

光応用電磁界計測(PEM)時限研究専門委員会ワークショップ

2015年 6月 11日  
産業技術総合研究所  
臨海副都心センター

# 光電界センサにおけるEO効果と 光回路の基礎

大阪大学 大学院基礎工学研究科

村田 博司

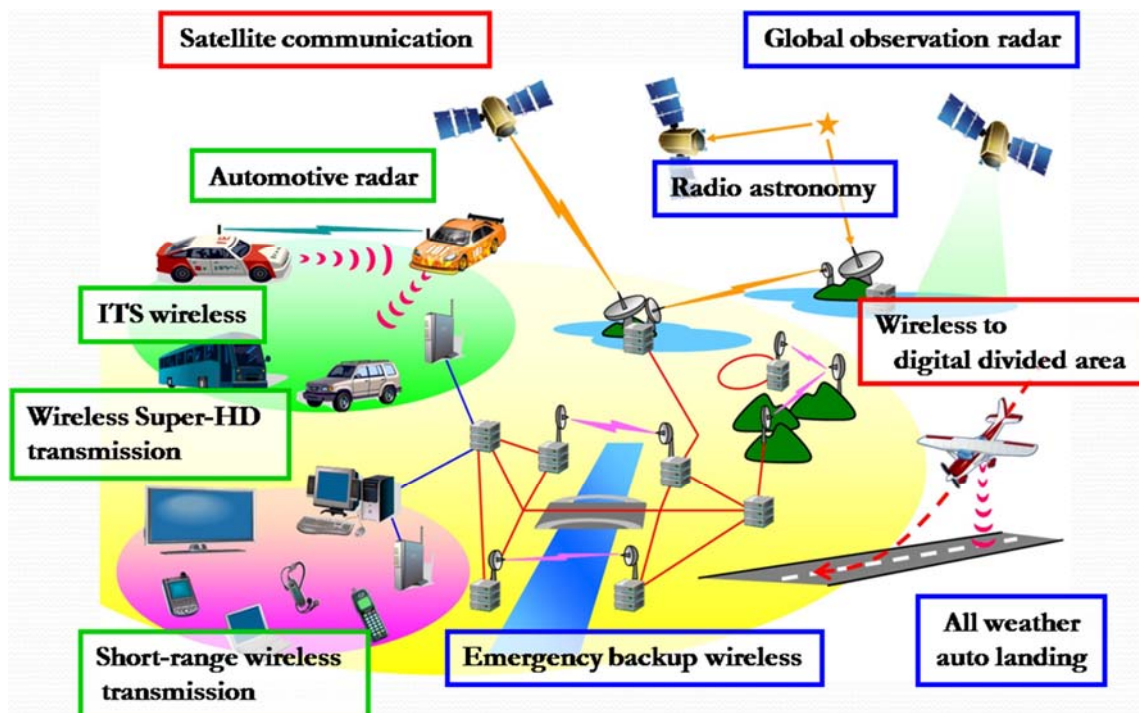


## Outline

1. はじめに
2. 光電界センサの原理
  - EO効果
  - 屈折率楕円体
  - 屈折率変化
3. 光電界センサにおける光回路
  - 光ビームと光導波路
  - マツハ・ツェンダー型光導波路
4. 高周波電界計測におけるポイント
5. まとめ

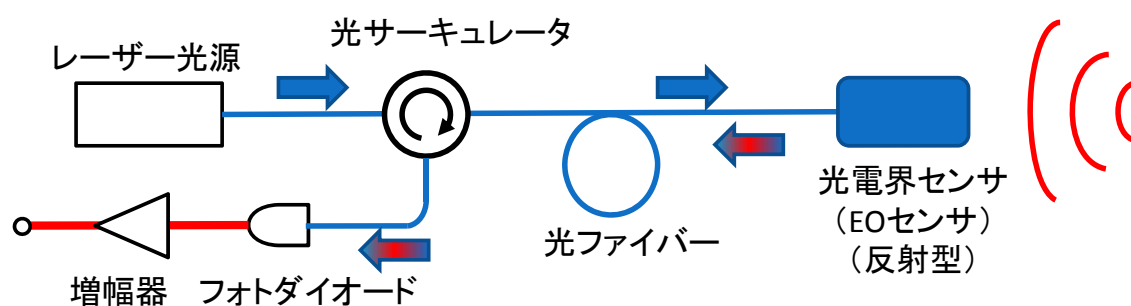
# 1. はじめに

## さまざまな無線システム





# 光電界センサを用いた電界計測



## 高性能フォトニクス技術

- 超低損失石英光ファイバー
  - 高安定DFBレーザー光源
  - 高速フォトダイオード
  - 光アイソレーター
- 伝搬損:  $\sim 0.2\text{dB/km}$   
線幅:  $\sim 100\text{MHz}$   
帯域:  $\sim 1\text{THz}$   
分離比:  $\sim 50\text{dB}$
- 光増幅器 (EDFA, PSA (位相感応増幅、 $NF < 1$ ))
  - 光フィルター、光変調器、etc.

DC $\sim$ THz帯の電磁界計測が可能

# 光電界センサの特長

- 小型・軽量 数mm～cm
- 高速・広帯域 DC～THz
- 非侵襲・低誘導
- 電界振幅・位相の測定可能
- 電界ベクトル(方向)の測定可能
- 安定性、信頼性
- 光ファイバーとの親和性

