



2019.1011 IMS



テラヘルツ波が拓く応用展望と キラーアプリケーション開拓に向けた取り組み例

斗内政吉

大阪大学

1. 背景と展望

2. テラヘルツキラーアプリケーション例の提案

(1) 半導体R&D分析プラットフォームへの展開

(1) テラヘルツ放射顕微鏡 (LTEM)

(2) CMOS表面・パッシベーション評価

(3) ワイドギャップ半導体評価

(4) 太陽電池評価

(5) LSI不良個所特定装置

(2) バイオイオテラヘルツプラットフォームへの展開

(1) 近接場テラヘルツセンシングイメージングシステム

(2) 高分解能プローブレステラヘルツイメージング

(3) 微量・高感度テラヘルツマイクロ流路チップ

3. まとめ



謝辞



斗内研スタッフ:

村上博成、川山巖、芹田和則、酒井裕司 多くの学生・OB
スクリーンホールディングス

H. Nakanishi, A. Ito, T. Nishimura

産総研

**T. Mochizuki, J. Mitchell, K. Tanahashi, K. Shirasawa,
H. Takaton(solar cells and passivation)**

理研

M. Yamashita(LSI Failure Analysis)

NECエレクトロニクス

K. Nikawa (LSI Failure Analysis)

浜松ホトニクス

T. Matsumoto (LSI Failure Analysis)

大阪大学

Y. Midoh, K. Miura, K. Nakamae (LSI Failure Analysis)

T. Hosoi, T. Shimura, H. Watanabe(SiC Wafer and Devices)

1. 背景と展望

2. テラヘルツキラーアプリケーション例の提案

(1) 半導体R&D分析プラットフォームへの展開

(1) テラヘルツ放射顕微鏡 (LTEM)

(2) CMOS表面・パッシベーション評価

(3) ワイドギャップ半導体評価

(4) 太陽電池評価

(5) LSI不良個所特定装置

(2) バイオイオテラヘルツプラットフォームへの展開

(1) 近接場テラヘルツセンシングイメージングシステム

(2) 高分解能プローブレステラヘルツイメージング

(3) 微量・高感度テラヘルツマイクロ流路チップ

3. まとめ

テラヘルツテクノロジーの将来展望

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター
斗内政吉



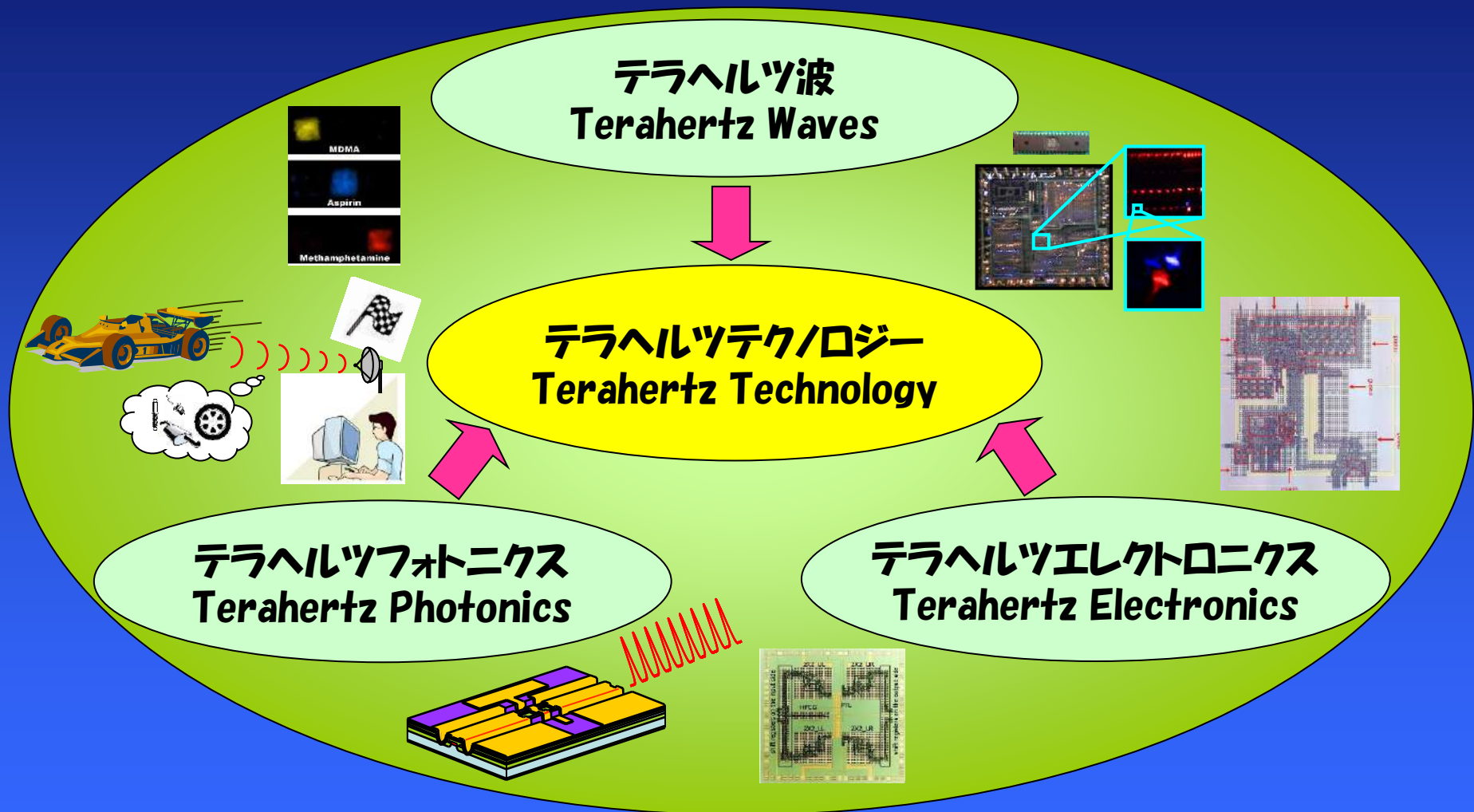
発表内容

1. テラヘルツテクノロジー分野形成の取組み
2. テラヘルツテクノロジーの目指すもの
3. テラヘルツが切り開く新しい社会・産業
4. テラヘルツ研究開発現状
5. 推進すべき課題
6. まとめ

テラヘルツテクノロジー動向調査委員会 総務省委託テレコム先端技術研究支援センター実施(2004.4-2005.3)

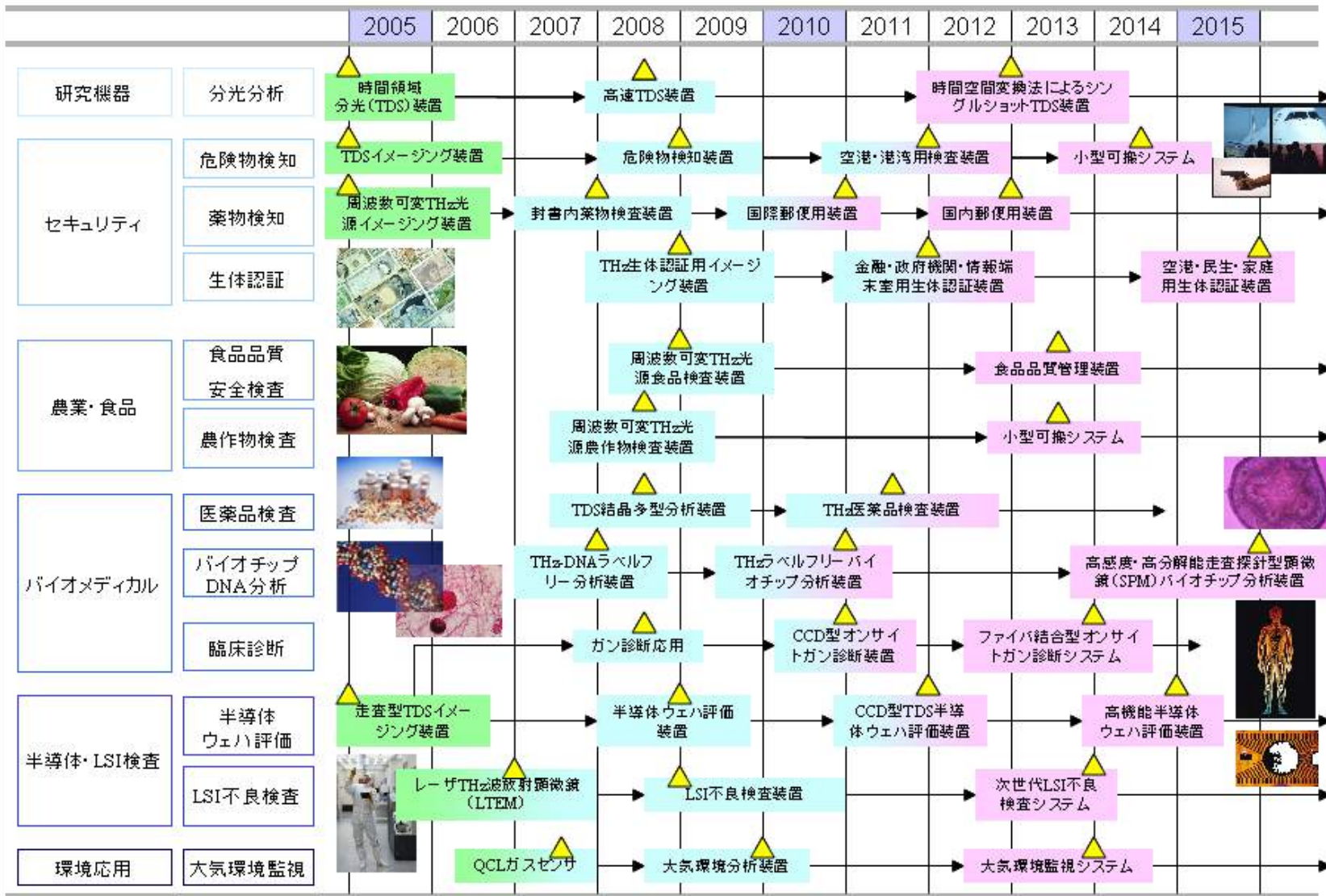
斗内政吉	大阪大学	榎木孝知	NTTフォトニクス研究所	山下雅弘	セスアイ精工
平川一彦	東京大学	小宮山進	東京大学	小川雄一	東北大学
川瀬晃道	理化学研究所	原田直樹	富士通	犬塚博誠	三菱重工業株式会社
大竹秀幸	アイシン精機	大谷啓太	東北大学	山下正嗣	理化学研究所
粟津邦男	大阪大学	浅田雅洋	東京工業大学	井上卓	グローリー工業
南出泰亜	理研仙台	ベイジョンソク	名古屋工業大学	大澤秀一	大和総研
近藤公伯	大阪大学	尾辻泰一	九州工業大学	廣住知也	アイシン精機
森 勇介	大阪大学	永妻忠夫	NTT-MSI研究所	佐野栄一	北海道大学
深澤 亮一	栃木ニコン	和田 修	神戸大学	岩岡秀人	横河電機
谷 正彦	大阪大学	小川 洋	沖電気工業	稲谷順司	宇宙航空研究開発機構
竇迫 巖	情報通信研究機構	戸田裕之	大阪大学	島田洋蔵	産業技術総合研究所
平川 靖之	広島大学	永井直人	東レリサーチセンター	土井靖生	東京大学
田畑 仁	大阪大学	田中耕一郎	京都大学	平田晃正	大阪大学
四方潤一	東北大学	小田一郎	島津製作所	山中幸雄	情報通信研究機構
佐藤征二	協和メテックス	萬 伸一	超電導工学研究所	渡邊聡一	情報通信研究機構
藤巻 朗	名古屋大学	北山研一	大阪大学	伊藤 弘	NTTフォトニクス研究所
須藤 建	半導体研究所	阪井清美	情報通信研究機構	王 鎮	情報通信研究機構

テラヘルツ:新しい枠組みの提案

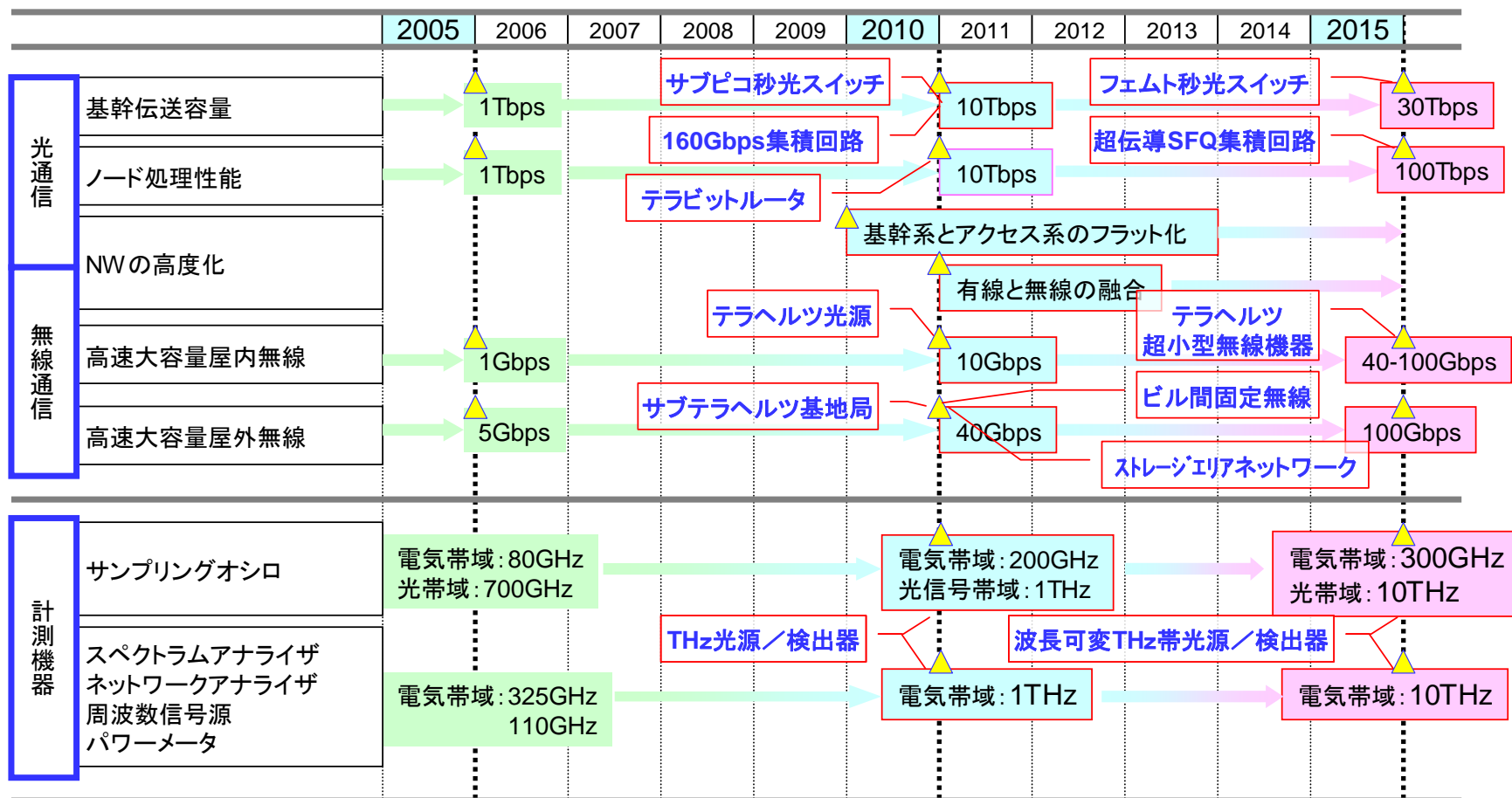


分光分析ロードマップイメージ

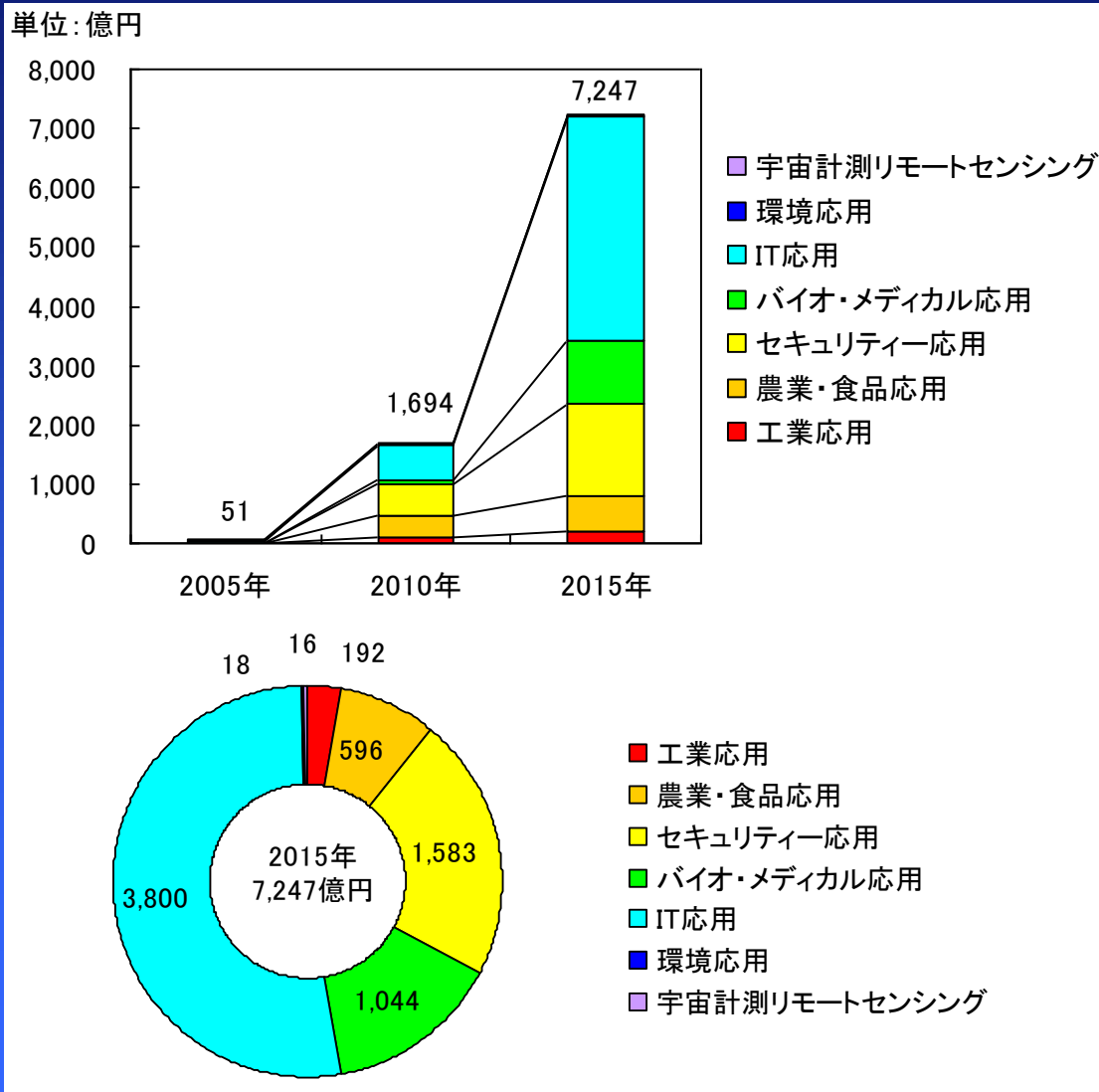
テラヘルツ分光・イメージング応用技術ロードマップ



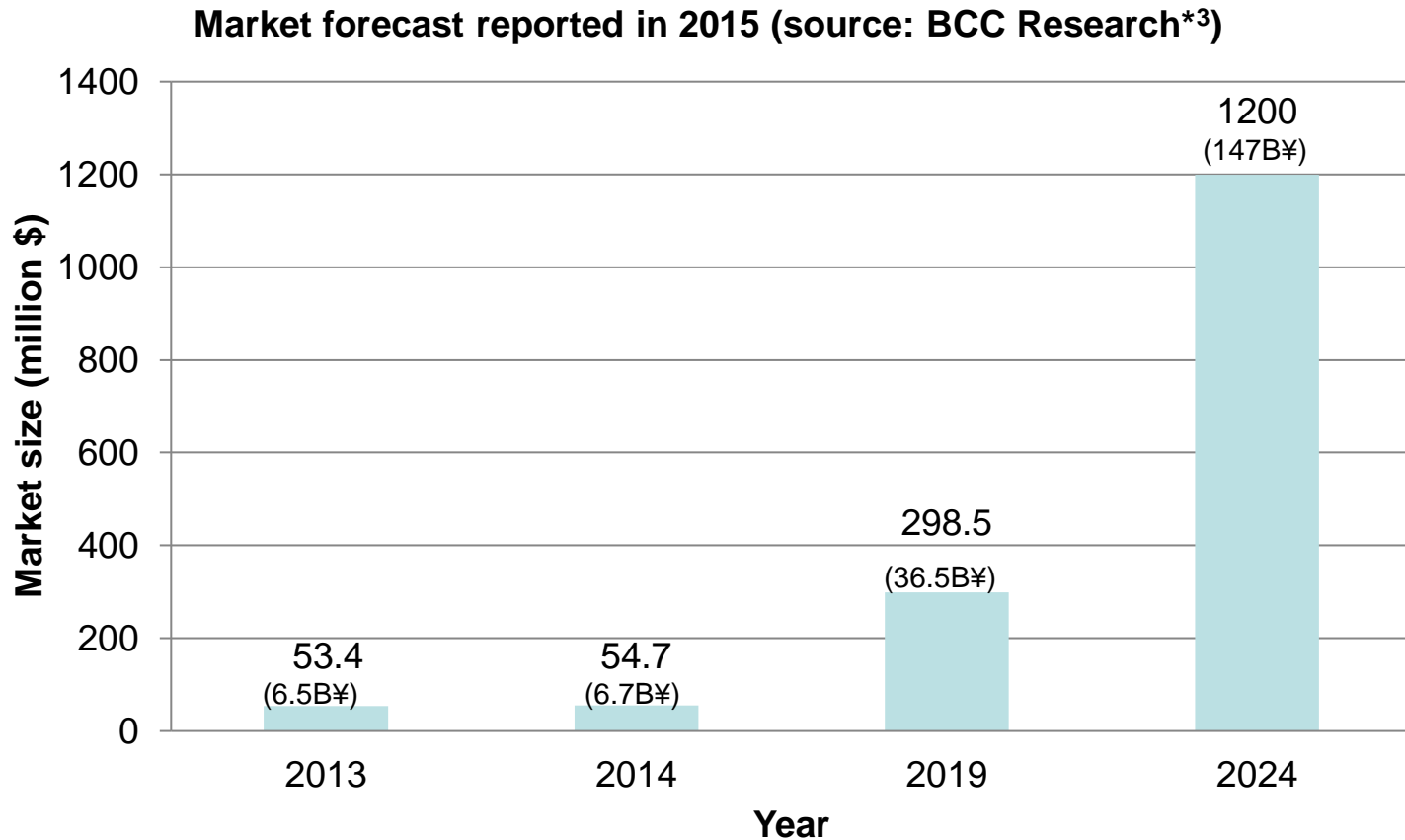
テラヘルツIT応用技術ロードマップ ～基盤技術:テラヘルツ・テラビット通信・計測



テラヘルツテクノロジー展開により期待される経済効果



Business growth in THz market



*3 BCC Research, "Terahertz Radiation Systems: Technologies and Global Markets", IAS029D (June., 2015)
<http://www.bccresearch.com/market-research/instrumentation-and-sensors/terahertz-radiation-systems-technologies-global-markets-report-ias029d.html>

