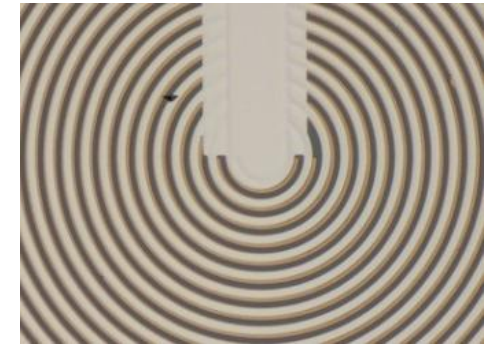
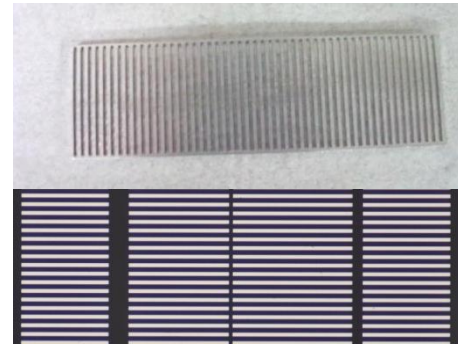
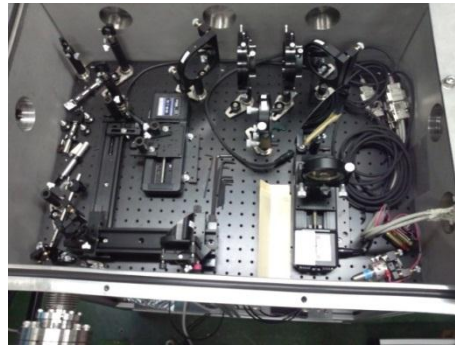
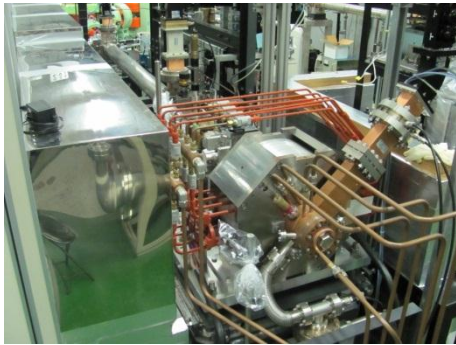


メタマテリアルにおけるスミス・パーセル効果およびラジアル偏光テラヘルツ波発生に関する研究



阪大産研¹、阪大レーザー研²、産総研³

菅晃一¹、楊金峰¹、小方厚¹、近藤孝文¹、榊原昇一¹、野澤一太¹、

樋川智洋¹、法澤公寛¹、小林仁¹、吉田陽一¹、萩行正憲²、

黒田隆之助³、豊川弘之³

テラヘルツ波に関する研究

Terahertz (THz)-wave: EM-wave with wavelengths of sub-mm and mm.

Our investigations on THz-wave using electron beam and laser

- Coherent Cherenkov radiation (CCR)
- Smith-Purcell radiation (SPR)
- Coherent transition radiation (CTR)
- Large-aperture photoconductive antenna (PCA)

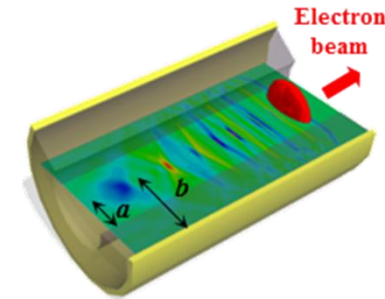


Diagram of CCR using dielectric tube
K. Kan et al., Appl. Phys. Lett. 99, 231503 (2011).

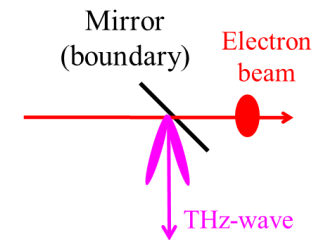


Diagram of CTR using Al mirror

Applications

beam diagnostic, pulse radiolysis, acceleration of charged particle, spectroscopy,
THz-device

テラヘルツ波に関する研究

Terahertz (THz)-wave: EM-wave with wavelengths of sub-mm and mm.

Our investigations on THz-wave using electron beam and laser

- Coherent Cherenkov radiation (CCR)
- Smith-Purcell radiation (SPR)
- Coherent transition radiation (CTR)
- Large-aperture photoconductive antenna (PCA)

Applications

beam diagnostic, pulse radiolysis, acceleration of charged particles
THz-device

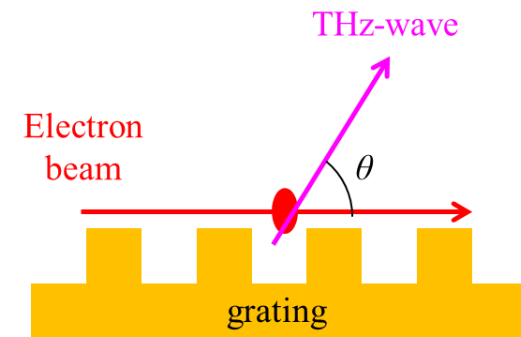


Diagram of SPR using metallic grating

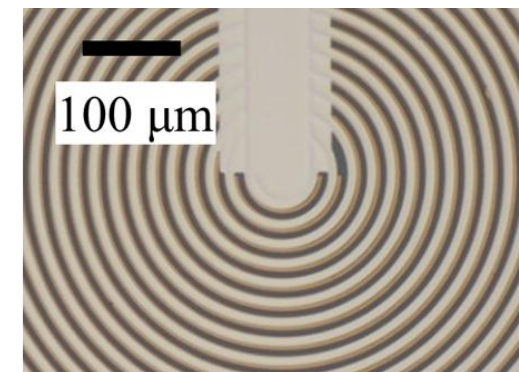


Diagram of PCA using SI-InP with microelectrode array

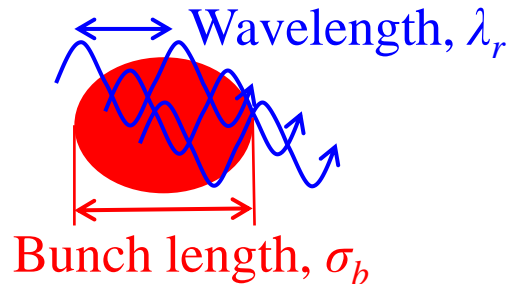
概要

- **メタマテリアルにおけるスミス・パーセル効果**
 - 電子ビームのコヒーレント放射
 - フォトカソードRF電子銃ライナックとスミス・パーセル効果の測定系
 - 金属回折格子およびメタマテリアルを用いたスミス・パーセル効果
- **ラジアル偏光テラヘルツ波発生**
 - 光伝導アンテナの製作
 - ラジアル偏光(?)テラヘルツ波の発生と計測
 - 今後の応用
- **まとめ**

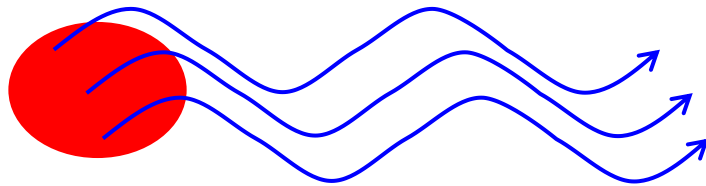
概要

- メタマテリアルにおけるスミス・パーセル効果
 - 電子ビームのコヒーレント放射
 - フォトカソードRF電子銃ライナックとスミス・パーセル効果の測定系
 - 金属回折格子およびメタマテリアルを用いたスミス・パーセル効果
- ラジアル偏光テラヘルツ波発生
 - 光伝導アンテナの製作
 - ラジアル偏光(?)テラヘルツ波の発生と計測
 - 今後の応用
- まとめ

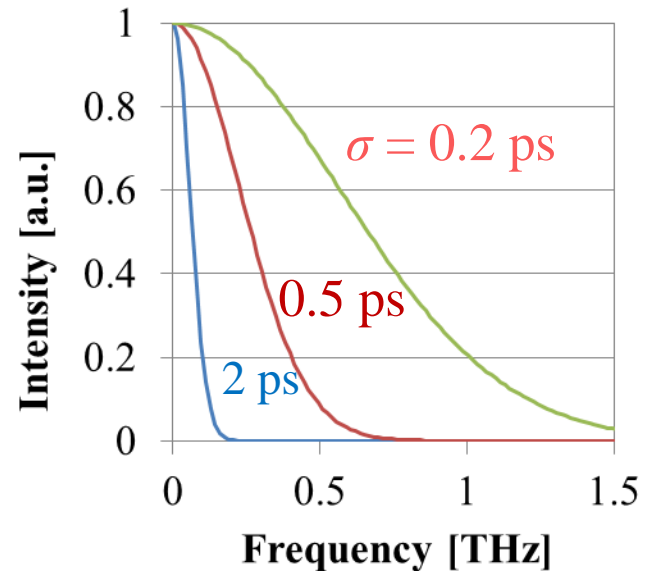
背景～電子ビームのコヒーレント放射～



Incoherent case $\lambda_r < \sigma_b, I \propto N$



Coherent case $\lambda_r > \sigma_b, I \propto N^2$



Bunch form factor, $f_b(\sigma, \omega)$

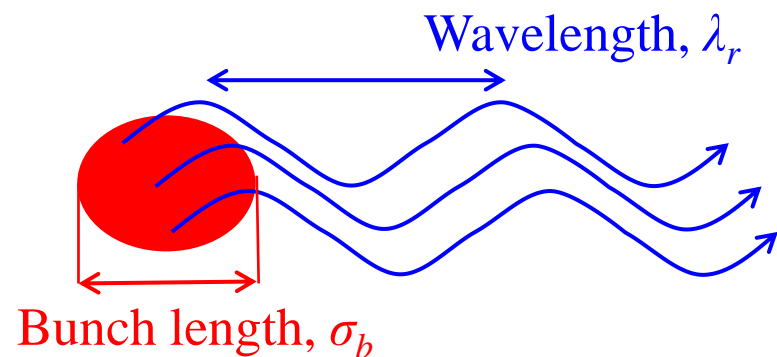
$$I(\omega) \propto Nf_e(\omega) + N(N-1)f_e(\omega)f_b(\sigma, \omega)$$

$$f_b(\sigma, \omega) = \exp\left(-(\sigma\omega)^2\right) \quad @ \text{ Gaussian distribution}$$

