特集

風向・風速測定のためのコヒーレント・ドップラー・ライダー

浅井和弘*・石津美津雄**・板部敏和**

(1989年3月10日 受理)

Coherent Doppler Lidar for Wind Velocity and Direction Measurements

Kazuhiro ASAI*, Mituo ISHIZU** and Toshikazu ITABE**

(Received March 10, 1989)

As a remote wind sensor having an ability of three-dimensional wind sounding, a coherent Doppler lidar operating in the eye-safe infrared wavelength range of 9-10 μ m has been successfully developed in ground-based and airborne applications for a variety of scientific research purposes. These lidar systems are capable of measuring a wind velocity and direction by detecting the radiation scattered from aerosols, found even in clearest atmospheric air, and by analyzing Doppler frequencies shifted by these moving with the wind. This paper describes a coherent lidar system and its applications.

Key Words: Doppler, Lidar, Wind, Space, Heterodyne.

1. はじめに

風の速度や方向に対する情報は、我々地球上で生活を営むものにとって気温、気圧とともになくてはならない天気に関する重要な気象パラメータの一つである。一方、近年の人間による社会活動の発展は、我々の周りの二酸化炭素やメタンなどの増加による地球の温暖化、フロンガスや窒素酸化物などの増加による成層圏オゾン層の破壊、太平洋域でのエルニーニョ現象など、地球規模での気候変動の問題を引き起こしつつある。従って、これ以上地球環境を悪化

させないためにも、地球の環境保全のために大気のより精密な監視体制の確立と同時に、気象パラメータ測定のための新しい方法の研究開発が強く望まれている。

よく知られているように、波長10cmのマイクロ波レーダーは散乱粒子として雨滴を使って嵐の構造や発達状況に関するデータを得ることができたり¹⁾、また、ある特殊な条件のもとではクリヤ・エア内での密度ゆらぎによって生じる信号の検出などが可能である²⁾。レーダーの送信器の周波数がより高いライダーの場合、最新のマイクロ波レーダー技術をもってしても測定でき

* 東北工業大学通信工学科 (〒982 仙台市八木山香澄町35-1)

** 郵政省通信総合研究所光計測研究室 (〒184 小金井市貫井北町4-2-1)

* Department of Telecommunication Engineering, Tohoku Institute of Technology (35-1, Yagiyama, Kasumicho, Sendai 982)

** Optical Applications Research Section, Communications Research Laboratory, Ministry of Posts and Telecommunications(4-2-1, Nukui-kitamachi, Koganei, Tokyo 184)

Fig. 1 Concept of a coherent Doppler Lidar.

なかったような大気現象を簡単に捕らえることができる。一般に、どんなにきれいな空気の状態の場合でも必ずエアロゾル（浮遊ふんじん）はあり、このエアロゾルは風によって大気中を時々刻々移動している。それ故、風に漂うエアロゾルによって散乱されたレーザー光のドップラー偏移周波数の解析から風の数値成分を推測することが可能となる³⁾。これが、本文で紹介するコヒーレント・ドップラー・ライダーである。

このコヒーレント・ライダーは、風の数値や方向の遠隔測定ができるばかりではなく、空気がきれいな状態に発生する擾乱（CAT: Clear Air Turbulence）さえも検出が可能である。まず、2. では原理ならびに送信機として使用される単一周波数レーザーについて解説をし、3. において現在までに開発されている欧米でのドップラー・ライダー装置の現状をまとめ、最後に現在米国宇宙局（NASA）を中心に計画されている地球規模での風の観測を行うスペース・コヒーレント・ドップラー・ライダーについて紹介する。

2. ドップラー・ライダー・システム

2.1 原理

一般に、塵などのエアロゾルにレーザー光を照射すると、ミー散乱効果により、強い散乱現象が生じる。それと同時に、もしこれらのエアロゾルが風の影響で大気中を動いているならば、散乱光の周波数はドップラー効果によりわずかに変化する。したがって、この散乱光周波数のスペクトル分析を行うことにより、風向、風速など風に対する情報が得られる。

