

[依頼講演]

光技術によるテラヘルツ連続波の電界分布計測

久武 信太郎[†] ハイフィ グエンファム 永妻 忠夫

大阪大学大学院 基礎工学研究科 〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

E-mail: [†] hisatake@ee.es.osaka-u.ac.jp

あらまし 伝搬している連続波の時空間位相発展を可視化することにより、非回折ビームや光渦を始めとした様々なビームの伝搬・回折・散乱等の性質を実験的に知る事が可能となる。アンテナなどのデバイス近傍界を調べれば、そのデバイスのダイナミクスが実験的にわかり、デバイス評価や設計にも役立つ。本発表では、最近我々が提案した「自己ヘテロダイン法」と「非偏光変調電気光学計測法」に基づく新しい電界可視化技術を紹介する。本技術は光技術特有の広帯域性を有しており、マイクロ波帯からテラヘルツ波帯まで適用可能である。発表では、ホーンアンテナから放射されるテラヘルツ連続波(125 GHz)の位相発展の様子や、近傍界-遠方界変換によるアンテナ放射パターンの測定例なども紹介する。

キーワード 電界計測, 電気光学効果, アンテナ計測, 波動伝搬, テラヘルツ波, マイクロ波, ミリ波

Visualization of a Continuous Terahertz Wave Based on Photonics Technologies

Shintaro HISATAKE[†] Hai Huy NGUYEN PHAM and Tadao NAGATSUMA

Graduate School of Engineering Science, Osaka University,

1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan

E-mail: [†] hisatake@ee.es.osaka-u.ac.jp

Abstract Visualization of the field evolution of the continuous waves with high phase and spatial resolution is a new approach to the study of the physical dynamics of unique beams, such as non-diffractive, self-reconstructing, and vortex beams. As near-field visualization can reveal device dynamics, it is also useful for diagnosing the devices. Here, we demonstrate the visualization of the spatial-temporal evolution of freely propagating continuous terahertz (THz) waves (125 GHz) by adapting the nonpolarimetric electrooptic (EO) detection technique to the self-heterodyne system.

Keyword E-field measurement, Electrooptic sensing, Antenna measurement, Wave propagation, THz wave, Microwave, Millimeter wave

光技術によるテラヘルツ連続波の 電界分布計測

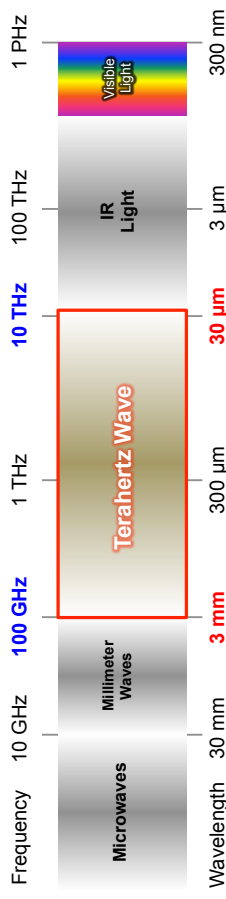
大阪大学大学院 基礎工学研究科
久武 信太郎, ハイファイ グエンファム, 永妻忠夫

波長に着目すると。。。

- 波長: **3 mm-3 μm** の世界
- マタテリアルやプラズモニック
デバイスの物理を理解するための実験に
ちょうどいい。

S. Hisatake et al., PEM研究会

THz波帯



- Frequency: **100 GHz – 10 THz**
- Wavelength: **3 mm- 30 μm**
- Period: **1 THz = 1 ps**
- Photon energy @ 1THz = **4.1 meV = 48 K**

S. Hisatake et al., PEM研究会

マイクロ波帯での実験: 10-12 GHz (波長3 cm)

JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 112, 073114 (2012)

A three-dimensional self-supporting low loss microwave lens with a negative refractive index

Isaac M. Ehrenberg,¹ Sanjay E. Sarma,¹ and Bao-ian Wu²
¹Auto-ID Labs, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139, USA
²Sensors Directorate, Air Force Research Laboratory, Wright Patterson AFB, Ohio 45433, USA
 (Received 5 July 2012; accepted 5 September 2012; published online 11 October 2012)

Demonstrations of focusing with metamaterial lenses have predominantly featured two dimensional structures or stacks of planar elements, both limited by losses which hinder realized gain near the focal region. In this study, we present a plano-concave lens built from a 3D self-supporting metamaterial structure featuring a negative refractive index between 10 and 12 GHz. Fabricated using macroscopic layered prototyping, the lens curvature, negative index and low loss contribute to a recognizable focus and free space gains abc

10.1063/1.4757577

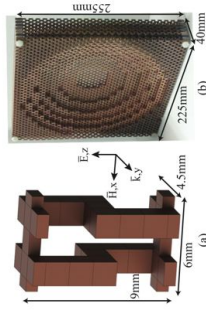


FIG. 1. (a) Solid model of the S-ring unit cell, the response of which is polarization dependent, and (b) a photograph of the assembled planoconcave lens which consists of 7 metamaterial layers in the propagating direction.

