

光応用電磁界計測 (PEM) 特別研究専門委員会ワークショップ

2019年 6月 21日
情報通信研究機構
イノベーションセンター

光電磁界計測に求められる フォトニクス基礎

三重大学 大学院工学研究科

村田 博司



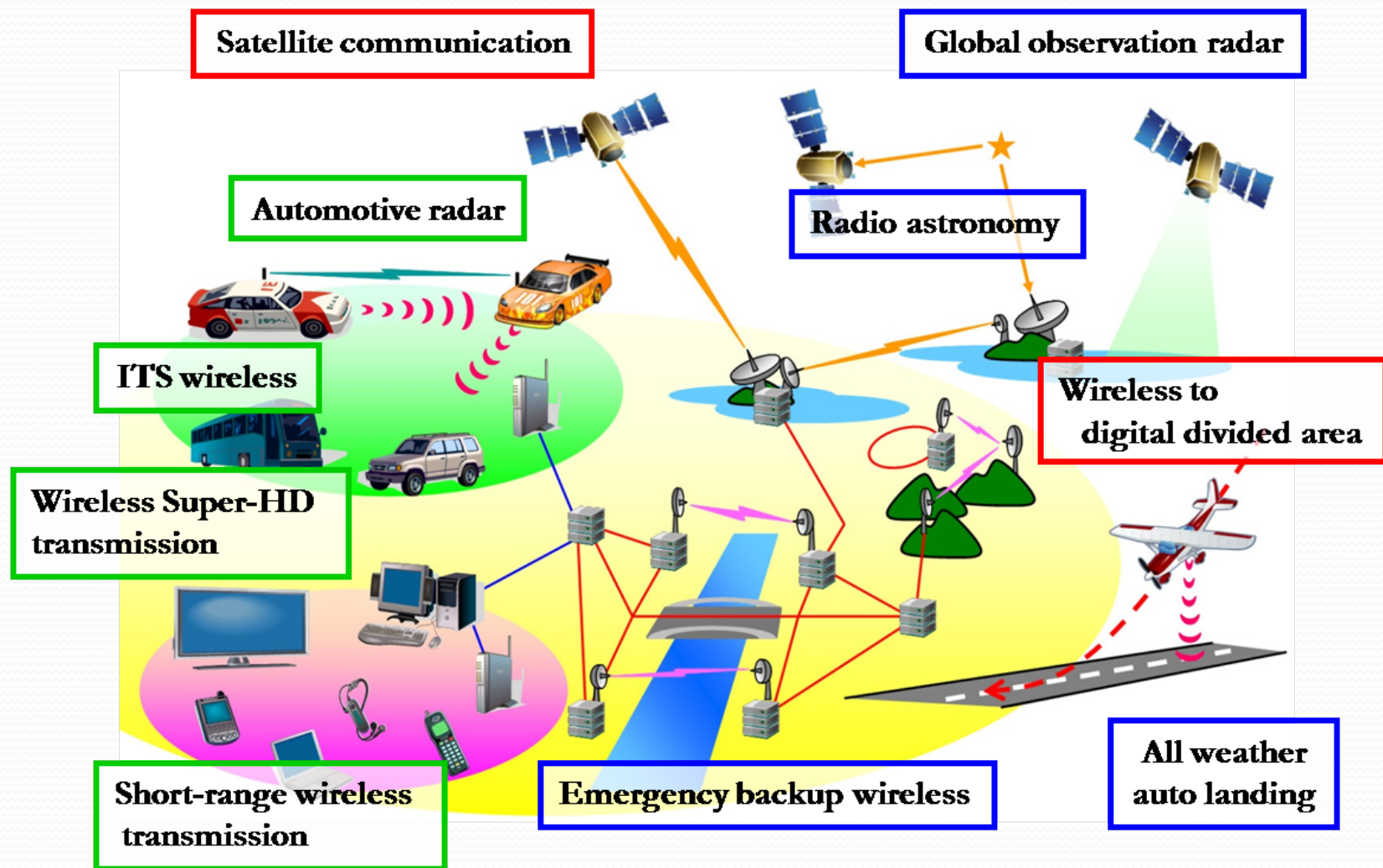
Outline

1. はじめに
 - 無線システムの動向
2. 光電界センサの原理
 - 基本構成
 - 電気光学(EO)効果と光学結晶
 - 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

1. はじめに

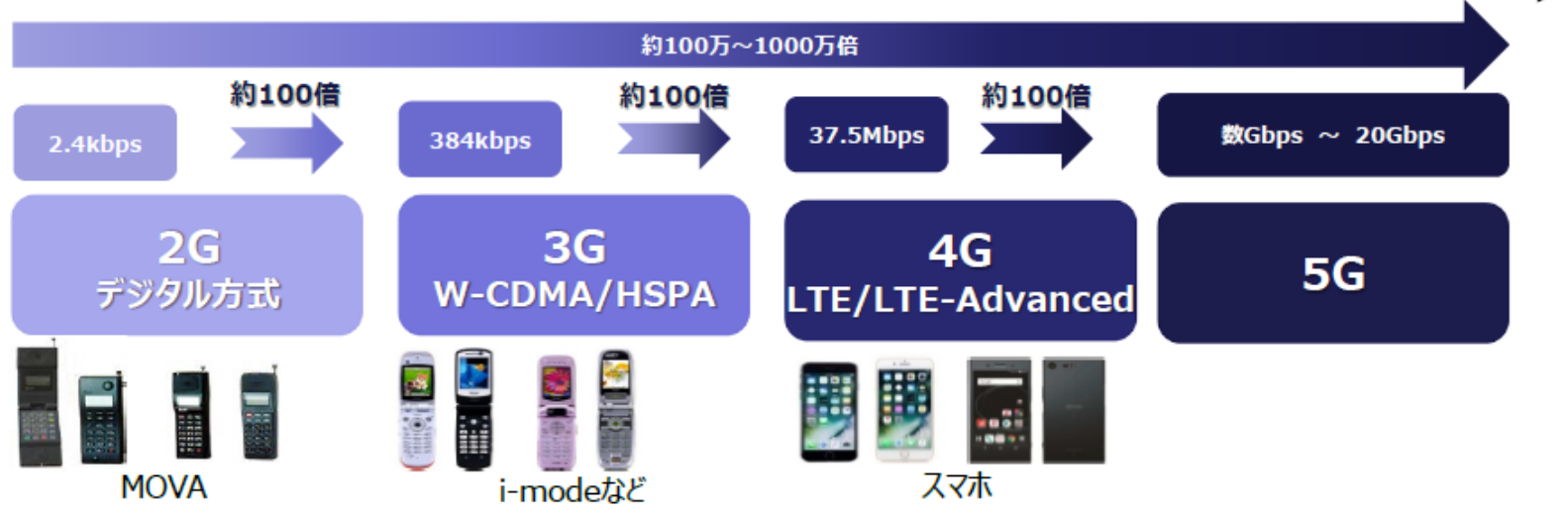
さまざまな無線システム



通信システムの進化

1990s 2000s 2010s 2020s

移動系



固定系



スマートフォン・携帯電話

国内の登録台数(2019年3月)

(TCA 電気通信事業者協会ホームページより)

1. NTTドコモ	78,452,800台
2. AU	55,225,400台
3. ソフトバンク	41,685,600台
合計	175,363,800台

5G 無線システム



第5世代移動通信システム(5G)の導入のための 特定基地局の開設計画の認定 (概要)

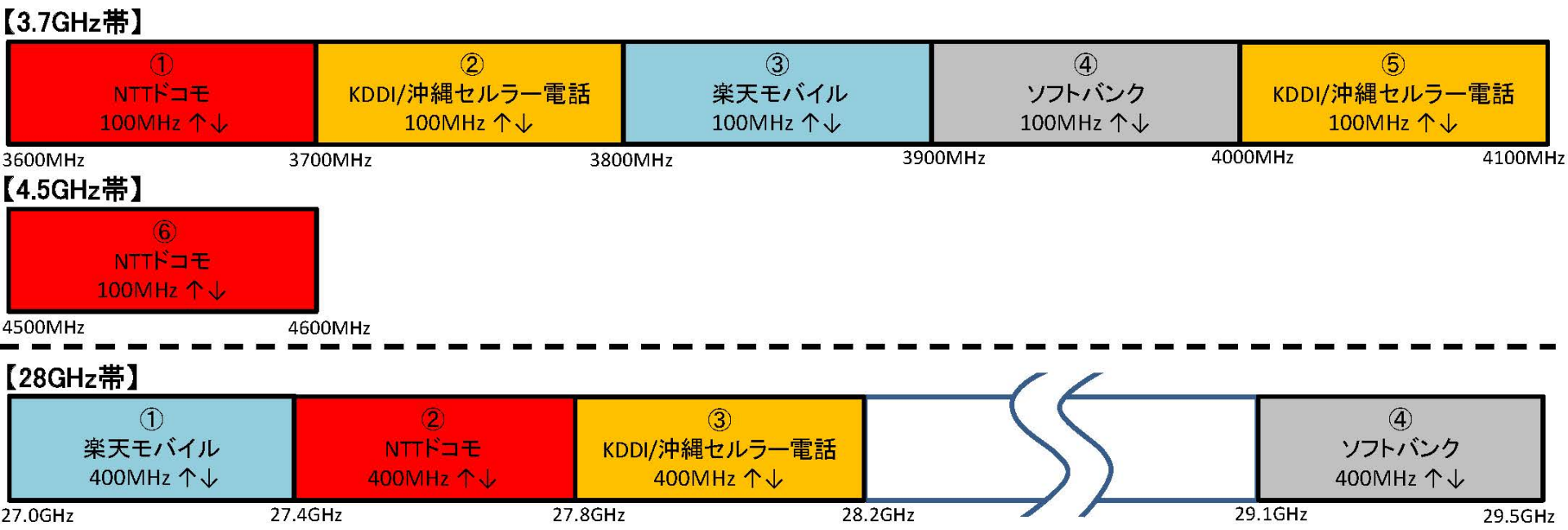
平成31年4月
総合通信基盤局

割当結果まとめ

- 以下のとおり、割当てを実施。
 - [3.7GHz帯及び4.5GHz帯] 2 枠割当て：NTTドコモ、KDDI / 沖縄セルラー電話
※ 1 枠当たり100MHz幅
1 枠割当て：ソフトバンク、楽天モバイル
 - [28GHz帯] 1 枠割当て：全ての申請者
※ 1 枠当たり400MHz幅



