

波長可変Nd:ガラス・レーザー・レーダー

Tunable Nd: Glass Laser Radar

小林喬郎 D.J. Booth 稲場文男

Takao Kobayashi

Humio Inaba

東北大学電気通信研究所

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

1. はじめに

近赤外域の固体レーザーとして従来良く知られているNd³⁺ガラス・レーザーは、大出力特性や超短パルス特性を有しており、これらの特徴を利用する応用分野が主に開拓されて来た。最近、筆者らはNd³⁺ガラス・レーザーの蛍光スペクトル幅が広いことに着目し、広帯域に発振波長が同調でき、スペクトル幅が狭く、かつ安定な発振が可能であることを実験的に明らかにした^{1,2)}。

本文では、まずこのNd³⁺ガラス・レーザーの波長可変特性を示すと共に、その発振波長域内での水蒸気分子の振動・回転吸収スペクトルの実験的検討を行う。また、その結果にもとづいて大気中の水蒸気密度(湿度)の遠隔測定のための差分吸収方式レーザー・レーダーを開発したので³⁾、その構成と動作特性の一部を報告する。

2. Nd³⁺ガラス・レーザーの波長可変特性

図1にSilicate系とPhosphate系ガラスを母体とするNd³⁺イオンの蛍光の相対スペクトル分布を示す。中心波長1.055μmのPhosphate系Nd³⁺ガラスは利得が大きいがスペクトル幅は狭い。これに対してSilicate系Nd³⁺ガラスは中心波長が1.064μmと長波長に変移しており、スペクトル幅が25~35nmと広いことが特徴である。そこで、広い同調特性を得ることを目指して、Silicate系Nd³⁺ガラスの光共振器中にエタロンを挿入して発振波長の選択特性を調べた。図2に実験装置の構成と使用したエタロンの特性を示す。

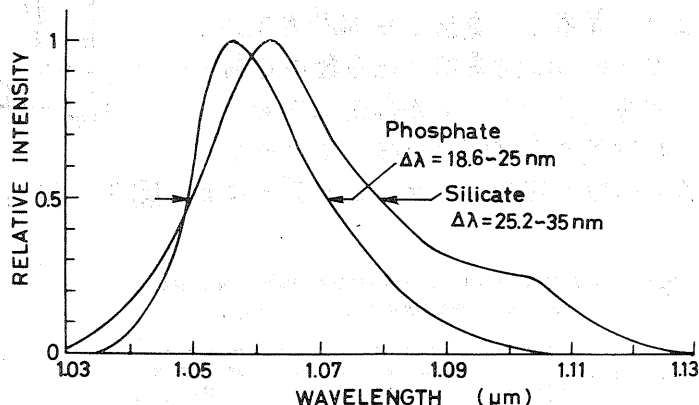


図1 Silicate系とPhosphate系Nd³⁺ガラスの蛍光のスペクトル分布(相対強度)

図3は、エタロン1のみを挿入して2種類

のSilicate系Nd³⁺ガラスの励起エネルギーをパラメータとした発振出力の波長可変特性を示す。Nd³⁺ガラス・ロッドは直径6mm、長さ75mmの寸法のO.I.社製ED-2とHoya社製LSG-91Hの2種類について、通常発振とQスイッチ発振(ED-2のみ)の出力分布を示す。通常発振では、しきい値の7倍の294Jの励起入力ですべてのロッドでもΔλ=361Å(Δν=315cm⁻¹)の波長可変幅が得られ、従来報告されている最大値Δν~150cm⁻¹よりもかなり広いことが判った。さらに、Free Spectral Range FSR=8cm⁻¹のエタロン2を挿入して、スペクトル幅0.2Åの安定な出力が得られた。この値は、エタロン2の温度0.01°Cの精度で制御することによって可能となったものである。