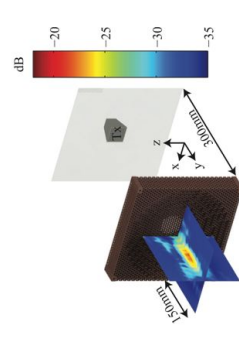
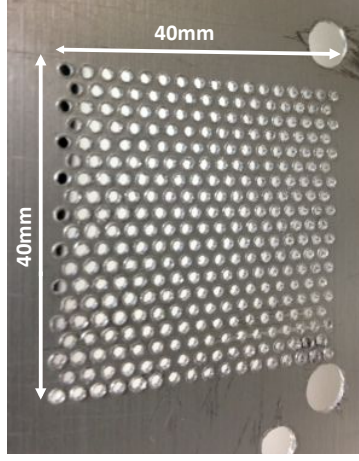


FIG. 5. The experimental setup and plot of experimentally measured power received through the lens at 10.9 GHz, including the focal region approximately 75 mm behind the lens.



120 GHz = 2.5 mm
一桁サイズダウン

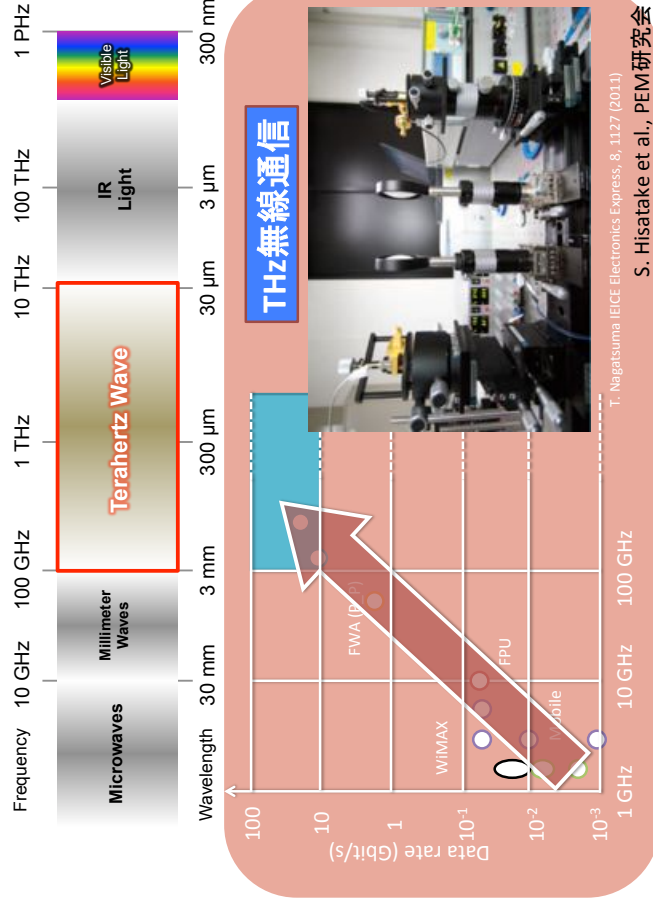
S. Hisatake et al., PEM研究会

f

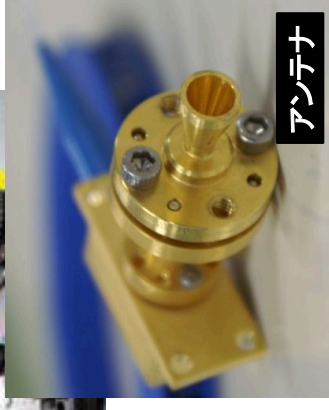
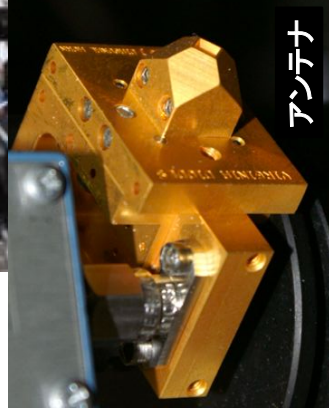
周波数に着目すると。。。。

