

要 旨

車載電子機器の開発にあたっては、電磁波による障害対策（電磁妨害）は重要な課題である。誤動作原因を機器内部の回路素子レベルで特定できれば、最適な電磁妨害対策が可能となることから、開発期間の短縮ひいては大幅なコスト低減が望める。そこで我々は、LiNbO₃光集積回路と光ファイバを用いた超小型光集積化電圧センサを開発し、電磁妨害の影響を受けることなく、しかもECU内部という非常に狭い場所での内部回路の電圧測定を可能にした。超小型化にあたって、反射型光変調器という独自構造の光集積回路と、レーザアブレーション加工による光ファイバガイド用V溝の形成により、φ3mm×L30mmという世界最小レベルのセンササイズを実現した。電圧測定範囲は0.2mVから0.7V、周波数応答範囲は10Hzから2GHzと非常に高感度で広帯域な特性を有している。このシステムの実現により、これまで困難であった強電磁界環境下にある電子機器の詳細な回路動作解析が可能になることから、これまで以上に的確で迅速な電磁妨害対策を講じることができる。

キーワード

光強度変調器, 光導波路, LiNbO₃, 電圧センサ, 電磁妨害, レーザ, 光ファイバ

Abstract

This paper reports the performance of an AC-voltage sensor with a LiNbO₃ integrated retroreflective structure based on the Y-junction Mach-Zehnder interferometer. This structure is capable of realizing a low-cost sensor chip because of the small chip size and single optical-fiber connection. In the sensitivity and frequency response evaluation, detection sensitivities of 0.2mV have been measured with a frequency response from 10Hz to 2GHz. These measurement limitations were also analyzed theoretically and compared with the experimental results. This unique sensor enables precise voltage measurement in an EMI environment, even inside a computer.

Keywords

Optical modulator, Waveguide, LiNbO₃, Voltage sensor, EMI, Laser, Optical fiber

1. はじめに

病院^{1,2)}や旅客機内^{3,4)}での携帯電話やPHSの使用が禁止されていることはすでに承知のことであるが、その理由は言うまでもなく、ペースメーカーやコンピュータ、計器類が携帯電話から放射される電磁波によって、誤動作することを防止するためである。このように今日の携帯電話の急速な普及に伴い、電磁波による電子機器の障害（電磁妨害）対策は極めて重要な課題となっている。このことは自動車用電子機器についても例外ではなく、とりわけエンジン、サスペンション、ブレーキといった自動車の基本的な機能を制御するECU（Electronic Control

Unit）の信頼性は厳しく検査され、安全が確認された後、市場に出されている^{5,6)}。信頼性評価の方法は、ECU近傍に携帯電話などの電磁波発生源を置き、正常に機能するかを観察することで行われている。そして万が一誤動作を起こした場合の対策としては、内部回路の設計変更や、ECUボックスのシールド方法を再検討するといった試作と評価を繰り返し行っているのが現状である。しかしこのような評価法では、開発に時間とコストがかかってしまうという問題から、最近ではECU内部のどの回路素子が誤動作を起こしているのかといった、誤動作の原因を回路素子レベルで特定したいという強いニーズが生じてきた。すなわち原因が特定できれば、適材適所の対

策を講じることができ、開発時間の短縮と低コスト化につながるからである。しかしそのためには、強電磁界環境下で素子間に誘起されている妨害電圧／電流が正確に、しかもECUボックス内という非常に狭い場所で測定できるような小型のセンサ部を持つ電圧測定器が必要となる。そこで我々は、光集積回路と光ファイバを用いた超小型のセンサ部を持つ光集積化電圧センサシステムを開発した^{7, 8)}。

