

紫外レーザーを用いたファイバグレーティングセンサーの 作製と特性評価

加藤 隆晴¹⁾・佐藤 明子¹⁾・福島 康広²⁾・亀山 晃弘³⁾
甲籐 正人⁴⁾・横谷 篤至⁴⁾・黒澤 宏⁵⁾

Fabrication and Evaluation of FBG Sensor with UV Laser

Takaharu KATO, Akiko SATO, Yasuhiro FUKUSHIMA, Akihiro KAMEYAMA
Masato KATTO, Atsushi YOKOTANI, Kou KUROSAWA

Abstract

Recently in the field of architecture and civil, there is a great demand high performance sensor for Health Monitoring to guarantee the efficiency of buildings. Optical Fiber sensor development is now being watched with interest because it is not influenced magnetic field. Therefore it takes place of the strain sensors which using bridge connection until now. FBG that can apply as strain sensor was fabricated based on the UV photosensitivity of germanosilicate in the fiber core. The interference fringe was generated exposing UV light through the phase mask with KrF Excimer Laser, this interference fringe made Bragg Gratings in the Optical fiber core. FBG fabrication was performed changing rep-rate from 10Hz to 600Hz, exposing fluences from 5 to 20mJ/cm². The specification value which demand as strain sensor is that the time of reach 10dB refractivity is within 300 seconds, the spectrum wave shape of FWHM is within 100pm, the fraction strain after exposed UV light is 3.2%. In our observation we could attain that minimum of fabricating time is 6 seconds, exposing length of a fiber line keeps above 8mm, which could minimize FWHM 38pm, the maximum fracture strain after exposed UV light is 5.79% to controlling exposing fluences. High precision Optical Fiber Sensor was fabricated to optimize controlling exposing fluences and multiplying rep-rate, we think.

Key Words:

Optical fiber sensor, FBG, UV photosensitivity

- 1) 電気電子工学専攻
- 2) 電気電子工学科
- 3) 電気電子工学科助手
- 4) 電気電子工学科助教授
- 5) 電気電子工学科教授

1. はじめに

近年、建築や土木の分野では構造物の性能保障のためにヘルスマonitoring用の高性能なセンサーの需要が大きい。そこで、従来のブリッジ回路等を利用した電気式の歪みセンサーに代わって、光を用い

る光ファイバーを使用したファイバーセンサーの開発に注目が集まっている。

光ファイバーのコアに紫外光を照射すると、屈折率が変化する。この変化は、紫外光照射を止めた後も持続する。ファイバークレーティングは、紫外レーザー光の干渉縞を照射して周期的な屈折率変化を書き込んだもので、ブラッグ反射条件を満たす光のみを反射する。このような特定の波長を反射する光ファイバーは、外部からの力や熱の影響により伸び縮みした時、周期構造の間隔も変化するためにブラッグ波長も変化する。この関係を利用して高い精度を持つ歪みセンサーや温度センサーを作製することが出来る。

構造物への歪みセンサーによる測定の例としては、コンクリート橋のひずみ、鉱山の坑道のひずみ、ロケット用液体水素燃料タンクのひずみなどの測定が行われている。また原子炉や船舶などの分野にも応用され始めている。その他の物理量のセンサーとしては、ファイバー回折格子をガラス球殻に固定し圧力を測定するもの、磁性体に固定し磁界を測定するものなどが有る。

ファイバークレーティングを利用したセンサーの利点として、長距離伝送が可能、電気的、磁氣的ノイズの影響を受けない、小型、軽量である、防爆性に優れる、多数のセンサーを一本のファイバーの上に分布させる多重化、複合化も可能である、などが挙げられる。

本研究の目的は、歪みセンサーに使用するためのファイバークレーティングを作製することであるセンサーとして使用するためにはいくつかの仕様値を満たす必要があるが、この仕様値を満たすために、ファイバーの作製条件（レーザーの繰り返し周波数、照射エネルギー密度、ファイバー長手方向の長さ）の最適値を決定した。

2. 実験装置及び方法

図1に実験装置図を示す。実験装置は紫外光源として KrF エキシマレーザー、射出されたレーザーのビーム調整用のレンズやミラー、フィルタ等の光学素子、グレーティングを形成するための位相マスク、ファイバーを固定しているステージ等から構成されている。ファイバーのグレーティング形成過程は、

ASE 光源からグレーティングを作成するファイバーの一端へ広帯域の光を入れ、別の一端から出た光をスペクトラムアナライザーで検出した。またファイバーの接続に使用した融着機や、ファイバの軸方向への破断歪み試験用にブルーメーターを使用した破断歪み試験機を用いた。