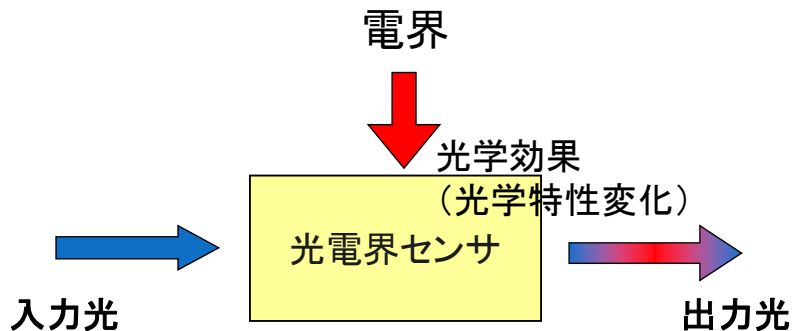
## 2. 光電界センサの原理

### EO効果

屈折率楕円体

屈折率変化

# 光を使った電界センシング



出力光電界  $E = E_0 \exp\{j(2\pi\nu t - ky + \phi)\}$

- ・ 振幅変調 Amplitude Modulation : AM  
(強度変調 Intensity Modulation : IM)
- ・ 周波数変調 Frequency Modulation : FM
- ・ 位相変調 Phase Modulation : PM
- ・ 偏光変調 Polarization Modulation : Pol. M

## EO(電気光学)効果 (広義の非線形光学効果の1つ)

### ● 1次EO効果(ポッケルス効果)

中心対称性のない光学材料(異方性材料)のみ

$$\Delta n \propto E$$

異方性結晶(LiNbO<sub>3</sub>等)、化合物半導体、ポリマー等

2次の非線形光学効果 → 3光波混合(2光波+1電気)

$$\mathbf{P}^{(2)} = \varepsilon_0 \chi^{(2)} \mathbf{E} \mathbf{E}$$

### ● 2次EO効果(カー効果)

すべての光学材料

$$\Delta n \propto |E|^2$$

3次の非線形光学効果 → 4光波混合(2光波+2電気)

$$\mathbf{P}^{(3)} = \varepsilon_0 \chi^{(3)} \mathbf{E} \mathbf{E} \mathbf{E}$$

# 種々の光学効果

- 電気光学効果 : 電界による屈折率変化
  - 光電界センサ、光変調器、光偏向器、光スイッチ
- 音響光学効果／光弾性効果 : 音波／歪による屈折率変化
  - 光周波数シフタ、光偏向器、光スイッチ、etc
- 非線形光学効果 : 誘電分極の非線形応答に起因
  - 光混合デバイス、光波長変換素子、光ソリトン生成  
スーパーコンティニューアム光発生、コリレーター、etc.
- 電界吸収効果 : 電界による吸収係数変化
  - 光変調器、光スイッチ
- 磁気光学効果 : 磁界による屈折率変化
  - 光アイソレーター、光サーキュレーター
- 熱光学効果 : 熱(温度)による屈折率変化
  - 光スイッチ

## EO効果を用いた 電界センシングの理解のために

- EO効果は少々分かりにくい
  - 光は電磁波なのに、何故マックスウエルの方程式で議論しない？ 何故屈折率楕円体なのか？
  - 屈折率楕円体って一体何なのか？
  - どうしてテンソルが出てくるの？
  - 位相変調と偏光変調の違いは？
  - そもそもEO効果って何故起きるのか？

# EO効果の歴史

- 1873 電気光学(EO)効果の報告 Kerr, Pockels
- 1922 音響光学(AO)効果の予言 Brillouin
- 1932 音響光学(AO)効果の実験  
Debye & Sears, Lucas & Biquard
- 1960 レーザーの発明 T. Maiman
- 1965 低損失光ファイバーの報告 C. Kao
- 1973 LiNbO<sub>3</sub>導波型EO変調器 Kaminov
- 1995 10Gbps LiNbO<sub>3</sub>光強度変調器
- 2000 40Gbps LiNbO<sub>3</sub>光強度変調器
- 2005 LiNbO<sub>3</sub> 光SSB(ベクトル)変調器

## 1次EO(電気光学)効果 ポッケルス(Pockels)効果

$$\Delta n_i = \frac{1}{2} n^3 r_{ij} E_j$$

$n$ : 屈折率

$r_{ij}$ : ポッケルス係数

$E_j$ : 印加電界

- 結晶中の電子分極の非線形性
- 電気信号に比例する屈折率変化
- 純粹な光位相変調
- 自発分極の向きで極性が反転
- LiNbO<sub>3</sub>, LiTaO<sub>3</sub>, ZnTe, ZnSe, GaAs, EOポリマー
- 高速動作 (>100GHz)
- 広波長帯域 (>C, L, S-band)
- 安定性・信頼性



*Friedrich Carl Alwin Pockels (1865 - 1913)*

# 1次EO(電気光学)効果 (ポッケルス効果)

1次電気光学効果により屈折率楕円体が変化

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{23}yz + 2a_{31}zx + 2a_{12}xy = 1$$

$$\begin{pmatrix} a_{11} - \frac{1}{n_x^2} \\ a_{22} - \frac{1}{n_y^2} \\ a_{33} - \frac{1}{n_z^2} \\ a_{23} \\ a_{31} \\ a_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} r_{ij} \end{pmatrix} : \text{1次電気光学テンソル (3階テンソル)}$$
$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} : \text{印加電界}$$

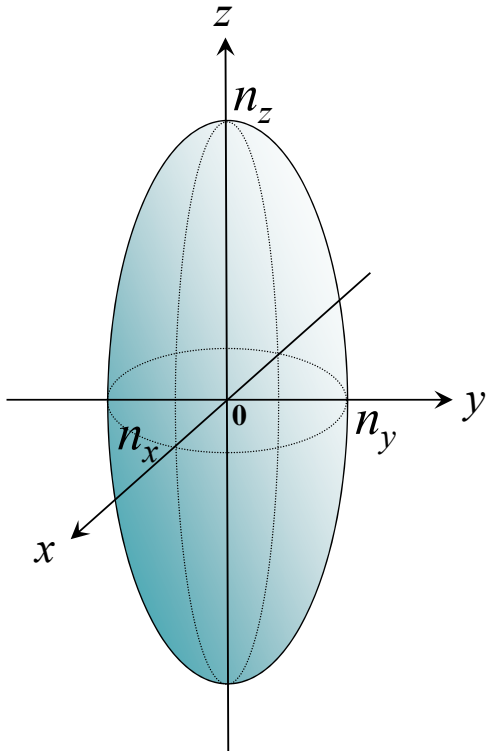
## 2. 光電界センサの原理

EO効果

屈折率楕円体

屈折率変化

# 屈折率楕円体



$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1$$

$n_x \neq n_y \neq n_z$  : 二軸性光学結晶

$n_x = n_y \neq n_z$  : 一軸性光学結晶

# なぜ屈折率楕円体なのか？

- 異方性結晶を扱う  
⇒ 本来はテンソルだが屈折率楕円体の方が簡便
- 光学結晶は透明誘電体  
⇒ 外部電界とあまり相互作用しない  
EO効果により屈折率楕円体が変わずかに変化