Fig. 1 は、風向・風速測定のためのコヒーレント・ドップラー・ライダーの原理を示す。このライダー・システムの心臓部は、精密に周波数安定化されたマスター・レーザーである。ビーム・スプリッターで分けられたマスター・レーザー光の一部は、受信散乱光をヘテロダイン検波するときのローカル光として使われる。残りのレーザー光は、送信レーザー光の“種”として、パルスレーザーに入れられる。マスター・レーザーの発振周波数 F_0 より Δf のオフセットをかけられたパルス・レーザーの周波数を F_1 とする。このレーザー出力は、送信望遠鏡を通して大気

に照射される。大気中に浮遊しているエアロゾルの動きは、大気の流れすなわち風速にほぼ等しく、エアロゾルからの散乱光は、風速を V_w 、レーザーの波長を λ とすると下のようなドップラーシフト f_D を受ける。

$$f_D = 2 \cdot V_w / \lambda \quad (1)$$

したがって、受信散乱光の周波数は $F_1 + f_D$ となる。受信望遠鏡で集光された散乱光は、ミキサー上でローカル光と重ね合わされヘテロダイン検波された後、 $\Delta f + f_D$ の周波数成分を有する電気信号に変換される。この電気信号はただちに周波数分析器に送られるが、解析結果より風に関する情報 V_w が得られる。周波数解析法には、マイクロ波ドップラー・レーダーにおいてよく使われている二つの受信パルス間での複素 covariance から周波数を推測するパルス・ペア法⁴⁻⁵⁾、SAW (Surface Acoustic Wave) フィルタ法⁶⁾、光音響偏向器とリニヤ・アレイ検出器を組み合わせた方法⁷⁾、また近年のコンピュータ技術の発展にともなって可能になった FFT 法などがある。

ライダー・システムの光軸が固定されている場合は、光軸成分の風の情報しかえられない。それ故、風の速度・方向に対する2次元プロファイルの測定は、マイクロ波レーダーの分野でも使われている送受信軸の仰角を一定にして方位方向で1回転させるコニカル・スキャンニング法を用いて行われる⁸⁻⁹⁾。各方位毎に得られた軸成分の風速はコンピュータ内で水平方向の速度と方向に計算処理された後、CRT上にVAD (Velocity Azimuth Display) 表示される。

2.2 周波数安定型パルスレーザー

風向・風速測定時の精度を決定づけるものは、使用するパルスレーザーの発振周波数がいかに安定であるにかかっている。したがって、このライダーの心臓部である周波数安定形パルスレーザーの実現のためにいままで多くの努力がなされてきている。現在のところ、Fig. 2 が示

Fig. 2 Techniques for a single frequency pulse laser using frequency stabilized master laser.

すような4種類が提案され、これらのレーザーを用いたドップラー・ライダーの実験が行なわれている。

第一の方法は、周波数安定化したマスター・レーザーと後段の高利得アンプの組合せで周波数の安定化された高出力パルス光を得る方法である。この方法には、(a)で示されるようにcwレーザー出力をE.O.変調器や高速光チョッパでチョッピングした後、cwレーザーアンプで必要なエネルギーにまで増幅する方式と、(b) cwレーザーと高速繰り返しパルス・レーザーアンプとを組み合わせたものがある¹⁰⁻¹²⁾。第二の方法は、注入同期型方式と呼ばれるもので、周波数安定化されたcwレーザーの出力を“種”として、パルス・レーザーに注入しパルス・レーザーの発振周波数を“種”周波数に同期させる¹³⁻¹⁵⁾。3番目の方法は、(d)に示されるようなハイブリッド型TEレーザーと呼ばれるもので¹⁶⁻¹⁸⁾、一つの共振器の中にcwレーザーとTEレーザーを設置してある。熱的な共振器

長の変化は $c w$ レーザーの出力と、外部に設置してあるマスターレーザーの出力のビート周波数変化を監視して最終的にパルス光の周波数を安定化する方法である。

3. 実際のライダー装置

ドップラー・ライダーによる風の測定は、初め He-Ne レーザーや Ar レーザーを光源に使用して行われたが¹⁹⁾、現在ではコヒーレント・ドップラー・ライダーと言えば CO_2 レーザーを光源に使っている装置のことをさす。コヒーレント・ドップラー・ライダーは大きく分けると、1) $c w$ ドップラー・ライダー、2) パルス・ドップラー・ライダーの二つに分類することができる。以下、それぞれについて述べる。

