

高速光通信用 LiNbO₃ 変調器の信頼性

永田 裕俊・箕輪 純一郎

高速光通信システムのキーデバイスである LiNbO₃ 変調器の信頼性について述べる。特に長期信頼性では、強誘電体結晶である LiNbO₃ の材料特性に起因した、半導体デバイスとは違った問題が発生する。新しいデバイスゆえ、まだ完全に解明されていない問題もあるが、厳しいスクリーニング試験を実施して長期使用に耐え得る変調器を厳選しており、早期にシステム導入されたものは、既に5年を越える無故障実績を示している。

1. はじめに

LiNbO₃ 結晶（以下 LN）が初めて合成され、その強誘電物性を応用したデバイス開発が始まったのが1960年代のなかば。特に、電気光学定数の大きいことが注目され、光導波路型電気光学デバイスの開発が中心となった。しかし、焦電効果、弾性光学効果のような強誘電体物性、および直流電場印加に対する応答で起こる誘電体特有のドリフト現象により、導波路からの光出力が安定しないという欠点があった。このため、当初 LN デバイスの信用は低く、実システムでの使用にかなう高信頼 LN デバイスが実現したのは、ドリフト現象を抑制する手法が発見された1990年台になってである⁽¹⁾。

LN 変調器が採用されているシステムには、2.5 および 5Gb/s 光強度変調器として太平洋 / 大西洋横断を始めとする光海底ケーブルシステム、2.5 および 10Gb/s 光強度変調器として各国陸上光幹線システムがある⁽²⁾。また、LN 偏波スクランブラあるいは位相変調器が、光強度変調器の後段に

組み合わされる形で、海底システムで用いられている。これらデジタル応用の他にも、光 CATV 用に、2GHz 帯域のアナログ変調器が LN を用いて製造されている。

LN 変調器の心臓である導波路素子は、ちょうどマッチ棒ほどの細長いチップであり、その両端に光ファイバを接続して、金属筐体に収納される。筐体は、半導体レーザー同様、シーム溶接などの手法で気密封止される。信頼性試験で故障判定される原因は、LN 素子自体の問題よりも、ファイバ破断等、むしろ実装のまずさからくることの方が多い。よって、少なくとも光通信システムに供給される LN 変調器は、実装工程に依存する機械的信頼性と、LN 素子のドリフト特性に依存する長期信頼性の両面からスクリーニング出荷される。

2. LN 変調器の信頼性保証

通信用レーザーに関する品質規格には、既にベルコア社による規格 TR - NET - 468 があり、市場での実績に応じた3段階の品質レベルが設定されている。これらに照らし

合わせると、市場実績が未熟なLN変調器は、最も厳しい品質管理レベルに分類され、製品ロットごとに100%スクリーニングされなければならない。ロットの定義は製造者側に委ねられるが、まだ手作業に頼ることの多いLN変調器の組立て工程を考慮して、製造した全デバイスをスクリーニング試験する。

スクリーニング試験の目的は、デバイスの長期動作中に起こる初期故障、偶発故障、摩擦故障の3つの故障期のうち、初期故障の可能性のある製品を出荷前に発見し、排除することである。LN変調機で発生し易い初期故障は、実装した光ファイバの断線や、ファイバとLN導波路の接着部分のずれによる、光挿入損失の増加(不通)である。これらは外観検査での検出が難しいため、短期間あるいは低度のストレスをスクリーニング試験として製品に負荷することで、強制的に故障を発生させ不良品を検出する。さらに、LN変調器特有のドリフト現象を長期保証すうため、実システムでの駆動方式を反映した温度加速試験を実施する。詳細は後述するが、これは性能実証試験に近いもので、レーザーについて行われるバーンイン試験とは主旨が異なる。

