

## [記念講演]光学的変調散乱素子を用いた高周波電界計測システム

黒澤 孝裕<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 秋田県産業技術センター 〒010-1623 秋田市新屋町字砂奴寄 4-21

E-mail: <sup>†</sup> kurosawa@ait.pref.akita.jp

**あらまし** 高周波電界中に半導体を設置して高周波の散乱体とし、そのバンドギャップエネルギーよりも大きな光子エネルギーをもつコヒーレント光を照射すると、高周波散乱効率を局所的かつ選択的に変化させることができる。この特性を利用して散乱波に振幅変調を与え、遠方で受信した散乱波強度に基づいて散乱体位置の電界強度を推定するための光学的変調散乱素子および電界計測システムを開発した。・アンテナが作る遠方界中に設置したアンドープゲルマニウム基板を散乱体に用い、1-7GHzの周波数範囲における感度、SN比、および、周波数特性を評価した。その結果、周波数および散乱体の照射径が大きくなるにつれて高感度になること、及び、1.05 GHzで65 dB  $\mu$  V/m以上の感度が得られることが分かった。また、マイクロストリップラインの近傍界計測では、2 GHzにおいて-40 dBmの通過電力を検出可能なこと、及び、線幅3 mmのマイクロストリップラインの面内電界分布を計測可能な空間分解能を持つことが分かった。

**キーワード** 電界計測, 変調散乱, 誘電体散乱体, 半導体, 電磁環境両立性

## Measurement System of Electric Fields by using Optically Modulated Scatterer

Takahiro KUROSAWA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Akita Industrial Technology Center, 4-21, Sanuki, Araya, Akita-shi, 010-1623 Japan

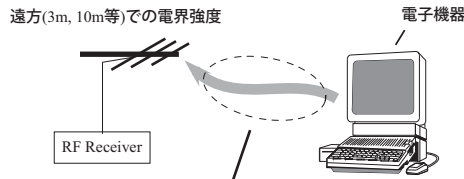
E-mail: <sup>†</sup> kurosawa@ait.pref.akita.jp

**Abstract** Electric field measurement system based on the modulated scattering technique with optically modulated scatterer has developed. A semiconductor is used as the scatterer, and illumination of the semiconductor with photons of energy larger than the band-gap energy of the scatterer, the scattering cross section can modulate. The modulated scattering signal is received by a receiving antenna, and demodulated, the scattered wave intensity can be obtained. The electric field at the scatterer is estimated from the intensity of the scattered wave. Sensitivity of the system was 65 dB  $\mu$  V/m at 1.05 GHz. The sensitivity was increased with increasing the frequency. With near-field measurement of the microstrip line, the system can detect the power of -40 dBm. The obtained spatial resolution depends on the diameter of the illuminated light, and the distribution in the microstrip line (width: 3 mm) could be measured.

**Keyword** Electric Field Measurement, Modulated Scattering, Dielectric Scatterer, Semiconductor, EMC

## 背景

電子機器から放射される電磁妨害波…許容値、試験法が規定されている



- ・波源の探知
  - ・伝搬経路
- ノイズ対策時の重要な情報

電界センサに求められる特性

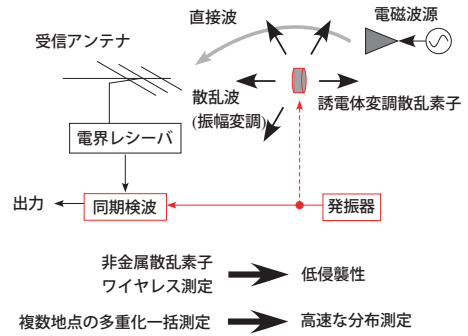
- ・十分な感度、周波数特性、空間分解能
- ・ケーブル等の金属による電界の乱れを抑える

→ 誘電体散乱を利用した電界計測

1

## 誘電体散乱を利用した電界計測

交流電界中の誘電体…分極し、電磁波の再放射（散乱）を起こす  
散乱される電磁波を遠方で観測する…散乱体位置の電界強度がわかる



非金属散乱素子  
ワイヤレス測定 → 低侵襲性

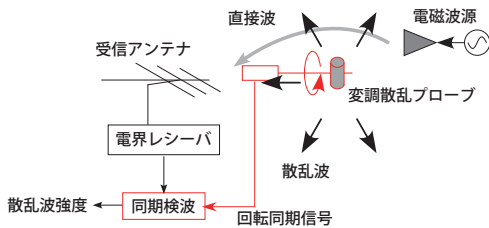
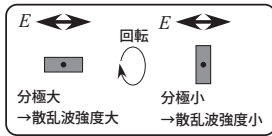
複数地点の多重化一括測定 → 高速な分布測定

