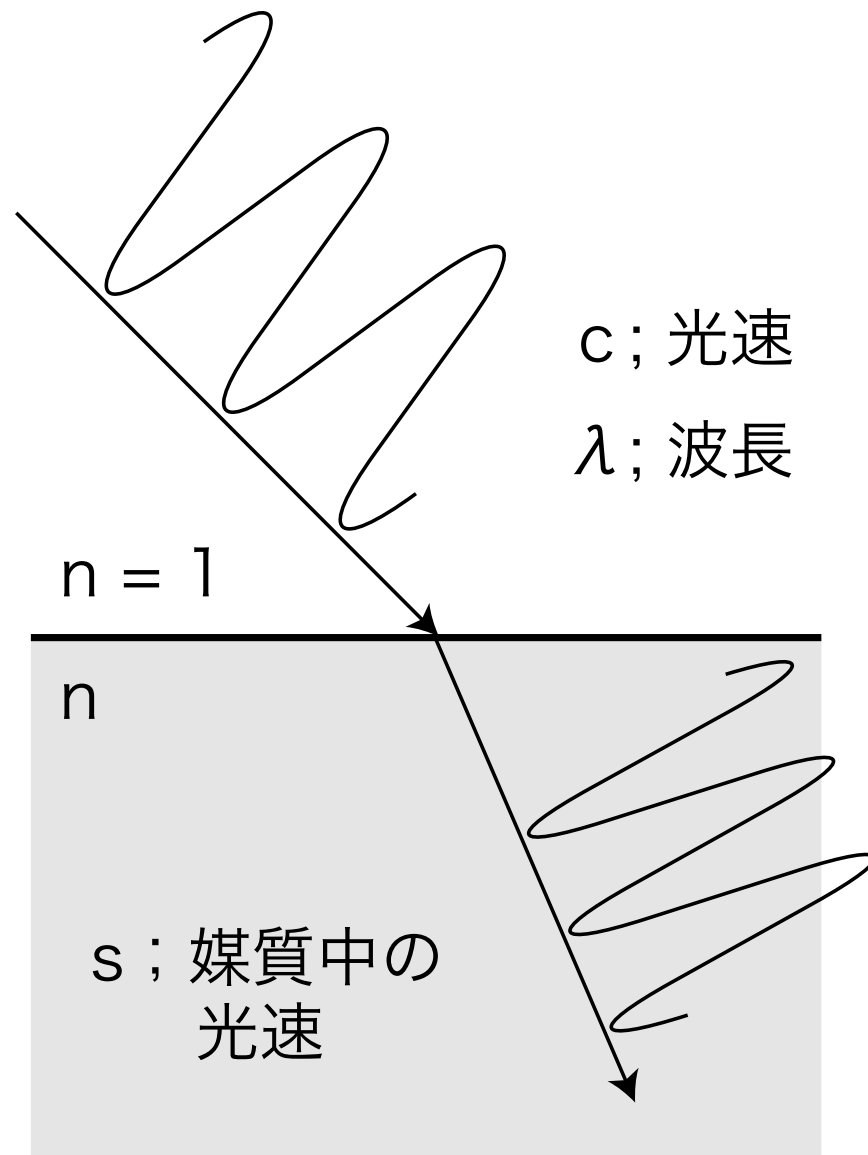


偏光解析 Ellipsometry

京都大学・材料工学専攻
杉村博之

光の屈折



$$\text{屈折率 } n = c/s$$

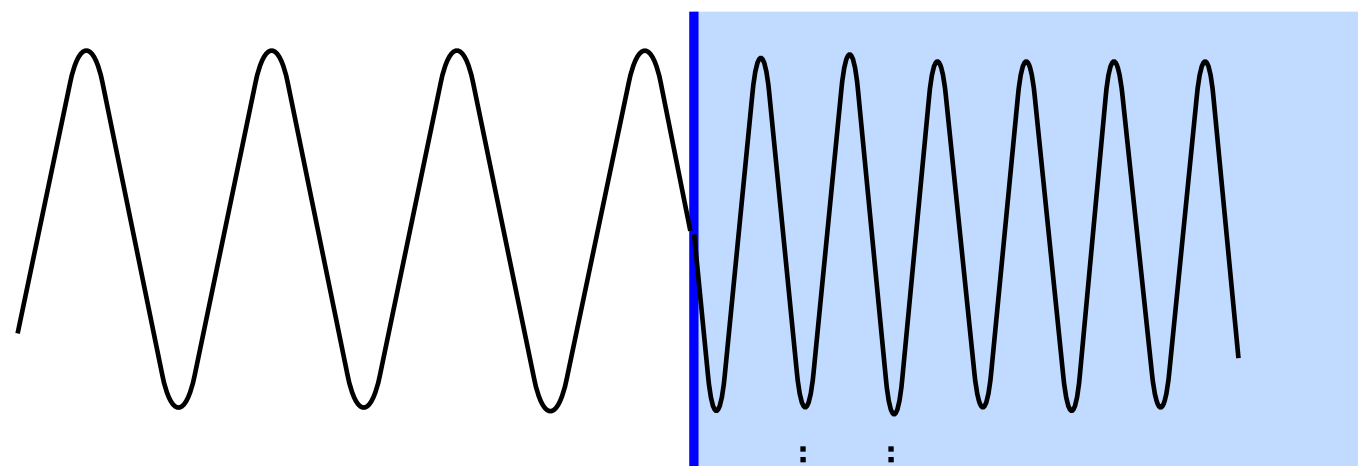
$n > 1$ の媒質中の光速は c より遅い.
波長は短く (λ/n) になる.