屈折率変化量:  $\Delta n < 10^{-4}$

$$1\text{次近似 } \Delta n_i = \frac{1}{2} n^3 r_{ij} E_j$$

# Maxwell 方程式

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$



James Clerk Maxwell (英)

## 構成方程式

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

$\epsilon$ : 誘電率

$\mu$ : 透磁率

$\sigma$ : 導電率

$\epsilon, \mu, \sigma$  は物質固有の量

物質の電磁氣的応答を表す

一般にテンソル量

## 光学結晶 (透明誘電体)

$\sigma=0$  (導電性無し)

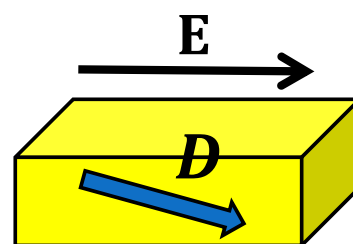
$\mu=\mu_0$  (非磁性)

# 誘電率テンソルと光学結晶

誘電率テンソル

(2階テンソル)

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{pmatrix}$$



$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$$

等方性結晶 (誘電率テンソルはスカラーと同じ)

$$\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_z$$

一軸性結晶

$$\epsilon_x = \epsilon_y \neq \epsilon_z$$

二軸性結晶

$$\epsilon_x \neq \epsilon_y \neq \epsilon_z$$

# 晶系と異方性

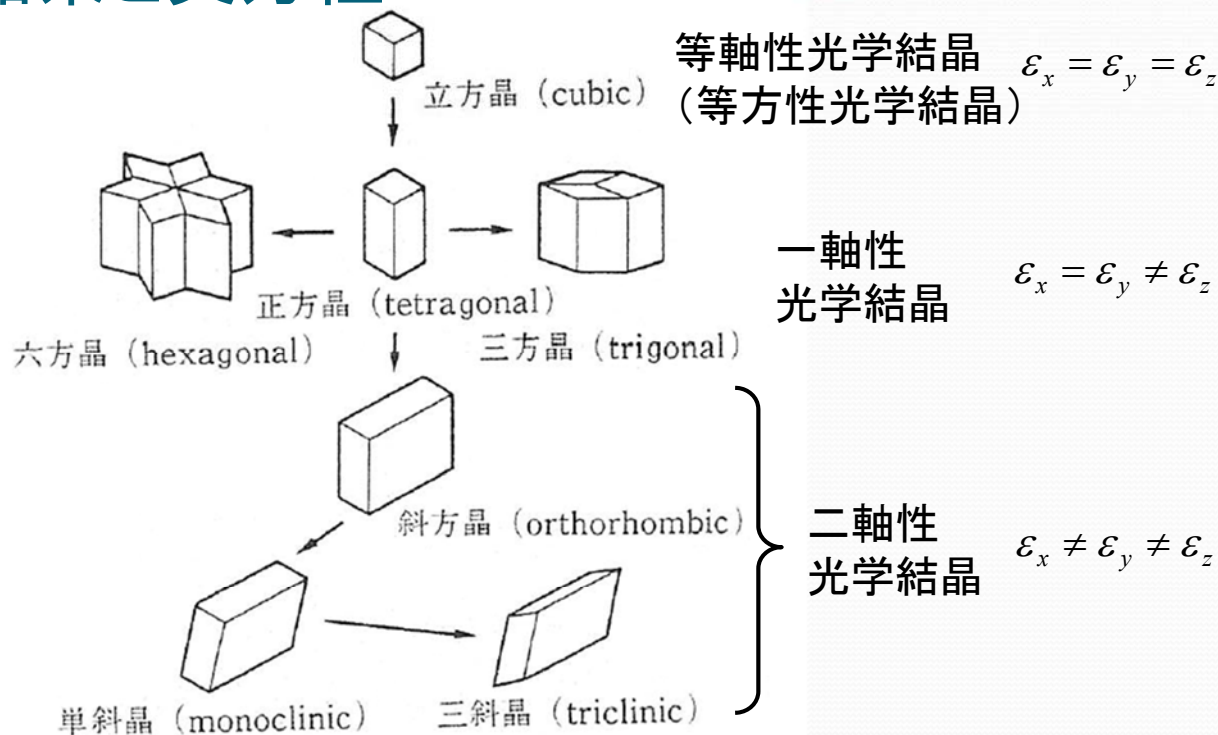


図 2.21 単純立方格子から変形する七つの晶系

宮澤信太郎「光学結晶」培風館

# 誘電率と屈折率

光周波数領域ではほとんどの結晶が非磁性

$$\mu = \mu_0$$

屈折率: 媒質中と真空中の光速の比

$$n = \frac{c_0}{c} = \frac{1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}{1/\sqrt{\epsilon\mu}} = \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{\epsilon_0\mu_0}} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} = \sqrt{\epsilon_r}$$

誘電率テンソル

(2階テンソル)

