

論文

超高速 IrDA (UFIR) 用アイセーフ半導体レーザ

Eye-Safe Laser Diodes for Ultra Fast IrDA(UFIR)

河西 秀典*

下中 淳*

平松 卓磨*

森本 直行*

Hidenori Kawanishi

Atsushi Shimonaka

Takuma Hiramatsu

Naoyuki Morimoto

要旨

ミクロン単位の微小スポットから発光する半導体レーザに光拡散部を付加することにより、ミリ単位まで発光スポットサイズが拡大され、目に対する安全性が確保された半導体レーザ、即ちアイセーフ半導体レーザを開発した。これにより半導体レーザからの放出光を自由に空間に放射することが可能となった。また、アイセーフ半導体レーザを IrDA ユニットに初めて搭載し、超高速 IrDA (UFIR) ユニットが実現可能であることを実証した。半導体レーザは発光ダイオードと比較して高速応答特性に優れ、かつ消費電力が格段に低いため、100Mb/s以上の伝送速度が可能となるとともに発光ダイオードの3分の1以下の消費電力で駆動可能である。アイセーフ半導体レーザを用いた UFIR ユニットは、携帯端末用の超高速データ転送に最適である。

Eye-safe laser diodes have been developed by introducing an optical diffusion portion in the output light path of the laser diodes. Safety to human eyes is secured, since the laser spot size is expanded in these devices. This technology has been successfully applied to IrDA devices. The IrDA units with eye-safe laser diodes are promising candidates for ultra fast IrDA(UFIR), since they have significantly high modulation speed and low power consumption compared with conventional LED's.

まえがき

携帯電話への IrDA 搭載が急速に進んでいる。特に最近、モバイル環境における電子決済用としての利用が注目を集めている。赤外線通信が本質的に高いセキュリティを有しており、かつ瞬時に非接触でアドホックネットワークが構築できるというのが採用の大きな理由である¹⁾。また、携帯電話の大半に搭載されているカメラで撮影した写真データをその IrDA を用いて相手と交換する、或いはプリンタに転送して印刷するという使い方が普及しようとしている。ところが増加の一途を辿るカメラの解像度は携帯電話においても既にメガピクセルに達し、今後更なる大容量化が進むとともに映像データをも取り扱うようになると、現状の IrDA のデータ転送速度ではとても追いつかなくなるのは明らかである。

IrDA は、手軽に瞬時にデータを転送できるという点にその長があるが、今後もこの長を保ち続けるためにはデータ転送速度の向上は不可欠である。我々

は、IrDA を用いた大容量データの瞬時転送用として 100Mbps 以上の超高速 IrDA (Ultra Fast IR:UFIR) の実現を目指しており、現在 IrDA 内に結成したワーキンググループ (UFIR-SIG) を中心に標準化作業を進めている。

100Mbps 実現のため、我々は応答速度に限界のある発光ダイオード (LED) に代えて半導体レーザを光源として用いる方法を提案している²⁾。半導体レーザは高速変調が可能であり^{3) 4)}、LED と比較して消費電力も格段に低いという特徴があるが、通常は目に対する安全性を確保できないため、これまで自由に空間に放射することは不可能であった。我々は、レーザの発光スポットサイズを拡大することにより安全性を確保する方法を提案し²⁾、実際に通常のステムにマウントした半導体レーザにおいてその効果を確認している。この『アイセーフ半導体レーザ』は、国際安全規格に基づく安全性が確保されていることを確認済みであり、更にはそれを用いた 100Mbps ワイヤレスデータ転送が可能であることを実証している^{2) 7)}。

* 技術本部 デバイス技術研究所 第1研究室

ここでは、このアイセーフ化技術をIrDA用小型ユニットに適用するために開発した微小領域光拡散技術^{5) 6)}について述べ、アイセーフ半導体レーザがUFIR用光源として最適であることを示す。