複素屈折率 $N = n - ik$

吸収媒体も含めた拡張された屈折率表現

n ; 屈折率 - refractive index

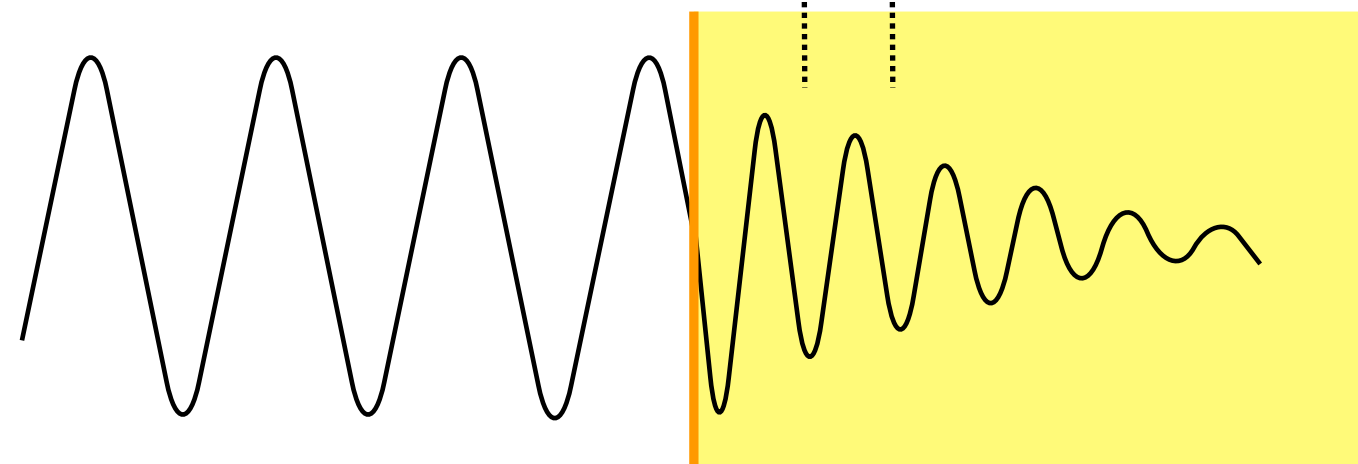
k ; 消衰係数 - extinction coefficient



$k = 0$ 透明媒体

$$A = A_0$$

λ/n



$k > 0$ 吸収媒体

$$A = A_0 \exp\left(-\frac{2\pi k}{\lambda} x\right)$$

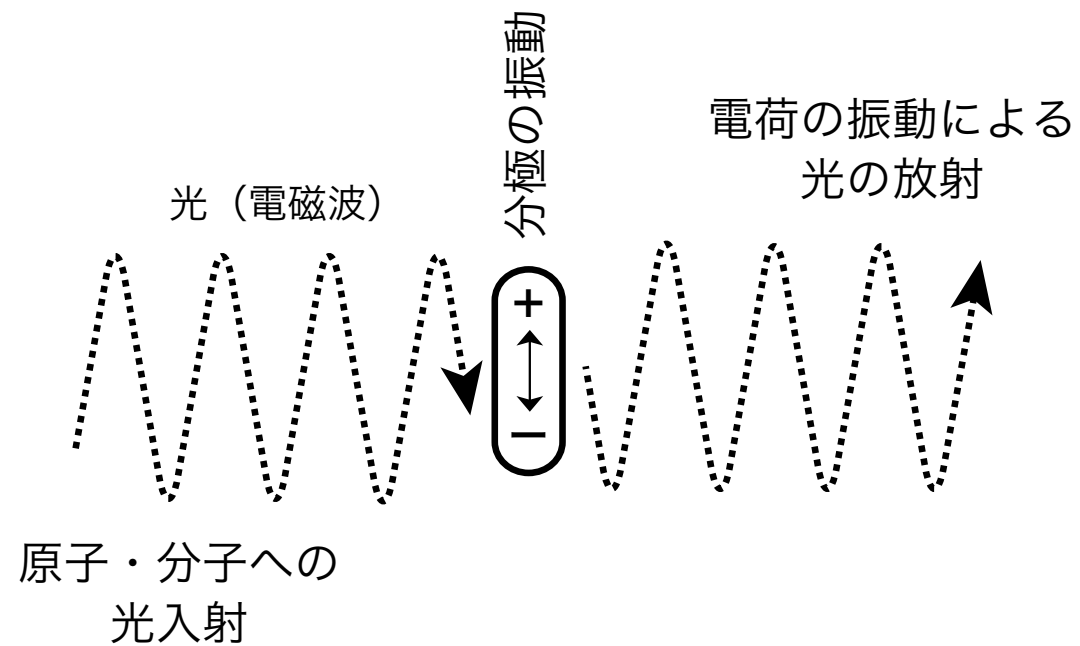
吸収係数 α と消衰係数 k の関係

光の強度 $I = |A|^2 = |A_0|^2 \exp\left(-\frac{4\pi k}{\lambda} x\right)$

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\alpha d)$$

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}$$

誘電体中の光の伝搬



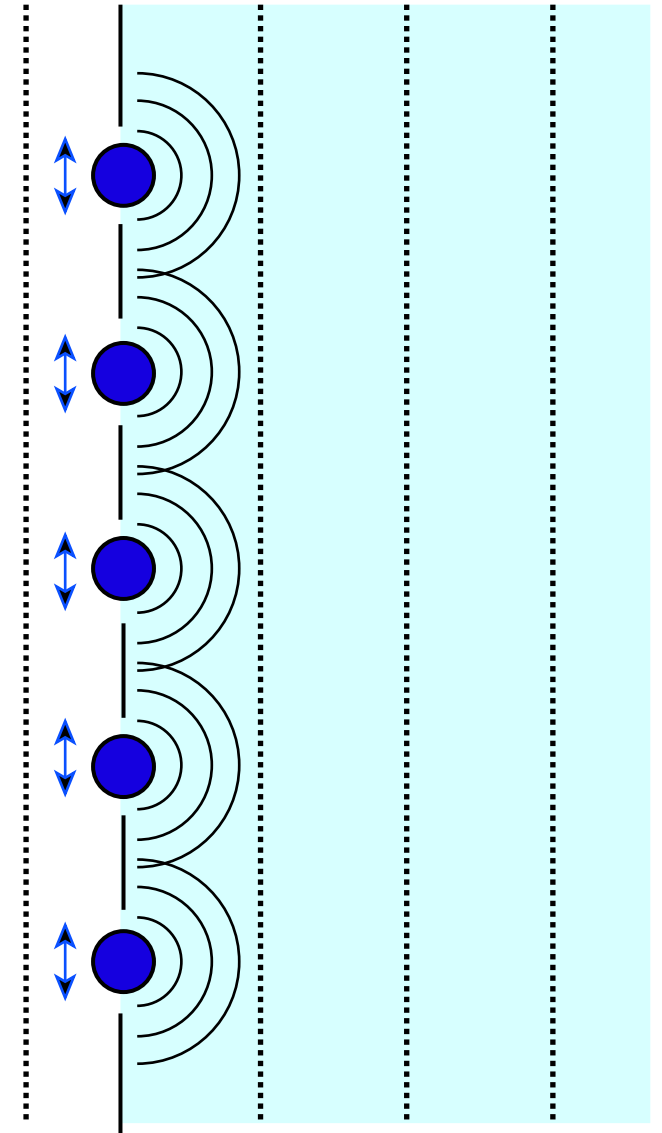
誘電率 ϵ $N^2 \equiv \epsilon$

$$\epsilon \equiv \epsilon_1 - i\epsilon_2$$

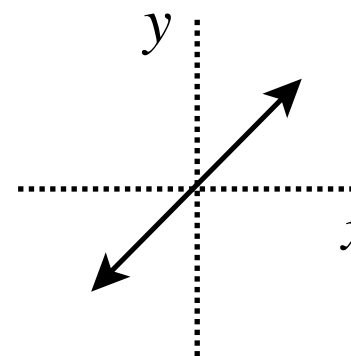
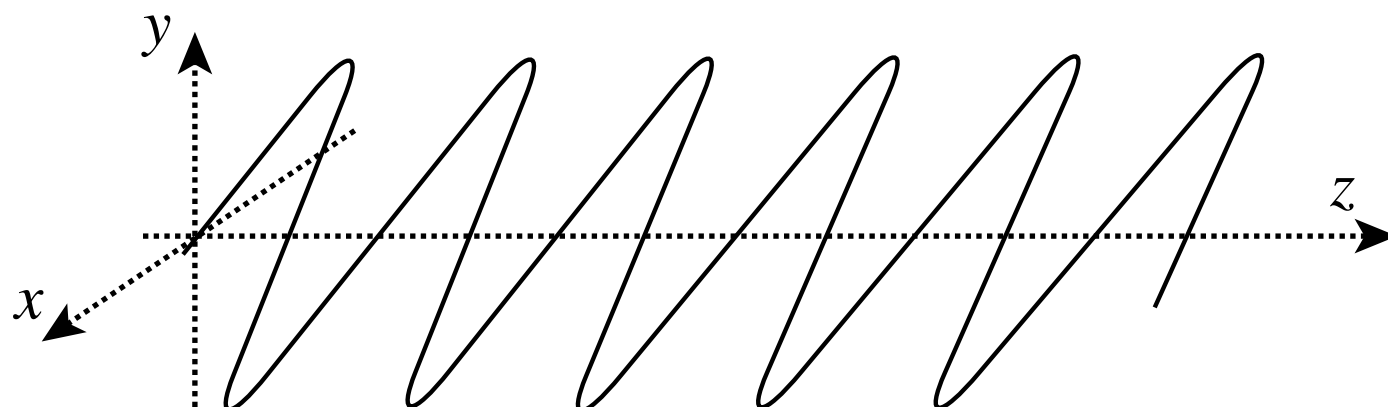
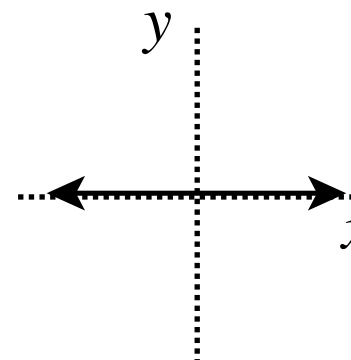
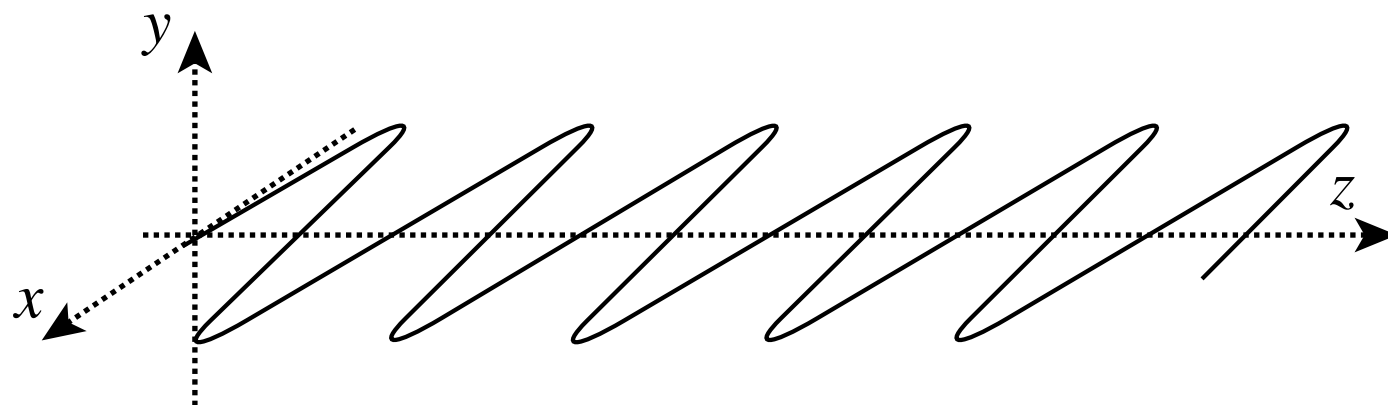
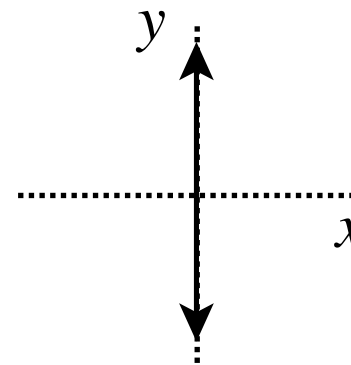
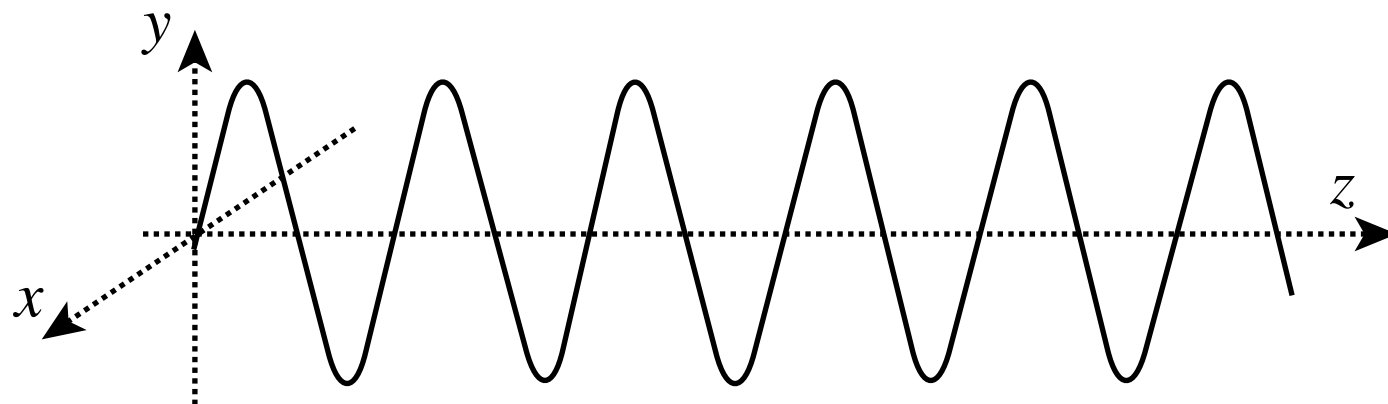
$$\epsilon_1 = n^2 - k^2$$

$$\epsilon_2 = 2nk$$

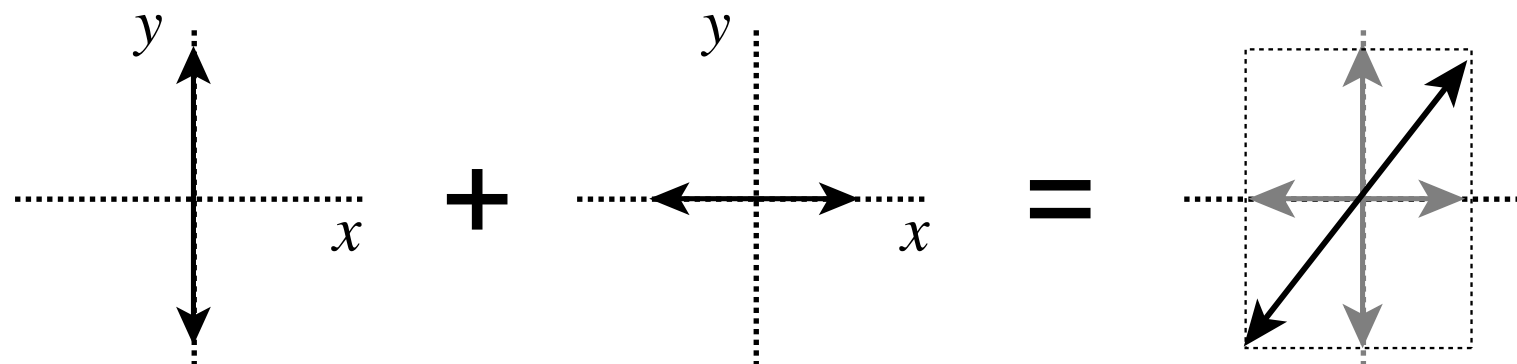
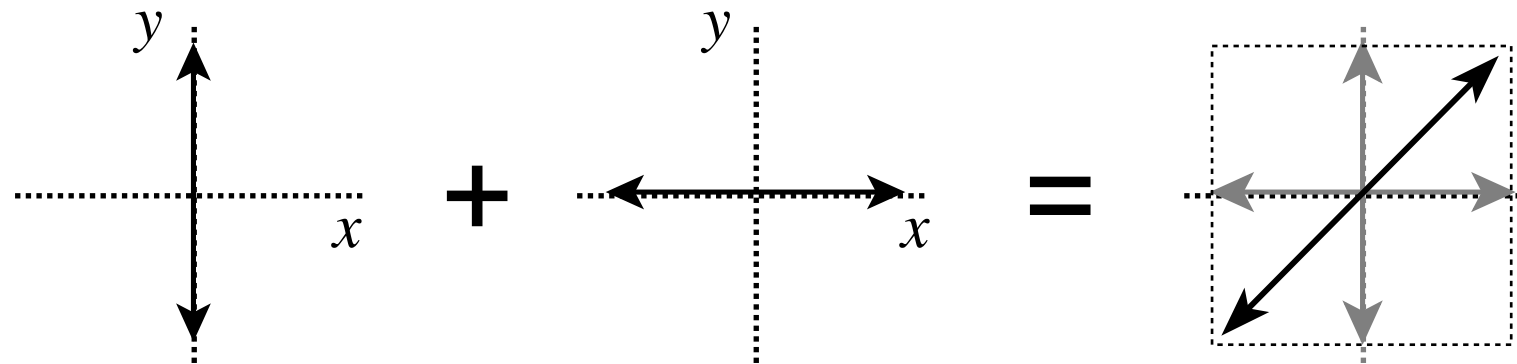
平面波