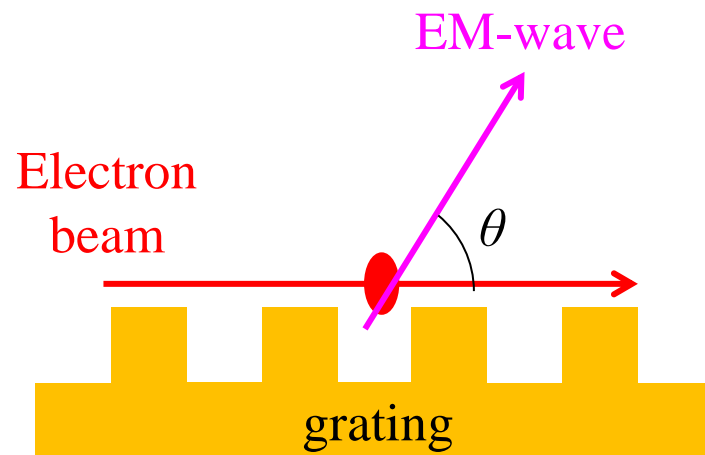
$$N \approx 10^9 \quad @ 1 \text{ nC}$$

短パルス電子ビームほど高強度・高周波のテラヘルツ波を放射可能。

メタマテリアルにおけるスミス・パーセル効果の目的



Coherent case $\lambda_r > \sigma_b$, $I \propto N^2$

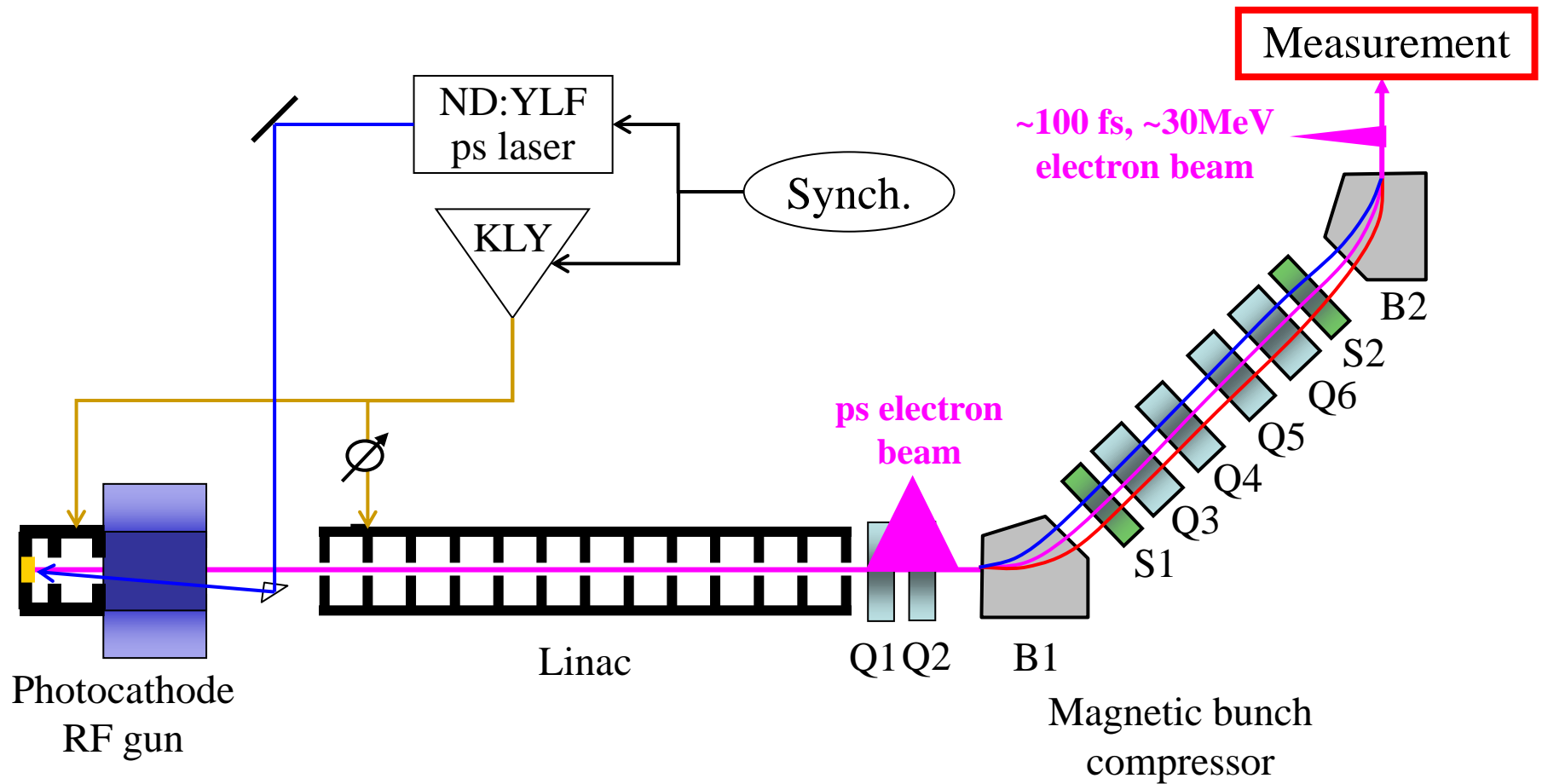


Smith-Purcell effect: a form of Cherenkov radiation where the phase velocity of the light has been altered by the **periodic grating**. (Ref.: Wikipedia)

Generation of THz-wave:
J. Urata et al., PRL 80, 516 (1998).

電子ビームと周期構造によるスミス・パーセル効果を利用した新たな高効率テラヘルツデバイス開発を目的とする。

フォトカソードRF電子銃ライナック



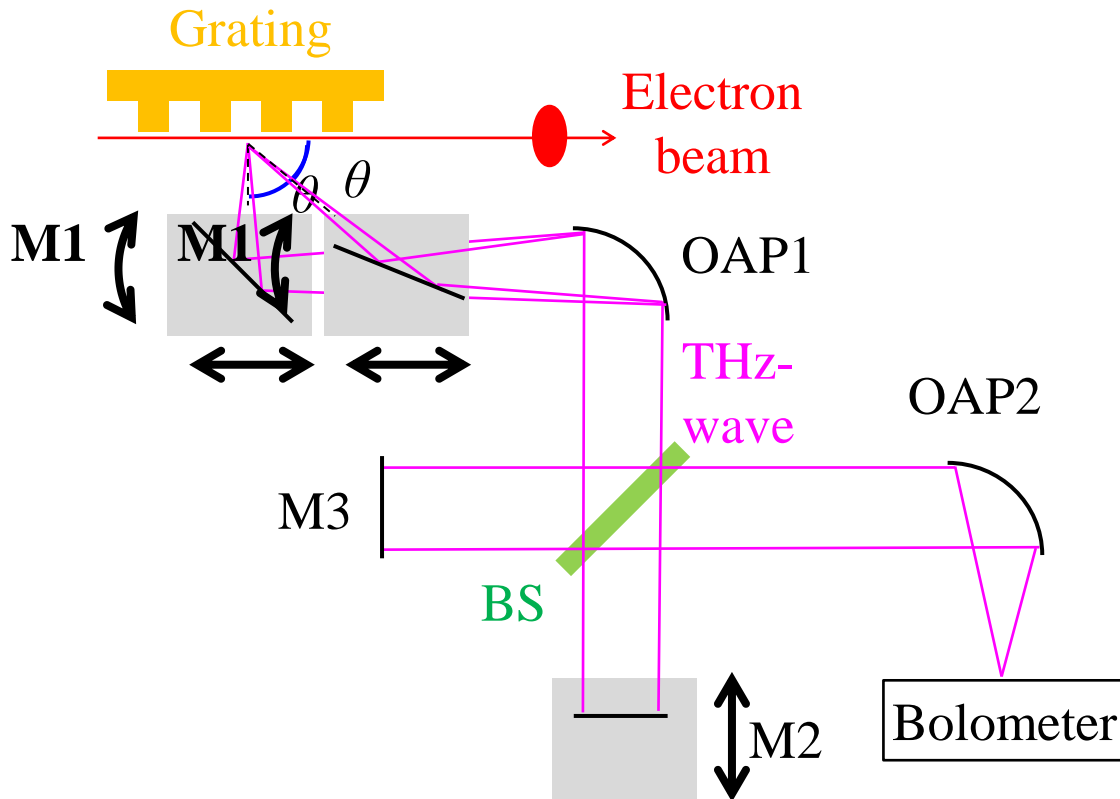
Beam energy : ~30MeV

Charge : <1 nC/pulse

Bunch length : ~100 fs

Operation: 10 Hz

スミス・パーセル効果の測定系



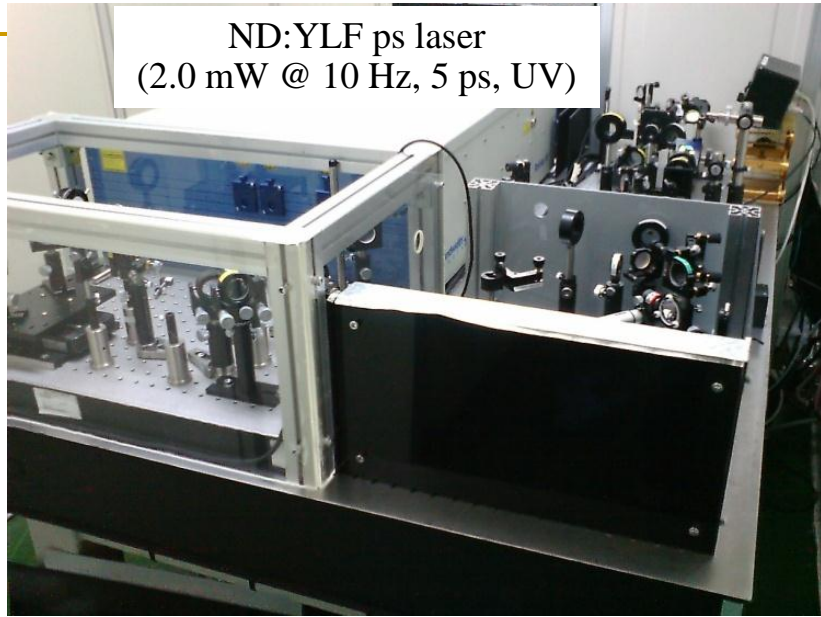
Spectroscopy using Michelson interferometer

M: plain mirror, OAP: off-axis parabolic mirror, BS: beam splitter.

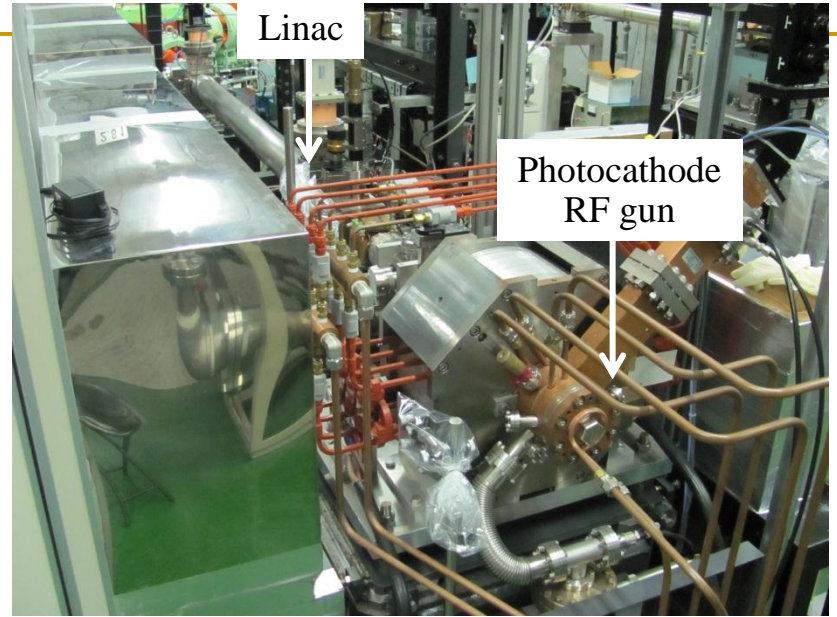
- Interferogram was measured by moving mirror (M2) and LHe Si bolometer.
- Frequency spectrum analyzed by the Fast Fourier Transform (FFT).
- THz-wave at a radiation angle, θ , was directed to the interferometer using moving and rotating mirror (M1) and off-axis parabolic mirror (OAP1).



