

MEMS 型可変光減衰器の開発

Development of MEMS-type Variable Optical Attenuator

森本 政仁*
Masahito Morimoto

森本 浩司*
Koji Morimoto

佐藤 功紀*
Kouki Sato

飯塚 晋一郎*2
Shinichiro Iizuka

概要 ますます増大する光通信トラフィック需要に対し、通信方式で主流となりつつある波長分割多重 (WDM) 通信方式においては、伝送速度の高速化のみならず波長多重数の増加によって通信容量増大を図る WDM 伝送装置の開発が鋭意行われている。今後の WDM 伝送方式では、多重化された各波長の信号を分波した後に、各信号光のパワーを調整し、波長によるパワーの変動を低減することで、通信品質を安定にすることが提案されており、現状のような多重化された光信号全体のパワーを 1 つの可変光減衰器 (以下 VOA: Variable Optical Attenuator と記述する) で調整する方法から、各波長に VOA を導入する方法に移行すると考えられる。このような、波長単位での VOA 導入が実現化されるには、波長多重数を考慮すると各波長に導入する VOA は、非常にコンパクトであることが要求されると考えられる。本稿では、多重信号の減衰にも使用できるよう減衰量波長特性が小さく、かつ超小型化可能な MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いた VOA を開発し、サイズ (体積比) を約 1/25 と小型化したので報告する。

1. はじめに

近年の通信容量の急激な増加に対応すべく、光通信分野においては 1 本の光ファイバに複数の異なる波長を多重化して伝送を行う波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 通信技術を用いた光通信ネットワークが急速に実用化、導入されてきた。現在の WDM 伝送システムにおいては波長多重化された複数の信号光を一括増幅することが可能なエルビウム添加ファイバ増幅器 (EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier) によって、通信線路中での減衰を補償し中継するということが行われているが、EDFA の増幅利得が WDM 通信における使用波長帯域内において波長依存性を有するので、受信機における各波長の信号光の受信レベルを一定に保つため、EDFA の利得の波長依存性と相反するプロファイルを有する利得等化器 (GEQ: Gain Equalizer) が EDFA とともに使用され、伝送帯域の利得平坦化がなされるように設計されることが多い¹⁾。

しかしながら、GEQ は固定のプロファイルを有しているため、伝送路途中でスパンロスが変動した場合や、波長信号を分岐挿入 (OADM: Optical Add Drop Multiplexing) したことにより EDFA への入力光強度が変化すると、EDFA の利得プロファイルの波長依存性も変化し、GEQ によって実現されていた利得平坦化にずれが生じる。したがって、EDFA 及び GEQ に波長依存性の少ない光量調節機能を付与することにより利得プロファイルの平坦化を実現させる光部品として可変光減衰器

(VOA: Variable Optical Attenuator) が必要となる²⁾。この VOA を用いた方式でも、多重化された信号を一括して調整するため、今後の通信の更なる高度化及び高精度化要求を満たすには、多重化された信号を分波した後、各波長において VOA を使用することが必要となってきている。しかし、WDM 通信では、波長多重数は数十波から将来的には数百波という数に増大することが予想され、各波長に VOA を使用するとすると、1 つの VOA は非常にコンパクトであることが要求されるであろう。また、コンパクトでありながら、波長依存性の少ない VOA が実現できれば、現状システムの設計自由度が増え、需要が喚起されることも考えられる。

以上のような背景から、超小型化が可能な MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いた減衰量波長依存性の小さい VOA を開発したので報告する。

2. 開発目標

開発目標値を表 1 のように設定した。なお、波長帯域については、各波長に分離された場合に使用される用途だけでなく、現状の多重信号一括調整にも使用可能な波長依存性が小さいこともターゲットに入れ、EDFA の帯域がいわゆる C バンド (1530 nm ~ 1565 nm) から L バンド (1565 nm ~ 1625 nm) へと広帯域化していることも念頭に置き、両帯域への適用が可能なように考慮した。(測定器の都合上、実際の測定評価には 1530 ~ 1620 nm を用いた。)