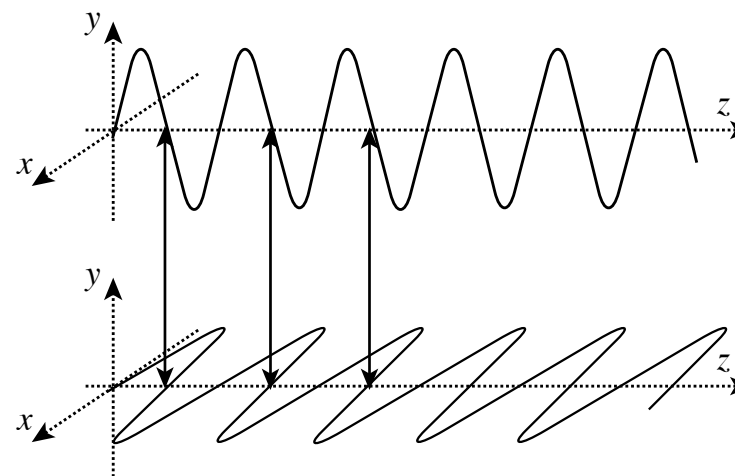
直線偏光



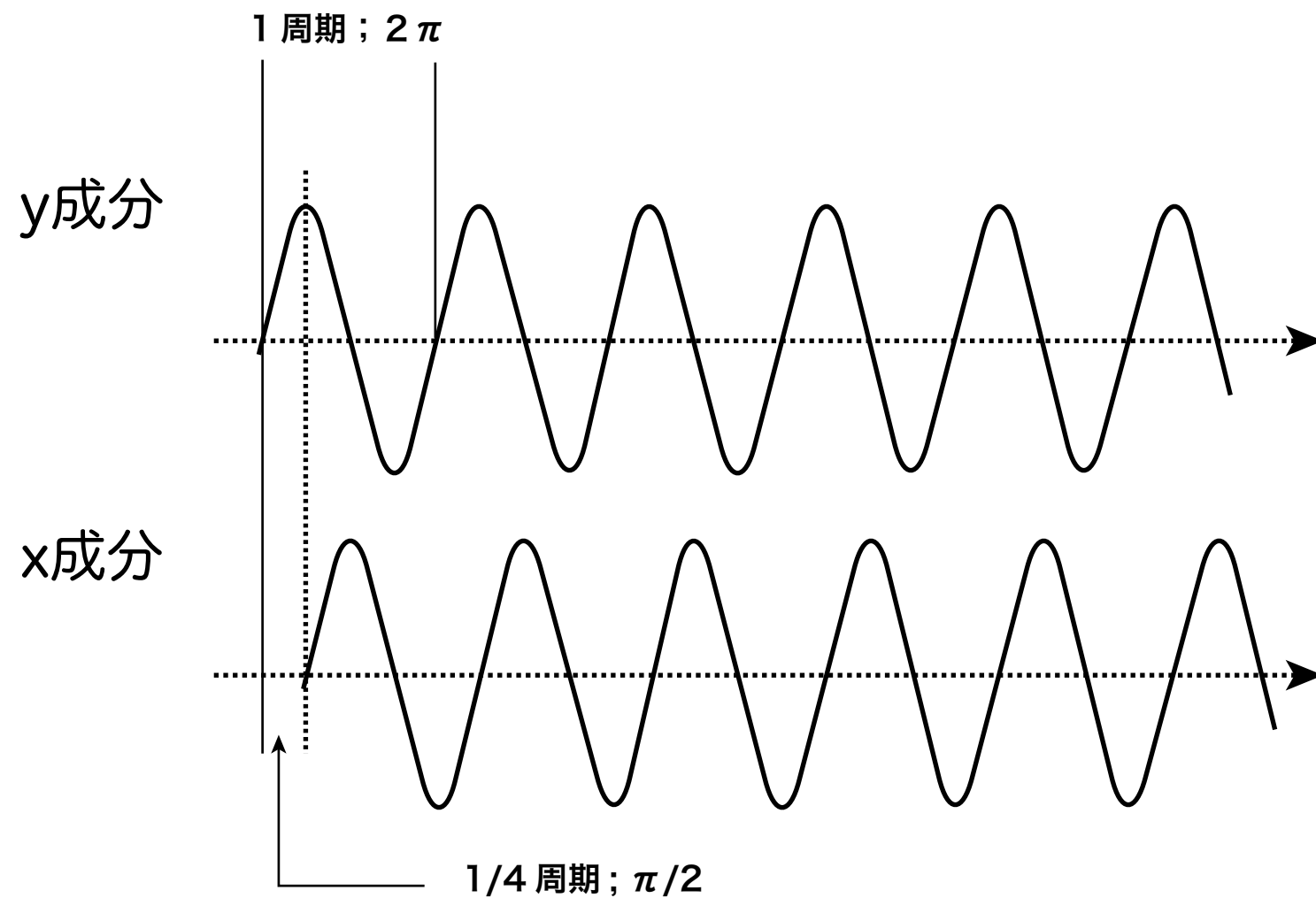
直線偏光の重ね合わせ 1



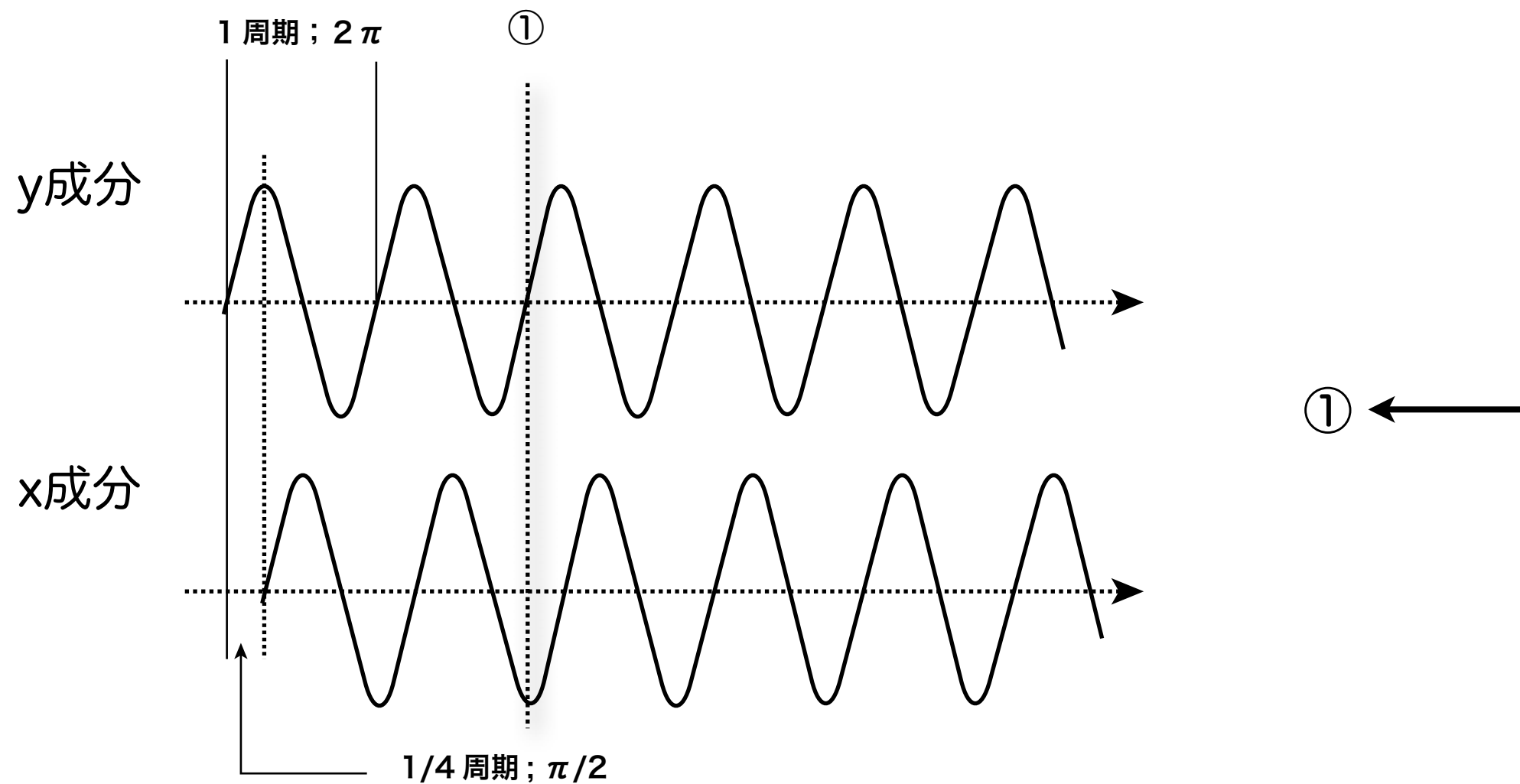
2つの偏光の位相が
同じ場合に成立



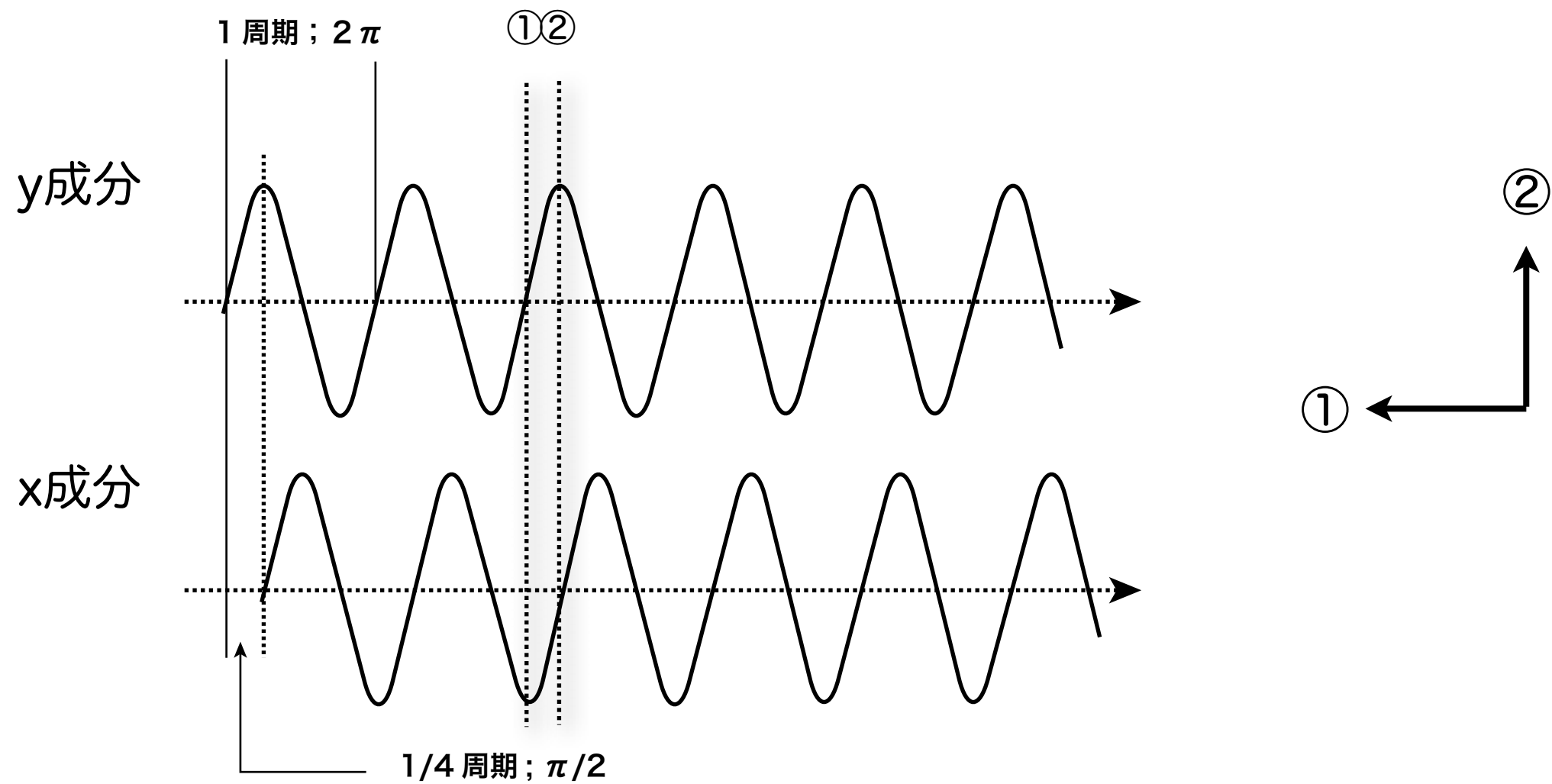
直線偏光の重ね合わせ 2



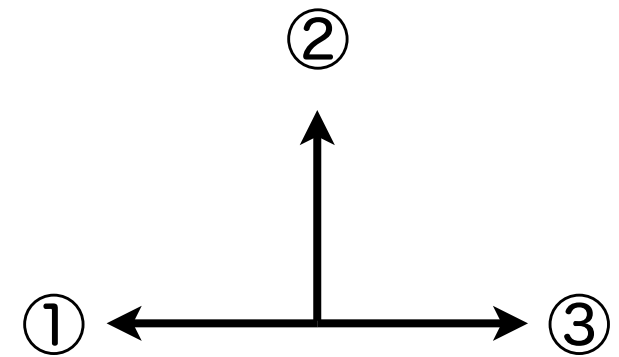
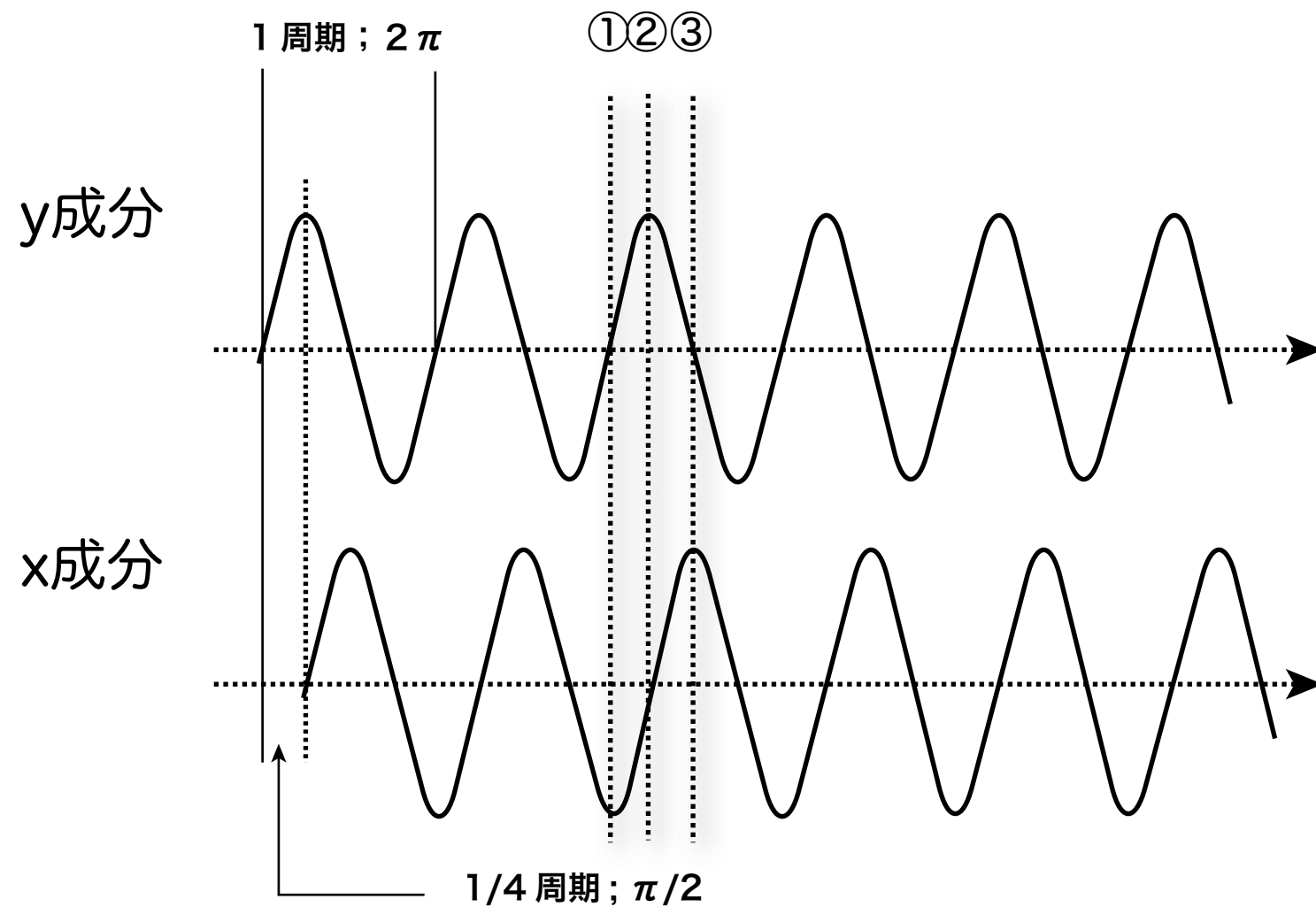
直線偏光の重ね合わせ 2