3. 水蒸気分子の吸収スペクトル分布

H₂O分子は赤外から可視域にわたり非常に多数の振動・回転吸収スペクトルを有していることが

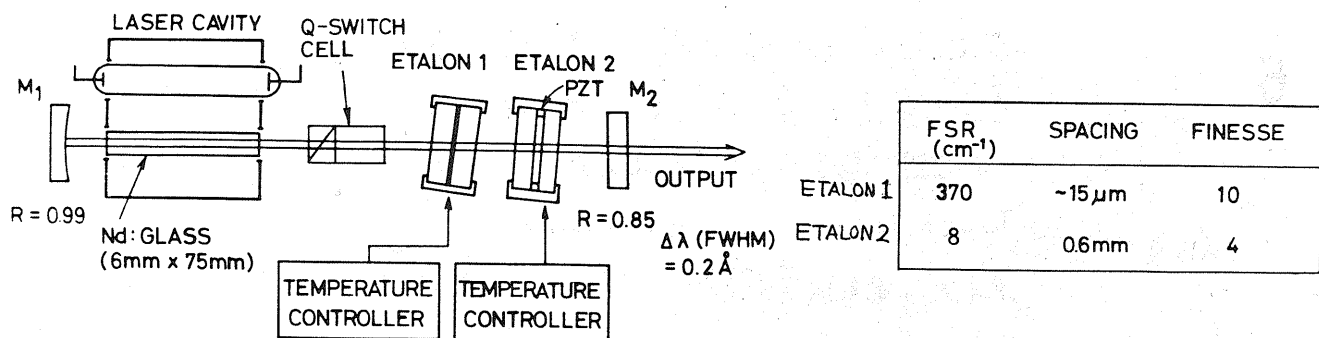


図2 波長可変 Nd³⁺:ガラスレーザーの基本的構成とエタロンの特性

知られている。特に、地球大気中の水蒸気による太陽光の吸収スペクトルは古くから詳細に調べられており、図4に1.08 μm 帯付近の測定例を示す⁴⁾。図中の水蒸気以外の吸収線は太陽光に起因するものである。表1に、図3で得られた Nd³⁺:ガラスレーザーの発振波長域内に存在する H₂O の吸収線の中心波長と強度、下準位エネルギー、遷移レベルの同定の結果を示す⁴⁾。この表より、筆者らの見出した Nd³⁺:ガラスレーザーの同調波長域には多数の振動-回転吸収スペクトルが存在しており、吸収強度も広範囲に分布しているため、差分吸収方式のレーザーレーダーによ