2. 強電磁界中での電圧測定

2.1 現状測定法の問題点

電圧波形を測定する最も一般的な方法は、オシロスコープによるものである。しかし電磁妨害耐性評価の場合、被測定回路近傍は強電磁界にさらされているため、測定プローブ自身や金属の信号ケーブルに大きな妨害電圧が誘起され、回路上の誘起電圧を分離して計測することは不可能である。また測定プローブが大きいためECUボックス内に入らないといった問題点がある。そこでこれらの問題点を解決するためLiNbO₃等の電気光学結晶を用いた電圧測定法が開発されている⁹⁾。これはFig. 1に示すように光ファイバを信号伝送路に用い、光源、信号処理部は電磁界環境の外に置かれ、センサ部とは光ファイバで結ばれている。センサ部はLiNbO₃結晶の表面に光導波路と金属電極が形成された分岐干渉型光変調器の構造で、金属電極に電圧が印加されると結晶内部の屈折率が変化するので、分岐後の2本の光導波路を通過する光に位相差が生じ、その光を合波干渉させると出射光量が変化する。そこでその光量を測定することにより結晶に印加された電圧が測定できる。この手法では、センサ部を絶縁物で構成できることから電磁界の影響をほとんど受けることなく、正確に測定できるという特徴がある。しかしこの手法においても、光の入射と出射に2本の光ファイバを使用しているのでセンサ部が大型化してしまうという問題点がある。

2.2 光集積化電圧センサ

前節で説明した方式の特徴を生かし、かつ大型という問題点を克服する手法として、我々は独自構造のTi拡散LiNbO₃光集積回路によりセンサ部の超小型化を実現した。光集積回路の外観をFig. 2に示す。これは基板にLiNbO₃を用い、その表面にY字状に光導波路を形成、分岐後の2本の導波路上に一对の金属電極を設けている。また基板右端には金属反射膜を蒸着して、光導

波路を伝搬する光を再び同じ光路に戻す構造である。以下に超小型化を実現したポイントを述べる。

2.3 センサの小型化

ここで用いた光集積回路には二つの特徴があり、これにより超小型化を達成した。1点目は反射型光変調器構造にしたことである¹⁰⁾。Fig. 1とFig. 2を比較してわかるように、この光変調器は通常の方岐干渉型光変調器の中央で切断し、その切断面に金属反射膜を設けた形になっている。これにより基板サイズを半減できる上に、通常2本必要とする光ファイバが1本で済むことから小型、高安定性、安価といった特徴がある。また金属電極部を光

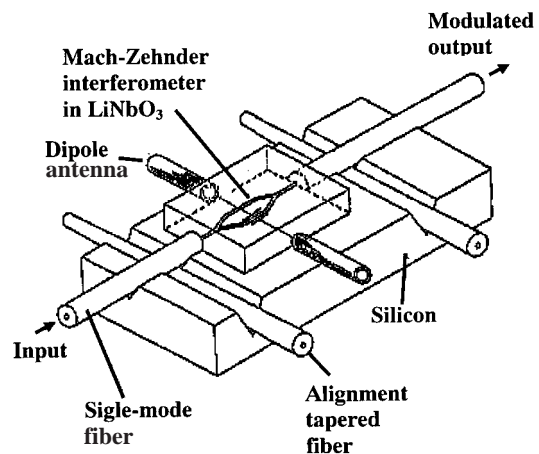


Fig. 1 Electric field measurement system using electro-optical modulator.

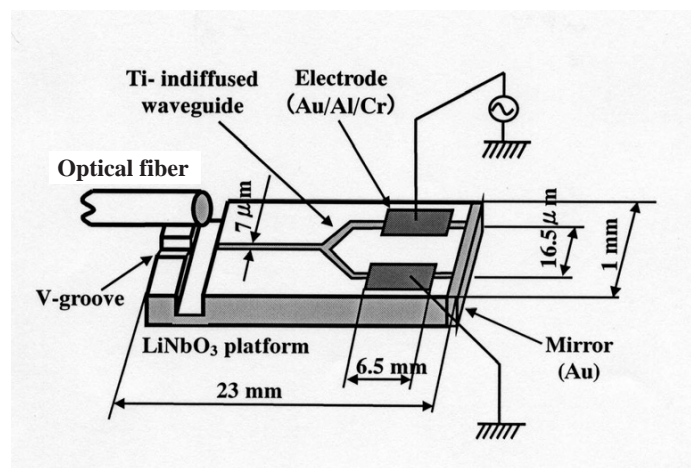


Fig. 2 Schematic diagram of retroreflective type voltage sensor.