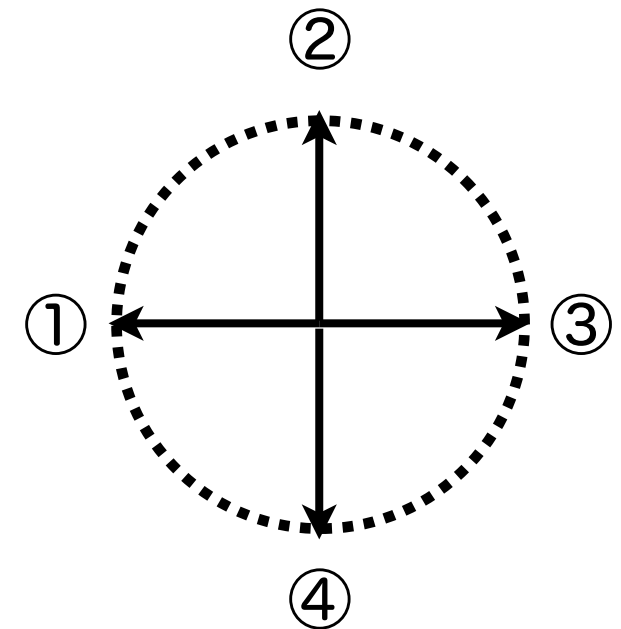
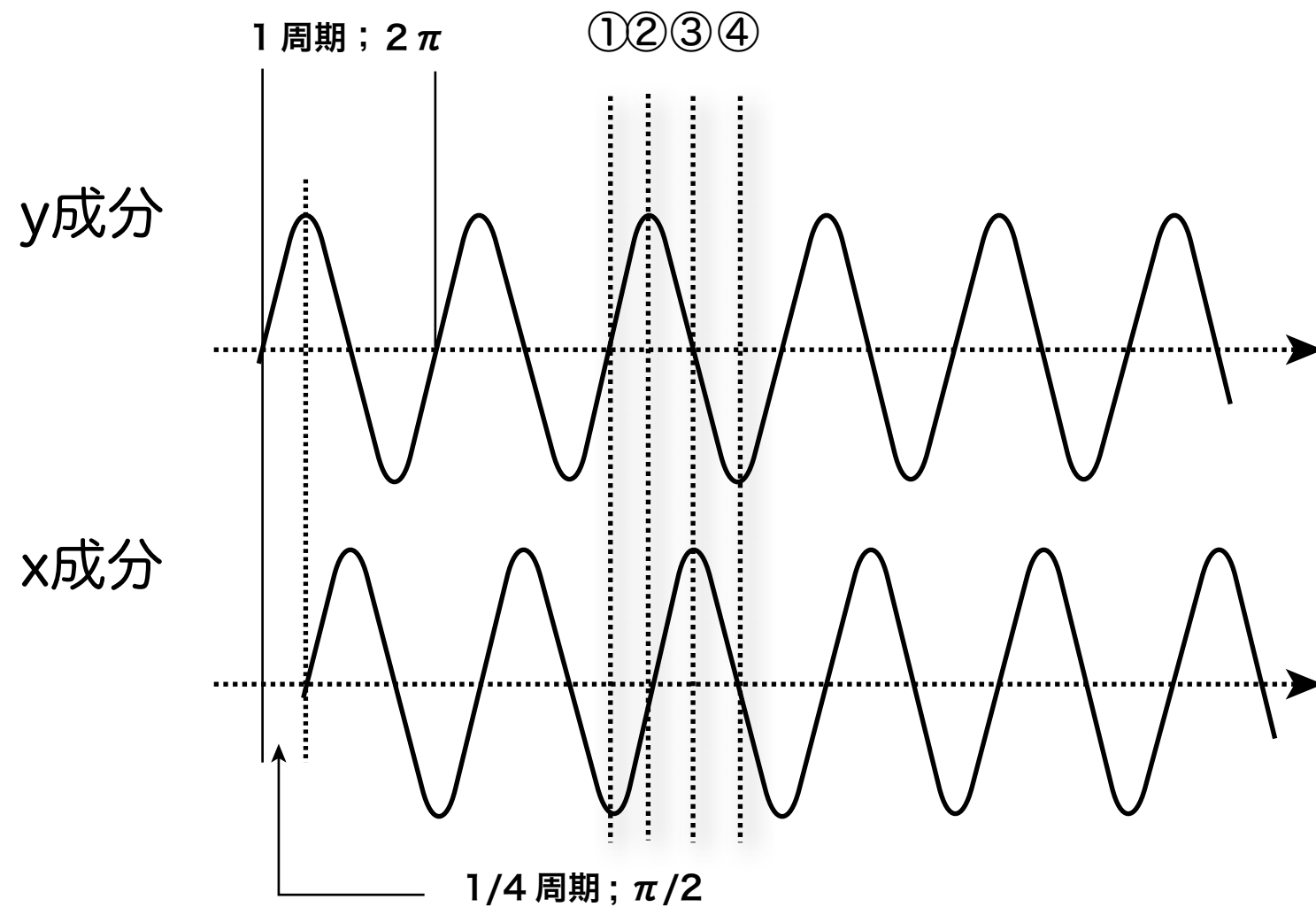
直線偏光の重ね合わせ 2



直線偏光の重ね合わせ 2

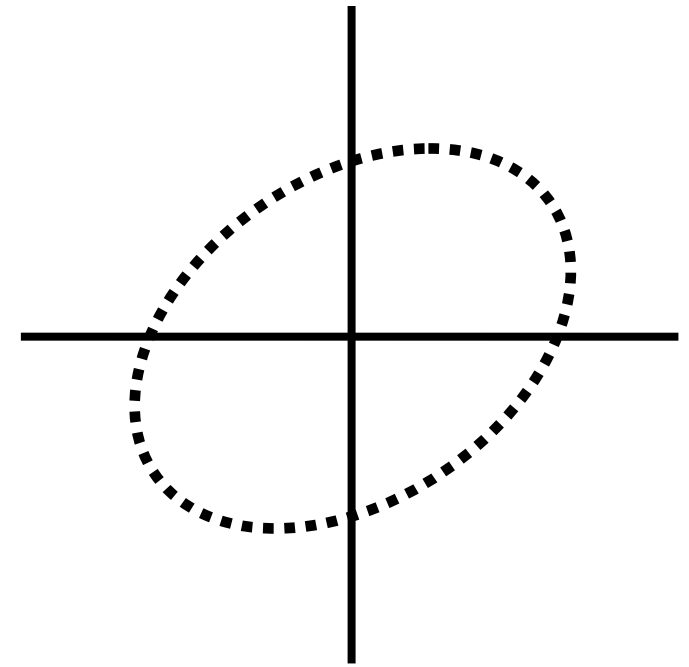
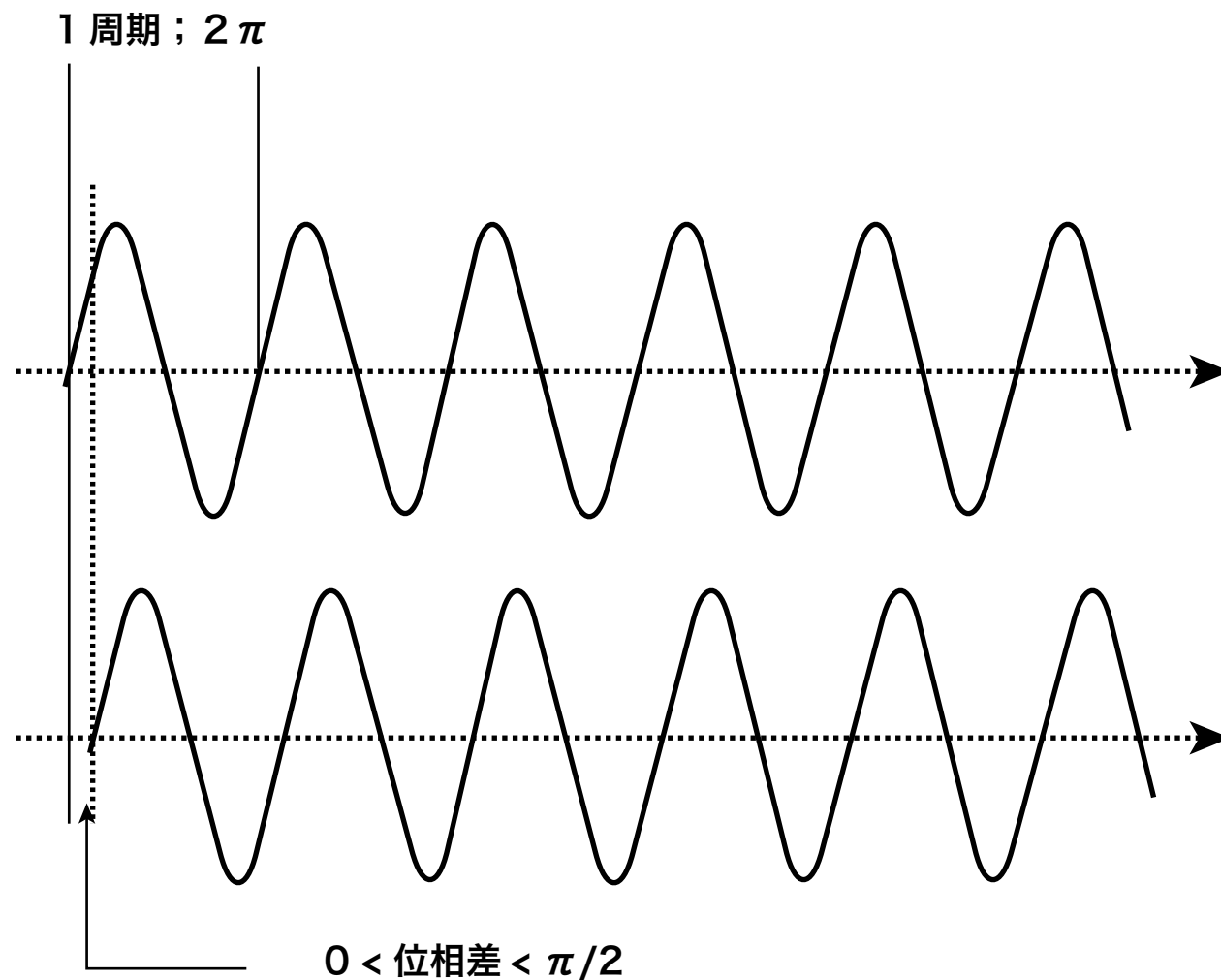