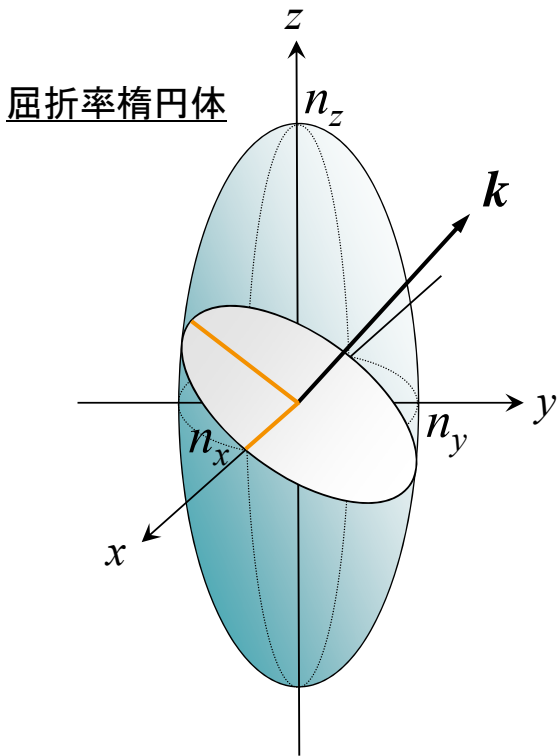
$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{pmatrix}$$

屈折率テンソル

(2階テンソル)

$$n = \begin{pmatrix} n_x & 0 & 0 \\ 0 & n_y & 0 \\ 0 & 0 & n_z \end{pmatrix}$$

# 異方性光学結晶中の光波伝搬



$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1$$

$n_x \neq n_y \neq n_z$  : 二軸性光学結晶

$n_x = n_y \neq n_z$  : 一軸性光学結晶

## 1次電気光学効果 (ポッケルス効果)

1次電気光学効果により屈折率楕円体が変化する

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{23}yz + 2a_{31}zx + 2a_{12}xy = 1$$

$$\begin{pmatrix} a_{11} - \frac{1}{n_x^2} \\ a_{22} - \frac{1}{n_y^2} \\ a_{33} - \frac{1}{n_z^2} \\ a_{23} \\ a_{31} \\ a_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}$$

$(r_{ij})$  : 1次電気光学テンソル (3階テンソル)  
 $\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}$  : 印加電界

## LiNbO<sub>3</sub> の特性

晶系/点群	三方晶/3m (一軸性光学結晶)
屈折率	$n_o = 2.2868$ ( $\lambda = 633\text{nm}$ ) $n_e = 2.2028$ ( $\lambda = 633\text{nm}$ )
電気光学係数	$r_{13} = 8.6\text{pm/V}$ $r_{33} = 30\text{pm/V}$ $r_{22} = 3.4\text{pm/V}$ $r_{51} = 28\text{pm/V}$
比誘電率	$\epsilon_{11} = 48$ $\epsilon_{33} = 28$

$$(r_{ij}) = \begin{pmatrix} 0 & -r_{22} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

## ZnTe の特性

晶系/点群	立方晶 $\bar{4}3m$ / (等軸性光学結晶)
屈折率	$n = 2.984$ ( $\lambda = 633\text{nm}$ )
電気光学係数	$r_{41} = 4.3\text{pm/V}$
比誘電率	$\epsilon_r = 10.1$

$$(r_{ij}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{41} \end{pmatrix}$$

## 2. 光電界センサの原理

5. 光電界センサの原理

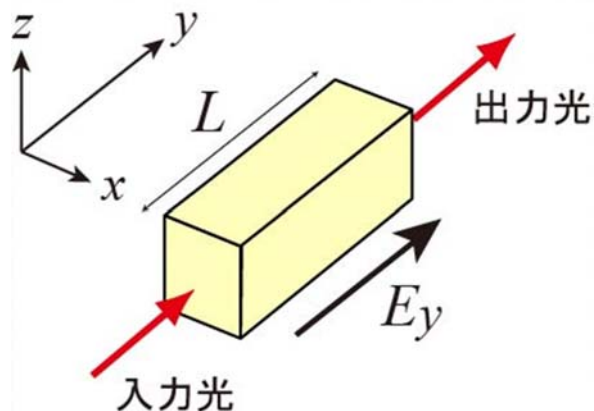
EO効果

屈折率楕円体

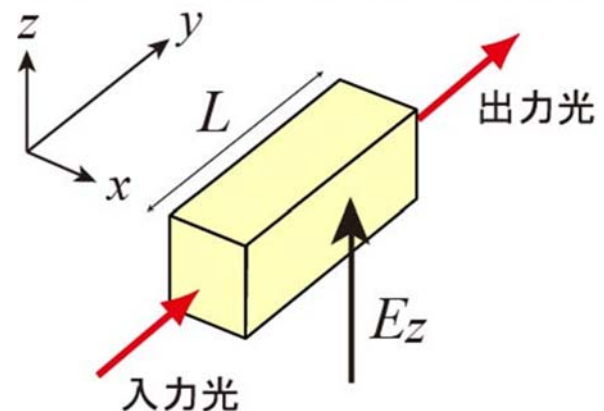
屈折率変化

## 光電界センサにおける屈折率変化

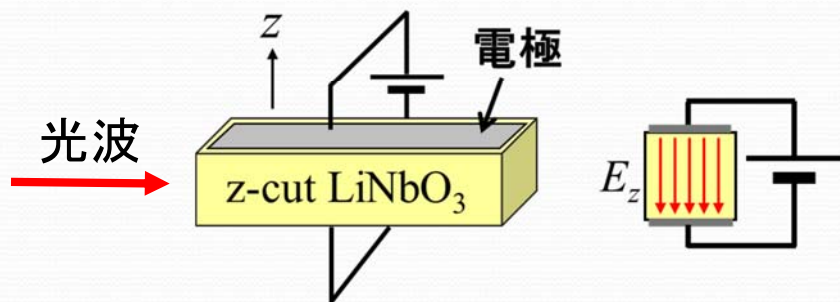
「縦型」構成



「横型」構成



## 例: LiNbO<sub>3</sub>の場合 (z方向電界印加)



$$\begin{pmatrix} a_{11} - \frac{1}{n_x^2} \\ a_{22} - \frac{1}{n_y^2} \\ a_{33} - \frac{1}{n_z^2} \\ a_{23} \\ a_{31} \\ a_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -r_{22} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ E_z \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{1}{n_x^2} + r_{13} E_z \\ a_{22} &= \frac{1}{n_y^2} + r_{13} E_z \\ a_{33} &= \frac{1}{n_z^2} + r_{33} E_z \\ a_{23} &= a_{31} = a_{12} = 0 \end{aligned}$$