なお、割当て（開設計画の認定）に当たり、**全者共通の条件及び個者への条件を付すこととする。**

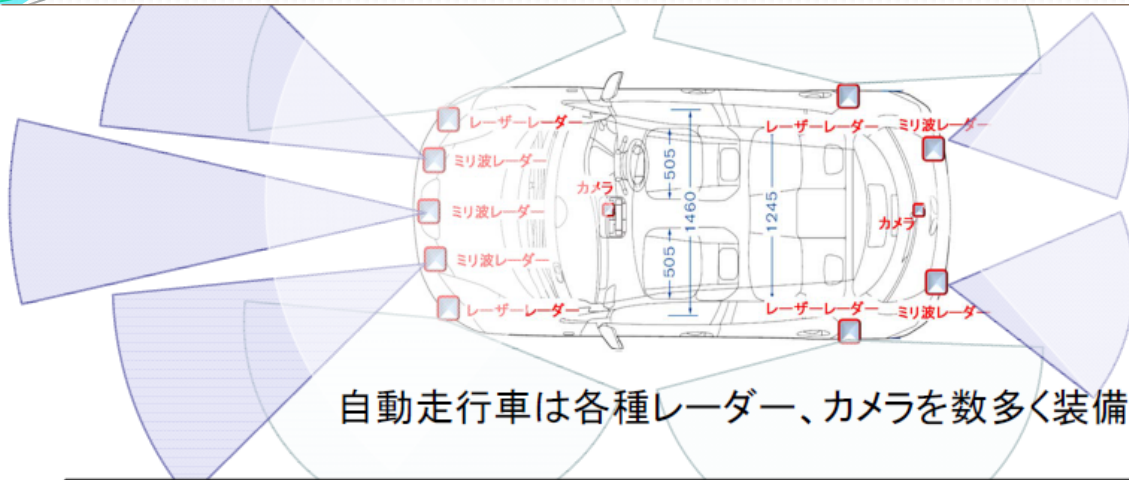


高速鉄道向けミリ波無線システム

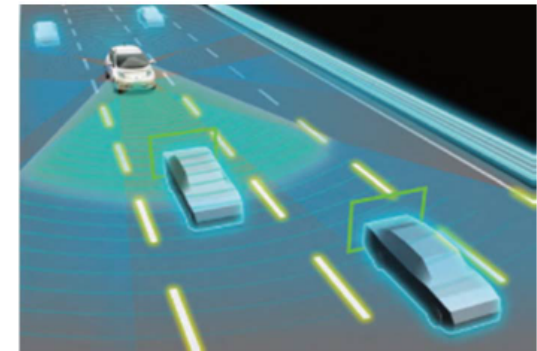


高速鉄道向け通信システムのイメージ図

自動車用レーダーシステム



自動走行車は各種レーダー、カメラを数多く装備



周囲の状況を適切に把握

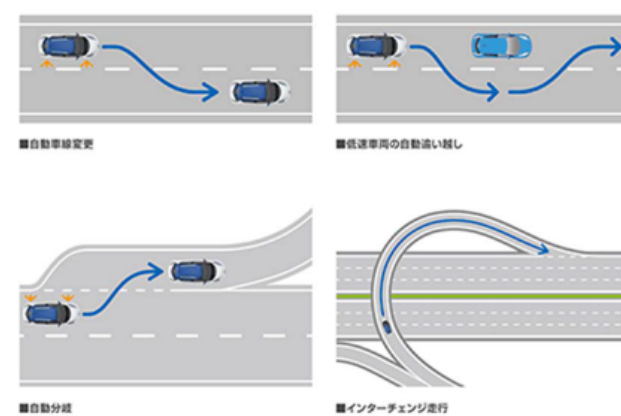
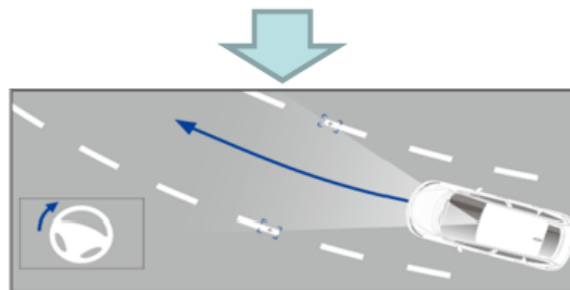
今回のITU決定により、ミリ波レーダーに使用できる周波数が拡大
【現在の20cm程度の大きさのものを把握できるレーダーをから7.5cm程度まで把握できるよう高性能化】

高精度化により人を検知しやすくなり街中での自動走行等の実現を加速化



カメラ・レーダー情報

自動走行車は、地図情報と周囲の情報を突き合わせて走行方法を判断、操作



様々な状況に対応出来るよう研究開発が進められている

電波利用の多様化・高度化

- 無線機器数の増加
 - 干渉、輻輳
- 無線機器の小型化・集積化
 - 誘導、結合



- 電波の正確な計測技術・評価技術
 - アンテナ、プローブ
 - △誘導・結合
 - △ケーブルの影響
 - 光電界センサ
 - ◎低侵襲・低誘導
 - 高感度化

光電界センサの特長

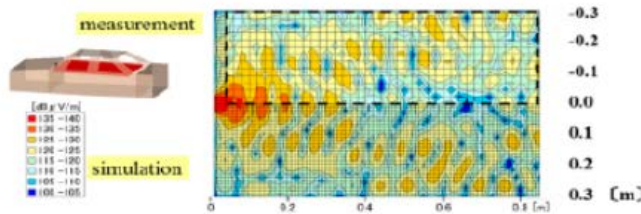
- 低侵襲、低誘導
- 電界振幅・位相・方向
- 線形性
- 小型・軽量 数mm～cm
- 高速・広帯域 DC～THz
- 安定性
- 光ファイバーとの親和性



市販の光電界センサ

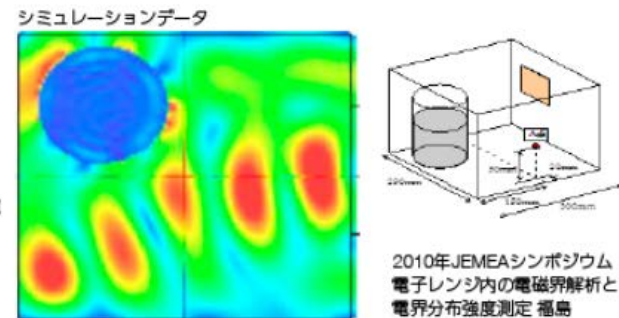
精工技研社HPより

自動車室内の電界分布計測



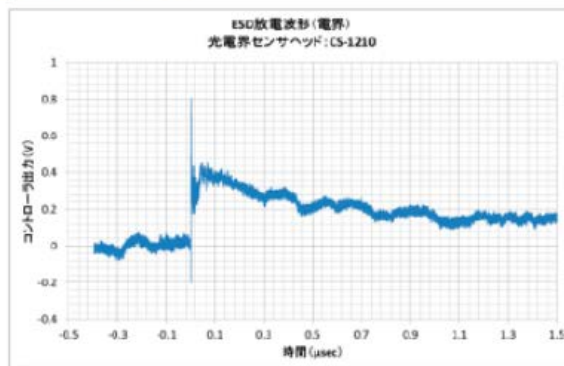
HORIUCHI et al., : COMPARISONS OF SIMULATED AND MEASURED ELECTRIC FIELD DISTRIBUTIONS :ICICE TRANS.COMMUN., VOL.E90-B, NO.9 SEPTEMBER 2007