3. LN用筐体と実装工程

筐体材料には、素子材料と熱膨張率が整合したものを選ぶ。半導体でない特殊性として、LN結晶は異方性が強く、Z軸方向の熱膨張率が $0.75 \times 10^{-5}/K$ 、X軸方向が $1.54 \times 10^{-5}/K$ と熱膨張率が2倍異なる。一般的デバイス設計では、導波路をZ軸に垂直にとるため、LNチップの長手方向の熱膨張率は $1.54 \times 10^{-5}/bb$ となり、熱膨張率を整合させるために、例えばステンレス鋼筐体を作製する(SUS303の熱膨張率は

$1.46 \times 10^{-5}/K$)。光ファイバとの熱膨張率整合を考えると、半導体レーザー筐体のようにコバル鋼を使用するのが好ましいが、コバル熱膨張率が $0.5 \times 10^{-5}/K$ と小さいため、50~70mmの長尺LNチップの実装には不適である。

筐体側面には、高周波対応の電極端子として、例えばSMAコネクタが、LNチップの実装工程に先立ち、はんだで封止固定される。次にLNチップをステンレス筐体中にダイボンディング用の導電性エポキシで直接接着した後、SMAコネクタとLNチップの電極を接続する。LNチップ端に接続する光ファイバは、被覆除去した裸ファイバ表面を予め無電界メッキ処理したものであり、図1の模式図に示すよう、筐体のファイバ導入パイプにはんだ固定される⁽³⁾。さらに、ファイバの固定強度を高めるため、保護被覆部分を熱硬化型のエポキシ接着剤で筐体に固定する。

4. 光ファイバー

LN変調器の信頼性保証では、後述するdcドリフト問題が支配的となるが、破局故障を招くファイバ破断も無視できない。ファイバの熱膨張率がステンレス筐体に比べ、小さいため、筐体の熱収縮によるファイバの座屈破断が起こり得る。また、ファイバ端の保護被覆を除去して実装するため、

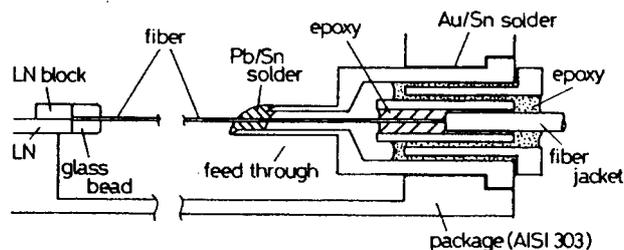


図1 筐体内部の概略構造

保護被覆の熱収縮により裸ファイバが被覆端から突き出し、座屈破断に至る場合もある。例えば、ナイロン被覆されたファイバは、-20 / 70 温度サイクルあるいは 80 保存の環境試験で被覆が軸方向に大きく収縮し、ファイバが被覆端から 1 ~ 2mm 突出することがある⁽⁴⁾。

光ファイバの座屈変形に対する耐性を調べるため、長さ 5mm の偏波保存ファイバを軸方向に押し込んで座屈させた試験では、裸ファイバの状態では 1.6mm 程度（ワイブル分布関数の特性値）、メッキ処理した状態で 0.75mm 程度の押し込みで破断することがわかった⁽⁵⁾。つまり、被覆端からのファイバ突き出し量が数百 μm 以下の被覆ファイバを使えば、ファイバ破断の原因を一つ排除することができる。例えば、紫外線硬化型樹脂（アクリレート系）被覆ファイバ、ハイトレル（ポリエステル系）被覆ファイバが適している⁽⁶⁾。