1. レーザの安全性

小さなスポットから光を発するレーザが人体に与える影響については皮膚、及び目に対する安全性の観点から検討する必要がある。空間伝送に用いられる近赤外の波長帯域では網膜に光が照射されたときの眼底における光吸収による発熱が最も重大な障害を与えるため、これを防ぐことが安全性を考える上での基準となる。この考え方をベースとしてIEC(国際電気委員会)において規格化作業が進められ、1984年にIEC825“Radiation safety of laser products, equipment classification, requirements and user’s guide”が制定された。その後、数回の改定を経て現行の規格はレーザとLEDを包含する形でIEC60825-1 Edition1.2(2001)としてまとめられている。本規格ではレーザ製品のクラス分けが行われ、最も安全性の高い『クラス1』に規定されれば『合理的に予知可能な運転条件で安全であるレーザ』と認められる。IrDA等の用途に自由に使用するためにはこのクラス1に分類される必要がある。

安全性を考える上でレーザとLEDの最も大きな違いは光源の大きさである。光源から出射された光を観察すると、図1に示すように角膜と水晶体から構成されるレンズ系を通して光源の像が網膜上に結像する。この像の大きさは光源の大きさに依存し、発光スポットサイズが小さい通常の半導体レーザからの光は網膜

上で微小スポットに集光されて網膜上の局所的な発熱を引き起こす。従ってトータルの光パワーが小さくても網膜損傷につながる可能性が高い。

一方LEDのように発光スポットサイズが大きい場合、網膜上で小さなスポットには集光されず、網膜上の単位面積あたりの光エネルギーは小さくなるため、比較的安全である。このことから国際安全規格では光源の大きさを考慮した測定によってクラス分けがなされる。従って、半導体レーザにおいても光源の大きさを拡大することによって高い光出力までクラス1として安全に光を放射できることがわかる。

図2にクラス1の光源波長と被曝放出限界(AEL: Accessible Emission Limit)との関係を示す。実際の放射強度は被曝放出限界に比例してその上限が規定されるため、波長を長く設定することで放射強度を大きくすることができる。しかし、安価に入手できる受光素子の代表であるシリコンのフォトダイオードはその受光感度のピークが900nm程度にあること、またIrDAでは発光素子のピーク波長を850nmから900nmの範囲に規定していることから、アイセーフ半導体レーザは発振波長が890nm前後になるように設定している。

図3に光源径に対する最大放射強度の依存性を示す。ここで光源径はCCDカメラ等で撮影した時の像の大きさで、全光量の63%を占める像の大きさで決定される。光源像がガウス分布の場合、撮像の最大強度から1/eに落ちる幅で光源径を近似できる。これより、光源径を拡大することにより最大放射強度が大幅に大きくなることがわかる。通常の半導体レーザの光源径はミクロンオーダーであるため、波長890nmにおける最大放射強度は時間平均で6.6mW/srに限定される。

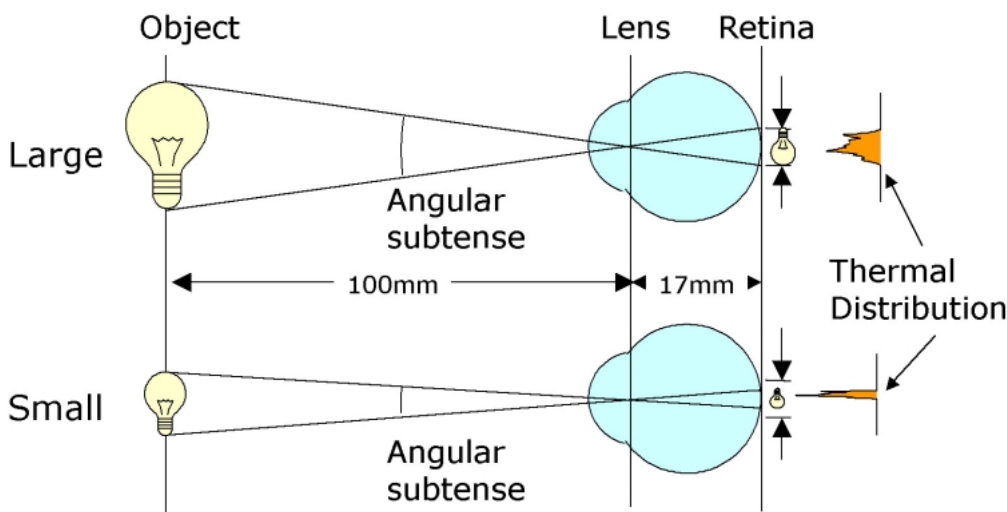


図1 異なる大きさを有する光源が網膜に与えるインパクトの違い
Fig. 1 Source size dependence of impact on human retina caused by light irradiation.

