

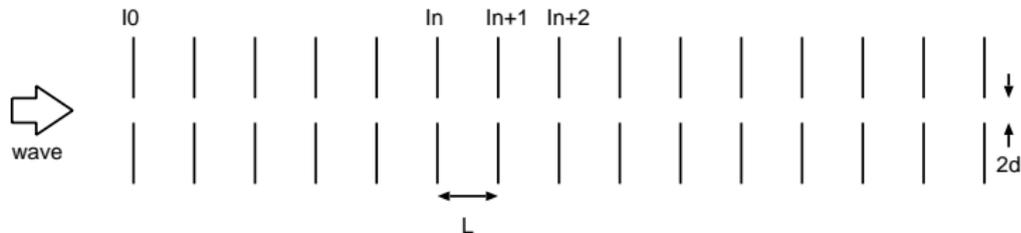
ピンホール列による光のガイド

電気通信大学レーザー新世代研究センター

森永 実

27pEE-8 2013-03-27 日本物理学会@広島大学

幾何光学的には無意味な構造



波動として扱うと？

$$I_{n+1} = \left\{ 1 - \beta \left(\frac{\lambda L}{d^2} \right)^{\frac{3}{2}} \right\} I_n$$

単位長さ当たりの損失は \sqrt{L} に比例。

ピンホール間隔を $1/4$ にすると単位長さ当たりの損失は半分になる。

ピンホール列の中の伝播

概要

損失の見積り

実験

実験 0

実験 1

ビーム断面

ビームの偏向

集光

まとめ

appendix

伝播過程は2つに分けられる:

- ① 隣り合うピンホール間の自由な伝播

$$T_L = \int_{-\infty}^{\infty} dk |k\rangle e^{ik_z L} \langle k| = e^{i\phi_0} \int_{-\infty}^{\infty} dk |k\rangle e^{-i\alpha k^2} \langle k|$$

$$k_0^2 = k_z^2 + k^2 \rightarrow k_z \sim k_0 - \frac{k^2}{2k_0} \rightarrow \alpha = \frac{L}{2k_0}$$

- ② ピンホールを通るときにマスクされる (完全吸収体)

$$(T_M \psi)(x) = \begin{cases} \psi(x) & |x| < d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

- ピンホール一つ分 (長さ L) の伝播: $T \equiv T_M T_L$
- n 個のピンホールの通り抜け: T^n
- T の固有値と固有状態を見つければよい

横モード展開

(波はスカラーとして扱う)
スリット直後の波動関数

- 開口の外では 0
- スリットの縁で 0 となるような \sin / \cos 関数で展開できる:

$$\psi_n(x) = \begin{cases} c_0 \cos k_n x & (n : \text{even}) \\ c_0 \sin k_n x & (n : \text{odd}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (-d \leq x \leq d)$$

$$k_n = \frac{n+1}{2d} \pi \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{d}}: \text{normalization constant}$$

(ψ_n は「箱に閉じ込められた粒子」の
エネルギー固有関数)

- T の行列要素 $T_{nm} = \langle \psi_n | T | \psi_m \rangle$ を評価

Tの固有状態と固有値

概要

損失の見積り

実験

実験 0

実験 1

ビーム断面

ビームの偏向

集光

まとめ

appendix

無次元パラメータ $\frac{\lambda L}{d^2} \ll 1$ のとき

- 対角要素の差: $O\left(\frac{\lambda L}{d^2}\right)$
- 非対角要素: $O\left(\frac{\lambda L}{d^2}\right)^{1.5}$

$\frac{\lambda L}{d^2} \rightarrow 0$ のとき

- ψ_n は固有状態になる
- T_{nn} は固有値になる

伝播行列 T の漸近形

概要

損失の見積り

実験

実験 0

実験 1

ビーム断面

ビームの偏向

集光

まとめ

appendix

$$\begin{aligned}
 T_{mn} = & \delta_{mn} \exp\left(-i \frac{(m+1)^2 \pi^2 L}{8 kd^2}\right) \\
 & + \frac{1+(-1)^{m+n}}{2} (m+1)(n+1) \frac{\pi^{\frac{3}{2}}}{12} \left(\frac{L}{kd^2}\right)^{\frac{3}{2}} (-1-i) \\
 & + O\left(\left(\frac{L}{kd^2}\right)^2\right)
 \end{aligned}$$