2

## 散乱波の変調

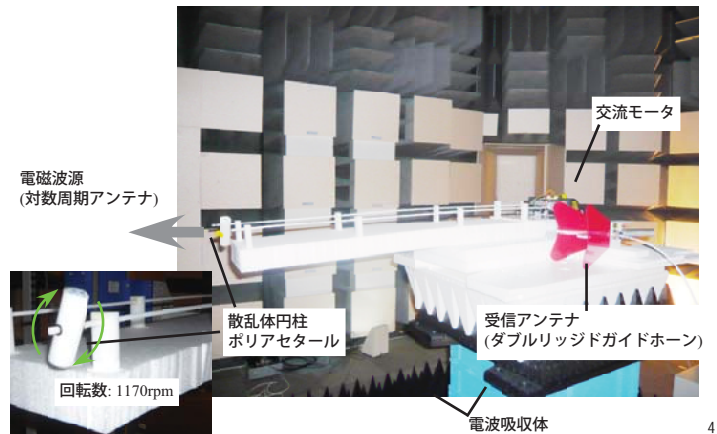
機械回転変調方式:

誘電体円柱の長手方向と電界の向きとがなす角度によって散乱波強度が変化することを利用



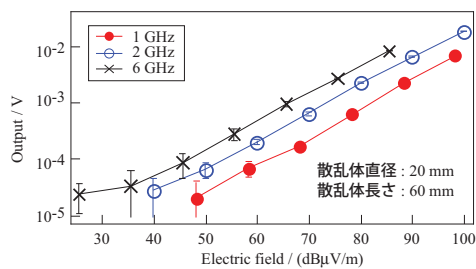
3

3m法5面電波暗室内で実施  
床面に電波吸収体を敷設し、自由空間を模擬



4

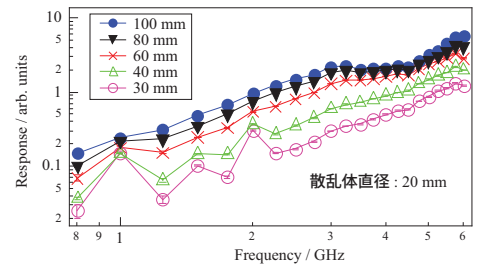
## 散乱波強度の電界強度依存性



- ・良好な直線性
- ・ダイナミックレンジ40dB以上
- ・周波数大→散乱波強度大
- ・感度50 dBμV/m(2 GHz以上)

5

## 周波数依存性および散乱体長さ依存性



縦軸: 散乱波強度を散乱体位置の電界強度、受信アンテナ係数、および受信系のケーブル損失で規格化した値

- ・散乱体長さ大→出力大
- ・周波数大→出力大

6

### 機械回転式変調散乱素子を用いた電界測定システムの性能

- ・良好な直線性
- ・40dB以上のダイナミックレンジ
- ・感度50 dBμV/m(2 GHz以上)  
…散乱体長さを大きくすることで、更に高感度化が可能
- ・800MHz-6GHzの帯域で使用可能
- ・周波数大→信号出力大  
…電子機器の高周波数動作化に容易に対応可能

### 問題点

- ・変調周波数が数十Hz程度に制限され、高速変調は困難  
…短時間で変動する信号の検出が難しい

散乱波振幅を高速に変調可能な、新たな変調散乱素子を提案

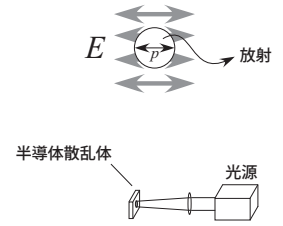
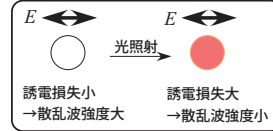
### 散乱波の光変調

- ・半導体にバンドギャップより大きな光子エネルギーの光を照射  
→導電率（誘電率の虚部）が増加

$$\epsilon = \epsilon_r + j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}$$

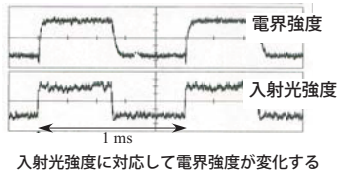
$\sigma$ : 導電率  
 $\omega$ : 角周波数  
 $\epsilon_0$ : 真空の誘電率

から誘電正接  $\tan \delta = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_r \epsilon_0}$  となり、



