

スクイズド光発生用 YAG レーザ
YAG Laser for Generating Squeezed Light

笠井 克幸、 石津 美津雄、 占部 伸二、 板部 敏和
Katsuyuki Kasai, Mitsuo Ishizu, Shinji Urabe, Toshikazu Itabe
郵政省 通信総合研究所
Communications Research Laboratory, MPT

The generation of squeezed states is planned in Communications Research Laboratory. Squeezed states of light are generated by degenerate parametric down conversion in an optical cavity which is pumped by the laser. We present squeezed states and Nd:YAG ring laser with high output power and high stability, which is under contemplation.

1. はじめに

近年、光を用いた測定・通信における限界は量子雑音によって決まる量子限界の域に近づき、一つの壁にぶつかっている。例えば、コヒーレント光通信では既に量子限界に2～3 dBの地点に達しており、レーザ干渉計を用いた重力波検出では量子限界を打ち破ることが成功の鍵とされている。この量子雑音の特性は信号自身が持つ量子状態に強く依存しており、量子状態を制御することによって量子雑音を抑制することが可能なのである。この人工的に制御された量子状態はスクイズド状態と呼ばれ、その物理的方法を含めた一般論が1976年にユーエンによって発表されている¹⁾。以後、いくつかのグループによってスクイズド状態の光の実験的検証が始められ、1985年にベル研究所で初めて実験の成功が報告された²⁾。続いて、IBM³⁾、MIT⁴⁾、テキサス大学⁵⁾等でも実験結果が発表された。ここでは、通信総合研究所においてもスクイズド光の発生に関する研究を開始し、それに必要なNd:YAGリングレーザの開発に取り掛かったのでその概要を報告する。

2. スクイズド状態⁶⁾

量子現象が顕著な波であるスクイズド光を取り扱う場合、それを量子力学的に記述することが必要である。量子力学では物理量はヒルベルト空間上の作用素によって表されることが知られている。量子化された光電場の演算子 \hat{E} は、

$$\hat{E} = \varepsilon (\hat{X} \cos \omega t + \hat{Y} \sin \omega t)$$

と表される。但し、 ε は定数である。ここで、 X 、 Y は直交位相振幅演算子と呼ばれ、その量子揺らぎは次の不確定性原理に従う。

$$\langle (\Delta X)^2 \rangle \langle (\Delta Y)^2 \rangle \geq 1/16$$

上式の等号を満足する光の量子状態は最小不確定状態と呼ばれる。最小不確定状態の中で $\langle (\Delta X)^2 \rangle = \langle (\Delta Y)^2 \rangle$ を満たす状態はコヒーレント状態であるが、その他に

$$\langle (\Delta X)^2 \rangle < \langle (\Delta Y)^2 \rangle \quad \text{or} \quad \langle (\Delta X)^2 \rangle > \langle (\Delta Y)^2 \rangle$$

を満たす多くの状態が存在し、スクイズド状態と呼ばれる。 X 、 Y の位相空間におけるスクイズド状態の例を Fig.1に示す。 X 成分に着目するとコヒーレント状態における量子限界以下の小さな揺らぎが得られることが分かる。

3. スクイズド光の発生

実際にスクイズド状態の光を得るには非線形光学効果を用いる。その中でも有望なのは縮退パラメトリック発振と呼ばれる過程で、非線形結晶(MgO:LiNbO₃)を閉じ込めた光共振器に周波数 ω_p (0.53 μ m)の励起光を注入することにより出力に $\omega_p/2$ (1.06 μ m)のスクイズド光が得られる。

発生したスクイズド光は励起光を局部発振光として用いる平衡型ホモダイン検波器で検出される (Fig.2参照)。局部発振光と信号光は 50-50%のビームスプリッタでそれぞれ等分され光検波された後、差動合成される。出力は信号光の量子雑音のみに応答し、局部発振光の量子雑音は抑圧される。テキサス大学のグループは Nd:YAG レーザ (SHG) を励起光源として、この方法でスクイズング 50%のトップデータを出している⁵⁾。

