

ナノフォトニック・デバイスを用いた 光パタン検出機構の提案と評価

Rina Asai

目次

- 光通信におけるセキュリティ
- 本研究のねらい
- ナノフォトニック・デバイスを用いた光パターン検出機構
- 消費電力モデル
- CMOSを用いた検出機構との比較
- まとめ

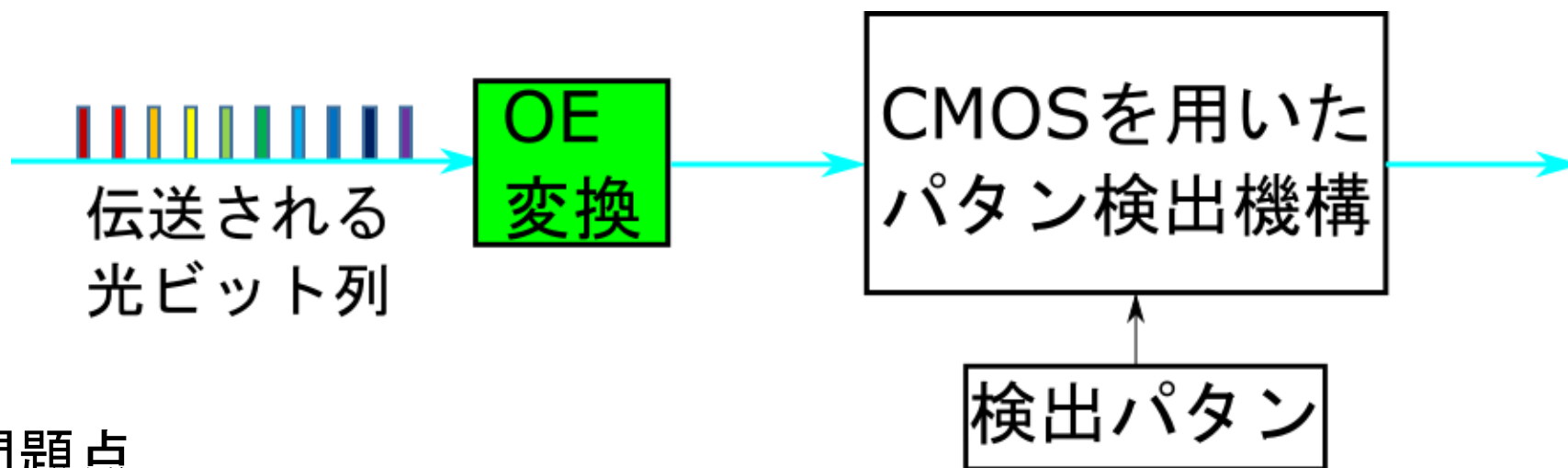
光通信におけるセキュリティ向上 の必要性

インターネットの普及
光通信の通信容量の増加

サイバー攻撃の増加
攻撃に対するセキュリティの要求



光通信でのセキュリティ対策



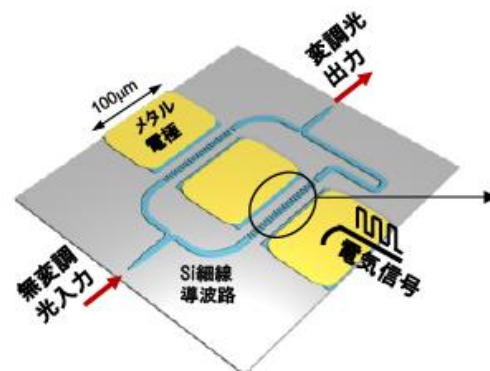
問題点

CMOS検出機構の低レイテンシ動作が困難



ナノフォトニック・デバイス

デバイスレベルでの研究は進んでいる



<http://www.nict.go.jp/press/2013/10/21-1.html>

本研究のねらい

- 目的

光速度でのパタン検出機構の提案
モデリングに基づく有効性

- CMOS検出機構との比較結果

遅延時間: 約 $1/900$

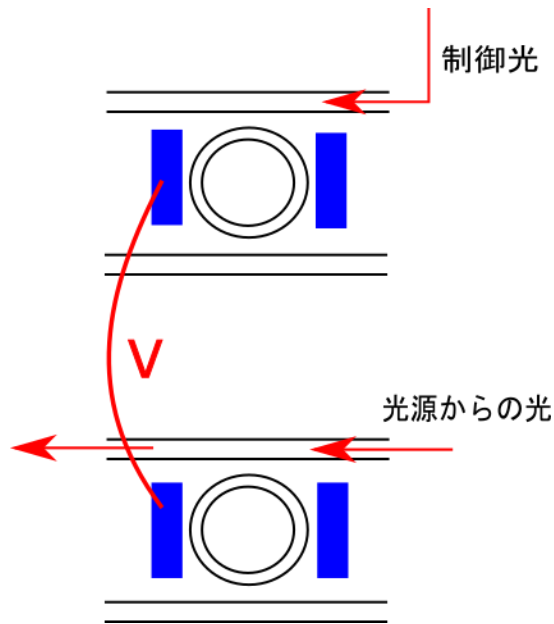
面積: 約 1,160倍

消費電力: 検出ビット数によって優劣変化

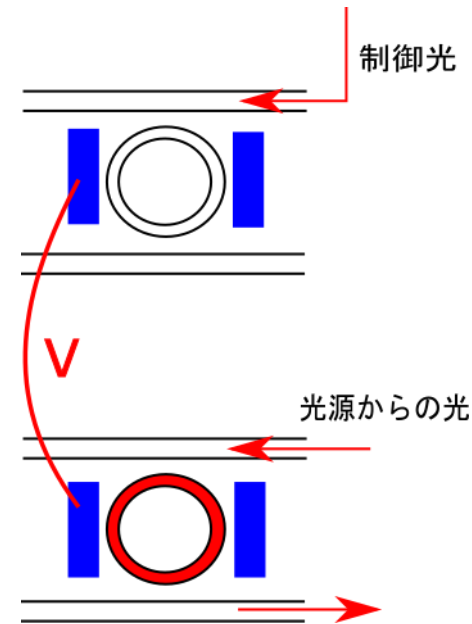
ナノフォトニック光スイッチ

- ナノフォトニック光スイッチとは

光信号を通過させるか否かでオン動作およびオフ動作をする光デバイス



光スイッチ オン動作



光スイッチ オフ動作

ナノフォトニック光スイッチの性能

漏れ率

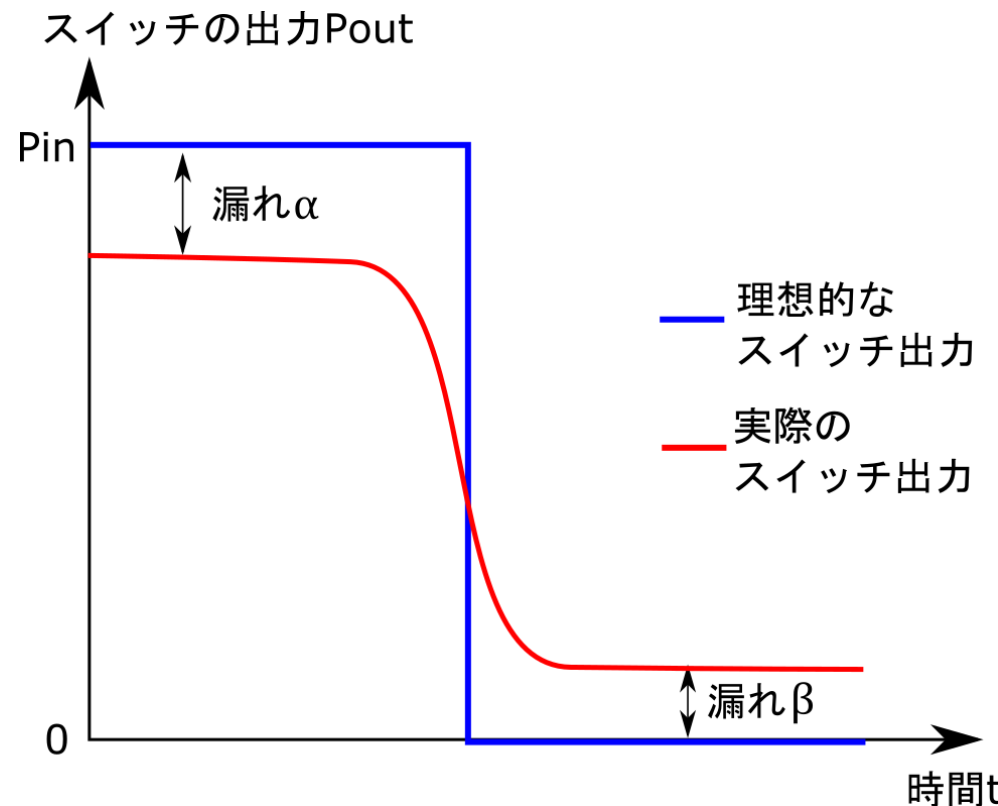
スイッチがオンオフそれぞれの時のエネルギーの漏れ率

漏れ α : 回路からの漏れ

漏れ β : 遮断時の漏れ

透過率 $1 - \alpha$:

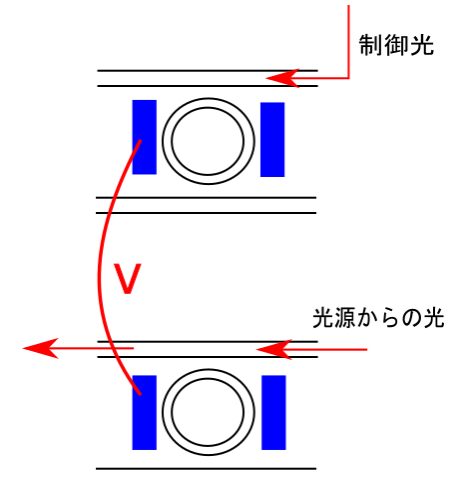
オン動作時の透過の割合



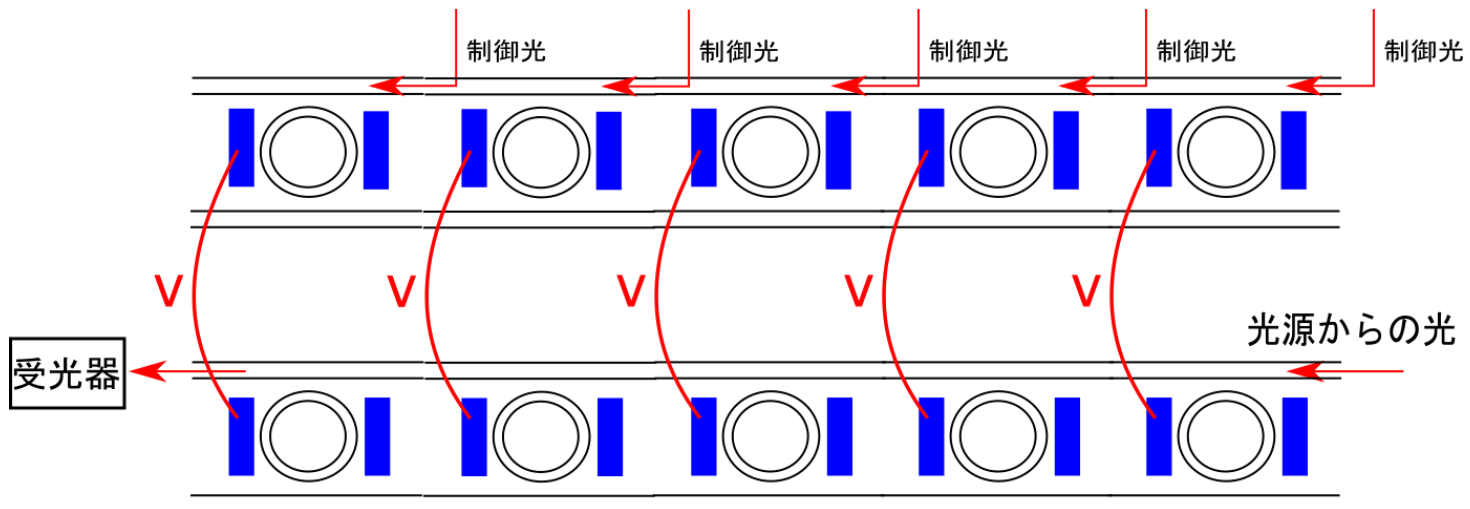
ナノフォトニック光スイッチの特徴

スイッチング時間: 10ps~25ps

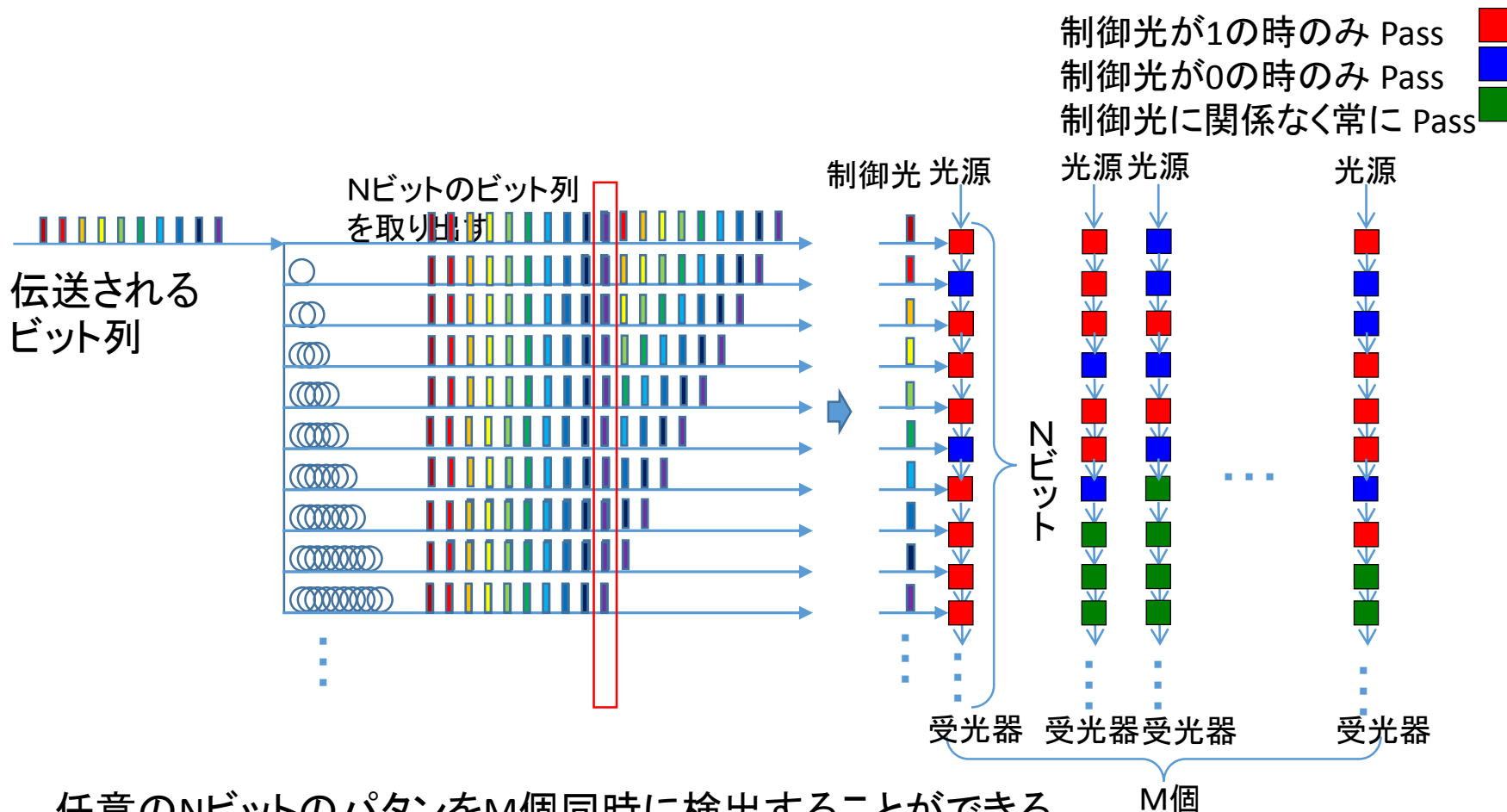
ゲートパス時間: 10fs~1ps



• ナノフォトニック光スイッチに向けた回路構造



ナノフォトニック・デバイスを用いた 光パターン検出機構



任意のNビットのパターンをM個同時に検出することができる
ナノフォトニック・デバイスを用いた光パターン検出機構

提案機構のモデリング

遅延時間

$$T_{NP_{total}} = L_{wire}/C + T_{amp} + T_{NP_{swich}} + N \times L_{gate}/C + T_{pd}$$

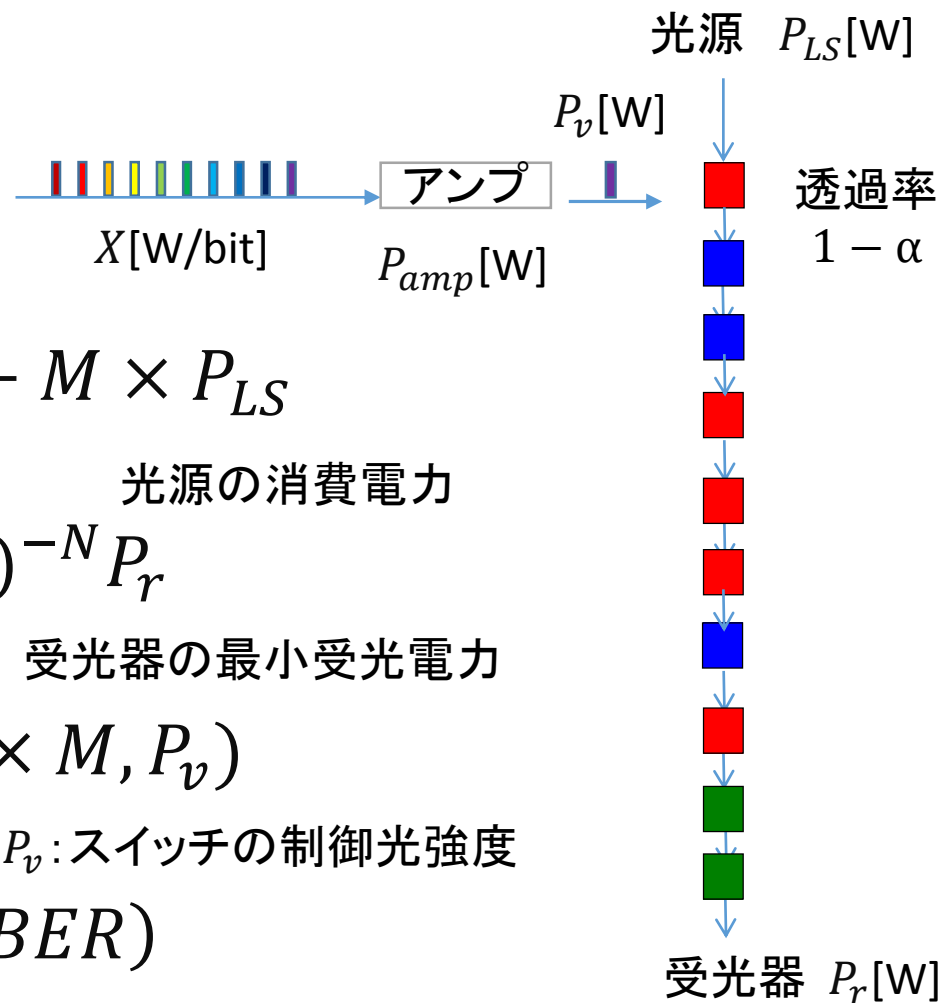
面積

$$S_{NP_{total}} = S_{delay} + S_{amp} \\ + M \times \{N \times S_{NP_{swich}} + S_{LS} + S_{pd} + S_{wire}\}$$