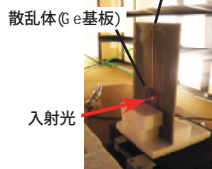
照射光強度を変調することで、散乱波を振幅変調できる

### 散乱電界強度の入射光強度依存性



入射光強度に対応して電界強度が変化する

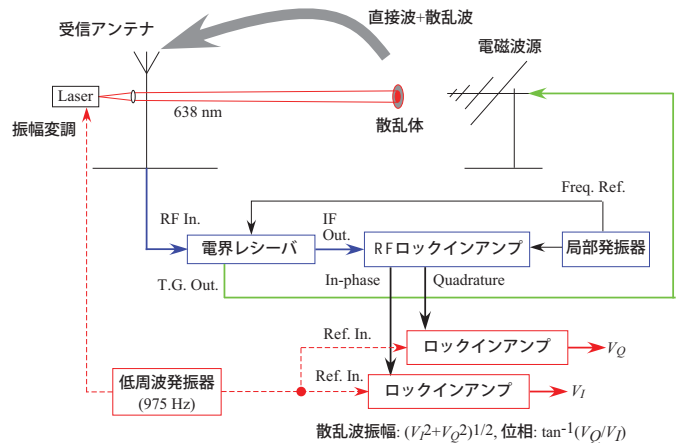
### マイクロストリップライン



- ・半導体基板への入射光を振幅変調することにより散乱波を振幅変調可能
- ・散乱電磁波を遠方で観測し、復調 → 散乱体位置の電界強度を得る

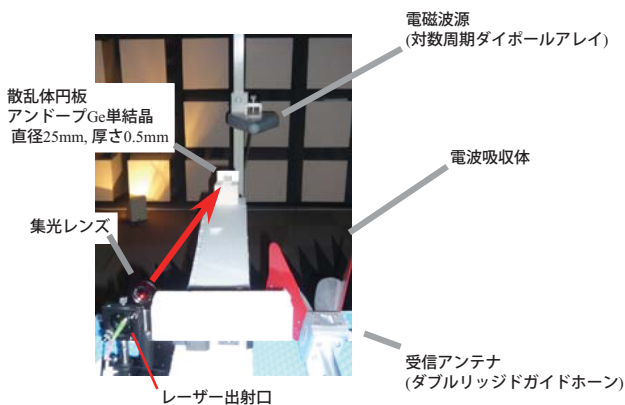
この原理を使用した電界センサを遠方界中に設置し、感度、周波数特性を評価

### 遠方界計測システムのブロック図

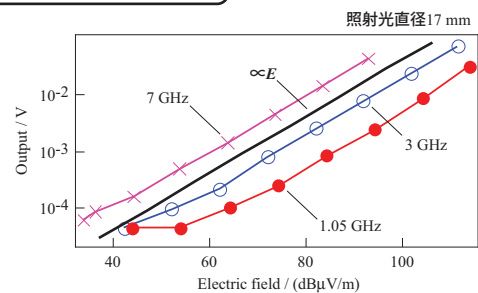


### 測定配置

3m法5面電波暗室内で実施  
床面に電波吸収体を敷設し、自由空間を模擬



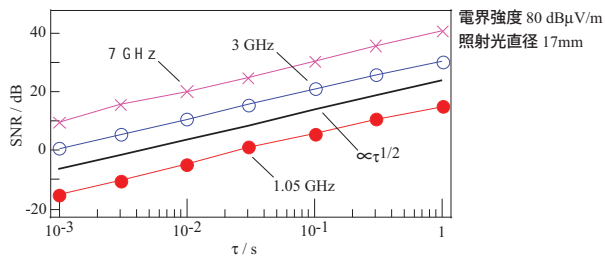
### 散乱波強度の電界強度依存性



- ・良好な直線性
- ・ダイナミックレンジ40dB以上
- ・周波数大→散乱波強度大

### 散乱波SN比の復調時定数依存性

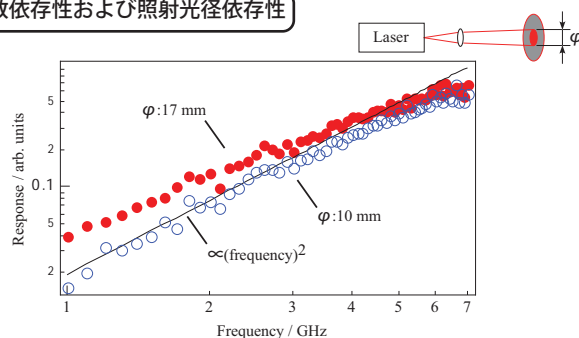
SNR: 散乱波強度を繰返し測定し、その平均値と標準偏差から求めた