## 例: LiNbO<sub>3</sub>の場合 (z方向電界印加)

$$\left(\frac{1}{n_o^2} + r_{13} E_z\right) x^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + r_{13} E_z\right) y^2 + \left(\frac{1}{n_e^2} + r_{33} E_z\right) z^2 = 1$$

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1$$

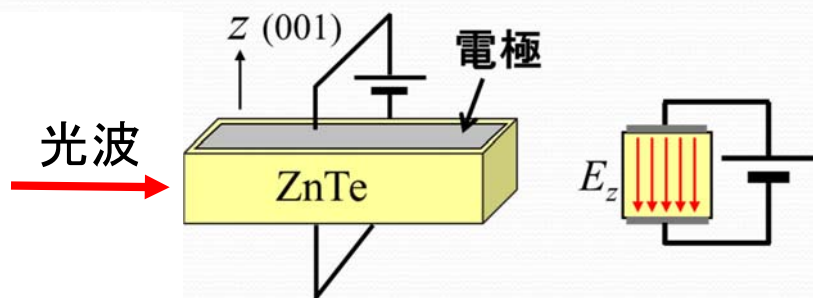
## 例: LiNbO<sub>3</sub>の場合 (z方向電界印加)

$$\begin{aligned}
 n_o' &= \left( \frac{1}{n_o^2} + r_{13} E_z \right)^{-1/2} & n_e' &= \left( \frac{1}{n_e^2} + r_{33} E_z \right)^{-1/2} \\
 &= n_o (1 + n_o^2 r_{13} E_z)^{-1/2} & &= n_e (1 + n_e^2 r_{33} E_z)^{-1/2} \\
 &\cong n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{13} E_z & &\cong n_e - \frac{1}{2} n_e^3 r_{33} E_z
 \end{aligned}$$

$$\Delta n_o = -\frac{1}{2} n_o^3 r_{13} E_z \quad \Delta n_e = -\frac{1}{2} n_e^3 r_{33} E_z$$

屈折率楕円体: 長軸・短軸が伸び縮みする

## 例: ZnTeの場合



$$\begin{pmatrix} a_{11} - \frac{1}{n_x^2} \\ a_{22} - \frac{1}{n_y^2} \\ a_{33} - \frac{1}{n_z^2} \\ a_{23} \\ a_{31} \\ a_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{41} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ E_z \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= a_{22} = a_{33} = a_{23} = a_{31} = 0 \\
 a_{12} &= r_{41} E_z
 \end{aligned}$$

## 例: ZnTeの場合

$$\left(\frac{1}{n^2} + r_{41}E_z\right)x'^2 + \left(\frac{1}{n^2} - r_{41}E_z\right)y'^2 + \frac{z'^2}{n^2} = 1$$

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1$$

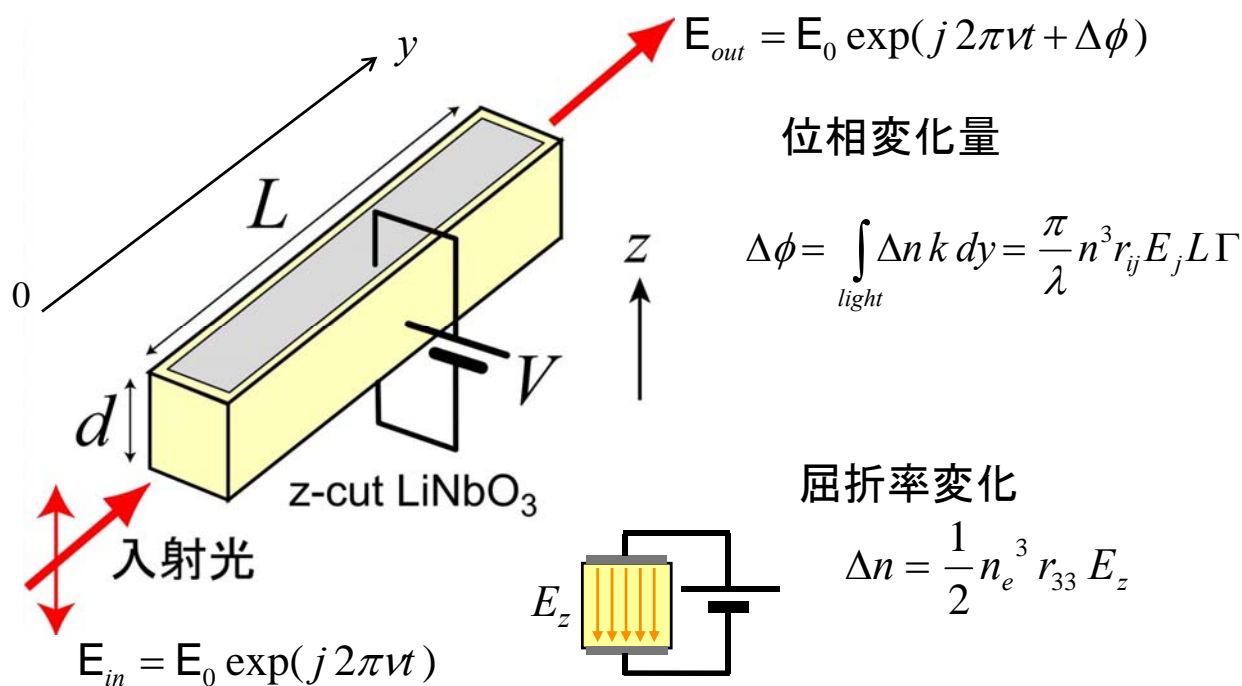
## 例: ZnTeの場合

$$\begin{aligned} n_{x'} &= \left(\frac{1}{n^2} + r_{41}E_z\right)^{-1/2} & n_{y'} &= \left(\frac{1}{n^2} - r_{41}E_z\right)^{-1/2} & n_{z'} &= n \\ &= n (1 + n^3 r_{41}E_z)^{-1/2} & &= n (1 - n^3 r_{41}E_z)^{-1/2} & & \\ &\cong n - \frac{1}{2}n^3 r_{41}E_z & &\cong n + \frac{1}{2}n^3 r_{41}E_z & & \end{aligned}$$