1. 背景と展望

2. テラヘルツキラーアプリケーション例の提案

(1) 半導体R&D分析プラットフォームへの展開

(1) テラヘルツ放射顕微鏡 (LTEM)

(2) CMOS表面・パッシベーション評価

(3) ワイドギャップ半導体評価

(4) 太陽電池評価

(5) LSI不良個所特定装置

(2) バイオイオテラヘルツプラットフォームへの展開

(1) 近接場テラヘルツセンシングイメージングシステム

(2) 高分解能プローブレステラヘルツイメージング

(3) 微量・高感度テラヘルツマイクロ流路チップ

3. まとめ

1. 背景と展望

2. テラヘルツキラーアプリケーション例の提案

(1) 半導体 R & D 分析プラットフォームへの展開

(1) テラヘルツ放射顕微鏡 (LTEM)

(2) CMOS 表面・パッシベーション評価

(3) ワイドギャップ半導体評価

(4) 太陽電池評価

(5) LSI 不良個所特定装置

(2) バイオイオテラヘルツプラットフォームへの展開

(1) 近接場テラヘルツセンシングイメージングシステム

(2) 高分解能プローブレステラヘルツイメージング

(3) 微量・高感度テラヘルツマイクロ流路チップ

3. まとめ

1. 背景と展望

2. テラヘルツキラーアプリケーション例の提案

(1) 半導体R&D分析プラットフォームへの展開

(1) テラヘルツ放射顕微鏡 (LTEM)

(2) CMOS表面・パッシベーション評価

(3) ワイドギャップ半導体評価

(4) 太陽電池評価

(5) LSI不良個所特定装置

(2) バイオイオテラヘルツプラットフォームへの展開

(1) 近接場テラヘルツセンシングイメージングシステム

(2) 高分解能プローブレステラヘルツイメージング

(3) 微量・高感度テラヘルツマイクロ流路チップ

3. まとめ



斗内研究室・研究紹介



レーザーテラヘルツ放射顕微鏡 -LTEM-

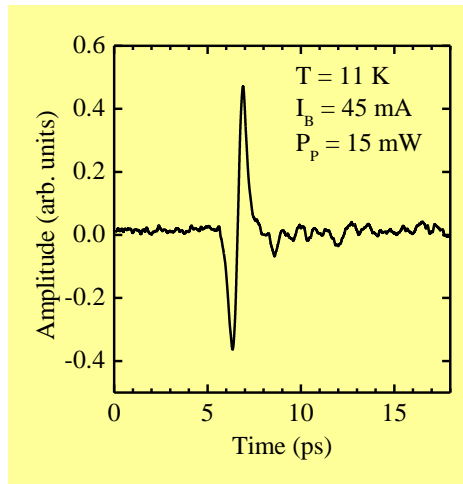
Only One 技術

斗内政吉
大阪大学レーザーエネルギー学研空センター
tonouchi@ile.osaka-u.ac.jp

レビュー: **Advanced Optical Materials** (in press)

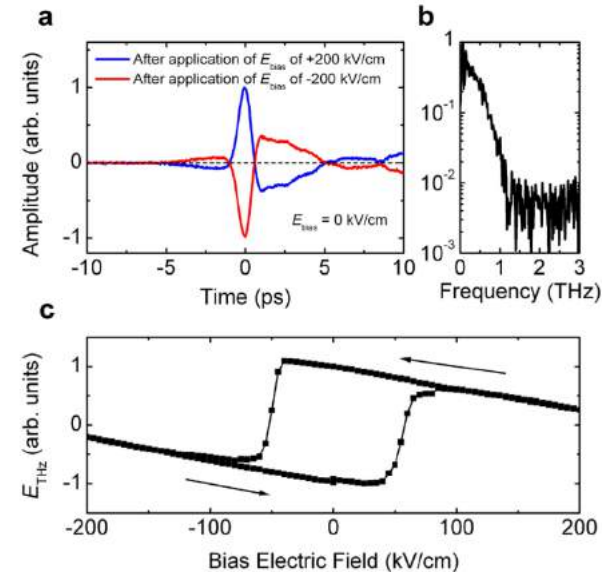
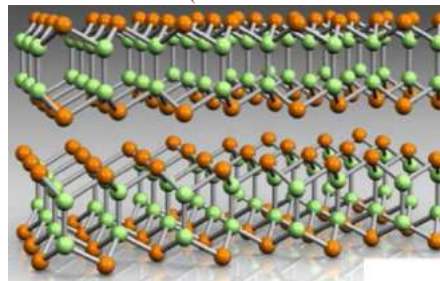
フェムト秒レーザー照射により、様々な物質からテラヘルツが放射される。放射機構としては、光電荷の励起とその移動による**超高速電流変調**、非線形効果などによる。前者の場合、放射される**テラヘルツ電磁波時間領域波形**には、様々な電子材料・デバイスの電荷ダイナミクスが反映され、本質的な**超高速物性科学**の研究に重要である。

フェムト秒レーザーパルス



テラヘルツパルス

$$\frac{\partial J}{\partial t}$$

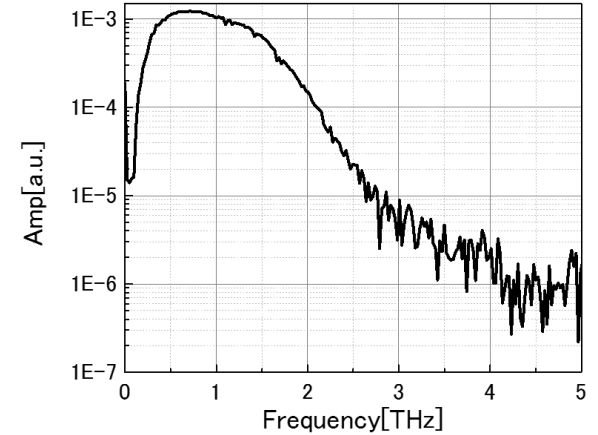
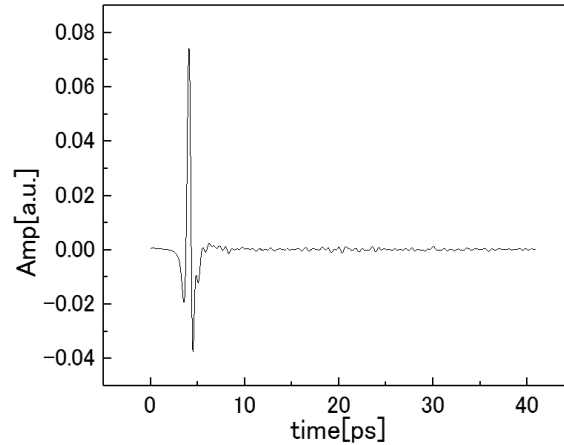
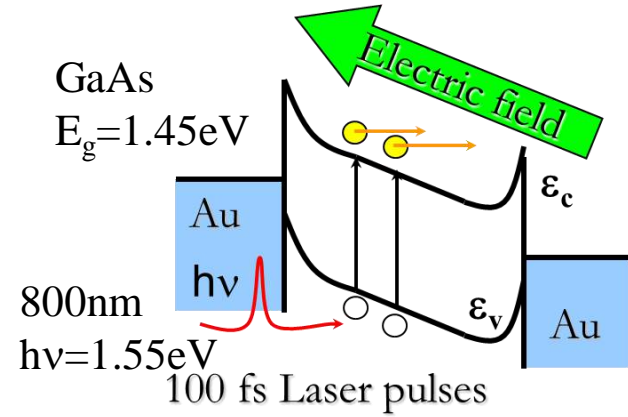


High T_c Superconductor

Jpn. J. Appl. Phys., 35(1996)2624.

Ferroelectrics BiFeO_3

Phys. Rev. Lett. 96, 117402 (2006).



$$n'(t) = -\frac{n(t)}{\tau_r} + G(t)$$

$$v_{e,h}'(t) = -\frac{v_{e,h}(t)}{\tau_s} + \frac{q_{e,h}}{m_{e,h}} E(t)$$

$$E(t) = E_b - \frac{P(t)}{\alpha \epsilon}$$

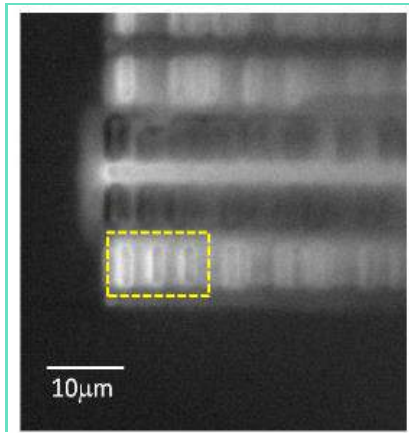
$$P'(t) = -\frac{P(t)}{\tau_r} + J(t)$$

Z. S. Piao, et al. Jpn. J. Appl. Phys., 39 (2000)96.

$$E_{THz} \propto \frac{\partial J}{\partial t} \propto n'(t)v(t) - n(t)v'(t) \propto E(t)$$

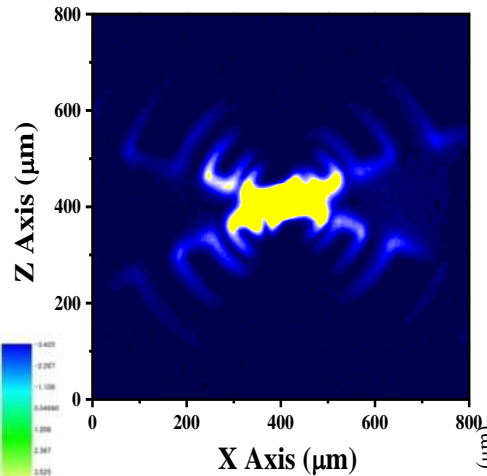
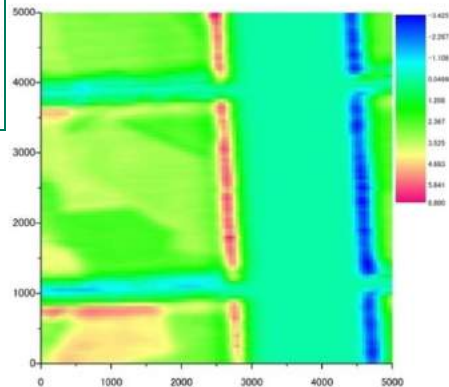
assuming $v = -\mu \cdot E$

レーザーを試料上で走査することにより、テラヘルツ放射2次元イメージが取得可能である。このとき、画像分解能はテラヘルツ波長ではなく、**励起レーザー波長で決まる**ため、ナノメートル分解能も達成可能である。このテラヘルツ放射顕微鏡 (LTEM) は、電荷のダイナミックな動きを可視化する独特の顕微鏡で、新しい科学・産業応用ツールとして期待される。



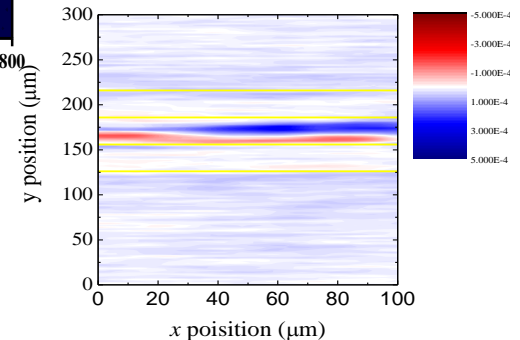
LSI

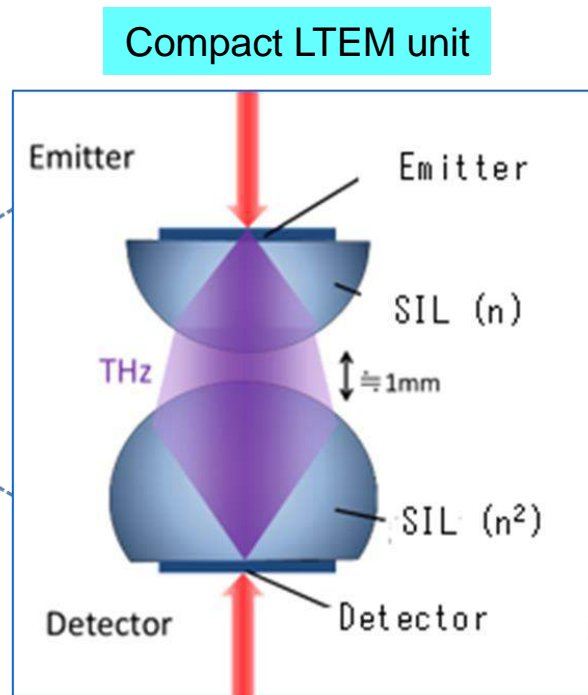
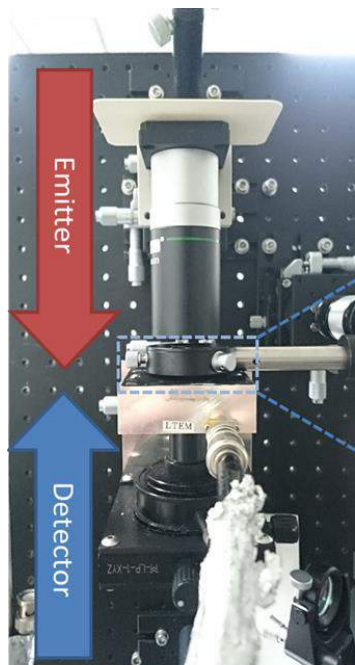
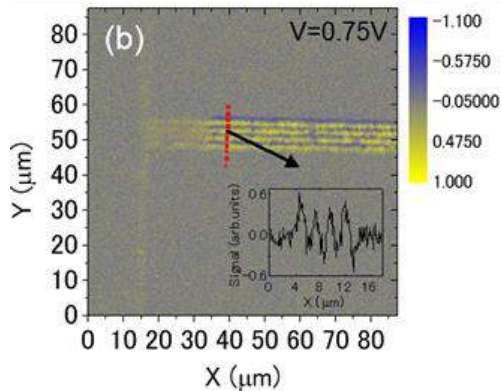
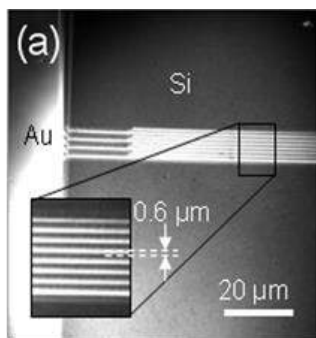
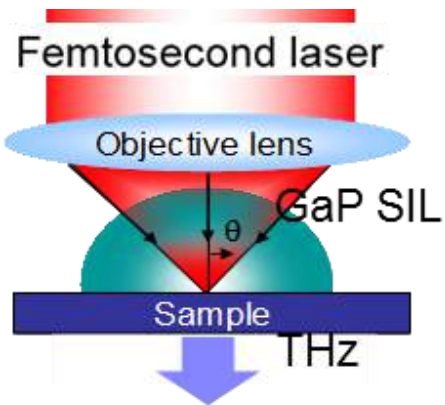
太陽電池



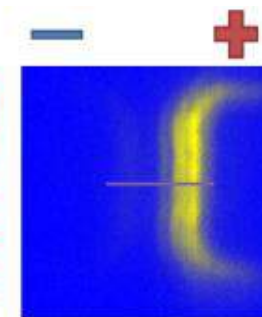
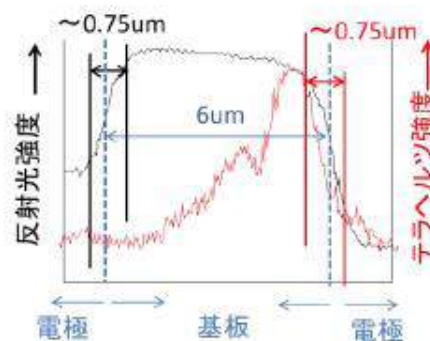
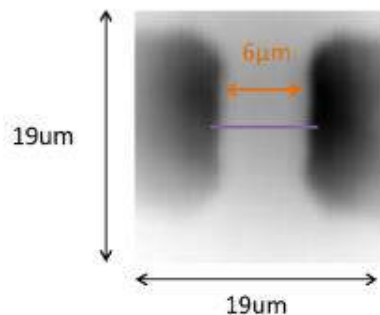
超伝導電流

強誘電ドメイン

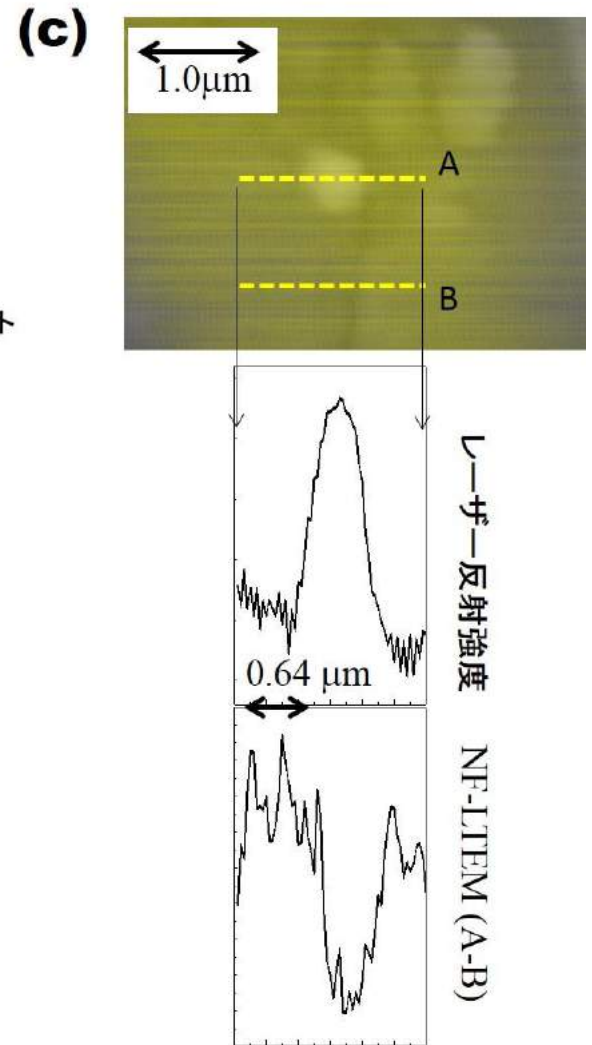
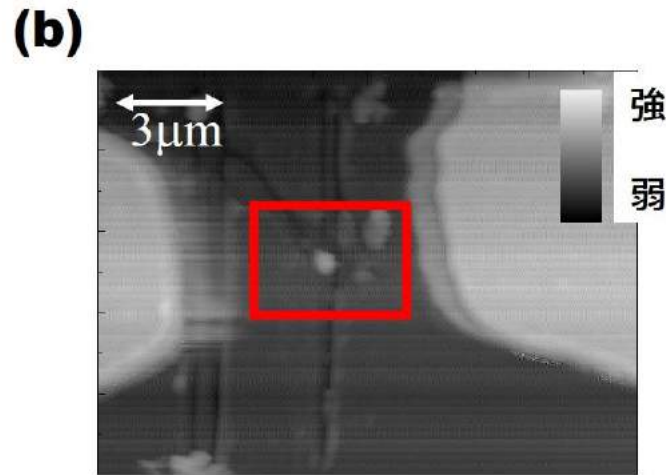
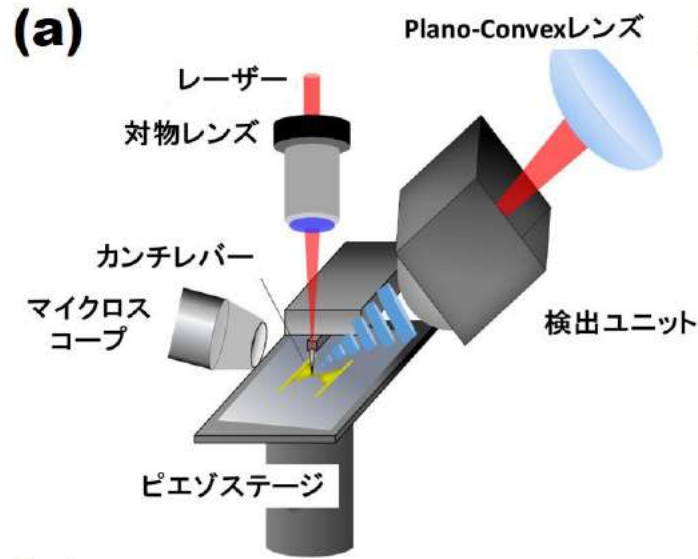
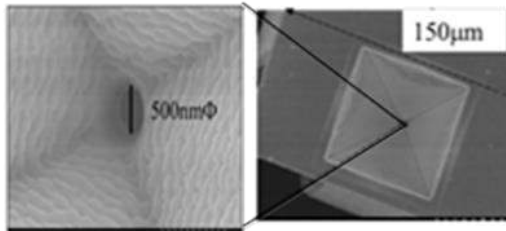
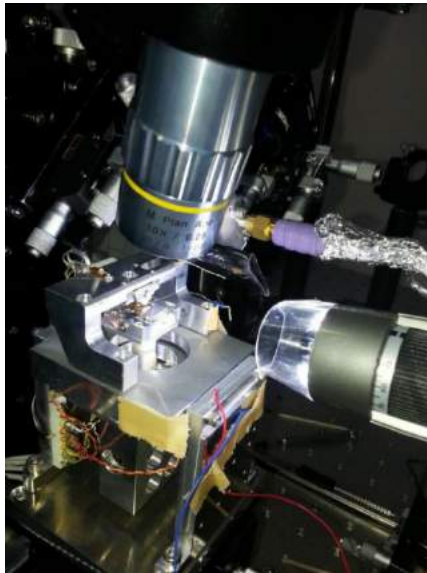




- Laser scan type
- Spatial resolution : $< 1\mu\text{m}$ (depend on NA of objective lens)
- Dynamic range: $\sim 3 \times 10^3$



走査プローブ型LTEM



1. 背景と展望

2. テラヘルツキラーアプリケーション例の提案

(1) 半導体R&D分析プラットフォームへの展開

(1) テラヘルツ放射顕微鏡 (LTEM)