スリット1つ分 (長さ L) 伝播したときの振幅損失:

$$1 - |T_{mm}| = (m+1)^2 \frac{\pi^{\frac{3}{2}}}{12} \left(\frac{L}{kd^2}\right)^{\frac{3}{2}} + O\left(\left(\frac{L}{kd^2}\right)^2\right)$$

概要

損失の見積り

実験

実験 0

実験 1

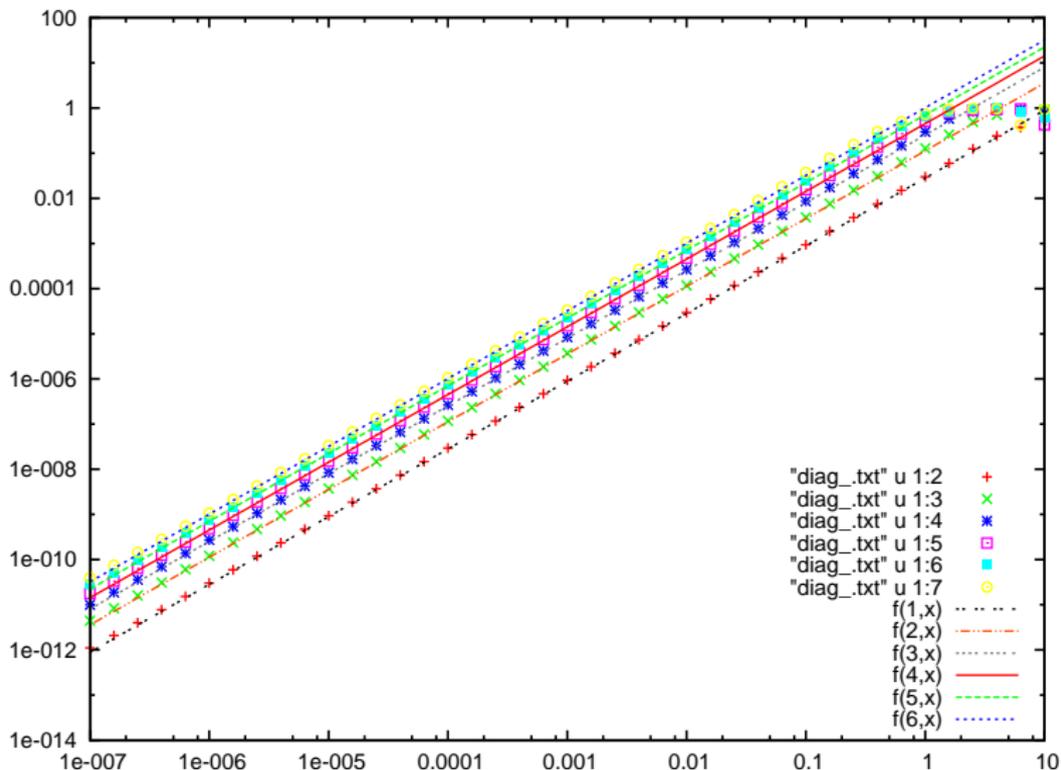
ビーム断面