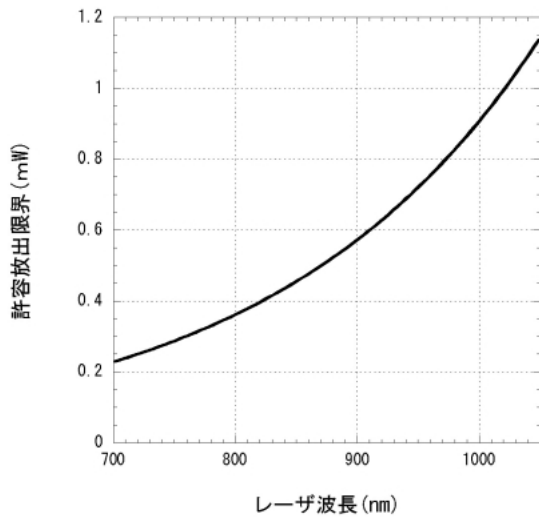


図2 許容放出限界の波長依存性
Fig. 2 Wavelength dependence of AEL.

ところが光源径を 1 mm まで拡大することにより、これを 173mW/sr まで上げることができる。以上のことから、光源径を大きくすることにより安全に空間に放射可能な半導体レーザー、即ちアイセーフ半導体レーザーが実現できることが理解できる。

2. アイセーフ半導体レーザー

我々はステムにマウントした半導体レーザーにおいてアイセーフ化が実現できることを既に報告している。ここでは実際の IrDA ユニットへの搭載を目的として、眼に対する安全性を確保しつつ、かつ小型ユニットに搭載可能なアイセーフ化の方法について述べる。

微小領域でアイセーフ化する方法として、我々はミー散乱による光拡散光学系を採用した。図4は、Z軸上に進行する直進光が散乱粒子により P1, P2, P3 で散乱される様子を示す。散乱の平均自由行程を μ とすると、n 回の散乱後の光線の Z 座標の平均値は

$$\langle z_n \rangle = \mu \cdot (1 + \langle \cos \theta \rangle + \langle \cos \theta \rangle^2 + \dots + \langle \cos \theta \rangle^{n-1}) \quad (1)$$

であらわされる。ここで散乱角 θ の余弦の平均値は非対称性因子： $g = \langle \cos \theta \rangle$ と呼ばれる。上式から無限に散乱を繰り返す場合を考えると、

$$\langle z_\infty \rangle = \frac{\mu}{1 - g} \quad (2)$$

となる。この $\langle z_\infty \rangle$ は十分に厚い散乱領域に入射した光が侵入することのできる深さ z の平均値を示しており、輸送平均自由行程とよばれる。 $\langle z_\infty \rangle$ にまで

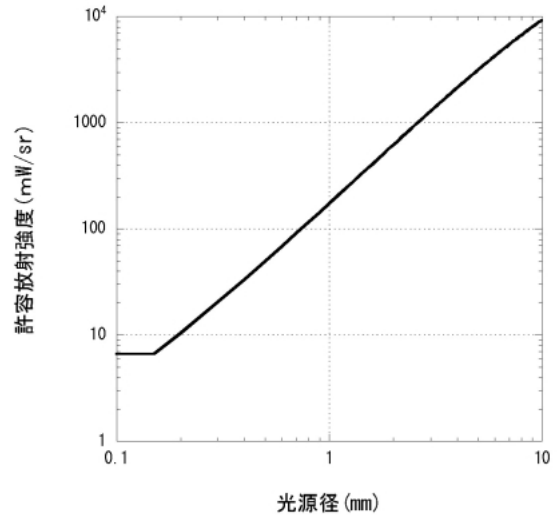


図3 許容放射強度の光源径依存性
Fig. 3 Source size dependence of maximum radiant power.