が往復2回通過するため、単位長さ当たり2倍の感度を得ることができる他、電極容量の半減により、高周波特性の向上にもつながる。2点目は反射型光変調器と光ファイバの接続法として、パッシブアライメント法を開発したことであり¹¹⁾。これはダイシングによる入射端面の形成と、レーザアブレーション加工による光ファイバガイド用V溝の形成からなるもので、従来入射端面の形成は、基板を切断後ポリッシングしていたため、工程が複雑で時間がかかった。我々はダイシングによる溝形成だけで良好な導波路端面を得る条件を見出し、行程を大幅に簡略化した。この方法による結合損失は0.5dBである。一方、光導波路と光ファイバの結合・接着は、 $1\mu\text{m}$ 以下という非常に精密な軸調整が必要となるため、専用の調整治具を使用しなければならない。また接着面積を増やすために光ファイバ先端にルビービーズを装着したり¹²⁾、端面ブロックを装荷するなどの接着治具が用いられている¹³⁾。しかしこのため軸調整にコストと時間がかかり、また基板が大型化してしまうという問題があった。そこでLiNbO₃基板に光ファイバガイド用のV溝を直接形成する方法を開発、これによりアライメントを容易にした。また接着治具が不要なため基板を小型化することができる。さらには同一基板の上にV溝を作製しているため、温度変動による軸ずれも小さいなどの特徴がある。V溝の形成はエキシマレーザによるアブレーション加工で行った。加工方法をFig. 3に示す。光源には波長248nmのKrFエキシマレーザを用いた。繰り返し周波数は50Hzである。光路途中に菱形パターンの金属マスクを置き、基板上に縮小投影して基板を一方方向に走査させると、投影パターンの中心部で最も照射時間が長く、パターンの端ほど照射時間は短くなるため、V字形の加工形状を得ることができる。このときのパワー密度は $5\text{J}/\text{cm}^2$ である。Fig. 4に光結合部のSEM写真を示す。この方法による加工精度は $\pm 5\%$ であった。また光ファイバ接続後の光量変動は 10°C から 40°C の温度試験において $\pm 0.1\text{dB}$ 以下であった。以上の方法により試作した超小型光集積化電圧センサの外観写真をFig. 5に示す。図中、上がLiNbO₃基板 ($1 \times 20 \times t 0.5\text{mm}^3$)、下がプラスチックケースに収納した後のセンサ外観 ($\phi 3 \times 30\text{mm}$)で、共に世界最小レベルの形状寸法である。反射型光変調器の特性は、半波長電圧 (光量が最大から最小になるまでに要する電圧) 4.5V、消光比15dB、挿入損失8.9dBである。

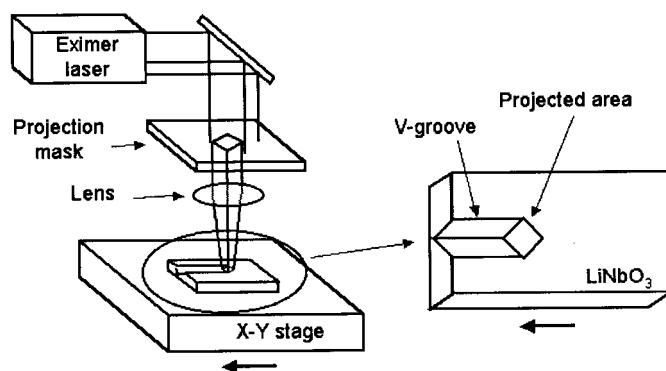


Fig. 3 Schematic of the laser ablation apparatus for V-groove formation.