ビームの偏向

集光

まとめ

appendix



off diagonal elements v.s. difference of the diagonal elements of \mathbf{T}

概要

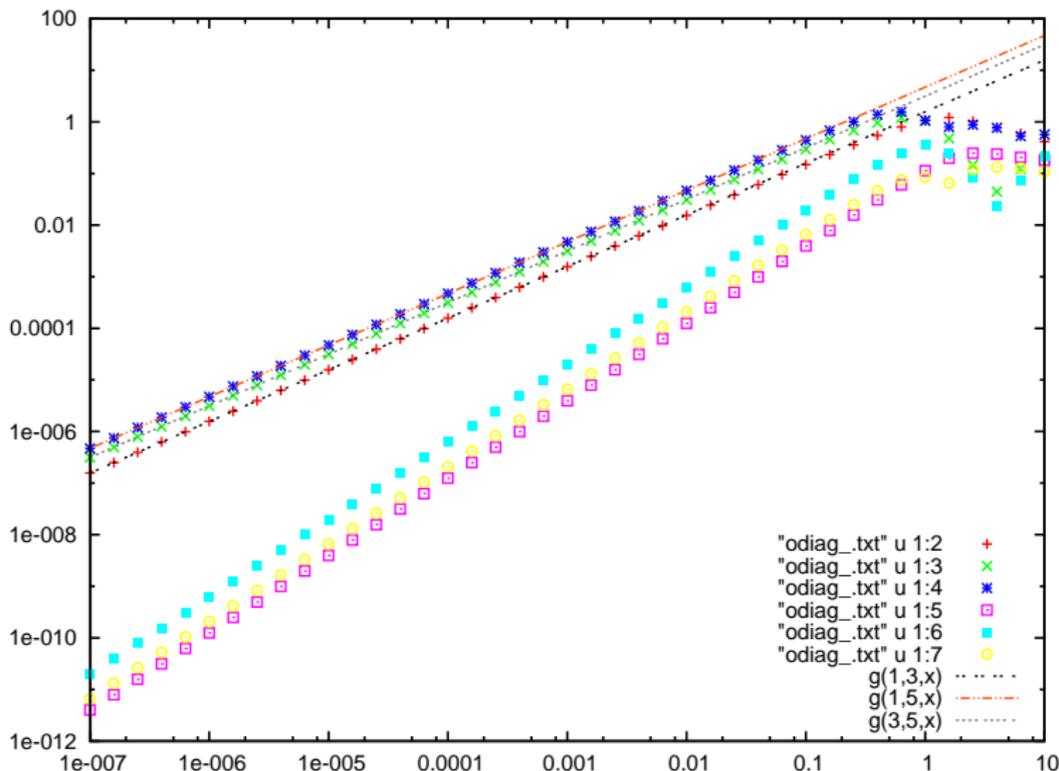
損失の見積り

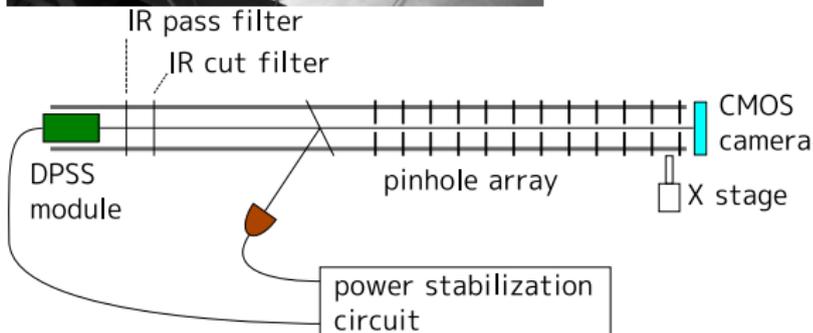
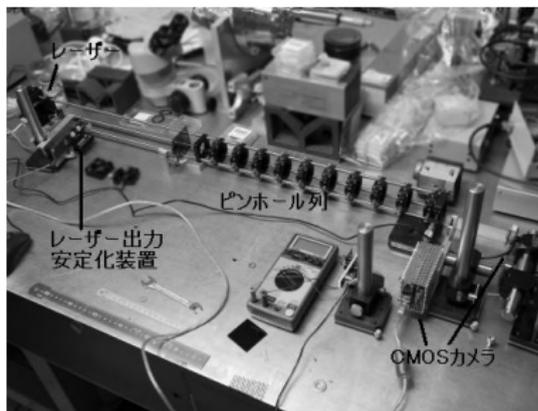
実験

