

CO₂ レーザ光のビーム・ガイドA Lens Beam Guide for CO₂ Laser Light

藤井 陽一*・大林 周逸*・東野 和久*・松井 秀文*

Yoichi FUJII, Shuitsu OHBAYASHI, Kazuhisa HIGASHINO and Hidebumi MATSUI

1. 序 言

CO₂ レーザ (10.6 μm) は、赤外ながら効率のよい発振を行い、かつ発振光の干渉性もすぐれているので、将来の光通信のひとつの有力な候補である。しかし、従来は、いわゆる flow 形であって、活性ガスを循環させる方式であって、装置も大型であったのが、最近ようやく、封じきり形となって、小形の装置が実用になった。この CO₂ ビームを通信伝送用として使用するためには、いくつかの問題点がある。そのひとつは、伝送路として、どのような媒体を用いるかである。可視光のレーザ・ビームに対しては、現在レンズをくりかえし配置するビーム・ガイドの他に、各種の clad 形ガラスせんい、SELFOC などが研究されており、その伝送損失も、ビーム・ガイドのそれに比肩しようようなものも現われている。しかし CO₂ レーザ (10.6 μm) に対しては、ガラスのように透過率が高く、かつ、せんいに引くことのできる材料がよく知られておらず、また、関連する分野の技術も一般によくすすんでいないので、現在のところ、径が大きくなる欠点はあってもビーム・ガイドを用いるのが、最適ではないかと考えられる。ここでは、このような観点から、CO₂ レーザ・ビームをレンズをもちいたビーム・ガイドで長距離伝送するための基礎的な実験を行った。

この実験には、本所千葉実験所に設置してある 100 m 長の地下洞道からなるレーザ・ミリ波伝送実験装置を使用した。

2. レンズおよび伝送系の設計

CO₂ レーザ・ビーム (10.6 μm) に対して透過率が良好で、かつレンズをつくるほど十分に大きい材料のえられるものとしては、現在 Ge, Si, GaAs などの半導体単結晶、CdS, ZnS, ZnSe などの chalcogenide 単結晶あるいは焼結体 (Irtran), KCl, NaCl などの水溶性単結晶がよく知られている。ここでは、ビーム・ガイド伝送の目的から、透過率が 98% 以上確保でき、かつ開口径が 60 φ 以上広くとれ、かつ、伝送路として長時間安定に使用できるものとして、Ge の単結晶をえらんだ。他の材料、たとえば、GaAs などでは、非常に良い透過率が報

告されており、また、レンズとして commercial になっている材料 (Irtran) もあるが、いずれも開口径が十分大きくとれない。また、KCl など大きな開口径はえられるが、潮解性がある安定に使用するのが困難である。

CO₂ レーザのビーム・ガイドでは、ビームを長距離伝送するために、焦点距離の長い凸レンズを製造する必要がある。しかし、現在、このような長焦点距離のレンズを製造するための十分な研摩方法が確立されていないのがもうひとつの問題である。ここでは以下にのべる方法で、このような長焦点距離のレンズを設計した。この実験で用いた Ge 板は、60 mm 径、5 mm 厚である。これを球面状になるように手で研摩していく。その球面の曲率半径は、ニュートン・リングを観測して行った。

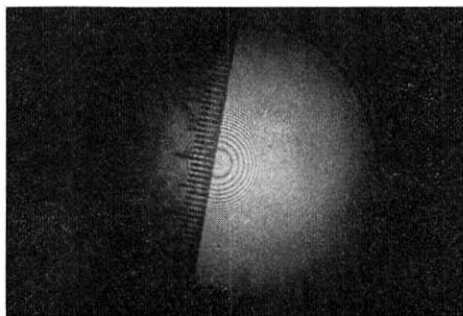
曲率半径を R とすると、平面上にレンズを置いたときの中心からの干渉縞本数 n は、中心からの距離を r とすると、

$$n = r^2 / R\lambda \quad (1)$$

ここで λ は観測光の波長である。実際には、図 1 に示すようにガラスの平板を Ge-レンズの上に置き、この上から He-Ne レーザ (6,328 Å) を照射してニュートン・リング本数を距離の関数として計数してもとめた。このレンズは両凸であるから、このようにして求めた表、裏の曲率半径から、Ge の屈折率 n を 4 として

$$1/f = (n-1)(1/R_1 + 1/R_2) \quad (2)$$

から、レンズの焦点距離を計算した。この方法で得られた焦点距離は約 7 m (ただし 1 枚は別にモード整合用として 3.5 m) で、測定の誤差は 10% 程度である。この程度の誤差は、以下のモード整合で大きな困難を示さない。

図 1 ニューリングによるレンズの f の測定例

* 東京大学生産技術研究所第 3 部

この焦点距離値は、既知のスポット径を有する CO₂ レーザとくみあわせて、ビームの集束状況を測定した結果と、誤差の範囲内で一致することがたしかめられた。

Ge レンズの透過率は、そのま では約 50% であるが、これに反射防止膜をつけて、97~98% である。

ビーム伝送系のモード整合の計算はいわゆる等価回路法¹⁾で行った。大約の値をスミス・チャート(図3)で求め、さらにこまかい数値は等価回路(図2)の数値を計算してもとめる。この計算法は省略するが、通常の電

気回路の整合計算と同様である¹⁾.