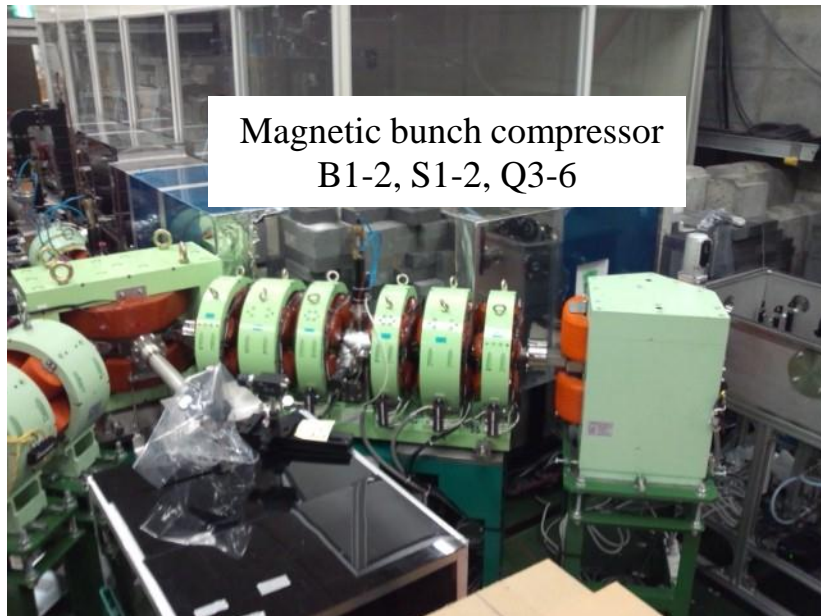
Bolometer



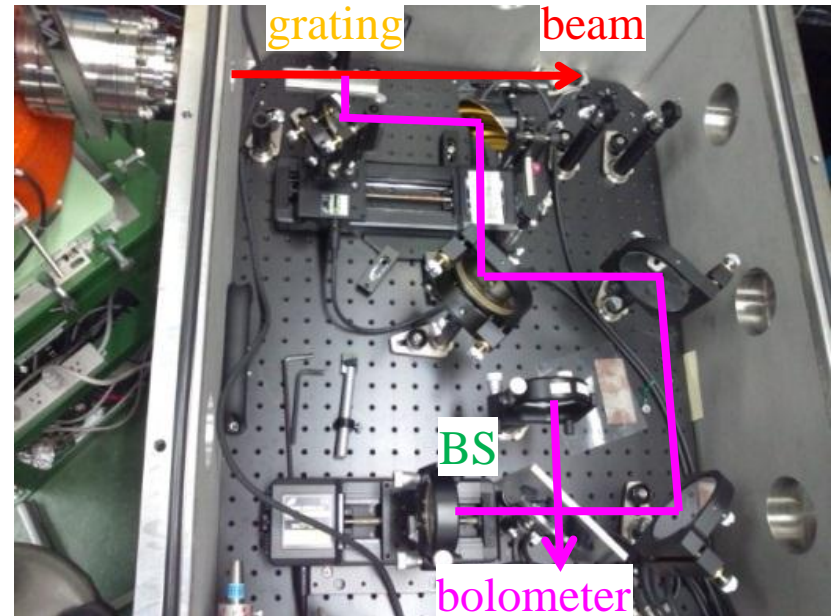
Picosecond laser



Accelerator



Magnetic bunch compressor

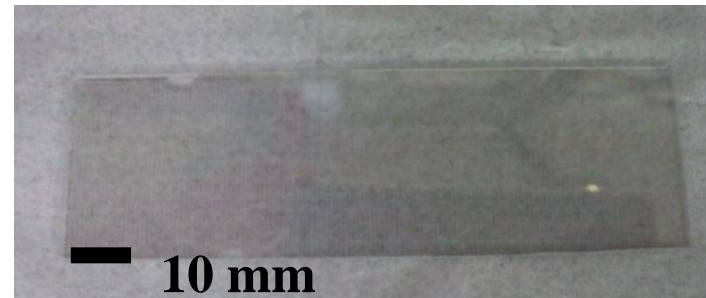


Interferometer

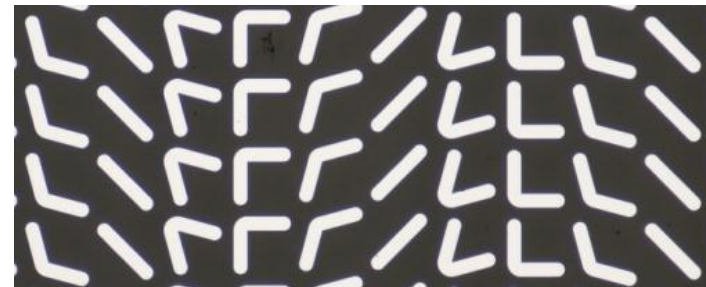
金属回折格子とメタ(マテリアル)表面



Metallic grating
Period length : 2 mm
Length : 100 mm
Made from aluminum

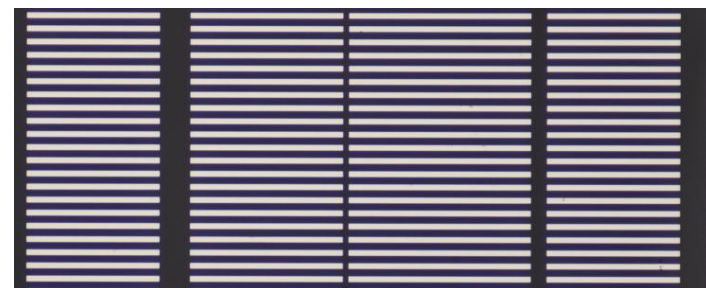


Example of meta-surface
Aluminum on fused-silica



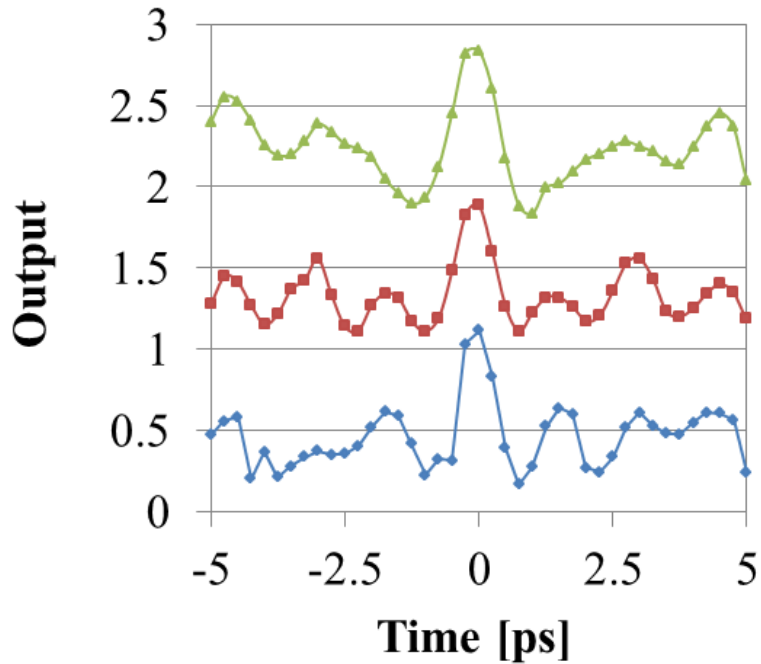
V-antenna

Metamaterial: can affect EM waves by having structural features smaller than the wavelength of the respective EM wave .
Meta-surface: 2D surface structure.

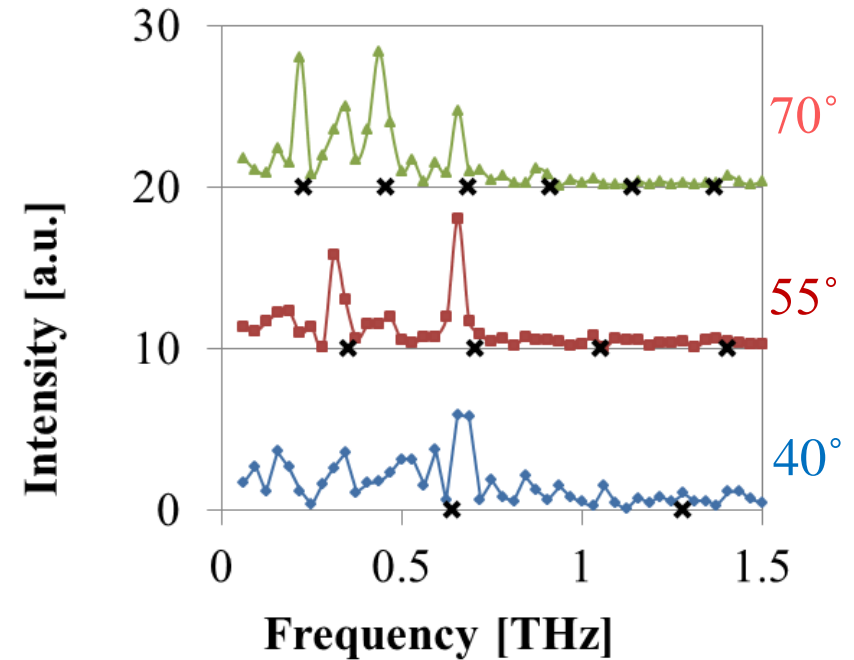


Linear antenna

金属回折格子の結果



Fast Fourier Transform



Interferograms for three different radiation angles

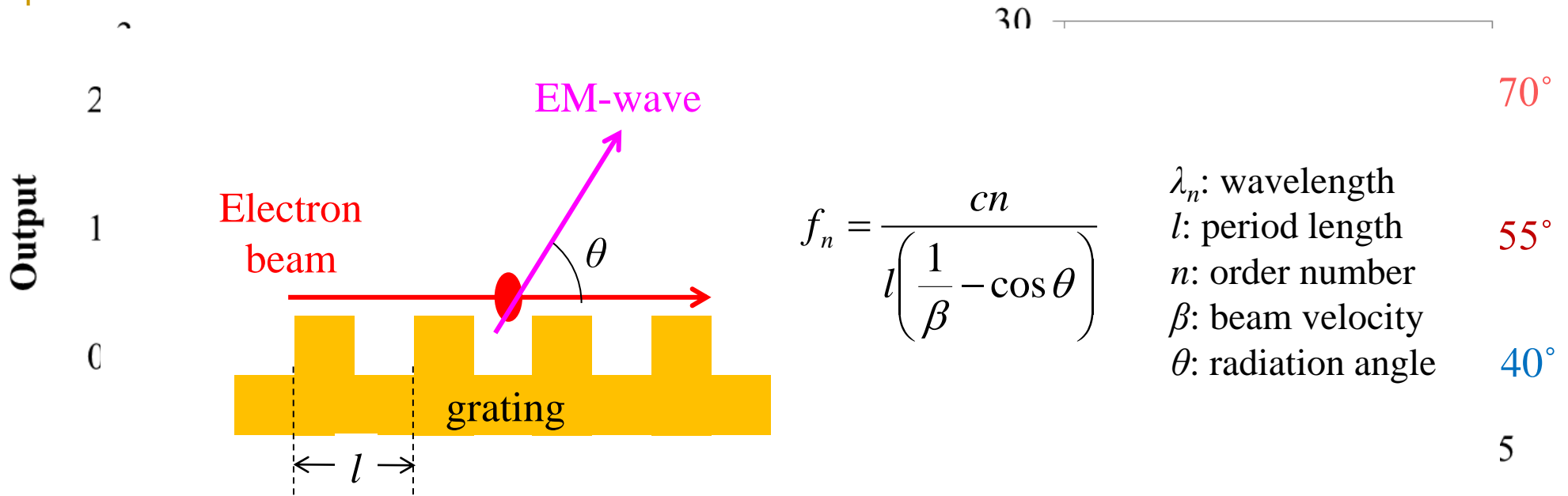
- Charge: 100 pC/pulse, ps gun
- Bunch length: ~200 fs
- 0.5 ps step
- Offsets adjusted for comparison