- 実験 0
- 実験 1
- ビーム断面
- ビームの偏向
- 集光

まとめ

appendix

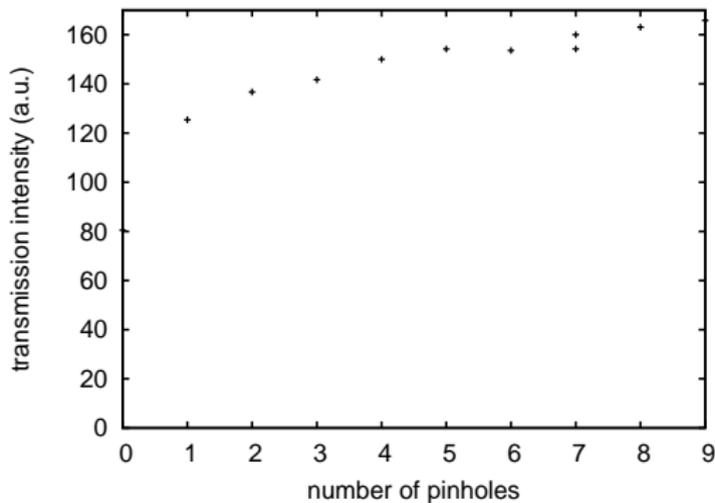
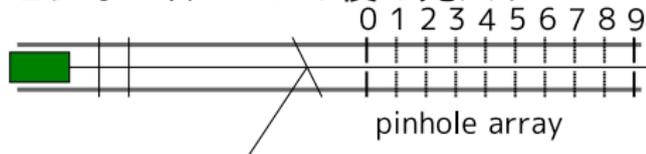




$\lambda = 1064\text{nm}, 532\text{nm}$

最初のピンホール入射する光は平面波とみなせる

ピンホール no.9 の後の光パワー



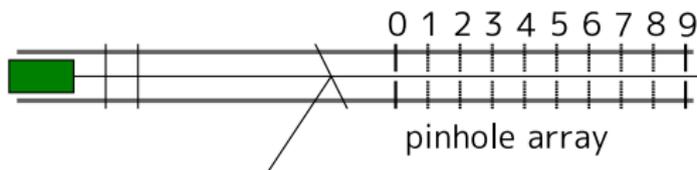
$$\lambda = 532\text{nm}$$

$$\phi = 0.5\text{mm}$$

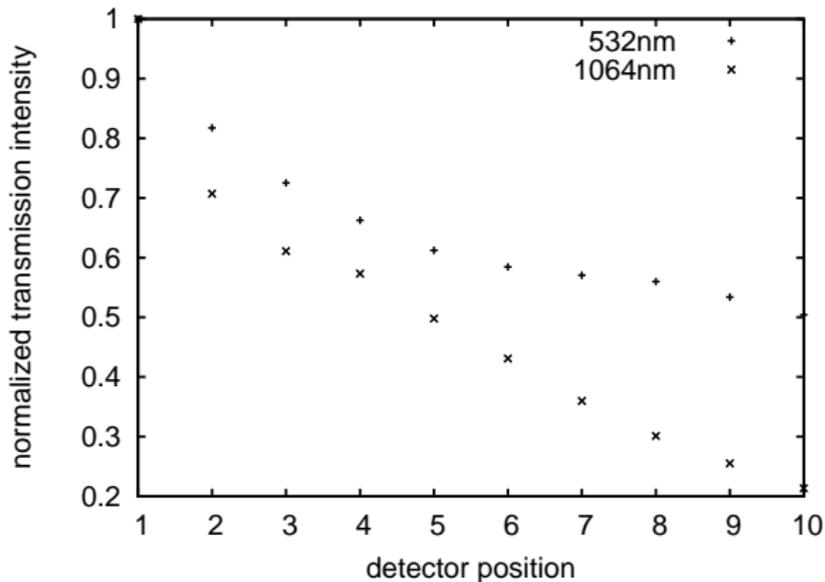
$$L = 45\text{mm}$$

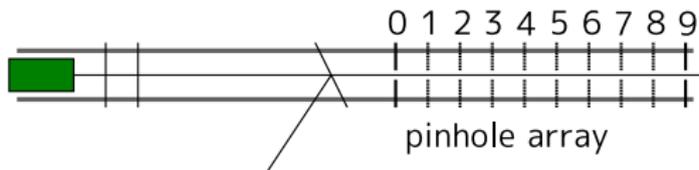
- 0: ピンホール no.9 のみ,
- 1: ピンホール no.9 + no.0,
- 2: ピンホール no.9 + no.0 + no.1,

...