電子レンジ内電界分布計測

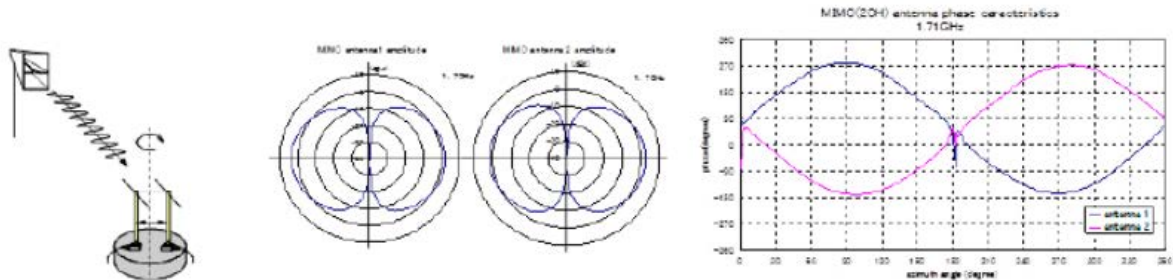


2010年JEMEAシンポジウム
電子レンジ内の電磁界解析と
電界分布強度測定 福島

ESD放電波形計測



MIMO受信パターン測定データ



コントローラ



光ファイバ

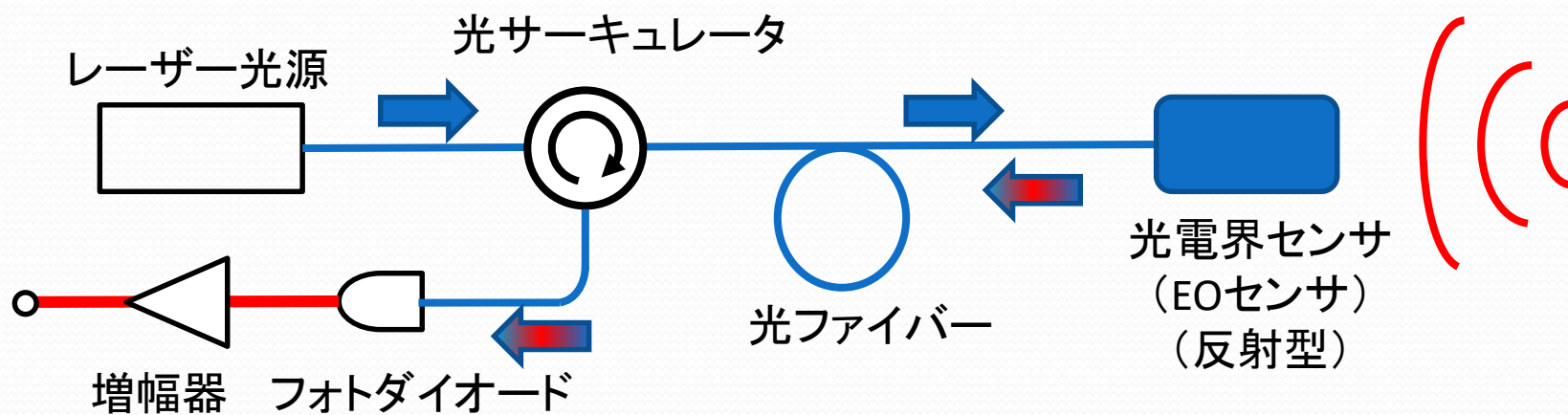
2. 光電界センサの原理

基本構成

電気光学(EO)効果と光学結晶

屈折率変化

光電界センサを用いた電界計測



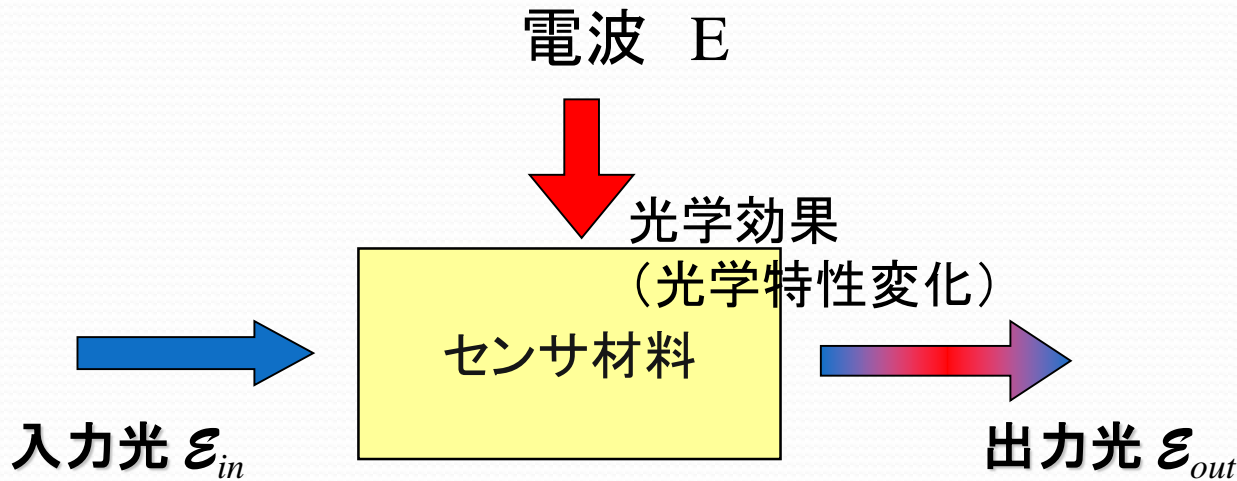
高性能フォトニクス技術

— 光ファイバー通信システムを支える技術 —

- 超低損失石英光ファイバー 伝搬損: $\sim 0.2\text{dB/km}$
- 高安定DFBレーザー光源 線幅: $\sim 10\text{MHz}$
- 超高速フォトダイオード 帯域: $\sim 1\text{THz}$
- 光サーキュレーター・カップラ 分離比: $\sim 50\text{dB}$
- 光増幅器 (EDFA, SOA) 利得: $\sim 20\text{dB}$
- 光変調器 帯域: DC \sim 30 GHz、駆動電圧: \sim 数V
- 光フィルター

DC \sim THz帯の電磁界計測が可能

光電界センサの基本構成

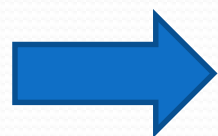


$$\text{出力光電界 } \varepsilon_{out} = \varepsilon_0 \exp\{j(2\pi\nu t - ky + \phi)\}$$

- ・ 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

光電界センサ材料への要求性能

- 光に対して透明
- 電波に対しても透明
- 電波によって光学特性が変化
 - 電気光学(EO)効果
 - 電波の振幅・位相・方向
 - 広帯域
- 安定性(金属封止は不可)



- ✓ 光学結晶(無機、有機)
- ✓ EOポリマー

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)

$$\Delta n \propto E$$

- ✓ 中心対称性のない光学材料(異方性材料)のみ

異方性結晶(LiNbO₃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)

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

- 2次EO効果 (カー効果)

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

- ✓ すべての光学材料

- ✓ 3次の非線形光学効果 → 4光波混合 (2光波 + 2電気)

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

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_3 導波型EO変調器 Kaminov
- 1995 10Gbps LiNbO_3 光強度変調器
- 2000 40Gbps LiNbO_3 光強度変調器
- 2005 LiNbO_3 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

- 電気信号に比例する屈折率変化
- 純粋な光位相変調
- 自発分極の向きで極性が反転
- LiNbO₃, LiTaO₃, 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)



AGNES-POCKELS-STRASSE

INFORMATIONEN | STRASSEN | EINRICHTUNGEN

Ort, Kreis, Strasse, Firma...

vor Ort regional bundesweit

KARTEN-TIPPS

Stadtplan Schleswig
Karte Rendsburg-Eckernförde
Stadtplan Eckernförde
Stadtplan Flensburg
Karte Schleswig-Flensburg

GEWERBE

DEUTSCHLANDKARTE

STADTPLAN SCHLESWIG



Journal content

- [+ Journal home](#)
- [+ Advance online publication](#)
- [+ Current issue](#)
- [+ Nature News](#)
- [+ Archive](#)
- [+ Supplements](#)
- [+ Web focuses](#)
- [+ Podcasts](#)
- [+ Videos](#)
- [+ News Specials](#)

Letters to Editor

Nature **43**, 437-439 (12 March 1891) | doi:10.1038/043437c0

Surface Tension





RAYLEIGH

I SHALL be obliged if you can find space for the accompanying translation of an interesting letter which I have received from a German lady, who with very homely appliances has arrived at valuable results respecting the behaviour of contaminated water surfaces. The earlier part of Miss Pockels' letter covers nearly the same ground as some of my own recent work, and in the main harmonizes with it. The later sections seem to me very suggestive, raising, if they do not fully answer, many important questions. I hope soon to find opportunity for repeating some of Miss Pockels' experiments.

[▲ Top](#)

subsc
na

Full text

- [+ Previous](#)
- [+ Table of c](#)
-  [Download](#)
-  [Send to](#)
-  [Rights](#)
-  [Order](#)