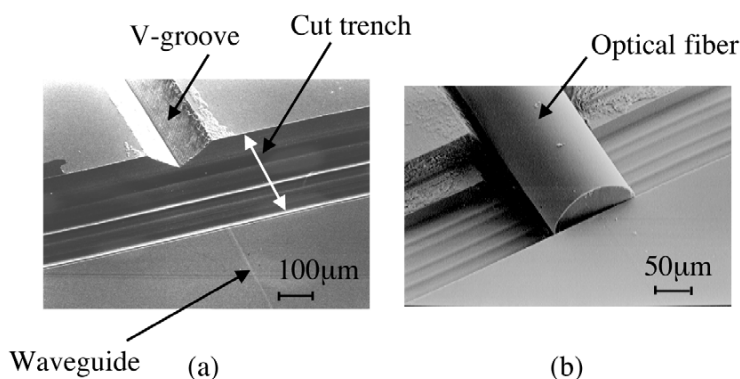


Fig. 4 SEM photograph of the fiber coupling section of LiNbO₃ platform, (a) before, and (b) after fiber insertion into the V-groove.

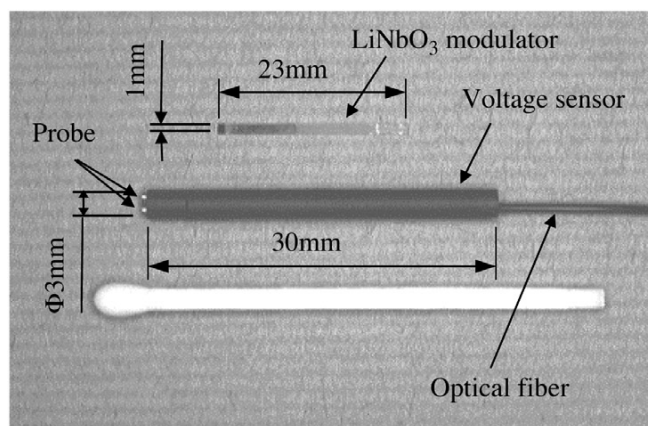


Fig. 5 Fabricated sensor chip and packaged sensor head.

3. 超小型電圧センサシステム

3.1 システム構成

上記超小型光集積化電圧センサを用いた電圧測定システムの構成をFig. 6に示す。光源には波長 $1.3\mu\text{m}$ の半導体レーザ (LD) を用い、光ファイバカップラを介してセンサ部に光を入射する。センサ部で強度変調を受けた光は再び光ファイバに戻り、光ファイバカップラで出射光のみを分離して光検出器 (PD) に入射、光量を電圧に変換して出力する。その出力電圧を電圧計やスペクトラムアナライザ等で測定すれば、センサ部での電圧を知ることができるというものである。

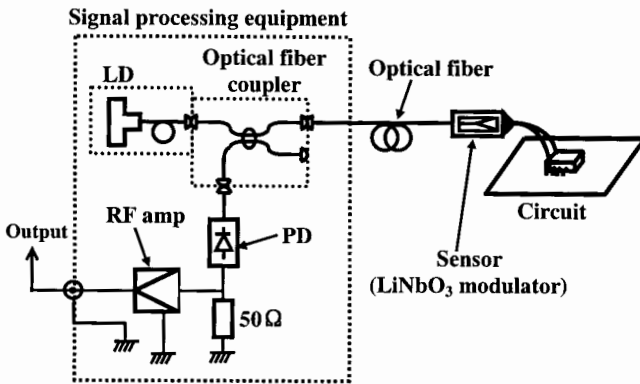


Fig. 6 Block diagram of the test setup for evaluation of sensing properties.