KrF エキシマレーザーから得られる光($\lambda=248\text{nm}$)を、アパーチャーを通して切り出し、ビームの発散角を抑える為に2枚のシリンドリカルレンズ($f=80\text{mm}$, 250mm)を用い、ビームを絞り込んでエネルギー密度を上げるための1枚のシリンドリカルレンズ($f=250\text{mm}$)を通した後、位相マスクを通してファイバーホルダーに固定したファイバーのコア・クラッド層を露出させた部分に照射してファイバークレーティングを形成させた。その際、ファイバーを固定しているホルダーには一定のテンションをかけ、ファイバーがたるまないようにした。光吸収屈折ファイバの両端はそれぞれ ASE 光源と光スペクトルアナライザーに接続することでファイバークレーティングの形成過程を実時間観測で行い、屈折率変化による反射強度 10dB に達するまでの時間と、10dB に達した時点でのブラッグ反射波長、形成される反射スペクトル波形を観測した。表1に実験条件を示す。

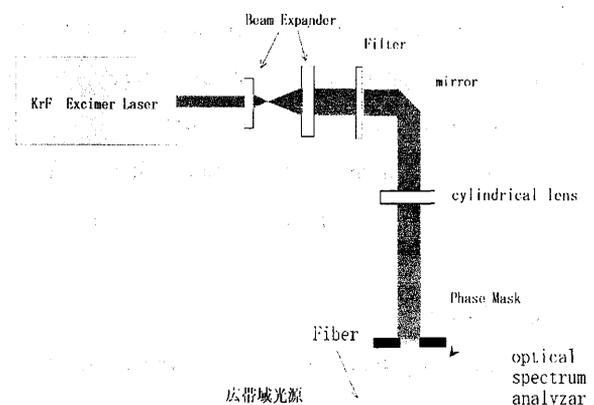


図1 実験装置図

表 1 実験条件

紫外レーザー光源	KrFエキシマレーザー(248nm)
繰り返し数	10,50,100,300,400,500,600 Hz
ファイバーへの照射エネルギー密度	1.2~13.5mJ/cm ²
ファイバー長手方向照射長さ	150mm
使用ファイバー	古河SMF(水素ローディング12MPa,10日間)
目標反射スペクトル強度	10dB
目標反射スペクトル強度到達時間	300s以内
目標半値幅	100pm以下
目標破断歪み	3.5%以上

3. 実験結果及び考察

図 2 にファイバグレーティング作製で得られる典型的なスペアナによる透過スペクトルを示す。

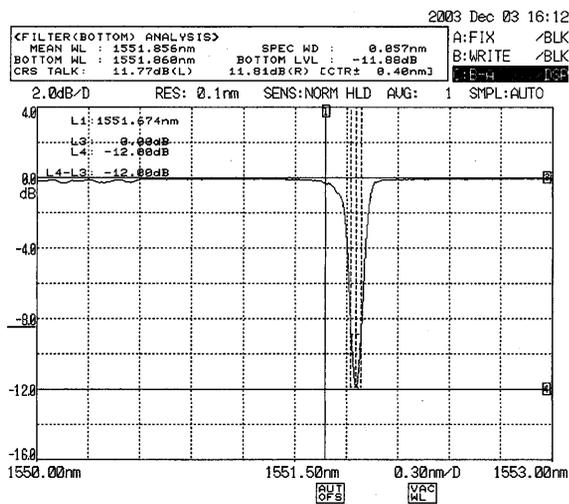


図 2 典型的な透過スペクトル

3.1 レーザー照射繰り返し数依存性

光ファイバーにエキシマレーザー光を照射してファイバグレーティングを形成させる際の、照射するエキシマレーザー光の繰り返し数を変化させることによる書き込みへの影響を調べるために実験を行った。繰り返し数 10Hz では、Lambda 製 LPX-200、繰り返し数 20~600Hz では GAM 社製 EX-10 を使用した。図 3 にレーザー照射繰り返し数変更に対する強度 10dB 到達時間の実験結果を示す。10Hz での書き込みはこれまでに最も短時間で書き込めても 90s 程度かかる。繰り返し数を上げていくと 200Hz では 10s 程度しかかからなかった。しかしそれ以上繰り返し数を上げて書き込み時間の大幅な短縮は見られず、最短で書き込めた 500Hz でも 6s だった。波形に関しては、どの繰り返し数でも半値幅が目標値 100pm 以下を充分満たすきれいなピークが得られた。レーザーの照射繰り返し数を 10~600Hz の範囲で変