光学結晶の種類

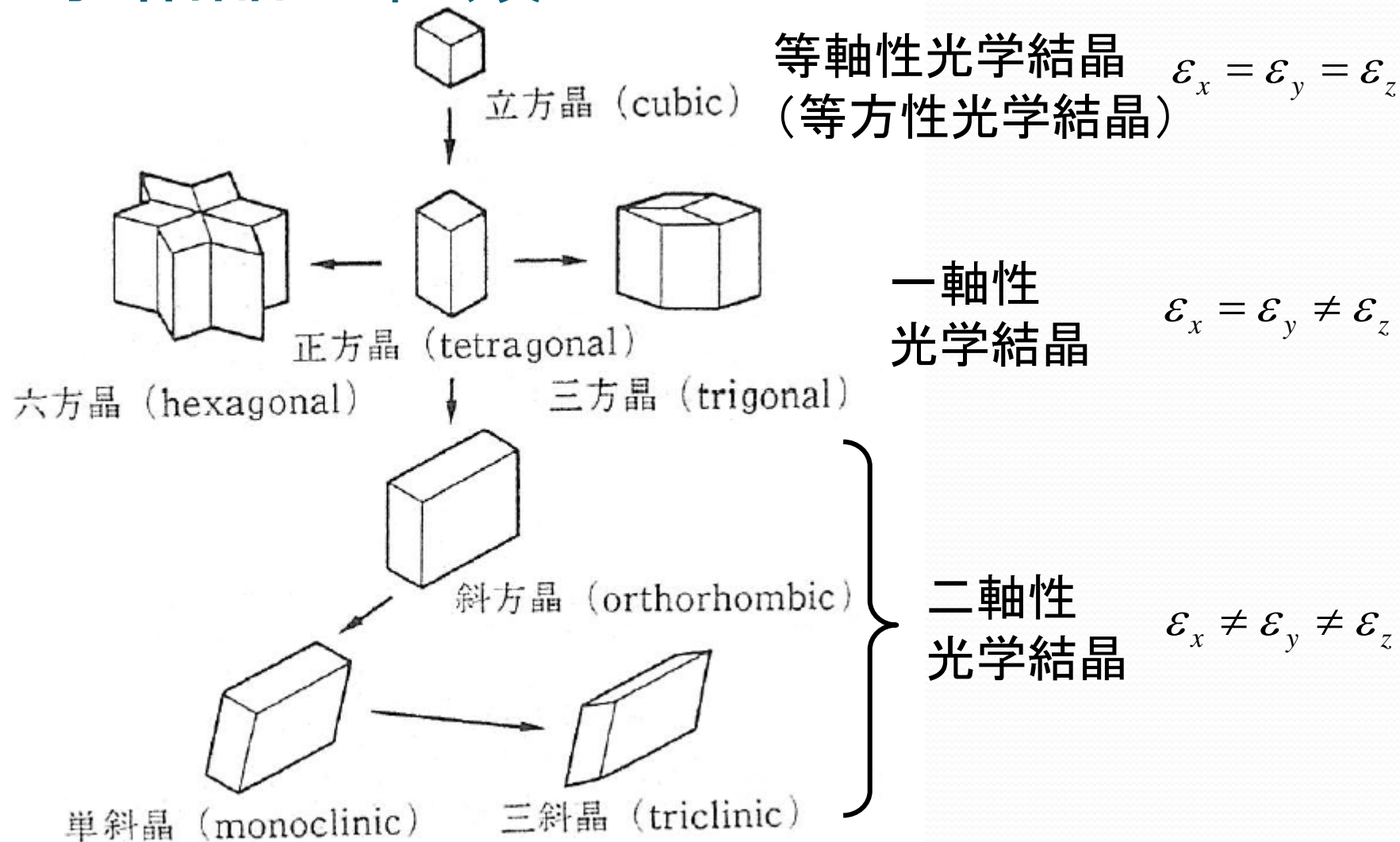
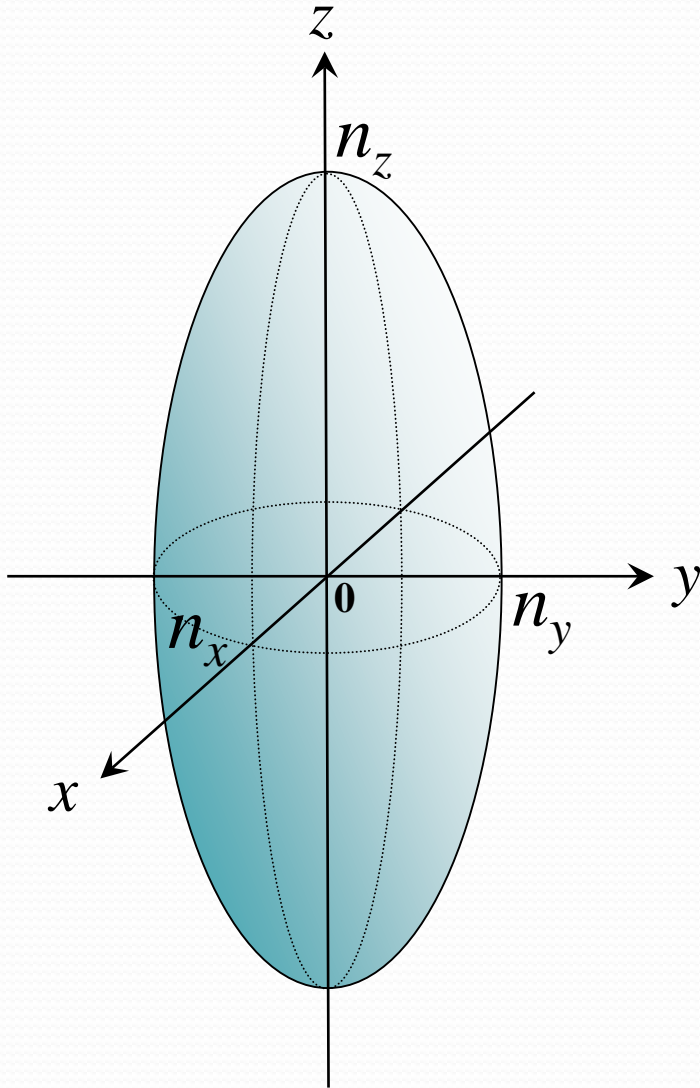


図 2.21 単純立方格子から変形する七つの晶系

屈折率橢圓體



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

$n_x \neq n_y \neq n_z$: 二軸性光学結晶

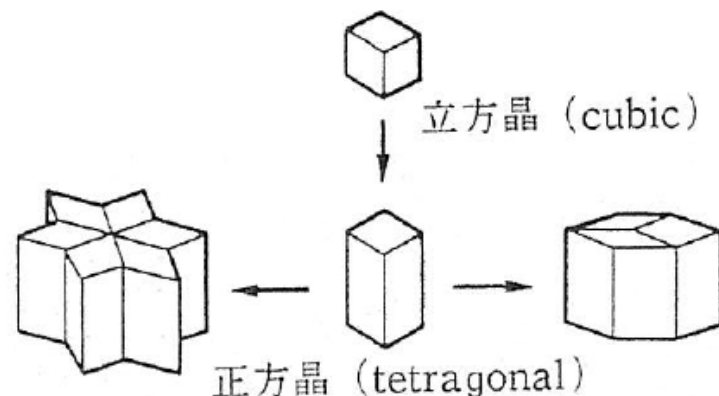
$n_x = n_y \neq n_z$: 一軸性光学結晶

屈折率楕円体とは？

- 空間に蓄えられる電気的エネルギー

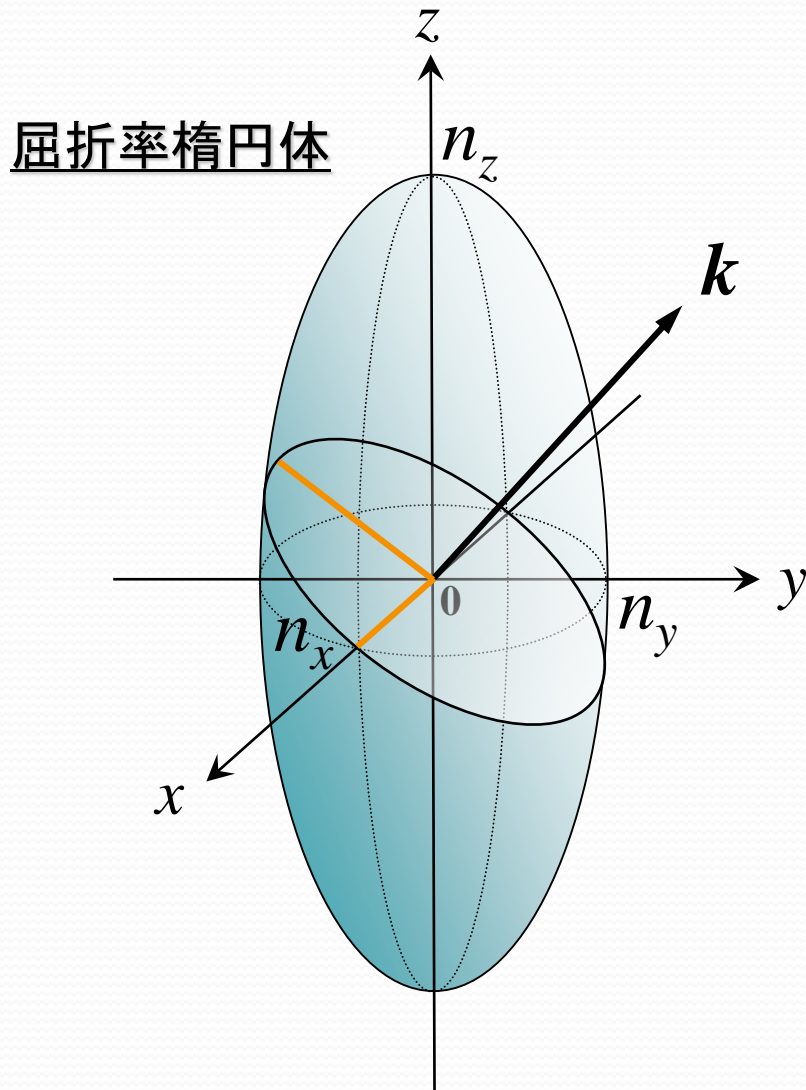
$$\begin{aligned}w_e &= \frac{1}{2} E \cdot D \\ &= \frac{1}{2} E \cdot (\varepsilon_{ij}) E \\ &= \frac{1}{2} (\varepsilon_{xx} E_x^2 + \varepsilon_{yy} E_y^2 + \varepsilon_{zz} E_z^2)\end{aligned}$$

$$\frac{D_x^2}{\varepsilon_{xx}} + \frac{D_y^2}{\varepsilon_{yy}} + \frac{D_z^2}{\varepsilon_{zz}} = 2w_e$$



$$\therefore \frac{D_x^2}{n_x^2} + \frac{D_y^2}{n_y^2} + \frac{D_z^2}{n_z^2} = 2\varepsilon_0 w_e$$

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

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はるかに簡便

- 光学結晶は低侵襲・低誘導（電界を乱さない）

⇒ 電界との相互作用は弱い

EO効果により屈折率楕円体が変わるかに変化

屈折率変化量： $\Delta n < 10^{-4}$

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

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

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

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

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

ϵ : 誘電率

μ : 透磁率

σ : 導電率

ϵ, μ, σ 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)

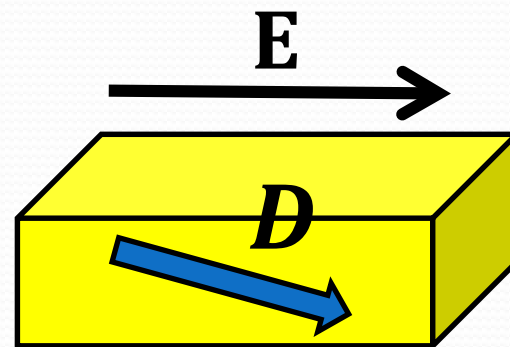
$\mu=\mu_0$ (非磁性)