各ピンホール後の光パワー

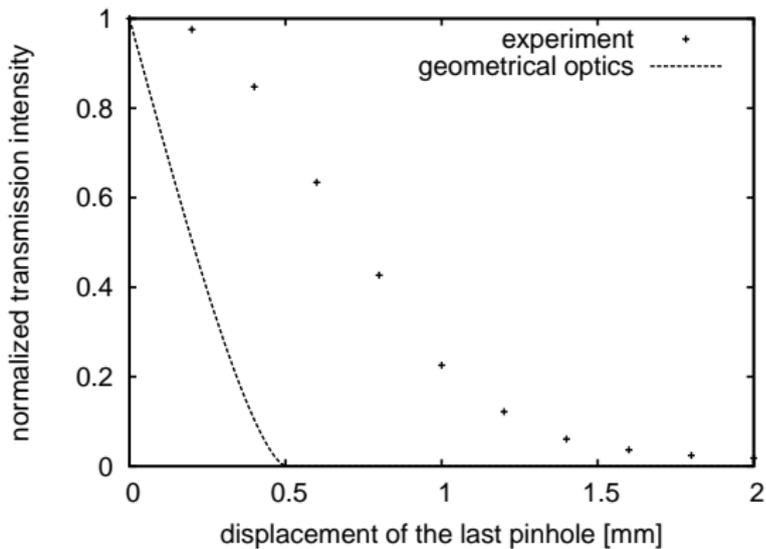
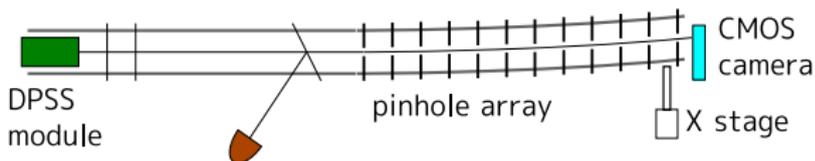




ピンホール no.0 と no.3 の後ろでのビーム断面

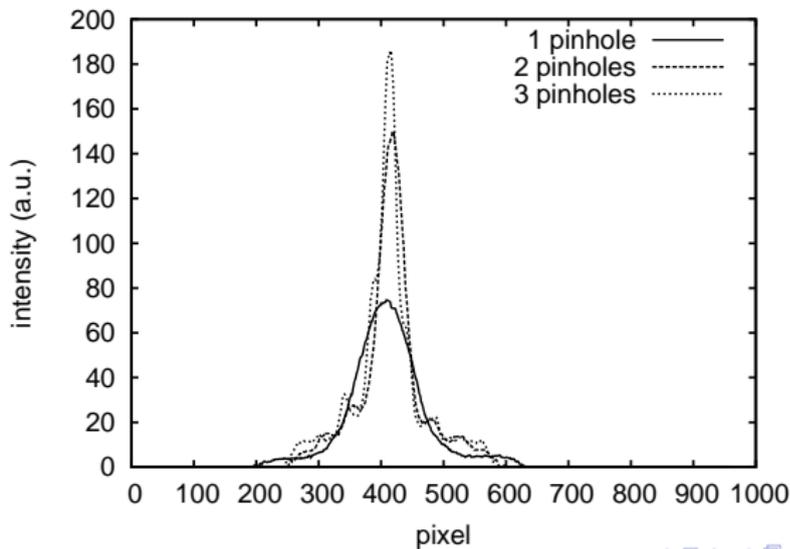
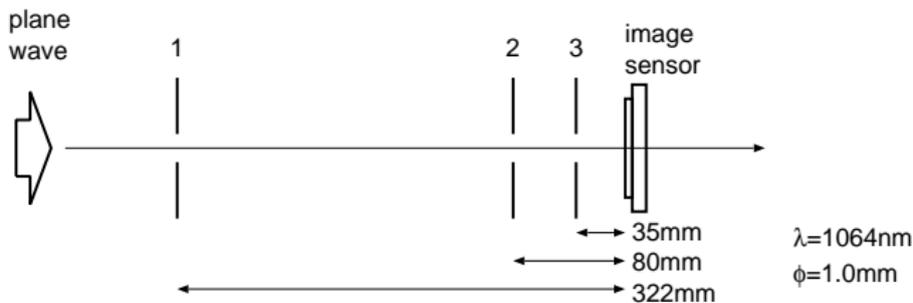