消費電力

$$P_{NP_{total}} = P_{amp} + M \times P_{LS}$$

消費電力モデリング



$$P_{NP_{total}} = P_{amp} + M \times P_{LS}$$

アンプの消費電力

光源の消費電力

$$P_{LS} = (1 - \alpha)^{-N} P_r$$

スイッチの透過率

受光器の最小受光電力

$$P_{amp} = f(X, N \times M, P_v)$$

X : 伝送されたビット列のもつパワー、 P_v : スwitchの制御光強度

$$P_v = g(\alpha, \beta, BER)$$

BER: 符号誤り率

CMOSを用いた光パターン検出機構 との比較

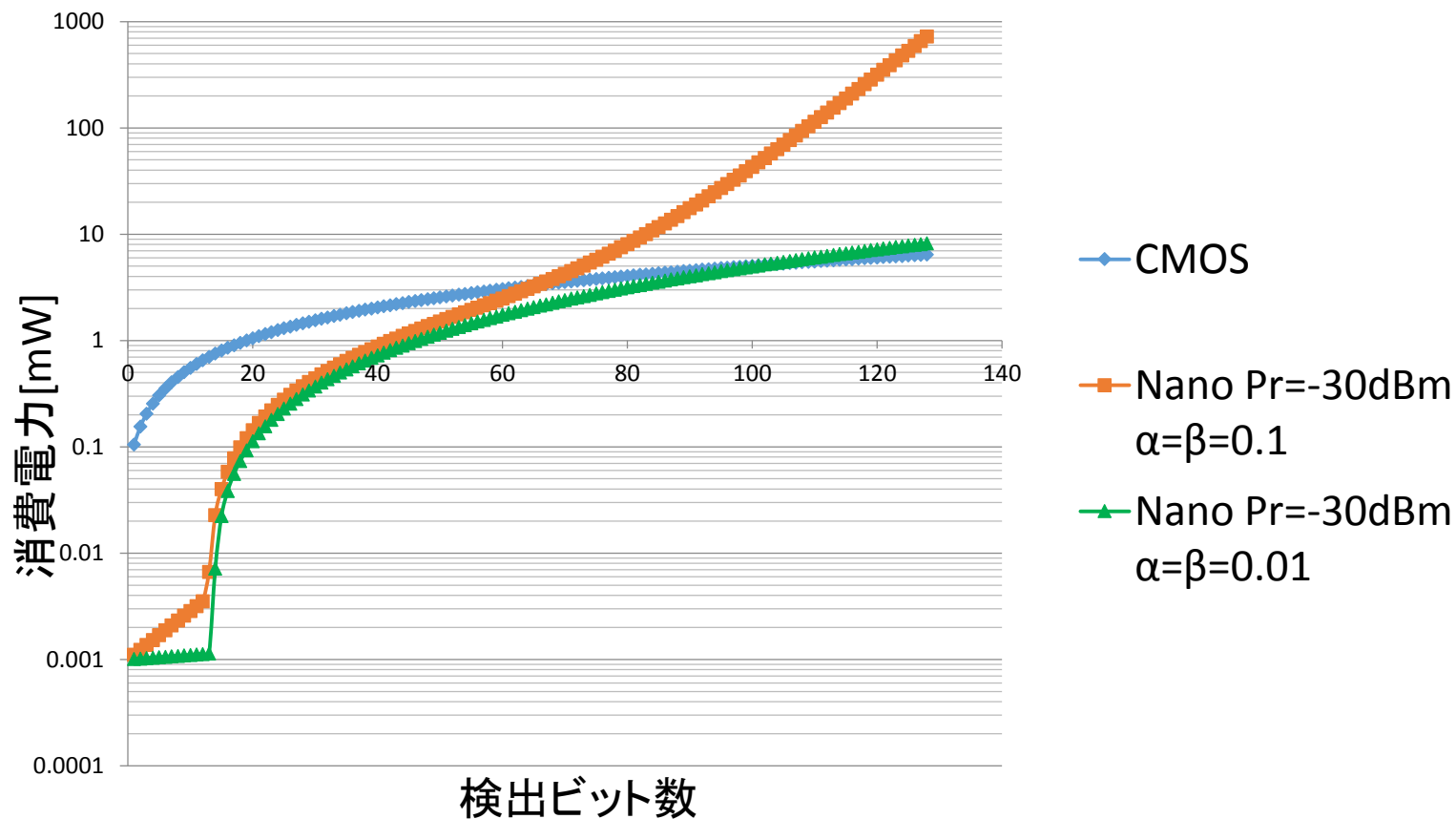
①スイッチ性能および受光器の性能による変化

②通信の分野において

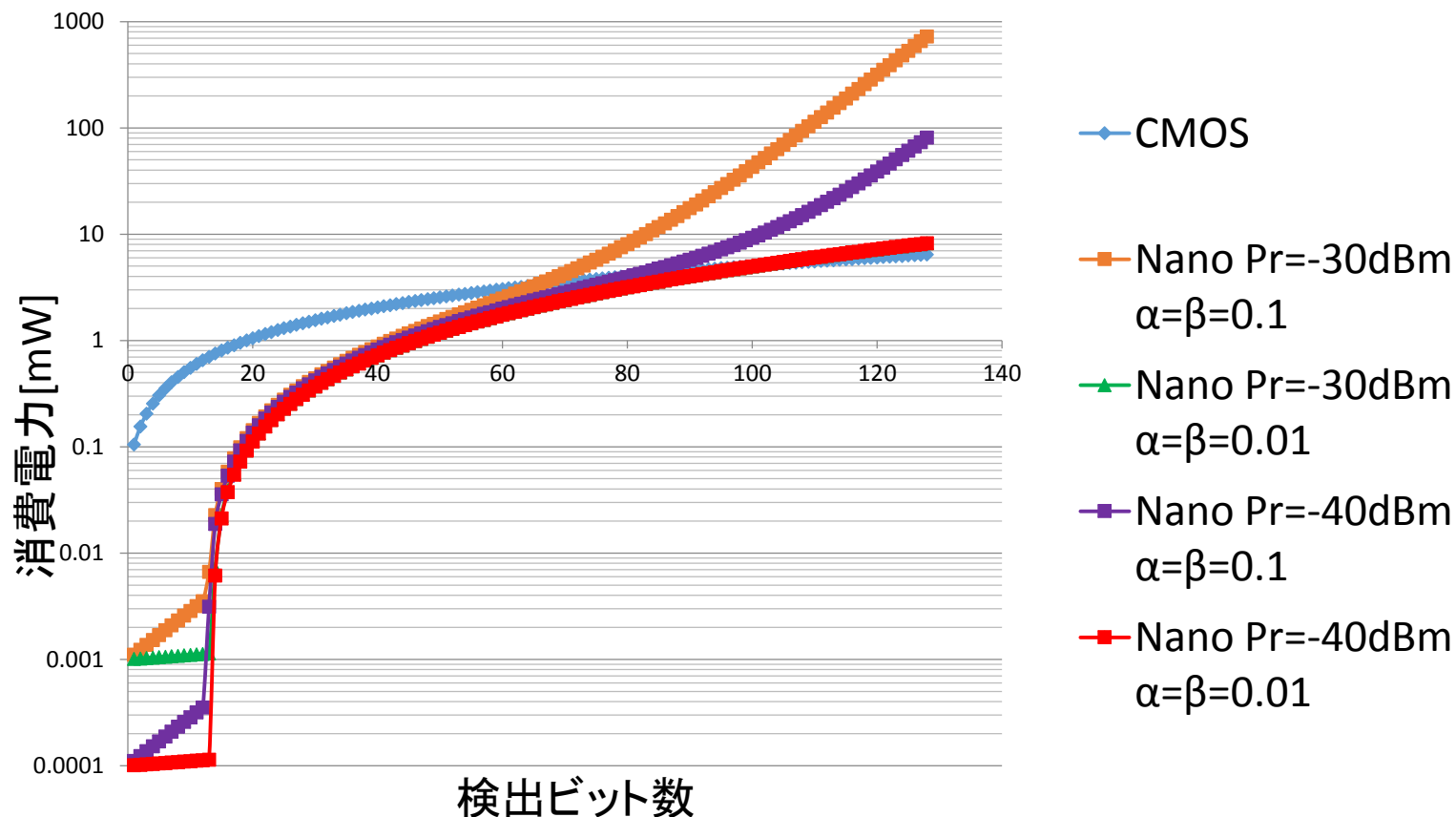
BER(符号誤り率)を許容することで消費電力を抑えられる.

同様の結果が提案機構で得られるのか確認

比較1の結果

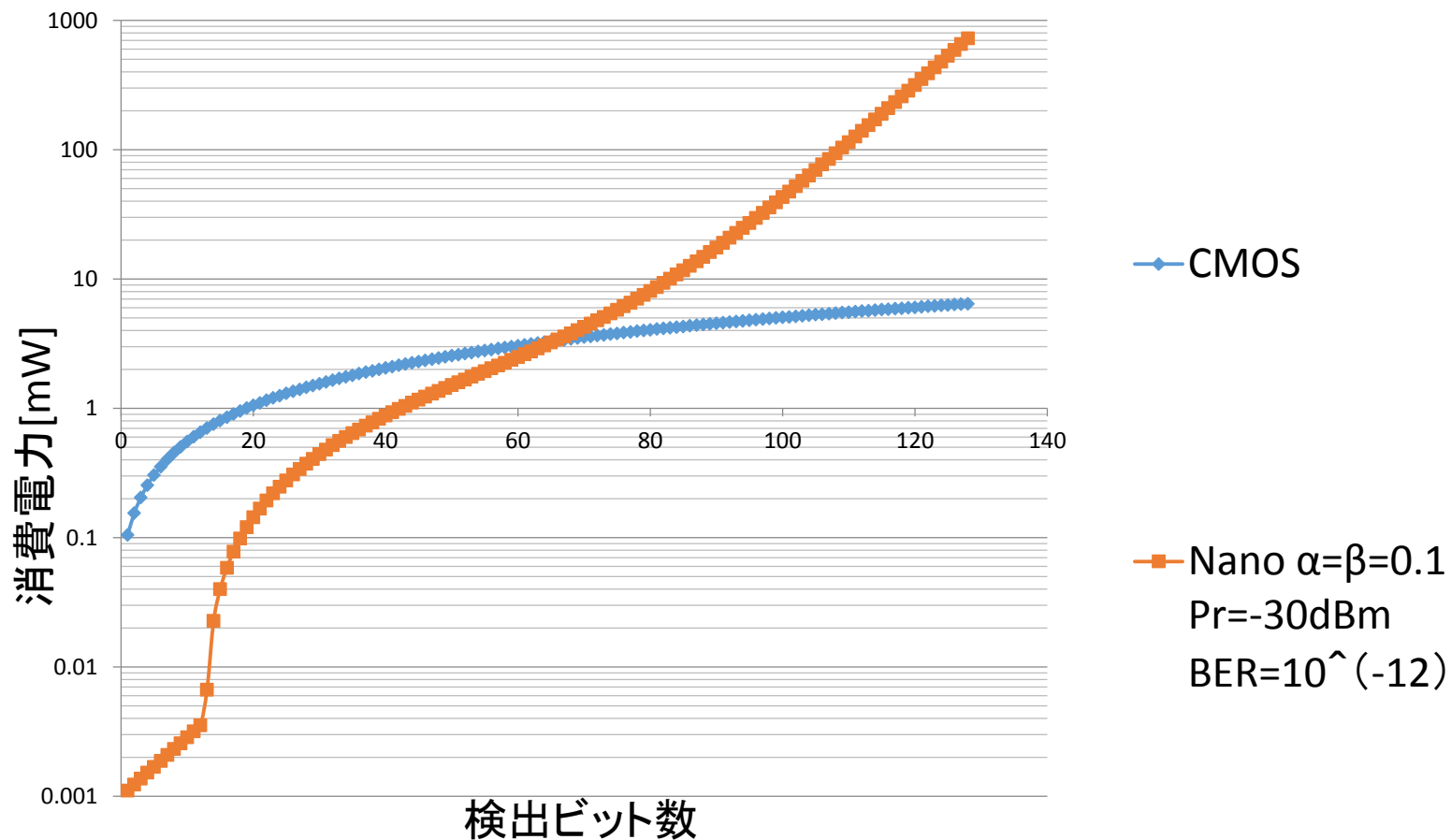


比較1の結果

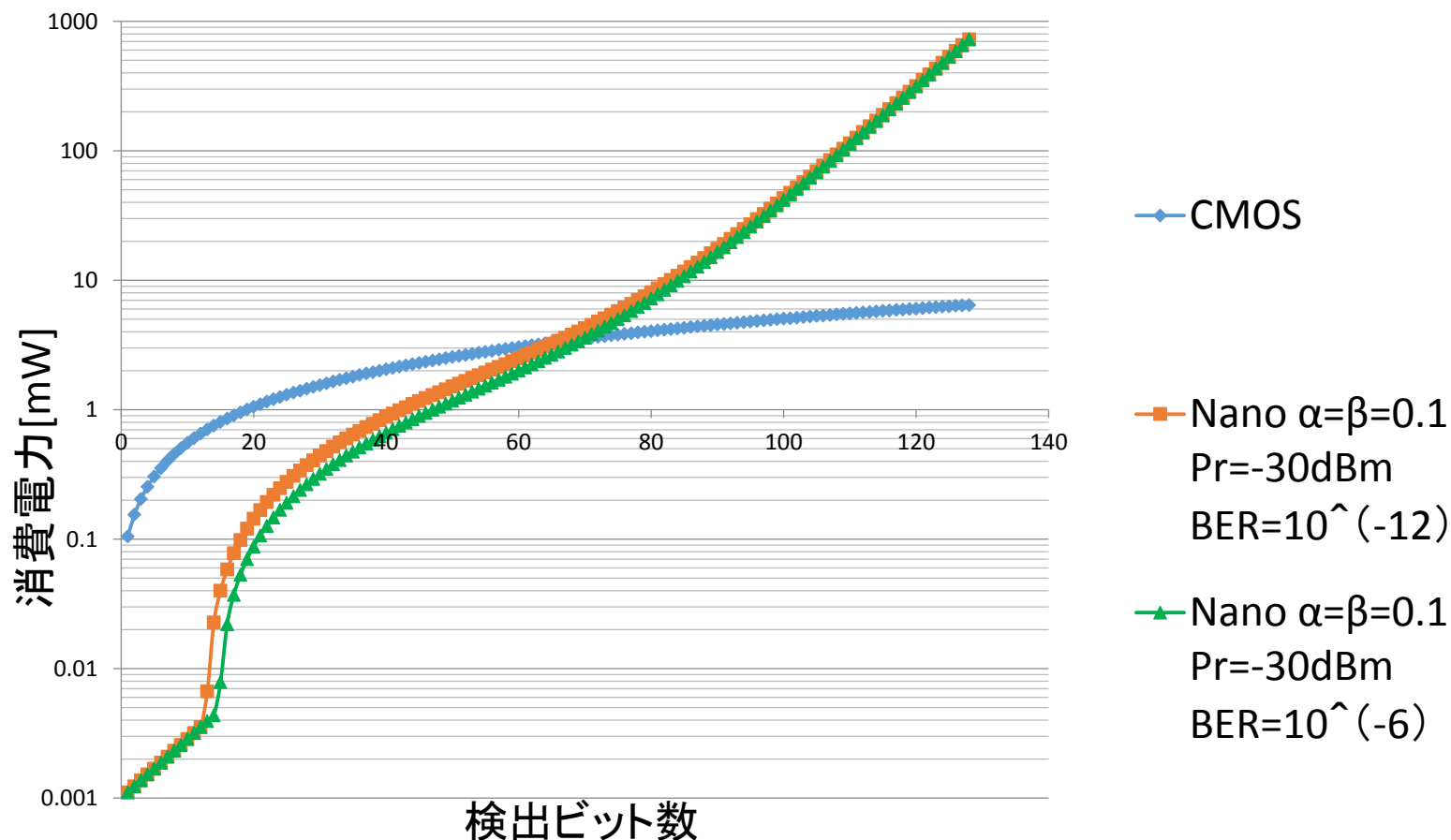


- ・スイッチの漏れ率および受光器の感度を改善で消費電力削減
- ・Nが大きい部分では漏れ率の改善の方が有効

比較2の結果



比較2の結果



BERの劣化を許容しても消費電力に大きな違いは見られない

消費電力のトレードオフ①

- ・光源の消費電力 P_{LS}
削減のためには(透過率) ≈ 1
- ・アンプ消費電力 P_{amp} (制御光強度 P_v)
(透過率) ≈ 1 のためには増加