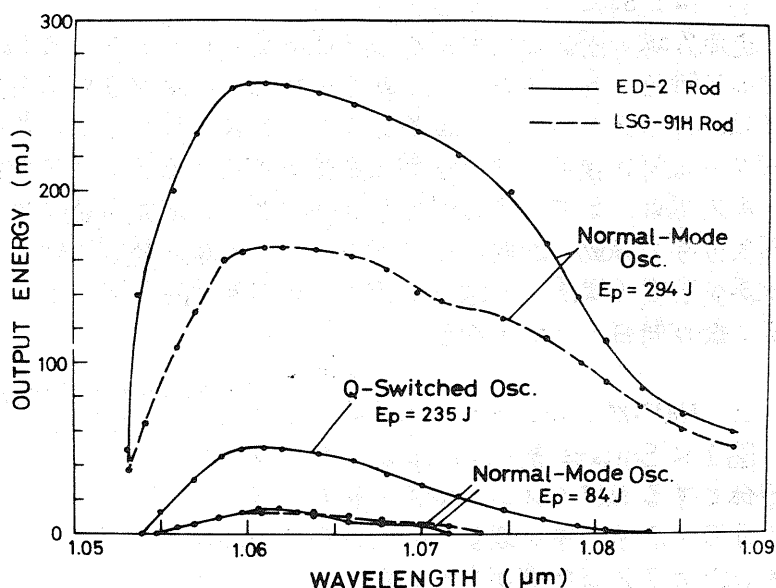


図3 Silicate系 Nd³⁺:ガラスレーザーの発振波長可変特性

表1 SELECTION OF SOME OF H₂O VAPOUR ABSORPTION LINES WITHIN TUNING RANGE OF Nd:GLASS LASER

WAVELENGTH (Å)	LINE STRENGTH (cm ⁻¹ /cm ² g ⁻¹)	RELATIVE STRENGTH	LOWER LEVEL ENERGY (cm ⁻¹)	ABSORPTION LINE (ν ₁ ν ₂ ν ₃) J _u - J _v
10860.07	0.91	71	285.43	(012) 4 ₃ -3 ₃
10859.93	0.30	23	285.23	(012) 4 ₄ -3 ₂
10857.30	0.44	34	300.35	(012) 5 ₁ -4 ₋₁
10834.02	0.31	24	383.85	(012) 5 ₂ -4 ₂
10832.12	0.62	48	382.52	(012) 5 ₃ -4 ₁
10799.58	1.00	78	488.10	(012) 5 ₅ -4 ₃
10781.56	0.04	3	326.64	(012) 6 ₂ -5 ₋₄
10779.17	0.09	7	842.36	(012) 8 ₁ -7 ₋₁
10772.86	0.18	14	648.97	(012) 7 ₁ -6 ₋₁
10771.96	0.40	31	610.35	(012) 6 ₃ -5 ₃
10771.74	0.10	8	610.12	(012) 6 ₄ -5 ₂
10744.67	0.22	17	756.75	(012) 7 ₃ -6 ₁
10743.47	0.28	22	742.10	(012) 6 ₅ -5 ₅
10720.81	0.08	6	888.61	(012) 7 ₅ -6 ₃
10699.52	0.06	5	888.60	(111) 7 ₆ -6 ₃
10656.05	0.03	2	542.91	(012) 7 ₆ -6 ₋₇
10625.07	0.04	3	586.26	(012) 8 ₃ -7 ₋₇
10543.65	0.01	1	447.24	(012) 7 ₁ -6 ₋₅

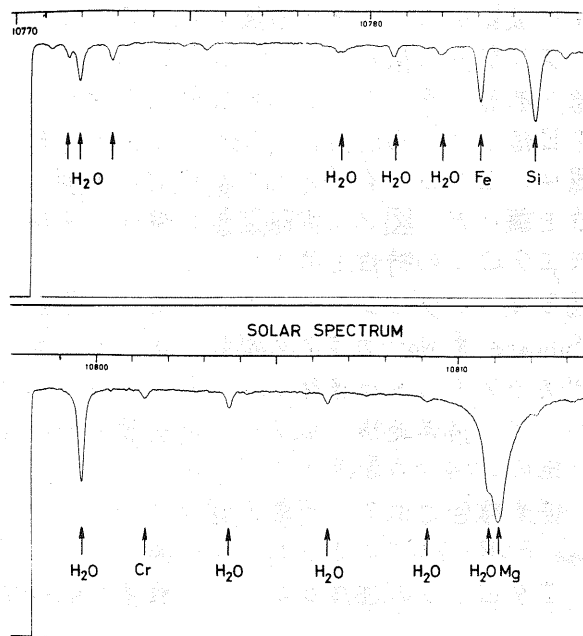


図4 大気中の水蒸気による太陽光の吸収スペクトルの高分解能分光測定結果 (文献4)

る大気中の H_2O 密度の測定に適していることが判る。

工 匠 $i \frac{2}{3}$
 22.34 Hz
 radio meter
 (T₀(h) の 12.2%)

4. Nd^{3+} :ガラスレーザーを用いる差分吸収方式レーザーレーダー

上記の検討に基づき、 Nd^{3+} :ガラスレーザーを用いた差分吸収方式レーザーレーダーを試作し、大気中の H_2O 密度の遠隔測定のための基礎的実験を行った。