$$\lambda = 532\text{nm}, \phi = 0.5\text{mm}, L = 45\text{mm}$$



$$\lambda = 532\text{nm}, \phi = 0.5\text{mm}, L = 45\text{mm}$$

ビームの集光



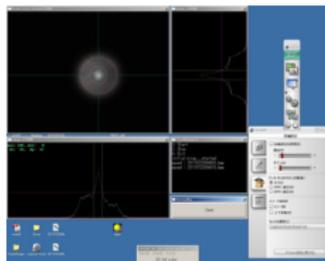
まとめ

ピンホール列による導波路の提案し予備的実験を行った

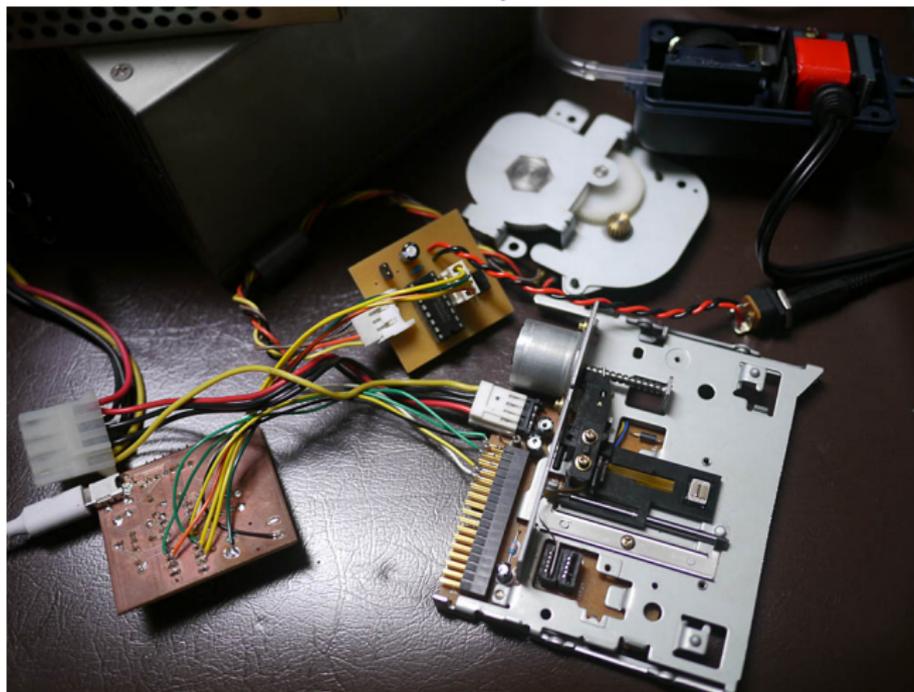
- 様々な波を扱える
 - 特殊な波長の電磁波、物質波など
- 曲げることができる
- 波は自由空間を伝搬する
 - ピンホール列でガイドされた光で原子をガイドする
- 開口の形状を工夫することにより横モードを断熱的に操作