両者のトレードオフが存在

提案機構 光源の消費電力が支配的

消費電力のトレードオフ②

消費電力の削減のポイント

スイッチの透過率

改善がスイッチ性能にのみ依存

アーキテクチャの問題

強度で判定していることが欠点の可能性

その他の判定法: 位相・波長

おわりに

- まとめ

CMOS検出機構との比較結果

遅延時間: 約 1/900

面積: 約 1,160倍

消費電力: 検出ビット数66で優劣変化

- 今後の課題

光源とBERとの関係を明らかにする

波長多重に対応したモデルの構築

backslide

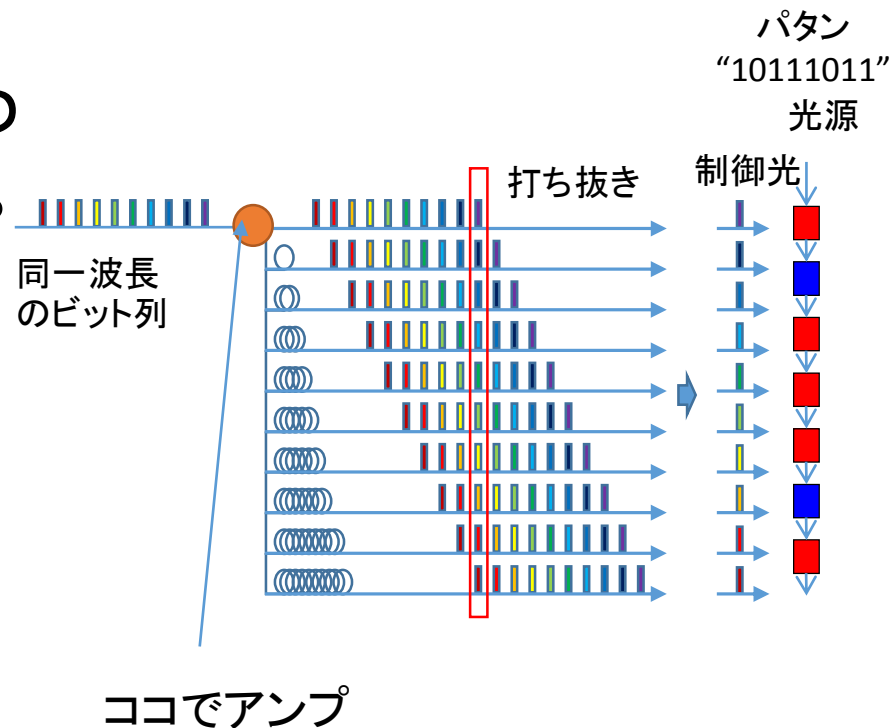
制御光用のアンプ

やってきた信号パルスが持つ
エネルギーを $X[\text{W/bit}]$ とする。

スイッチの個数は $N \times M$ 個

$\frac{X}{N \times M} > P_v$ のとき アンプ不要

$\frac{X}{N \times M} \leq P_v$ のとき アンプ必要



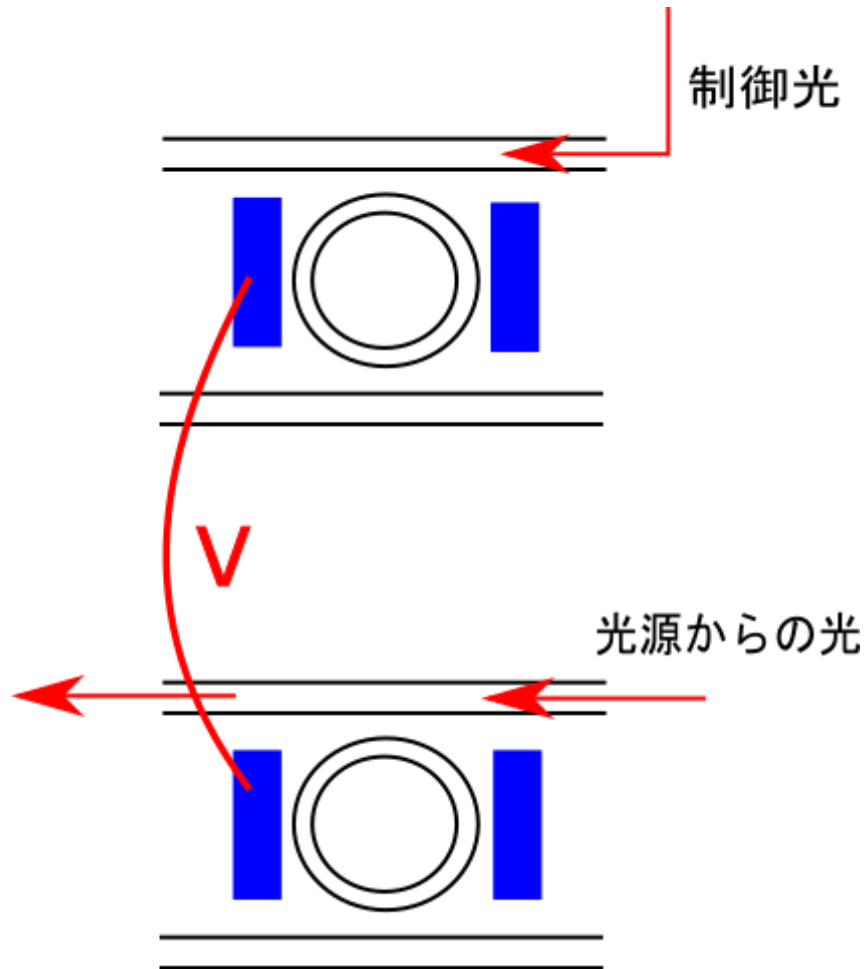
制御光強度とアンプ量

伝送されたビット列の強度が X [W/bit]、アンプ量を G [w]とすると、次の関係式が導ける

$$G = P_v \times N \times M - X$$

アンプの変換効率を100%とすると、アンプの消費電力 $P_{amp} = G$ である

提案するスイッチの仕組み



上部構造に制御光が入力されると電極に電流が発生.

そのため下部構造に電圧がかかる.

電圧がかかることによってスイッチのオンオフが決定する.