達した光はほぼ方向性が消失し、360度方向に均一に散乱するようになる。散乱剤の存在する領域の厚さ L を上記 $\langle z_\infty \rangle$ で除した値を輸送平均散乱回数もしくは Optical Depth とよび $\langle n \rangle$ と表す。 $\langle n \rangle \geq 1$ とすることで入力光を完全に散乱させることが可能となる。

一回の散乱の大きさは上記 g で制御する。g は散乱剤と媒質の屈折率、粒径により決定される量であるから、母剤、散乱剤を最適化すれば所望の g を得られることになる。輸送平均散乱回数 $\langle n \rangle$ は散乱剤の濃度を変えることで 1 以上の範囲に設定している。

図5に微小領域拡散型アイセーフ半導体レーザーの構造を示す。ガラスエポキシ基板上に作製されたザグリ穴には光反射用に金メッキが施され、その中央部に半導体レーザーチップを配置する。ザグリ穴内部には光散乱剤を含んだ樹脂を充填した。ここでは、樹脂母剤と

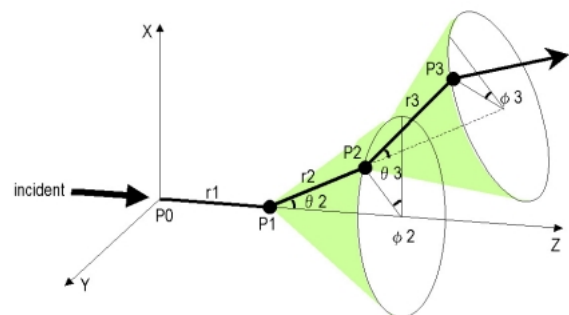


図4 ミー散乱の概念図
Fig. 4 Schematic view of Mie scattering.

してジメチルシロキサンを主成分とする屈折率約1.4のシリコーンゲル、散乱材には粒径1 μ m、屈折率1.59のスチレンを用いた。この時、非対称性因子gは0.748になる。なお、Lはレーザー光がザグリ穴から出る最短距離で規定し、 $\langle n \rangle = 5$ となるように濃度を設定した。

試作したアイセーフ半導体レーザーの指向半値角は縦横共に ± 45 度程度の広がった放射パターンとなり、元のレーザーチップの指向性が完全に消失していることが確認できた。

以下に上記構造をベースに検討した散乱粒子の最適化の結果について述べる。まず始めに、散乱粒子の非対称性因子gと輸送平均散乱回数 $\langle n \rangle$ を最適化することを目的として光線追跡シミュレーションを行った。光線追跡においては光が散乱粒子により散乱を受けるまでに進行できる距離を指数確率密度関数で表し、一回の散乱で散乱角 θ を得る確率密度関数は次のHenyey-Greestein 散乱式をもちいた⁸⁾。

$$p(\theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{1-g^2}{(1+g^2-2g\cos\theta)^{3/2}} \quad (3)$$

実際の散乱粒子には若干ながら吸収があり、散乱回数が増すことでザグリ穴上面への取り出し効率が低下する。図6にgの異なる3種の散乱剤を用いたときの取り出し効率 η のシミュレーション結果を示す。ここでは吸収の大きさは同じと仮定した。これより、gの大きな散乱粒子を用いる方が $\langle n \rangle$ の小さな領域から吸収が大きくなり、取り出し効率が低下することがわかる。図には実際に図5の構造で試作を行った実験結果も示している。TiO₂を散乱体として用いた場合は明らかに吸収が大きく、十分な取り出し効率が期待できない。