図5に、その装置の基本的構成を示す。レーザー光はミラーを介して大気中に送出される。受信光は口径30cmの反射望遠鏡で集光され、小型モノクロメータを通して、S-1特性のフォトマル(HTV, R316)で検出される。受信信号はトランジェントレコーダ(Data Lab. DA 905)に記憶され、データ処理装置でこの出力値を送信光エネルギーモニタ出力値で割算して、レーザー出力の変動を補正した大気吸収スペクトルがレコーダに記録される。まず、レーザーを通常発振動作モードで、約500mの距離にある建物を標的として、途中の大気中の H_2O の吸収量を測定した。

図6(a)は、波長 $1.0800 \mu m$ 付近の Nd^{3+} :レーザーの発振波長を変えて測定した大気吸収スペクトルを示す。また、(b)は大気中の H_2O による太陽光の吸収スペクトルの測定結果⁴⁾である。両者を比較して中心波長が一致していることから、(a)での吸収スペクトルは H_2O に起因するものであることが明らかである。ただし、(a)のスペクトル幅は $0.5 \text{ \AA}$ であり、(b)での幅 $0.2 \text{ \AA}$ に比べてかなり広がっている。これはレーザー光のスペクトル幅 $0.2 \text{ \AA}$ に比べても大きな値であり、この差異についての詳細は検討中である。

また、Qスイッチ動作を行うことにより、大気中のエアロゾルを散乱体として用いて、距離分解能を持つ差分吸収方式レーザーレーダー(DIAL)が可能となる。図7に、DIAL方式で距離分解能 $L=100 \text{ m}$ 、 H_2O 密度測定精度 $\varepsilon=10\%$ を得るために必要なレーザー出力値の測定距離に対する関係の計算結果を示す。視程 V と測定回数 n をパラメータとし、最適吸収強度の条件 $N\sigma R=1$ (N :密度、 σ :吸収断面積、 R :距離)を仮定している。この検討結果より、