Frequency spectra for three different radiation angles (×: theoretical frequency)

- Offsets adjusted for comparison

- 前方への放射: 単色、~0.7 THz at $\theta = 40^\circ$
- 後方への放射: 多モード、2~3次 at $\theta = 55, 70^\circ$

金属回折格子の結果



Interferograms for three different radiation angles

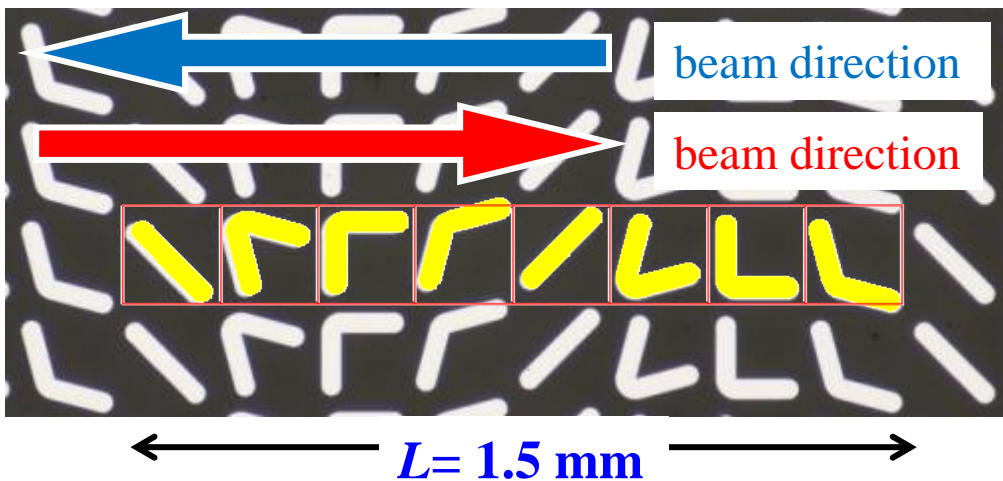
- Charge: 100 pC/pulse, ps gun
- Bunch length: ~200 fs
- 0.5 ps step
- Offsets adjusted for comparison

Frequency spectra for three different radiation angles (×: theoretical frequency)

- Offsets adjusted for comparison

- 前方への放射: 単色、~0.7 THz at $\theta = 40^\circ$
- 後方への放射: 多モード、2~3次 at $\theta = 55, 70^\circ$

V-antennaの測定



Picture of metal V-antenna array
(Aluminum: white area)

c.f., N. Yu et al., Science 334, 333 (2011).
Meta-surface of V-antenna array: Control of
phase and diffraction angle of EM wave
according to Huygens' principle.

Sample

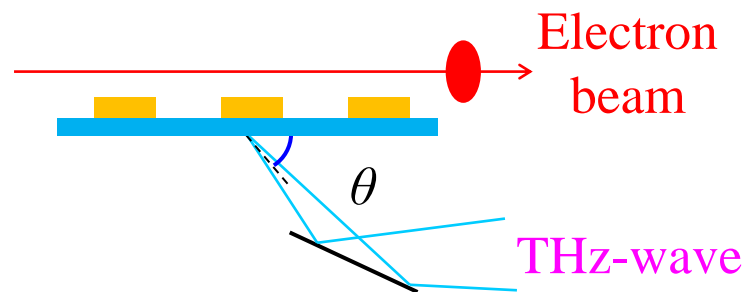
Deposited aluminum on fused-silica (t 1.0 mm)

Period of 8 antennas, $L: 1.5 \text{ mm}$ (0.2 THz)

Period of minimum unit: $\sim 0.2 \text{ mm}$ (1.5 THz)

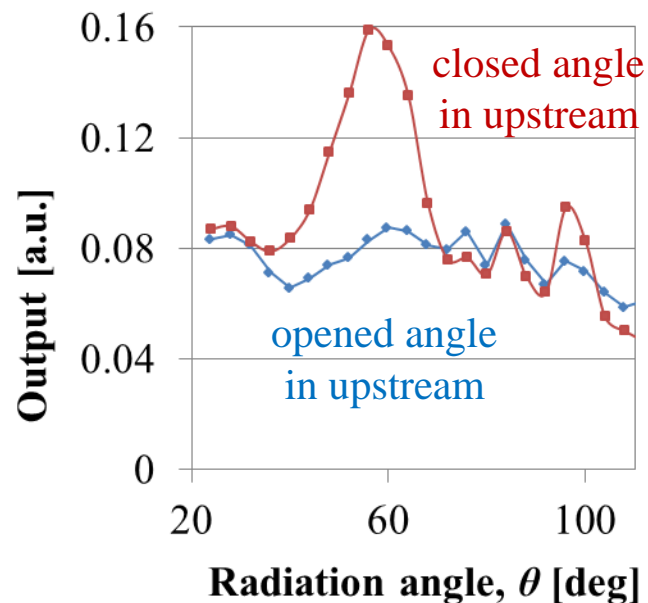
Size: $30 \times 100 \text{ mm}$

Array number: 170×160



Geometry in measurement

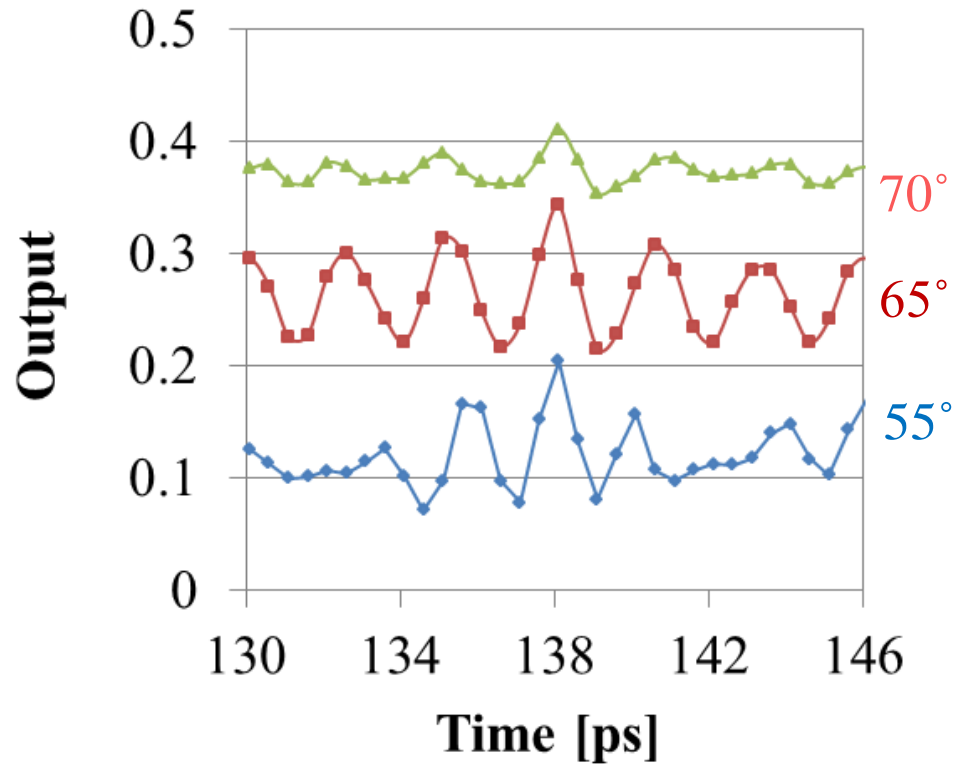
Beam, Antenna, Fused-silica, Mirror



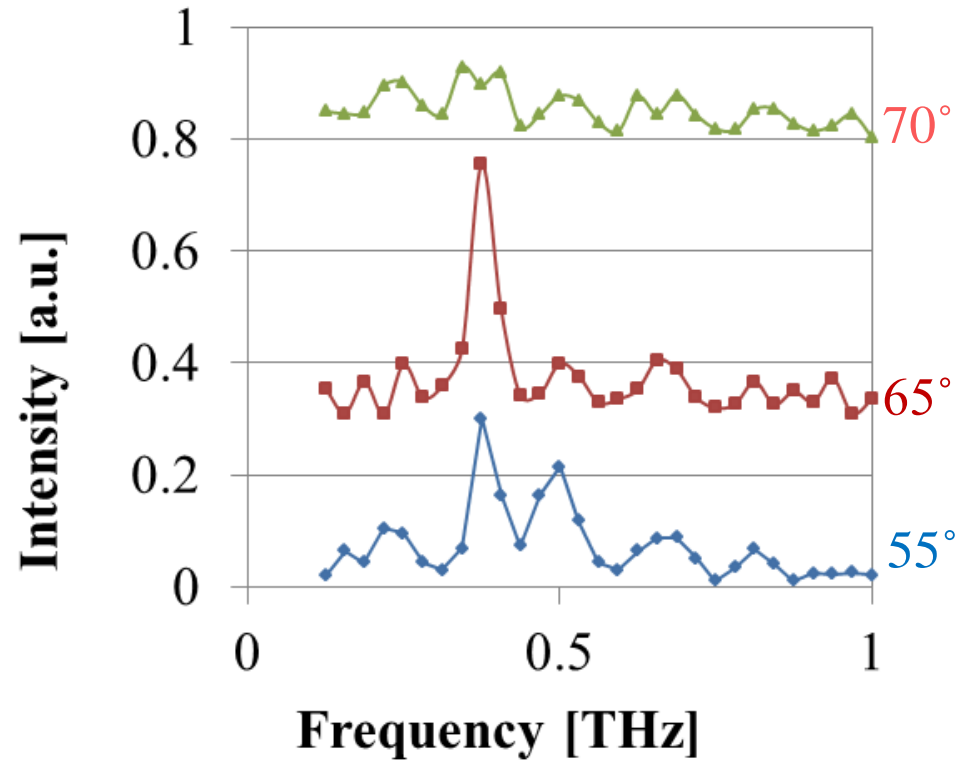
THz-wave intensity as a
function of radiation angle