次に光源径拡大効果について検討する。図7にアクリル、スチレン、TiO₂の各散乱粒子を用いた場合の損

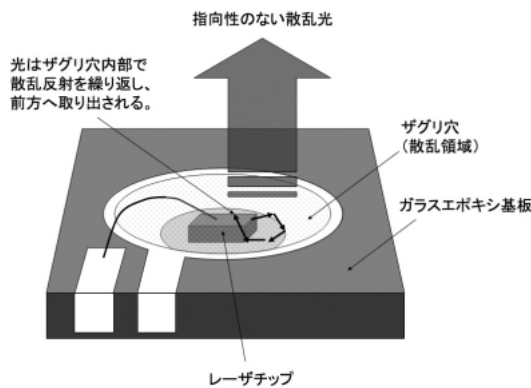


図5 アイセーフ半導体レーザー
Fig. 5 Eye-safe laser diode.

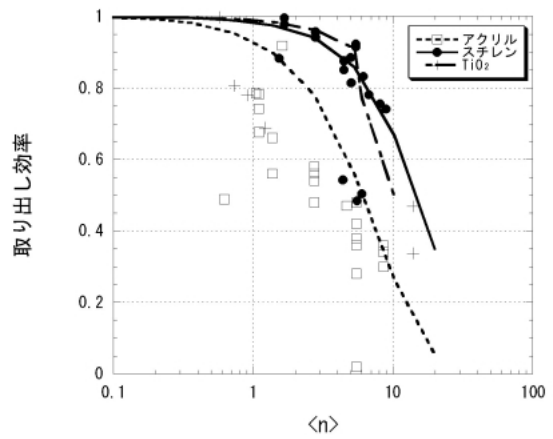


図6 取り出し効率の輸送平均散乱回数依存性
Fig. 6 Optical output dependence on the optical depth ($\langle n \rangle$) for several scattering particles.

失 (1 - 取り出し効率) と光源径の関係を示す。 $\langle n \rangle$ が小さい領域では、光は透過成分が大きくなり光源径は拡大しない。一方、 $\langle n \rangle$ の大きな領域では、光はわずかな距離で方向性を消失し、それ以上広がらなくなる。したがって光源径の拡大には最適な $\langle n \rangle$ の範囲が存在することがわかった。また同図より、高効率な光取り出しと光源径の拡大を両立するためには計算上スチレン、もしくはTiO₂に限られることがわかる。一方、図7上にあわせて示した実際の実験結果からは、TiO₂では先に見たように吸収の影響から取り出し効率が低下することがわかる。アクリルにおいては光源径の拡大効果が小さい。スチレン粒子の場合は若干光源径の拡大が予想を下回っているものの、傾向はよく一致しており、高い取り出し効率 (>0.9) で大きな光源径のアイセーフレーザーを得ることができる。

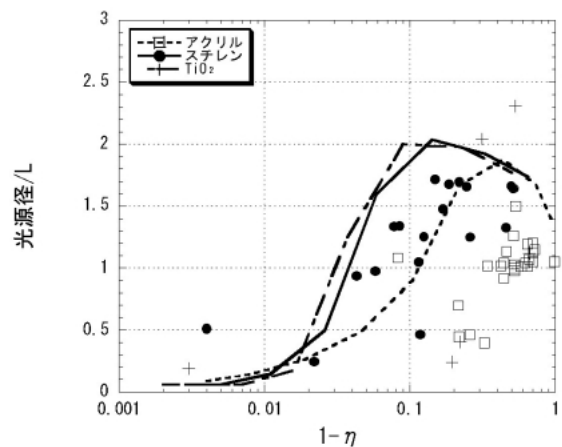


図7 光損失と光源径
Fig. 7 Relationship between the optical loss and the source size for several scattering particles.