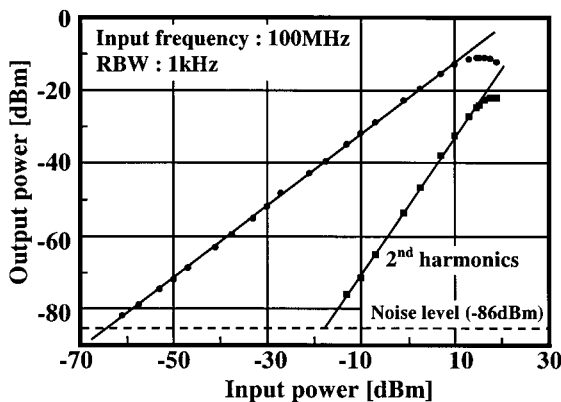


Fig. 7 Output vs. input power for a proposed voltage sensor.

3.2 センサ特性

試作した超小型光集積化電圧センサシステムの特性を評価した。Fig. 7は入出力特性で、横軸は入力電圧、縦軸はスペクトラムアナライザの測定値である。この図からセンサのダイナミックレンジとして70dBが得られている。検出限界は測定帯域幅1kHzのとき0.2mVであった。また測定電圧の上限は高調波ひずみが基本波の-20dBになったときと定義し、0.7Vであった。Fig. 8は周波数応答特性で、横軸は入力電圧周波数、縦軸はスペクトラムアナライザの測定値である。10Hzから2GHzの範囲で $\pm 3\text{dB}$ のほぼ平坦な特性が得られている。なお低周波側の感度低下は、光変調器のインピーダンス ($C=2.5\text{pF}$, $R=10^{10}\Omega$) により生じるものである¹⁾。

3.3 考察

ここで最小検出電圧、および周波数応答の上限について考察してみる。

3.3.1 最小検出感度

基本的なマツハツエンダ干渉型光変調器の印加電圧 V_s に対する光出力強度 I_s は一般的に式(1)で表される^{14, 15)}。

$$I_s = \cos^2\left(\frac{\pi V_s}{2V_\pi} + \frac{\phi_0}{2}\right) \cdot r_d \cdot P_r \cdot V_s \quad (1)$$

また $V_s \ll V_\pi$ のときには式(2)で表すことができる。

$$I_s = \frac{\pi}{2V_\pi} \cdot r_d \cdot P_r \cdot V_s \quad (2)$$

ここで V_π は半波長電圧、 ϕ_0 は固定位相バイアスで一般的には $\pi/2$ である。また r_d は光検出器感度、 P_r は光検出器入射光量である。一方、光検出器出力に含まれる雑音電流 I_n は自乗の時間平均値で表され、

$$\langle I_n^2 \rangle = B_w \left[\frac{4kT}{R_L} + 2e \{ I_d + r_d (P_{av} + P_{on}) \} M^2 F \right] \quad (3)$$

ここで B_w は測定周波数帯域、 k はボルツマン定数、 T は光検出器負荷抵抗 R_L の絶対温度、 e は電子電荷、 I_d は光検出器の暗電流、 P_{av} は受光量の時間平均値、 P_{on} は光源雑音、 F は光検出器の過剰雑音指数である。今求めようとする最小検出電圧は、測定帯域幅1Hzで I_s と I_n の比すなわち S/N が1のときの V_s である。これを $V_{s(NE)}$ とすると、それは式(4)で表される。

$$V_{s(NE)} = \frac{2V_\pi \left[\frac{4kT}{R_L} + e \cdot r_d \cdot P_r \right]^{1/2}}{\pi \cdot r_d \cdot P_r} \quad (4)$$