一方、ステンレス筐体の熱収縮による光ファイバの座屈変形について計算した結果では、図 2 に示したように、座屈曲げによりファイバ側面に生ずる引っ張り歪み量が、

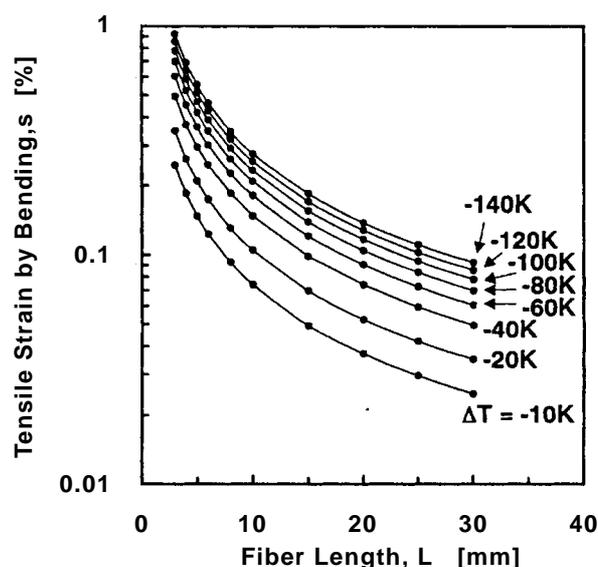


図 2 筐体の熱収縮によるファイバ歪み

温度変化量以外に、ファイバ長にも依存して変化する⁽⁷⁾。該当部分のファイバが短くなると、歪み量が著しく増大し、光ファイバ製造時のスクリーニング歪み量である 1% に近づいている。保護被覆が除去された実装状態では、表面キズ等の影響によりファイバ強度が低下しているので、実装後のスクリーニング試験が必要となる。

スクリーニングの方法は種々あろうが、保護被覆端からのファイバ突き出しに関しては、温度サイクルや高温保持、筐体の熱収縮の影響については低温が、それぞれ適している。通信用 LN 変調器の動作環境を考慮すると、例えば、80 ~ 85 での保存試験、-20 / 70 温度サイクル、-20 での保存試験を組み合わせればよいであろう。この場合、低温保存試験は、ファイバにとって応力（歪み）加速試験となる。

5. 紫外線硬化型接着剤

LN チップと光ファイバの接続には、硬化速度の早い、紫外線公開方接着剤を用いるのが一般的である。紫外線照射による初期硬化のみでは、接着剤の硬化反応が完了しないので、熱硬化処理を行い、接着強度を高めてやる。しかし、熱硬化反応を完了させるには 100 を越える温度での処理が必要となり、ファイバ被覆材を熱劣化させない温度域での短時間の熱処理のみでは、未反応成分が残ってしまう。接着剤は、硬化反応時に大きな体積変化を生じるので、接着剤の塗布量が異常に多くなってしまったような場合、未反応成分がデバイス使用中に徐々に追硬化反応して、ファイバ接着部がズれてしまう可能性がある。

幸い、接着剤の追硬化反応は温度加速型の反応であるため、高温保持試験により、不良品を容易にスクリーニングできる。

市販の光学用紫外線硬化エポキシ接着剤について試験した結果では、実装段階での所定の硬化処理後、80 で100時間追アニールしてやることで、未反応成分の70～80%が追反応することがわかった（活性化エネルギー0.4eV）⁽⁸⁾⁽⁹⁾。つまり数十時間の高温保持試験で追硬化反応をほとんど終了させてしまうと同時に、追硬化反応によるファイバ接続部の異常発生を事前に発見できる。

6. 気密封止

ベルコア TR-NWT468 規格、MIL 規格等で筐体に要求される気密封止は、もともと、IC チョップの金属配線の劣化（原子マイグレーション、デンドライト成長等）を抑制することを目的としている。LN チップ上に配線されている電極は、厚さ10～20 μm もの金メッキ電極であるため、特に重要な配線劣化は生じない。しかし、封止していないLN 変調器を、高温高湿度下（80 /95%/RH）で直流バイアスを負荷しながら動作させると、電界の集中し易い電極の曲げ部分が変成し、ショートすることがある。この部分ではAu が変成しているようであり、水分の存在下で起きた、電気化学反応による故障と推測できる。したがって、最悪の動作環境を想定すると、LN 変調器にも気密封止筐体を採用するのが望ましい。

筐体封止の方法には、エポキシ樹脂の充填、金属接合があるが、封止能力の低いエポキシ封止を選択する場合は、高温高湿下でも長期動作試験（ダンプヒート試験）を実際に行って、デバイスの安定動作を実証する必要がある。