3.1 $c w$ ドップラー・ライダー

この方式は、化学工業などの分野で広く使われている液体の流速を測るレーザー流速計(LDV: Laser Doppler Velocimeter)の原理とまったく同じで、液体に代わって測定対象物がエアロゾルになっただけである。初期の風速測定用ドップラー・ライダーの研究・開発はパルス・レーザーの周波数安定法やパルス光のヘテロダイン検波技術が確立されていなかったため、主

に $c w$ CO_2 レーザーを用いたこの方式が多かった。

1970年、Huffacker は、クリヤ・エアからの信号の周波数解析を行い、初めて大気風の測定に成功した²⁰⁾。それ以後、米国大気海洋研究所(NOAA)、NASA マーシャル飛行センター(MSFC)を中心に境界層内での風向・風速の測定^{8,21-22)}、航空機によるクリヤ・エア擾乱(CAT)や雷雲の解明手段として研究が進められた²³⁻²⁵⁾。一方、ヨーロッパでも英国王立信号・レーダー研究所(RSRE)や西独航空宇宙局(DFVLR)などが同様な研究を行っている²⁶⁻²⁸⁾。

この $c w$ ドップラー・ライダーは $c w$ レーザーだけを用いるため装置自体を小型に且つ簡便にすることができ、野外実験などには適している。しかしながら、最大測定可能距離がおおよそ 1000 m と短くまた距離分解能が低い(たとえば、距離 500 m に対し分解能 ± 150 m 程度⁹⁾)。

3.2 パルス・ドップラー・ライダー

TEA- CO_2 レーザーの出現などパルス CO_2 レーザーの性能が向上したのに伴い、前述の $c w$ ドップラー・ライダーの持つ短所を解決するために約 10 年位前から研究され始められたのがこのパルス・ライダー方式である。この方式の場

Fig. 3 Wind profiles measured with a coherent doppler lidar (from Ref. 29).
(a) velocity vs. altitude; (b) direction vs. altitude.

合、光源としてのレーザーは2.2 で述べたように非常に複雑な構成となるため、ライダー装置もより大型でかつ複雑化してしまう欠点がある。しかし、大気中に発射する送信レーザー光は、後段のパルス・レーザーアンプで十分なまでにエネルギーを高めることができるので、この方式のシステムの多くは、最大測定距離5 km程度の性能を有している。Fig. 3は NOAAのライダー装置で得られた風向・風速の測定例である。

詳しくは、4のスペース・コヒーレント・ライダーで述べるが、近年このコヒーレント・ドップラー・ライダーをスペース・シャトルや人工衛星などに搭載し、宇宙から地球規模で風の動きを監視しようと計画が進められている。この場合、数百kmの上空からレーザー光線を発射し、対流圏、下部成層圏にあるエアロゾルからの散乱光を再び衛星上で受光せねばならないため、少なく見積ってもおおよそ1 Jのレーザー・エネルギーが必要となる。また、地上の実験施設と違い人工衛星が有する電力容量には限りがあるため、レーザーの発振効率が低いことが強く求められる。従って、現在の研究方向としては、最も効率がよく、且つ高出力が得られる

注入同期型 TEA CO₂レーザーを光源に用いたライダー・システムの開発に目が向けられている。Table Iは、代表的なパルス・コヒーレント・ドップラー・ライダー装置の性能比較をまとめたものである。表が示すように、現在のところ実働しているシステムは米国のみであるが、筆者らも昨年度より、科学技術庁振興調整費により最大測定距離4 km、距離分解能375 m、測定精度 ± 2 m/sの性能を目標としたコヒーレント・ドップラー・ライダーの研究・開発に着手している^{7,32)}。参考のために、筆者らが現在開発中のコヒーレント・ライダー装置についての諸元をTable IIに示す。現在、注入同期型レーザーの周波数安定化の基礎実験やドップラー周波数解析のためのハードおよびソフトウェアの整備を進めている。

4. スペース・ライダーへの展望³³⁾

地球規模での風向・風速に対する情報は、我々地球上で生活を営むものにとってなくてはならない天気に関するパラメータの一つである。現在では、気象衛星などの地球観測衛星からのデータを基に数値気象予測モデルをたて、5日

Table I Characteristics of coherent doppler lidars systems for wind measurement.