近接場光・エバネッセント光

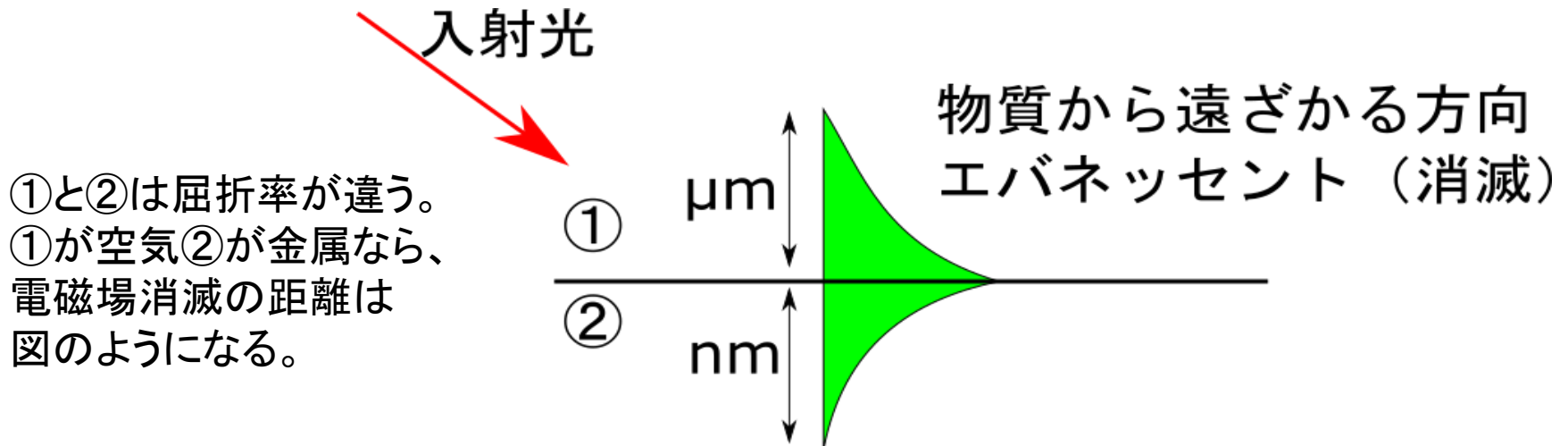
近接場光とエバネッセント光は同じものと考えてよい

近接場光とは

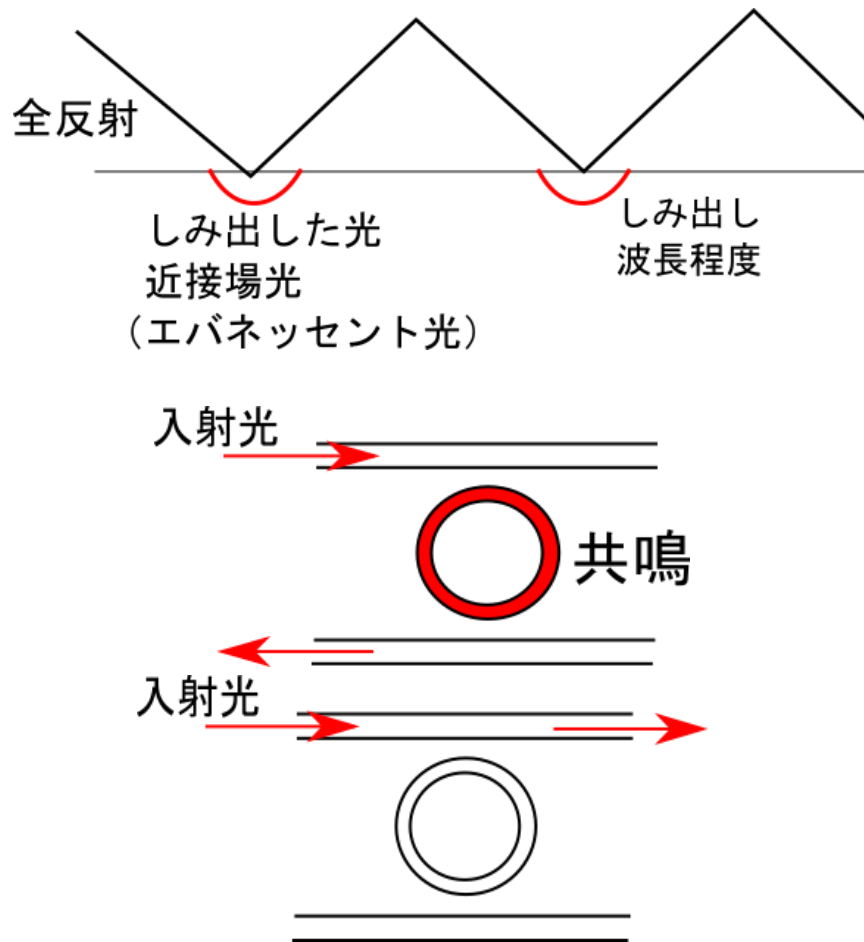
物質に局在。近接してみたときと遠くから見たときと特徴が違う。

物質から離れる方向にはエバネッセント(倅い)特徴。

物の近くには局在。



近接場光の利用①

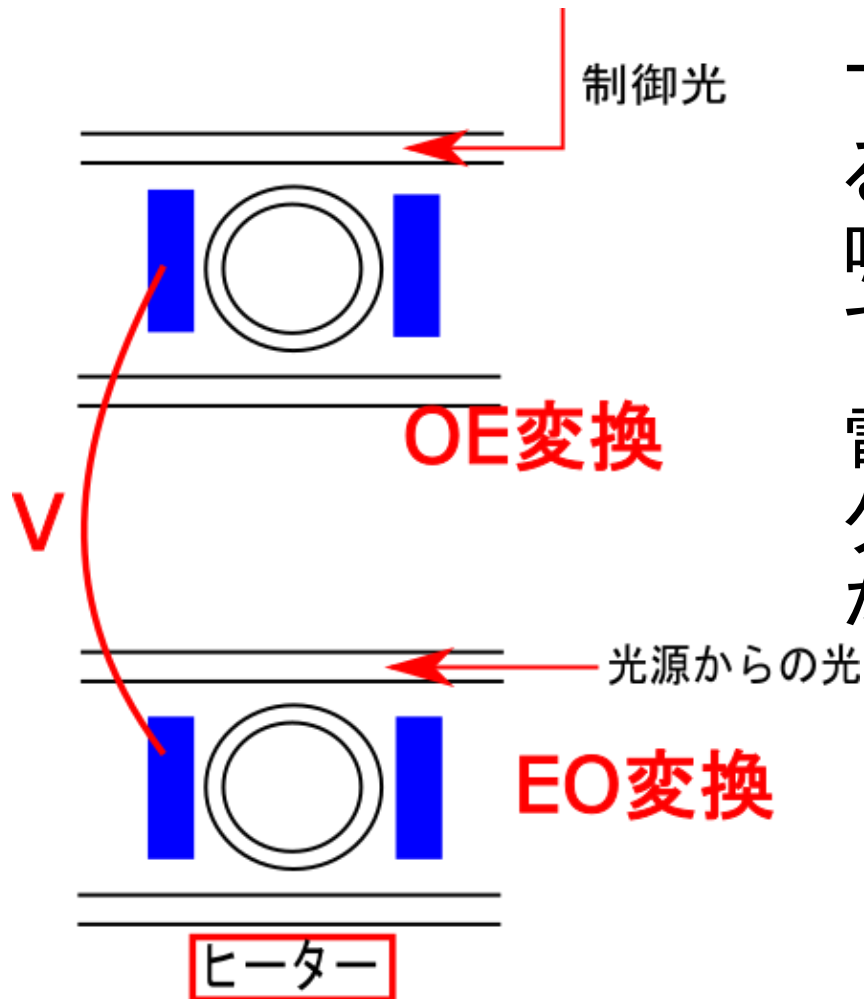


全反射の境界面にしみ出す光を利用.

リングがしみ出し光と共鳴する時オフ動作.

リングがしみ出し光と共鳴しないときオン動作.

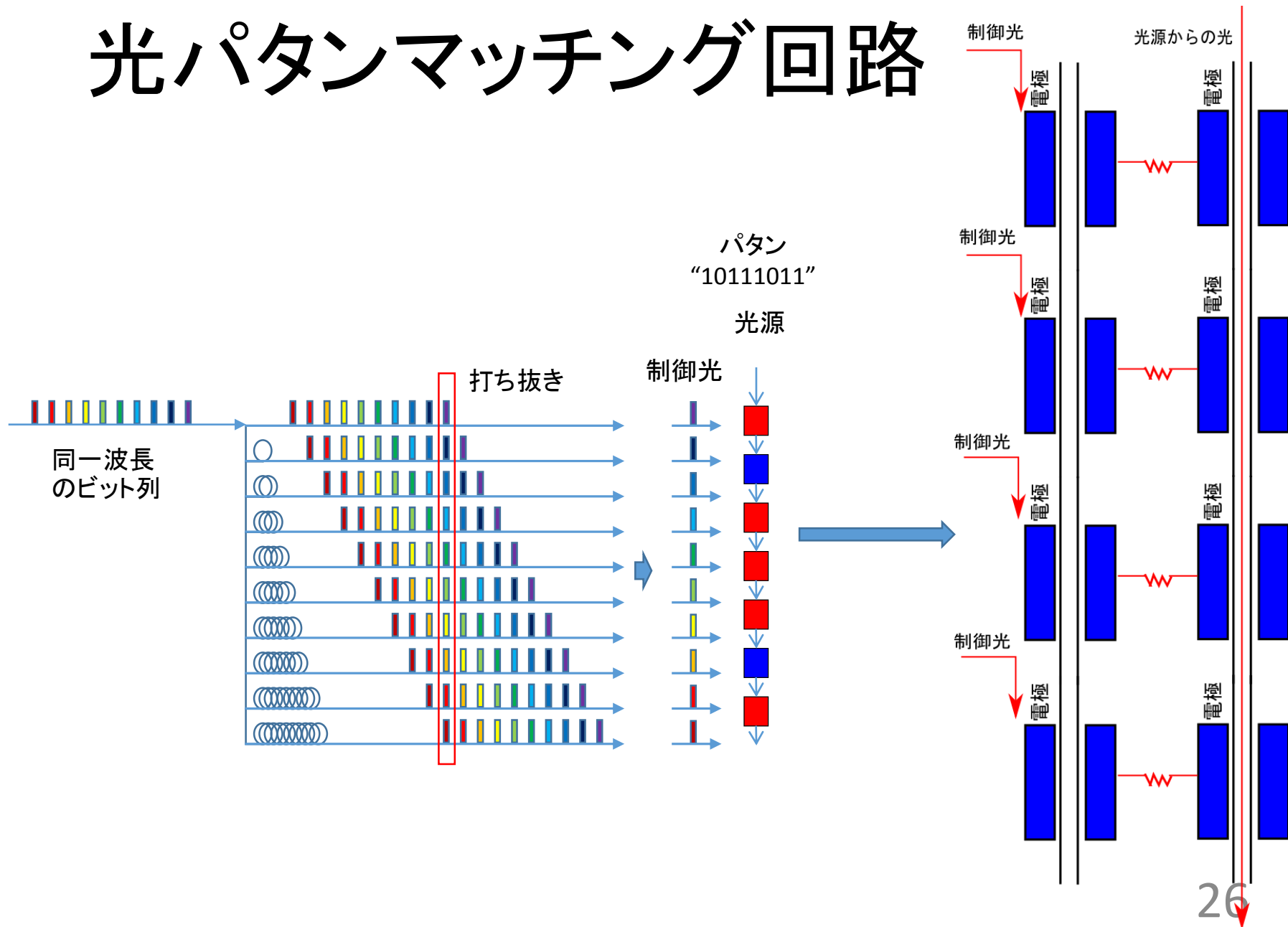
近接場光の利用②



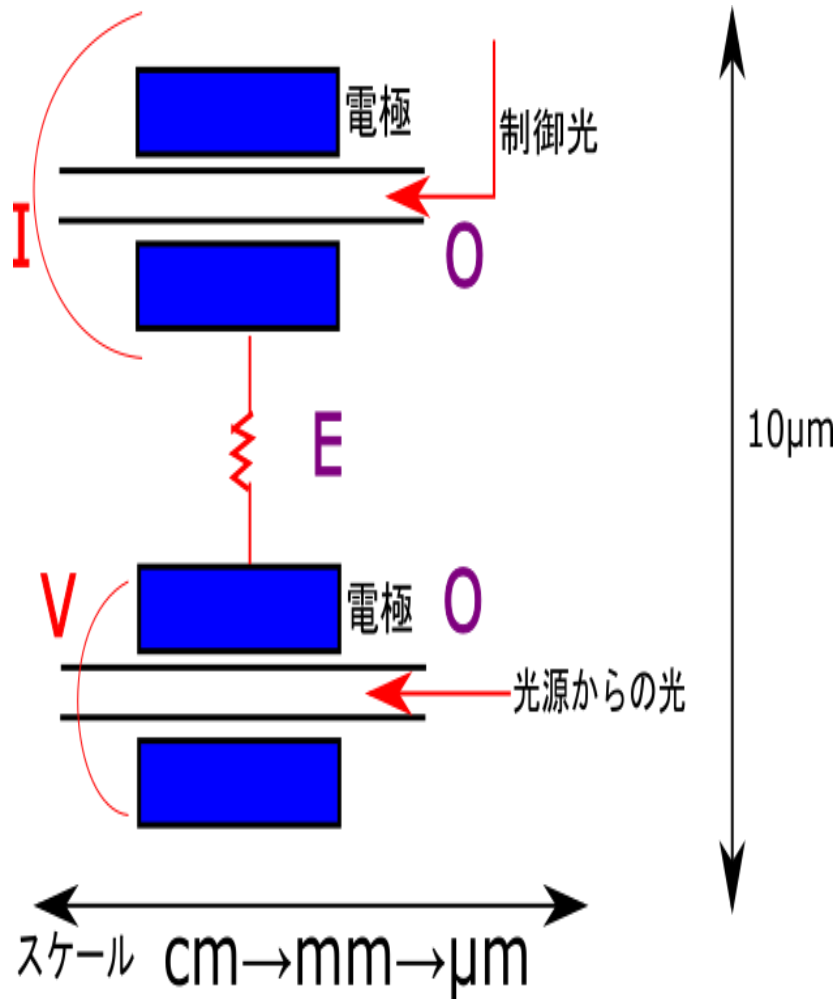
下部構造は電圧をかけることにより、リングが共鳴するかどうかを制御している。

電圧がかかった時、リングの共鳴状態がどうなるかはヒーターで制御

光パターンマッチング回路



光素子のスケール



cm→mm(フォトリソ)

→μm(目標)(ナノフォトリソ)

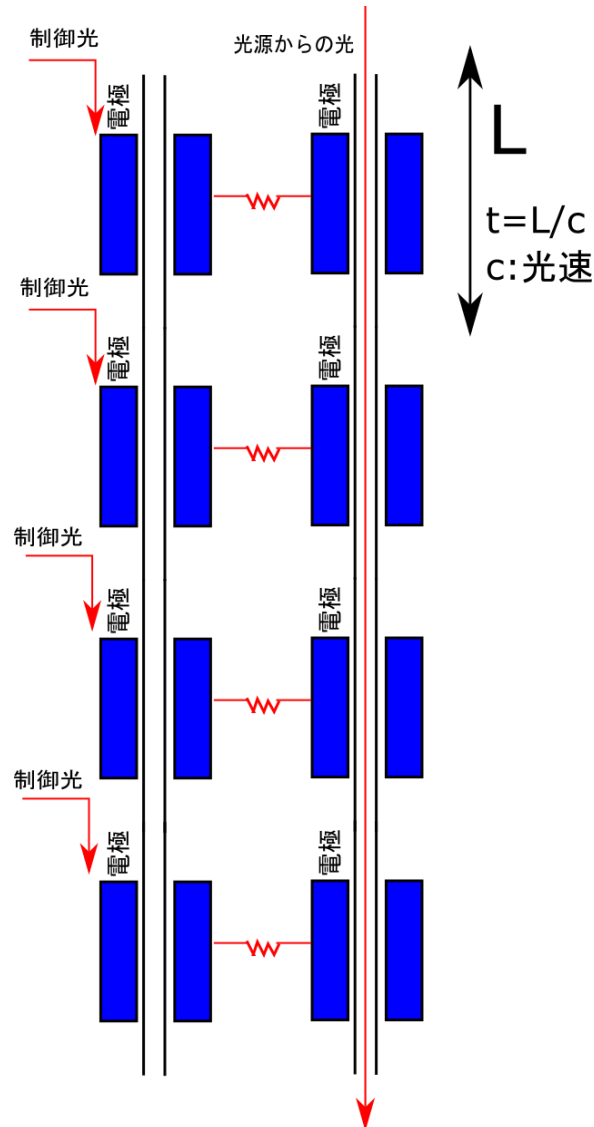
光素子は大きいほど消費電力が大きい。フォトリソでは電力不足を補うため、外部から電圧をかけなければならない。

光素子は大きいほどOE変換部分の遅延も大きい。

↓

微細化の必要性

光素子の素子内伝搬時間



素子内の伝搬時間.