ビーム通過方向により放射強度の異方性

V-antennaの結果



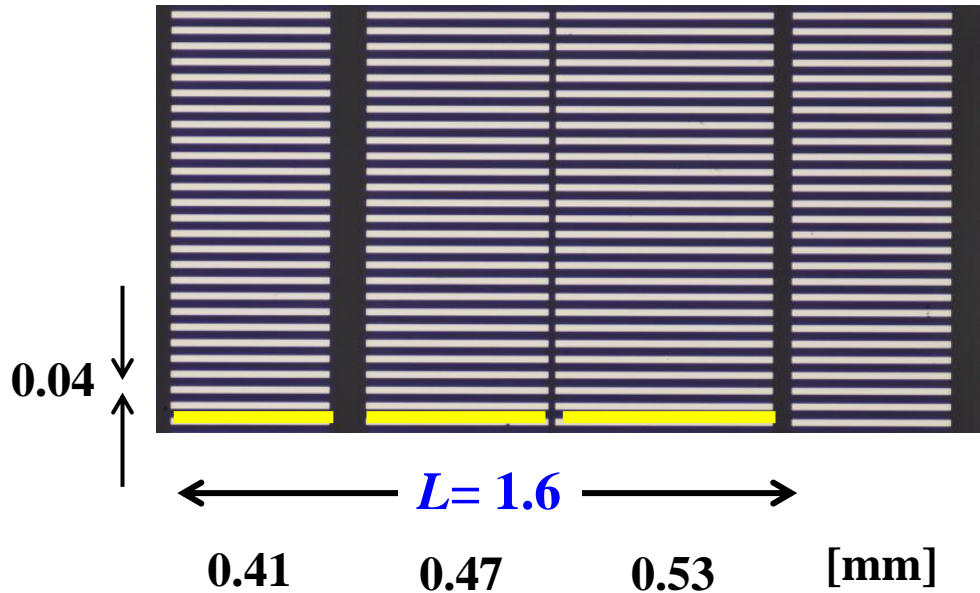
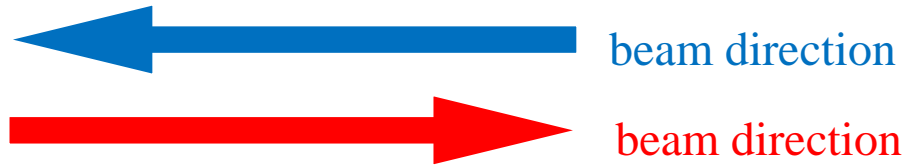
Interferograms for three different radiation angles



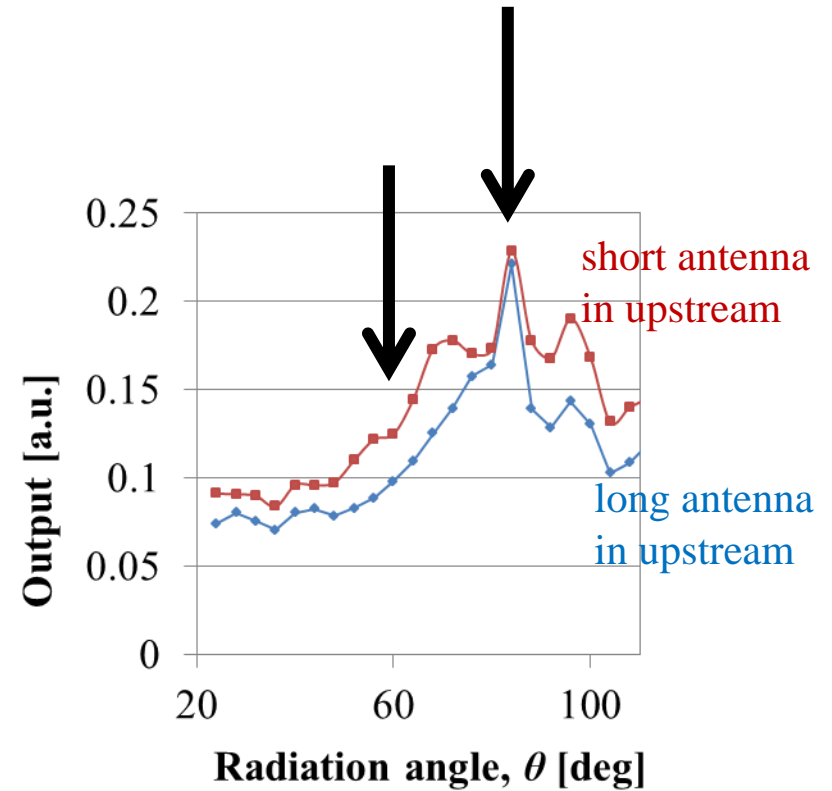
Frequency spectra for three different radiation angles

放射角: ~65° のとき、~0.4 THz にスパイクを観測。

Linear antennaの測定



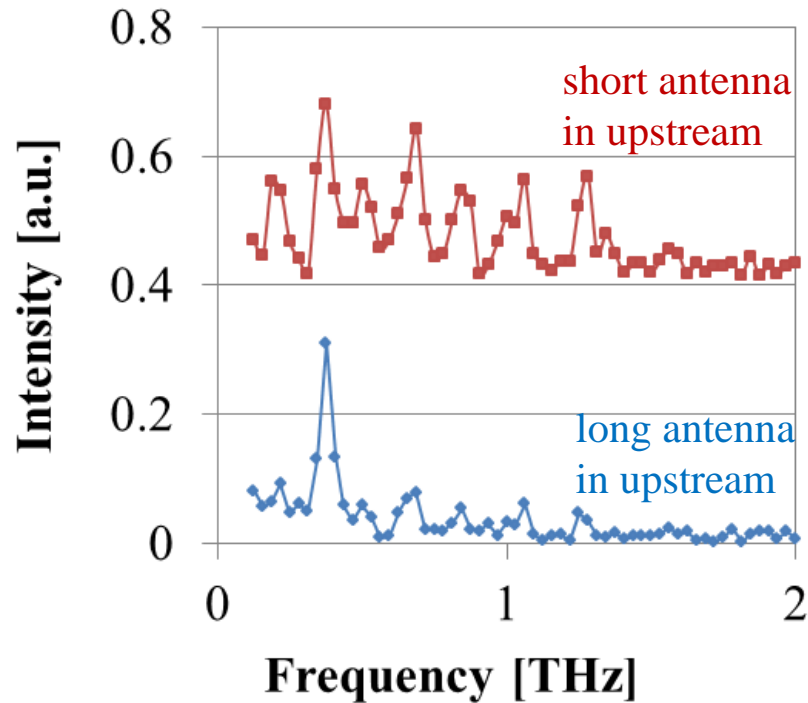
Array of linear antennas
White area: deposited aluminum
Yellow area: unit of 3 antennas
on 1-mm-thick fused-silica



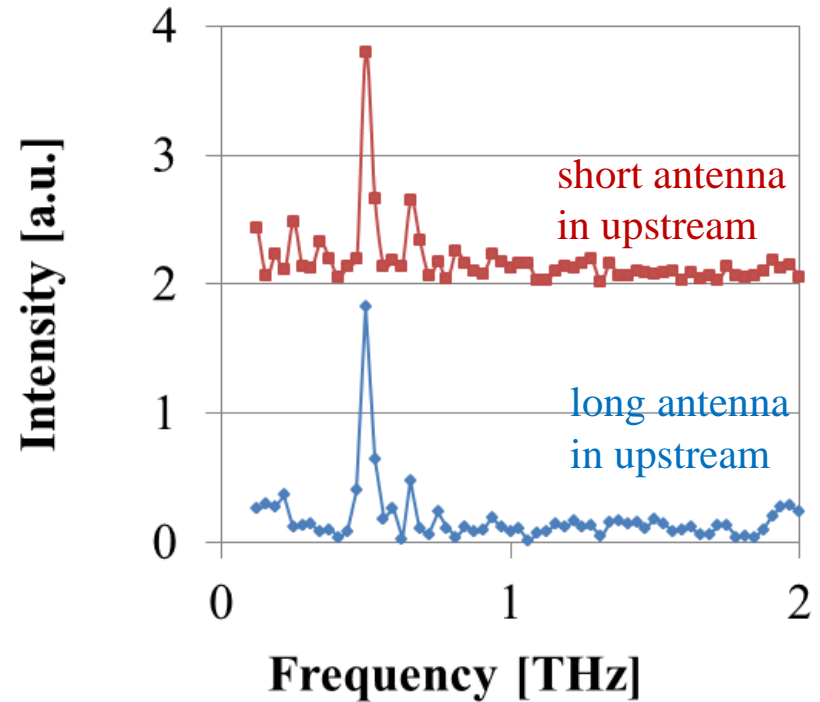
THz-wave intensity as a function
of radiation angle

ビーム通過方向により放射強度の異方性

Linear antennaの結果



Frequency spectra at a radiation angle of 60°
Offsets were adjusted for comparison.



Frequency spectra at a radiation angle of 96°
Offsets were adjusted for comparison.

- 放射角: 60° のとき、 ~ 0.4 もしくは < 1.3 THz にスパイクを観測。
- 放射角: 96° のとき、 0.5 THz にスパイクを観測。

メタマテリアルにおけるスミス・パーセル効果のまとめ

新たな高効率テラヘルツデバイス開発のため、電子ビームと周期構造によるスミス・パーセル効果の研究を行った。

- 金属回折格子

2 mm周期長の金属回折格子により、 <0.7 THz 単色・多モードテラヘルツ波

- V・直線アンテナ配列のメタ(マテリアル)表面

テラヘルツ波強度のビームに対する異方性

0.5 THz単色、 <1.3 THzの多モードテラヘルツ波

概要

- **メタマテリアルにおけるスミス・パーセル効果**
 - 電子ビームのコヒーレント放射
 - フォトカソードRF電子銃ライナックとスミス・パーセル効果の測定系
 - 金属回折格子およびメタマテリアルを用いたスミス・パーセル効果
- **ラジアル偏光テラヘルツ波発生**
 - 光伝導アンテナの製作
 - ラジアル偏光(?)テラヘルツ波の発生と計測
 - 今後の応用
- **まとめ**

光伝導アンテナ (PCA)?