3. 伝送系のスポット径の測定

上記の設計のとおりレンズを配置し、CO₂ レーザ・ビームを通して見るわけであるが、これが計算と一致した正しいビーム形状となっていることを検証するためには、ビームのスポット径を測定しなければならない。CO₂・レーザビームのスポット径の測定には、直接視認できないから、感光（感熱）材料を必要とする。この実

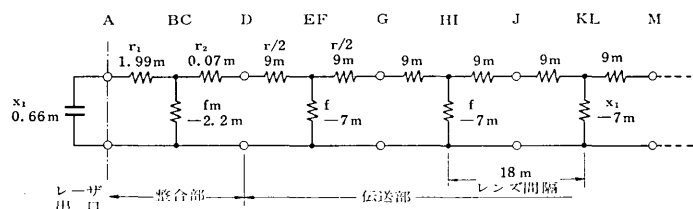


図 2 CO₂ レーザ・ビーム伝送系の等価回路図

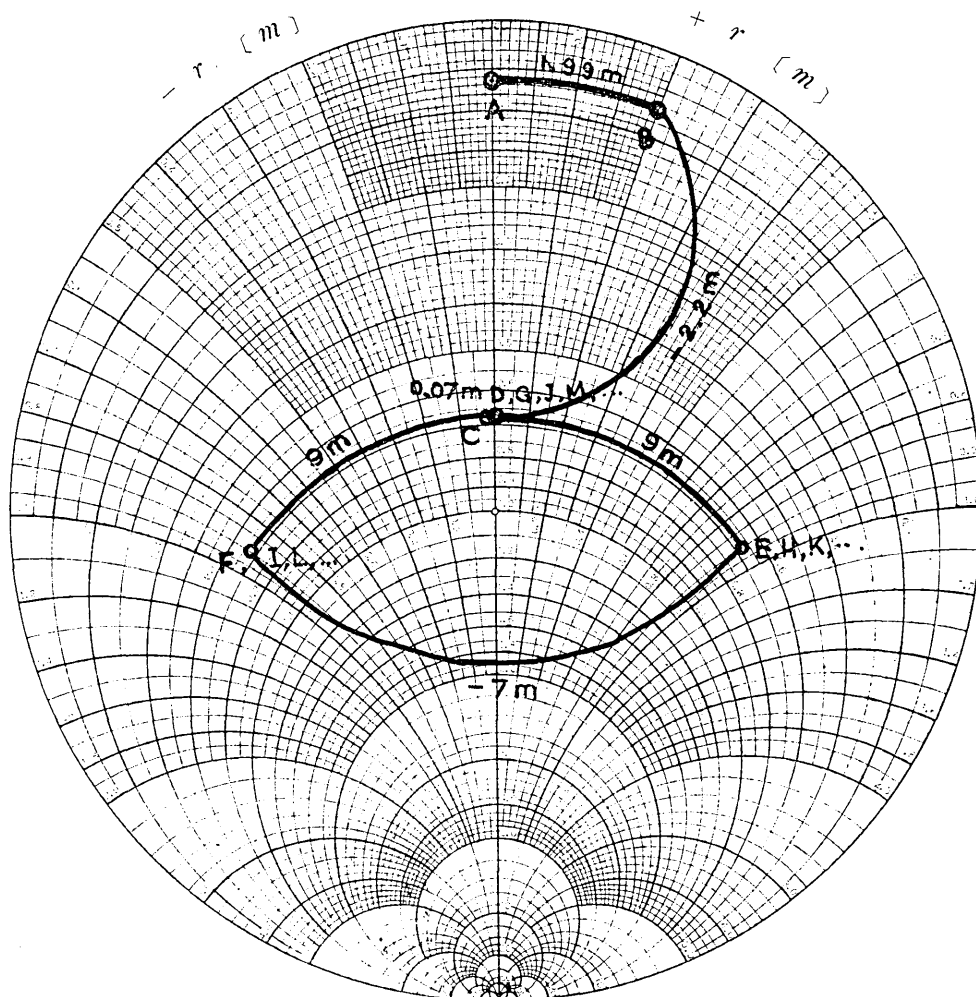


図 3 CO₂ レーザビーム伝送系のスミス・チャート

研 究 速 報

験では入手しやすいものとして、サーモ・ペイントをえらんだ。これは約 70°C で可逆性の変色を行うので、これにビームをあて、変色した部分の径を測定する。この感熱材の特性は、つぎのように計算される。サーモペイントを基板（実験では 10 cm 角タイル）上に薄く塗布したものを考え、これに、単位面積当り p の光が入射する。一次元の熱伝導式

$$\partial u / \partial t = 1 / \kappa \cdot \partial^2 u / \partial x^2 \quad (3)$$