- 周波数: **100 GHz-10 THz**の世界
- 120 GHz帯は無線通信に使えることに
- 275 GHz以上での無線通信利用の可能性

S. Hisatake et al., PEM研究会



T. Nagatsuma | IEICE Electronics Express, 8, 1127 (2011)
S. Hisatake et al., PEM研究会



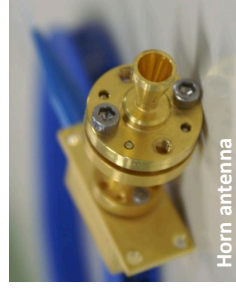
S. Hisatake et al., PEM研究会

NEEDS:

アンテナを始めとした様々な**金属デバイス**の評価のために
CW-THz電磁波の可視化技術が望まれている

振幅と位相の分布の可視化

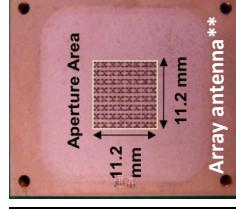
周波数特性の測定 = 分光イメージング



Horn antenna



Metal hole array (Filter)



Array antenna

S. Hisatake et al., PEM研究会

** Collaboration with Prof. Ando and Hirokawa, APMP2012

Challenges and solutions:

[1] 広帯域に亘る精密測定

自己ヘテロダイン法



[2] 再現性の高いEO計測

非偏光変調EO計測法



APPLICATIONS:

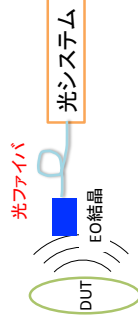
- 金属デバイスからの(再)放射場の可視化
- 位相分布の時空間発展
- アンテナ評価

S. Hisatake et al., PEM研究会

Approach:

EO(Electrooptic) 計測:

- 被計測波による光変調
- 高速応答 (>1 THz)
- 低擾乱(誘電体)
- ファイバ型は取り扱いが柔軟

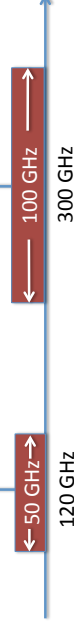


* 切離し導波管や微小アンテナ(金属プロービング)は被測定場を乱す

S. Hisatake et al., PEM研究会

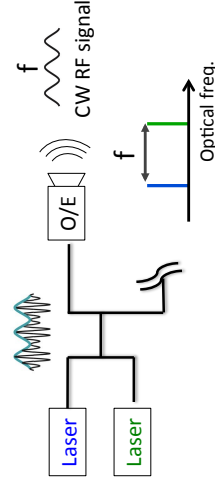
[1] 広帯域に亘る精密な位相測定

Requirements



Approach:

発生と検出にFREE-RUNNING LASERを使う



Problem:

FREE-RUNNING LASERで精密位相計測? ?

S. Hisatake et al., PEM研究会

FREE-RUNNING LASERで精密位相計測？

IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 13, NO. 1, JANUARY 2013

31

Phase-Sensitive Terahertz Self-Heterodyne System Based on Photodiode and Low-Temperature-Grown GaAs Photoconductor at 1.55 μm

Shintaro Hisatake, Member, IEEE, Genki Kitahara, Katsuhiko Ajiro, Associate Member, IEEE, Youichi Fukada, Naoto Yoshimoto, Member, IEEE, and Tadao Nagatsuma, Senior Member, IEEE

自己ヘテロダイン法

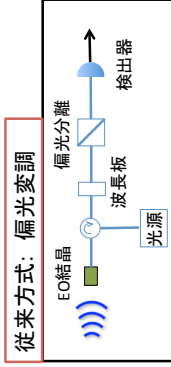
- 広帯域：DC付近からTHzに亘って連続的に掃引可能
- Free-running laserを使うのに精密位相測定が可能

S. Hisatake et al., PEM研究会

[2]再現性の高いEO計測

S. Hisatake et al., PEM研究会

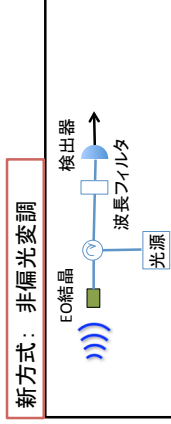
これまでのEO計測=プローブ光の偏光変調に基づく手法(25年間の実績)