7. ドリフト現象

以下、LN 変調器の機械的な信頼性に関

わる問題について述べたが、これらは他のデバイスにも通じる問題である。次に、LN 変調器に特有、かつ長期信頼性にも影響するドリフト現象について述べる。

光通信で使用されているLN 変調器には、大別して、光強度変調器と位相変調器の2種類がある。前者は、電気信号を光信号に変換する役目にする外部変調器である。位相変調器の使い方はシステムに依存するが、光信号の色分散の補正、偏光度の制御等に用いられる。ドリフトは、特に強度変調器の長期信頼性に大きく関わってくる。さらに、光強度変調器のドリフト現象には、dcドリフトと温度ドリフトがあり、長期信頼性の観点からは、dcドリフトがデバイス寿命を決める重要なパラメータとなる。

7.1 dcドリフト

動作状態のLN 光強度変調器には、高周波信号に加え、光出力の変調状態を調整するためのdcバイアスが印加される。この時、図3に示すように、変調波形が経時的に流れていく現象が起こり、これがdcドリフトと呼ばれる⁽¹⁰⁾。後述する温度ドリフトも、温度に依存した同様な変調波形の動きとして観測されるが、dcドリフト

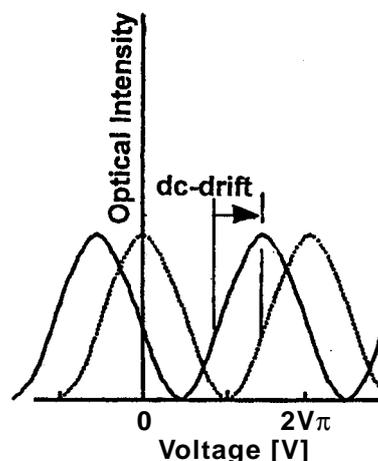


図3 dcドリフト

は、バイアスを印加することで誘起される現象である。 もっとも、dc バイアスは、温度ドリフトしてしまう光出力を常に一定の状態に維持するために印加するのであるから、両ドリフトは複雑に絡み合っている。

Dcドリフトを引き起こす物理的なメカニズムはまだ明らかでない。 しかし、その挙動は、デバイスを構成する誘電体に関する等価回路で説明できる。 図4は、清野らによって示された、最も基本的なモデルである⁽¹¹⁾。 図に示したよう、LN変調器は、光導波路を埋設した、LN単結晶基板と、それを覆うSiO₂バッファ層、高周波用表面電極とから構成される。 これに対応する等価回路を検討すると、初期のドリフトは構成材料の容量C、長期のドリフトは抵抗Rに影響されることがわかる。 特に、LN結晶の抵抗RLNが十分に大きくないため、印加したdcバイアスがゆっくりと電圧降下し、これが長期ドリフトの主要因となる。 また、バッファ層の特性RB、CBに依存して、初期ドリフトの方向が変わる。 実際の変調器では、このことを利用して、初期に負方向のドリフトを誘起し正方向のドリフトを打ち消すよう、バッファ層を設計する⁽¹¹⁾。