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)

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



$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \epsilon \mathbf{E} \\ &= \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \end{aligned}$$

等方性結晶 (誘電率テンソルはスカラーと同じ)

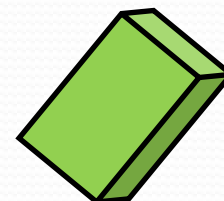
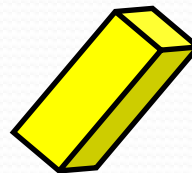
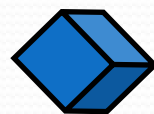
$$\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_z$$

一軸性結晶

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

二軸性結晶

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



<2階テンソル>
結晶の方向
電界の方向

誘電率と屈折率

屈折率：媒質中と真空中の光速の比

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

光周波数領域ではほとんどの結晶が非磁性： $\mu=\mu_0$

$$\therefore n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} = \sqrt{\epsilon_r}$$

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)

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

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

<3階テンソル>
結晶の方向
電界の方向
光電界の方向

LiNbO₃ 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	$\epsilon_{11} = 48$ $\epsilon_{33} = 28$

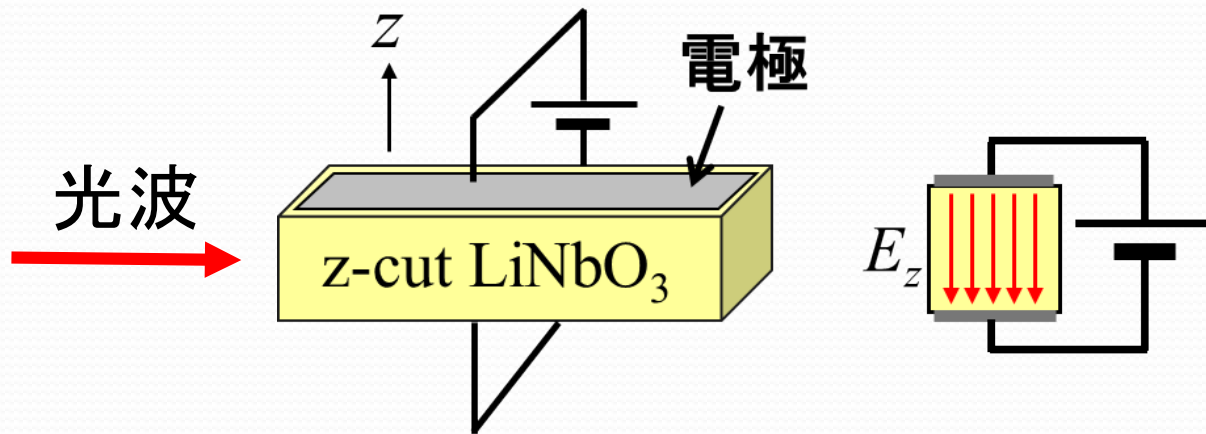
$$(r_{ij}) = \begin{pmatrix} 0 & -r_{22} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

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	$\epsilon_r = 10.1$

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

例: LiNbO₃の場合 (z方向電界印加)



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

$$a_{11} = \frac{1}{n_x^2} + r_{13} E_z$$

$$a_{22} = \frac{1}{n_y^2} + r_{13} E_z$$

$$a_{33} = \frac{1}{n_z^2} + r_{33} E_z$$

$$a_{23} = a_{31} = a_{12} = 0$$

例: LiNbO_3 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: LiNbO₃の場合 (z方向電界印加)

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

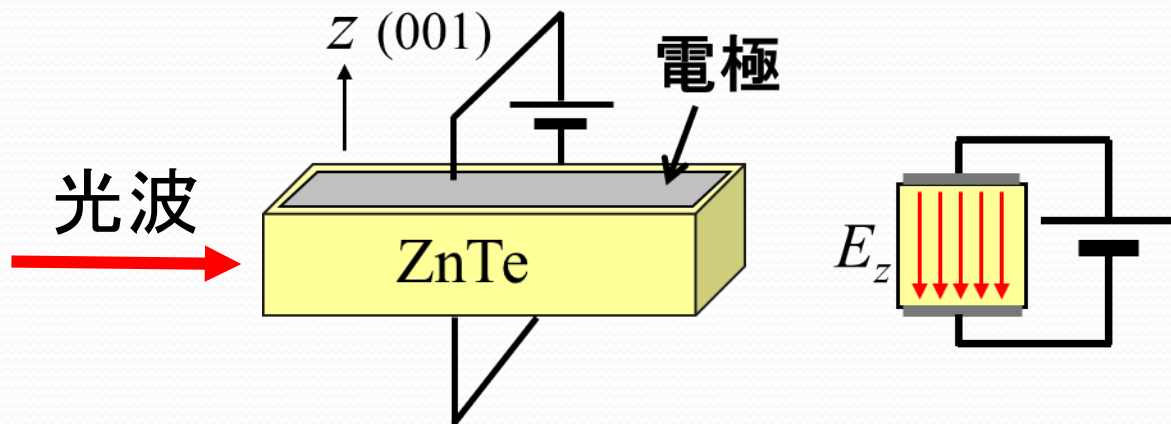
$$\begin{aligned}n_e' &= \left(\frac{1}{n_e^2} + r_{33}E_z\right)^{-1/2} \\ &= n_e (1 + n_e^2 r_{33}E_z)^{-1/2} \\ &\cong n_e - \frac{1}{2}n_e^3 r_{33}E_z\end{aligned}$$

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

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

屈折率楕円体: 長軸・短軸が伸び縮みする

例：ZnTeの場合



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

$$a_{11} = a_{22} = a_{33} = a_{23} = a_{31} = 0$$

$$a_{12} = r_{41} E_z$$

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

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

$$= n (1 + n^3 r_{41} E_z)^{-1/2} \quad = n (1 - n^3 r_{41} E_z)^{-1/2}$$

$$\cong n - \frac{1}{2} n^3 r_{41} E_z \quad \cong n + \frac{1}{2} n^3 r_{41} E_z$$