$$\Delta n_{x'} = -\frac{1}{2}n^3 r_{41}E_z \quad \Delta n_{y'} = +\frac{1}{2}n^3 r_{41}E_z \quad \Delta n_{z'} = 0$$

屈折率楕円体: 球  $\Rightarrow$  回転楕円体

# 光電界センサにおける位相変化量



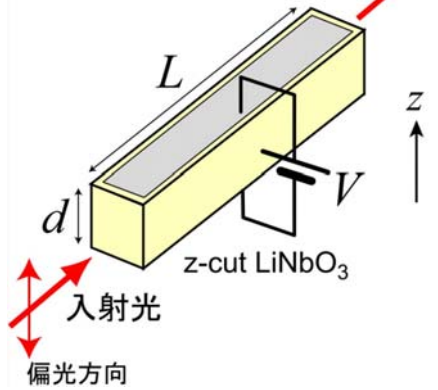
## 3. 光電界センサにおける光回路

バルク型と導波路型

マツハ・ツェンダー型光導波路

# バルク(光ビーム)型と導波路型

バルク型光電界センサ  
(電極は必須ではない)



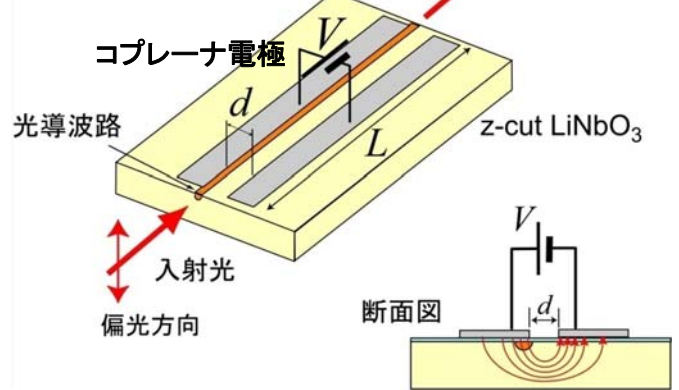
回折による  $L/d$  の制限

$$d \sim 2\text{mm}$$

$$L \sim 2\text{cm}$$

$$V_{\pi} = \frac{\lambda d}{n_e^3 r_{33} L} \sim 470\text{V}$$

導波型光電界センサ  
(電極による高感度化)