3. UFIR 用 IrDA ユニットへの適用

IrDA に代表される光通信では、その指向半値角度を制御することで、1対1の光通信を低消費電力で実現している。実際のアイセーフ半導体レーザーは、上記目的のためエポキシ樹脂レンズと一体形成されて UFIR 用ユニットに組み込まれる。図 8 に、直径 2.4mm のレンズを一体形成したアイセーフ半導体レーザーの光源径を CCD カメラにて測定した結果を示す。パワーの 63% が含まれる最小の光源径は 0.97mm となった。もともとの半導体レーザーの出射端面での光源径は数ミクロン程度であるので、光源径は約 1000 倍程度に拡大されている。光パワー密度としては $1/10^6$ 程度に下がったことになり、大幅に安全性が向上したといえる。

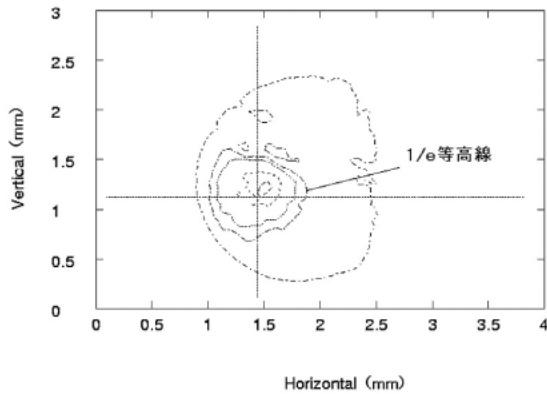


図 8 近視野像の強度等高線プロット
Fig. 8 Near field pattern of UFIR unit.

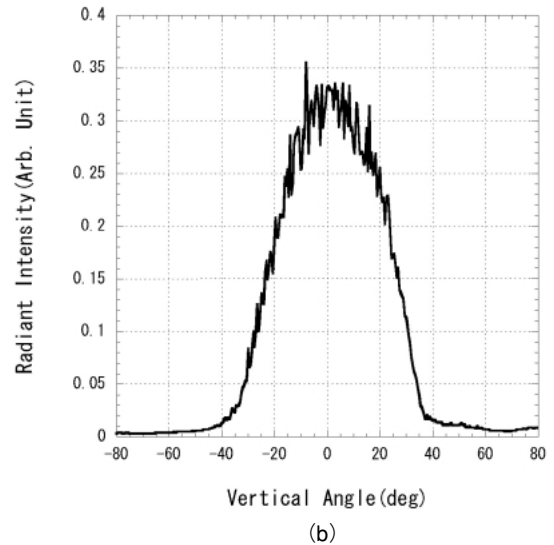
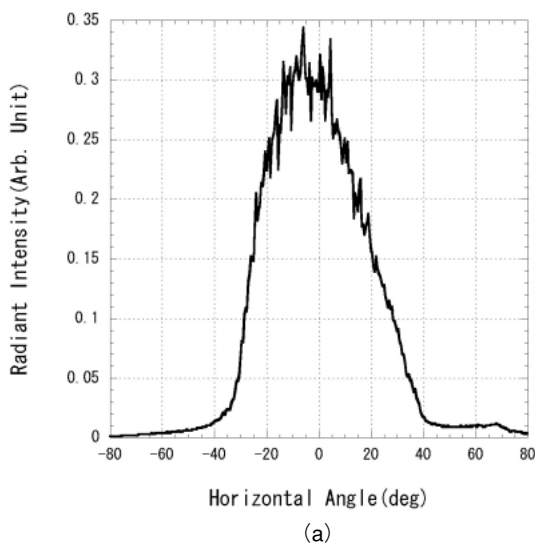


図 9 UFIR ユニットの遠視野像
(a) 水平方向, (b) 垂直方向

Fig. 9 Far field pattern of UFIR Unit:
(a) horizontal and (b) vertical direction.

図 9 (a), (b) には遠視野像を示す。この素子の場合、指向半値角度 $\pm 23 \sim 24$ 度の光源ができており、指向半値角度が $15 \sim 30$ 度を要求される IrDA 向け光源として適した特性が得られている。

一般に波長 890nm の半導体レーザーの電流-光変換効率は 1.0W/A 程度であり、通常の発光ダイオード ($0.25 \sim 0.3\text{W/A}$) に比べて格段に高い。従ってこのアイセーフ半導体レーザーを従来の発光ダイオードに置き換えて用いることで、消費電流を約 $1/3 \sim 1/4$ に低減することが可能となる。