しかし、dcドリフトは完全には除去できないので、変調器の寿命を見積もるには、長期dcドリフト評価が不可欠となる。寿

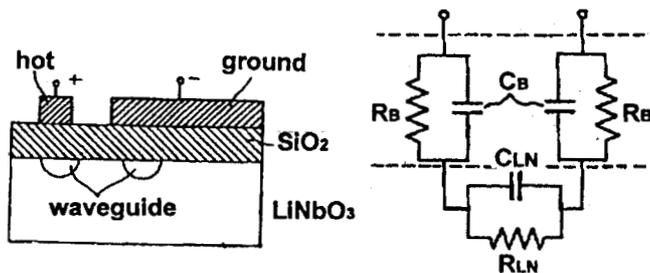


図4 LNチップ断面とその等価回路

命見積りに必要なドリフト現象の活性化エネルギーEaとして、これまで、1eV前後の値が報告されている⁽¹²⁾。 図5は、Ea = 1eVを用い、100での温度加速試験データをもとに計算した、50でのFIT数である。 試験では、複数のロットからなる変調器サンプルにdcバイアス5Vを印加し、出力変調波形の動きから電圧降下量、つまりドリフト量を求め、ドリフト量が印加電圧の50%に達する時点を故障と定義した。 FIT数の計算には、対数正規分布関数を用いた。 また、図5には、SiO₂バッファ層の厚さの異なる3種類の変調器に関する結果を示してあり、バッファ層厚という単純な設計パラメータが、dcドリフト挙動に大きく影響することがわかる。 例えば、バッファ層厚1.1 μmの高速仕様LN変調器の、長期dcドリフトに関する信頼性パラメータは、50でのメジアンライフMLが230年間、標準偏差が2.20、20年後の故障率が640FITであった。 バッファ層厚の異なる変調器のデータも考慮すると、本試験で示すことのできるdcドリフトに関する最大故障率は、50で1000FIT程度である。

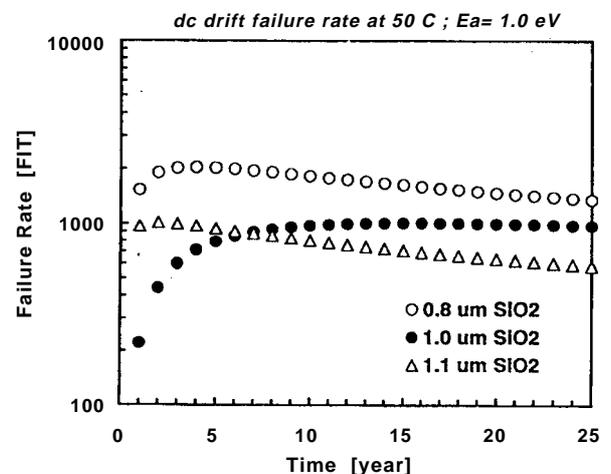


図5 dcドリフトに関する故障率見積り

7.2 温度ドリフト

LN 変調器の温度ドリフトの原因は非常に複雑である。LN 結晶の焦電効果により、チップ表面に誘起される電荷、バッファ層や表面電極を形成したことで発生する内部応力の温度依存等が、導波路の屈折率変動につながり、変調波形をドリフトさせる。ドリフトを低減するには、焦電効果を見逃すことのできる結晶面を使う、誘起された表面電荷を一様分布させるために半導体膜コートする、応力分布が一様になるよう対称性の高い導波路/電極パターンを採用する、内部応力自体を小さくできる構造/プロセス条件を選ぶ、などで対処できる⁽¹³⁾。

図6は、LN 光強度変調器について測定した、出力変調波形のピーク位置の温度依存性を示す。測定中、dc バイアスは印加していない。温度 0 から 70 の間で、約 2.5V 変調波形がドリフトしている。つまり、変調器出力を一定に維持するために印加する dc バイアス電圧が、環境温度の変化を反映して、本サンプルでは最大 2.5V 変動する。商用変調器では、前述の温度ドリフト要因のうち、焦電効果の影響はほとんど除かれており、電極デザインの変更でドリフト量を図6の一割程度に低減す