素子のゲートの長さだけを
考えればよい.

光より信号が早く伝搬する
ことはありえないので、素
子が1[mm]なら10[ps],
1[cm]なら100[ps] かかる

光回路での消費電力

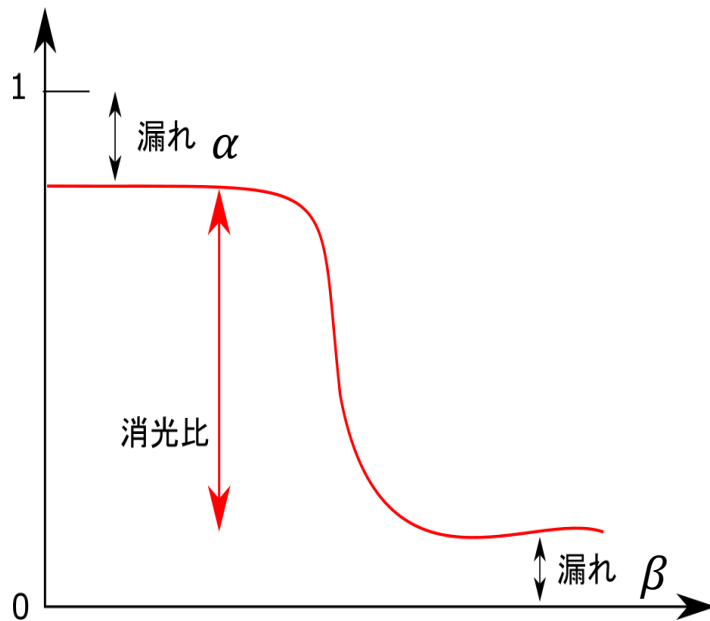
光パタンマッチング回路での消費電力は

- ・光源の消費電力
 - ・アンプの消費電力
- の2つで考えられる.

光スイッチの内部で電圧で駆動する部分の消費電力
これは入ってきた光のエネルギーで駆動できたことになる.

この場合の消費エネルギーは、光源の消費エネルギーでカウント. 電圧駆動部の消費エネルギーを足すとダブルカウントになる.

スイッチの漏れ率・透過率



漏れ率

スイッチがオンオフそれぞれの時のエネルギーの漏れ率

漏れ α

オン動作時の回路からの漏れ

漏れ β

オフ動作時の回路からの漏れ

透過率 $1-\alpha$

オン動作時の透過の割合

光のエネルギー・強度

光は周波数(波長)で光子のエネルギーが決まる

$$E = h\nu$$

h : プランク定数 ν : 光の周波数

光子数で光の強度が決定する

光のエネルギーと強度は全くの別物

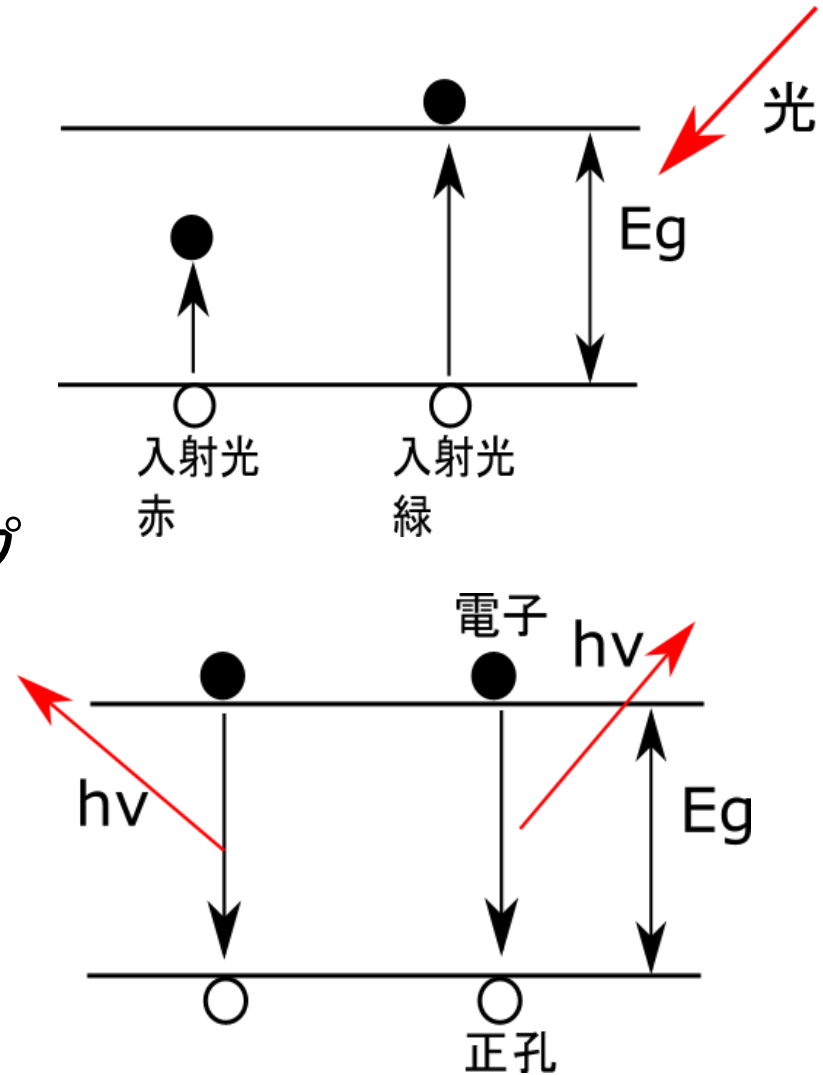
同じ色(周波数)の光でも明暗がある、という事がエネルギーと強度の違いを示している。

受光器(フォトダイオード)①

エネルギーギャップを超えるのに十分なエネルギーを持った光子が入射したときに自由電子と正孔のペアを生成する(吸収)