Laboratory *1	Laser *2	Energy/Pulse	Pulse Rep. Rates	Data Analysis
NASA/MSFC ³²⁾	MOPA	14mJ	110 Hz	Pulse Pair Algo.
NASA/LaRC ³¹⁾	TEA injection lock	750mJ	20Hz	
NOAA ³³⁾	hybrid TEA	100mJ	10Hz	Pulse Pair Algo.
JPL ³³⁾	TEA injection lock	1-3 J	0.1Hz	F F T
AFGL ³³⁾	TEA injection lock	1 J	50Hz	F F T

* 1 NASA/MSFC: Marshall Space Flight Center

NASA/LaRC : Langrey Research Center

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

J P L : Jet Proplulsion Laboratory

AFGL : Air Force Geophysics Laboratory

* 2 MOPA : Fig. 2. (a)

TEA injection lock : Fig. 2. (c)

hybrid TEA : Fig. 2. (d)

Table II System parameters of Japanese coherent doppler lidar.

Parameter of Coherent Lidar System

Transmitter:	
TEA CO ₂ Laser	(Injection Locked Type)
Laser Output	200 mJ/Pulse
Laser Wavelength	9-11 μ m
Pulse Rep. Rate	300 Hz
Pulse Width	2 μ sec.
Optics	(Off-axis Telescope)
	25 cm ϕ , f = 200 mm
Receiver:	
Optics	(Newtonian Telescope)
	25 cm ϕ , f = 200 mm
Mixer	PV-HgCdTe
Electronics	
I. F. Frequency	30 MHz
I. F. Bandwidth	10 MHz
Rise Time	0.1 μ s

先までならばほぼ正確に天気を予測できる様になっている。しかし、この数値気象予測モデルの理論的境界は2週間先と言われており、この理論境界まで到達するためには、いま以上に正確でかつ詳細な地球規模での風の観測データの取得が求められている。

現在、風のデータは、おもに世界各地に存在する気象台からあげられている気象ゾンデにたよっている。したがって、自ずからその観測地域は工業化された先進国に偏っており、地球表面の4分の3を占める大洋や未開発地域の多い南半球での風のデータは極端に乏しいのが現状である。これらの理由が長期的な数値気象予測

モデルをたてにくくしている。目下、米国 NASA を中心に地球観測計画 EOS (Earth Observing (System)) の一環として宇宙から地球の風の観測を行おうとする提案がなされている。これは、さきに述べた EOS の中で LAWS (Laser Atmospheric Wind Sounder) 計画と呼ばれ、NASA のマーシャル飛行センターがその開発を担当している。この LAWS は、スペース・シャトルや極軌道衛星または太平洋上空の宇宙ステーションに搭載したコヒーレント・ドップラー・ライダーから地上に向けてレーザーを発射し、下部成層圏と地表面との間の大気中の風に漂うエアロゾルに照射して、その散乱光を再び衛星上で受信し、受信した散乱光の周波数解析を行ってこれらの大気中エアロゾルのドップラー・シフトから大気の流れを地球規模で把握しようとする壮大な計画である。LAWS 開発の目的は、単に数値天気予報精度の改善だけではなく、その他、中規模スケールでの大気現象の解明、気候変動と大気大循環の解明などであり、地球の環境を予測する上で大変重要な役割を担うものとなるであろう。

Menzies は、衛星搭載用ドップラー・ライダーについて YAG レーザーの SHG (第二高調波) やエキシマレーザーを用いたインコヒーレント・ドップラー・ライダーと本文で紹介してきた CO₂ レーザー、YAG レーザーを用いたコヒーレント・ドップラー・ライダーとのシステム比較を行った結果、現在のところ技術的には CO₂ ライダーが最も優れていると結論した³⁴⁾。現在の計画では LAWS も CO₂ レーザーを送信機として用いる予定である。LAWS では、Table III で示すような測定精度を満足させることを目標に計画を進めている。ちなみに、精度

Table III Required wind component accuracy and observational resolution

		Required Resolution
Measurement error	δV	± 1 m/s (0-5 km) $\pm 2-5$ m/s (5-10 km)
Horizontal range resolution	δH	100 km
Vertical range resolution	δZ	1 km

Table IV Base parameters for LAWS project.