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

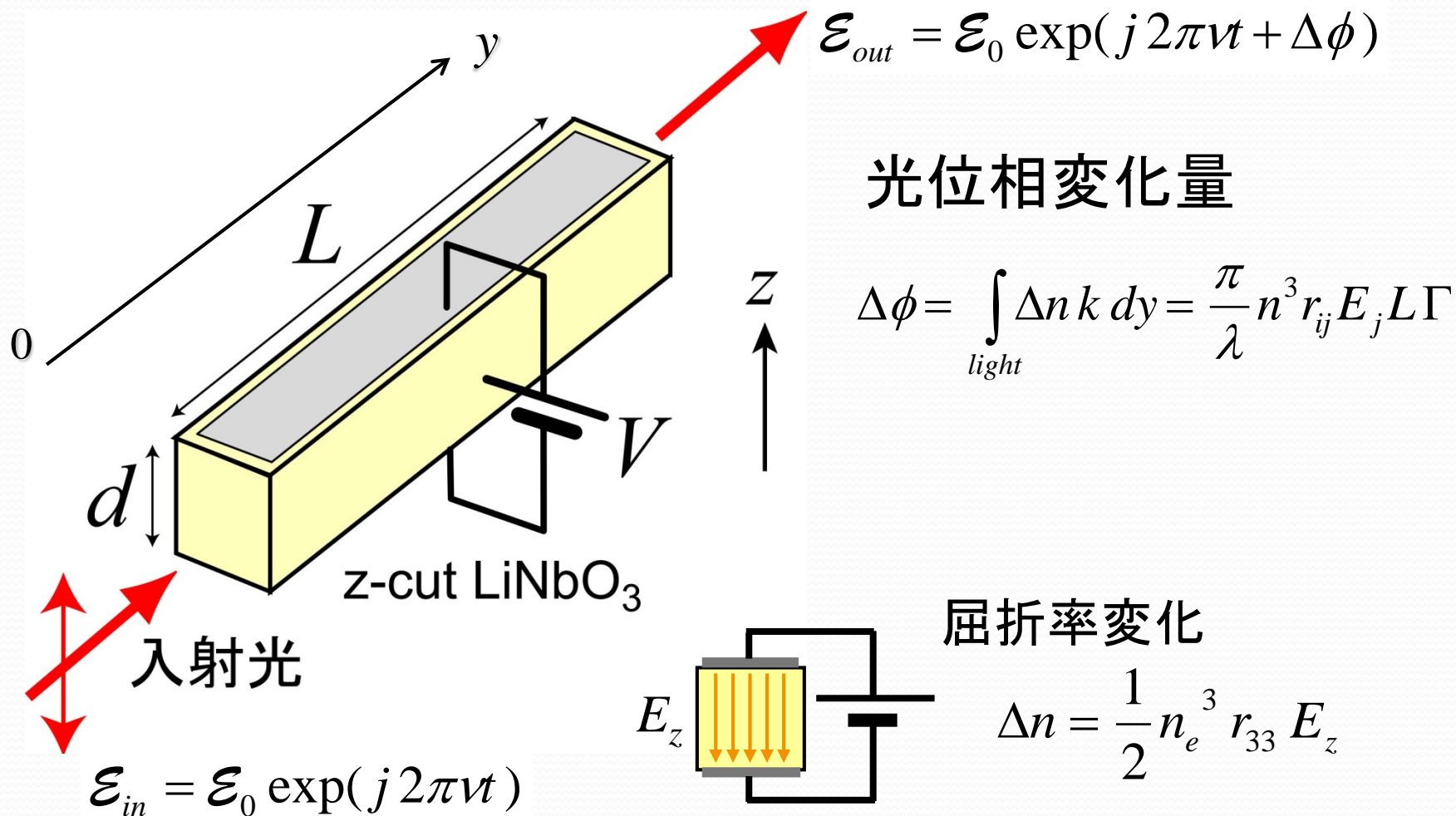
屈折率楕円体：球 \Rightarrow 回転楕円体

3. 光電界センサにおける光回路

バルク型と導波路型

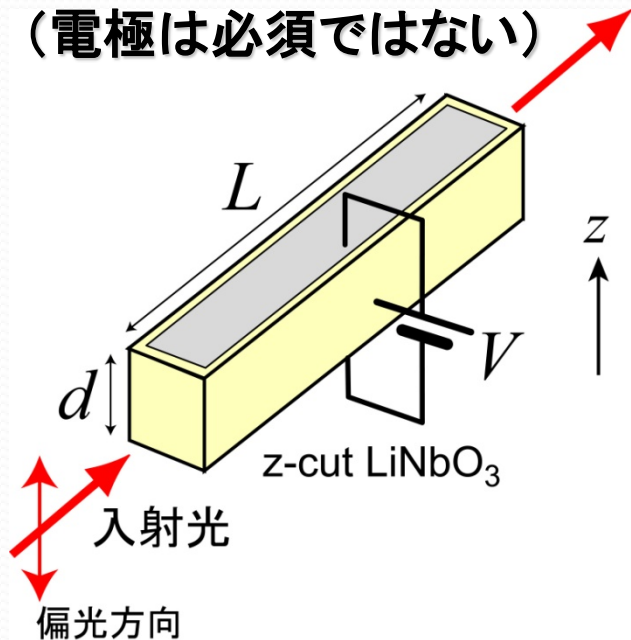
マツハ・ツェンダー型光導波路

光電界センサにおける光位相変化



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)



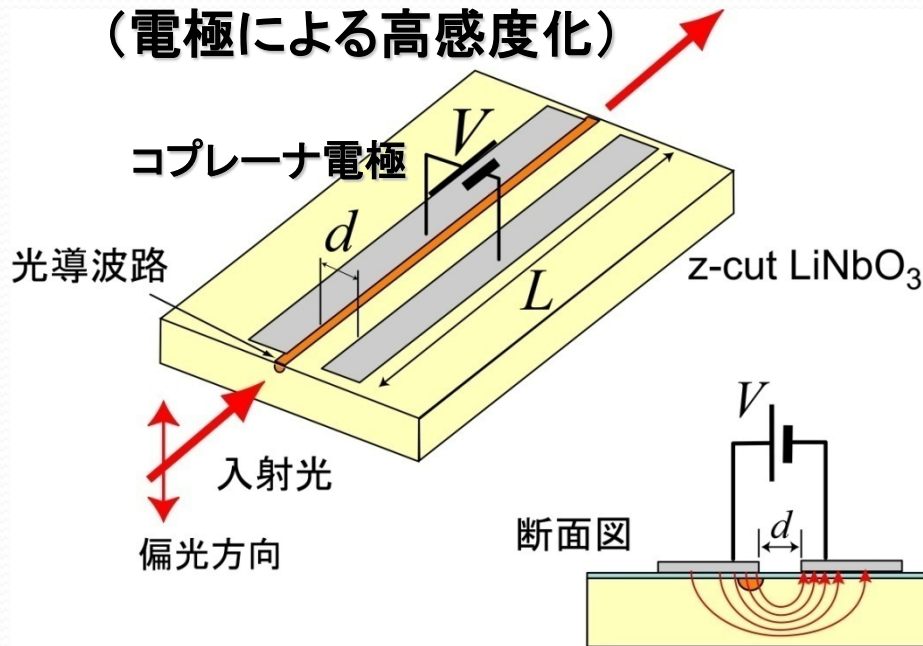
回折による L/d の制限

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

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

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

導波路型光電界センサ
(電極による高感度化)



回折制限無し

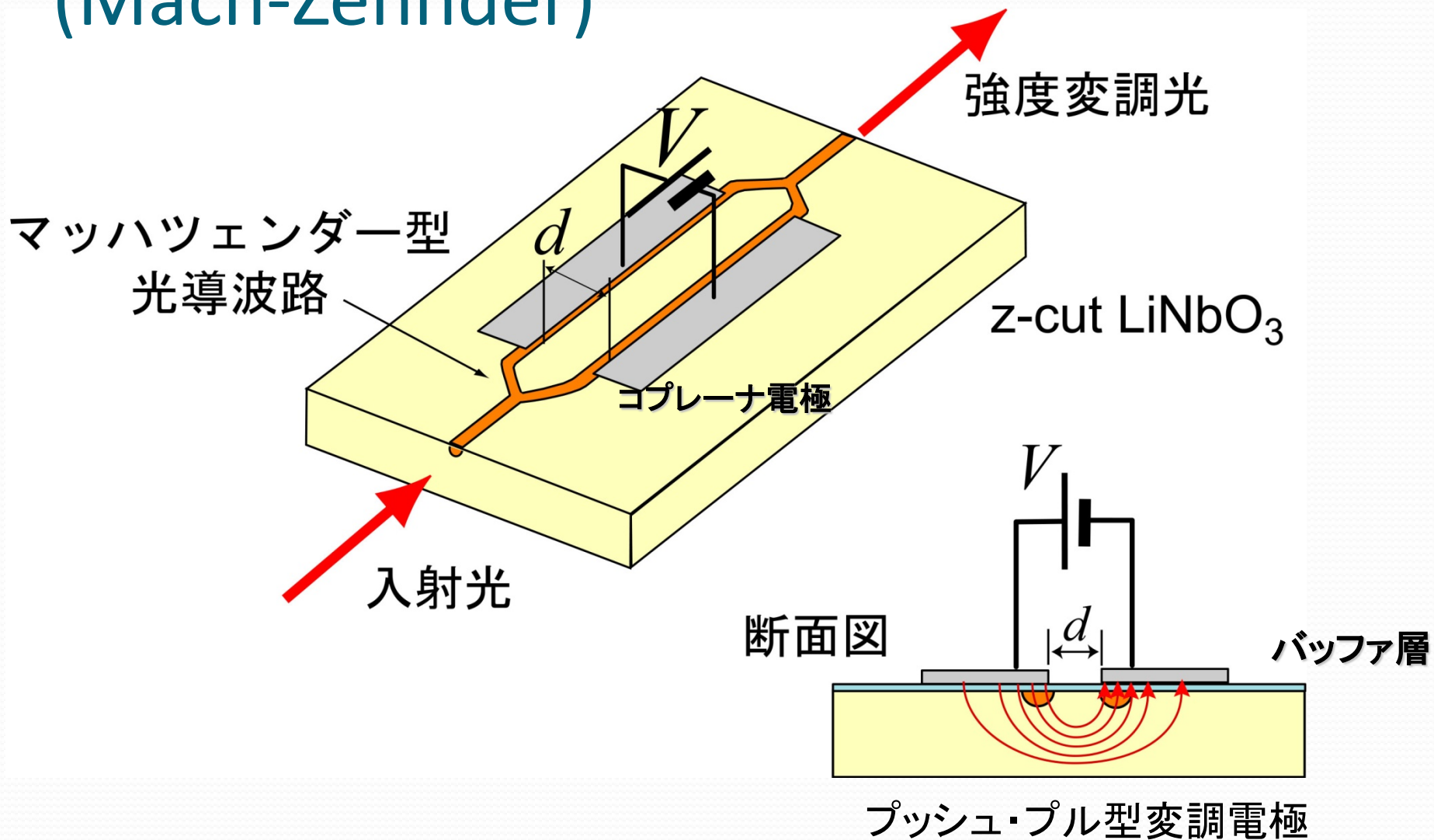
$$d \sim 20\mu\text{m}$$

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

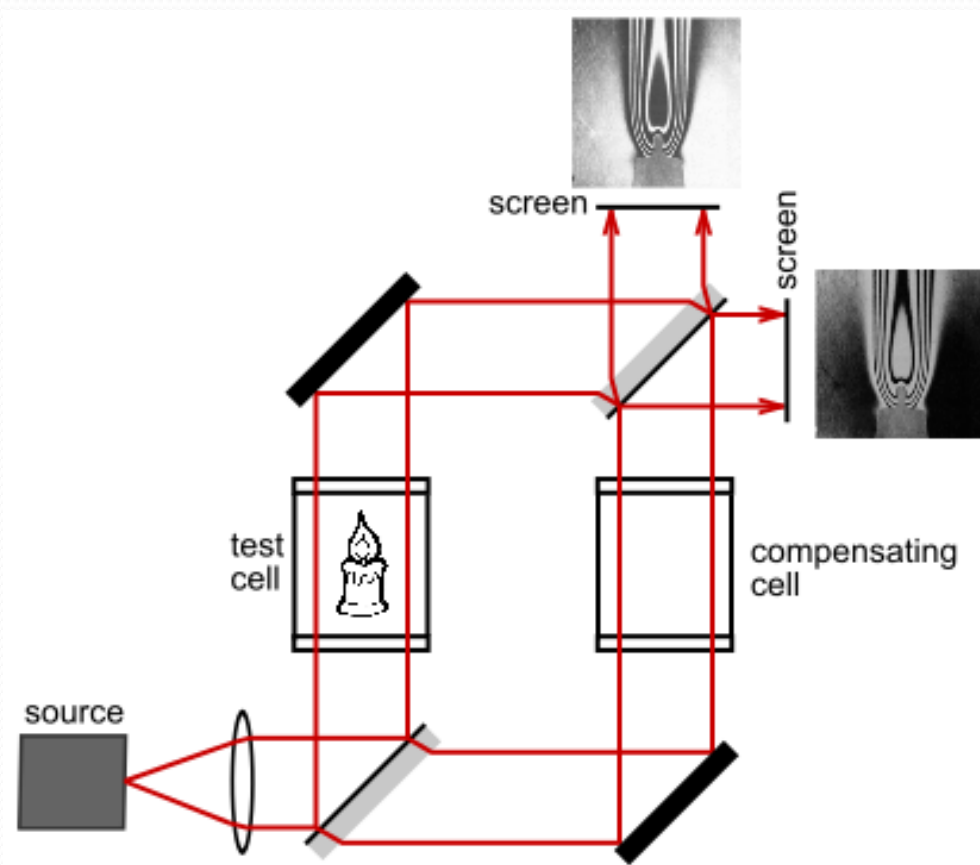
$$V_{\pi} = \frac{\lambda d}{n_e^3 r_{33} L \Gamma} \sim 5\text{V}$$