(2) CMOS表面・パッシベーション評価

(3) ワイドギャップ半導体評価

(4) 太陽電池評価

(5) LSI不良個所特定装置

(2) バイオイオテラヘルツプラットフォームへの展開

(1) 近接場テラヘルツセンシングイメージングシステム

(2) 高分解能プローブレステラヘルツイメージング

(3) 微量・高感度テラヘルツマイクロ流路チップ

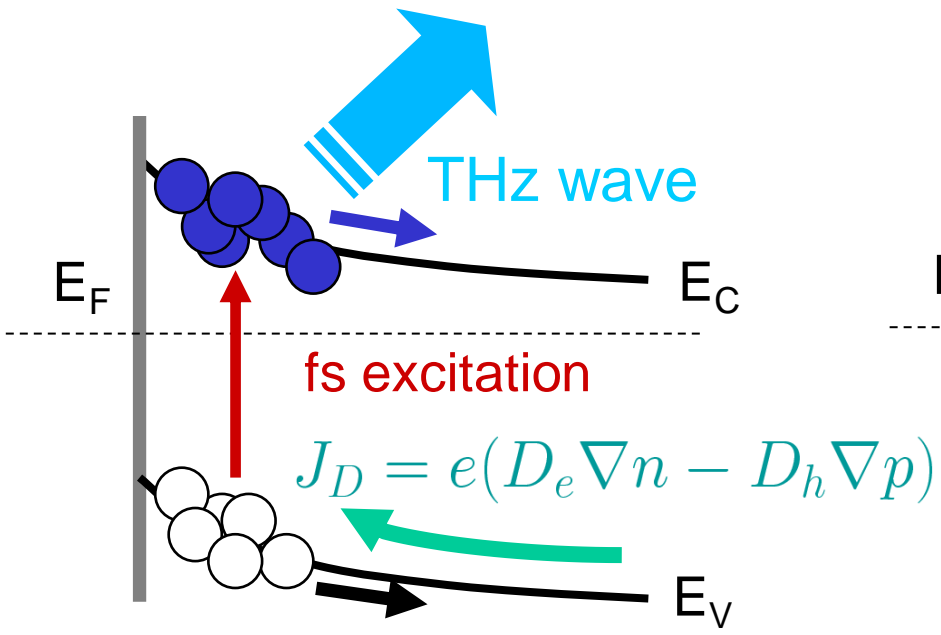
3. まとめ

半導体表面からのテラヘルツ放射

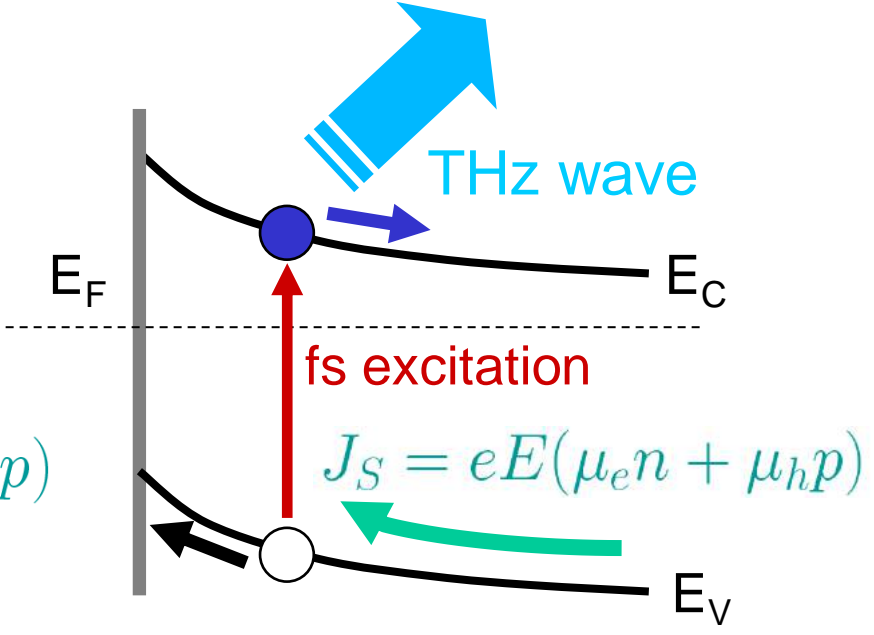
$$E_{THz} = \frac{\partial J}{\partial t} = \frac{\partial J_D}{\partial t} + \frac{\partial J_S}{\partial t}$$

光電荷の拡散
フォトデンバー効果

ビルトイン電界による
電荷の加速

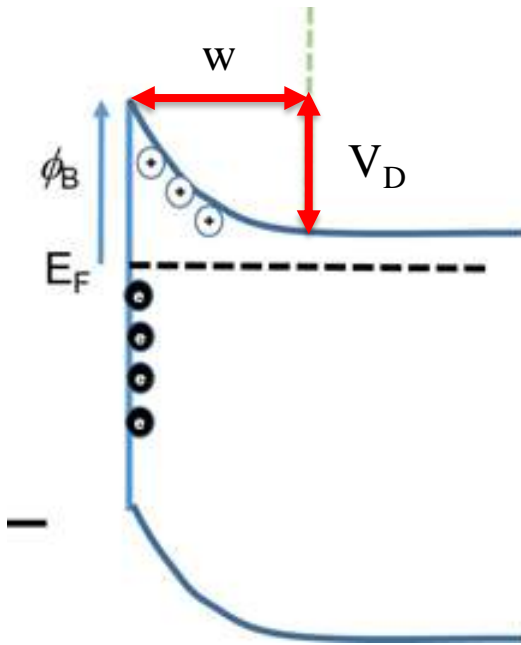


InAs, InSb等、
小さいバンドギャップ



InP, GaAs等、
通常のバンドギャップ

フォトデンバーか電界加速か？



空乏層

$$w = \sqrt{\frac{2\epsilon_s\epsilon_0}{eN_D} V_D}$$

光の侵入長 λ_L 物質と光の波長依存

電界加速

混合

フォトデンバー

$$w \gg \lambda_L$$

$$w \sim \lambda_L$$

$$w \ll \lambda_L$$

通常の半導体

Semi-Insulative

Lightly-doped

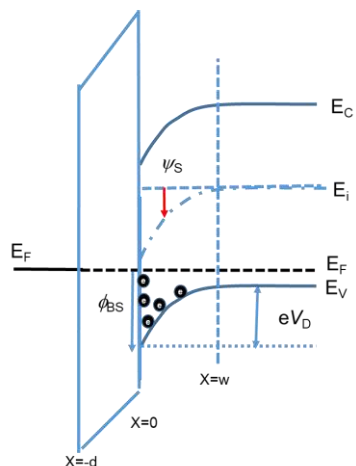
Heavily-doped

狭ギャップ半導体

All type

Unpublished

1. Carrier Acceleration by Built-in Field



$$E_{THZ} \approx E_s = \pm \frac{\sqrt{2}}{\beta L_D} F \left(\beta \psi_s, \frac{n_{p0}}{p_{p0}} \right)$$

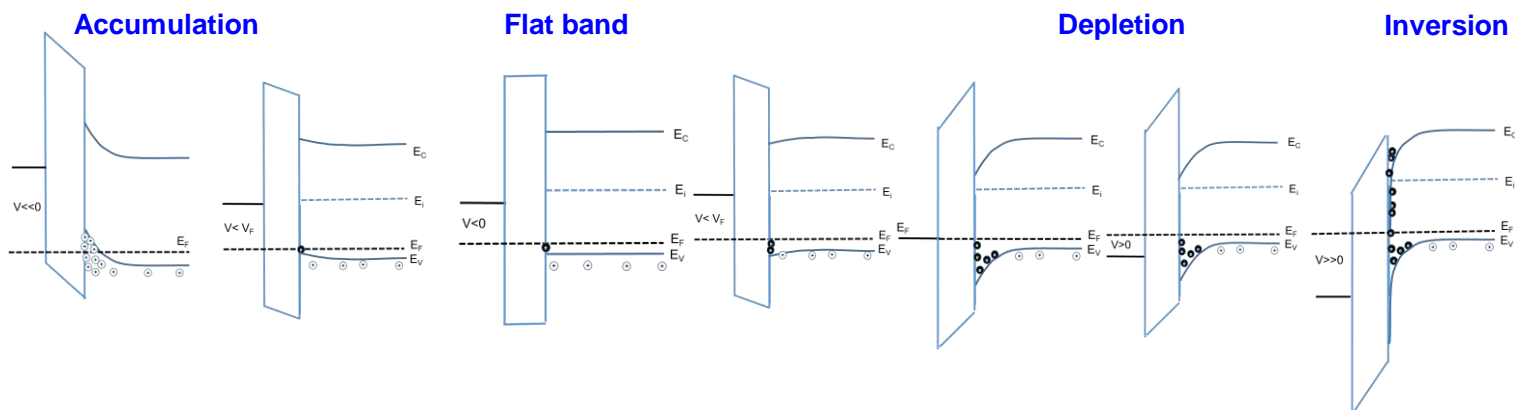
$$F \left(\beta \psi_s, \frac{n_{p0}}{p_{p0}} \right) = \sqrt{(e^{-\beta \psi_s} + \beta \psi_s - 1) + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} (e^{\beta \psi_s} - \beta \psi_s - 1)}$$

Near flat band

2. Diffusion Current

$$E_{THZ} \approx \frac{\mu_n^2 (e - 1)}{\beta^2 L_\lambda^3} (1 - \beta L_\lambda)$$

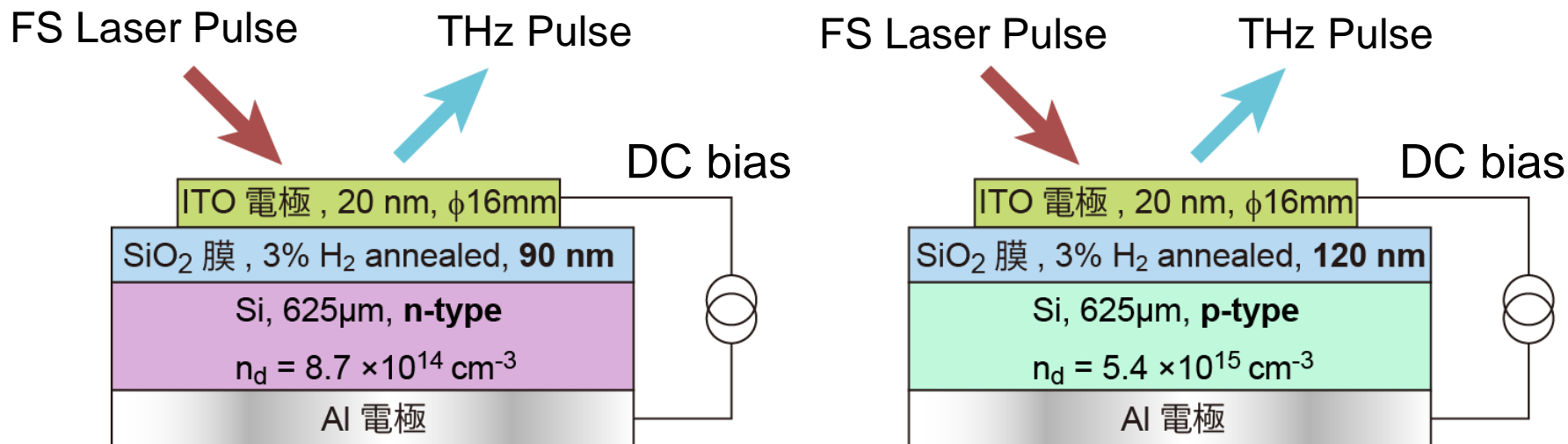
$$F_s = \sqrt{(e^{-\beta \psi_s} + \beta \psi_s - 1)}$$



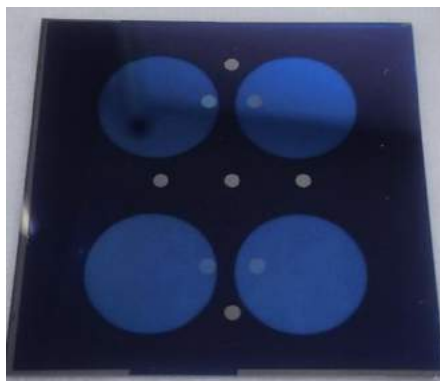
C-V計測との相関が期待される
→非接触評価への応用の可能性

Evaluation of Si MOS interface

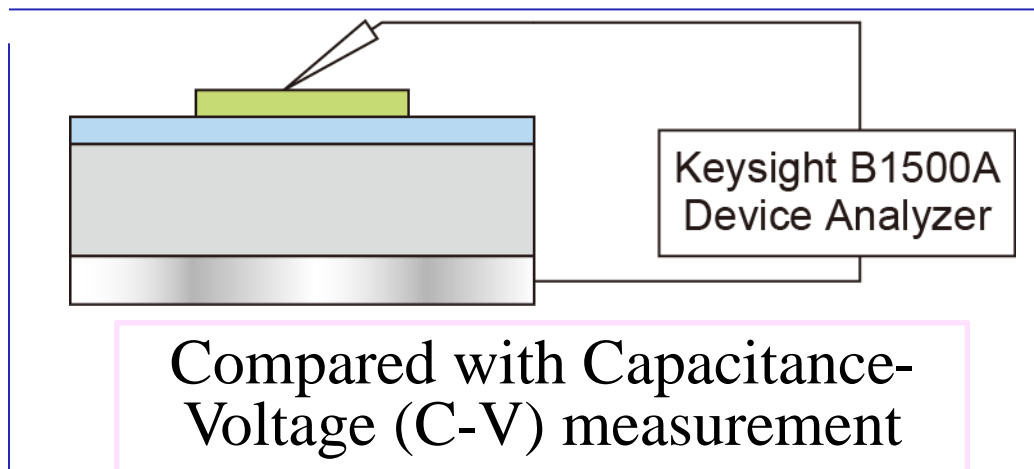
T. Mochizuki, Appl. Phys. Lett. 110, 163502 (2017)



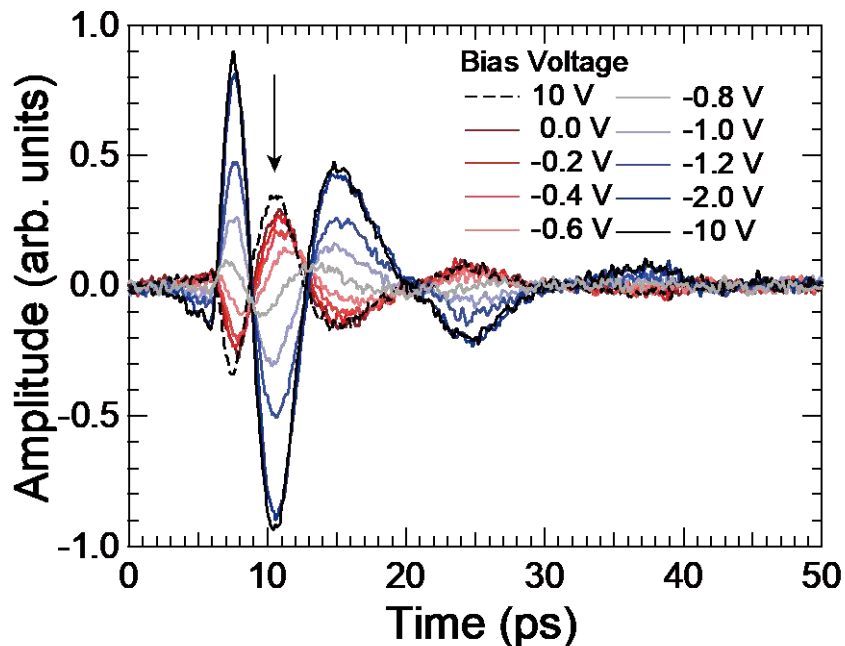
Wavelength 800 nm, 80MHz, 100fs, Laser spot 1cm, 100mW



Sample size : 5cm \times 5cm

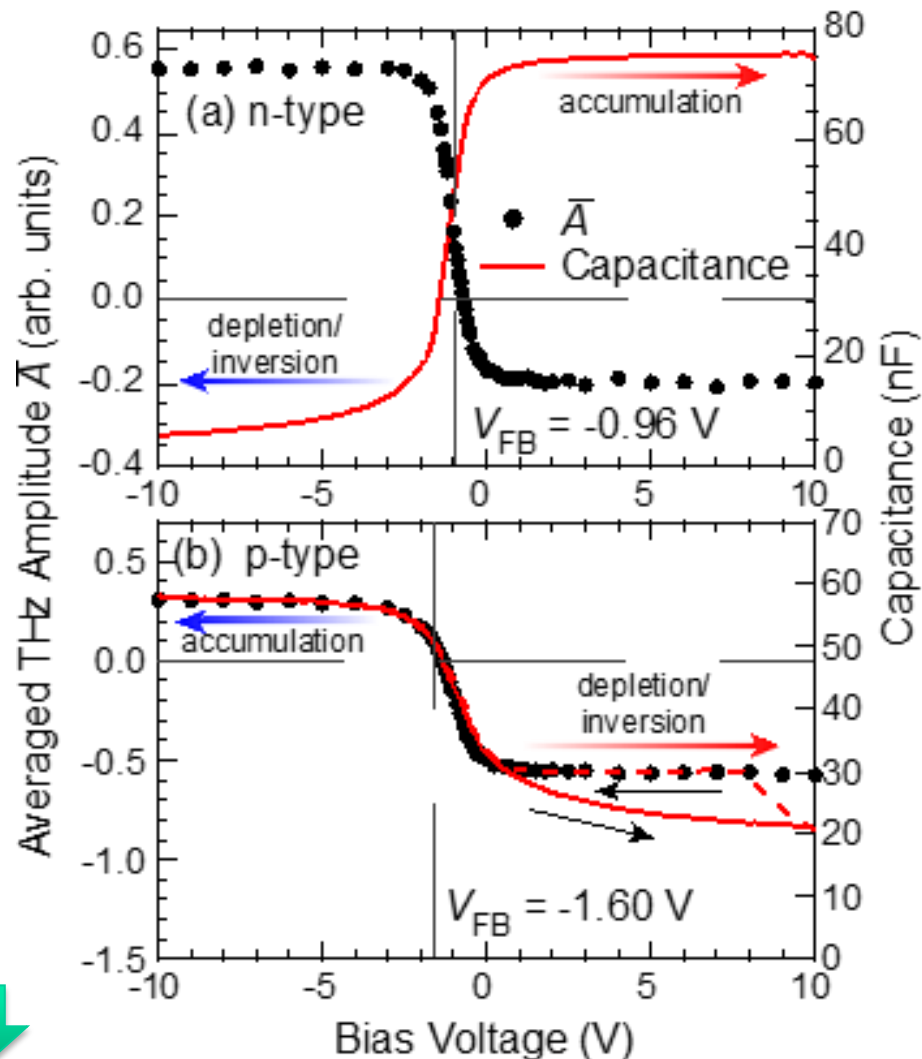


THz waveforms



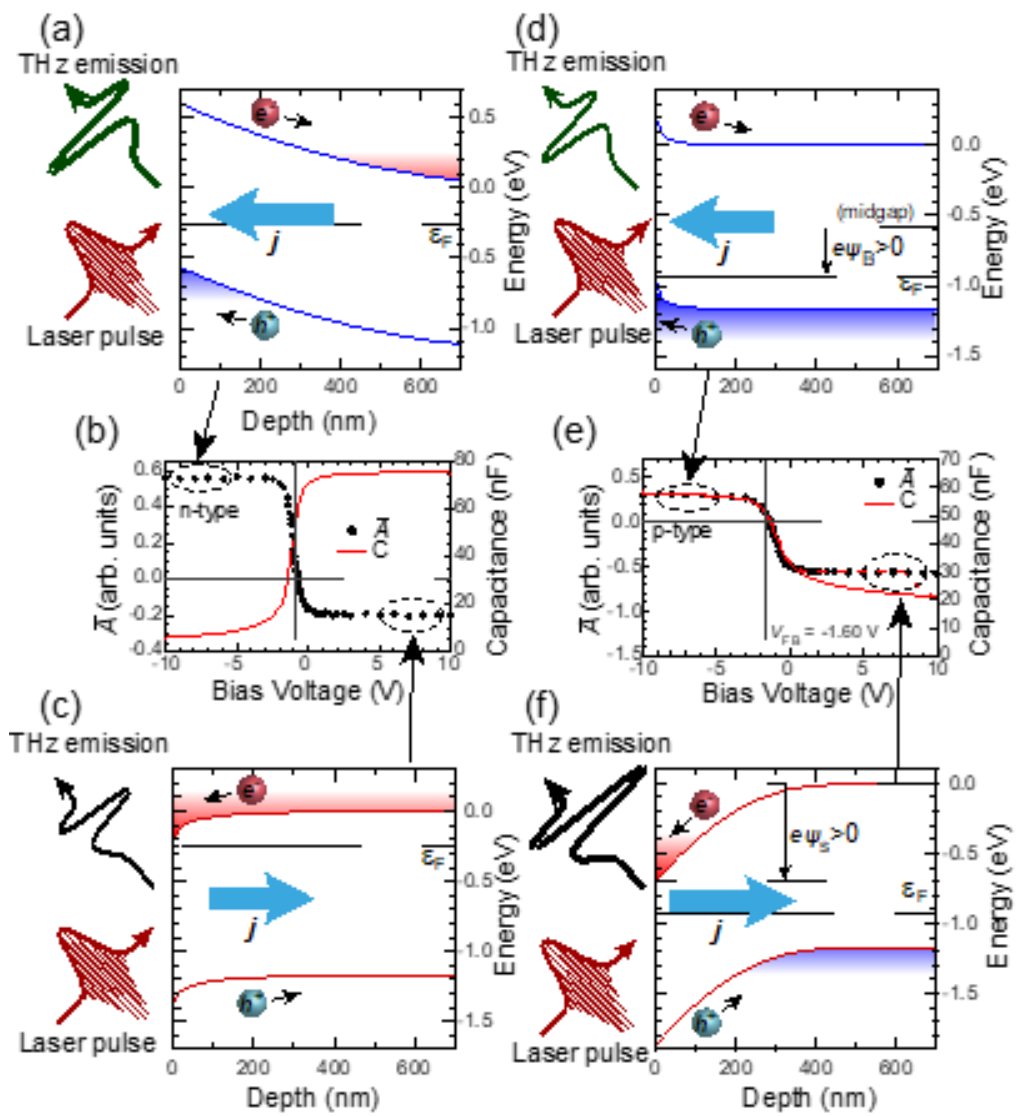
Polarity of THz radiation is inverted around the flat-band voltage at -0.95 V

Peak amplitude vs Bias voltage



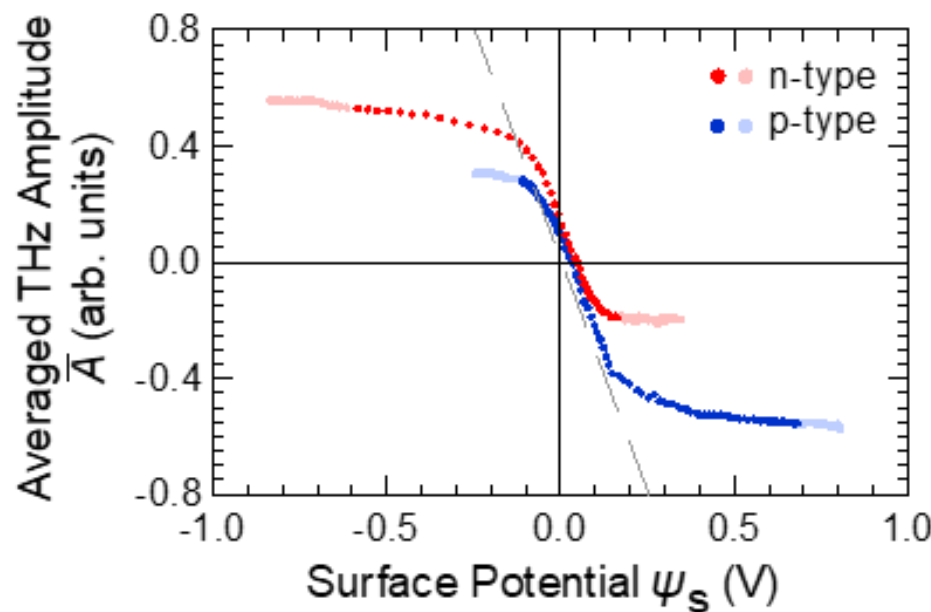
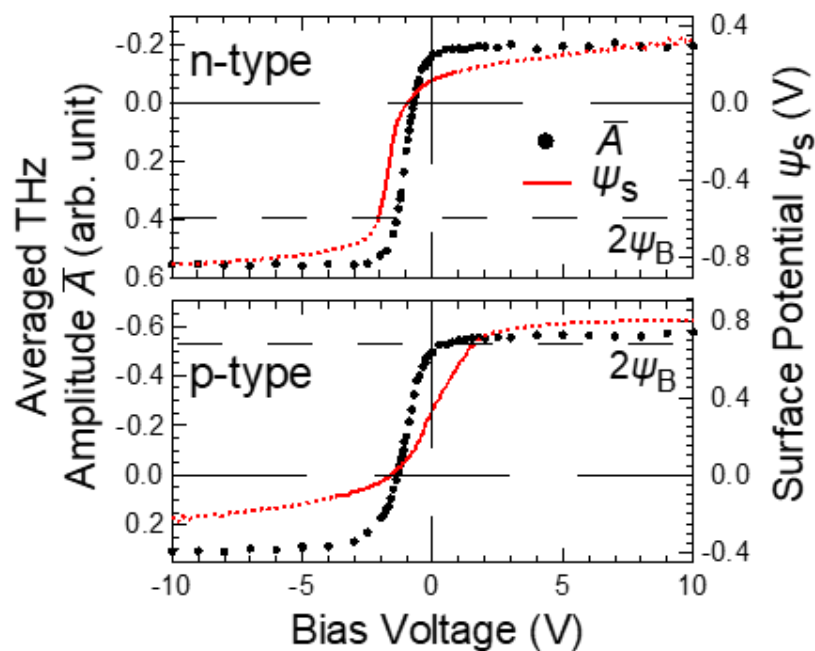
Non-contact inspection technique for passivation layer