光子のエネルギーは周波数で決まるため、エネルギーギャップによって検出できる周波数が決定

吸収の逆の現象は電子正孔対の再結合による光放出

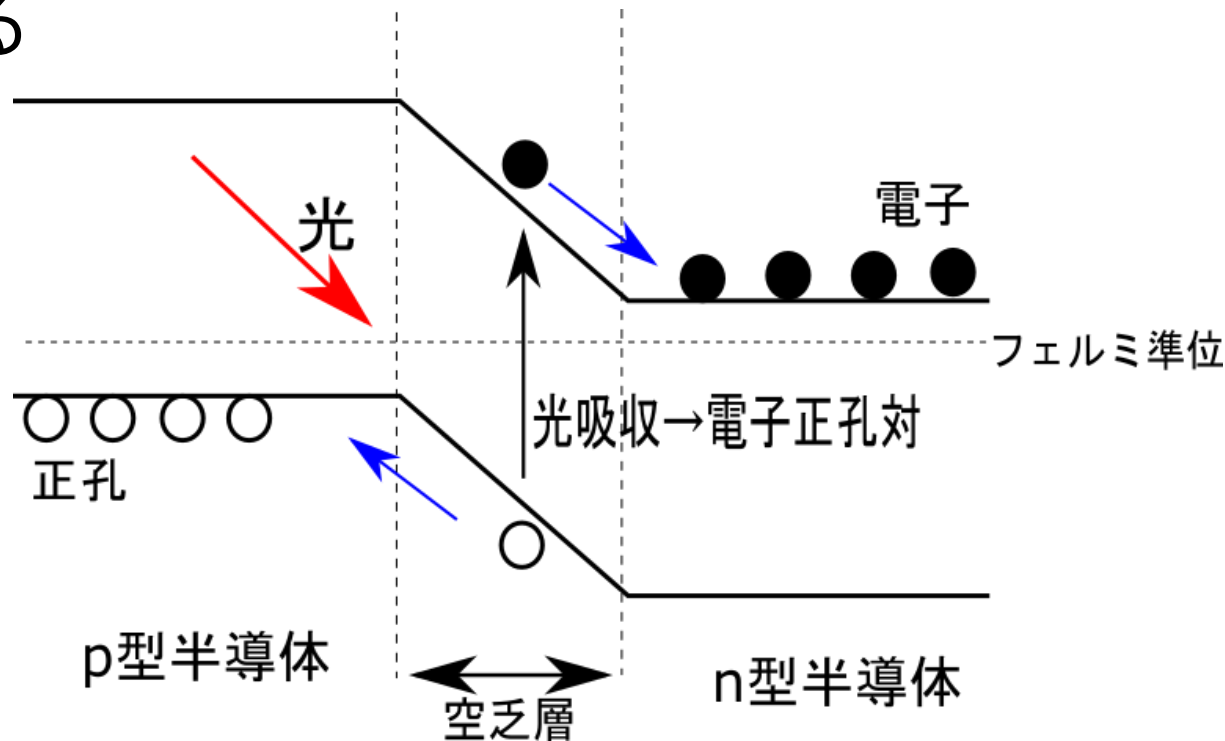


受光器(フォトダイオード)②

フォトダイオードはpin接合を持つ

空乏層で発生した電子や正孔が移動することで光電流が流れる

流れる電流は入射される光の強度、つまり光子数に比例する



最小受信感度

一定のビットエラーレートを確保するために最小限必要な受光器の受光電力。

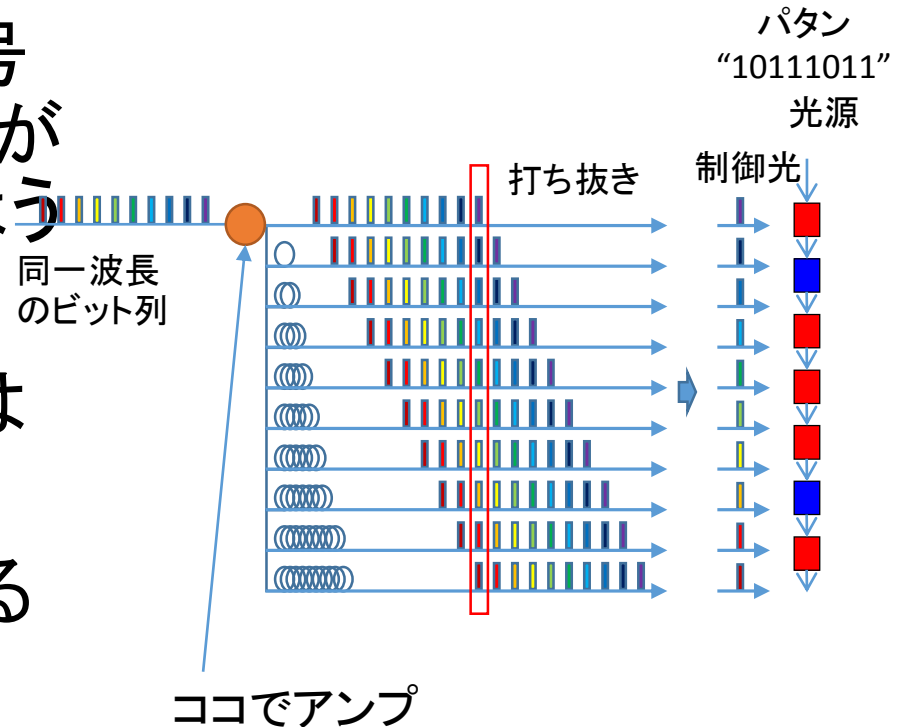
伝送ビットレート、必要なビットエラーレートなどによって値が変わる。

制御光用のアンプ考察①

スイッチに入力される信号
パルスのもつエネルギーが
 P_{vW}/bit 以下にならないよう
にしなければならない

スイッチに到達するまでは
遅延線・配線を通るだけ

信号のパワーが小さくなる
前に大元で増幅させる



制御光用のアンプ考察②

やってきた信号パルスが持つエネルギーを XW/bit とする。

スイッチの個数は $N \times M$ 個

$\frac{X}{N \times M} \geq P_v$ のとき アンプ不要

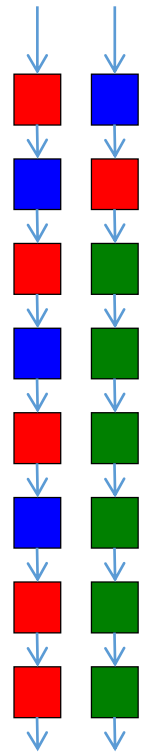
$\frac{X}{N \times M} < P_v$ のとき アンプ必要

パタンマッチ用（串刺し構造） のアンプ

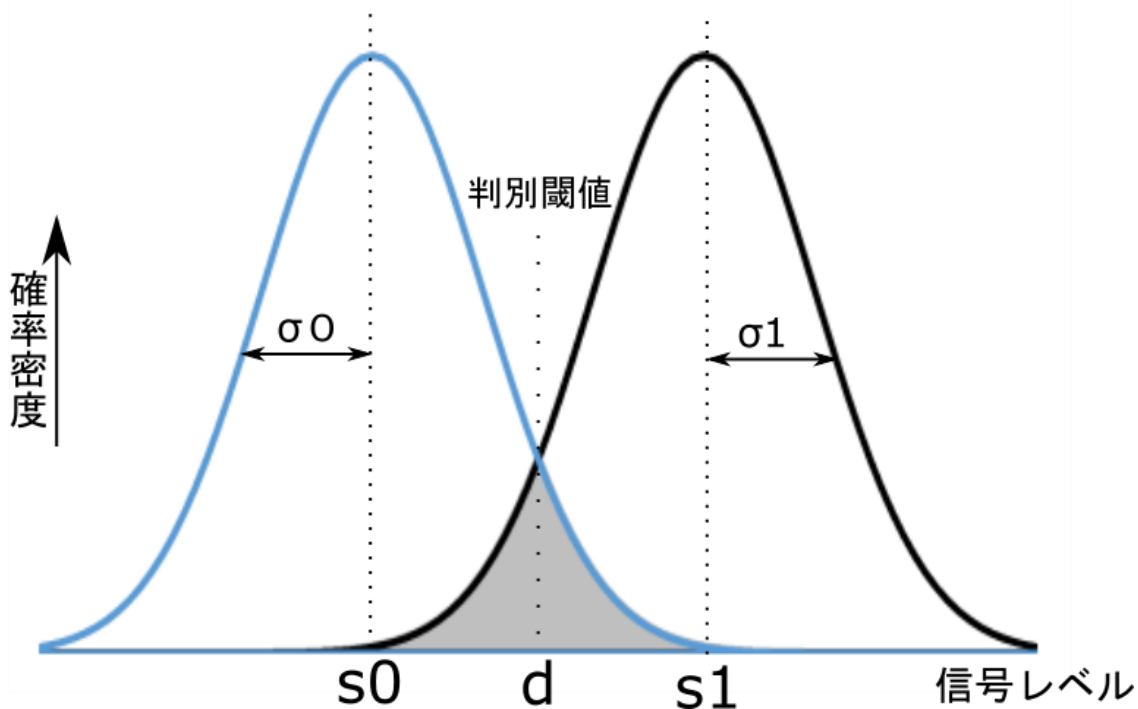
光アンプはスケールが大きい（つまり遅延
が大きいということ）

電気アンプを使うと、光→電気→光変換を
するコストがかかる

以上から考えられるのは、串刺し構造に
はできるだけアンプがない方がいいという
事である。



BERとQ値



$$\begin{aligned} \text{BER} &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^d \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left[-\frac{(s-s_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] ds + \frac{1}{2} \int_d^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} \exp\left[-\frac{(s-s_0)^2}{2\sigma_0^2}\right] ds \\ &= \frac{1}{2} \text{erfc}\left[\frac{Q}{\sqrt{2}}\right] \quad Q \equiv \frac{s_1 - s_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \end{aligned}$$

$BER = 10^{-12}$: エラーフリー

よりQ値を求め、1fJ/bit, 10GHzのときのスイッチ一つの σ を求める。

単位を「パワー」から「率」に変換
ここで1段スイッチの揺らぎを考えてみる

出力: $s_1 = z \times \sigma_1 + \mu_1$

$$= P_0 \times (1 - \alpha + z \times \sigma') = z \times (P_0 \sigma') + P_0(1 - \alpha)$$

入力: P_0

$$\therefore \sigma' = \sigma_1 / P_0$$

例えば、

$$BER = 10^{-12} \rightarrow P_0 = 0.001, \sigma_1 = 0.000078125 \text{ [mW]}$$

$$\downarrow$$
$$\sigma' = 0.078125$$

信号レベル①

1の出力信号レベルと0の出力信号レベルを考える。

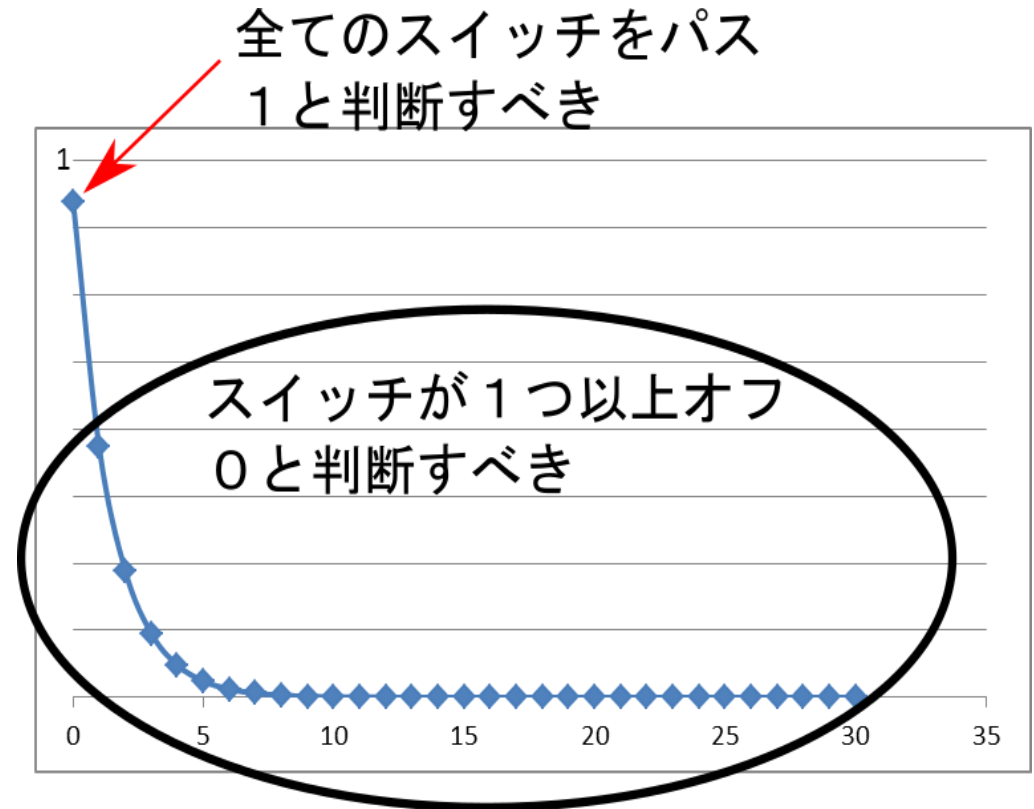
0を出力する場合はワーストパターンのみ考える。

ワーストパターン: ただ1つのスイッチがオフ

信号レベル②

複数のスイッチのうち1つでもオフになったなら、出力は0と判断。

オフのスイッチの数によって出力エネルギー値がバラバラ



縦軸は出力エネルギー値
横軸はオフになってるスイッチの数
今回はN=30でグラフを作成

信号レベル：出力1の時

出力1のとき

$$X1 = P_{ls}(1 - \alpha)$$

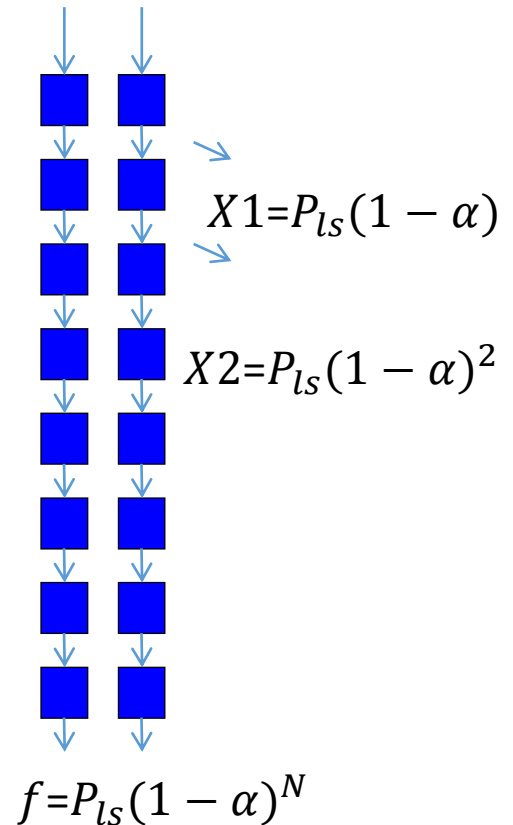
これが次の段の入力になる

$$X2 = P_{ls}(1 - \alpha)^2$$

N段目からの出力は

$$f = P_{ls}(1 - \alpha)^N$$

出力1とする



信号レベル:出力0の時

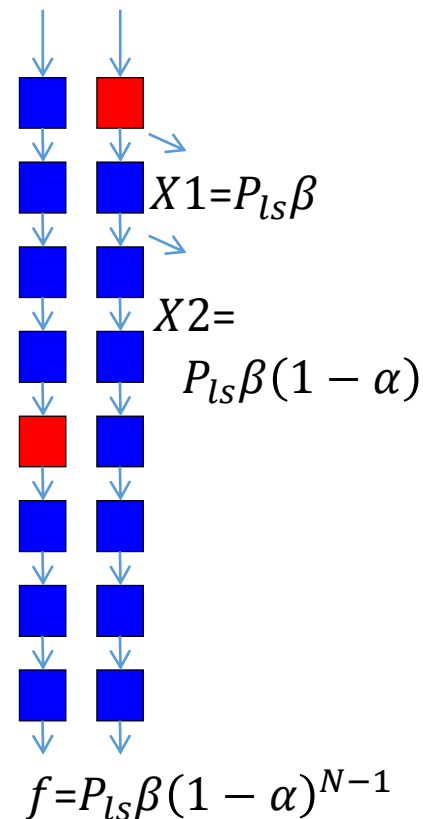
出力が0のとき

出力1のときより、N段目からの出力は光源からの信号強度に透過率のN乗をかければよいことがわかった。

スイッチ1つがオフ動作をするときの出力なので、透過率の1つを漏れ率に変えればよい.