Γ : 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)

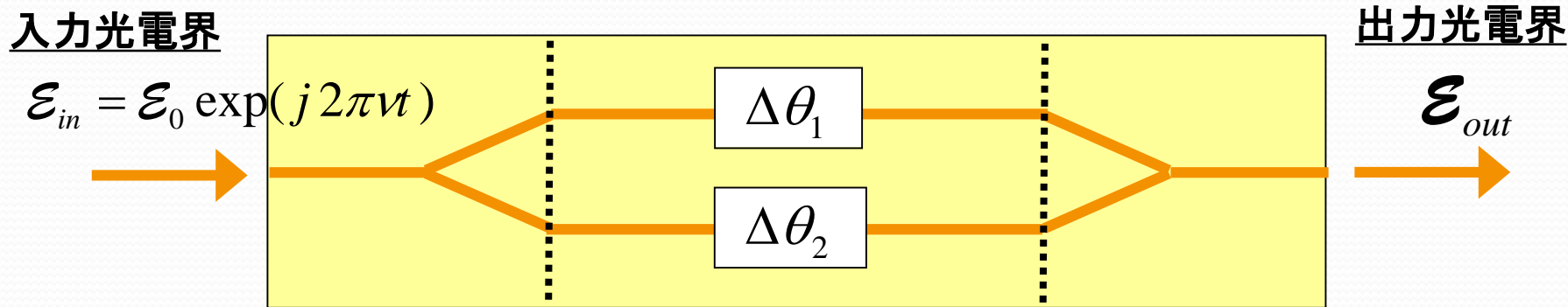


Mach-Zehnder 干涉計



1891年 Ludwig Zehnder, 1892年 Ludwig Mach

マツハ・ツェンダー型導波路の出力



$$\varepsilon_{out} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ \sqrt{2} & \sqrt{2} \end{pmatrix}}_{\text{出力側 Y分岐}} \underbrace{\begin{pmatrix} \exp(j\Delta\theta_1) & 0 \\ 0 & \exp(j\Delta\theta_2) \end{pmatrix}}_{\text{直線導波路}} \underbrace{\begin{pmatrix} 1 \\ \sqrt{2} \\ 1 \\ \sqrt{2} \end{pmatrix}}_{\text{入力側 Y分岐}} \varepsilon_0 \exp(j2\pi\nu t)$$

出力側 Y分岐 直線導波路 入力側 Y分岐 入力光

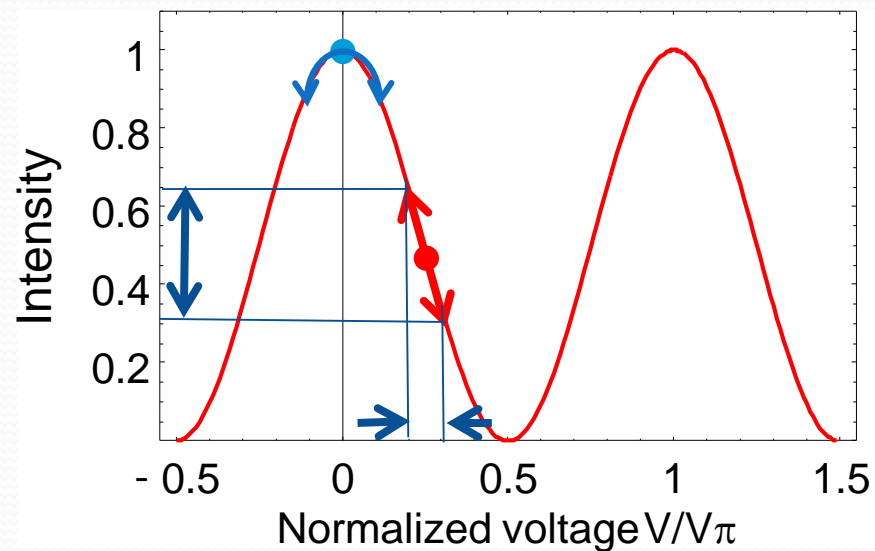
$$\therefore \varepsilon_{out} = \frac{1}{2} \{ \exp(j\Delta\theta_1) + \exp(-j\Delta\theta_2) \} \varepsilon_0 \exp(j2\pi\nu t)$$

伝達関数

ゼロバイアス
プッシュ・プル動作の場合

$$\Delta\theta_1 = -\Delta\theta_2 = \Delta\theta = \pi \frac{V}{V_\pi}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{out} &= \frac{1}{2} \{ \exp(j\Delta\theta) + \exp(-j\Delta\theta) \} \\ &\quad \times \mathcal{E}_0 \exp(j2\pi\nu t) \\ &= \mathcal{E}_{in} \cos\left(\pi \frac{V}{V_\pi}\right) \end{aligned}$$



4. 高周波電界計測におけるポイント

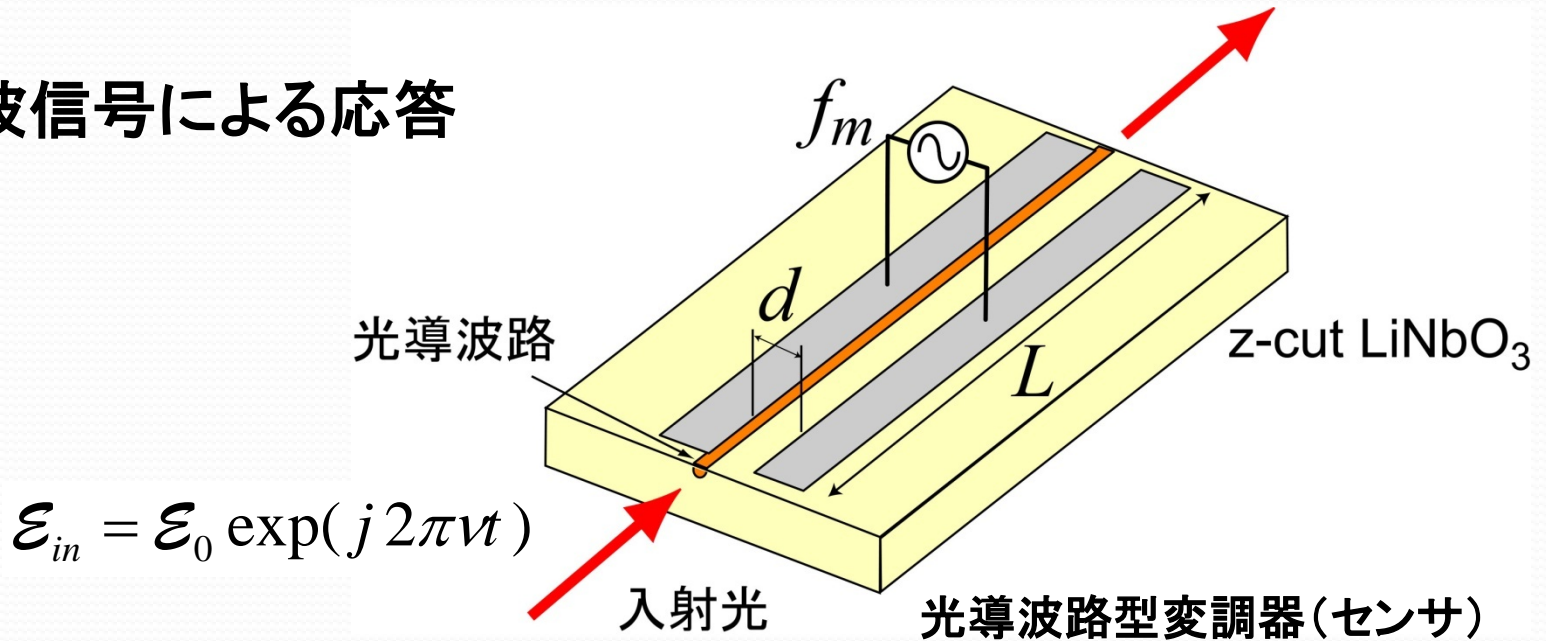
走行時間効果

最近の光電界センサ技術の動向

高周波動作

$$\mathcal{E}_{out} = \mathcal{E}_0 \exp(j 2\pi\nu t + \Delta\phi)$$

高周波信号による応答



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

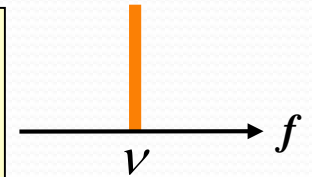
入力光電界

$$\mathcal{E}_{in} = \mathcal{E}_0 \exp(j 2\pi \nu t)$$

出力光電界

$$\mathcal{E}_{out} = \mathcal{E}_0 \exp[j \{ 2\pi \nu t + \Delta\phi_0 \sin(2\pi f_m t) \}]$$