Parameter	Space Shuttle	Polar Orbit Satellite
Altitude	300 km	830 km
Conical Scan Period	7 sec	19sec
Nadir Angle	62deg	52deg
Long-term Pointing Error	50 μ rad	50 μ rad
Short-term Pointing Error	2 μ rad	2 μ rad
Telescope Diameter	1.5 m ϕ	1.5 m ϕ
Optical Efficiency	10%	10%
Laser Wavelength	9.11 μ m	9.11 μ m
Pulse Width	6.7 μ sec	6.7 μ sec
Pulse Repetition Rate	8 Hz	2 Hz
Laser Output	0.5-1 J	0.5-1 J

±1 m/sで風を測定するにはエアロゾルのドップラー・シフトを約 200 kHz の精度で求める必要がある。

Table IVは計画中のLAWSのシステム・パラメータを示している。コヒーレント・ライダーで風を測定するためにはエアロゾルのドップラー・シフトを利用するため、風を測定しようとする場所のエアロゾルの散乱係数 β がLAWSのシステム・パラメータ（特にレーザーの出力）を決定する上できわめて重要である。LAWSのシュミレーションでは β の値として $3 \times 10^{-11} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ を仮定しているが、NASAでは、1986年から3年計画でこの β 値がどれくらい正確かを求めるため地球規模での飛行機による観測、すなわちGLOBE (Global Backscatter Experiment)計画を進めていて、この一連の実験により求めた β 値より最終的なLAWSのシステム・パラメータを決めようとしている。この実験は、NASAのDC-8にcwドップラー・ライダー、注入同期型TEAドップラー・ライダー、YAGライダー等のほか、パーティクル・カウンタ等のエアロゾル測定機を搭載し、本年10月、おもに太平洋上空での β 値測定のために、カリフォルニアアラスカー北太平洋ー日本ーフィリピンーオーストラリアーニュージーランドーハワイーカリフォルニアの飛行経路で行われる予定である。なお、日本上空での実験

時には国立研究所や大学の地上設置ライダーも参加して共同実験を行う予定になっている。

コヒーレントライダーで得られる風向・風速は視線方向のみであるため、望遠鏡をコンカルスキャンして、風速と風向の水平成分を求める。コンカルスキャンと衛星の移動からレーザーの地表面での軌跡は螺旋の交点のデータから風のベクトルを求める。LAWSは雲のない晴天域での風を直接測定できる利点はあるが、雲に覆われた地域の測定が可能である。したがって、今後地球全体の風を測定するためには雲のあるところで風をどのような方法で正確に測定するかを検討する必要があると思われる。

5. おわりに

レーザーが発明されてまもなく、Fioccoらによって始められたライダー研究は、誕生からかれこれ20数年になる。この間、いろいろな方式のライダーが提案されたが、それらを基にさらに実用化をめざした研究や応用研究が着実に進んだ結果の一つが本文で紹介して来たコヒーレントライダーである。

今年は地球環境元年と言われ、従来からの点と点とを結ぶ大気観測網では現在地球上のあちらこちらで発生している諸問題の解決に対処しきれなくなっている。従って、今後ますますライダーに向けられる期待が大きくなるもの