これに具体的な数値を代入して最小検出電圧を求めたものが Fig. 9 である。なおここで $V_{\pi}=5V$, $P_r=-13dBm$, $R_L=50\Omega$, $r_d=0.8A/W$, $M=F=1$, $T=300K$ とし、光源自身に含まれる雑音 (RIN : Relative Intensity Noise) は無視した。この図から電圧センサの最小検出電圧が理論値よりも大きいことがわかる。この原因として我々は、光源である半導体レーザ光の可干渉性が高いため、光学素子端面からのわずかな反射光と、本来の強度変調光との干渉により AM ノイズが増加したものと予測した。そしてその対策として、インコヒーレントな光源である SLD (Super Luminescent Diode) を用い、反射光による干渉雑音の低減を図った。Fig. 10 はその効果を確認した例で、光源に半導体レーザと SLD を用いて同じ電圧を測定し、その出力波形を比較したものである。図左は半導体レーザを用いた場合、図右は SLD を用いた場合である。この図から、光源に SLD を用いることでノイズが 1/3 に低減されていることがわかる。この結果において、式(4)の中で無視した $RIN^{16)}$ は、本来 SLD の方が大きいにもかかわらずノイズの低減効果が見られることから、先に予測した干渉性雑音を実測値と理論値が異なる主要原因であることを顕著に示しているものである。

3.3.2 周波数応答

周波数応答の上限は、位相変調用電極と金属反射膜間の距離により生じるもので、光波が反射して再び位相変調用電極に戻ってくる間に、印加された電圧の電場方向が変化してしまうためと考えられる。すなわちこれは、光波が電極を通過して反射端面へ向かうときと、反射されて戻ってきたときで印加されている電圧の符号が逆になるときである。したがって反射型光変調器における周波数の上限 f_{max} は次式で表される。

$$f_{max} = \frac{c}{4L \cdot n} \tag{5}$$

ここで L は導波路の物理長、 n は媒質の屈折率、 c は光速である。この光変調器の電極長と電極から反射面までの距離はおおよそ 15mm である。LiNbO₃ の屈折率 $n=2.28$ から、周波数の上限を式(5)より求めると f_{max} は 2.2GHz となり、Fig. 5 の実験結果とよく一致している。

4. 適用例

本測定器を用いて、実際に ECU の電圧波形を測定した。ECU に 1V, 1kHz という既知の電圧信号

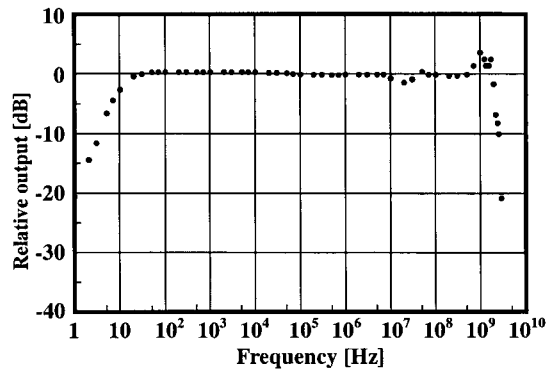


Fig. 8 Sensor frequency response.

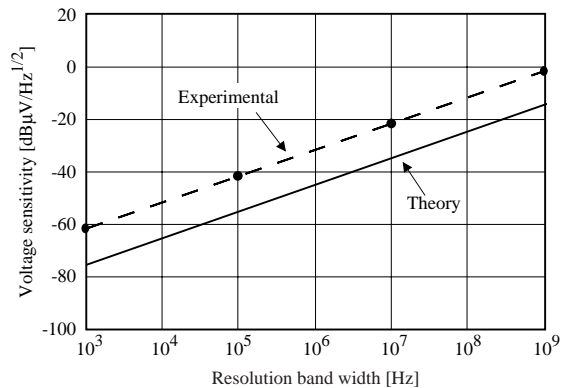


Fig. 9 Comparison of the experimental result with the theoretical for resolution band width vs. voltage sensitivity.

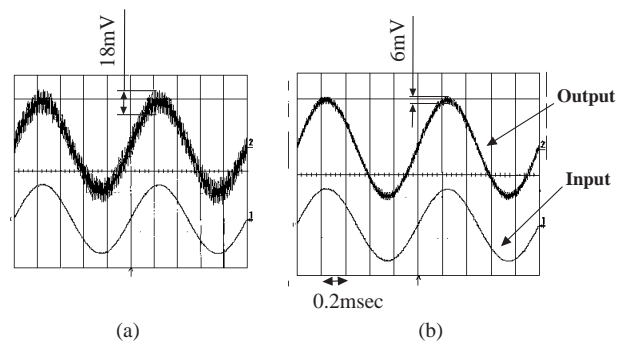


Fig. 10 Temporal traces of the input and output signal as the light source (a) LD, (b) SLD.