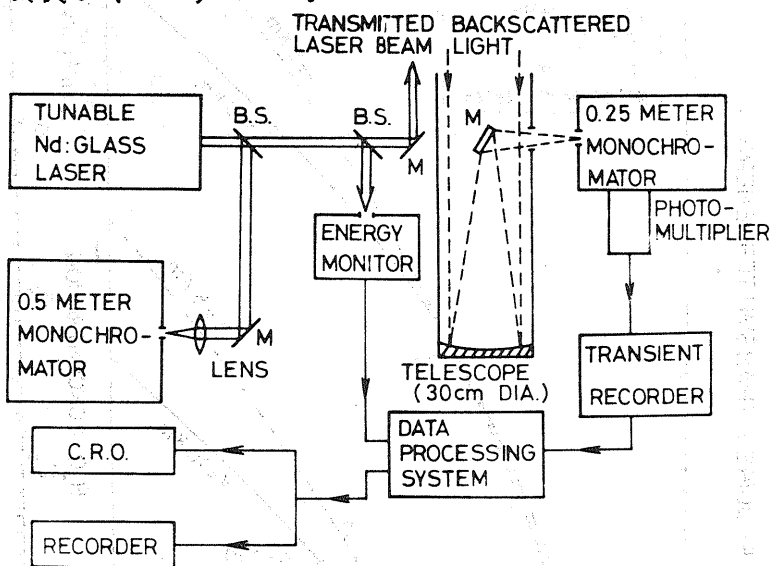


図5 大気中の水蒸気測定のための差分吸収方式レーザーレーダーの構成

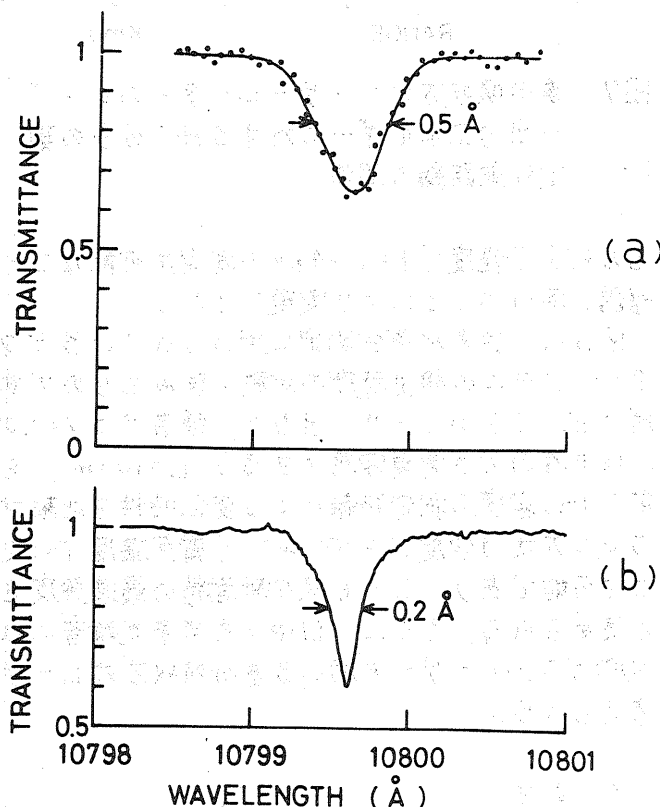


図6 大気中の水蒸気の吸収スペクトルの測定結果。(a) $R=500 \text{ m}$ の長光路の Nd^{3+} :ガラスレーザーによる測定結果。(b) 太陽光の H_2O による吸収スペクトル(文献4)