Understanding the nature



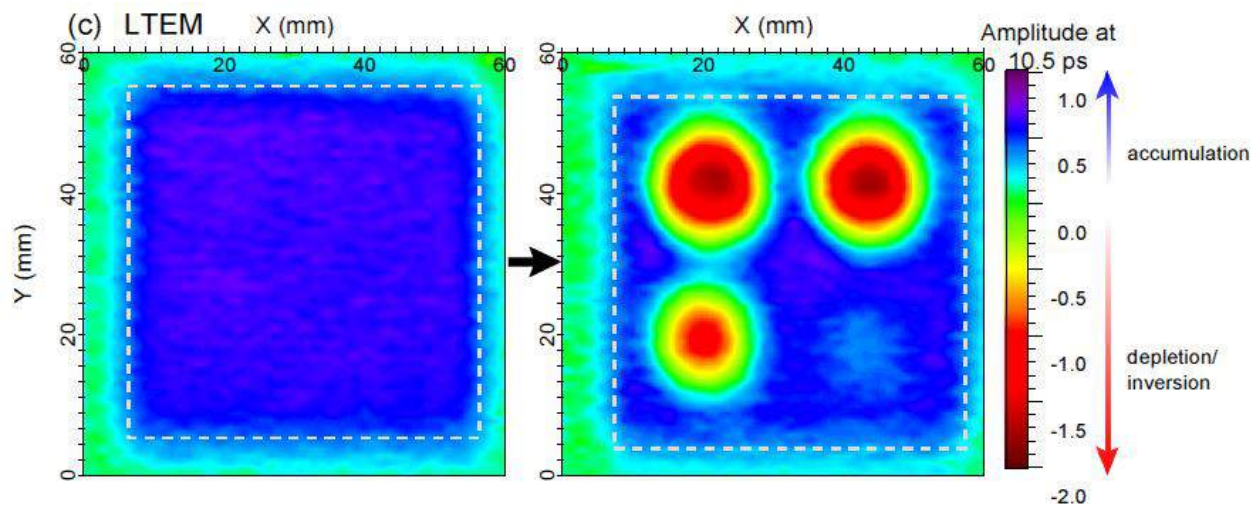
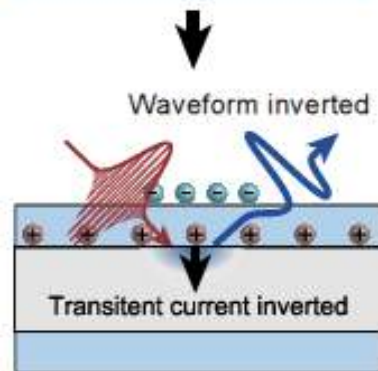
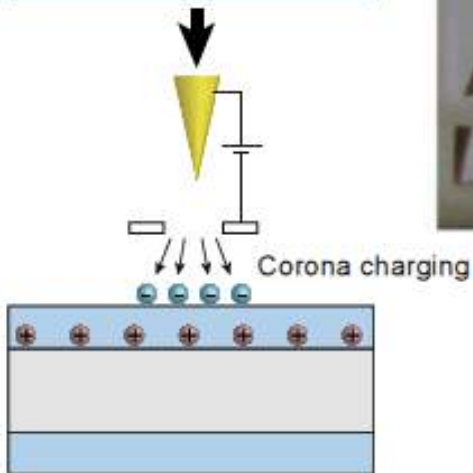
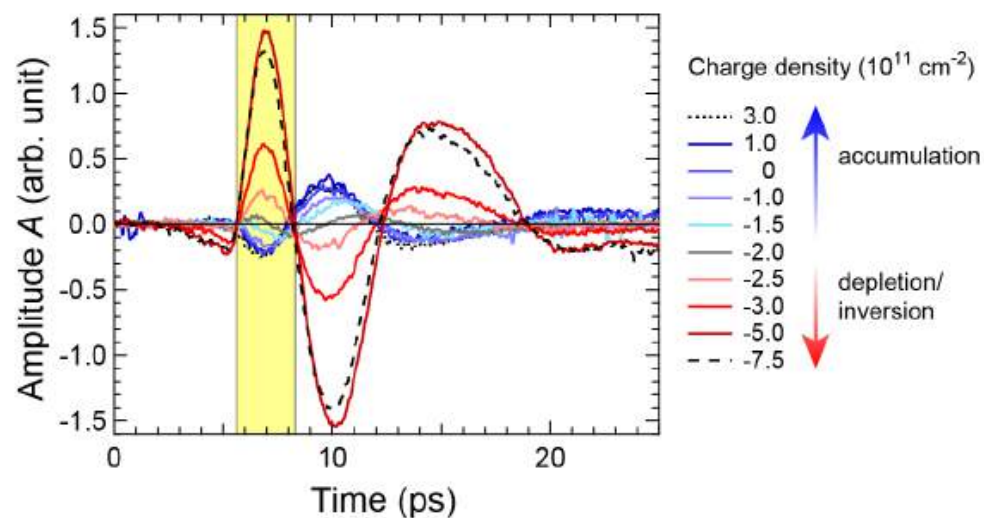
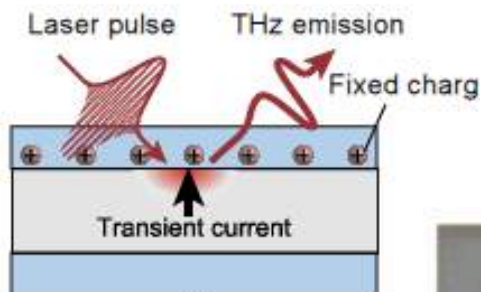
Explanation of the Relationship between Band diagram, THz Emission Amplitude and Capacitance

The relation between the surface potential and the amplitude of the laser THz emission

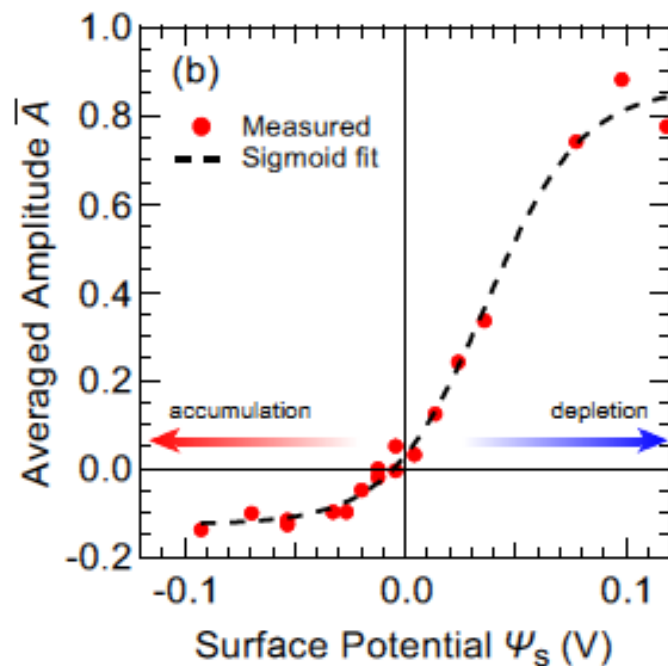
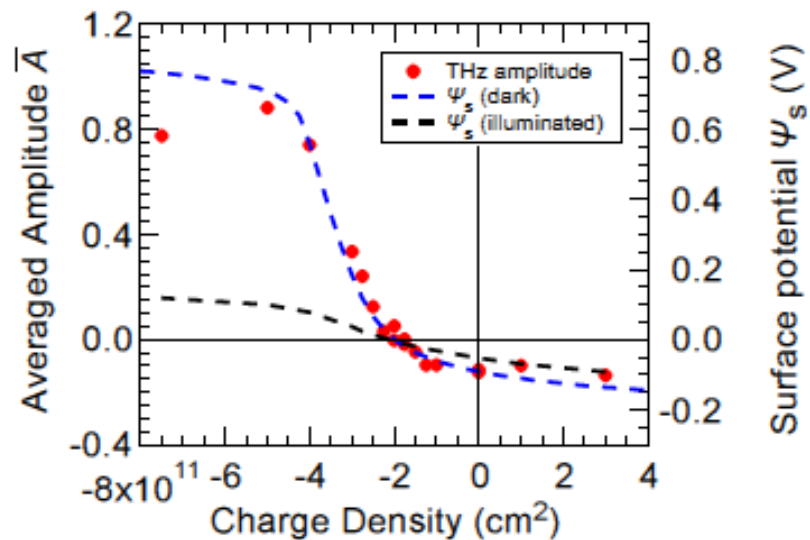
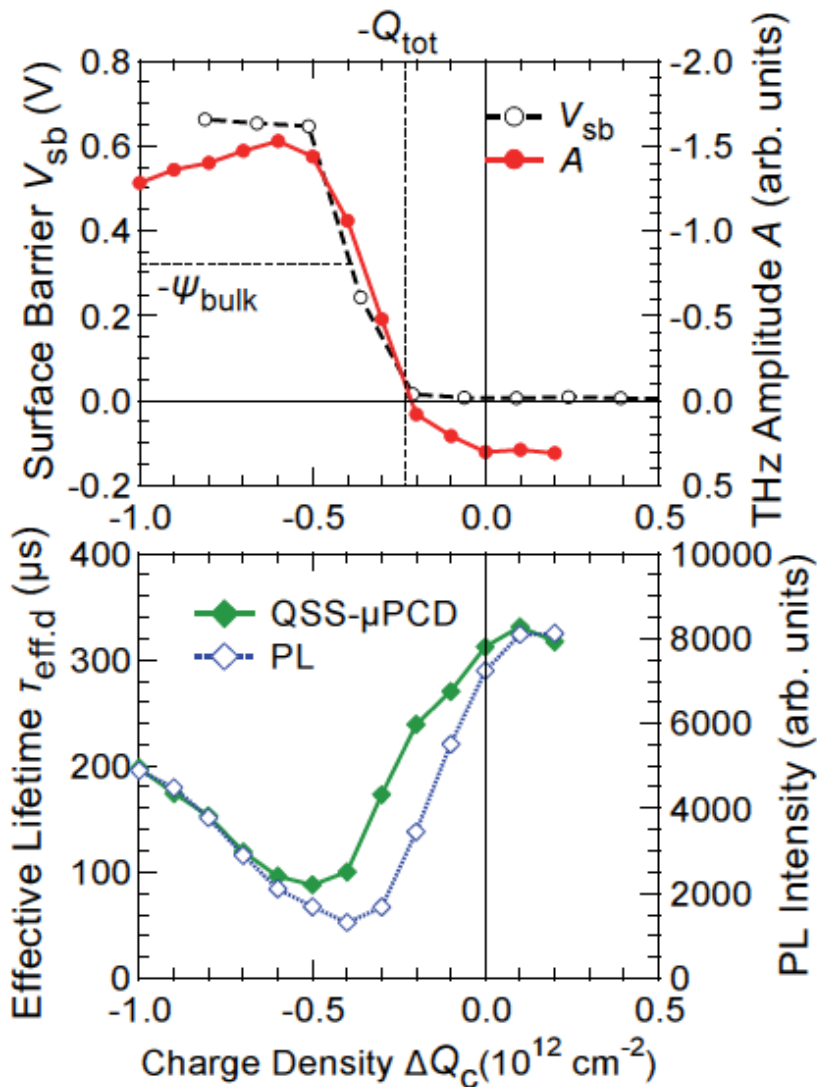


Non-contact evaluation of electrical passivation of oxidized silicon using laser terahertz emission microscope and corona charging

T. Mochizuki, J. Appl. Phys.



The relation between the surface potential and the amplitude of the laser THz emission



1. 背景と展望

2. テラヘルツキラーアプリケーション例の提案

(1) 半導体R&D分析プラットフォームへの展開

(1) テラヘルツ放射顕微鏡 (LTEM)

(2) CMOS表面・パッシベーション評価

(3) ワイドギャップ半導体評価

(4) 太陽電池評価

(5) LSI不良個所特定装置

(2) バイオイオテラヘルツプラットフォームへの展開

(1) 近接場テラヘルツセンシングイメージングシステム

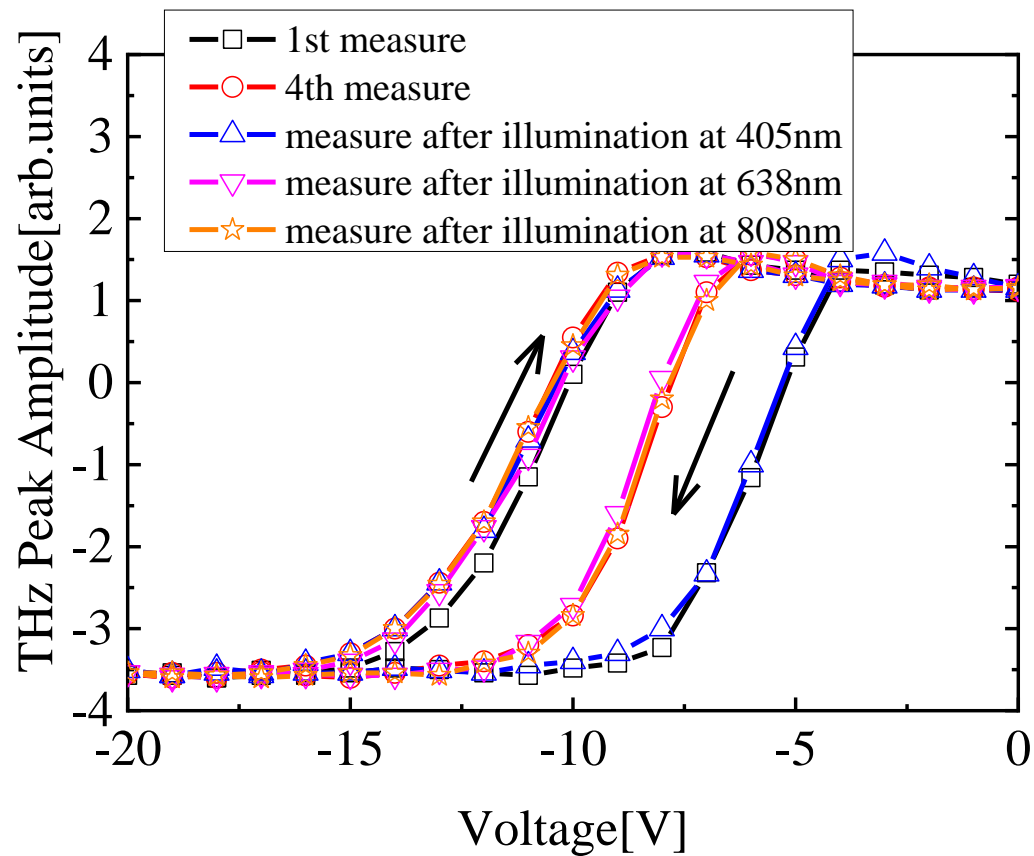
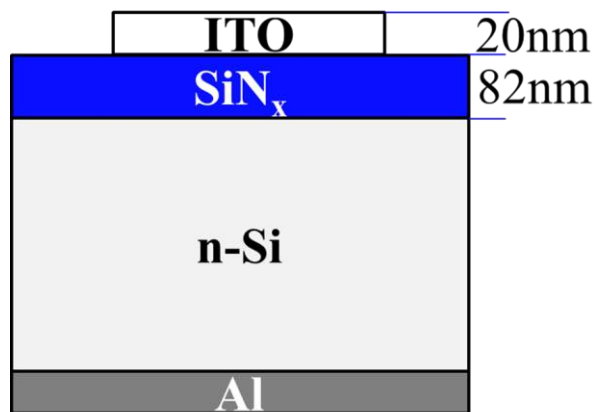
(2) 高分解能プローブレステラヘルツイメージング

(3) 微量・高感度テラヘルツマイクロ流路チップ

3. まとめ

Application to the SiN_x/Si surface

Potential tool to characterize the defects in the SiN_x passivation



1. 背景と展望

2. テラヘルツキラーアプリケーション例の提案

(1) 半導体R&D分析プラットフォームへの展開

(1) テラヘルツ放射顕微鏡 (LTEM)

(2) CMOS表面・パッシベーション評価

(3) ワイドギャップ半導体評価

(4) 太陽電池評価

(5) LSI不良個所特定装置

(2) バイオイオテラヘルツプラットフォームへの展開

(1) 近接場テラヘルツセンシングイメージングシステム

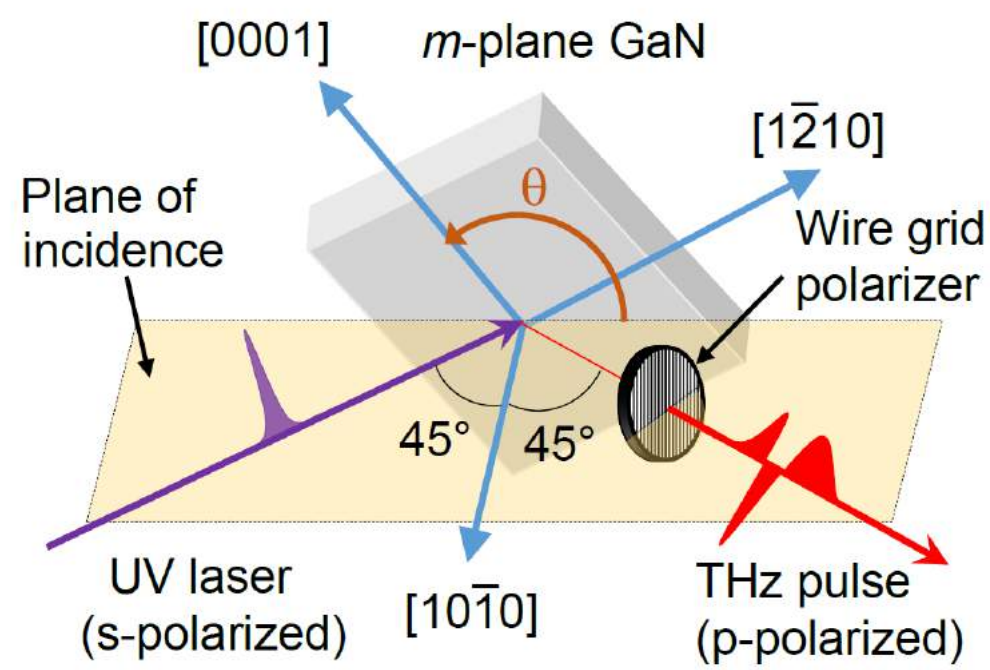
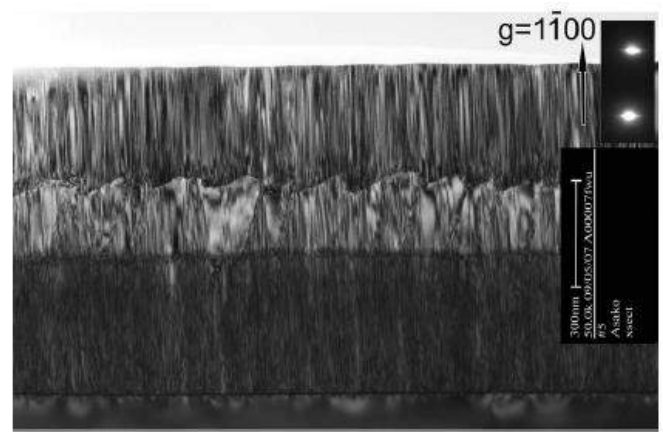
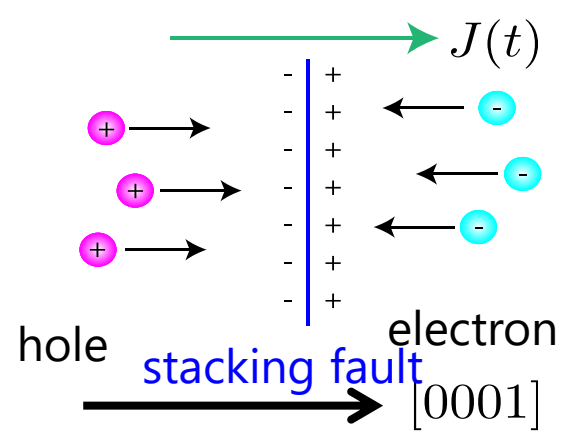
(2) 高分解能プローブレステラヘルツイメージング

(3) 微量・高感度テラヘルツマイクロ流路チップ

3. まとめ

m-plane GaN

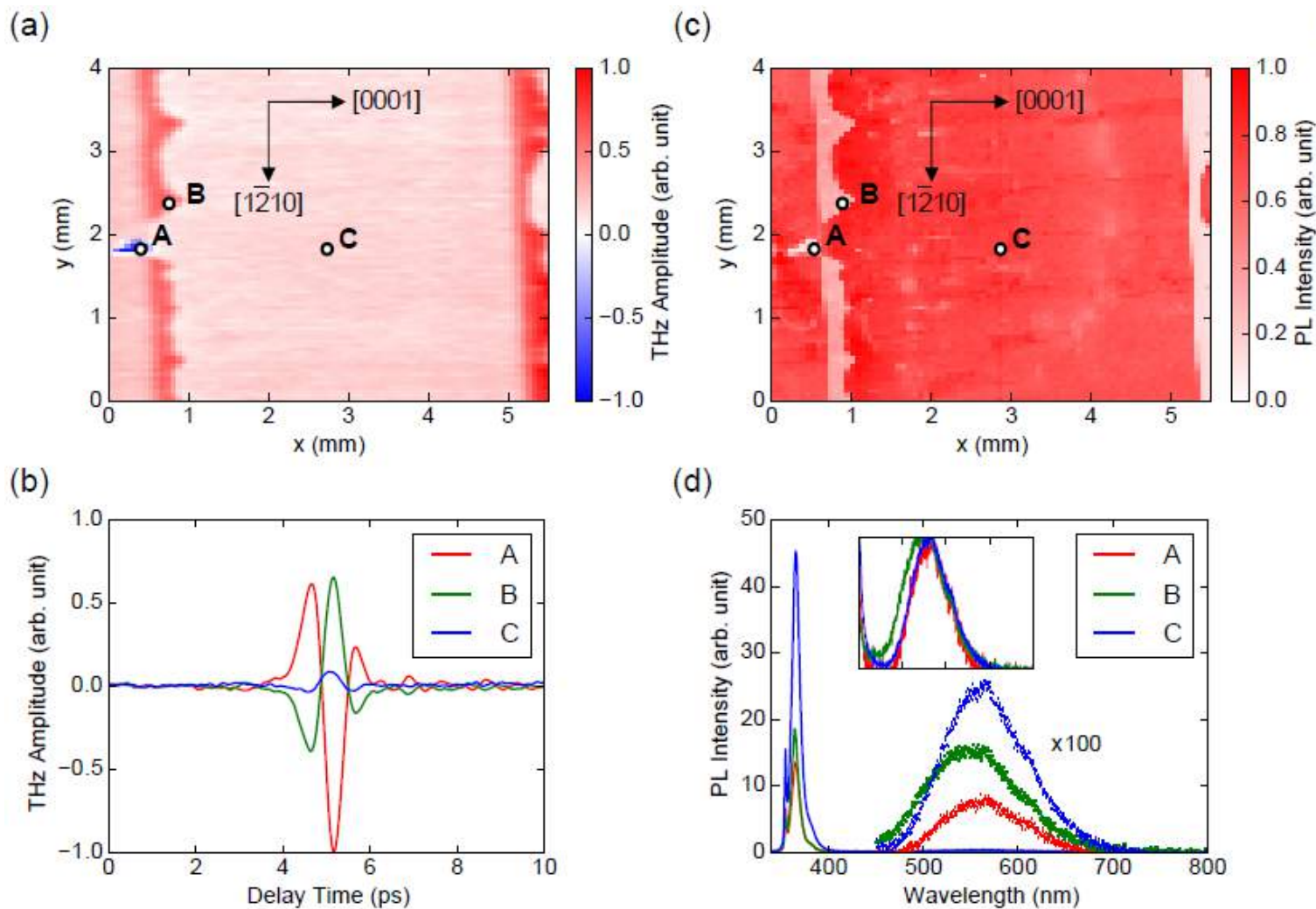
Y. Sakai, *APL Photonics* 2, 041304 (2017)