SNR:  $\tau^{1/2}$ に比例 ← 散乱波強度: 電界強度に比例  
ノイズレベル: 受信系で決まり、 $\tau^{1/2}$ に反比例

例えば、 $\tau=3$  msとした場合の感度: 1 GHzで90 dBuV/m  
3 GHzで75 dBuV/mと見積もられる

### 周波数依存性および照射光径依存性



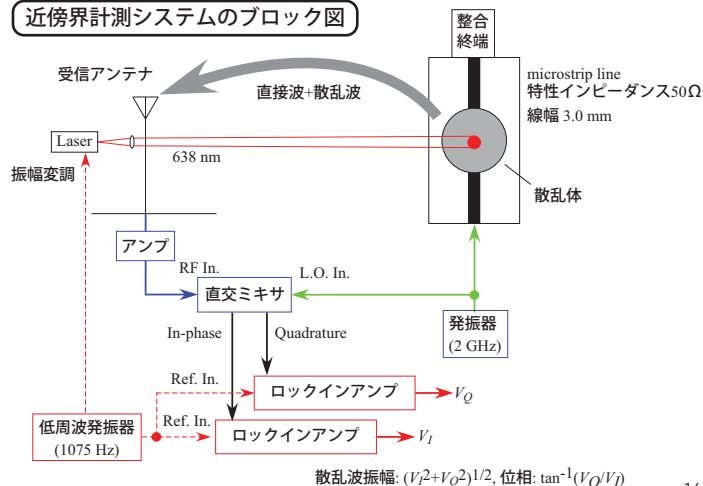
$\phi$  10mm: 周波数の2乗に比例  
→ 散乱体を微小ダイポールで近似可能  
 $\phi$  17mm:  $\phi$  10mmの場合より変調散乱体が大きくなると見なせる  
→ 散乱波強度大  
→ 微小ダイポール近似は成立しない

### 光学的変調散乱素子を用いた電界測定システムについて 遠方界中での性能を評価した

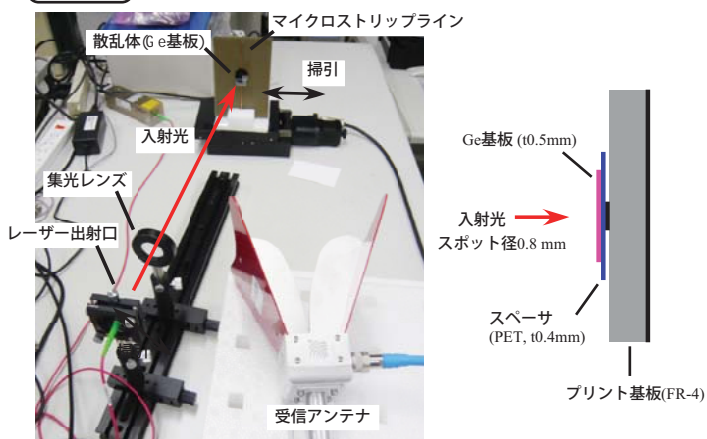
- 40dB以上のダイナミックレンジ
- 感度65 dBuV/m (周波数1.05 GHz, 復調時定数 1s)  
→ 照射光径大, 周波数大で高感度  
→ 電子機器の高周波数動作化に容易に対応可能
- 機械式変調散乱素子と比較して, 高速な変調周波数(1kHz程度)を達成  
→ 復調時定数を小さくでき, 短時間で変動する信号も検出可能
- 光照射された領域のみがセンサ動作することを示唆  
→ 照射径を小さくすることで, 高い空間分解能が得られる可能性