表 1 に示した開発目標の設定にあたっては、既に製品化されている VOA の特性とおおむね同等となることを開発目標として挙げた。

* ファイナルフォトニクス研究所 光部品開発部 光機能部品グループ

*2 設備部 生産技術開発センター プロセス開発部

表 1 MEMS 型 VOA の開発目標
Target specification for MEMS-type VOA

光学特性	
波長帯域	1530 ~ 1625 nm
挿入損失	< 1.0 dB
反射減衰量	> 45 dB
波長平坦性	0.3 dB (C または L バンドで)
偏波依存性損失 (PDL)	< 0.3 dB (減衰量の 1% 以下)
温度依存性	< 0.15 dB
駆動部特性等	
MEMS アクチュエータ	静電力駆動型
動作電圧	< 200 V
減衰量分解能	< 0.1 dB
繰り返し設定精度	< 0.1 dB
サイズ (幅 × 長さ × 厚さ)	10.0 × 2.0 × 0.6 mm
パッケージ	33 × 6.5 × 4.5 mm
封止	気密封止

また、動作電圧としては 200 V 以下を目標とした。MEMS チップ自体は静電力駆動方式を採用し、チップ自体の消費電力を抑えることとした。静電力駆動方式では高電圧が必要であるが、基本的に電流は流れない（リーク電流は存在するが）ので、典型的な消費電力は μW オーダーである。したがって、モジュール自体の消費電力は、MEMS チップよりも昇圧回路の消費電力で決定されると考えてよい。パッケージは MEMS チップへの結露を避けるため、気密封止を採用することとした。

3. MEMS 型 VOA の構造

今回開発した MEMS 型 VOA の概略構造は以下のとおりである。入射ファイバはシングルモード光ファイバ（SMF: Single Mode Fiber）であり、SMF 先端には外径が SMF と同等の 125 μm の GIF（Graded Index Fiber）を所定長融着接合することで、レンズ機能を持った光結合系を構成する。この GIF の先端は斜め研磨され無反射（AR: Anti-Reflection）コーティングが施されている。GIF の先端が斜め研磨されていることにより、GIF 端面から放射される光ビームはファイバ光軸に対して真っ直ぐ放射されず、斜めに放射される。この斜めに放射された光ビームを、シリコン ICP-DRIE（Inductively-Coupled-Plasma Deep Reactive Ion Etching）によって作製されたシャッターによって遮る構造となっている。

MEMS チップは SOI（Silicon on Insulator）ウェーハを用いて、シャッター、アクチュエータ、ファイバ溝を同時にチップ内に ICP-DRIE 加工し、最後に全体を金蒸着することで作製した。

MEMS アクチュエータとしては櫛歯型アクチュエータを採用し、ファイバ溝への GIF の固定には接着剤を用いた。この GIF 光結合系を実装した MEMS チップは筐体（きょうたい）内に接着固定され、モジュールとして気密封止を行っている。