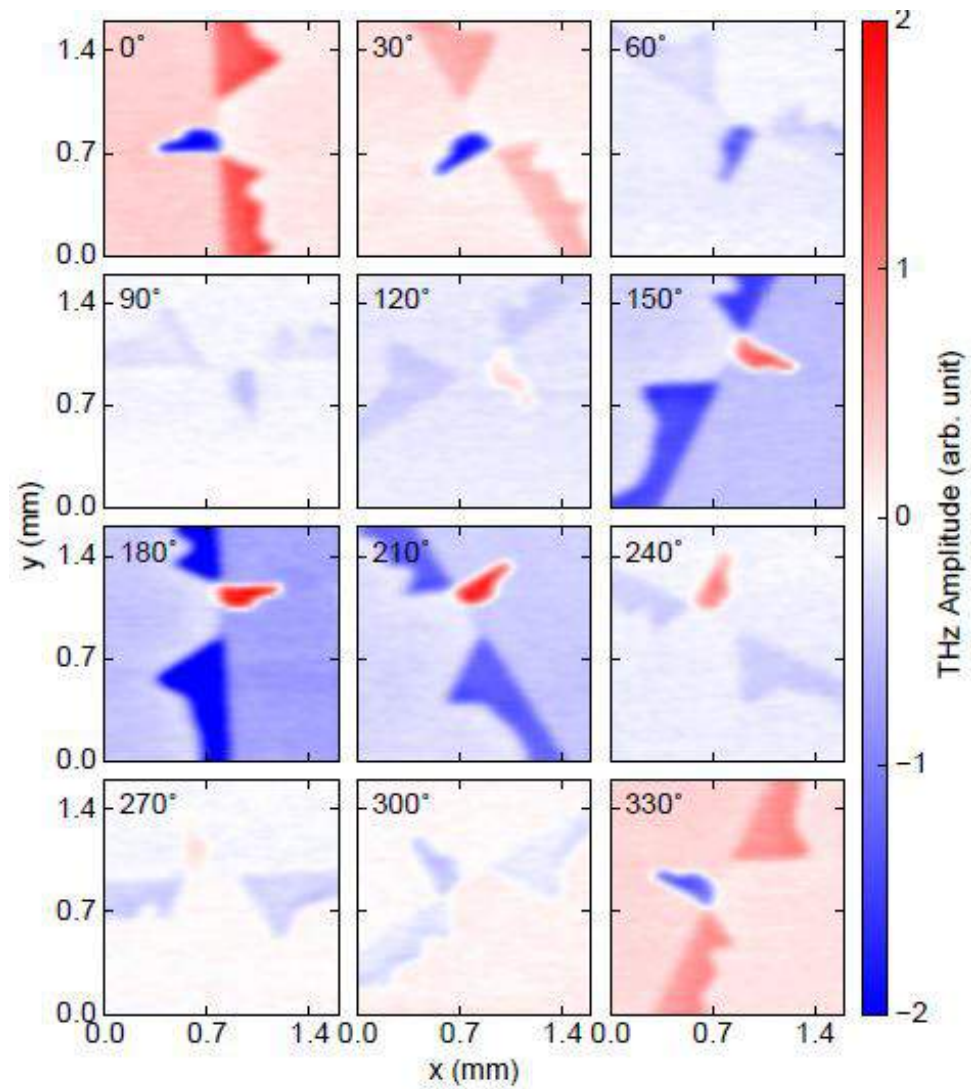
Appl. Phys. Lett. **92**, 241106(2008)

If spontaneous polarization is terminated by stacking faults, photo excited carriers move toward the stacking faults.

The polarization of THz wave is varying with the c-axis direction.

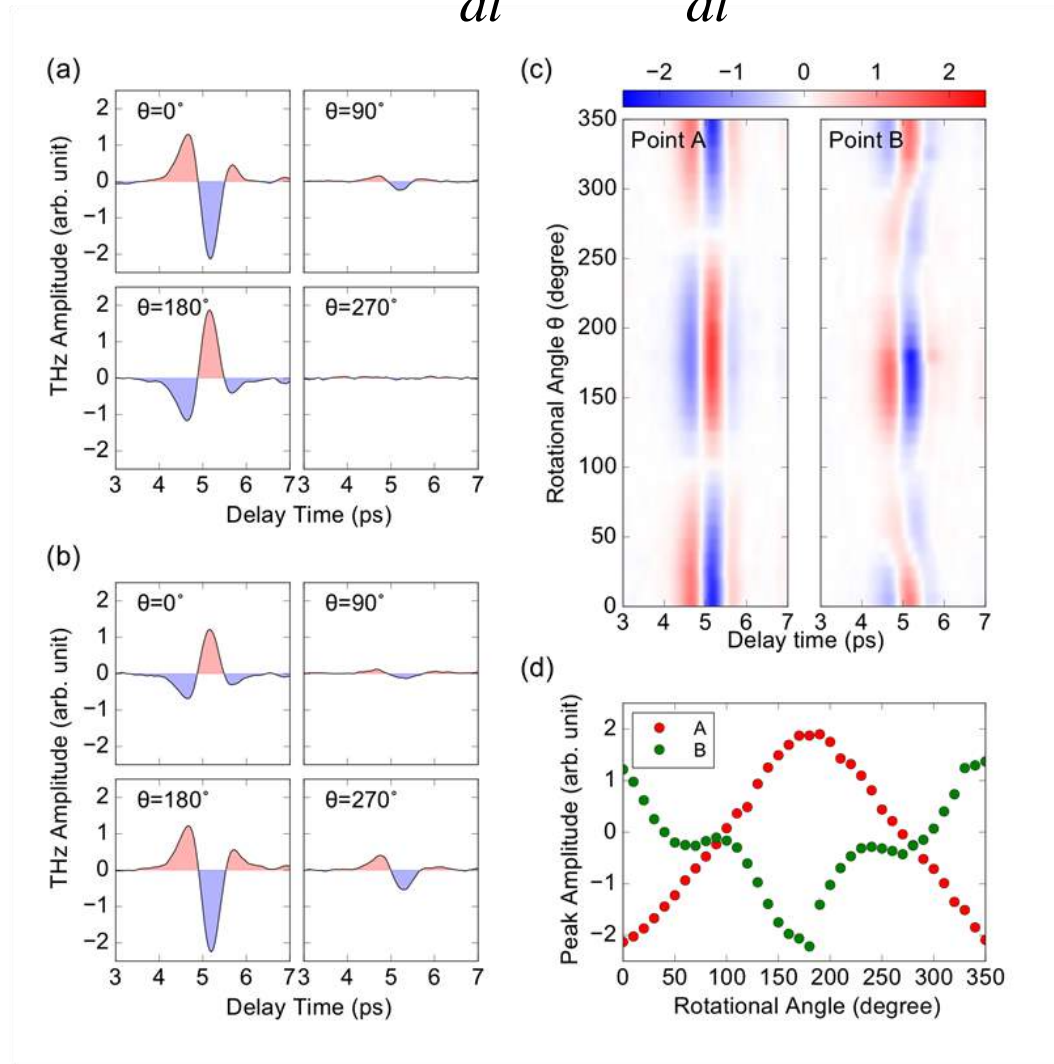


(a) LTEM image of *m*-plane GaN and (b) THz emission waveforms at points A, B, and C in the LTEM image. (c) Corresponding PL image of the intensity from the near-band-edge emission and (d) PL spectra at points A, B, and C in the PL image.



Rotation angle dependence of the LTEM images around points A and B.

$$E_{THz} \propto \frac{dJ}{dt} = \frac{d(J_{\perp} + J_{\parallel})}{dt}$$



THz waveforms of the THz emissions at rotation angles $\theta = 0^\circ$, 90° , 180° , and 270° at (a) point A and (b) point B in Fig. 3. (c) The distribution of the amplitudes of the THz waveforms, and (d) the peak amplitude at 5.2 ps as a function of the delay time and θ at points A and B.

β -Ga₂O₃

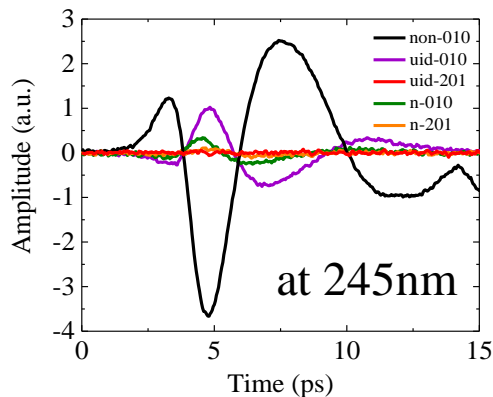
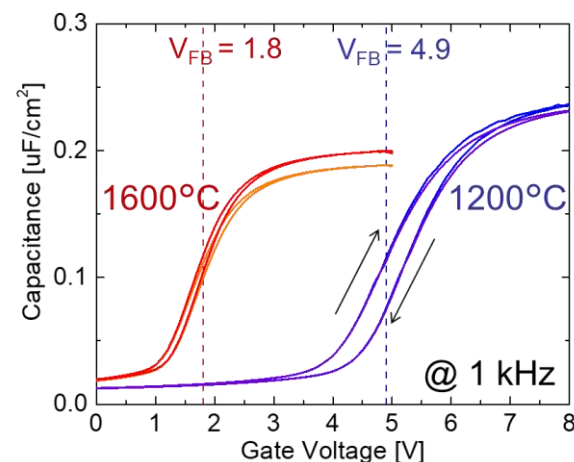


TABLE 1. List of five types β -Ga₂O₃ samples

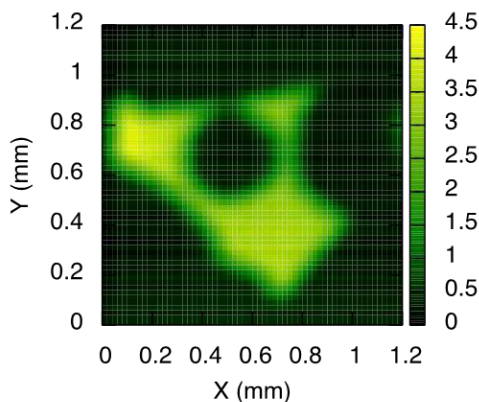
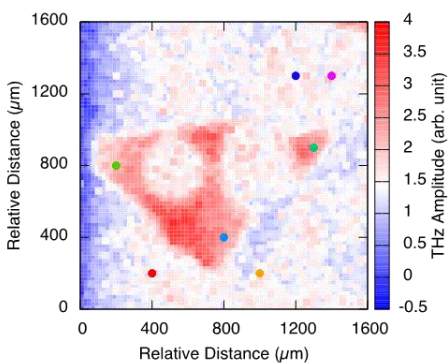
Orientation	dopant	conductivity	$N_d - N_a$ (cm ⁻³)
(-201)	Sn	n-type	$5 \times 10^{17} \sim 9 \times 10^{18}$
(-201)	Unintentional	n-type	$1 \times 10^{17} \sim 9 \times 10^{17}$
(010)	Sn	n-type	$1 \times 10^{18} \sim 9 \times 10^{18}$
(010)	Unintentional	n-type	$1 \times 10^{17} \sim 9 \times 10^{17}$
(010)	Fe	-----	-----

This suggests the non-doped one p-type.

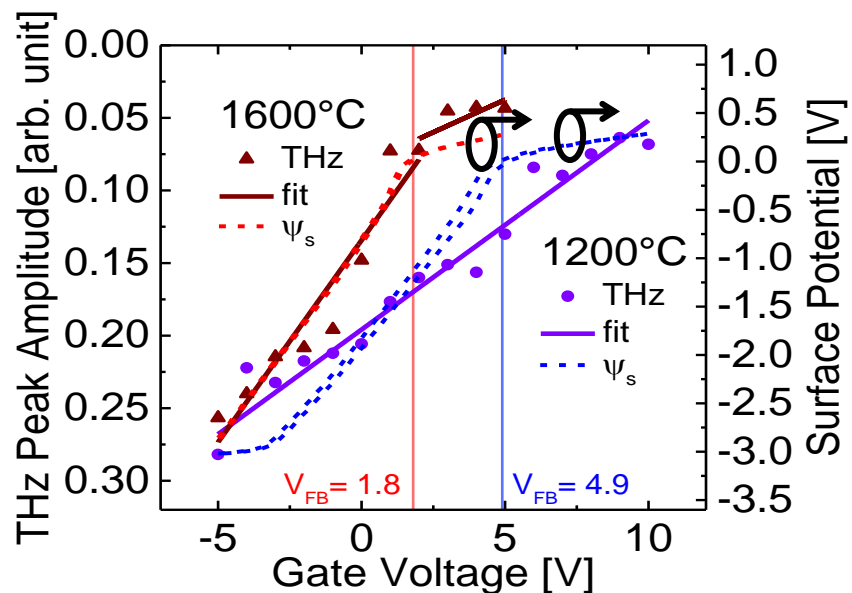
SiO₂/SiC



C-plane of GaN



Scientific Reports 5, 13860 (2015)



1. 背景と展望

2. テラヘルツキラーアプリケーション例の提案

(1)半導体R&D分析プラットフォームへの展開

(1)テラヘルツ放射顕微鏡 (LTEM)

(2)CMOS表面・パッシベーション評価

(3)ワイドギャップ半導体評価

(4)太陽電池評価

(5)LSI不良個所特定装置

(2)バイオイオテラヘルツプラットフォームへの展開

(1)近接場テラヘルツセンシングイメージングシステム

(2)高分解能プローブレステラヘルツイメージング

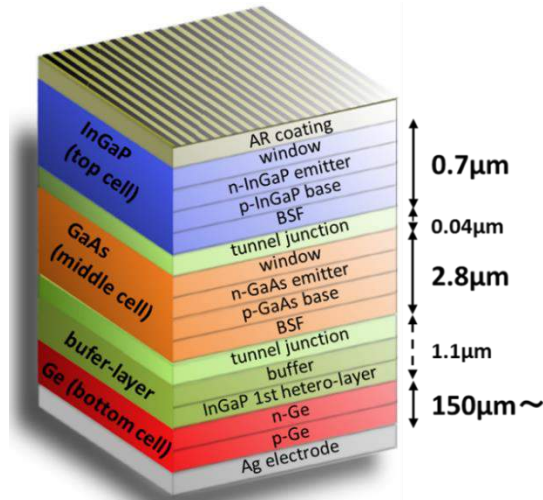
(3)微量・高感度テラヘルツマイクロ流路チップ

3. まとめ

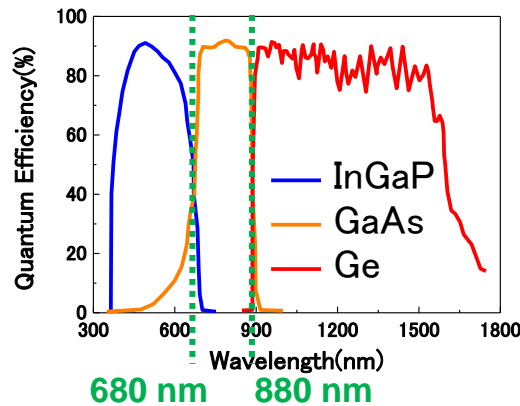
3接合タンデム太陽電池から 放射されるテラヘルツ波特性

○濱内翔太¹、酒井裕司¹、梅垣俊仁¹、伊藤明²、
中西英俊²、川山巖¹、村上博成¹、斗内政吉¹
阪大レーザー研¹、SCREEN ホールディングス²

本研究で用いた3接合型太陽電池



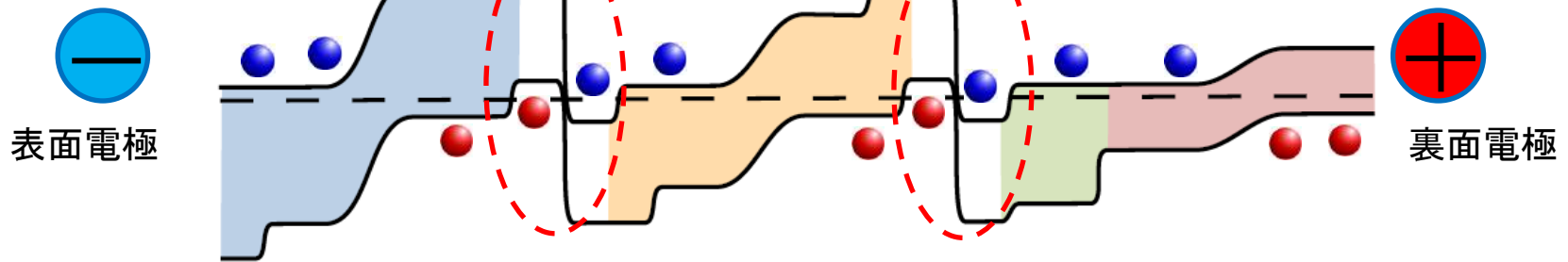
量子効率[1]



- 各層のバンドギャップエネルギーに相当する波長
- ・InGaP-680 nm (1.8 eV)
 - ・GaAs-870 nm (1.4 eV)
 - ・Ge-1850 nm (0.67 eV)

([1]先端技術研究所 ATI社製)

バンド図



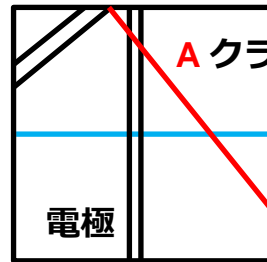
波長を変えることにより、各層を励起できる

(波長を変えることにより、各層からテラヘルツ波が発生することを期待)

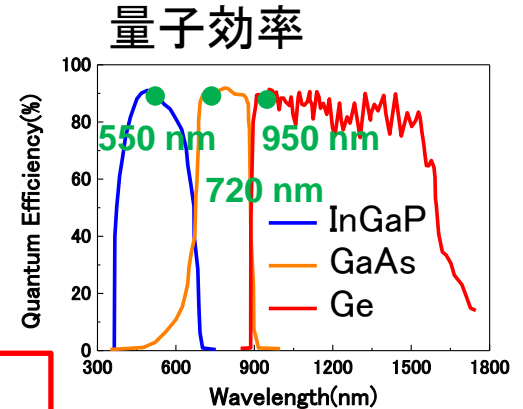
波長可変時のLTEM像

550 nm, 720 nm and 950 nmのフェムト秒パルスレーザー照射時のLTEM像

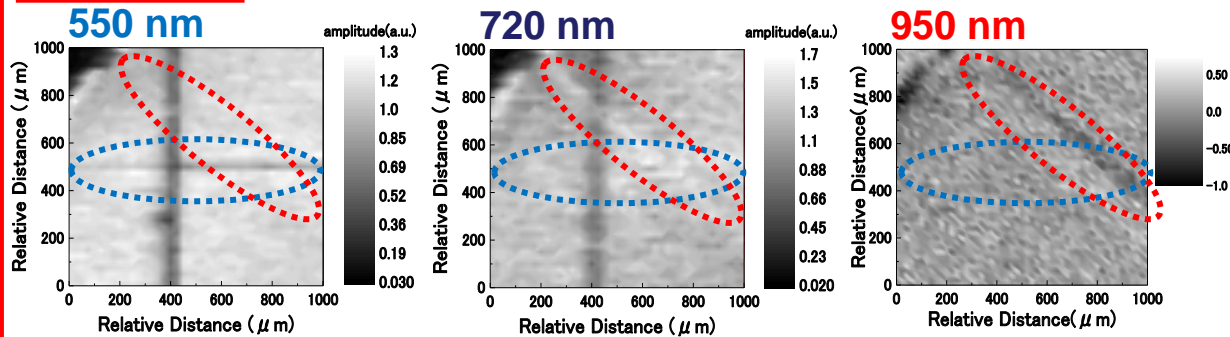
光学像



A クラック
B 850 nm レーザー
による損傷



LTEM像



波長、パワー、ビーム径
550 nm-1.3 mW-50 μ m
720 nm-1.0 mW-50 μ m
950 nm-62.6 mW-140 μ m

- ・850 nmレーザーによる損傷は、550 nm (InGaP) LTEMのみ観測
- ・クラックは、GaAs、GeのLTEMで顕著に観測

1. 背景と展望

2. テラヘルツキラーアプリケーション例の提案

(1) 半導体R&D分析プラットフォームへの展開

(1) テラヘルツ放射顕微鏡 (LTEM)

(2) CMOS表面・パッシベーション評価

(3) ワイドギャップ半導体評価

(4) 太陽電池評価

(5) LSI不良個所特定装置

(2) バイオイオテラヘルツプラットフォームへの展開

(1) 近接場テラヘルツセンシングイメージングシステム

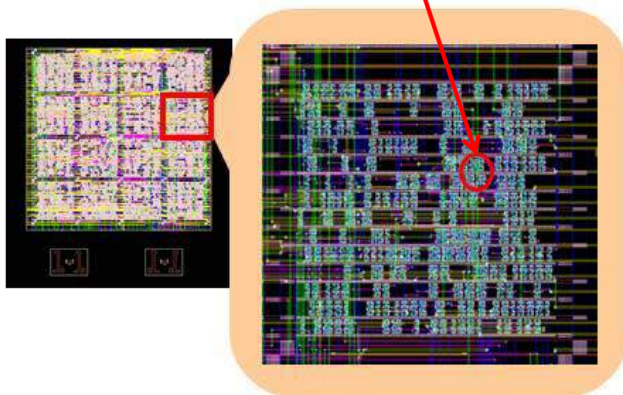
(2) 高分解能プローブレステラヘルツイメージング

(3) 微量・高感度テラヘルツマイクロ流路チップ

3. まとめ

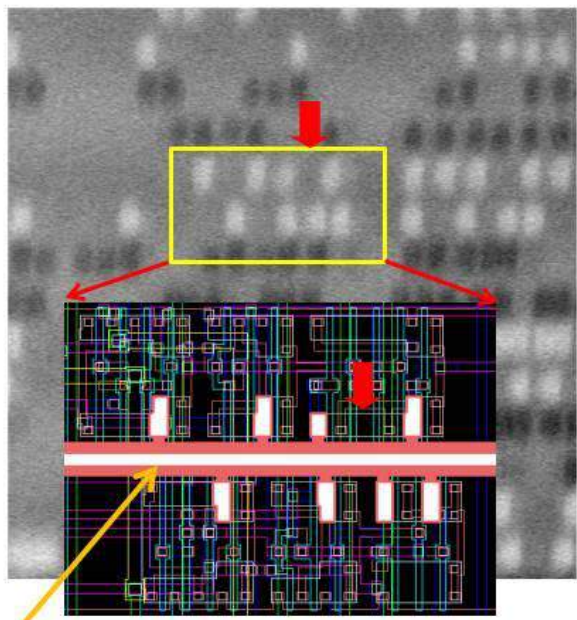
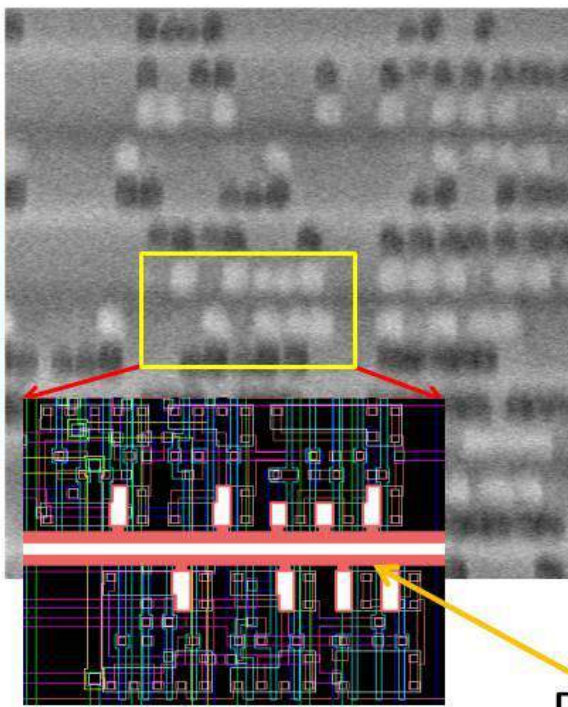
Open Defect