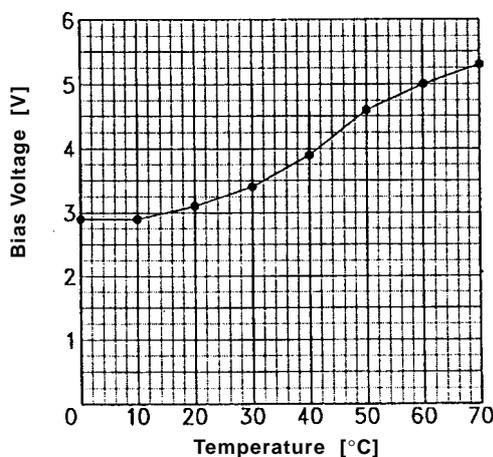


図6 温度ドリフトの測定例

ることも可能である。しかしデバイス的高速化を目指す、電極を厚くするなど内部応力の上昇につながる設計が必要で、温度ドリフトを完全に無くすことは難しい。

8 信頼性保証試験

8.1 機械的信頼性

LN 変調器に要求される主要な信頼性試験は、表1に示す主要6項目である。各社から市販されているLN 変調器は、一連の試験に合格するレベルにある。

また、表1の試験以外に、電極部分の静電破壊への耐性を調べるESD試験、筐体に封着した電極ピンの封止性能を調べる熱衝撃試験および温度サイクル試験が要求されることもある。気密封止型LN 変調器について500 ~ 4000VのESD試験(MIL - 883D - 3015.7)を行ない、変調器特性に異常のないことを確認している。SMA電極、光ファイバ、筐体の蓋のといった封止部分の気密性評価のため、-55 /125 熱衝撃試験(MIL - 883 - 1011B)、-65 /150 温度サイクル試験(MIL - 883 - 1010C)を行なった結果も、ほぼ良好であった。しかし、ステンレス筐体と光ファイバのはんだ接合部分は、互いの熱膨張率差のため、熱衝撃試験、温度サイクル試験で気密性能が劣化することがある。部材表面はNi/Auの2層メッキされており、これをPb/Snはんだで接合すると、NiとSnの金属相間化合物が生成する。したがって、接合界面がもろくなり、熱衝撃等でリークが発生し易くなる。

8.2 エージング試験

LN 変調器の長期エージング試験は、長期dcドリフトの評価を兼ねる。ドリフトに関する信頼性見積もりは先に述べたが、LN 変調器長期dcドリフト測定例を、図7

表 1 信頼性試験項目

Test	Reference	Conditions
Mechanical shock (MS)	MIL-STD-833 2002, A	500G, 1.0 ms, 5 times/axis
Heat cycle (HC)	MIL-STD-833 1010	-40 ~ +70°C, 100 cycles min.rate = 10°C/min
Low-temperature storage (LTS)	—	-50°C, 7 days
Vibration (VB)	MIL-STD-833 2007, A	20-2000 Hz, 20 G, 4 min/cycle, 4 cycles/axis
Fiber pull (FP)	—	1 kg, 10 s, 3 times
Damp heat (DH)	IEC 68-2-3	40°C, 95%RH, 56 days biased (dc=5 V here)

に改めて示す。試験では、85 の恒温槽に入れた LN 変調器に、初期バイアス 4.5V を印加し、出力光の変調状態を初期状態と同一に保つようバイアス電圧を 1KHz のタイミングで調整しながら、5000 時間連続動作させた。図の横軸は 85 での動作時間、縦軸は初期バイアス 4.5V を含めたバイアス電圧値を示す。ドリフト挙動が変調器に大きく依存しているが、これは既に述べたように、サンプル MZ4-141 と MZ4-218 とで、バッファ層の厚さが異なるため

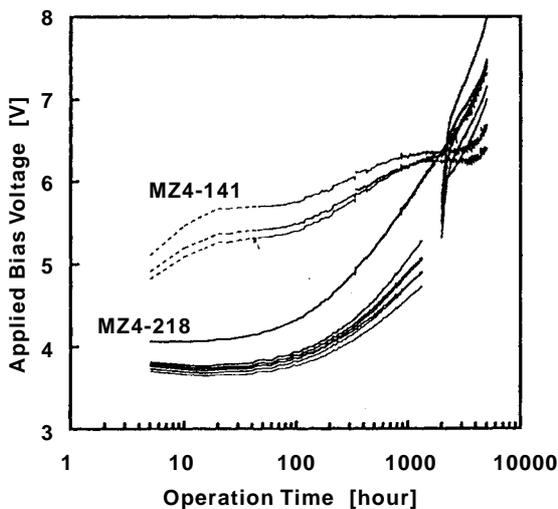


図 7 長期 dc ドリフトの測定例

ある。Ea=1eV から換算すると、85 での動作時間 5000 時間は、40 で 60 年間、50 で 19 年間、60 で 6.5 年間、70 で 2.3 年間に相当する。