従来方式が持つ問題点

- EO結晶とファイバによる偏波変動
- 感度が外乱により大きく揺らぐ
- 高感度化はEO結晶次第

- 測定の再現性に問題
- 高感度化に限界

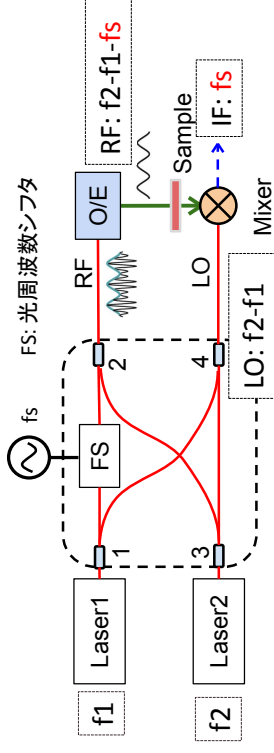


新方式が持つ利点

- 感度は安定
- 調整不要
- 自然複屈折の強いEO結晶も利用可能
- システムからのアプローチでも高感度化が可能

- 高い再現性
- これまでの限界を打ち破る感度

自己ヘテロダイン法の原理



$$i(t) \propto T(\omega) \cos(\omega_s t + \phi(\omega))$$

振幅

位相

(1) 振幅と位相の同時計測

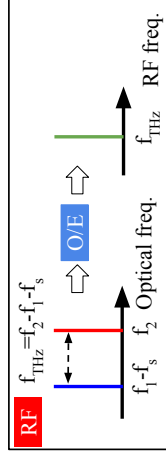
(2) 光源由来の位相雑音はキャンセル

S. Hisatake et al., IEEE Sensors Journal, vol.13, pp. 31-36 (2013).

S. Hisatake et al., PEM研究会

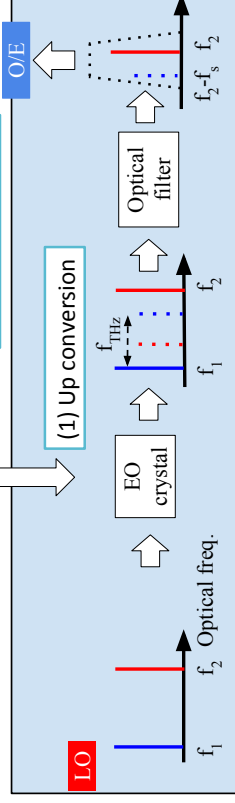
非偏光変調方式の原理

THz波を光領域でコヒーレント検出



(1) Up conversion

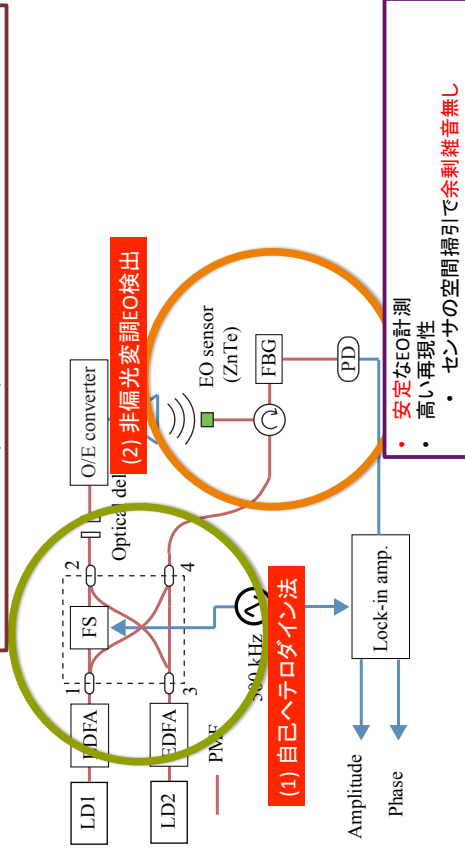
(2) Down conversion



S. Hisatake et al., PEM研究会

実験系

- Free-running laserを用いたTHz連続波の振幅と位相の精密計測
- 広い周波数帯域幅 (> 1 THz)