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

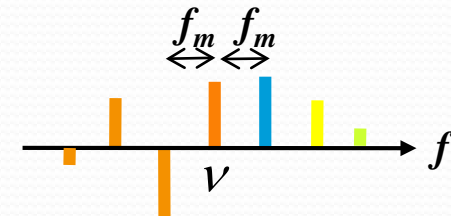


数学公式 $\exp(j \Delta\phi_0 \sin \phi)$

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

$J_n(\Delta\phi_0)$: n 次のベッセル関数

$$\therefore \mathcal{E}_{out} = \mathcal{E}_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\Delta\phi_0) \exp\{ j 2\pi(\nu + n f_m) t \}$$



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

光波走行時間効果

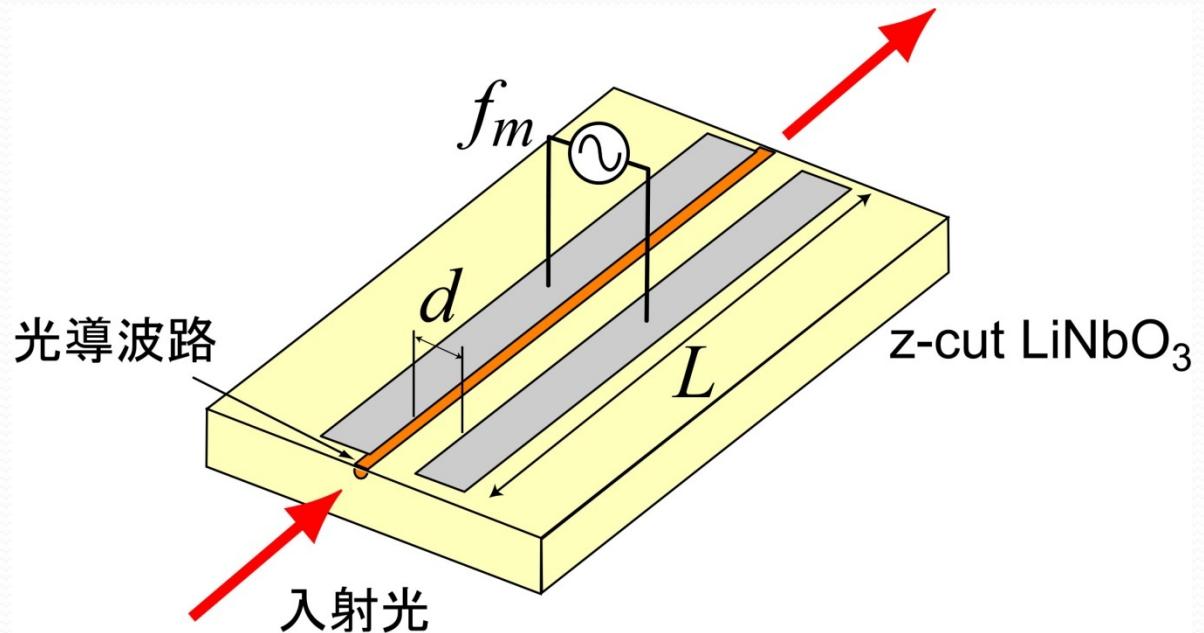
▶ 光波走行時間 : τ

$$\tau = L / v_g$$

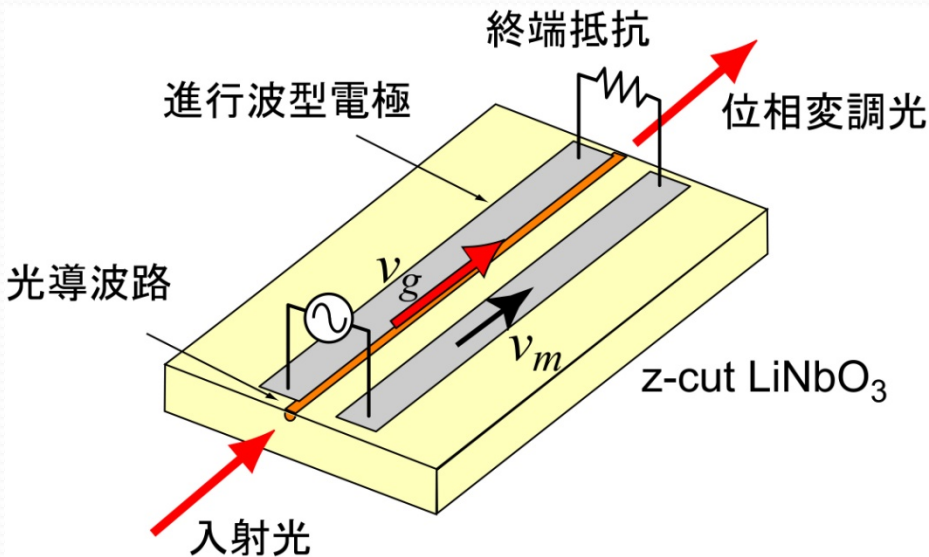
LiNbO₃ センサ

$L=15\text{mm}$

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



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)
 $y' = y - v_g t$

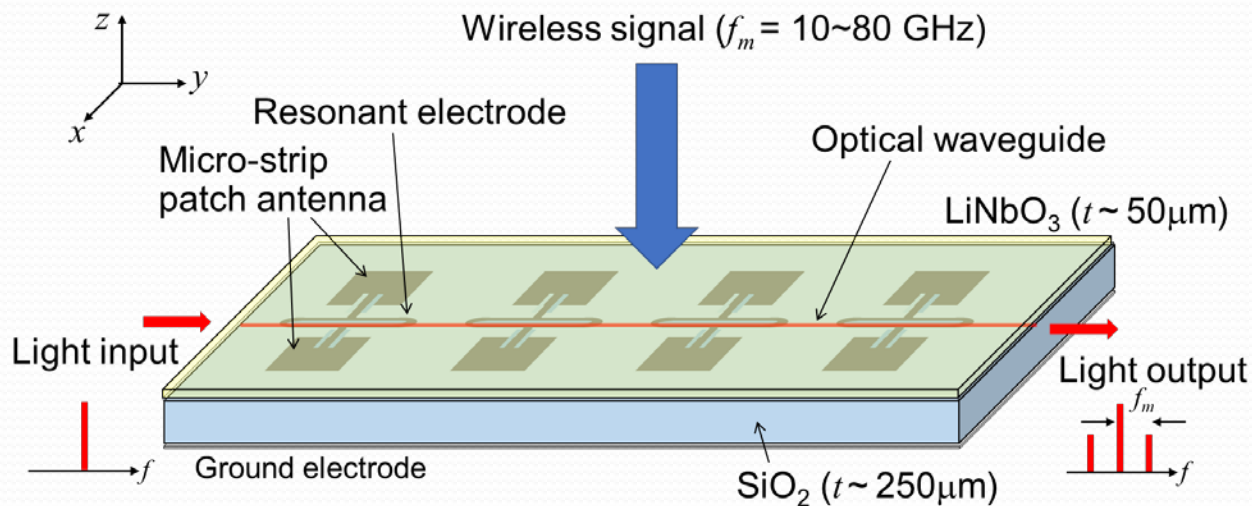
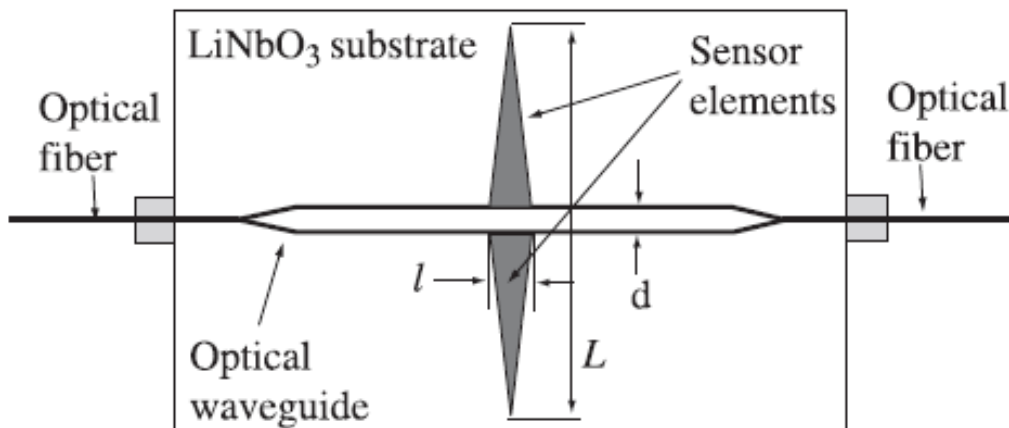
$$t = \frac{y - y'}{v_g} \quad y' = \frac{v_g}{4f_m}$$

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

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \int_0^L \Delta n k dy \\ &= \int_0^L \frac{\pi}{\lambda} n_e^3 r_{33} \frac{V_0 \sin(2\pi f_m t - y/v_m)}{d} \Gamma dy \\ &= \Delta\phi_0 \frac{1}{L} \int_0^L \sin(2\pi f_m t - y/v_m) dy \\ &= \Delta\phi_0 \frac{1}{L} \int_0^L \sin(2\pi f_m \frac{y - y'}{v_g} - y/v_m) dy \\ &= \Delta\phi_0 \frac{1}{L} \int_0^L \cos(2\pi f_m (\frac{1}{v_m} - \frac{1}{v_g}) y) dy \\ &= \Delta\phi_0 \text{sinc}\{2\pi f_m (\frac{1}{v_m} - \frac{1}{v_g}) L\} \end{aligned}$$

$v_m = v_g$: 速度整合 \Rightarrow 高感度化

アンテナによる高感度化



まとめ

- 光電界センサの基礎
 - 電気光学(EO)効果
 - 光学結晶、検出電界、光波電界の方向
 - 屈折率楕円体
 - センサの構成
 - 光回路
 - 高周波動作
 - DC～THz帯
 - アンテナ接続・集積化