直線偏光の重ね合わせ 2



光の電場ベクトルが
円を描く ; 円偏光

直線偏光の重ね合わせ 3



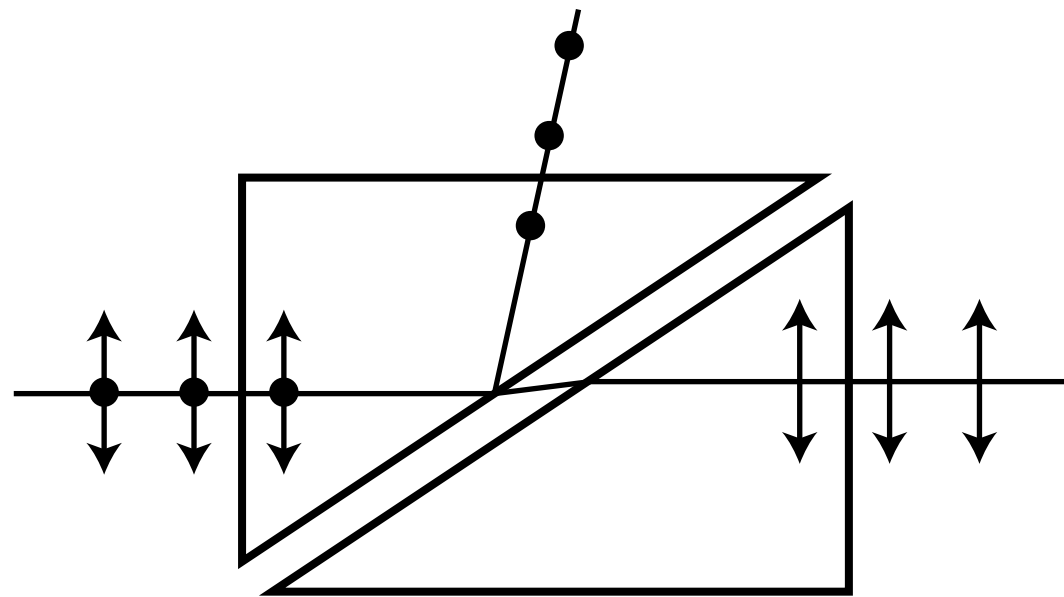
光の電場ベクトルが
楕円を描く ; 楕円偏光

elliptical polarization $\Rightarrow$ ellipsometer

偏光子・検光子

Polarizer/Analyzer

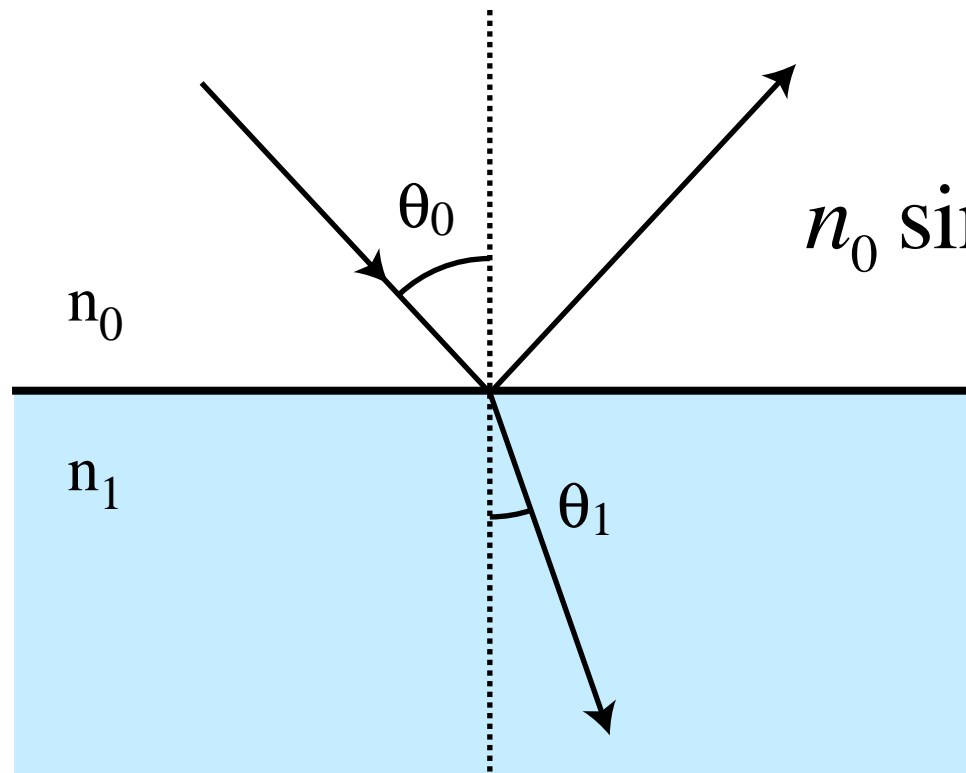
گران・テラー・プリズム



方解石

偏光方向で屈折率が異なる（複屈折）

スネルの法則 Snell's law



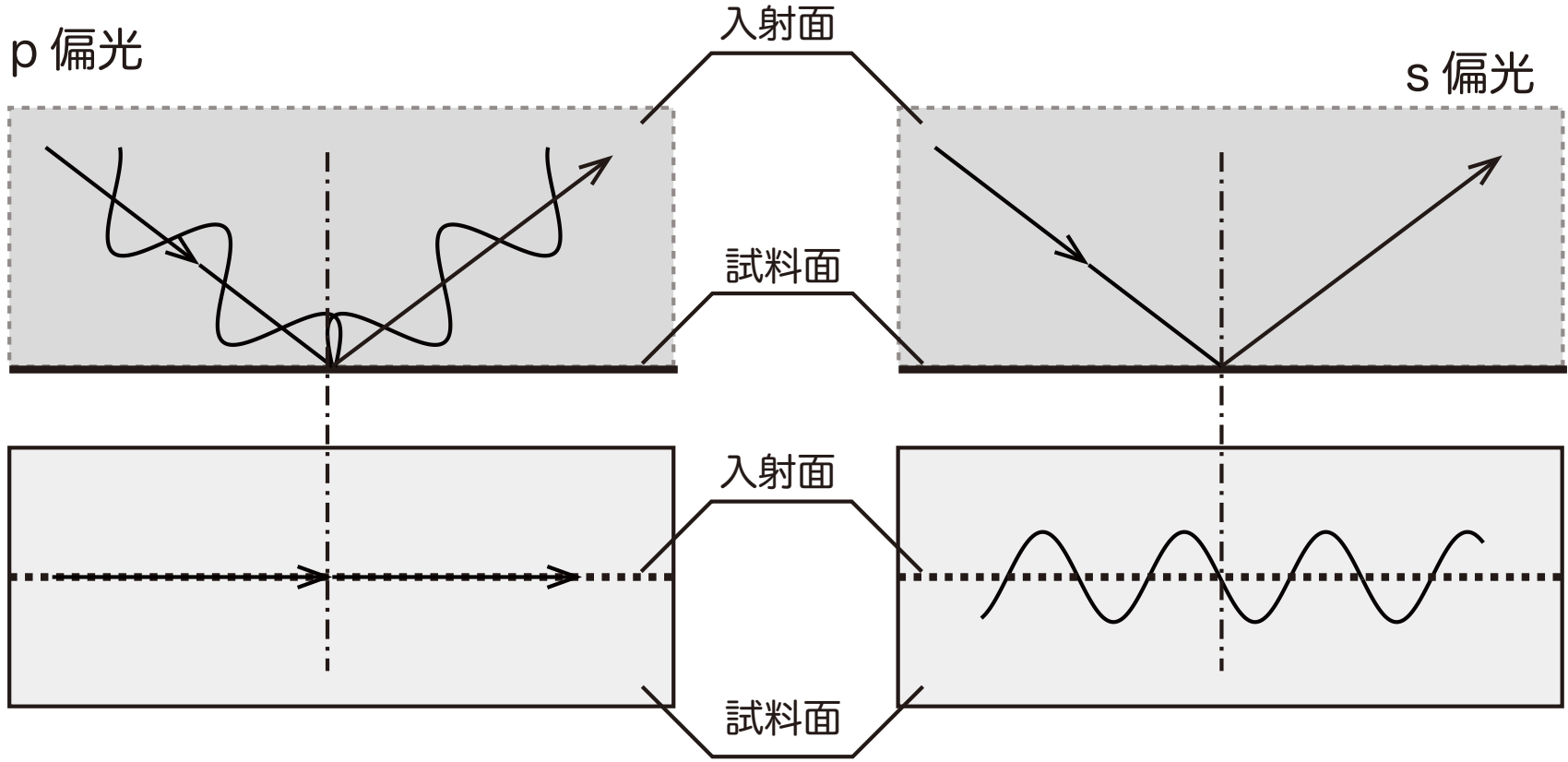
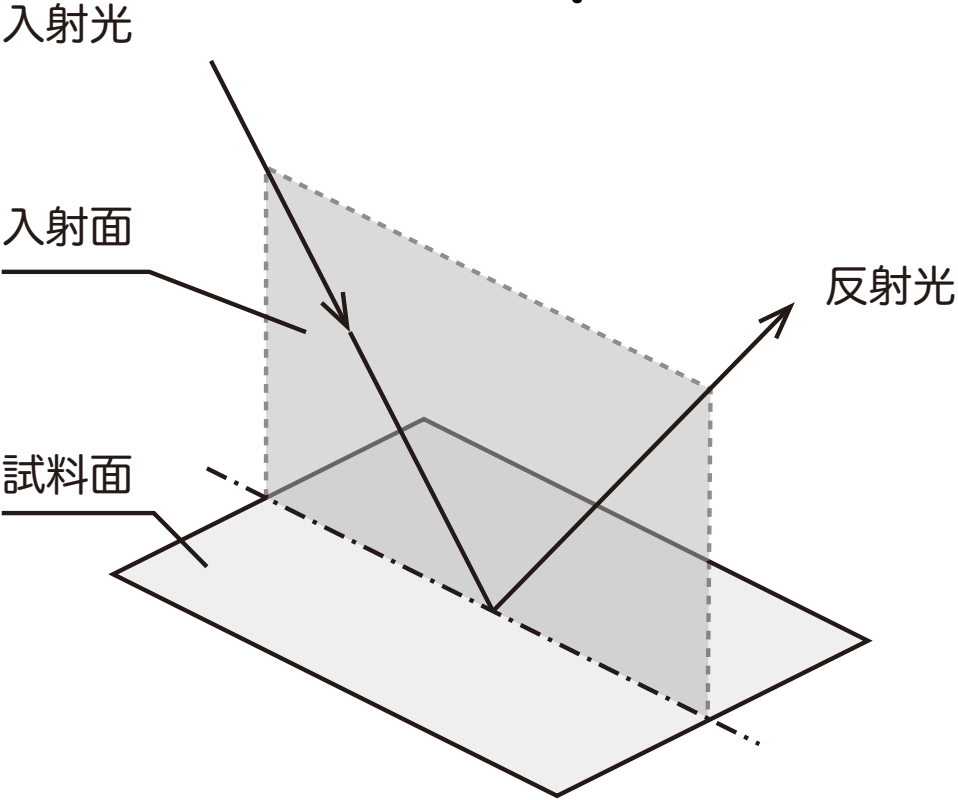
$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1$$

複素屈折率の場合

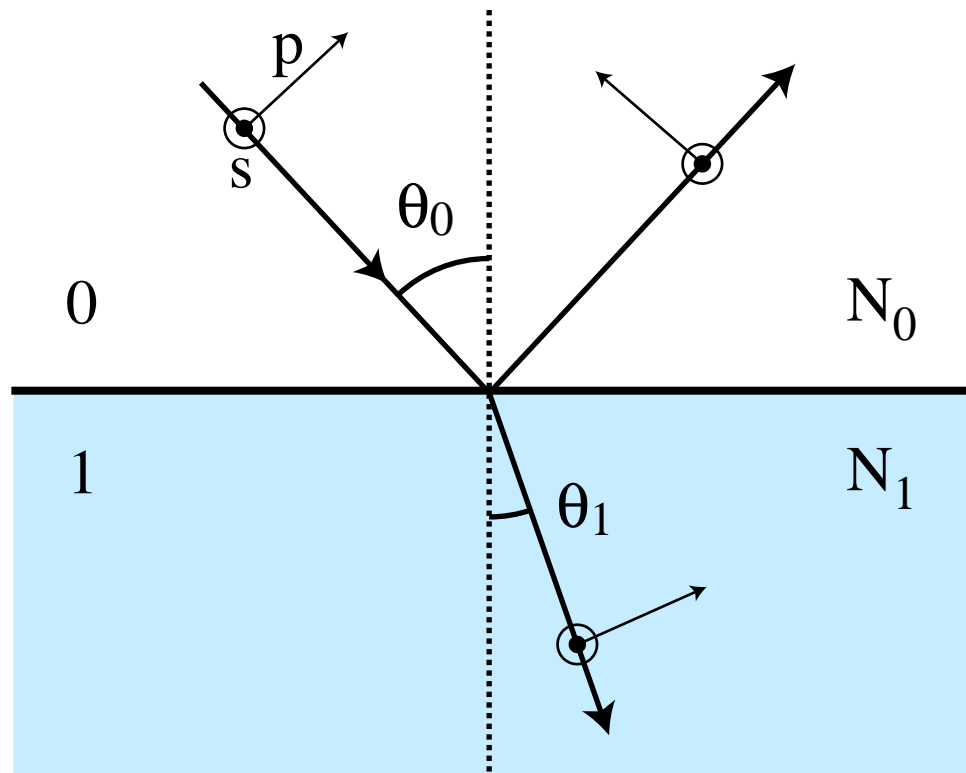
$$N_0 \sin \theta_0 = N_1 \sin \theta_1$$