MEMS チップ形状の SEM 写真を写真 1 に示す。

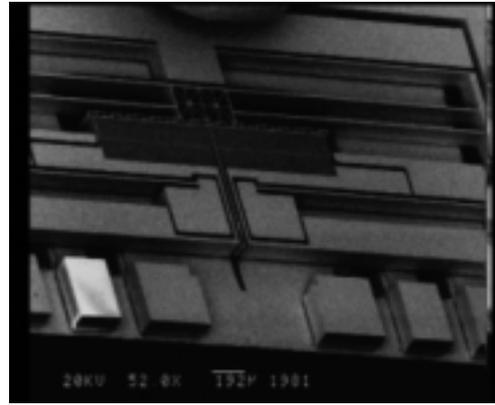


写真 1 MEMS チップの形状 SEM 写真
SEM image of MEMS tip figure

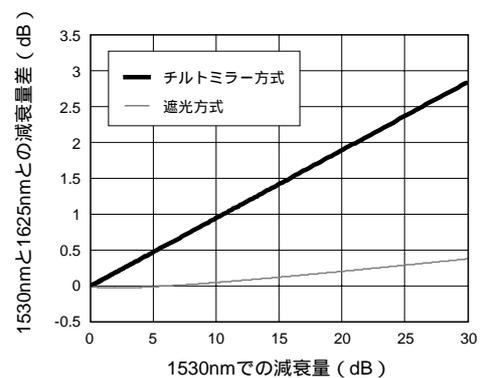


図 1 減衰量波長特性シミュレーション
Simulation result of wavelength dependent loss

4. 設計

4.1 光学系設計

今回の MEMS 型 VOA を設計するにあたって、MEMS チップが小さい利点を十分に生かすため、使用するコリメータも光ファイバと同一サイズとすることで、モジュールサイズを小さくすることとした。そこで、全コア型の GIF をレンズとして機能させ、SMF の先端に所定長融着接続した GIF 光結合系の設計を行った。この設計の際に、VOA の方式として遮光型を用いるか、チルトミラー型を用いるかの検討を行った。遮光型ではシャッターの形状を工夫することで減衰量波長依存性を小さくすることが可能であることが分かったが³⁾、チルトミラー型では遮光型に比べ、光ファイバのモードフィールド径波長依存性のため減衰量波長特性が大きくなることが避けられない。図 1 に SMF のモードフィールド径測定結果を用いた、チルトミラー方式及び片側から光ビームを遮光する遮光方式での減衰量波長依存性シミュレーション結果を示す。（1530 nm の減衰量を基準に取り、1625 nm の減衰量との差をプロットした。他の遮光方式については参考文献 3) 参照）しかし、遮光型ではシャッター部分での回折の影響を低減するため、光ビーム径を大きくする必要があり、MEMS アクチュエータを大きく動作させる必要があるが、チルトミラー方式の場合は、小さな動作で大きな減衰量を達成できる。今回は減衰量波長特性も小さな VOA を開発することを目標としたので、光ビーム遮光型を採用することと

した。

放射される光ビームのスポットサイズは、今回使用したGIF光結合系で得られる最大スポット径に設計されている。また、GIF端面は-45 dB以上の反射減衰量を達成するため、角度を持たせて斜め研磨した。これにより光ビームはGIF端面からスネルの法則で計算される角度だけ斜めに放射される構造となる。よってGIF光結合系は一直線上に対向させるのではなく、オフセットした位置に対向させ、結合させる必要がある。左右の光ファイバ用溝は、光ビームの出射角度と対向間距離から決まる距離だけオフセットして作製されている。このオフセットしたファイバ溝はMEMSチップ上に一括形成した。

実際のGIFから出射された光ビームをNFP装置で測定した結果、設計通りの光ビーム径と対向間距離が達成されていることを確認した。図2に今回作製したGIFのNFP像を示す。なお、GIFは特別に作製した全コアGI母材をSMFと同径に線引きして作製した。

4.2 MEMSチップ設計

MEMSチップはシリコンウェーハを微細加工して作製されているが、機械構造物であることに変わり無く、可動部を有するので、機械的な振動、衝撃による可動部の破壊が懸念される。

