, T. Otsuji, T. Ishibashi, and E. Sano, "Terahertz emission from InGaP/InGaAs/GaAs grating-bicoupled plasmon resonant emitter," IEICE Transactions on Electronics, vol. E90-C, No.5, pp. 985-992, (May 1st, 2007)、被引用度数:0

[7] Y. M. Meziani, T. Otsuji, M. Hanabe and E. Sano, "Threshold behavior of photoinduced plasmon-resonant self-oscillation in a new interdigitated grating gates device," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 46, No. 4B, pp. 2409-2412, (April 21st, 2007)、被引用度数:0

[8] Y. M. Meziani, T. Otsuji, M. Hanabe, T. Ishibashi, T. Uno and E. Sano, "Room temperature generation of terahertz radiation from a grating-bicoupled plasmon-resonant emitter," Applied Physics Letters, Vol. 90, issue 6, pp. 061105-1-3, (Feb. 2007)、被引用度数:1

[9] V. Ryzhii, A. Satou, and T. Otsuji, "Plasma waves in two-dimensional electron-hole system in gated graphene heterostructures," Journal of Applied Physics, vol. 101, Issue 2, pp. 024509-1-5, (Jan. 2007)、被引用度数:0

[10] T. Otsuji, Y. M. Meziani, M. Hanabe, T. Ishibashi, T. Uno and E. Sano, "Grating-bicoupled plasmon-resonant terahertz emitter fabricated with GaAs-based heterostructure metamaterial," Applied Physics Letters, Vol. 90, issue 26, pp. 261108-1-3, (Dec. 2006)、被引用度数:0

[11] T. Nishimura, M. Hanabe, M. Miyamoto, T. Otsuji and E. Sano, "Terahertz frequency multiplier operation of 2-D plasmon resonant photomixer," IEICE Transactions on Electronics, Vol. 89, No. 10, pp. 1005-1011, (Oct. 2006)、被引用度数:2

[12] M. Hanabe, M. Miyamoto, T. Otsuji and E. Sano, "Structure sensitive design for wider tunable operation of terahertz plasmon resonant photomixer," IEICE Transactions on Electronics, Vol. 89, No. 7, pp. 985-992, (Jul. 2006)、被引用度数:2

[13] T. Otsuji, Y. M. Meziani, and E. Sano, "A grating-bicoupled plasmon-wave photomixer with resonant-cavity enhanced structure," Optics Express, Vol. 14, No. 11, pp. 4815-4825, (May 2006)、被引用度数:0

[14] V. Ryzhii, M. Ryzhii, I. Khmyrova, T. Otsuji and M. Shur, "Resonant terahertz photomixing in integrated high-electron-mobility transistor and quantum-well infrared photodetector device," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 45, No. 4B, pp. 3648-3651 (April 2006)、被引用度数:0

[15] M. Hanabe, T. Otsuji, T. Ishibashi, T. Uno and V. Ryzhii, "Modulation effects of photo carriers on the THz plasma-wave resonance in high electron mobility transistors under interband photoexcitation," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 44, No. 6A, pp. 3842-3847 (June 2005)、被引用度数:9

[16] T. Otsuji, M. Hanabe and O. Ogawara, "Terahertz plasma wave resonance of two-dimensional electrons in InGaP/InGaAs/GaAs high-electron mobility transistors," Applied Physics Letters, Vol. 85, No. 11, pp. 2119-2121 (Sept. 2004)、被引用度数:33

	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度	合 計
誌上発表数	1件 (1件)	1件 (1件)	9件 (7件)	11件 (7件)	22件 (16件)
口頭発表数	13件 (5件)	16件 (8件)	28件 (16件)	28件 (14件)	85件 (43件)
申請特許数	1件 (0件)	1件 (1件)	0件 (0件)	1件 (0件)	3件 (1件)
登録特許数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)
受賞数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)
報道発表数	0件 (0件)	1件 (0件)	5件 (0件)	0件 (0件)	6件 (0件)
国際標準提案数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)

()内は海外