入射角，屈折角を
複素数として扱う

p偏光とs偏光



界面での反射・透過・屈折



Snellの法則

$$N_0 \sin \theta_0 = N_1 \sin \theta_1$$

フレネル係数

$$r_p = \frac{N_1 \cos \theta_0 - N_0 \cos \theta_1}{N_1 \cos \theta_0 + N_0 \cos \theta_1}$$

$$r_s = \frac{N_0 \cos \theta_0 - N_1 \cos \theta_1}{N_0 \cos \theta_0 + N_1 \cos \theta_1}$$

$$t_p = \frac{2N_0 \cos \theta_0}{N_1 \cos \theta_0 + N_0 \cos \theta_1}$$

$$t_s = \frac{2N_0 \cos \theta_0}{N_0 \cos \theta_0 + N_1 \cos \theta_1}$$

p偏光, s偏光の
振幅反射率(r)と振幅透過率 (t)

フレネル係数

$$\begin{aligned}r_p &= \frac{N_1 \cos \theta_0 - N_0 \cos \theta_1}{N_1 \cos \theta_0 + N_0 \cos \theta_1} = \frac{\tan(\theta_0 - \theta_1)}{\tan(\theta_0 + \theta_1)} \\r_s &= \frac{N_0 \cos \theta_0 - N_1 \cos \theta_1}{N_0 \cos \theta_0 + N_1 \cos \theta_1} = \frac{-\sin(\theta_0 - \theta_1)}{\sin(\theta_0 + \theta_1)} \\t_p &= \frac{2N_0 \cos \theta_0}{N_1 \cos \theta_0 + N_0 \cos \theta_1} = \frac{2 \sin \theta_1 \cos \theta_0}{\sin(\theta_0 + \theta_1) \cos(\theta_0 - \theta_1)} \\t_s &= \frac{2N_0 \cos \theta_0}{N_0 \cos \theta_0 + N_1 \cos \theta_1} = \frac{2 \sin \theta_1 \cos \theta_0}{\sin(\theta_0 + \theta_1)}\end{aligned}$$

反射・透過光

の振幅

$$r_p = |r_p| e^{i\delta_{rp}}$$

$$r_s = |r_s| e^{i\delta_{rs}}$$

$$t_p = |t_p| e^{i\delta_{tp}}$$

$$t_s = |t_s| e^{i\delta_{ts}}$$

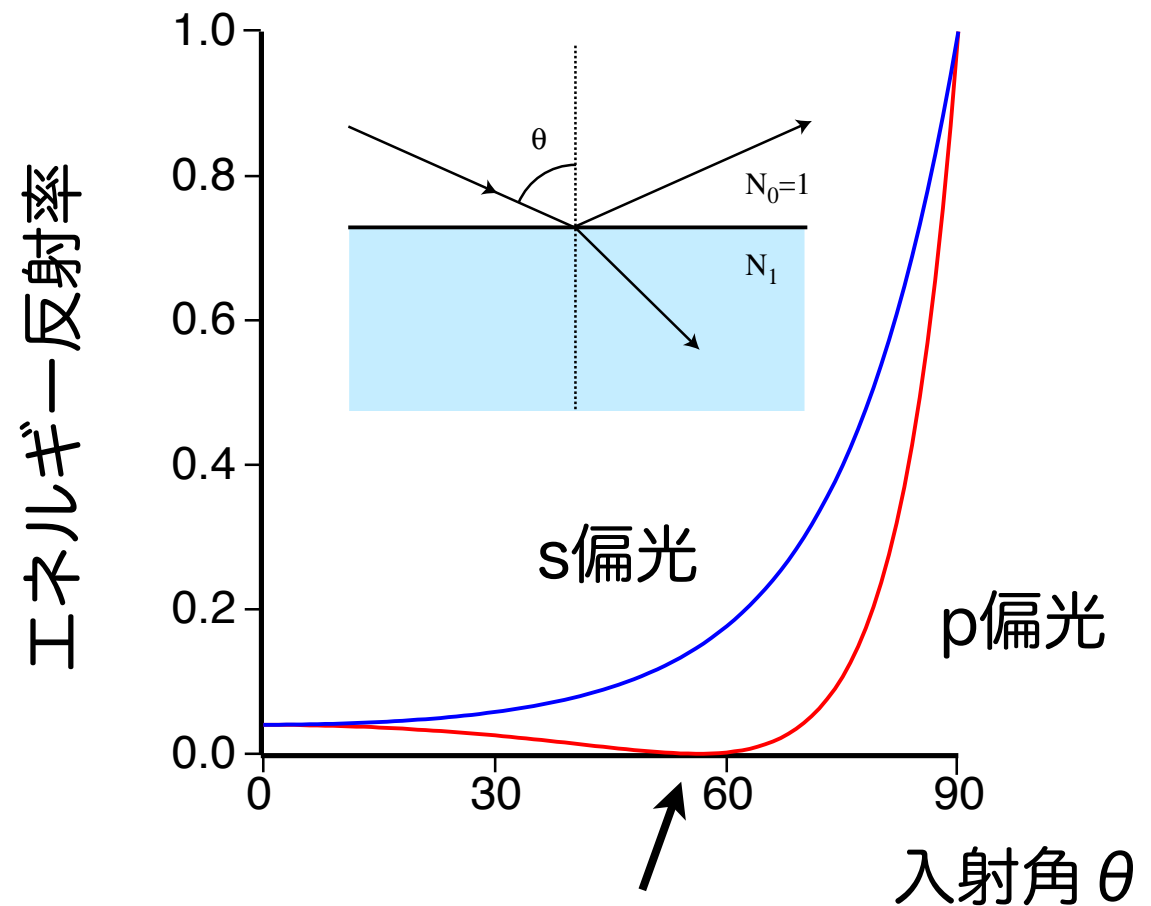
反射・屈折による
位相差

ブリュースター角

エネルギー反射率

$$R_p = |r_p|^2$$

$$R_s = |r_s|^2$$

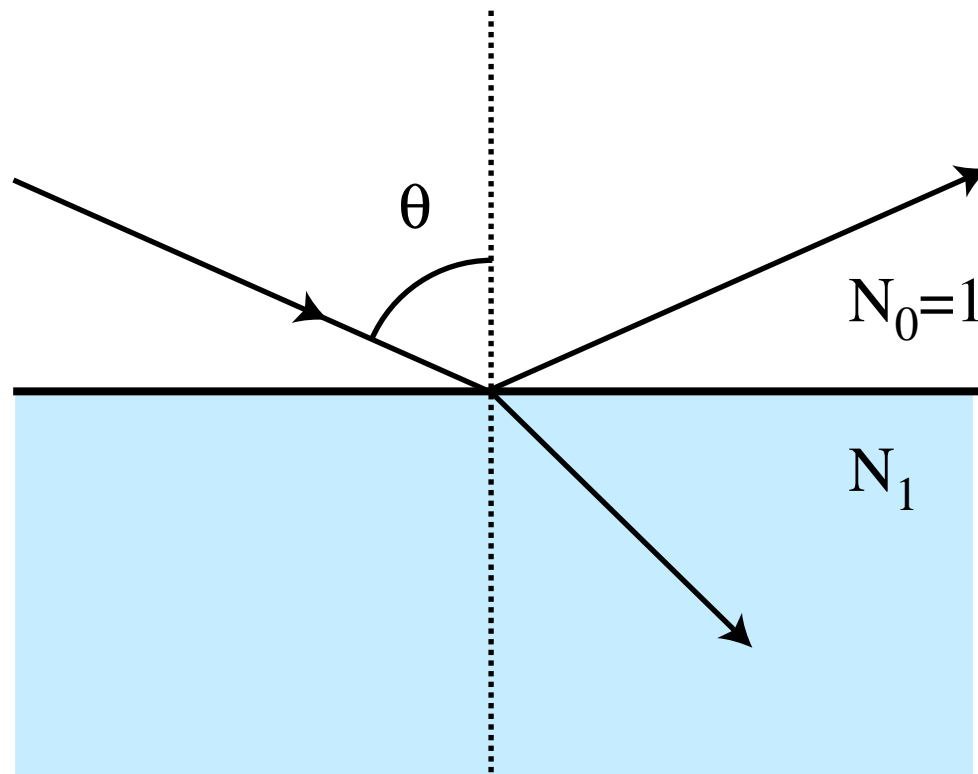


p偏光の反射率が極小になる
(ブリュースター角)

$n=1.5$ (glass) $\rightarrow 56^\circ$

$n=3.4$ (Si) $\rightarrow 74^\circ$

エリプソメーターの測定値 (Δ , ψ)



p偏光, s偏光の
振幅反射係数の比

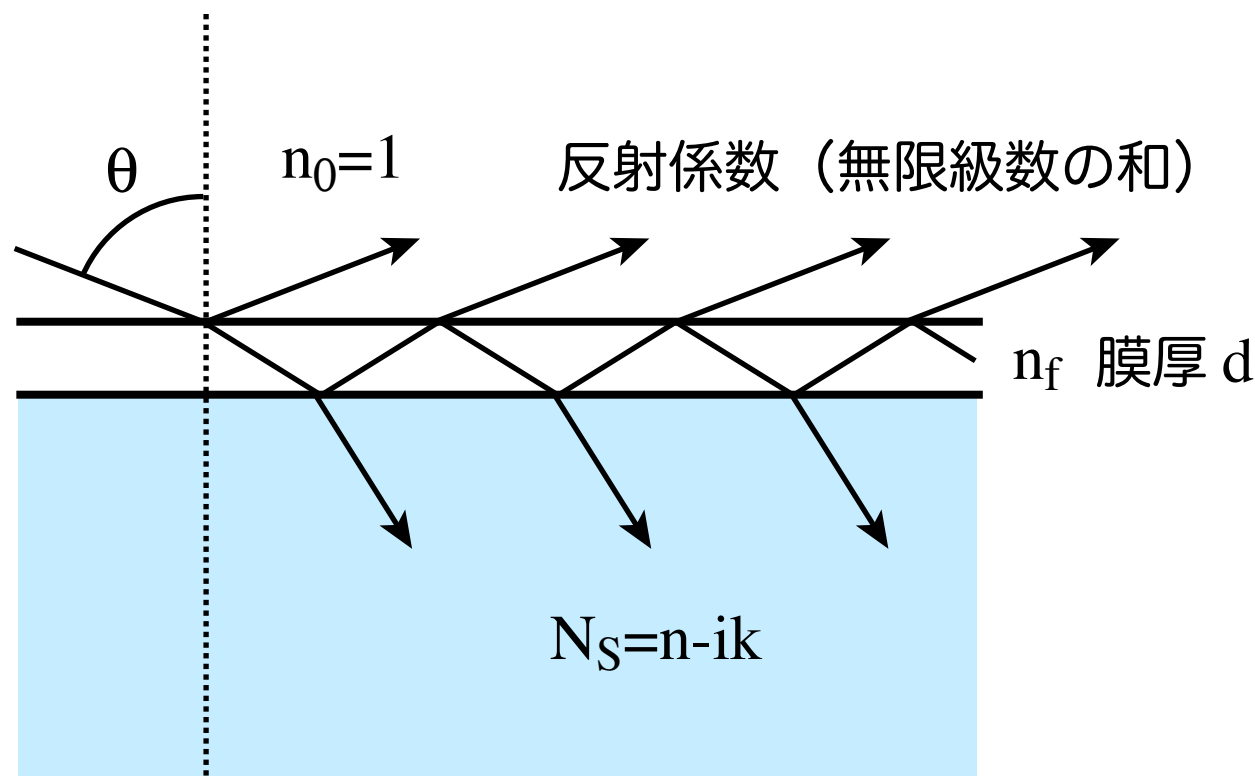
$$\rho \equiv \frac{r_p}{r_s} \equiv \tan \psi \exp(i\Delta)$$

$$\tan \psi = |r_p| / |r_s|$$

$$\Delta = \delta_{rp} - \delta_{rs}$$

- ・ 測定値 $\Delta \cdot \psi$ から、媒質の屈折率 $n \cdot k$ が求まる.
- ・ 入射角をブリュースター角近辺にすると感度が高くなる.