そこで、まずシミュレーションにより振動印加時、衝撃試験での可動部の破壊が無いことを確かめた。

具体的には、Telcordia試験の振動試験（GR-1221）、6軸20 Gで20～2000 Hzによって破壊しないことを考慮した。衝撃に

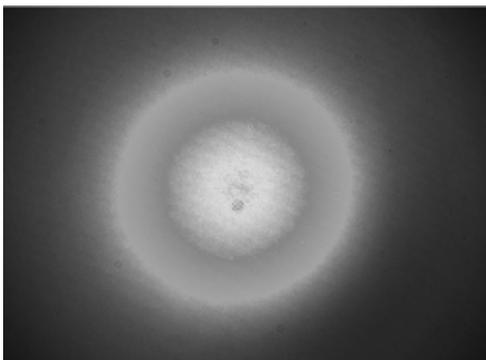


図2 GIFのNFP測定結果
NFP of GIF

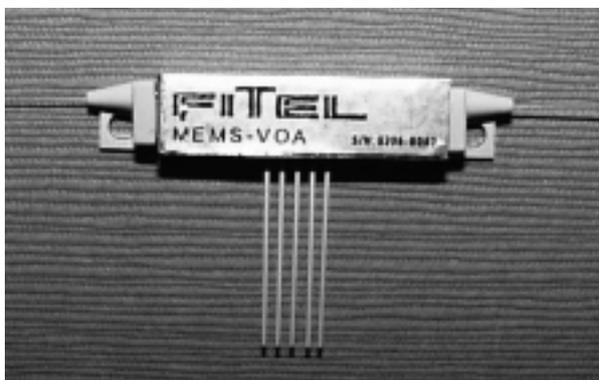


写真2 MEMS型VOAモジュール外観写真
General view of MEMS-type VOA module

については、同じくTelcordia試験の衝撃試験である6軸500Gの衝撃を与えて破壊しないことを考慮し、シミュレーションによって、500 Gの衝撃印加時に最も弱い歯部分構造体がぶつからないことを確認した。シミュレーションでは500 Gの衝撃印加によって、可動部がシャッター移動方向に動くが、歯同士はぶつからず、逆方向については、バネのトラス構造部分のリジッドな部分が電極にぶつかることになるが、この部分は破壊しない十分な強度を有している。また、シャッター移動方向に垂直な2方向には1 μm以下の移動であり、可動部はその他の構造体に全くぶつからない設計となっている。

5. 試作結果

今回開発したVOAモジュールの外観写真を写真2に示す。サイズは開発目標であった幅6.5 mm、長さ33 mm（ファイバ保護ブーツ部長さは5 mm）、高さ4.5 mmを実現している。モジュールは窒素ガス封止による気密封止が施されている。

5.1 光学特性

5.1.1 挿入損失

試作したMEMS型VOAモジュールの1.55 μmの光源を使用した場合の挿入損失の平均値は0.6 dBであり、開発目標値の1 dBに対し、十分満足すべき試作結果となっている。この損失は対向させたコリメータ間のアライメント精度に依存するが、この結果から、シリコン基板上へ一括形成したファイバ溝が非常に精度良く出来ていることが分かる。

5.1.2 反射減衰量

図3に、シャッター挿入による減衰時の入射ポートにおける、反射減衰量の波長特性を示す。シャッターで光ビームを遮光する本方式では、減衰領域においてシャッターからの反射が予想されるため、10 dB減衰時、20 dB減衰時、30 dB減衰時において、反射減衰量を測定した。全減衰量範囲において、実用上問題ない反射減衰量が得られている。

5.1.3 波長特性

図4に、各減衰量における減衰量の波長依存性を示した。開発目標である、Cバンド又はLバンドの25 dBまでの減衰量範囲において帯域内での平坦性（最大減衰量 - 最小減衰量）は0.3 dB以内に収まっていることが確認された。また、20 dBまでの減衰範囲においては、C及びLバンドを合わせた広帯域においても平坦性は0.3 dB以内に収まることも確認された。更に、このスペクトルにおいては、周期的なリップル等も観測されて

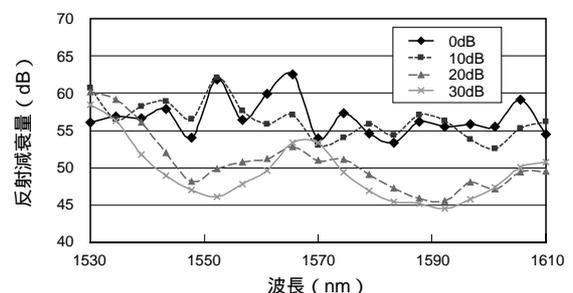


図3 シャッター挿入減衰時の反射減衰量波長特性（入射ポート）
Wavelength dependence of back reflection at several attenuation by shutter (Incidence port)