と考える。そのためにも、このコヒーレント・ドップラー・ライダーの分野では後発となっている日本の研究開発をもっと活発にしなくてはならないのではないかと考える。

参 考 文 献

- 1) P. S. Ray, R. J. Doviak, G. B. Walker, D. Sirmans, J. Carter, and B. Bumgarner, *J. Appl. Meteorol.*, **14** (1975) 1521.
- 2) R. J. Doviak, D. Zrnic, and D. Sirmans, *Proc. IEEE*, **67** (1979) 1522.
- 3) M. J. Post, R. A. Richter, R. M. Hardesty, T. R. Lawrence, and F. F. Hall, *Pro. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **300** (1981) 60.
- 4) D. S. Zrnic, *IEEE Trans. Aerosp. Electron.*, **AES-13** (1977) 344.
- 5) R. M. Hardesty, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **GE-24** (1986) 777.
- 6) M. Alldritt, R. Jones, C. J. Oliver, and J. M. Vaughan, *J. Phys.* **E11** (1978) 1.
- 7) 浅井和弘, 板部敏和, 石津美津雄, 第35回応用物理学関係連合講演会, 講演予稿集, 第3分冊, 807 (1988).
- 8) W. C. Cliff and R. M. Huffaker, *NASA TM TMX-64891*, 1974.
- 9) C. Werner, *Appl. Opt.*, **24** (1985) 3557.
- 10) J. W. Bilbro, H. B., Jeffreys, J. W. Kaufman, and E. A. Weaver, *NASA TN TND-8429*, 1977.
- 11) W. D. Jones, L. Z. Kennedy, J. W. Bilbro, and H. B. Jeffreys, *Appl. Opt.*, **23** (1984) 730.
- 12) J. W. Bilbro, C. DiMarzio, D. Fitzjarrald, S. Johnson, and W. Jones, *Appl. Opt.*, **25** (1986) 3952.
- 13) J. L. Lachambre, P. Lavigne, O. Otis, and M. Noel, *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-12** (1976) 756.
- 14) G. Megie, and R. T. Menzies, *Appl. Phys. Lett.*, **35** (1979) 835.
- 15) R. T. Menzies, P. H. Flamant, M. J. Kavaya, and E. N. Kuiper, *Appl. Opt.*, **23** (1984) 3854.
- 16) A. Gondhalekar, N. R. Heckenberg, and E. Holzhauser, *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-11** (1975) 103.
- 17) P. W. Pace, and J. M. Cruickshank, *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-16** (1980) 937.
- 18) J. M. Cruickshank, *Appl. Opt.*, **18** (1979) 290.
- 19) G. Benedetti-Michelangeli, F. Congeduti, and G. Fiocco, *J. Atmos. Sci.*, **29** (1972) 906.
- 20) R. M. Huffaker, A. V. Jelalian, and J. A. L. Thomson, *Proc. IEEE*, **58** (1970) 322.
- 21) T. R. Lawrence, D. J. Wilson, M. C. Krause, I. P. Hones, R. M. Huffaker, and J. A. L. Thomson, *Rev. Sci. Instrum.*, **43** (1972) 512.
- 22) M. J. Post, R. L. Schweissow, R. E. Cupp, D. A. Haugen, and J. T. Newman, *Appl. Meteorol.*, **17** (1978) 1179.
- 23) J. W. Bilbro, and H. B. Jeffreys, *Electro-Optical Systems Design Conference*, 380, Anaheim, CA, 1975.
- 24) J. W. Bilbro, H. B. Jeffreys, E. A. Weaver, R. M. Huffaker, G. D. Craig, R. W. George, and P. J. Marrero, *NASA Report TMX-64996, FAA-RD-76-11*, 1976.
- 25) R. M. Huffaker, "CO₂ Laser Doppler systems for the measurement of atmospheric winds and turbulence", *Atmospheric Technology*, NCAR, 1974-1975.
- 26) F. Koepp, R. L. Schweissow, and C. Werner, *J. Climate Appl. Meteor.*, **23** (1984) 148.
- 27) C. Werner, F. Koepp, and R. Schweissow, *Appl. Opt.*, **23** (1984) 3557.
- 28) J. M. Vaughan, and A. A. Woodfield, *Int. J. Aviation Safety*, **1** (1983) 207.
- 29) T. R. Lawrence, R. M. Hardesty, M. J. Post, R. A. Richter, R. M. Huffaker, and F. F. Hall, in *Preprint Volume Fifth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, 481 (1983).
- 30) R. T. Menzies, M. J. Kavaya, P. H. J. Flamant, and D. A. Haner, *Appl. Opt.*, **23** (1984) 2510.
- 31) R. V. Hess, P. Brockman, D. R. Schryer, I. M. Miller, C. H. Bair, B. D. Sidney, G. W. Wood, B. T. Upchurch, and K. G. Brown, *NASA Tech. Memo. 86415, Langley Research Center, Hampton, VA* 41 (1985).
- 32) 科学技術庁研究開発局編「太平洋に置ける大気海洋変動と機構編に関する国際共同研究」, 昭和62年度成果報告書.
- 33) 板部敏和, "スペースライダー", *光学*, **18** (1989) 68.
- 34) R. T. Menzies, *Appl. Opt.*, **25** (1986) 2546.