CAD layout of Sample open defect



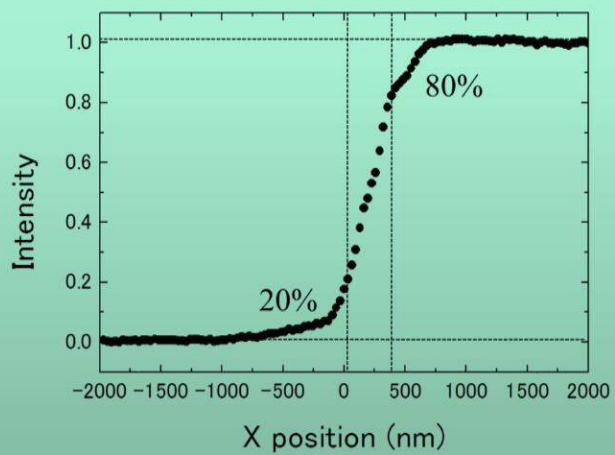
Normal

Open circuit



Power supply line

360nm



The LSI chip is fabricated by 180nm process
The area of the LSI: $350 \times 350 \mu\text{m}^2$
LTEM Image size : $30 \times 30 \mu\text{m}^2$
Resolution : 360nm

1. Si表面欠陥評価、パッシベーション界面評価
2. パッシベーション内欠陥検査
3. ウェファーレベル均一性評価
4. ワイドギャップ半導体評価
5. ワイドギャップMOS開発支援
6. 太陽電池効率分布評価
7. 内部電界評価
8. LSI不良個所特定装置
9. ダイナミック実時間電荷移動観察
など。。。。まだまだ期待されます。

既存の分析ツールとの融合でデバイス性能改善へ

1. 背景と展望

2. テラヘルツキラーアプリケーション例の提案

(1) 半導体R&D分析プラットフォームへの展開

(1) テラヘルツ放射顕微鏡 (LTEM)

(2) CMOS表面・パッシベーション評価

(3) ワイドギャップ半導体評価

(4) 太陽電池評価

(5) LSI不良個所特定装置

(2) バイオイオテラヘルツプラットフォームへの展開

(1) 近接場テラヘルツセンシングイメージングシステム

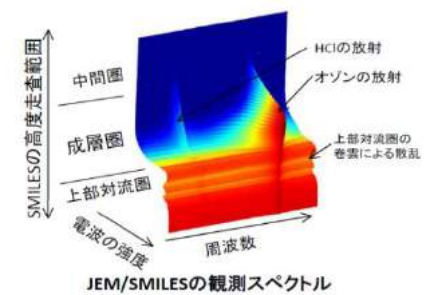
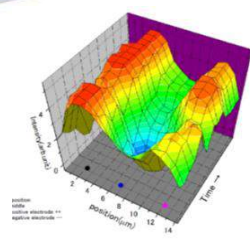
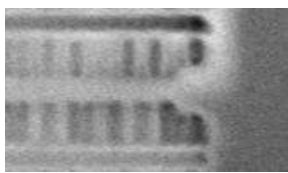
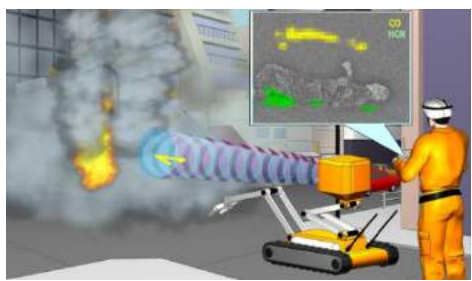
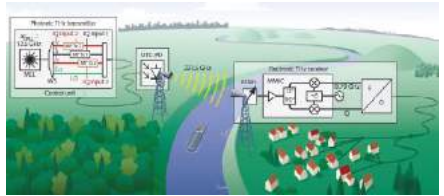
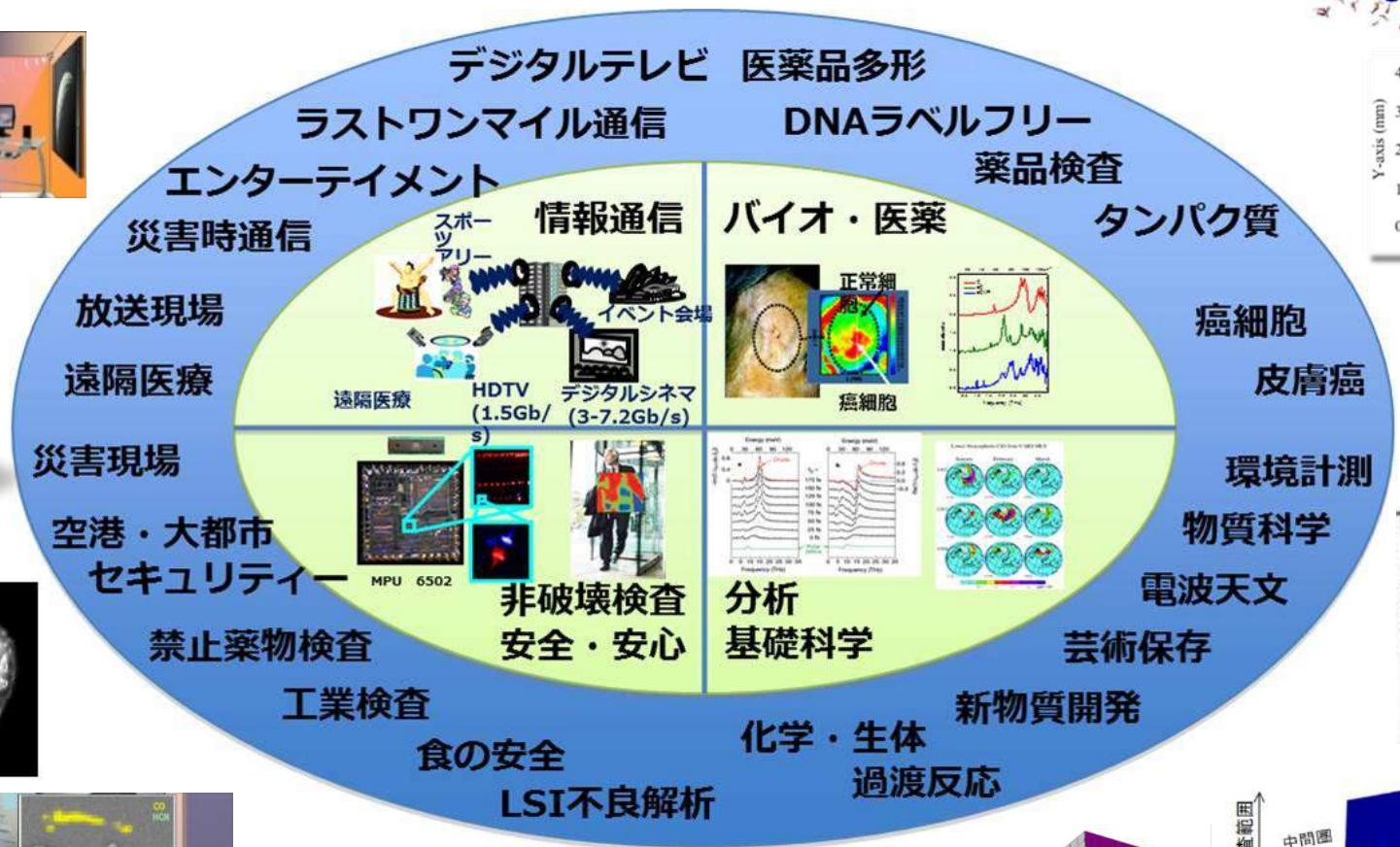
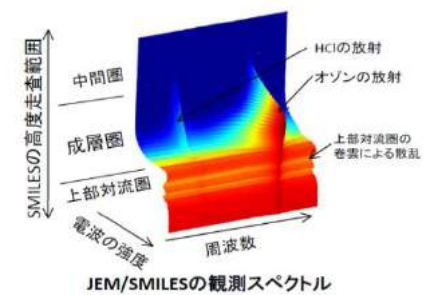
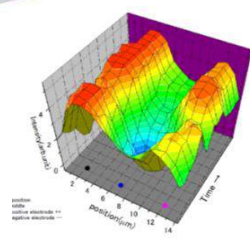
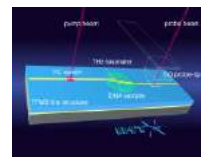
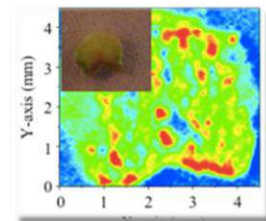
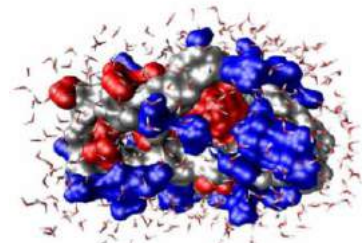
(2) 高分解能プローブレステラヘルツイメージング

(3) 微量・高感度テラヘルツマイクロ流路チップ

3. まとめ

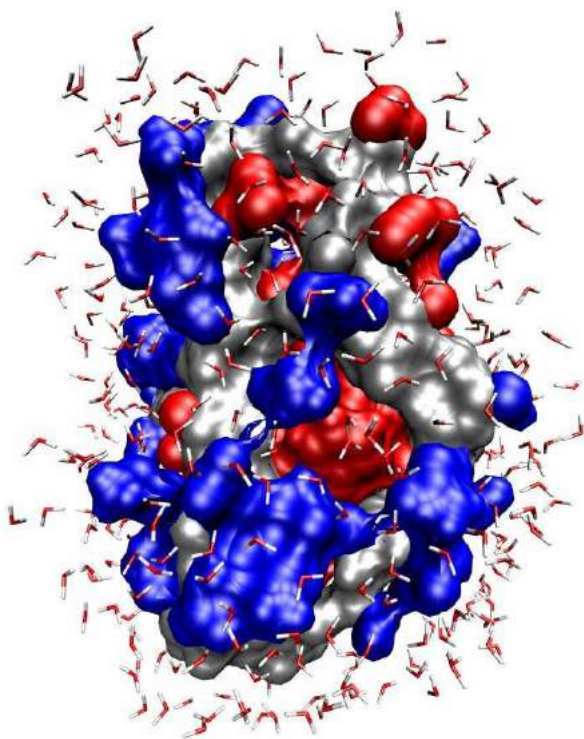
テラヘルツ技術が拓く新産業

大阪大学 斗内政吉

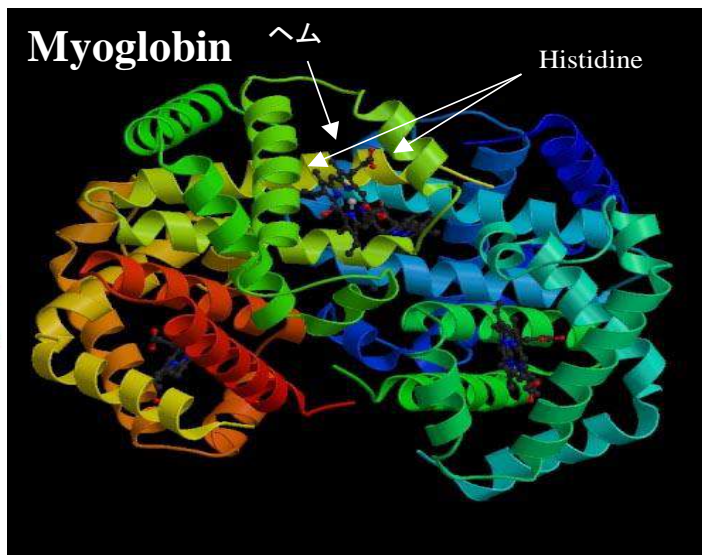


バイオ分析

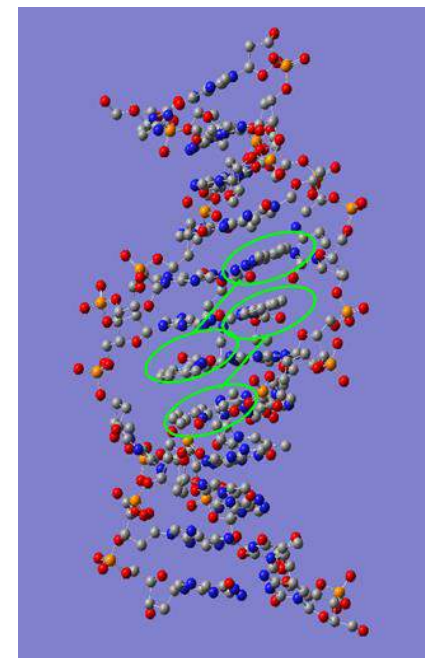
テラヘルツで何がわかるか？



M. Havenith



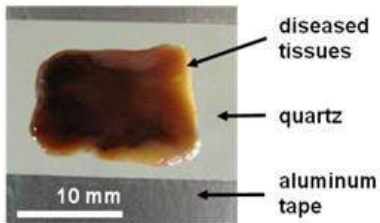
M. Walther



田畑 仁

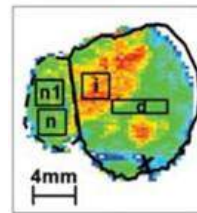
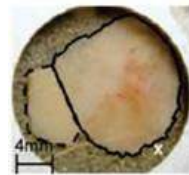
生きた細胞の活動（水和）・巨大分子間相互作用・水素結合

最近のテラヘルツバイオ研究



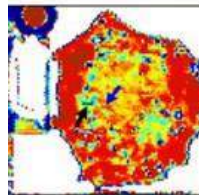
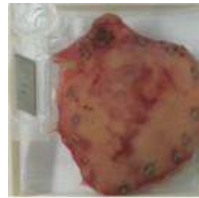
口腔癌

IEEE J. Biomed. Health Inform. **17**, 779 (2013).



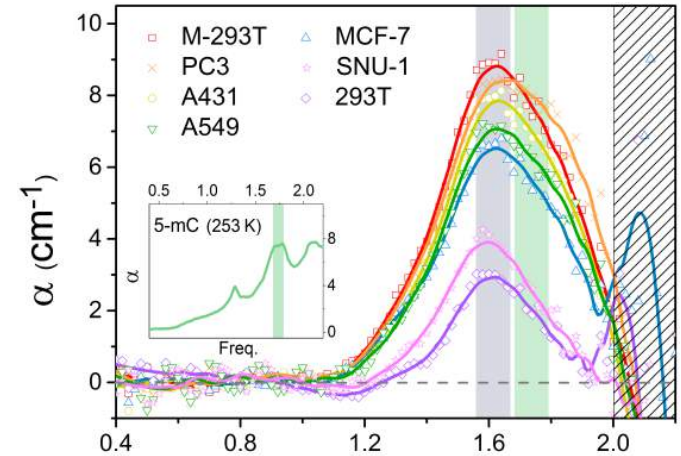
皮膚癌

Phys. Med. Biol. **47** 3853 (2002).



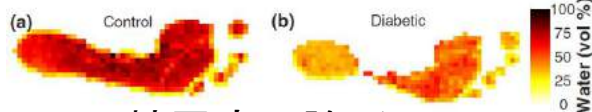
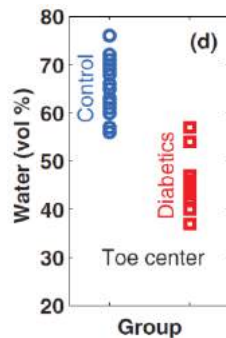
胃癌

Opt. Med. Express **6**, 1398 (2015).



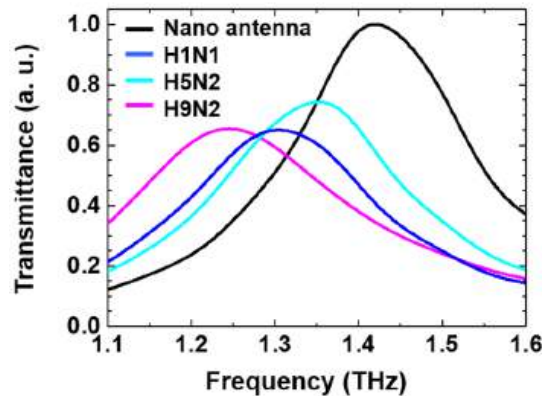
癌細胞株の識別

Sci. Rep. **6**, 37103 (2016)



糖尿病の診断

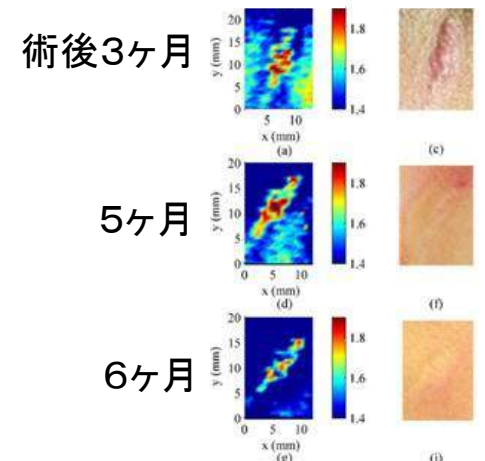
Sci. Rep. **7**, 124 (2017).



インフルエンザウイルスの識別

Sci. Rep. **7**, 8146 (2017).

THz Visible



傷治癒の客観的評価

J. Biophoton. **10**, 1143 (2017).

1. 背景と展望

2. テラヘルツキラーアプリケーション例の提案

(1) 半導体R&D分析プラットフォームへの展開

(1) テラヘルツ放射顕微鏡 (LTEM)

(2) CMOS表面・パッシベーション評価

(3) ワイドギャップ半導体評価

(4) 太陽電池評価

(5) LSI不良個所特定装置

(2) バイオイオテラヘルツプラットフォームへの展開

(1) 近接場テラヘルツセンシングイメージングシステム

(2) 高分解能プローブレステラヘルツイメージング

(3) 微量・高感度テラヘルツマイクロ流路チップ

3. まとめ

1. THz-TDSは微量検査に弱い
2. イメージング分解能が悪い
3. イメージング時間とコストがトレードオフ

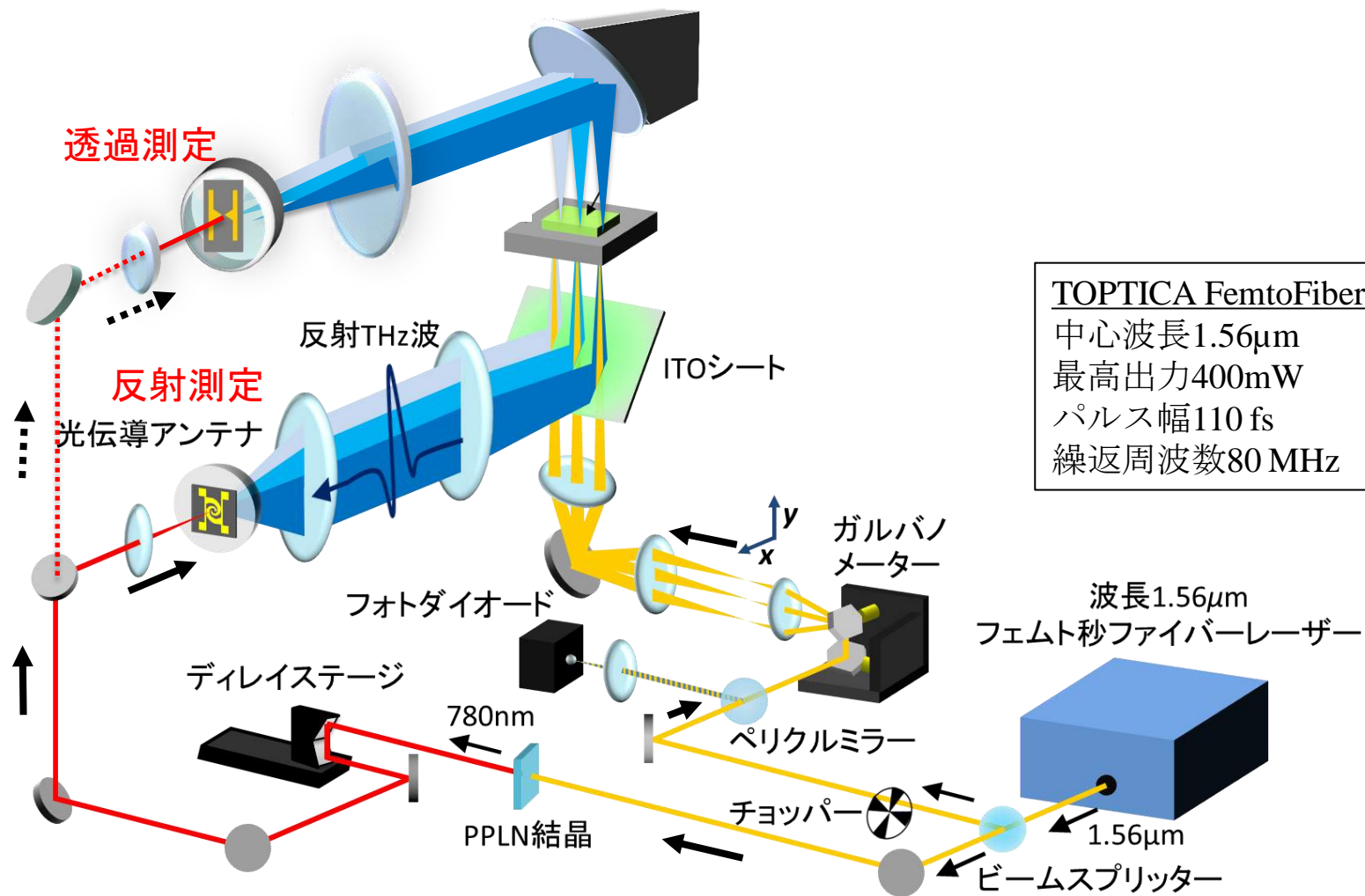


レーザー走査型テラヘルツイメージングシステム

- | | | |
|------------------|---|----------|
| 1. ガルバノミラー制御 | ⇒ | 高速 |
| 2. 光通信帯フェムト秒レーザー | ⇒ | 小型・ロバスト) |
| 3. 近接場 | ⇒ | 高分解能 |
| 4. テラヘルツチップ | ⇒ | 高感度 |

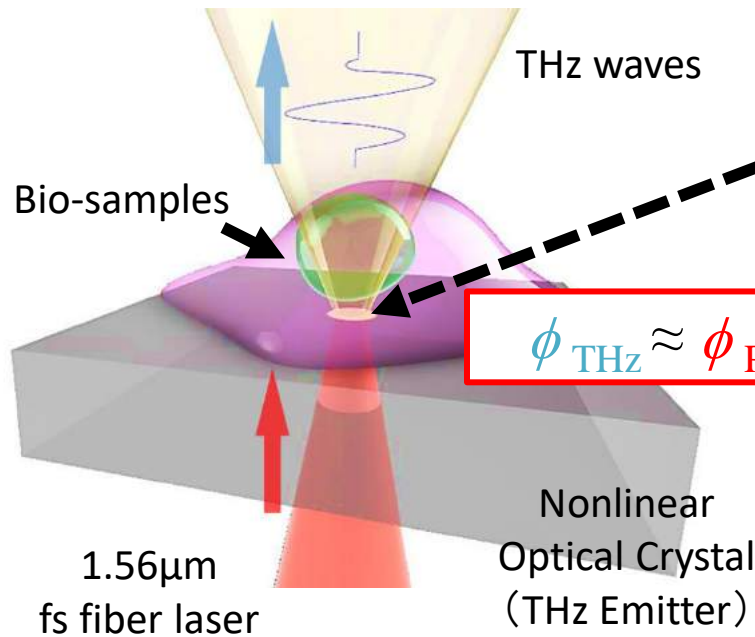
世界オリジナル

レーザー走査近接場 THz分光イメージングシステム



TOPTICA FemtoFiber pro
中心波長1.56μm
最高出力400mW
パルス幅110 fs
繰返周波数80 MHz

THz near-field emission technique



$$\phi_{\text{THz}} \approx \phi_{\text{Pump}}$$

Local THz Emission by Nonlinear Optical Effect

❖ Optical Rectification

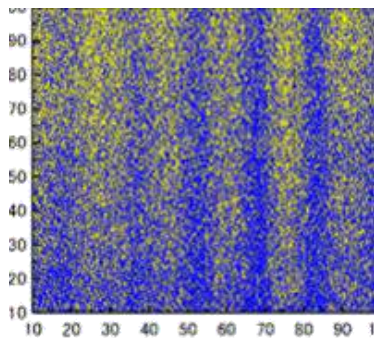
$$\nabla^2 \cdot \mathbf{E} - \epsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu \frac{\partial^2 \mathbf{P}^{(2)}}{\partial t^2}$$

$$\mathbf{P}^{(2)}(t) = \epsilon_0 \chi^{(2)} \sum_n \mathbf{E}_n \mathbf{E}_n^*$$

❖ Pumping Source:

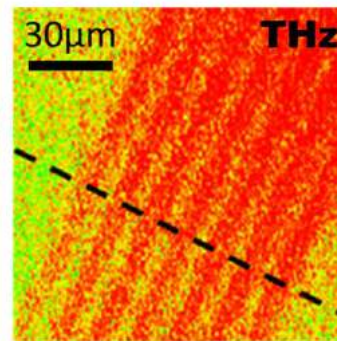
1.56μm femtosecond fiber laser

Opt. Express **20**, 12956 (2012).