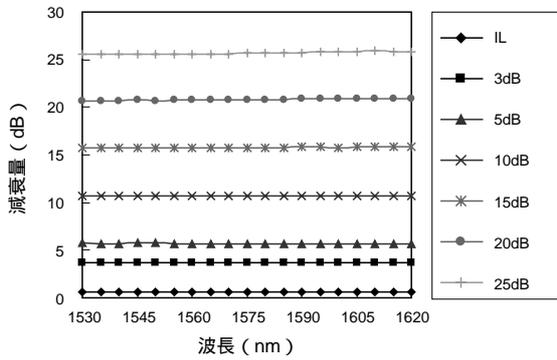


図4 各減衰量における減衰量波長依存性
Wavelength dependent loss of several attenuation

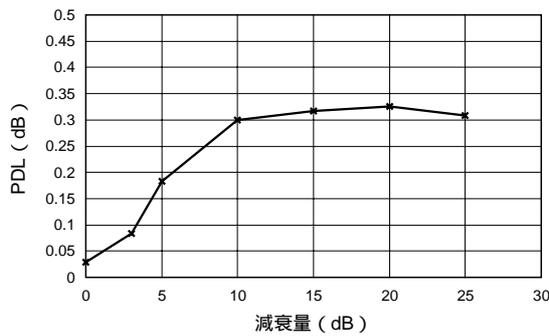


図5 PDLの減衰量依存性
Attenuation dependence of PDL

いない。この平坦性は、SMFのモードフィールド径波長依存性からのシミュレーション結果と良好な一致を示している。この良好な波長平坦性は一般の非球面レンズを用いたコリメータでは実現出来ないことがシミュレーションにより得られており、実際の測定でも今回のGIF光結合系を使用した場合には、一般の非球面レンズを用いたコリメータの結果より約1/3倍程度の良好な波長依存性が得られた。

5.1.4 偏波依存性損失

図5にPDLの減衰量依存性を示す。この値は1530 nmから1620 nmまで5 nmごとに測定したPDLの平均値である。減衰量が10 dB程度まで急激にPDLが悪化し、それ以上の減衰量で約0.3 dB程度の結果が得られた。同じGIF光結合系と、シャッターとして非常に鋭い刃先を持ったかみそりを使った基礎実験では、減衰量の1%以下と言う非常に良好なPDL特性であった。

5.1.5 温度依存性

図6に、-40 から85 の温度範囲における挿入損失の温度依存性の測定データを示す。図では50時間程度しか示されていないが、実際には2週間の試験を行い、同等のグラフとなっている。挿入損失の変動は±0.10 dB以内に収まっており、開発目標0.15 dB以下が達成されていることがわかる。温度依存性はGIFの固定方法に起因していると考えられるが、GIFの固定はエポキシ系接着剤の塗布量、接着位置、接着面積を管理して行っていることによって、良好な温度依存性が実現できたと考えられる。

5.2 動作特性

5.2.1 減衰量対電圧特性

図7に、MEMS型VOAを動作した際の電圧と減衰量の関係を示す。また、シミュレーションによる電圧と減衰量の関係も同一グラフ上に示した。図からも明らかなように、シミュレーションと実測は非常に良く一致しており、電圧の設定精度がmVオーダーで可能であることから、減衰量調整精度は0.1 dB以下である。なお、MEMSチップ自体はアナログ動作が可能で、減衰量設定精度は電圧回路の設定精度に依存することになる。

5.2.2 切り替え時間

切替時間の測定にあたっては、EDFAの中で利得レベル調整用途を想定した場合、変化させる減衰量としては数dB程度と考えると良いと思われるので、3 dBの減衰量変化に要する切り替え時間の測定を行うこととした。測定は、2チャンネルのデジタルストレージオシロスコープを用い、1つのチャンネルにMEMS型VOAモジュールの射出ポートからの光をO/E変換して入力し、もう1つのチャンネルにMEMSチップへの印可電圧を入力することで行った。結果を図8に示す。電圧印加時に減衰量が3 dB前後で振動し、振動が落ち着くまでに15~20 msec掛かっている。これはパネと静電力の釣り合いの位置に勢い良く動いていくことが原因であると思われる。この振動は、筐体内にマッチングオイルなどの粘性抵抗を持った液体を注入することで抑えられる。実際に、マッチングオイルを入れた場合の切り替え時間測定結果を図9に示す。この結果では切り替え時間は約2 msecとなっている。