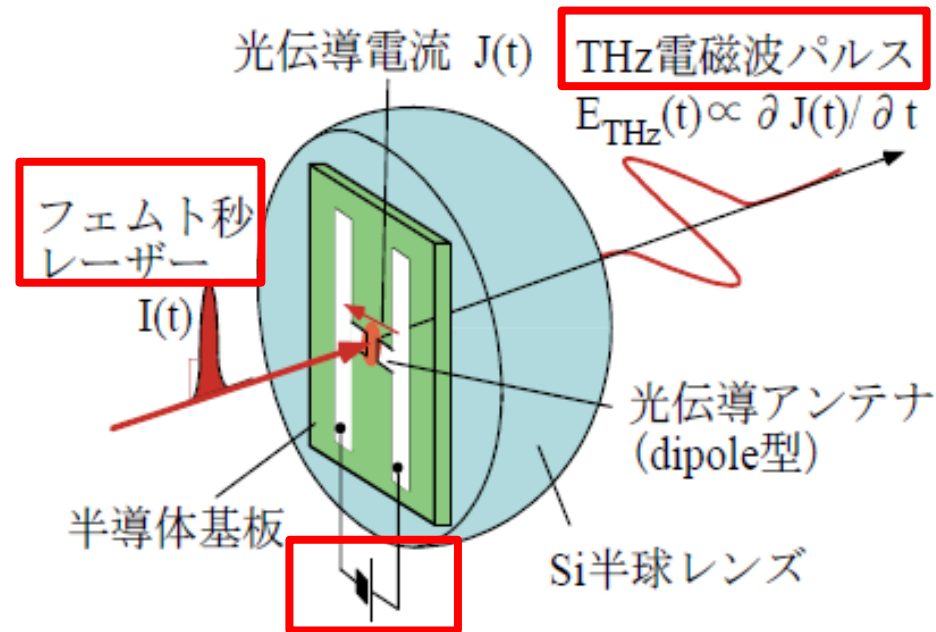


Diagram of photoconductive antenna (PCA)

- Substrate: LT-GaAs, SI-GaAs, SI-InP etc.
- Si lens

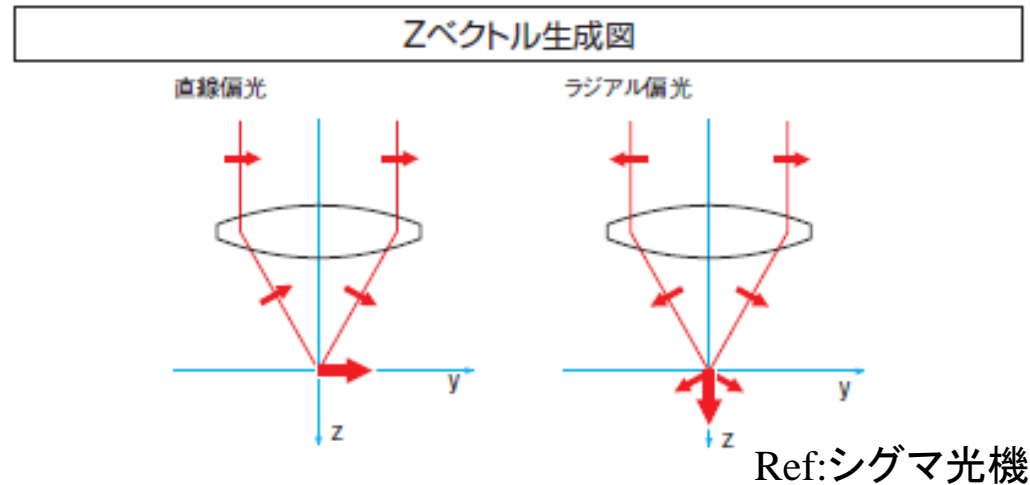
Ref: 「テラヘルツ電磁波の発生・検出とその応用」

http://fir.u-fukui.ac.jp/thzlab/THz_note.pdf

- バイアス電場に従い、ピコ秒オーダーの光伝導電流:テラヘルツ電磁波を発生
- バイアス回路を電流計に置き換え、光伝導電流を流せば、検出にも利用可
- 発生・検出電磁場の偏光特性はアンテナ形状に依存(図では直線偏光)
- 一般的なテラヘルツTDS(時間領域分光法)で普及

ラジアル偏光テラヘルツ波について

ラジアル偏光 \longleftrightarrow 集光 \longleftrightarrow Z偏光



応用

- 顕微分光
N. Anderson et al., J. Opt. A 8, S227 (2006).
- トラッピング
Q. Zhan, Opt. Express 12, 3377 (2004).
- 電子ビーム絡みの研究？
 - 電子ビームの加速・減速？
 - ラジアル偏光電場の振幅・位相計測？

本研究との関連研究

- ラジアル偏光可視光発生
M. Beresna et al., Appl. Phys. Lett. 98, 201101 (2011).
- プラズマによる楕円偏光テラヘルツ波
J. Dai et al., Phys. Rev. Lett. 103, 023001 (2009).
- 微細構造による(大口径)光伝導アンテナ
H. Yoneda et al., Appl. Opt. 40, 6733 (2001).
H. Dreyhaupt et al., Appl. Phys. Lett. 86, 121114 (2005).
T. Hattori et al., Jpn. J. Appl. Phys. 45, L422 (2009).

光電導アンテナの製作

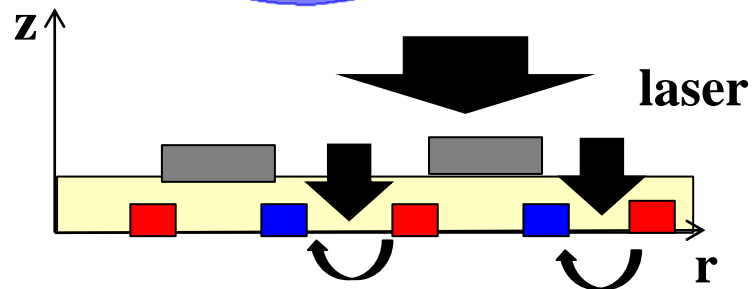
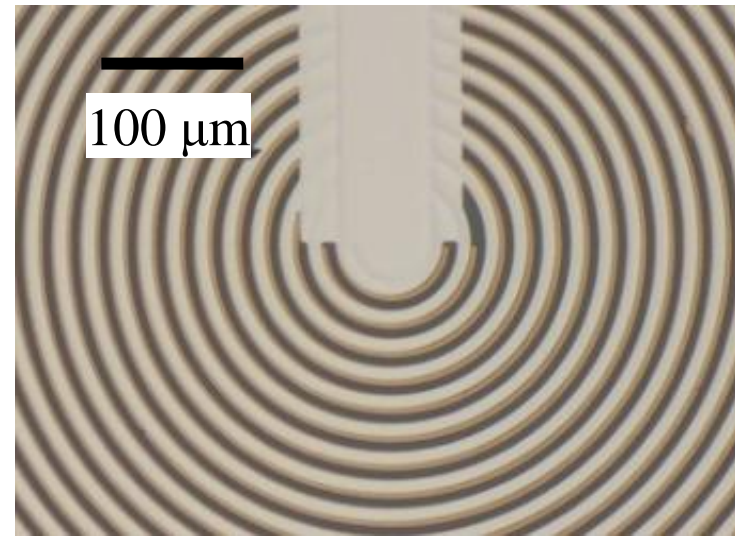
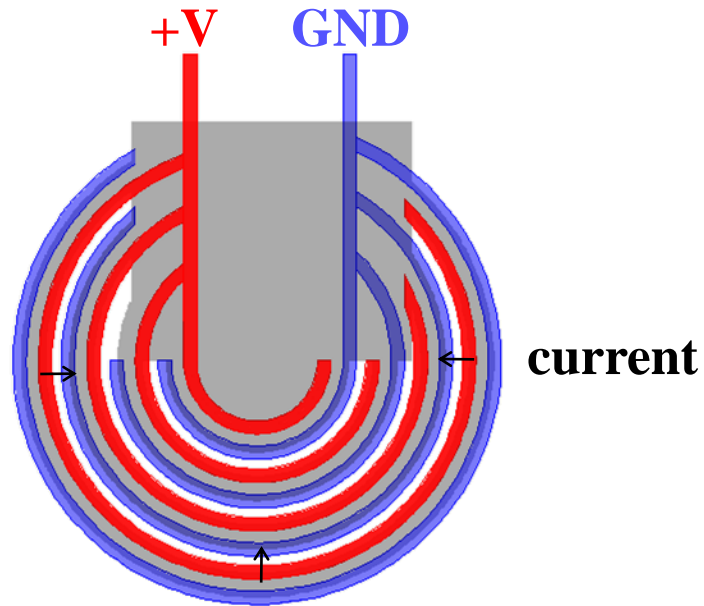
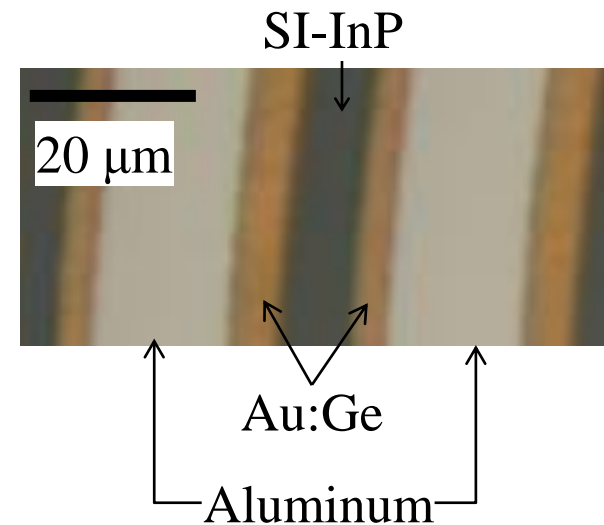