回折制限無し

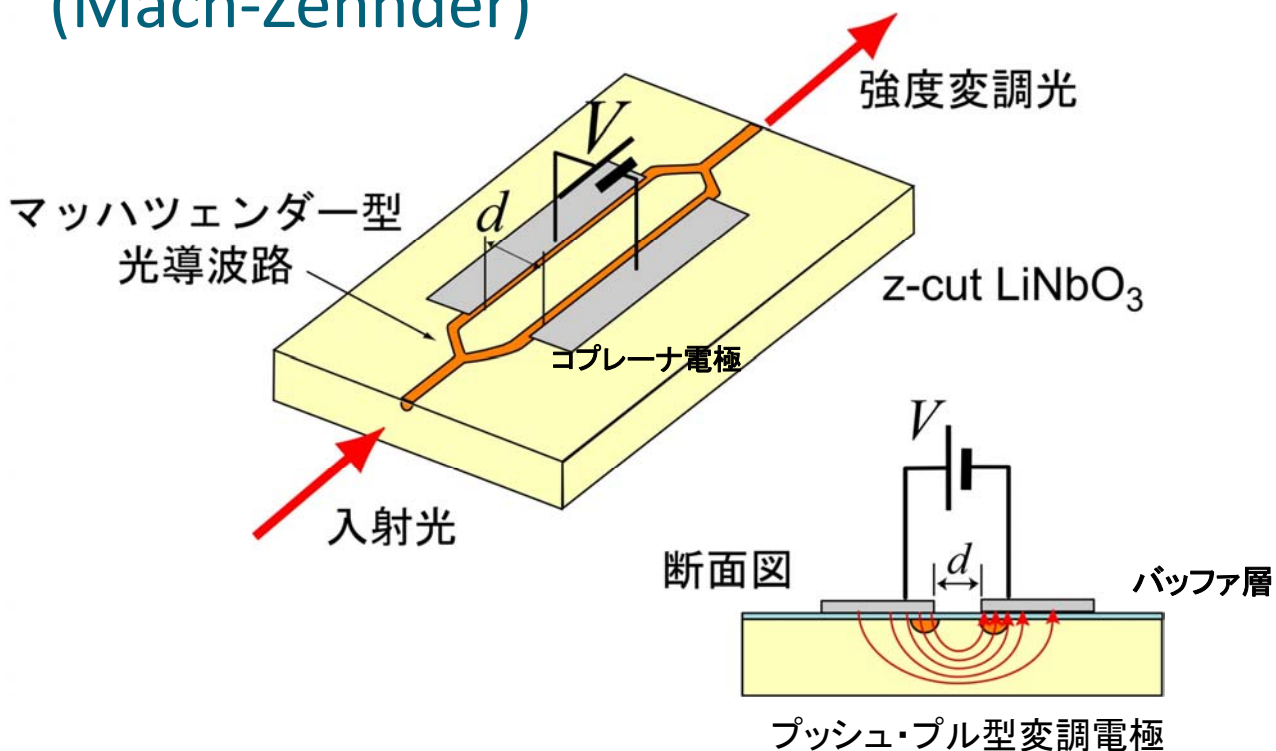
$$d \sim 20\mu\text{m}$$

$$L \sim 2\text{cm}$$

$$V_{\pi} = \frac{\lambda d}{n_e^3 r_{33} L \Gamma} \sim 5\text{V}$$

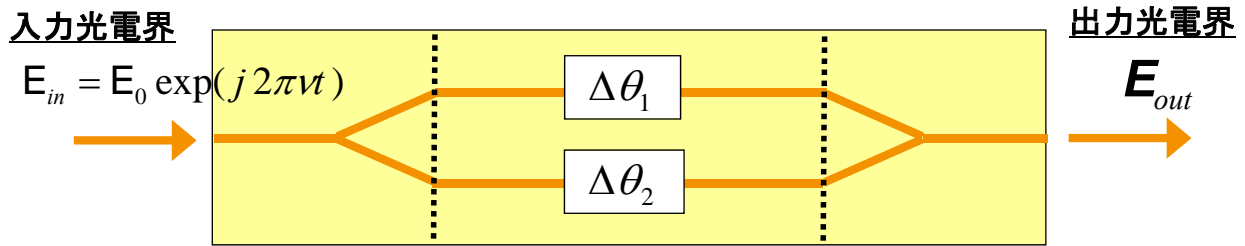
$\Gamma$ : 印加電界低減係数  
(光波と変調電界の重なり積分)

# マツハ・ツェンダー型光導波路構成 (Mach-Zehnder)



プッシュ・プル型変調電極

# マツハ・ツェンダー型導波路の出力



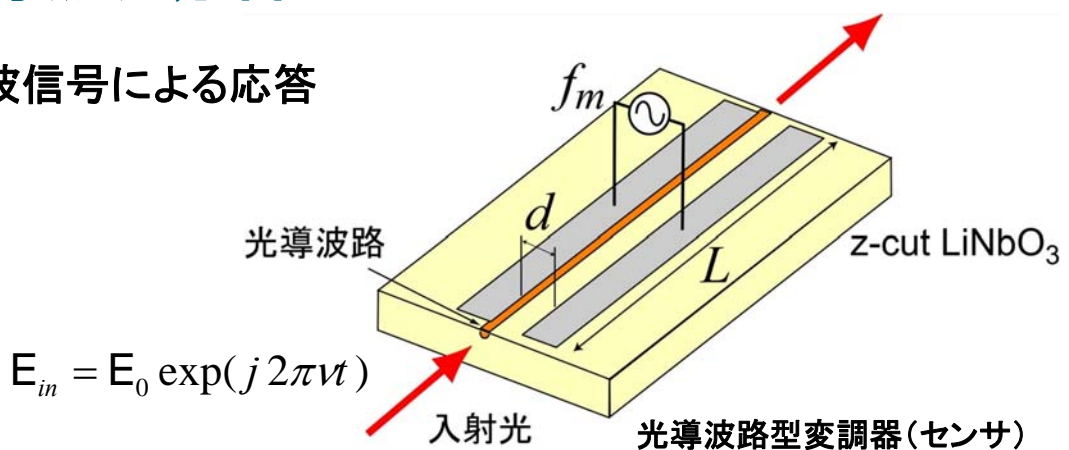
$$E_{out} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ \sqrt{2} & \sqrt{2} \end{pmatrix}}_{\text{出力側 Y分岐}} \underbrace{\begin{pmatrix} \exp(j\Delta\theta_1) & 0 \\ 0 & \exp(j\Delta\theta_2) \end{pmatrix}}_{\text{直線導波路}} \underbrace{\begin{pmatrix} 1 \\ \sqrt{2} \\ 1 \\ \sqrt{2} \end{pmatrix}}_{\text{入力側 Y分岐}} E_0 \exp(j 2\pi \nu t) \quad \text{入力光}$$

$$\therefore E_{out} = \frac{1}{2} \{ \exp(j\Delta\theta_1) + \exp(-j\Delta\theta_2) \} E_0 \exp(j 2\pi \nu t)$$

# 高周波動作

$$E_{out} = E_0 \exp(j 2\pi \nu t + \Delta\phi)$$

➤ 高周波信号による応答



$$E_{in} = E_0 \exp(j 2\pi \nu t)$$

**位相変化量**  $\Delta\phi = \frac{\pi}{\lambda} n_e^3 r_{33} \frac{V}{d} L \Gamma$

**高周波信号**  $V = V_0 \sin(2\pi f_m t)$

$$\begin{aligned} \therefore \Delta\phi &= \frac{\pi}{\lambda} n_e^3 r_{33} \frac{V_0}{d} L \Gamma \sin(2\pi f_m t) \\ &= \Delta\phi_0 \sin(2\pi f_m t) \end{aligned}$$

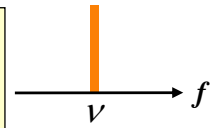
$$(\Delta\phi_0 = \frac{\pi}{\lambda} n_e^3 r_{33} \frac{V_0}{d} L \Gamma = \pi \frac{V_0}{V_\pi})$$

# 出力光スペクトル

入力光電界  $E_{in} = E_0 \exp(j 2\pi \nu t)$

出力光電界  $E_{out} = E_0 \exp[j\{2\pi \nu t + \Delta\phi_0 \sin(2\pi f_m t)\}]$

$$\Delta\phi_0 = \pi \frac{V_0}{V_\pi} : \text{位相変調指数}$$

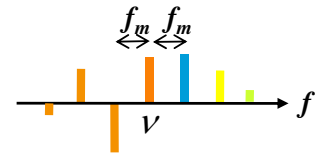


数学公式  $\exp(j \Delta\phi_0 \sin \phi)$

$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\Delta\phi_0) \exp(j n \phi)$$