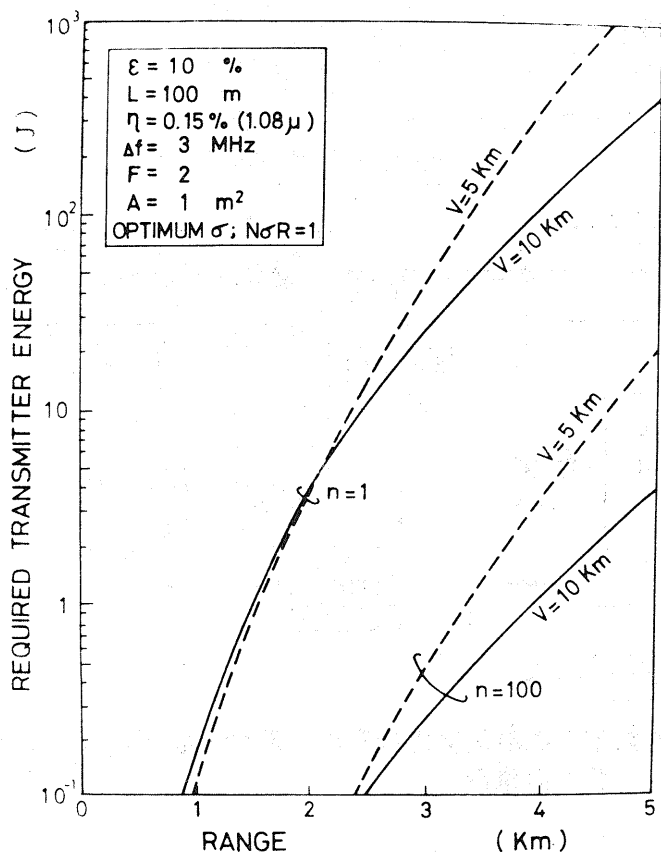


図7 差分吸収方式レーザーレーダーのレーザー出力エネルギーに対する H_2O 分子の測定可能距離の関係

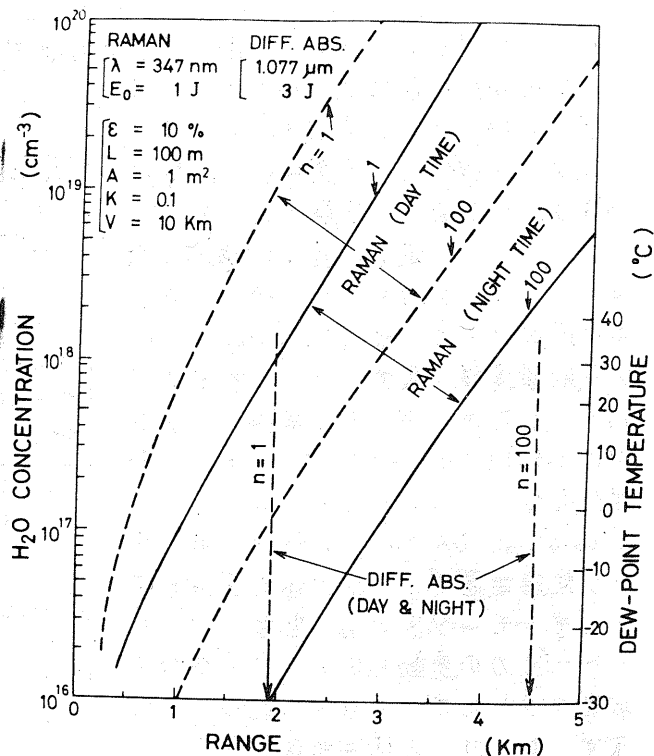


図8 ラマン散乱方式および差分吸収方式レーザーレーダーによる水蒸気の測定感度の比較

出力約1 J程度で $R=1\sim 4$ kmの測定が可能なが判る。この出力値は発振器以外に1~2段の増幅器を用いることにより実現できよう。

図8は、従来水蒸気測定に用いられているラマン散乱方式と上記のDIAL方式の両レーザーレーダーシステムの検出感度の比較を試みたものである。前者では $\lambda=347$ nm (ルビーのSH)の紫外域で $E_0=1$ Jのレーザー出力を、後者では $\lambda=1.077$ μ m 付近で $E_0=3$ Jを仮定している。(技術的には後者の方が実現容易である) $L=100$ m, $\varepsilon=10$ %, 受信鏡面積 $A=1$ m²とした場合の検出可能な H_2O 密度の測定距離による変化特性を比較すると、図8より、例えば $n=100$ パルスの測定では、ラマン方式は密度 $N \approx 10^{17}$ cm⁻³ (露点温度 $T=0^\circ$ C)で $R_{max}=2$ kmに対し、DIALでは $R_{max}=4.5$ kmまで可能であり、しかも吸収断面積の最適強度を選定すれば広い密度に対して測定可能であることが認められる。さらに、日中でも背景光雑音にほとんど制限されない検出感度を得られる点で、 Nd^{3+} :ガラスレーザーを用いる差分吸収方式レーザーレーダーは実用的に優れた特徴を有していると考えられる。

5. むすび

以上、 Nd^{3+} :ガラスレーザーの広い波長可変特性を明らかにし、さらに、これを利用した大気中の水蒸気測定のための差分吸収方式レーザーレーダーの基本的特性について検討した。今後、高出力で小型の Nd^{3+} :ガラスレーザーの製作を進めることによって、本方式レーザーレーダーの実用化が期待される。

参考文献 1) D.J. Booth, 小林, 福嶋: 応用物理学会予集 15p-A-3 (1977-10) 2) D.J. Booth, T. Kobayashi, and H. Inaba: Opt. Commun. (投稿中)
3) D.J. Booth, T. Kobayashi, and H. Inaba: 8th Intern. Laser-Radar Conf. Abstracts, No.78 Philadelphia (June 1977) 4) J.W. Swenson et al. "The Solar Spectrum from λ 7480 to 12016," Institute d'Astrophysique de l'Université de Liege (1970)