Transmission mode

10μm interdigitate structure



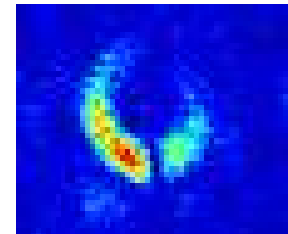
Reflection mode

9μm interdigitate structure



84μm

A split ring resonator



J. Infrared Milli. Terahz. Waves **38** 1107 (2017).

1. 背景と展望

2. テラヘルツキラーアプリケーション例の提案

(1) 半導体R&D分析プラットフォームへの展開

(1) テラヘルツ放射顕微鏡 (LTEM)

(2) CMOS表面・パッシベーション評価

(3) ワイドギャップ半導体評価

(4) 太陽電池評価

(5) LSI不良個所特定装置

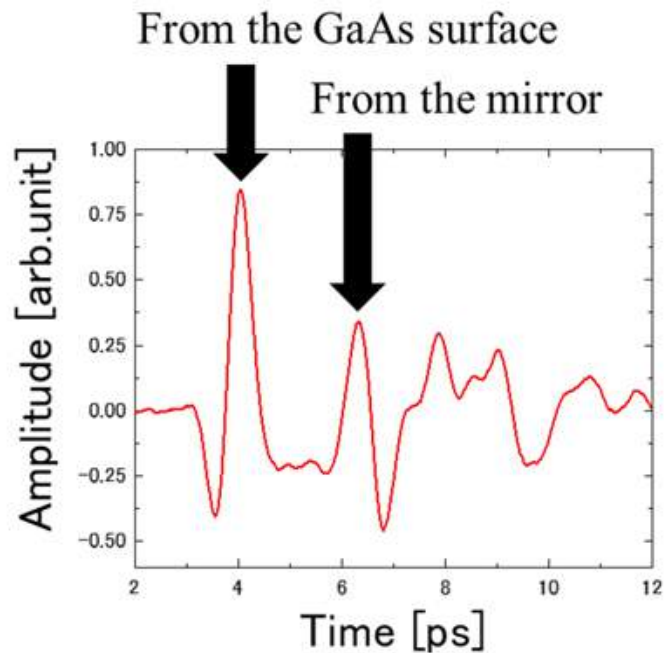
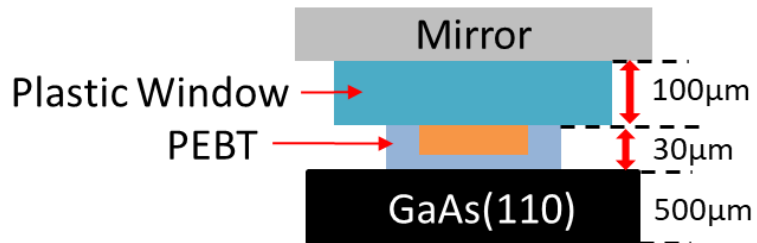
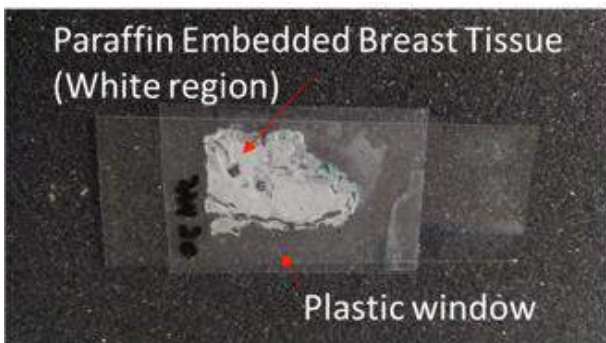
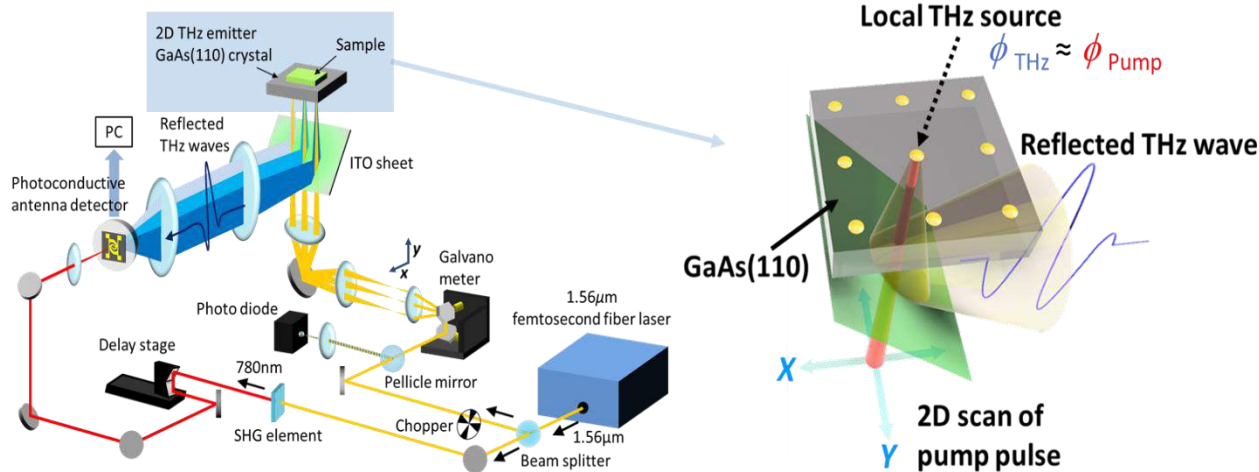
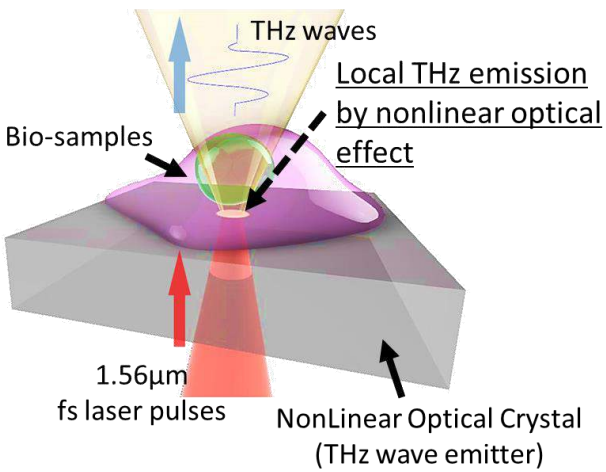
(2) バイオイオテラヘルツプラットフォームへの展開

(1) 近接場テラヘルツセンシングイメージングシステム

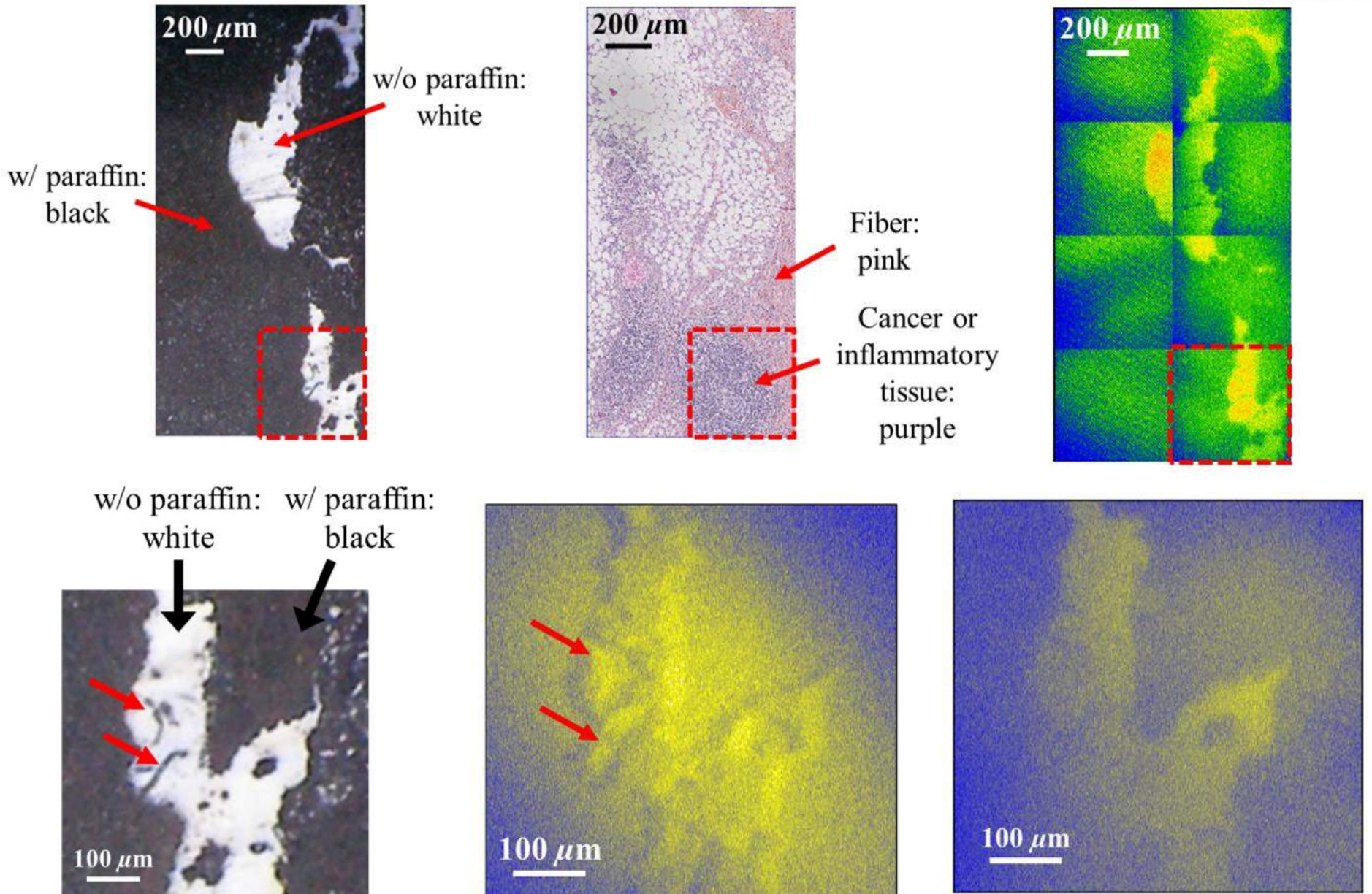
(2) 高分解能プローブレステラヘルツイメージング

(3) 微量・高感度テラヘルツマイクロ流路チップ

3. まとめ



半導体からのテラヘルツ放射



1. 背景と展望

2. テラヘルツキラーアプリケーション例の提案

(1)半導体R&D分析プラットフォームへの展開

(1)テラヘルツ放射顕微鏡 (LTEM)

(2)CMOS表面・パッシベーション評価

(3)ワイドギャップ半導体評価

(4)太陽電池評価

(5)LSI不良個所特定装置

(2)バイオイオテラヘルツプラットフォームへの展開

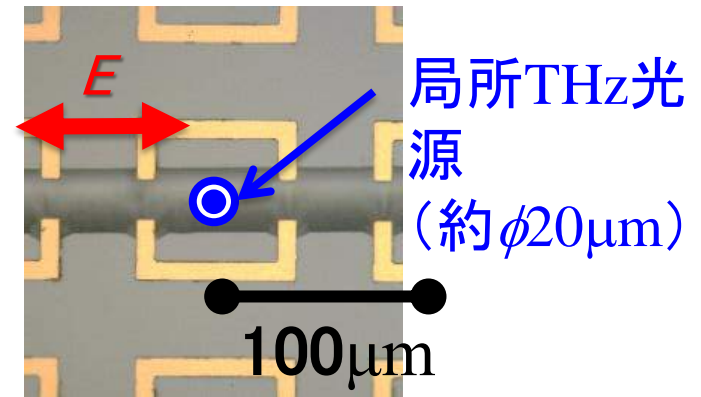
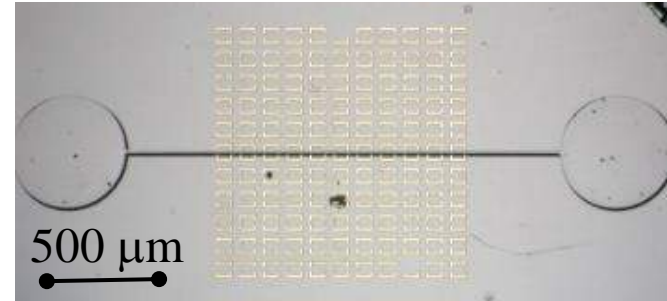
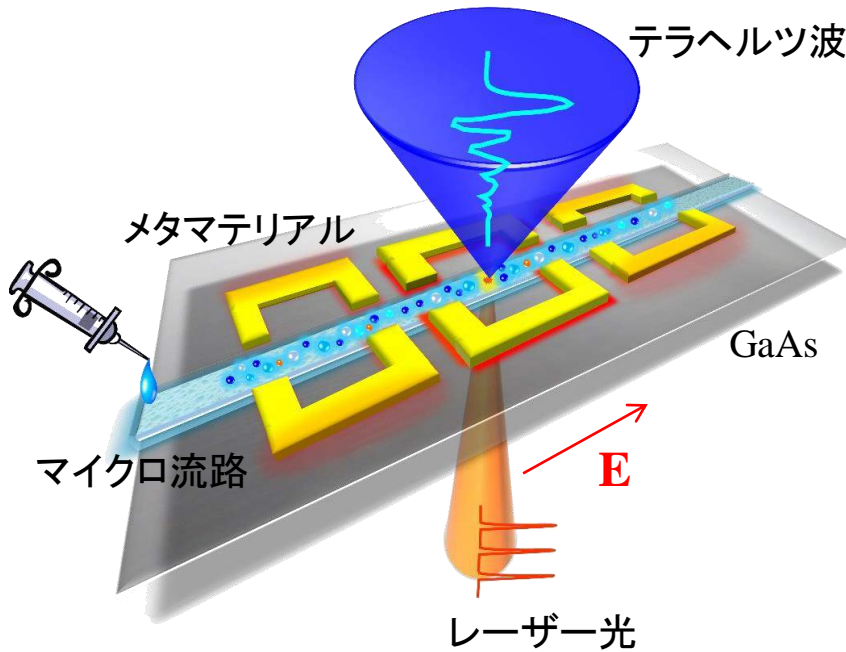
(1)近接場テラヘルツセンシングイメージングシステム

(2)高分解能プローブレステラヘルツイメージング

(3)微量・高感度テラヘルツマイクロ流路チップ

3. まとめ

テラヘルツマイクロ流路チップ

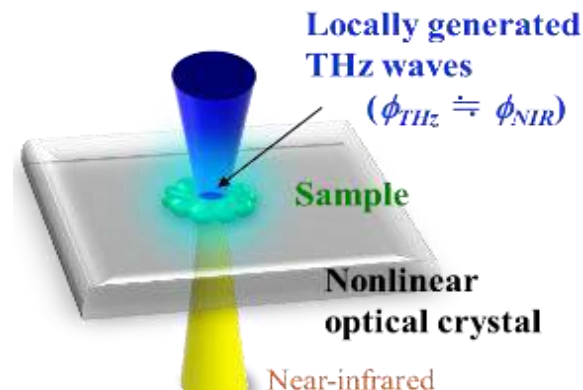


- 11×11アレイのメタマテリアルを有するマイクロ流路チップ
- 単一マイクロ流路(全長:2.2mm, 幅:26.5μm, 深さ:10μm)
- 石英で流路をカバーし、マイクロシリンジにより~50nL以下の溶液サンプルを流路に注入。

チップ開発のためのアプローチ

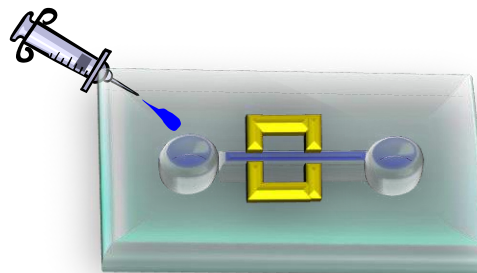
1. 局所テラヘルツ波光源の利用

- レーザーテラヘルツ放射顕微鏡技術を応用
- THz波とサンプルの近接場相互作用
- 回折限界を克服



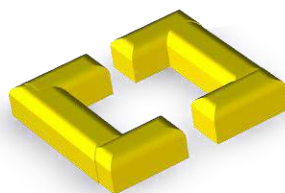
2. マイクロ流路の利用

- 微量かつ定量で正確な測定



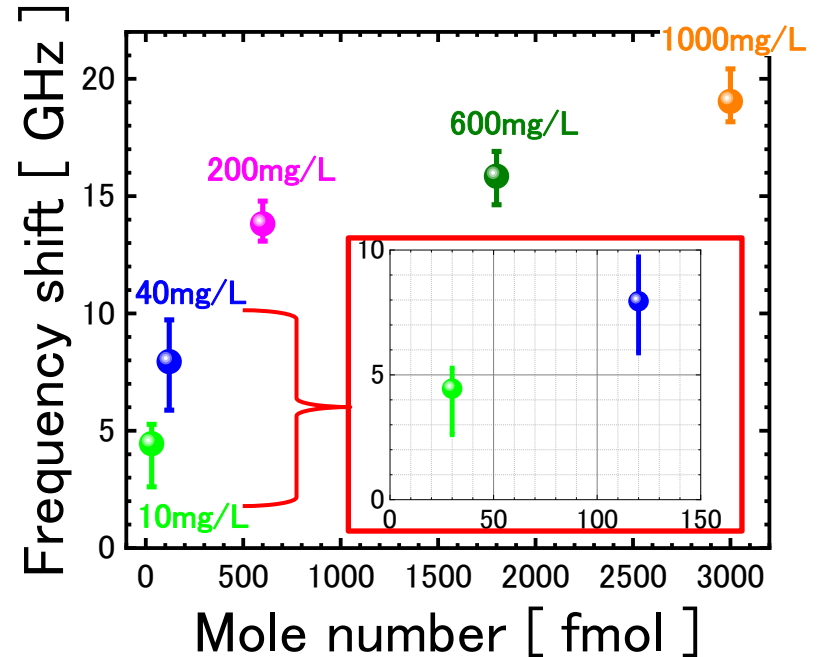
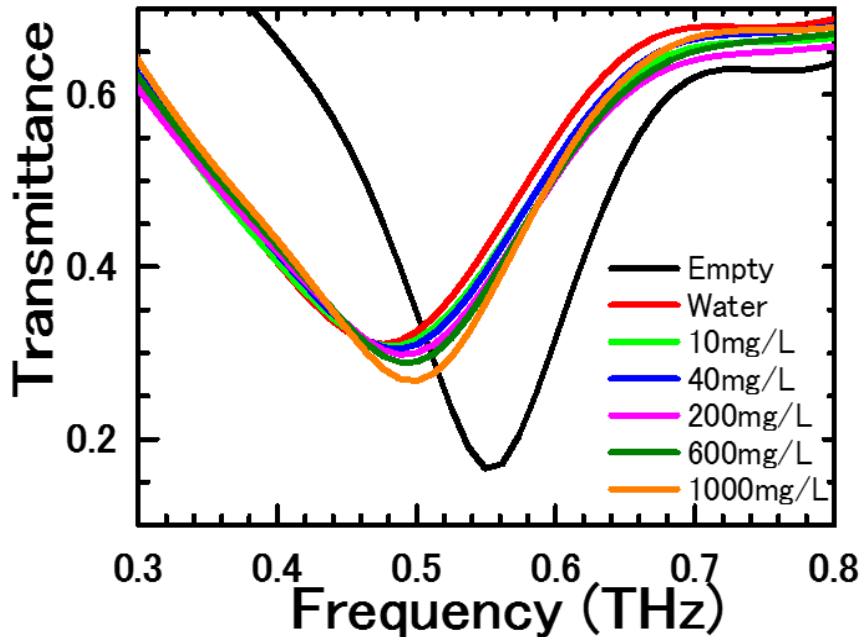
3. メタマテリアルの利用