Diagram of PCA with electrodes driven by a laser

半導体表面加工のパラメータ

- ・1層目(電極) Au:Ge/Ni = 80/15nm
- ・2層目(絶縁体) ポリイミド = 10 μm
- ・3層目(マスク) Al = 50 nm



Electrodes and mask on SI-InP produced by Dr. Sakakihara-san

光電導アンテナの製作

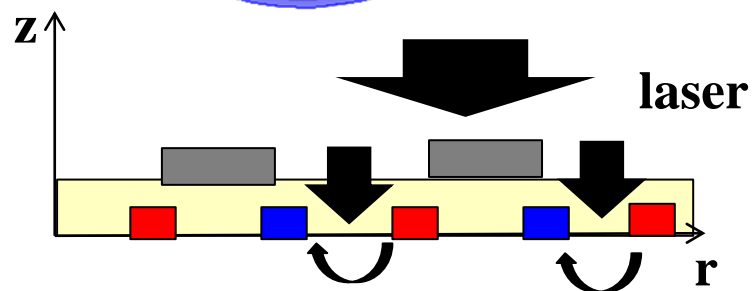
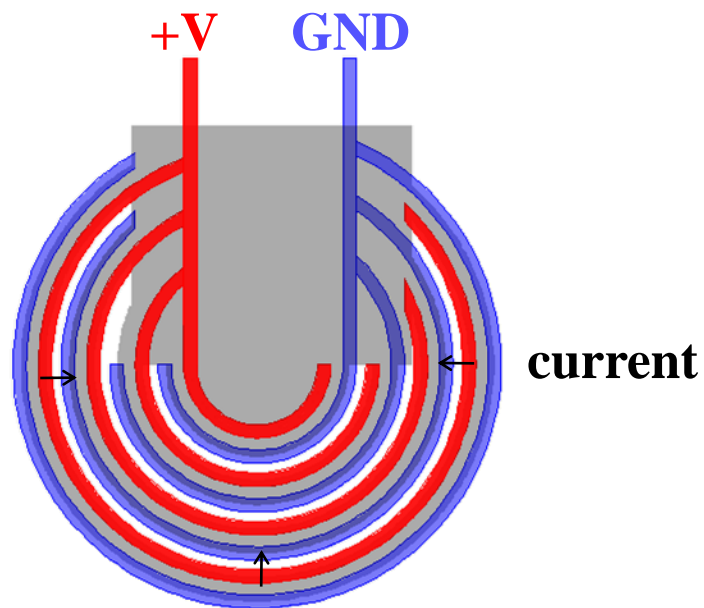
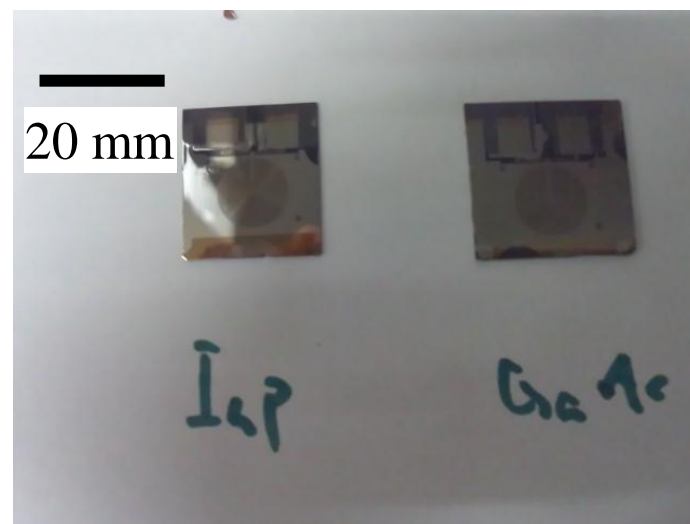
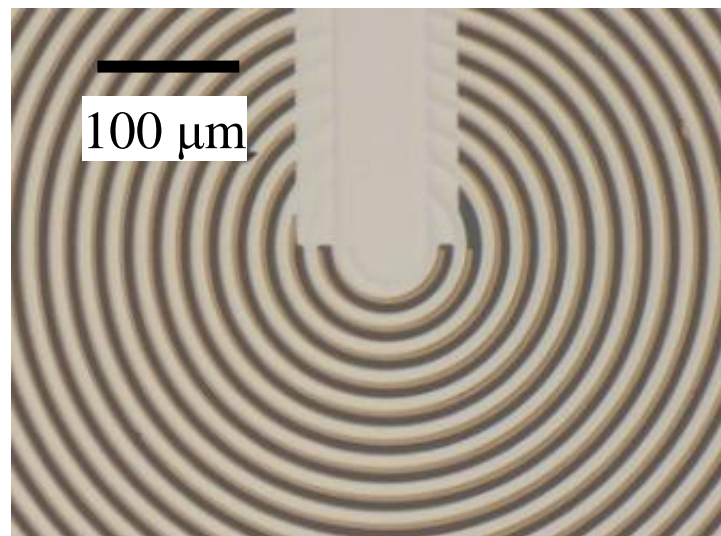


Diagram of PCA with electrodes driven by a laser

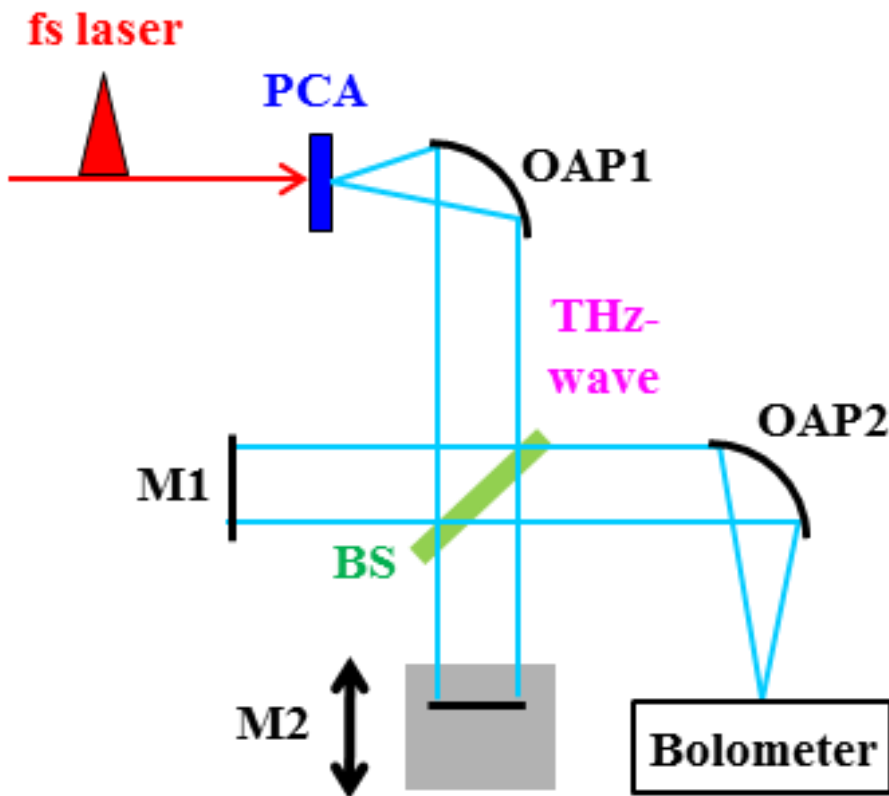
半導体表面加工のパラメータ

- ・1層目(電極) Au:Ge/Ni = 80/15nm
- ・2層目(絶縁体) ポリイミド = 10 μm
- ・3層目(マスク) Al = 50 nm

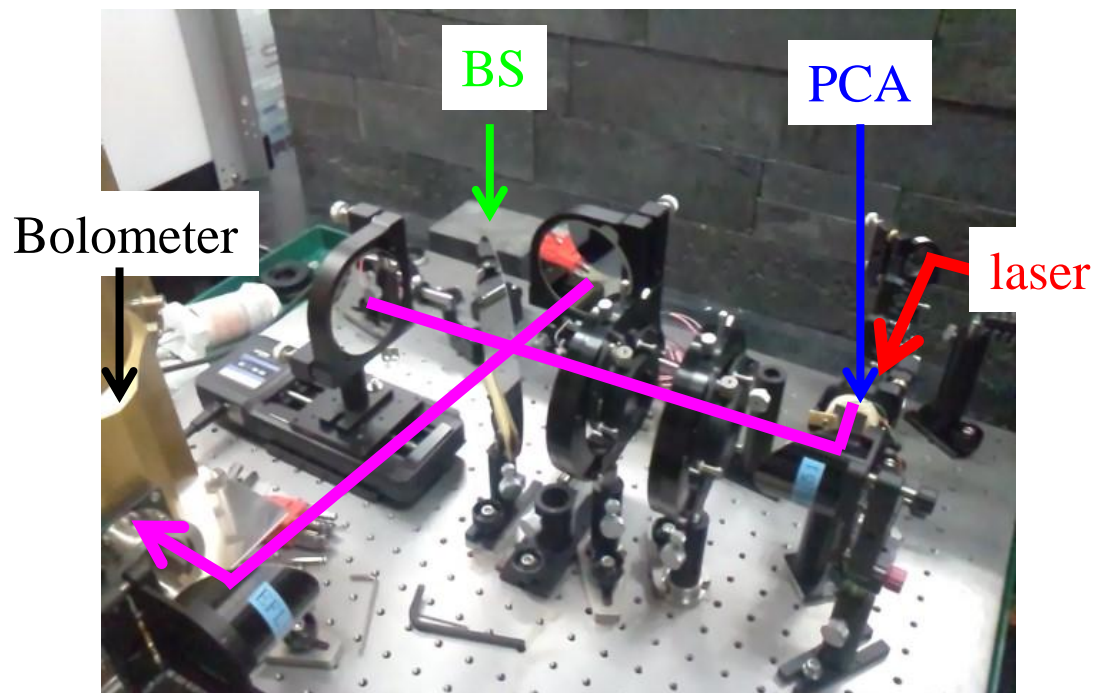


Electrodes and mask on SI-InP produced by Dr. Sakakihara-san

テラヘルツ波の測定系

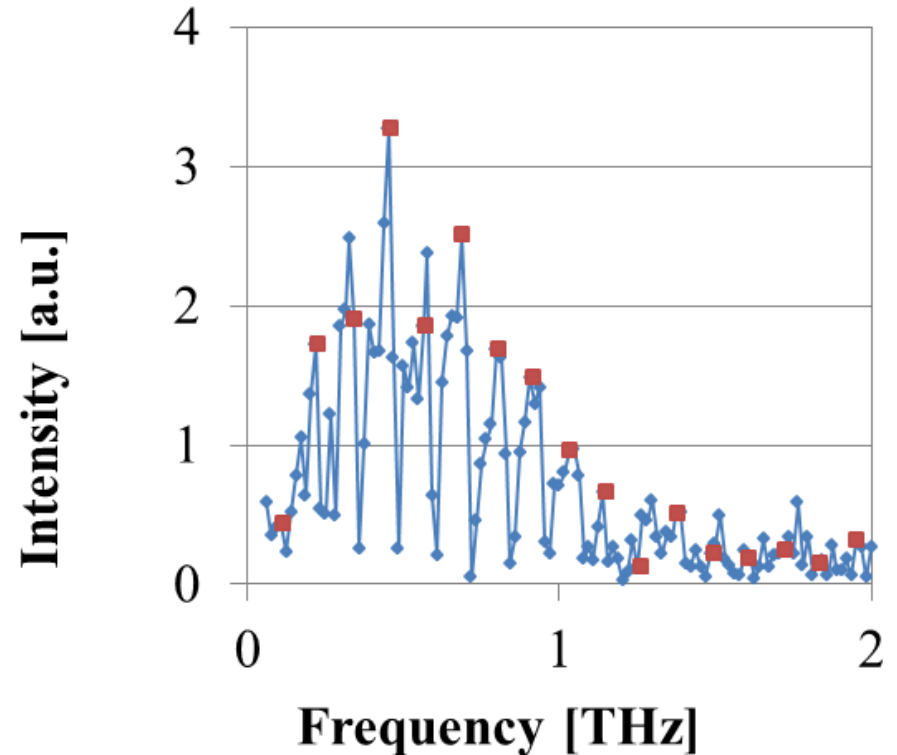
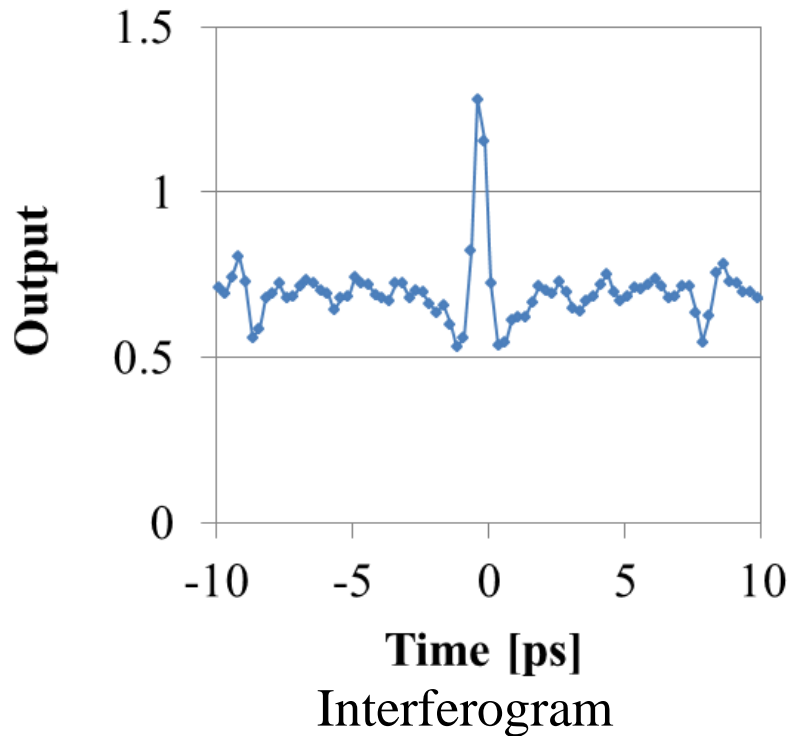


