

導波路光パラメトリック増幅における高次モードと損失の影響の解析

Numerical analysis of the effects of higher-order modes and losses in waveguide optical parametric amplification

東大院工 ○佐野 由季, 田口 富隆, 小口 研一, 小関 泰之

Univ. Tokyo, ○Yuki Sano, Yoshitaka Taguchi, Kenichi Oguchi, Yasuyuki Ozeki

E-mail: sano@ginjo.t.u-tokyo.ac.jp

導波路を使った光パラメトリック増幅 (OPA) はパルススクイーミングにおいて非常に重要である。しかし、ポンプ光の高次モード成分は基本モードと高次モードの OPA を介して基本モードの雑音を発生させることが予想される。また、導波路中の損失もスクイーミングレベルを悪化させることが予想される。本研究ではその影響を数値解析で明らかにした。

本解析では、以下の 2 種類の OPA が発生すると仮定した。(1) ポンプ光: 基本モード, シグナル及びアイドラ光: 基本モード。(2) ポンプ光: 高次モード, シグナル及びアイドラ光: 基本モードと高次モード。(1), (2) の OPA ゲインを決める定数を g_0, g_1 とし、基本モードと高次モードの消滅演算子を $\hat{a}, \hat{b}$, 基本モードと高次モードの位相不整合を $\Delta k_0, \Delta k_1$, ポンプ光電場の基本モードと高次モードへのカップリング効率を u_0, u_1 とすると,

$$\frac{d}{dz} \begin{pmatrix} \hat{a} \\ \hat{a}^\dagger \\ \hat{b} \\ \hat{b}^\dagger \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -i\Delta k_0 & u_0 g_0 & 0 & u_1 g_1 \\ u_0 g_0 & i\Delta k_0 & u_1 g_1 & 0 \\ 0 & u_1 g_1 & -i\Delta k_1 & 0 \\ u_1 g_1 & 0 & 0 & i\Delta k_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{a} \\ \hat{a}^\dagger \\ \hat{b} \\ \hat{b}^\dagger \end{pmatrix} \quad (1)$$

が成り立つ。式 1 を解くと $\hat{a}(z)$ は複素数 p, q, r, s を用いて $\hat{a}(z) = p\hat{a}(0) + q\hat{a}^\dagger(0) + r\hat{b}(0) + s\hat{b}^\dagger(0)$ とかける。入射基本モードの複素振幅を $x + iy$ とし、それが導波路通過後複素振幅が $x' + iy'$ の基本モードになるとすると以下の式が成り立つ。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Re}(p+q) & \text{Im}(q-p) \\ \text{Im}(p+q) & \text{Re}(p-q) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (2)$$

入射光が真空場だとすると複素平面上での確率密度関数 $P(x, y)$ は $P(x, y) = \frac{2}{\pi} \exp(-2(x^2 + y^2))$ とかけるので、式 2 より x', y' の確率密度関数 $P_a(x', y')$ は

$$P_a(x', y') = \frac{2}{\pi} \exp\left(-\frac{2((\text{Re}[(p-q)(x'-iy')])^2 + (\text{Im}[(p+q)(x'-iy')])^2)}{(|p|^2 - |q|^2)^2}\right) \quad (3)$$

と表される。同様に導波路通過後の入射高次モード由来の基本モードの確率密度関数 $P_b(x, y)$ を考えると、導波路通過後の基本モードの確率密度関数は $P_a(x, y)$ と $P_b(x, y)$ の畳み込みである。

以上の計算方法でスクイーミングレベルを計算した結果を図 1 にしめす。ただし、現在実験で使用中の導波路 [1] のモード解析結果に基づき、位相不整

合の値は $\Delta k_0 = 0 \text{ m}^{-1}$, $\Delta k_1 = 1.67 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$ とした。OPA ゲインが 10 mm の結晶で 10 dB となるように $g_0 = g_1 = 2.30 \times 10^3 \text{ m}^{-1}$ とした。基本モードと高次モードの OPA が起こるときは、スクイーミングレベルの下限が存在することがわかる。

また、損失を真空場へのカップリングとし、導波路中の損失のスクイーミングレベルへの影響を計算した結果を図 2 にしめす。 $\Delta k_0 = 0 \text{ m}^{-1}$, OPA ゲインが 10 mm の結晶で 10 dB となるように $g_0 = 2.30 \times 10^3 \text{ m}^{-1}$ とした。導波路直後で損失が加わったと考えた場合よりも導波路中で損失が起こった場合の方が損失の影響が小さいことがわかる。

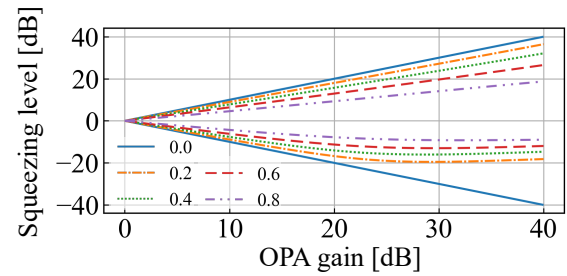


図 1: 高次モードのスクイーミングレベルへの影響。左下の数字はポンプ光強度の高次モードへの結合効率を表している。

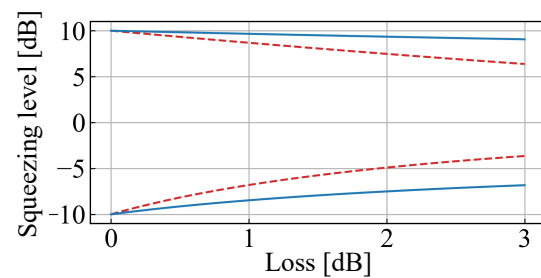


図 2: 導波路中の損失のスクイーミングレベルへの影響。青実線: 導波路中で損失が起こった場合。赤破線: 導波路直後で損失が加わったと考えた場合。

参考文献

[1] Z. Xu *et al.*, CLEO2021, JW1A.44 (2021).

謝辞

本研究は CREST (JPMJCR1872) の支援を受けた。