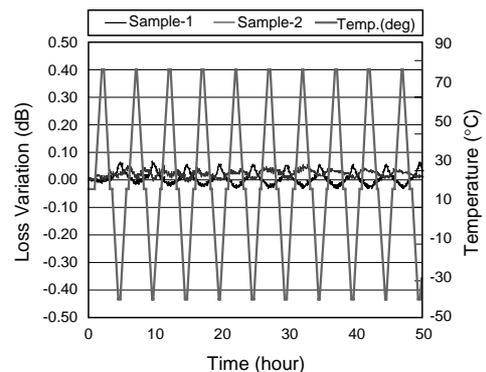


図6 挿入損失の温度依存性
Temperature dependence of insertion loss

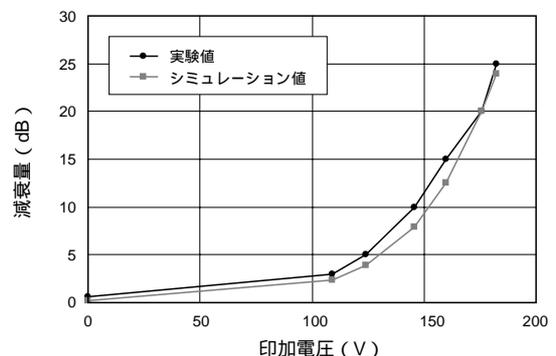


図7 電圧と減衰量
Applied voltage versus attenuation

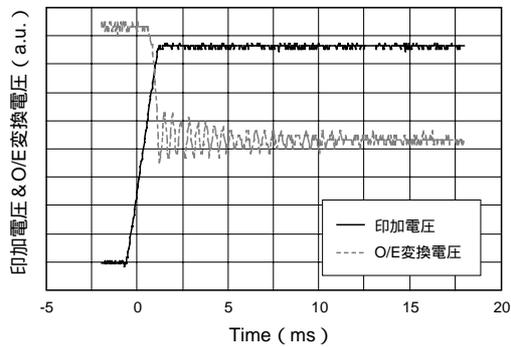


図8 電圧印加による3 dB減衰までの切り替え時間（空气中）
Switching time of IL to 3 dB attenuation (air)

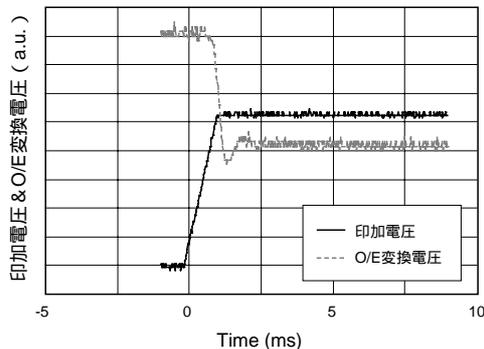


図9 電圧印加による3 dB減衰までの切り替え時間（空气中）
Switching time of IL to 3 dB attenuation (air)

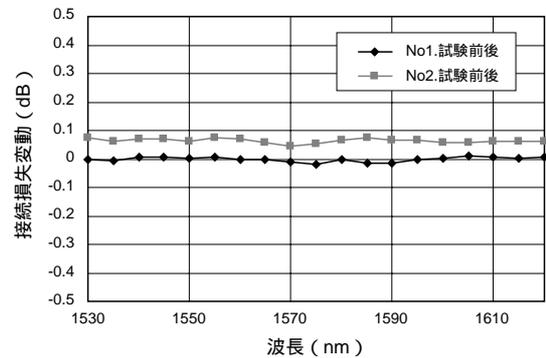


図10 振動試験前後の挿入損失変動
Insertion loss change before and after a vibration test

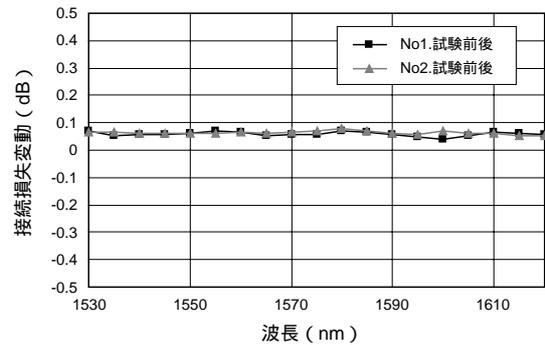


図11 衝撃試験前後の挿入損失変動
Insertion loss change before and after an impact test

6. 信頼性試験

6.1 Telcordia試験

開発したMEMS型VOAモジュールについて、信頼性試験としてTelcordia試験（GR-1209, 1221）を実施した結果を以下に示す。

6.1.1 機械的試験

機械的試験として、振動試験（20～2000 Hz，加速度20 G），衝撃試験（加速度500 G，6軸×5回）をそれぞれ2モジュールずつ実施した前後における挿入損失の変化を図10及び図11にそれぞれ示す。