Michelson interferometer



Picture of Michelson interferometer

測定結果

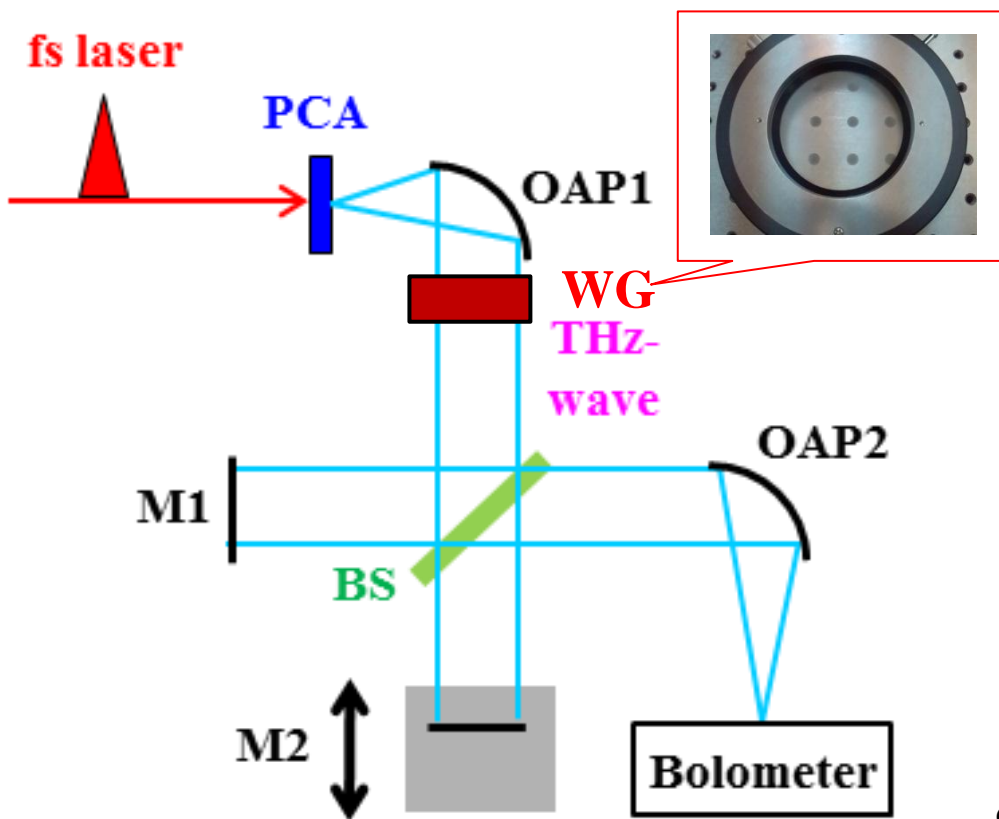


Frequency spectrum using FFT
(squares: multiple reflection of 115 GHz)

- Interferometer using bolometer
- Laser : 800 nm, 13 μ J/pulse, \sim 5 mm(FWHM), 150fs、1 kHz
- SI-InP substrate
- w/o Si lens
- Lock-in detection, 0.25 ps step
- Bias: 10 μ m gap, 18 V \rightarrow 18 kV/cm

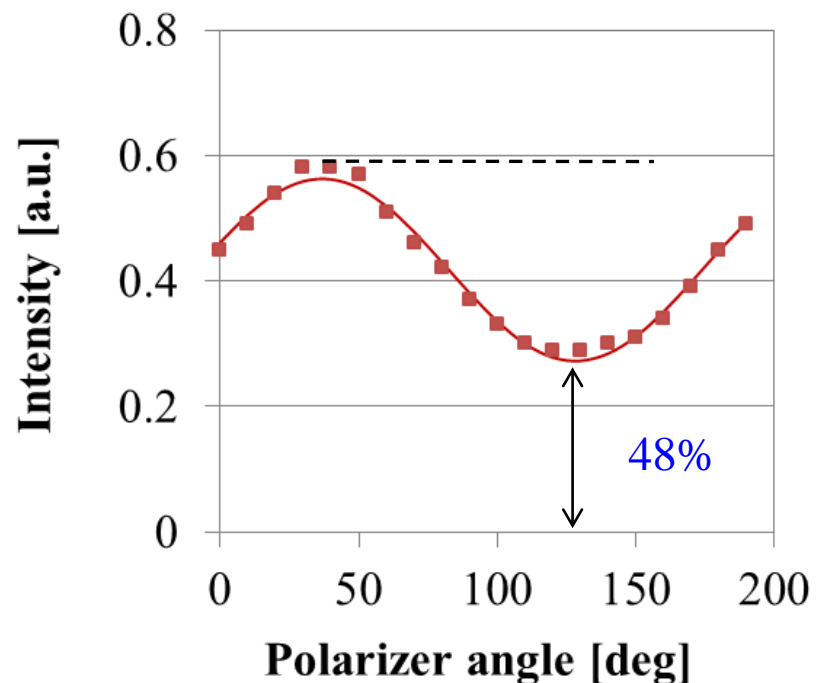
テラヘルツ波の発生を確認！

偏光成分の測定



Michelson interferometer with wire grid polarizer (WG)

- WG:GS57204, Specac Limited
- Fielded component in plane of paper: 90°

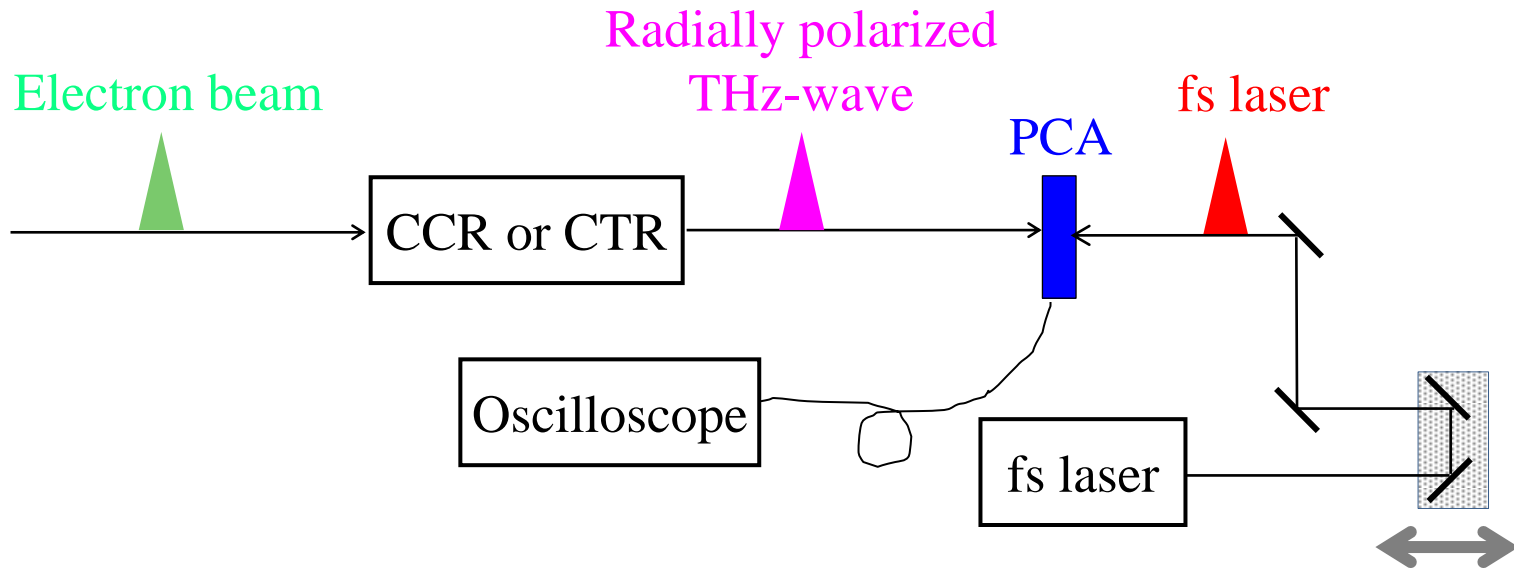


Intensity as a function of polarizer angle
Oscillation: ± 0.15 , Center: 0.42

c.f., H. Park et al., Appl. Phys. Lett. 101, 121108 (2012).
Ratio of vertical field component to horizontal one: 2~4%

- PCA (ダイポール)とは異なる偏光特性
- 不均一な偏光特性の原因: 電極の非対称性、レーザー電場、ビームスプリッタ、照射レーザーの傾き?

電子ビーム診断応用の提案



Electric field measurement using PCA

もし応用できれば・・・

- 電子ビーム電場を時間領域で計測可能(振幅・位相計測)
- EOサンプリングと同様の計測が可能?
- 干渉計(周波数領域の測定)よりも高度な計測

ラジアル偏光テラヘルツ波発生のまとめ

電子ビーム診断を目指して、大口径光伝導アンテナ(PCA)からのラジアル偏光テラヘルツ波発生を確認した。

SI-InP上に径方向に光電流が流れるような電極・マスクを持つPCA製作

ボロメータを用いたマイケルソン干渉計によりテラヘルツ波計測

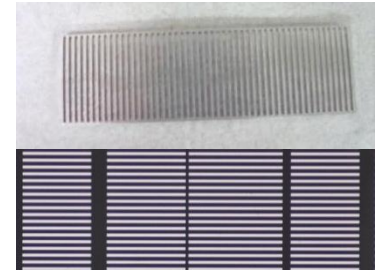
ワイヤーグリッド偏光子を用いた解析により、~50%の偏光成分の不均一性

電子ビーム診断への応用を提案

まとめと今後の予定

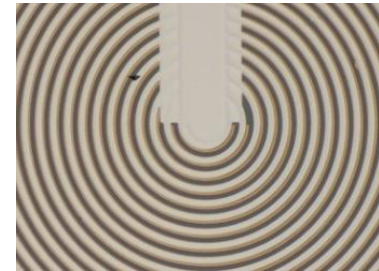
メタマテリアルにおけるスミス・パーセル効果

- メタ表面におけるスミス・パーセル効果を計測
- 構造の最適化による放射角の設計・テラヘルツ波強度の増加



ラジアル偏光テラヘルツ波発生

- 大口径光伝導アンテナを製作し、テラヘルツ波の偏光特性を計測
- 電子ビーム診断などへ応用



本研究は、科研費 (21226022, 23109507) 及び受託研究 (産総研、高出力テラヘルツ光源を用いた不正薬物・爆発物探知に係る調査研究) により支援された。



ご清聴ありがとうございました！！