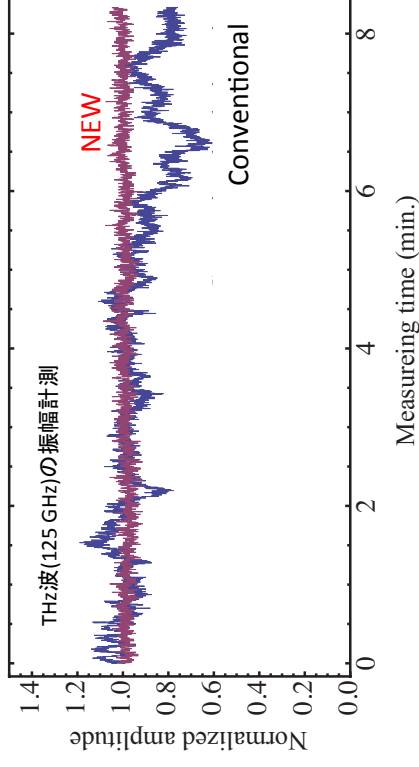


- 安定なEO計測
- 高い再現性
- センサの空間掃引で余剰雑音無し

S. Hisatake et al., PEM研究会

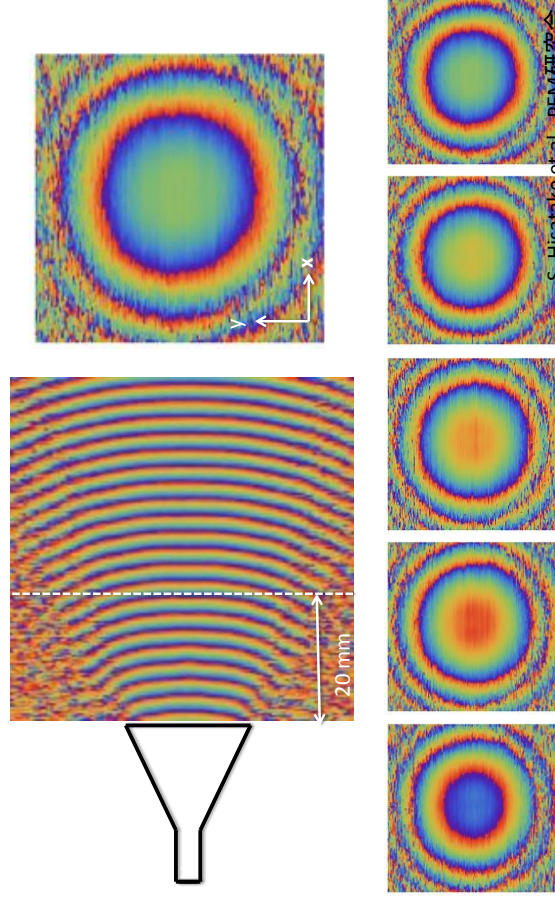
安定性の比較

- SNR: 31 dB
- 位相計測の標準偏差: 80 mrad



S. Hisatake et al., PEM研究会

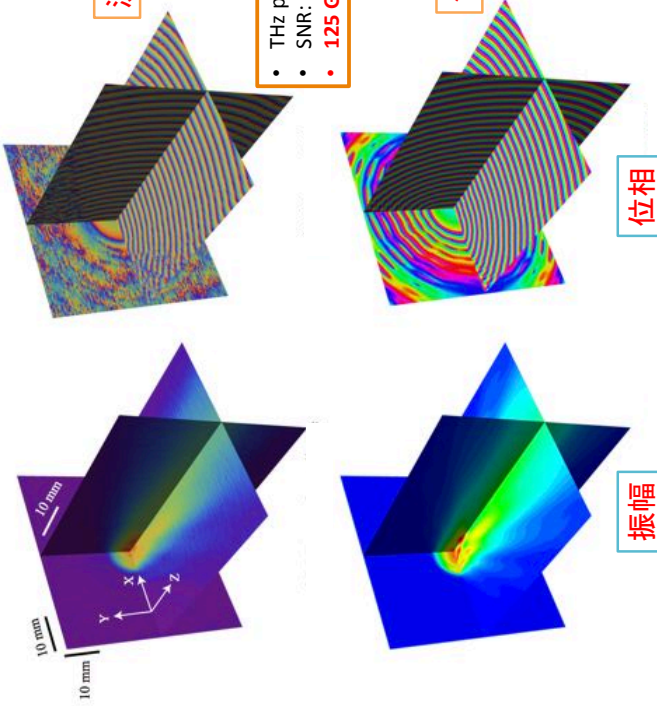
位相の時空間発展



S. Hisatake et al., PEM研究会

測定結果

- THz power: 650 μ W
- SNR: 31 dB
- 125 GHz



振幅

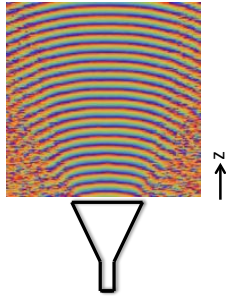
位相

シミュレーション

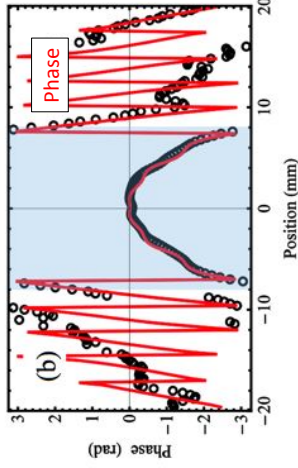
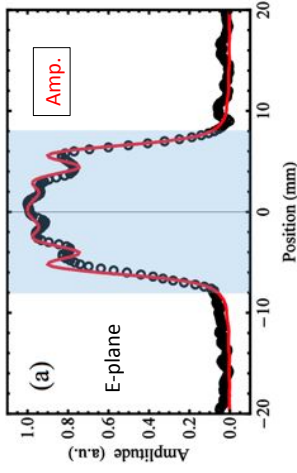
S. Hisatake et al. PEM研究会

NEAR-FIELD Sim. vs. Meas.

— Simulated
○ Measured



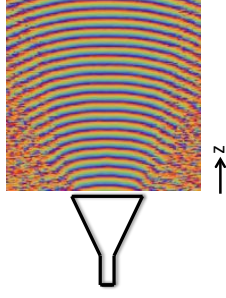
$z=1 \text{ mm}=0.4\lambda$