(u : 温度, $\kappa = \lambda / c\rho$, λ : 熱伝導率, ρ : 比重, c : 比熱)

熱的平衡状態に達していない (t を小とする) として解き、これを直線近似をして温度勾配 du/dx を、入射エネルギー密度を p として、

$$du/dx = -p/\lambda \quad (4)$$

とおくと、時間 t 内に入射したエネルギー密度 pt は、

$$pt = 1/2 \cdot \lambda c \rho u^2 / p \quad (5)$$

となる。 u_c をサーモペイントの発色温度と室温の差、 w をスポット径とすると、レーザのエネルギー分布を一樣と仮定すればレーザ・ビームのパワー P は

$$P = \pi w^2 \cdot p \quad (6)$$

従って、

$$\pi^2 u_c^2 \lambda c \rho w^4 / 2 P^2 t = 1 \quad (7)$$

となる。従って、

$$w^4 / t P^2 = K = \text{const} \quad (8)$$

となり、写真乾板とはことなつた露光法則がえられる。

実験では、上記の伝送系にサーモ・ペイントを塗布したタイルをビームと直角において、露光時間（数秒～数分）をみながら、変色したスポットが大きくなって飽和したところの径を測定した（図 4）。

このスポット径測定例は図 5 に示すように、計算値とよく一致している。このとき、(8) 式の関係を検証する

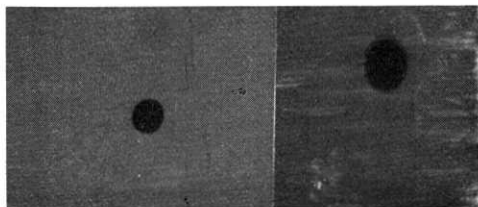


図 4 サーモペイントを用いた CO₂ レーザ・ビームのスポット径の測定例

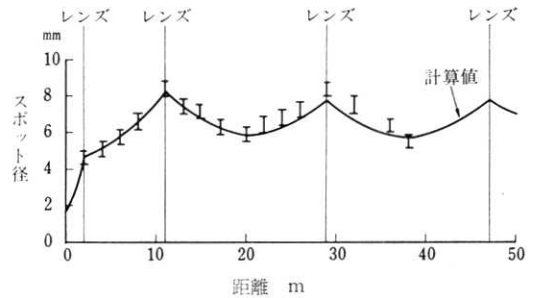


図 5 CO₂ レーザ・ビーム伝送系のスポット径測定

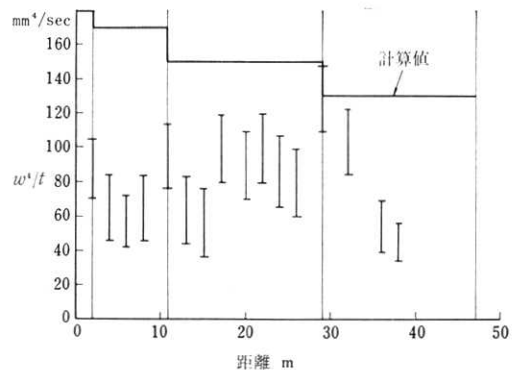


図 6 サーモペイント露光特性 ($w^4/t = \text{一定}$)

ために、各測定点での、 w^4/t を求めたものが、図 6 で、大体 3dB の誤差内で const となっており定数は、大約 $1.3 \times 10^{-11} \text{ m}^4/\text{Ws}$ である。

4. 結 言

以上述べたごとく、CO₂ レーザ・ビーム伝送系として、Ge レンズを用いたシステムを実験し、また、サーモ・ペイントによるスポット径測定を行ない、理論とよく一致する結果を得た。この系の伝送損失は、5.6 dB/km であって、十分実用的な値といえる。

おわりに、日頃御指導いただく斎藤、浜崎教授、ならびに御助言を賜った千葉工大・相浦教授、CO₂ レーザを快く貸与された東芝総研・重松氏、レンズ製作に御協力いただいた日本赤外線工業の各位に深謝する。

(1973 年 5 月 7 日受理)

参考文献

- 1) 藤井陽一: 光学集束系の等価回路表現, 生産研究, vol. 19, No. 1, pp. 8-15, 昭 42.1.