各機械的試験後においても、挿入損失の変化は0.1 dB以下であり、また、MEMSチップの破壊は観測されず、シミュレーション通りに、Telcordiaの機械的試験をパスしている。

6.1.2 振動環境下での動作挙動

Telcordia GR-63のoffice vibrationに規定される、動作中に振動が印加された場合の挙動を試験するため、電圧印加により約10 dB減衰させた状態で、シャッター移動方向に5～100 Hz，加速度0.1 Gを往復10分でスキャン（19 Hz/min）し、そのときの減衰量の変動を測定した。その結果を図12に示す。

なお、グラフ中のup及びdownは周波数を上げていった場合と下げていった場合を示す。この結果ではup及びdownで違いは見られず、10 dB減衰時においても±0.03 dB程度の変動量であり、非常に安定した特性を有すると考えられる。

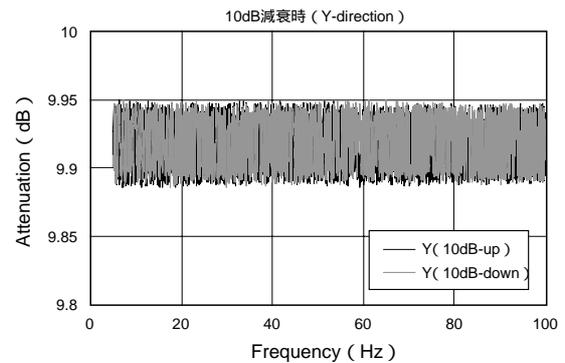


図12 減衰時に加速度と振動を加えた場合の減衰量変化
Attenuation change of adding acceleration and vibration at around 10 dB attenuation

6.1.3 環境試験

温度、湿度の環境下における試験として、温度湿度エージング試験（GR-1209：85℃，RH85%，14日），温度湿度サイクル試験（GR-1209：-40℃～75℃，RH10%～80%，42サイクル，14日），高温高湿保持（85℃，RH85%，2000時間），高温保持（85℃，2000時間），低温保持（-40℃，2000時間）の各試験を今後行う予定であるが、モジュールは気密封止されており、また前記した温度依存性試験の結果から、問題ないものと考えている。

7. まとめ

光伝送路のダイナミックな損失変動を調整するため外部から電気信号によって減衰量を制御可能な、減衰量波長特性に優れた超小型のMEMS型VOAを開発した。その結果、開発目標である以下の諸特性を満足することを確認した。

波長帯域	: 1530 ~ 1625 nm
挿入損失	: < 1 dB
反射減衰量	: > 45 dB
波長平坦性	: < 0.3 dB (C , Lバンド@25 dB) < 0.3 dB (C + Lバンド@20 dB)
温度依存性	: < 0.15 dB
減衰量分解能	: < 0.1 dB (電気回路に依存)
繰り返し設定精度	: < 0.1 dB (電気回路精度に依存)
サイズ (幅 × 長さ × 厚さ)	: 33 × 6.5 × 4.5 mm

また、MEMS型VOAモジュールの信頼性試験としてTelcordia試験を実施し、結果が良好であることが確認された。

参考文献

- 1) 水野一庸, 西 泰宏, 味村 裕, 飯田義隆, 松浦 寛, 尹 大烈, 麻生 修, 山本敏郎, 虎谷智明, 小野義視, 安 輝: 古河電工時報 105号, (2000) 36.
- 2) S.Kinoshita, Y.Sugaya, H.Onaka, M.Takeda, C.Ohshima, and T.Chikama: Optical Amplifiers and Their Applications, (1997), 49.
- 3) Masahito Morimoto, Kouki Sato, Akira Mugino, Hirokazu Tamura, Matt Neal, and Alan L. Sidman: NFOEC, session E5 (2001)