薄膜の偏光解析



測定値

Δ , ψ の 2 変数

透明膜の場合

θ , λ , $N_s \rightarrow$ 既知

d , $n_f \rightarrow$ 未知数

吸収膜の場合

θ , λ , $N_s \rightarrow$ 既知

d , n_f , $k_f \rightarrow$ 未知数

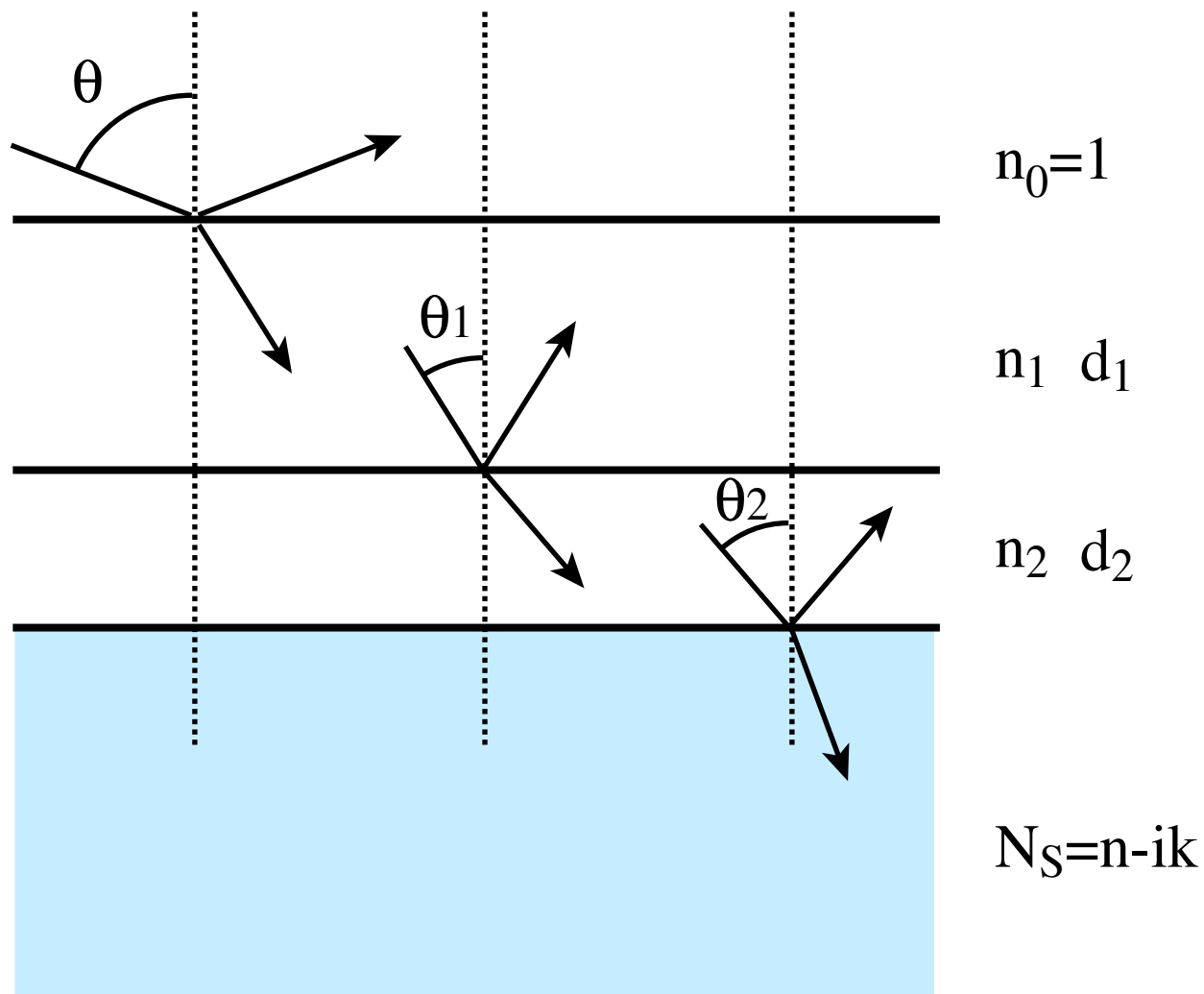
空気-薄膜界面のフレネル係数
薄膜-基板界面のフレネル係数
各界面での屈折角 (スネルの法則)



試料トータルの反射係数を導出
反射係数から $\Delta \cdot \psi$ を導出
(入射角, 屈折率, 膜厚の関数)

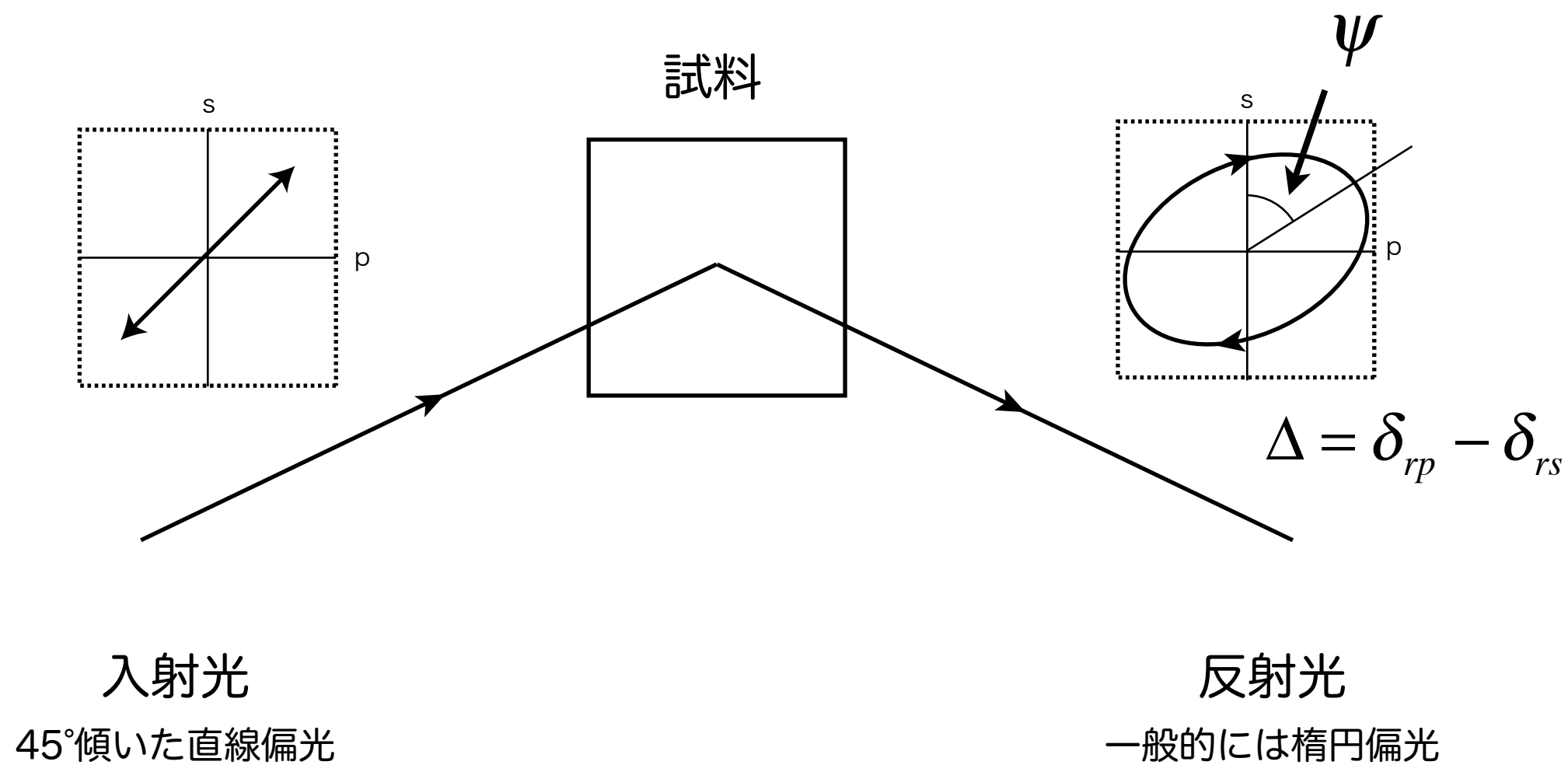
多層膜の偏光解析

平行平板積層モデル



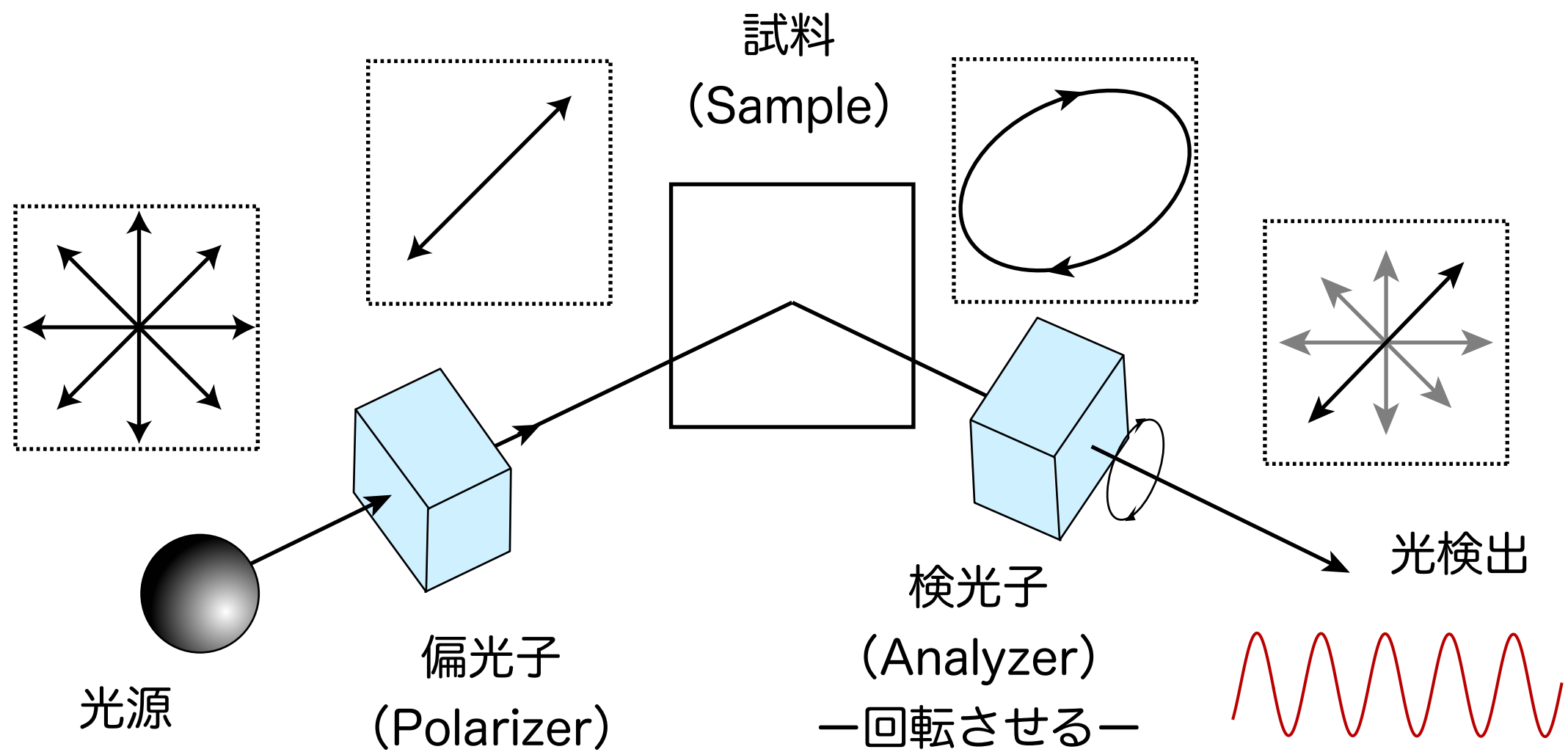
各界面のフレネル係数を導出
トータルの反射係数を導出
 $\Delta \cdot \psi$ を導出