4. Nd:YAGリングレーザの構成

上述の方法でより大きなスクイズングを得るには、励起光として高出力・高安定度のレーザ光が必要とされる。励起光の振幅・位相揺らぎはスクイズド状態を破壊する方向に働くことが報告されている⁸⁾。また、その強度揺らぎによって光パラメトリック共振器内のLiNbO₃内に線形吸収が起こり結晶内に温度変動が起こる。LiNbO₃は温度位相整合を取るため温度変化により共鳴点がずれてしまうのである。スクイズド光発生用の高出力・高安定度のYAGレーザはリングレーザによって構成される (Fig.3参照)。単方向性リングレーザでは、定在波型レーザで問題となる空間的なホールバーニングを避けることができる。また、Nd:YAGロッド内に生じる熱変動による影響を極力避けるように設計パラメータ (全光路長、ミラーM4の焦点距離、ロッドの位置等) は選ばれる。更に、リファレンスキャビティ (C1)、位相検出器 (P.S.D)、高圧アンプ (H.V.Amp)、PZTによりサーボループが組まれ能動的安定化が計られる。現在、計画中のYAGリングレーザではCW、シングルモードで出力10W以上、さらに安定度としては光パラメトリック共振器 (キャビティ長:100mm、フィネス 100) の共振幅の 1/100程度の 100~200kHz rms linewidthを目標としている。

5. おわりに

計画では、YAGリングレーザの開発が済み次第、光パラメトリック共振器及び検出系の開発に取り掛かり、それらを結合してスクイズド光を発生させる予定である。

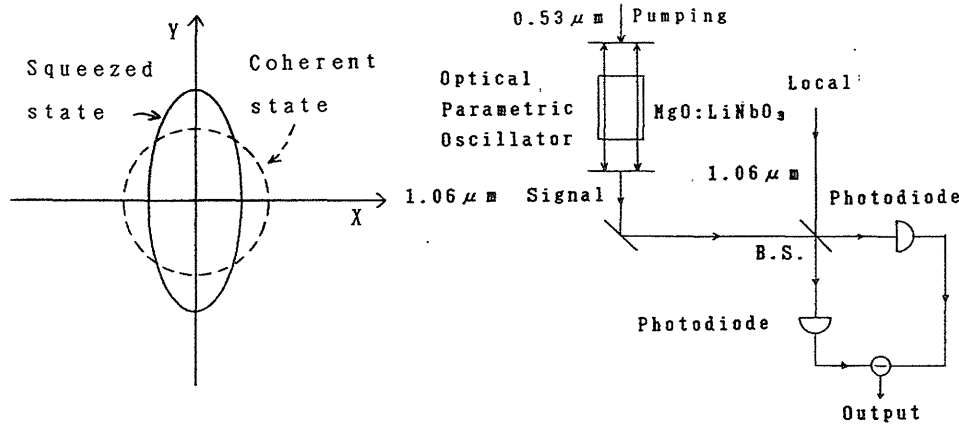


Fig.1 Squeezed state

Fig.2 Squeezed-state generation and detection

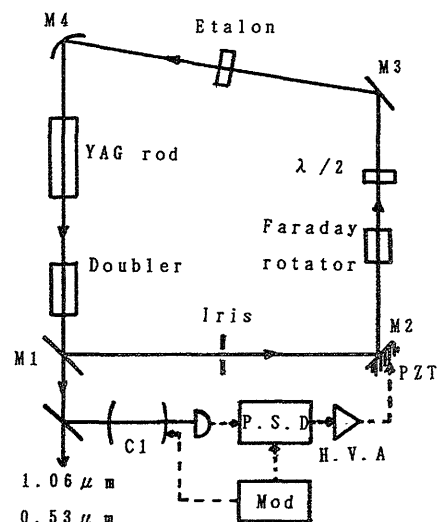


Fig.3 Nd:YAG ring laser

<参考文献>

- 1) H.P.Yuen, phys. Rev. A13, 2226 (1976)
- 2) R.E.Slusher, L.W.Hollberg, B.Yurke, J.C.Mertz and J.F.Valley, Phys. Rev. Lett. 55, 2409 (1985)
- 3) M.D.Levenson, R.M.Shelby, A.Aspect, M.Reid and D.F.Walls, Phys. Rev. A32, 1550 (1985)
- 4) M.W.Maeda, P.Kumor, J.H.Shapiro, J. Opt. Soc. Am. B4, 1501 (1987)
- 5) L.A.Wu, H.J.Kimble, J.L.Hall and H.wu, Phys. Rev. Lett. 57, 2520 (1986)
- 6) 日本物理学会編: 量子力学と新技術 (培風館)
- 7) K.C.Peng, L.A.Wu and H.J.Kimble, Appl. Opt. 24, 938 (1985)
- 8) K.Wo'dkiewicz and M.S.Zubairy, Phys. Rev. A27, 2003 (1983)