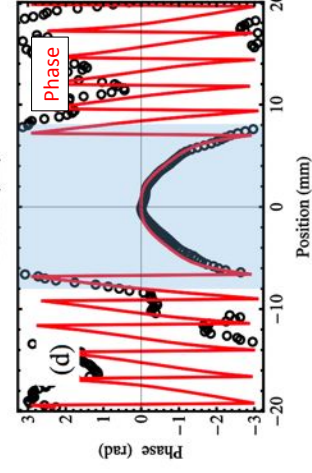
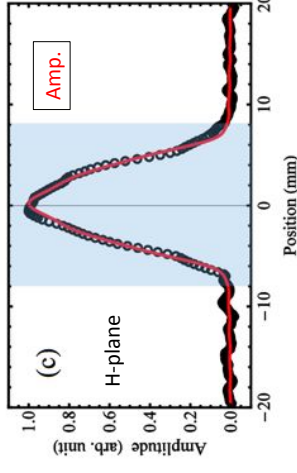
S. Hisatake et al., PEM研究会

NEAR-FIELD Sim. vs. Meas.

— Simulated
○ Measured

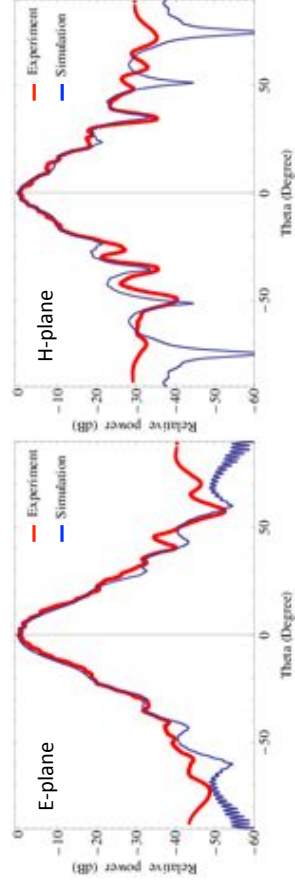


$z=1 \text{ mm}=0.4\lambda$



S. Hisatake et al., PEM研究会

ホーンアンテナの放射パターン(@125 GHz)



S. Hisatake et al., PEM研究会

まとめ

- 光技術によるテラヘルツ連続波の電界分布計測
 - 自己ヘテロダイン法+非偏光変調EO計測
 - 広帯域: GHz to THz
 - 高精度・高い計測の再現性
- THz放射場の可視化・位相の時空間発展の可視化(@125 GHz)
 - 位相計測の標準偏差: **80 mrad**
- Near-field分布はシミュレーションと良い一致
- アンテナ評価: ホーンアンテナの放射パターン(@125 GHz)
 - $z=1 \text{ mm}=0.4\lambda$
 - シミュレーションと良い一致

今後の展開

- Phased-array antenna等の評価へ適用
- プラズモンデバイス、メタマテリアルの物理
- 高感度化

S. Hisatake et al., PEM研究会