偏光反射率測定



回転検光子法

PSA配置



偏光解析；Ellipsometry

サンプルの光学モデル

平行平板一積層

屈折率； $n-ik$

屈折率と膜厚； n_f, d_f

測定；

測定値； Δ, ψ

測定パラメーター； λ, θ

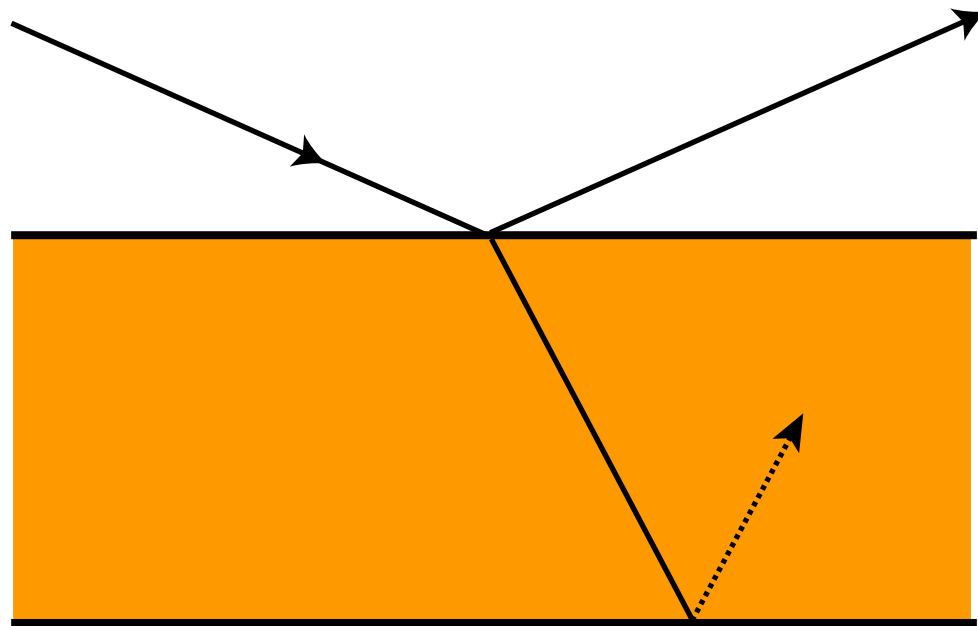
光学モデルから Δ, ψ を計算

フィッティング

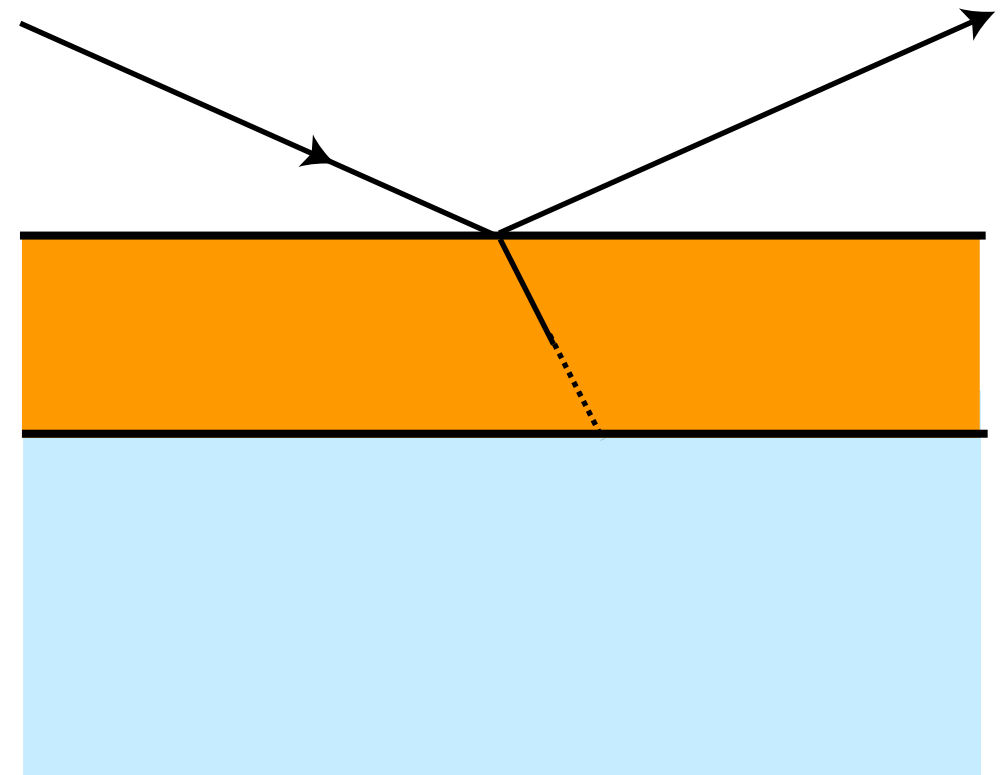
どの物性値を未知数にするか？

基板の複素屈折率を求める

- ・ 測定値 $\Delta \cdot \psi$ から、媒質の屈折率 $n \cdot k$ が求まる

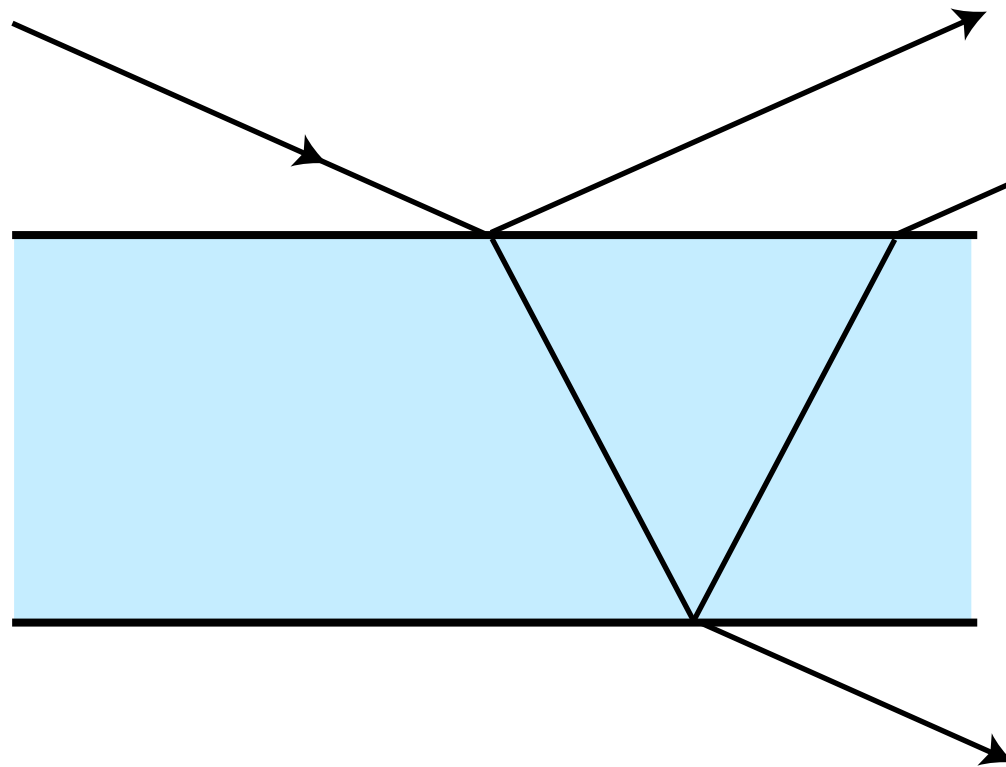


裏面からの反射光が表面に出ないこと

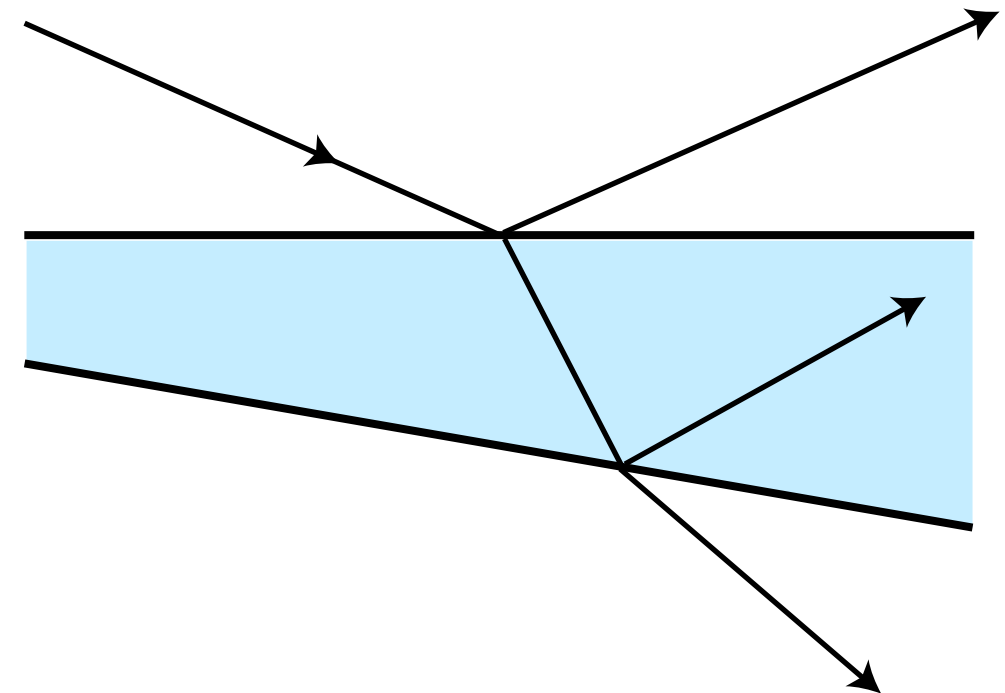


吸収の大きい金属等は、薄膜でもバルクの屈折率が測定できる。

透明基板の測定



板厚を十分厚く



基板を楔型に

裏面からの反射光が検出器に入らないよう工夫する

試料の光学モデル

基板は透明か吸収体か？

薄膜は何層あるか？

透明膜か吸収膜か？

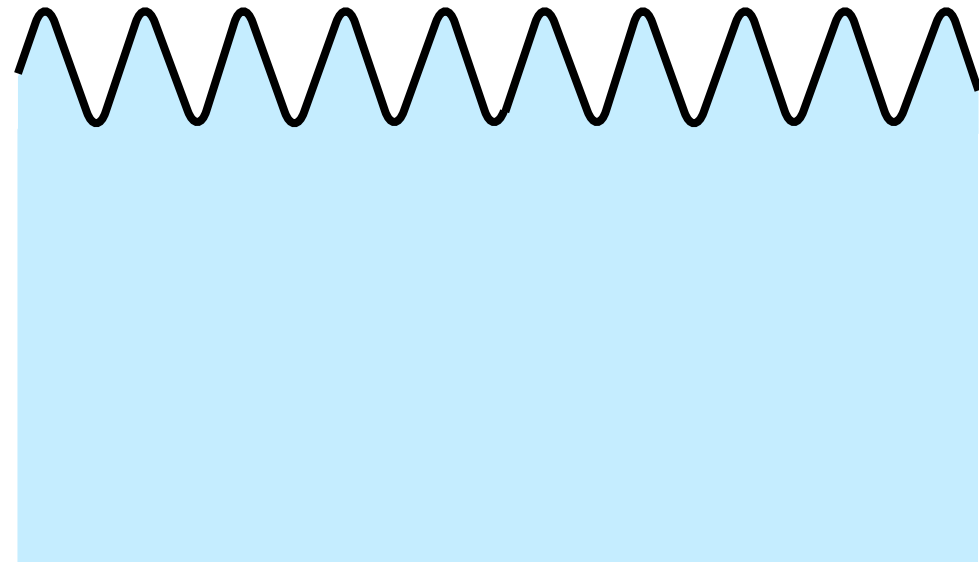
表面あらさ・界面粗さは考慮するか？

立てる光学モデルによって、
測定条件や解析方法が変わる。

単層膜モデル

表面ラフネス層

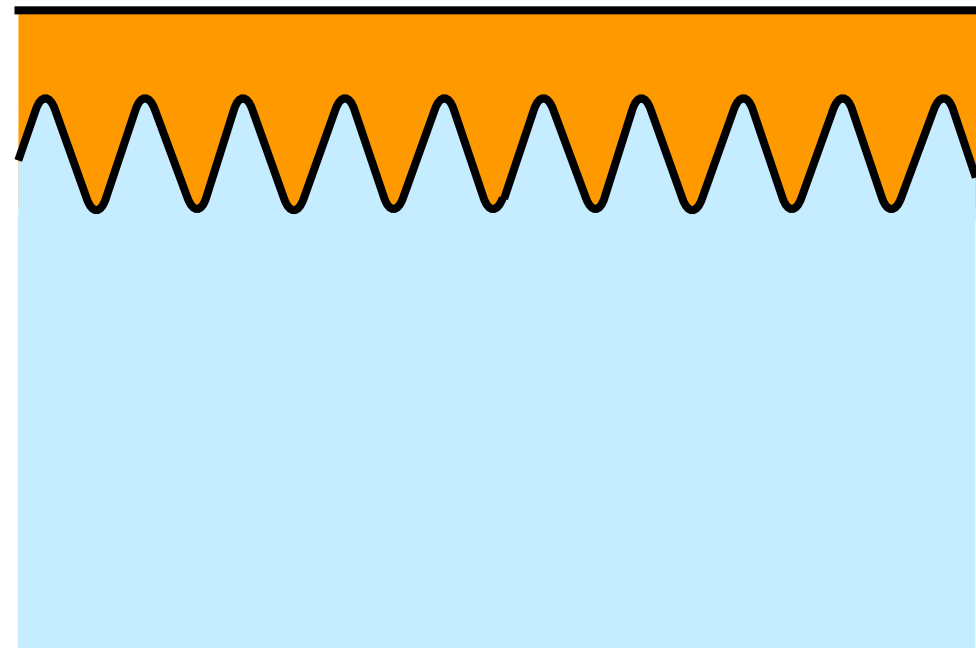
基板より屈折率の低い薄膜として解析



2層膜モデル

界面ラフネス層

基板と膜の中間の屈折率として解析



単分子膜および関連試料の偏光解析

金-チオール系；

単層膜モデル／Au-SAM

シリコン-有機シラン系；

2層膜モデル／Si-SiO₂-SAM

シリコン直接接合型；

単層膜モデル／Si-SAM

水素終端化Si；

表面ラフネスモデル

膜厚<10nmの場合、屈折率と膜厚の両方を精度良く求めるのは難しい

SAMは通常透明膜として扱い、その屈折率には、

1) SiO₂, 2) ポリエチレン, 3) モデル式

を使用する.

例えば、Cauchyの式

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \dots, \quad k = 0$$

偏光解析により求めた単分子膜厚

- ・モデルに基づく光学膜厚
- ・屈折率や中間層膜厚もモデル化

分子の長さから想定される膜厚と矛盾は無いか？

他の測定結果と矛盾は無いか？

- ・ X線の干渉による測定（低角入射反射率測定）
- ・ AFMによる段差測定
- ・ XPSやIRからの吸着量の推定

分光エリプソメトリーの長所

①スペクトルデータの測定

②多点測定による

フィッティング精度の向上