$J_n(\Delta\phi_0)$  :  $n$  次のベッセル関数

$$\therefore E_{out} = E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\Delta\phi_0) \exp\{j 2\pi(\nu + n f_m)t\}$$



主要スペクトル成分 :  $-\lceil \Delta\theta_0 \rceil$  次  $\sim$   $+\lceil \Delta\theta_0 \rceil$  次 ( [x]:ガウス記号 )

## 4. 高周波電界計測におけるポイント

走行時間効果

最近の光電界センサ技術の動向

# 高周波動作における注意点

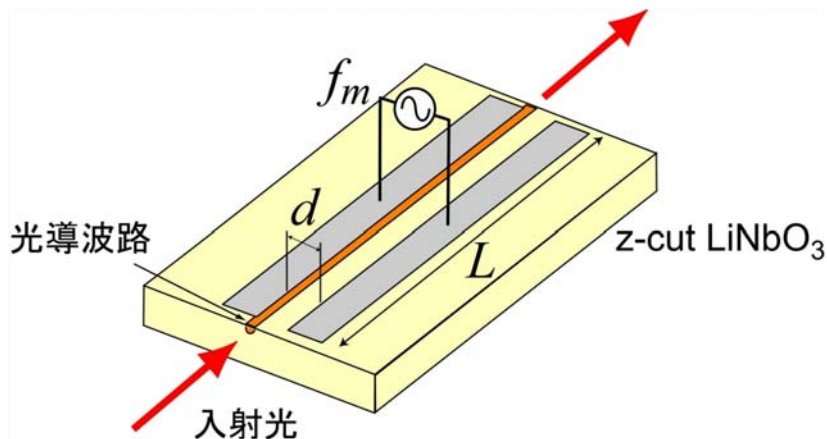
➤ 光波走行時間 :  $\tau$

$$\tau = L / v_g$$

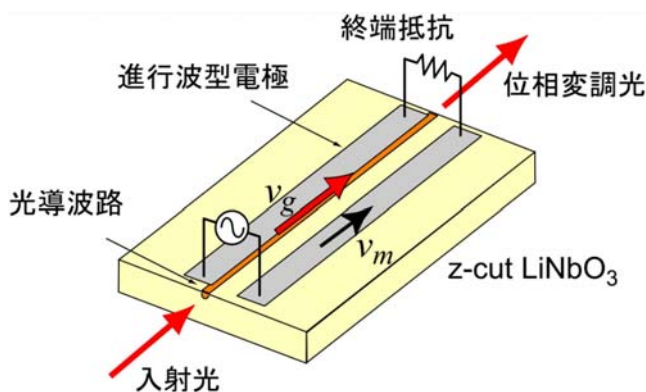
LiNbO<sub>3</sub> センサ

$$L=15\text{mm}$$

$$\tau \sim 100\text{ps}$$



# 進行波型電極を用いたEOセンサ



静止座標系  $(x, y, z)$   
 光波と共に進む座標系  $(x, y', z)$   
 $y' = y - v_g t$

$$t = \frac{y - y'}{v_g} \quad y' = \frac{v_g}{4f_m}$$

$$\Delta\phi_0 = \frac{\pi}{\lambda} n_e^3 r_{33} \frac{V_0}{d} L \Gamma \quad \text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$$

$$\Delta\phi = \int_0^L \Delta n k dy$$

$$= \int_0^L \frac{\pi}{\lambda} n_e^3 r_{33} \frac{V_0 \sin(2\pi f_m t - y/v_m)}{d} \Gamma dy$$

$$= \Delta\phi_0 \frac{1}{L} \int_0^L \sin(2\pi f_m t - y/v_m) dy$$

$$= \Delta\phi_0 \frac{1}{L} \int_0^L \sin(2\pi f_m \frac{y - y'}{v_g} - y/v_m) dy$$

$$= \Delta\phi_0 \frac{1}{L} \int_0^L \cos(2\pi f_m (\frac{1}{v_m} - \frac{1}{v_g}) y) dy$$

$$= \Delta\phi_0 \text{sinc}\{2\pi f_m (\frac{1}{v_m} - \frac{1}{v_g}) L\}$$

$v_m = v_g$  : 速度整合  $\Rightarrow$  高感度化

## Integrated Optical Electric Field Sensor from 10 kHz to 18 GHz

Bao Sun, Fushen Chen, Kaixin Chen, Zhefeng Hu, and Yongsheng Cao

## Integrated Photonic Electromagnetic Field Sensor Based on Broadband Bowtie Antenna Coupled Silicon Organic Hybrid Modulator

Xingyu Zhang, *Student Member, IEEE*, Amir Hosseini, Harish Subbaraman, Shiyi Wang, Qiwen Zhan, Jingdong Luo, Alex K.-Y. Jen, and Ray T. Chen

電気光学効果を利用した電磁界計測技術の動向

永妻 忠夫<sup>†a)</sup>

久武信太郎<sup>†</sup>

電子情報通信学会論文誌 B Vol. J97-B No. 3 pp. 243–252

# Electrooptic Millimeter-Wave–Lightwave Signal Converters Suspended to Gap-Embedded Patch Antennas on Low- $k$ Dielectric Materials

Yusuf Nur Wijayanto, *Student Member, IEEE*, Hiroshi Murata, *Member, IEEE*,  
and Yasuyuki Okamura, *Member, IEEE*



# まとめ

- 光電界センサにおけるEO効果
  - 光電界センサの構成
  - EO効果の基礎と屈折率楕円体
  - 高周波動作における注意点
  
- 光電界センサの最近の技術動向
  - PEM研究会の技術報告集
  - 電子情報通信学会和文論文誌B特集号  
「光応用電磁界計測技術の最新動向」（2014年3月発行）