$$f=P_{LS}\beta(1-\alpha)^{N-1}$$

出力0とする



信号レベルの揺らぎ①

出力1のとき

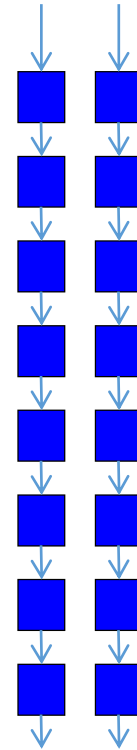
$(1 - (\alpha + \gamma))^N$ を γ に対してマクローリン展開(1次の項まで)

$$(1 - (\alpha + \gamma))^N = (1 - \alpha)^N + N(1 - \alpha)^{N-1}\gamma$$

$$P_{ls}(1 - (\alpha + \gamma))^N$$

$$= P_{ls}(1 - \alpha)^N + P_{ls}N(1 - \alpha)^{N-1}\gamma$$

出力1とする



$$X1 = P_{ls}(1 - (\alpha + \gamma))$$

$$X2 = P_{ls}(1 - (\alpha + \gamma))^2$$

$$f = P_{ls}(1 - (\alpha + \gamma))^N$$

信号レベルの揺らぎ②

$P_{ls}(1 - \alpha)^N + P_{ls}N(1 - \alpha)^{N-1}\gamma$ の標準偏差

相関係数1のとき： $\sigma_1 = P_{ls}N(1 - \alpha)^{N-1}\sigma$

相関係数0のとき： $\sigma_1 = P_{ls}\sqrt{N}(1 - \alpha)^{N-1}\sigma$

σ_1 の単位はパワー、 σ は率

信号レベルの揺らぎ③：出力0の時

出力が0のとき

$(\beta + \gamma)(1 - (\alpha + \gamma))^{N-1}$ を γ に対してマクローリン展開(1次の項まで)

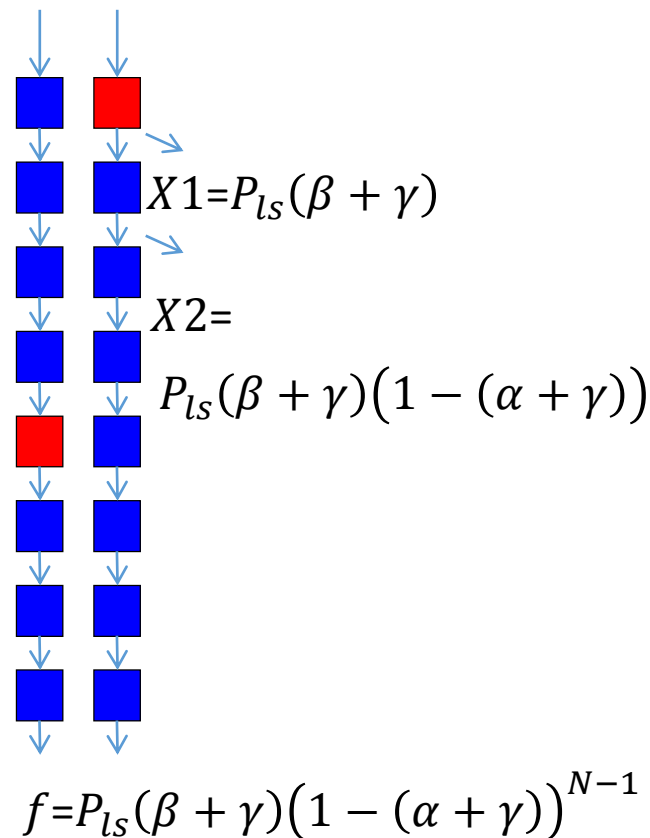
$$\begin{aligned} (\beta + \gamma)(1 - (\alpha + \gamma))^{N-1} &= \beta(1 - \alpha)^{N-1} \\ &+ ((1 - \alpha)^{N-1} - (N - 1)\beta(1 - \alpha)^{N-2})\gamma \\ &= \beta(1 - \alpha)^{N-1} \left(1 + \left(\frac{1}{\beta} - \frac{N - 1}{1 - \alpha}\right)\gamma\right) \end{aligned}$$

$$P_{ls}(\beta + \gamma)(1 - (\alpha + \gamma))^{N-1}$$

$$= P_{ls}\beta(1 - \alpha)^{N-1}$$

$$+ P_{ls}\beta(1 - \alpha)^{N-1} \left(\frac{1}{\beta} - \frac{N - 1}{1 - \alpha}\right)\gamma$$

出力0とする



信号レベルの揺らぎ④

$P_{ls}\beta(1-\alpha)^{N-1} + P_{ls}\beta(1-\alpha)^{N-1} \left(\frac{1}{\beta} - \frac{N-1}{1-\alpha}\right) \gamma$ の標準偏差

相関係数1のとき: $\sigma_0 = P_{ls}\beta(1-\alpha)^{N-1} \left(\frac{1}{\beta} - \frac{N-1}{1-\alpha}\right) \sigma$

相関係数0のとき: $\sigma_0 = P_{ls}\beta(1-\alpha)^{N-1} \left(\frac{1}{\beta} - \frac{\sqrt{N-1}}{1-\alpha}\right) \sigma$

Q値：相関関数1

$$Q \equiv \frac{s_1 - s_0}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{P_{ls}(1 - \alpha)^{N-1}(1 - \alpha - \beta)}{P_{ls}(1 - \alpha)^{N-1}(N + 1 - \frac{\beta}{1 - \alpha}(N - 1))\sigma}$$
$$= \frac{(1 - \alpha)(1 - \alpha - \beta)}{\{(N + 1)(1 - \alpha) - (N - 1)\beta\}\sigma}$$

Q値：相関関数O

$$Q \equiv \frac{s_1 - s_0}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{P_{ls}(1 - \alpha)^{N-1}(1 - \alpha - \beta)}{P_{ls}(1 - \alpha)^{N-1}(\sqrt{N} + 1 - \frac{\beta}{1 - \alpha}\sqrt{N - 1})\sigma}$$
$$= \frac{(1 - \alpha)(1 - \alpha - \beta)}{\{(\sqrt{N} + 1)(1 - \alpha) - \sqrt{N - 1}\beta\}\sigma}$$

パターン検出回路でのQ値

スイッチの透過率を $1 - \alpha$ 、漏れ率を β

透過率と漏れ率の雑音を正規分布と仮定したときの標準偏差を σ とする

$$Q = \frac{(1 - \alpha)(1 - \alpha - \beta)}{\{(N + 1)(1 - \alpha) - (N - 1)\beta\}\sigma}$$

スイッチの制御光強度 P_v と標準偏差 σ は $\frac{1}{P_v} = A\sigma$ (A は比例定数)の関係を満たすので

$$Q = \frac{(1 - \alpha)(1 - \alpha - \beta)AP_v}{\{(N + 1)(1 - \alpha) - (N - 1)\beta\}}$$

受光器の性能と光源の強度

受光器の最小受光感度: P_r [W]

スイッチの透過率を $1 - \alpha$

光源の消費電力: P_{LS} [W]

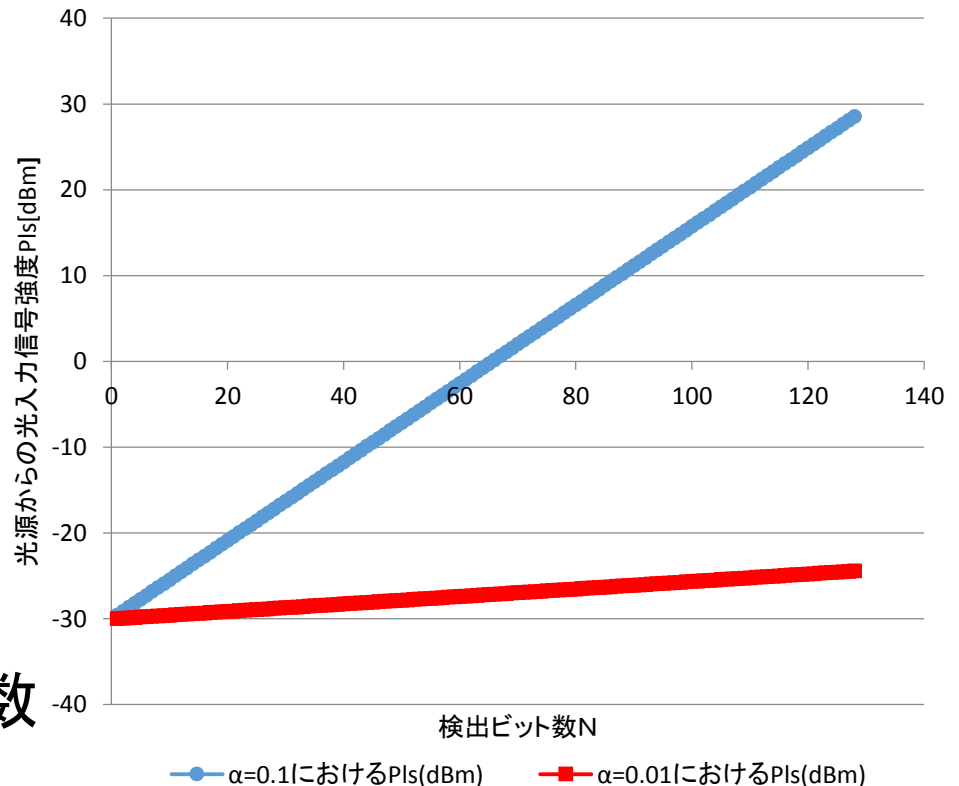
$$P_{LS}(1 - \alpha)^N \geq P_r$$

P_{LS} について整理すると

$$P_{LS} \geq P_r \left(\frac{1}{1 - \alpha} \right)^N$$

光源の消費電力は検出ビット数 N に対して指数関数的に増加

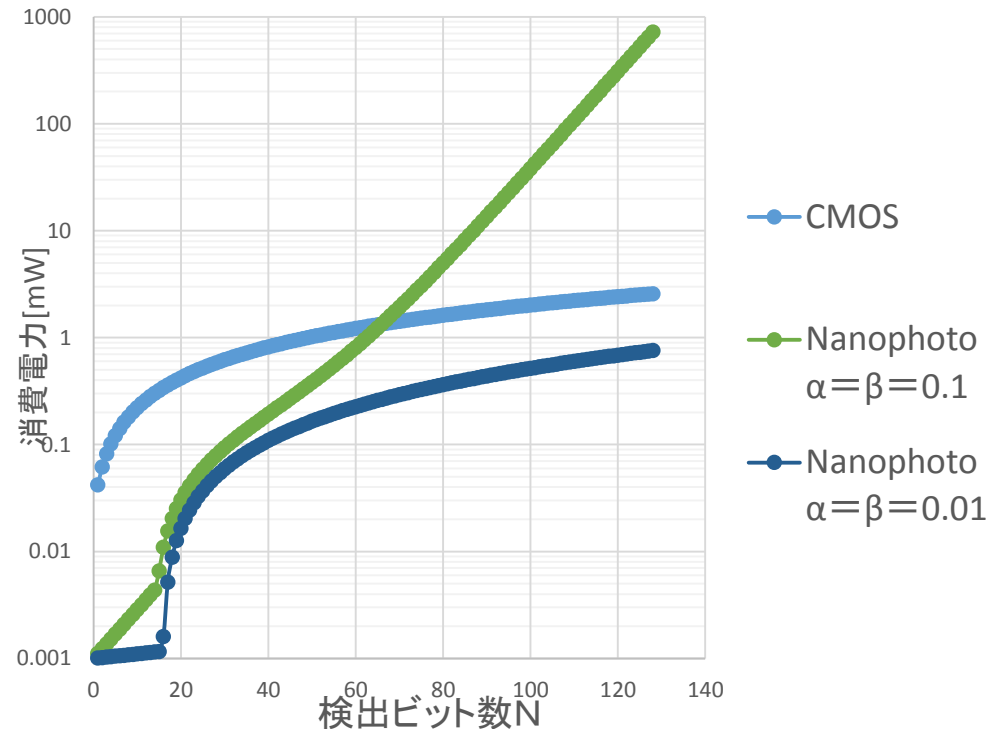
より良い透過率が求められる



提案機構の消費電力

消費電力モデルは次のように書き直せる

$$P_{NP_{total}} = G + M \times P_r \left(\frac{1}{1-\alpha} \right)^N$$



40Gbpsにおける、ナノフォトニックデバイスパターン検出機構とCMOSパターン検出機構の消費電力