### マイクロストリップラインの近傍界計測から 感度, 空間分解能を評価

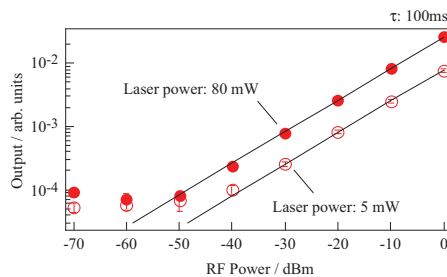
### 近傍界計測システムのブロック図



### 測定配置

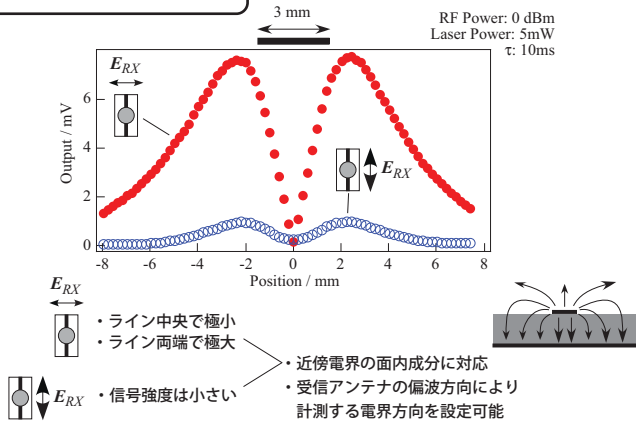


### 信号強度の給電力依存性



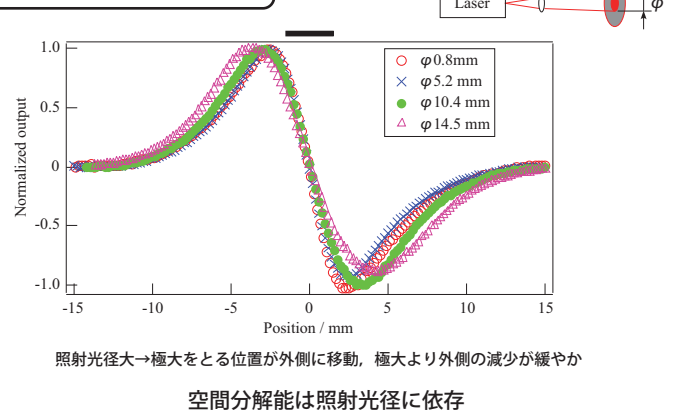
- 信号出力は給電力の平方根に比例→信号出力は電界強度に比例
- ダイナミックレンジ>40 dB
- 光強度大→信号出力大

### 散乱波強度の照射位置依存性



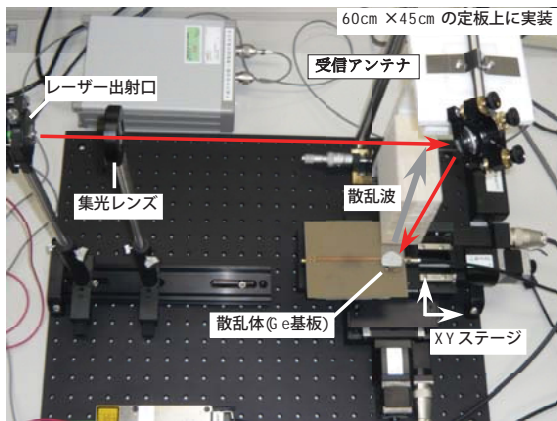
19

### 散乱波強度の照射光径依存性



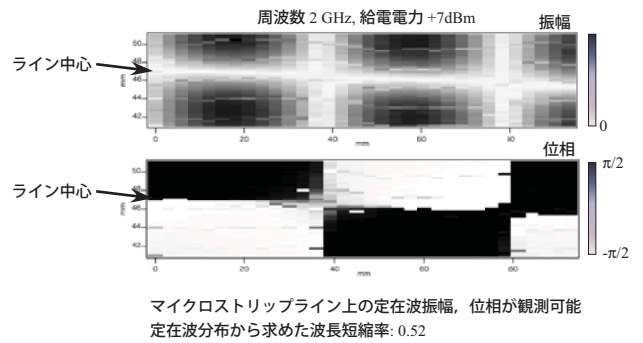
20

### ラボ環境で使用可能な電界分布計測システムの開発



21

### 計測例: 開放終端したマイクロストリップライン



22

### 結び

半導体を散乱体に用い、その複素誘電率を光変調することによって散乱波を振幅変調する変調散乱手法によって、高周波電界を計測した

- ・機械式変調散乱素子と比較して、高速な変調周波数(1kHz程度)を達成  
→復調時定数を小さくでき、短時間で変動する信号も検出可能
- ・遠方界での感度65 dBμV/m (周波数1.05 GHz, 復調時定数 1s)  
…照射光径大, 周波数大で高感度  
→電子機器の高周波数動作化に容易に対応可能
- ・近傍界計測では-40dBm程度の通過電力を検出可能(周波数2 GHz)
- ・散乱波の受信偏波により、検出する電界の方向を設定可能
- ・照射光径により、空間分解能を設定可能

#### 課題

- ・周囲環境の影響を低減するための、振幅、位相校正法の開発
- ・散乱体物性と散乱波強度との関係

#### 謝辞

いつもご議論いただき、秋田工業高等専門学校の駒木根 隆士教授に深謝いたします  
本研究の一部は、科学研究費助成事業(23560430)の助成を受けて実施した

23