また、エージング試験後に変調器の諸特性を室温で再測定した結果、初期値からの特性劣化はなかった。エージング試験で起こり得る故障には、例えば、ファイバ接着部の劣化による光挿入損失増がある。現在のところ故障モード解析するに十分なデータ数が少ないため、偶発故障モードを仮定して、のべ 20 数台のサンプルについて実施した種々のエージング試験の結果をもとに計算すると、偶発故障の FIT 数は 50 換算で 2000FIT 程度であった (Ea = 0.4eV を使用)。dc ドリフトに関する FIT 数を合わせると、総 FIT 数は 3000FIT 程度となる。

9. まとめ

LN 変調器の信頼性について、弊社製品に関する試験結果をもとに述べた。LN 変調器には、目標故障率として数百 FIT 程度が要求される。弊社の試験量からは、現状、数千 FIT という一桁悪い値しか示す

ことができなかったが、その一方で、のべ2800万時間におよぶ弊社製品ノデバイスアワーのうち、確認されている故障は現在のところ1件のみである(ファイバ破断)。単純計算すると、100FITを十分に達成していることになる。

弊社製品以外にも、国内外で製造されたLN変調器が世界中の通信システムで使用されているが、その品質および信頼性については、まだ完全に理解できていない状況である。LN変調器の市場は今後も成長が期待でき、デバイスメーカーとしては、さらなる品質向上はもとより、LNについての様々な謎解きに努めていきたい。

参考文献

- (1) M.seino 他 : A low dc-drift Ti:LiNbO₃ modulator assured over 15years, Tech. Dig. Cong. Opt. Fiber Commun., 325/328(1992)
 - (2) 箕輪 : LN 光デバイス集積技術, セラミックス, 32-8, 609/612(1997)
 - (3) H.Nagata and N.Mitsugi : Mechanical reliability of LiNbO₃ optical modulators hermetically sealed in stainless steel packages, Opt. Fiber Technol., 2, 216/224(1996)
 - (4) H.Nagata 他 : Elimination of optical fiber breaks in stainless steel packages for LiNbO₃ optical modulator devices, Opt. Fiber Technol., 2, 98/105 (1996)
 - (5) N.Mitsugi 他 : Optical fiber breaks due to buckling, Opt. Fiber Technol., 1 278/282(1995)
 - (6) H.Nagata : Thermal analysis of jacketing materials for commercial optical fiber, Opt. Fiber Technol., 3 87/89(1997)
 - (7) H.Nagata 他 : Failure case study for optical fiber breaks in metal packages, Opt. Fiber Technol. (印刷中)
 - (8) H.Nagata 他 : Evaluation of new uv-curable adhesive material for stable bonding between optical fibers and waveguide devices, Opt.Fiber Technol., 1, 283/288(1995)
 - (9) H.Nagata 他 : Effect of aging on polymerization of a low refractive index epoxy, Daikin Optodyne UV-1100 Eng.&Lab. Note in Opt.&Phot. News, 9-5, (1998)
 - (10) H.Nagata 他 : Reliability of LiNbO₃ based integrated optical waveguide devices for fiber communication systems, Mat.Res.Soc.Symp.Proc. 531,359/370(1998)
 - (11) 清野 他 : LiNbO₃ 導波路変調器の DC ドリフト改善の検討、信学技報、OCS95-66, 55/60(1995)
 - (12) H.Nagata and J.Ichikawa : Progress and problems in reliability of Ti : LiNbO₃ optical intensity. Modulators, Opt. Eng., 34-11, 3284/3293(1995)
 - (13) H.Nagata 他 : Comments on fabrication Parameters for reducing thermal drift on LiNbO₃ Optical modulators, Opt Eng., 36-1, 283/286 (1997)
- (ながた ひろとし・
みのわ じゅんいちろう
/ 住友大阪セメント 新規技術研究所)