最後に、光拡散が通信に与える影響について検討する。図 9 を見ればわかるようにアイセーフレーザーからの放射光は、空間的コヒーレンスは大幅に低減されているが、単一波長の光であるため若干のスペckル (ランダムな干渉パターン) が残存しており、そのため放射強度の強度分布のばらつきが見られている。その変動量は約 10% 程度であって通信に与える影響は小さいことを確認している。

次に、多重散乱による信号到達時間の遅延について検討する。図 10 に $g=0.748$ (スチレン粒子)、 $\langle n \rangle = 5$ の場合のアイセーフレーザーからの放射光の光路長分布のシミュレーション結果を示す。図よりザグリ穴内部で、20mm 程度までの光路長の分布を示している。これは時間遅れに換算すると最大 0.06ps となる。この値は 500Gb/s を超える通信では顕著なジッタとなりうるが、数 Gb/s 程度までの通信にはまったく影響を与えないと考えられる。

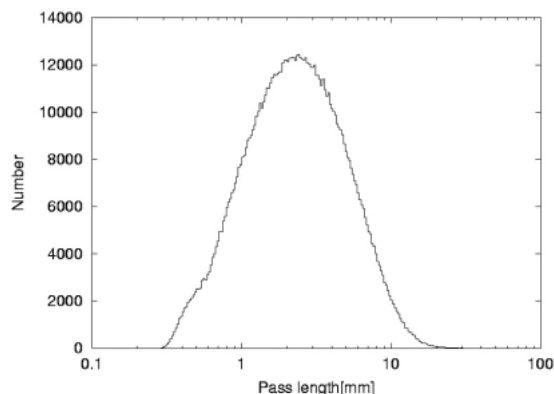


図10 多重散乱による信号遅延の計算結果
Fig. 10 Estimated signal delay due to multiple scattering.

むすび

微小領域で半導体レーザをアイセーフ化する技術を開発した。また、これをIrDAユニットに適用するとともに、散乱剤を最適化することにより、高効率で光源径の大きなアイセーフレーザを実現した。

またこのアイセーフレーザを用いたIrDAユニットは、従来の発光ダイオードを使用したユニットと比較して、消費電流が1/3～1/4と大きく低減されていることを示した。レーザを用いた小型IrDAユニットの実現により、安全性が確保され、低消費電力かつ、超高速での使用が可能なIrDAユニットが実現できた。

このIrDAユニットはモバイル機器等への搭載が可能であるため、携帯電話からプリンタへの大容量画像データ転送を始めとして、様々な用途展開が可能である。

今後、標準化作業中の超高速IrDA規格に準拠した様々な機器が普及し、大容量データの瞬時転送が広く普及していくものと期待される。

参考文献

- 1) 大槻, “近距離無線をケータイが牽引 IrDAを先頭に一気に市場へ”, 日経エレクトロニクス, 2002年8月26日号, pp.59-66 (2002).
- 2) 河西, 光技術応用システムのフーズビリティ調査報告書XXII—光ワイヤレス通信技術—2.5節, 光産業技術振興協会(2002).
- 3) 吉田, 松本, 若原, 河西, “890nm帯アイセーフ半導体レーザによる100Mbps赤外線通信における一検討”, 信学総大B-10-96 (2003).
- 4) 吉田, 松本, 河西, “アイセーフ半導体レーザを用いた高速赤外線通信システムに関する検討”, 第2回 情報科学技術フォーラム C-013(2003).
- 5) 下中, 森本, 平松, 河西, “空間伝送用890nm帯高出力アイセーフレーザ光源(I)”, 信学総大B-10-148(2002).
- 6) 平松, 森本, 下中, 河西, “空間伝送用890nm帯高出力アイセーフレーザ光源(II)”, 信学総大B-10-149(2002).
- 7) 河西, 下中, 平松, 森本, “超高速IrDAの技術動向”, 電通学会集積光デバイス技術時限研究専門委員会第一回研究会 IPD02-03(2003).
- 8) Giovanni Zaccanti et al., Pure Applied Optics 3, 897-905 (1994). (2003年9月30日受理)