おまけ

- **FREE** WDM カメラ (USB カメラ) 用のビームプロファイルソフトウェアを開発: <http://m.ils.uec.ac.jp/sbpw/>



pinhole aligning ROBOT (under construction)



number of pinholes: ~ 100
pinhole spacing: $\gtrsim 2\text{mm}$

naive estimate of the loss coefficient

概要

損失の見積り

実験

実験 0

実験 1

ビーム断面

ビームの偏向

集光

まとめ

appendix

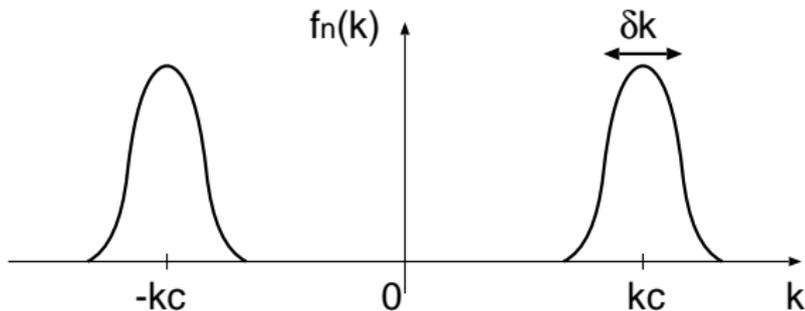
- projection of $\mathbf{T}\psi$ onto ψ

$$\mathbf{S} = \langle \psi | \mathbf{T} | \psi \rangle = \langle \psi | \mathbf{T}_L | \psi \rangle = \int d\mathbf{k} |\langle \psi | \mathbf{k} \rangle|^2 e^{-i\alpha \mathbf{k}^2}$$

- $\mathbf{1} - |\mathbf{S}_n|^2 = \mathbf{1} - |\langle \psi_n | \mathbf{T} | \psi_n \rangle|^2$ gives the intensity loss coefficient for the n th mode when $\frac{\lambda L}{d^2} \ll 1$
- property of $\mathbf{f}(\mathbf{k}) \equiv |\langle \psi | \mathbf{k} \rangle|^2$:

$$\int_{-\infty}^{\infty} d\mathbf{k} \mathbf{f}(\mathbf{k}) = 1, \quad \mathbf{f}(\mathbf{k}) \geq 0$$

$$f_n(\mathbf{k}) \equiv |\langle \psi_n | \mathbf{k} \rangle|^2$$



$$k_c = \frac{n+1}{2d} \pi, \quad \delta k \sim \frac{\pi}{2d}.$$

$$k_c \equiv \int_0^{\infty} dk \, k \{f(k) + f(-k)\}$$

$$\delta k \equiv \left(\int_0^{\infty} dk \, (k - k_c)^2 \{f(k) + f(-k)\} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{S} \\
 = & \langle \psi | \mathbf{T} | \psi \rangle \\
 = & \int_{-\infty}^{\infty} dk f(k) e^{-i\alpha k^2} \\
 = & e^{-i\alpha k_c^2} \int_0^{\infty} dk \{f(k) + f(-k)\} e^{-i\alpha(2k_c \Delta k + \Delta k^2)} \\
 \sim & e^{-i\alpha k_c^2} \int_0^{\infty} dk g(k) \{1 - i\alpha(2k_c \Delta k + \Delta k^2) - 2\alpha^2 k_c^2 \Delta k^2\} \\
 = & e^{-i\alpha k_c^2} \{1 + (-i\alpha - 2\alpha^2 k_c^2) \delta k^2\}
 \end{aligned}$$

$$|\mathbf{S}|^2 \sim 1 - 4\alpha^2 k_c^2 \delta k^2 = 1 - \frac{k_c^2 \delta k^2}{k_0^2} L^2$$

$$|\mathbf{S}_n|^2 \sim 1 - \frac{(n+1)^2 \pi^4}{16k_0^2 d^4} L^2 = 1 - \frac{(n+1)^2 \pi^2}{64} \left(\frac{\lambda L}{d^2}\right)^2$$

wrong result!

$$g(k) = f(k) + f(-k), \quad \Delta k \equiv k - k_c.$$