を入力しておき、それに向けてアンテナから、200V/m、27MHzの電磁波を照射したときの測定結果をFig. 11に示す。Fig. 11(a)は今回開発した電圧センサを用いて測定した例であり、Fig. 11(b)はオシロスコープ用プローブで測定した例である。この図からオシロスコープ用プローブでは、妨害電磁波の影響により異常な出力波形が観測されているが、電圧センサではノイズの影響を受けることなく1V、1kHzの電圧波形を正確に測定できていることがわかる。

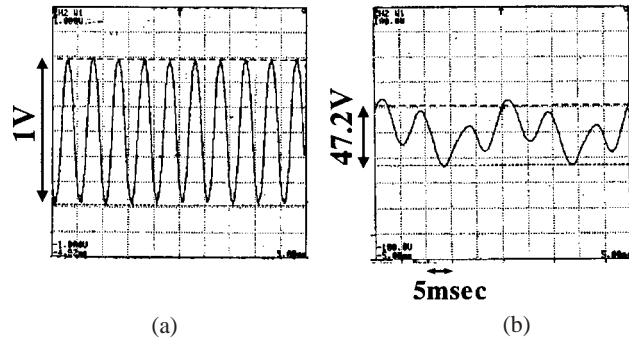


Fig. 11 Comparison of the oscilloscope traces measured using (a) proposed IO sensor, and (b) conventional electric probe.

5. まとめ

独自構造の反射型光変調器と光ファイバパッシブアライメント法によって、センサ部の超小型化、低コスト化を実現した。これにより従来の測定器ではできなかった強電磁界環境下での電子機器の詳細な回路動作解析が可能となることから、適材適所の電磁妨害対策を講じることができ、開発時間やコストの大幅な低減に寄与することが期待される。

参考文献

- 1) 携帯電話等の使用に関する報告書，不要電波問題対策協議会 (1997)
- 2) 古幡博：医科器械学，69-2(1999)，55
- 3) RTCA/Do-199，Vol.1，Sep.1988
- 4) Tekla, S. P. : IEEE SPECTRUM, Sep(1996), 26
- 5) 中野雅光：電磁環境工学情報EMC，10-4(1996)，60
- 6) 池田啓三，他3名：電磁環境工学情報EMC，13-5(1999)，37
- 7) Ichikawa, T., et al. : IPR99, (1999), 275
- 8) Ichikawa, T., et al. : IEICE, E83-C-3(2000), 355
- 9) Yim, Y. -S., Shin, S. -Y. : Opt. Commun., 152(1998), 225
- 10) 市川正，伊藤博：計測自動制御学会SICE，'92(1992)，DS45-2
- 11) Ichikawa, T., et al. : Opt. Lett., 23-14(1998)，1138
- 12) Mekata, N., et al. : Appl. Opt., 29-34(1990)，5096
- 13) 豊原篤志，他3名：電子情報通信学会技術研究報告，OQE91-71，(1991)，13
- 14) 伊藤博，他3名：電気学会物理センサ研究会資料，PS-96-3，(1996)，19
- 15) Bulmer, C. H. : Appl. Phys. Lett., 53-24(1988)，2368
- 16) Aileen, M. Y., et al. : IEEE J. Quantum Electron., 22-4(1986)，522
(2001年1月8日原稿受付)

著者紹介



市川 正 Tadashi Ichikawa
生年：1961年。
所属：光応用研究室。
分野：光集積回路の研究・開発。



伊藤 博 Hiroshi Ito
生年：1949年。
所属：光応用研究室。
分野：光集積回路とその応用。光応用計測。
学会等：応用物理学会，日本光学会，計測制御学会，電子情報通信学会，SPIE会員。