- 高感度検出

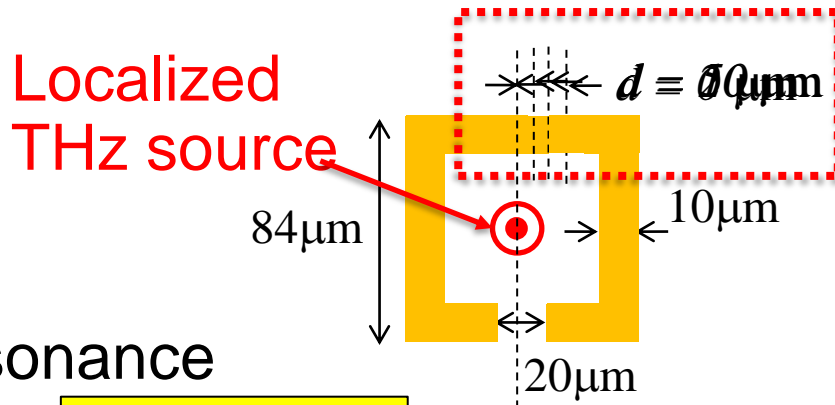


$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

テラヘルツマイクロ流路チップの開発

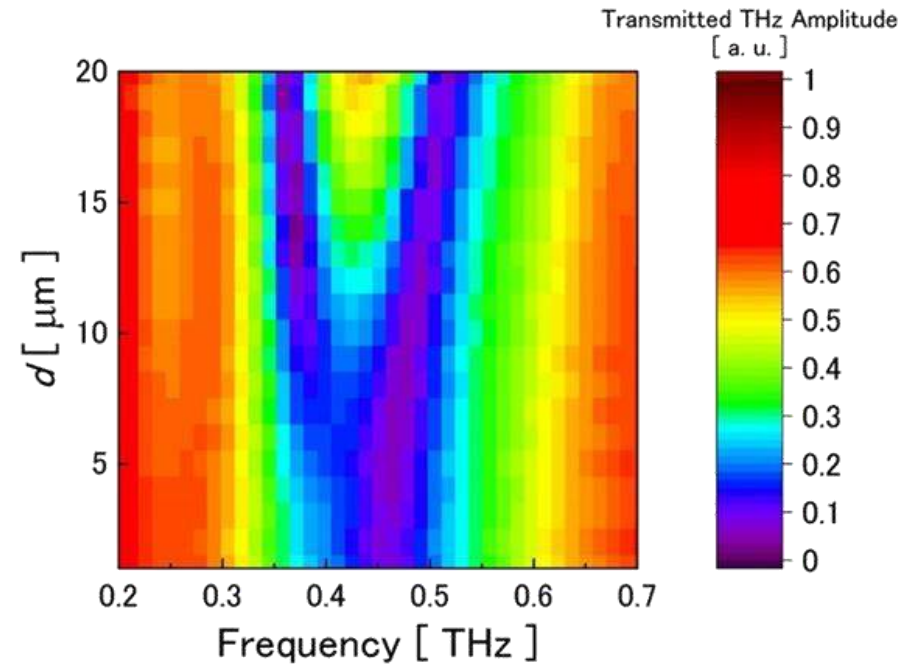
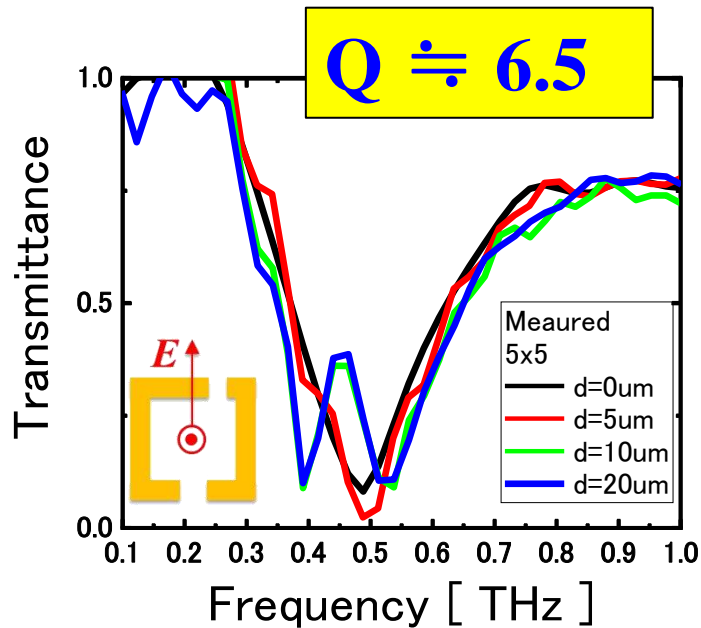


- マイクロ流路内の実量318ピコリットル中に存在する31.8フェムトモルのミネラル分の濃度検出に成功。
- 従来のマイクロ流路を使ったTHz波による実験の約100分の1のサンプル量。

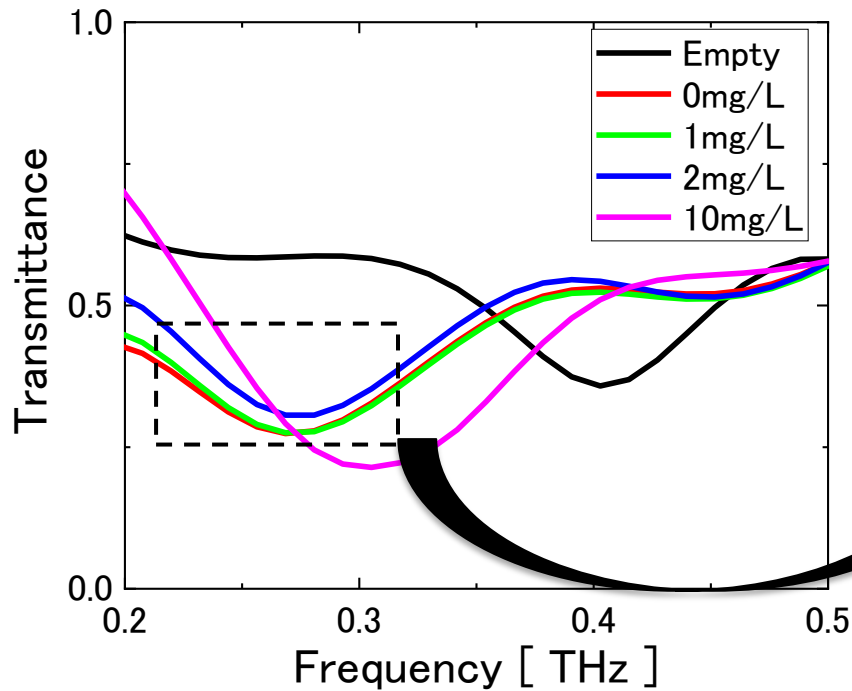


Fixed parameters :
5x5 arrays and periods of $100 \mu\text{m}$

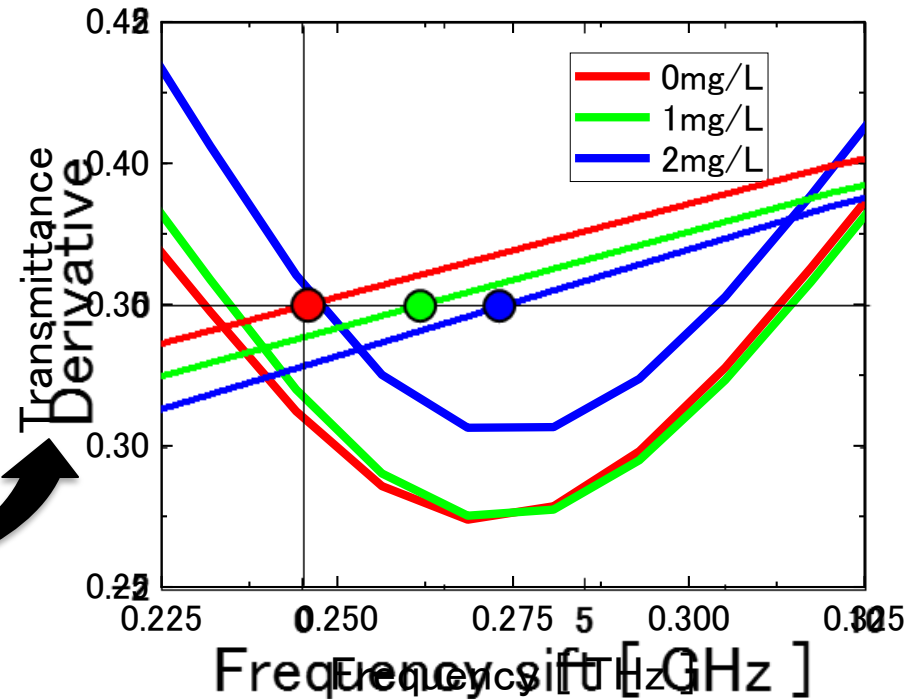
Fano resonance



- Remarkable resonance responses are observed for $d=20 \mu\text{m}$.
- The Q value has been improved more than twice as much as the prototype
- Sharp Fano resonance begins to occur around $d=7 \mu\text{m}$ and is remarkably observed around $d=20 \mu\text{m}$.



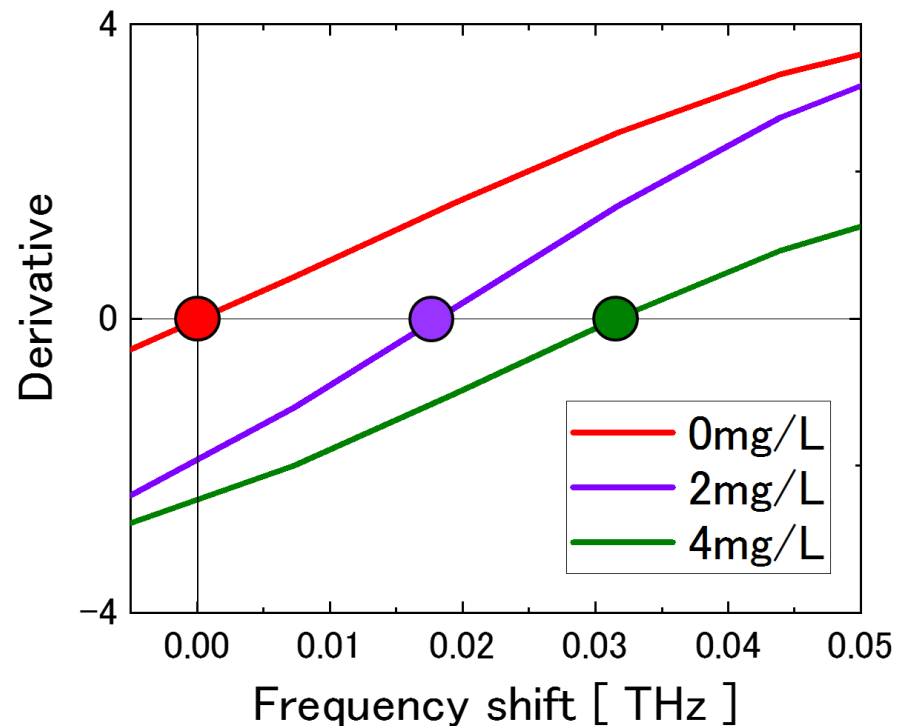
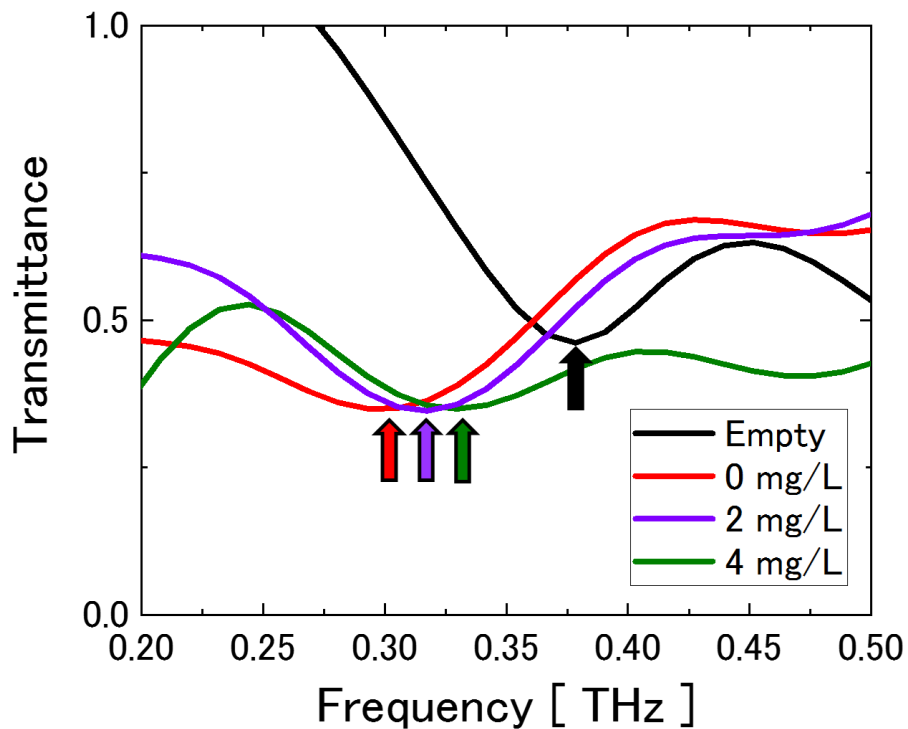
THz transmittance spectra



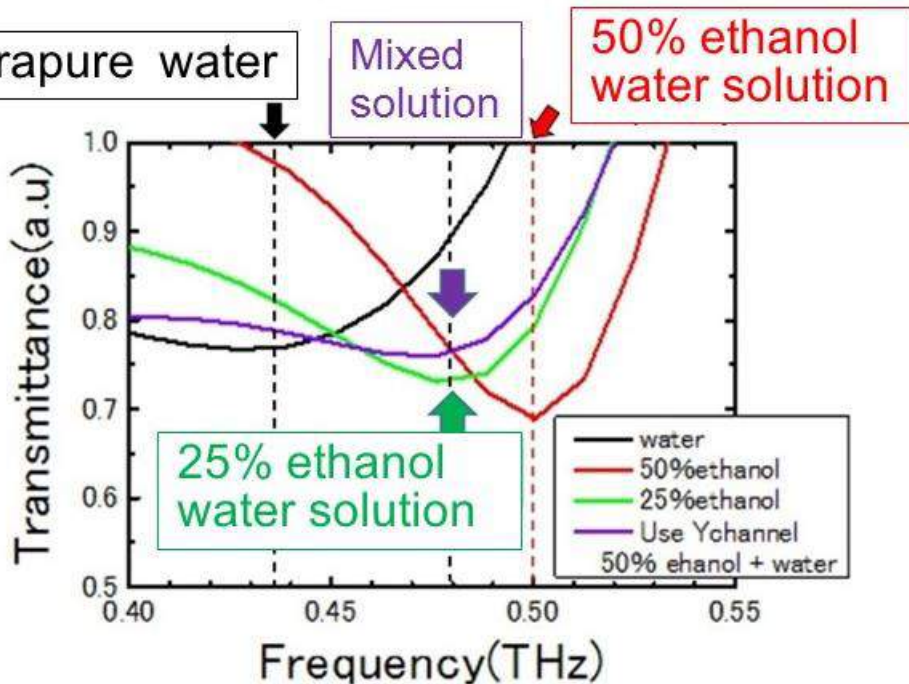
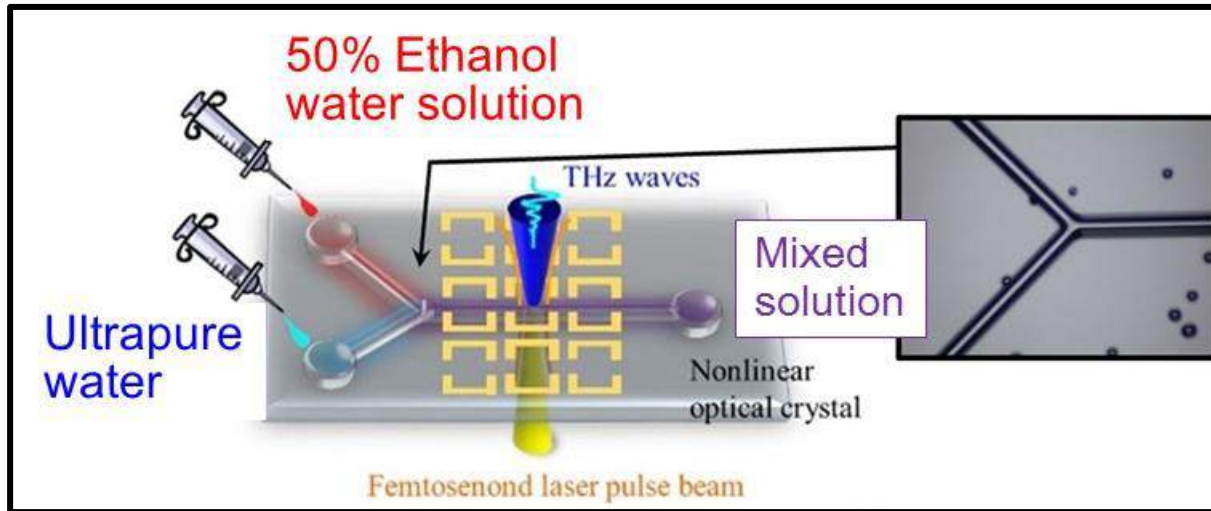
Differentiated THz transmittance spectra with deviation from the resonance frequency of water (0 mg/L)

- The chip operated correctly as a sensor to sensitively detect minute changes in the concentration of a solution.
- 770 amol of solutes in a 77pL of actual volume

D グルコース水溶液



1.4 fmol (2mg/L) of glucose was detected.



- ❑ Y-shaped THz microfluidic chip with meta-atoms
- ❑ Mixed solution is accurately evaluated.
- Apply to THz- μ TAS



テラヘルツバイオ・メディカルセンシング プラットフォームの一翼を担う テラヘルツマイクロ流路チップと 近接場イメージングシステム

1. ヒストロー処理フリーオンサイト癌診断
 2. ヒストロジーフリーゲノム診断支援
 3. 細胞刺激によるダイナミック応答の可視化
 4. 創薬支援 μ -TAS
- など。。。。まだまだ期待されます。

テラヘルツバイオ・医療・創薬サイエンスの創製

1. 背景と展望

2. テラヘルツキラーアプリケーション例の提案

(1) 半導体R & D分析プラットフォームへの展開

(1) テラヘルツ放射顕微鏡 (LTEM)

(2) CMOS表面・パッシベーション評価

(3) ワイドギャップ半導体評価

(4) 太陽電池評価

(5) LSI不良個所特定装置

(2) バイオイオテラヘルツプラットフォームへの展開

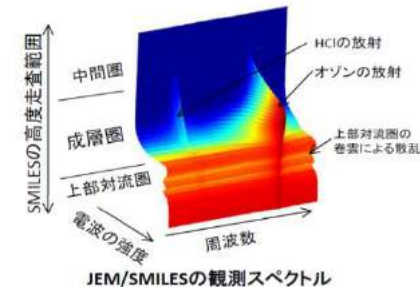
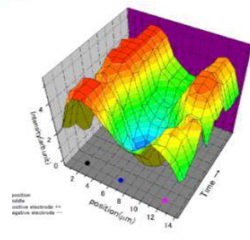
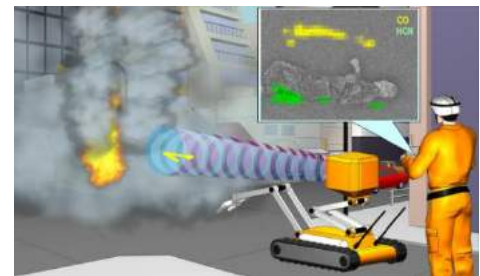
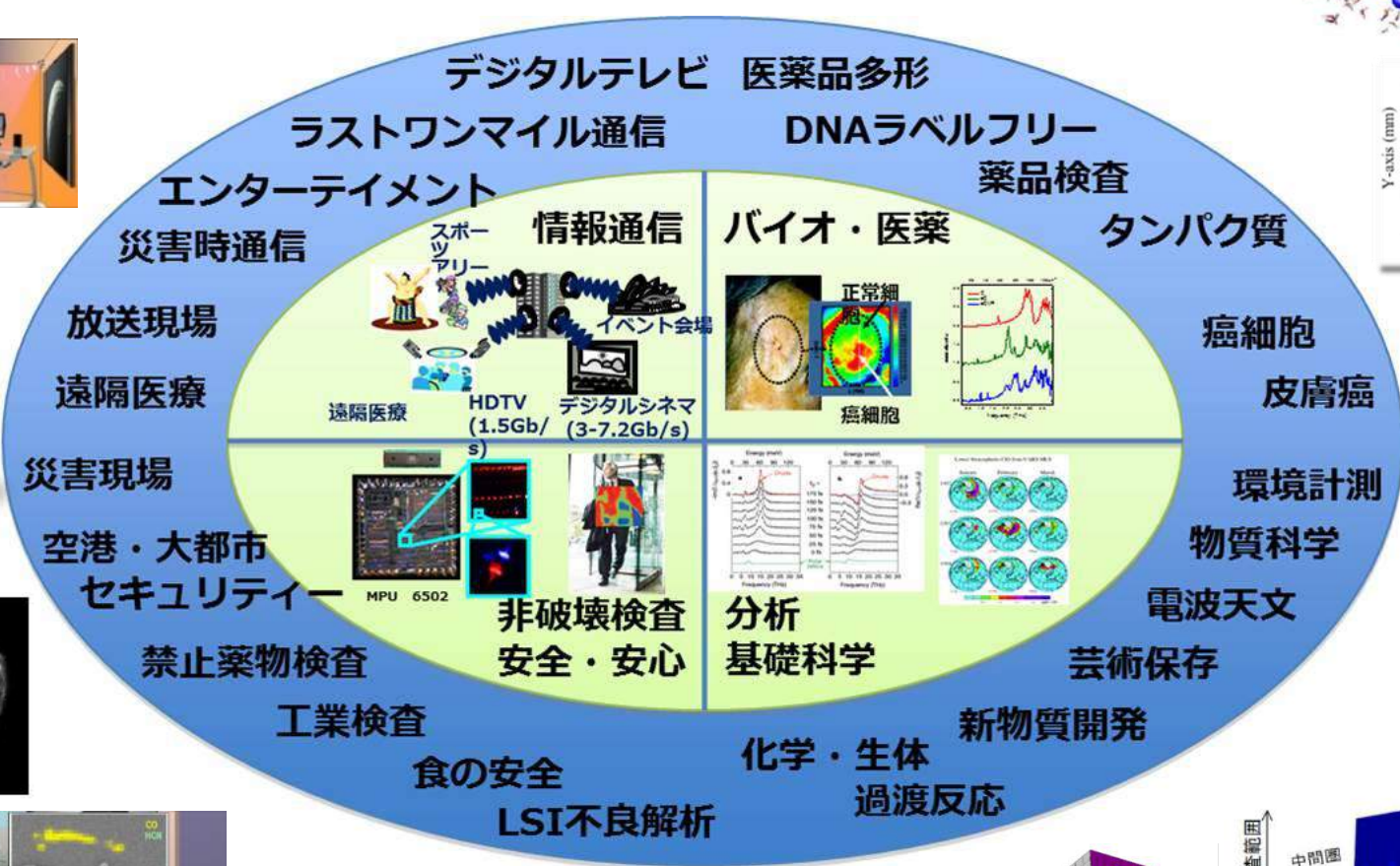
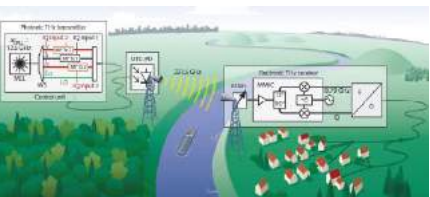
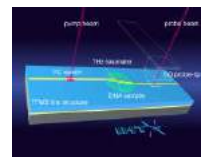
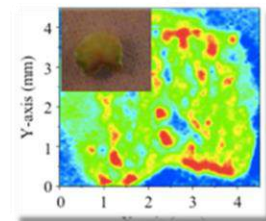
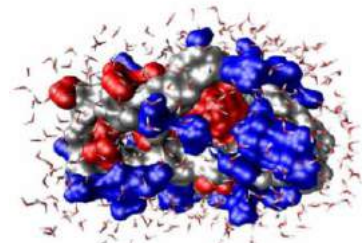
(1) 近接場テラヘルツセンシングイメージングシステム

(2) 高分解能プローブレステラヘルツイメージング

(3) 微量・高感度テラヘルツマイクロ流路チップ

テラヘルツ技術が拓く新産業

大阪大学 斗内政吉



被引用件数上位10%の論文数. もう少し新しいdataによると2012~2014年の平均が10位. (米, 中, 英, 独, 仏, カナダ, 伊, オーストラリア, スペイン, 日本の順). 2017年度科学技術白書(閣議決定)による.

全分野での国別Top 10%補正論文数の推移(3年移動平均)