化させて行なったグレーティング形成実験からは、明らかに照射周波数を高めた方が目標仕様値である反射スペクトル強度 10dB に到達するまでの時間が短縮されることが分かった。200Hz 以上では、繰り返し数の増加と到達時間の減少の割合が反比例しておらず大きく照射繰り返し数を増加させても到達時間の短縮幅が小さいことがわかった。図 4 に照射繰り返し数と 10dB 到達までの shot 数を照射エネルギー密度毎にプロットして関係を示した。照射エネルギー密度が 10mJ/cm² 以上では、10dB 到達に必要な shot 数はほぼ一定だが、それ以下のエネルギーのもとでは照射繰り返し数に依存せず 10dB 到達に必要なショット数が安定しなくなった。しかし、本実験で得られたように 10Hz での書き込みでも 90~120s、200Hz 以上では 10s 以内で形成することができ、目標形成時間 500s 以内をかなり余裕をもって達成できた。

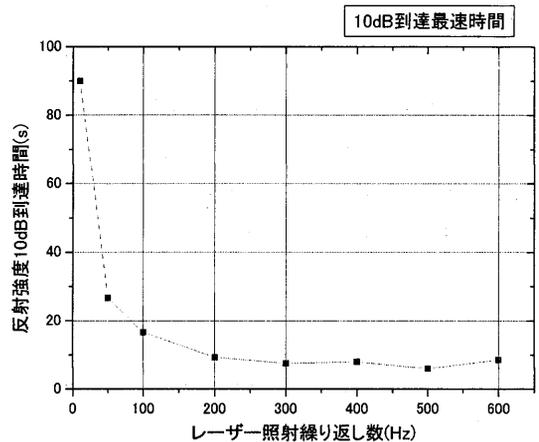


図 3 照射繰り返し数変更に対する強度 10dB 到達時間

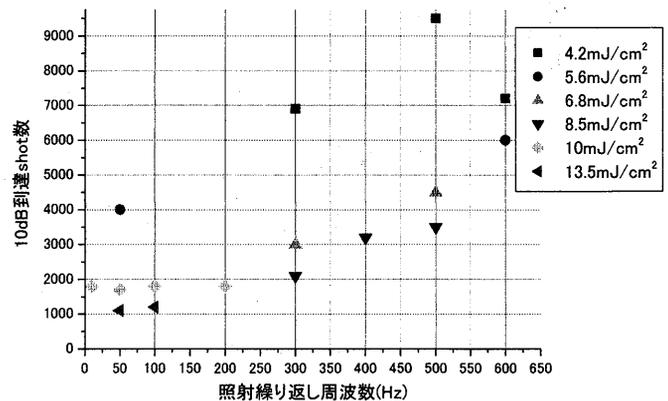


図 4 照射繰り返し数と 10dB 到達 shot 数の関係

3.2 照射エネルギー依存性

光ファイバーにエキシマレーザー光を照射してファイバークレーティングを形成させる際の、照射するエキシマレーザー光のエネルギー密度を変化させることによる書き込みへの影響を、調べるために実験を行った。光学系のビームエキスパンダーの後ろにフィルターを入れ、透過率に応じて入れ替えることでエネルギー密度を変化させた。この実験は前の3-1で行ったレーザー照射繰り返し数の変更に合わせて、それぞれの繰り返し数においてフィルター無しの状態から数段階にエネルギー密度を落として行った。

図5に繰り返し毎の、レーザーの照射エネルギー密度に対する反射スペクトルの強度 10dB 到達時間の実験結果を示す。同程度の照射エネルギー密度では、繰り返し数を大きいほうがより短時間で書き込むことが出来た。また同一の繰り返し数の場合は、エネルギー密度が高いほうがより短時間で書き込むことができた。

エネルギー密度を $1.0\text{mJ}/\text{cm}^2$ 以下まで落とすと、今回行った繰り返し数のうち 400Hz 以下では目標値である 300s 以内の書き込みは達成出来なかった。

なお、600Hz の場合のみレーザー装置の限界値のためか、500Hz の場合より到達時間が増加することがあった。

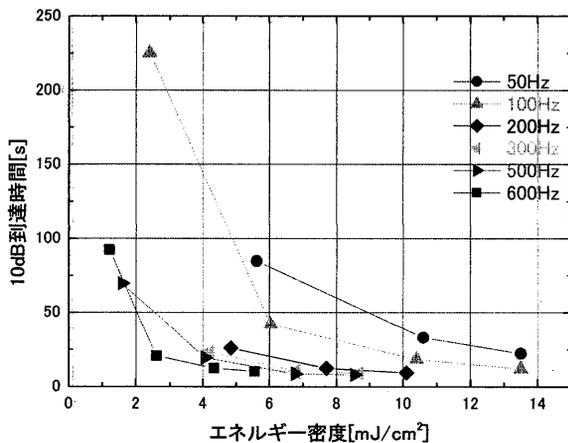


図5 照射エネルギー密度と反射スペクトルの強度 10dB 到達時間の関係

図6に照射エネルギー密度と 10dB 到達 shot 数の関係を示す。照射エネルギー密度が $4\text{mJ}/\text{cm}^2$ より小さいと必要ショット数が大きく増加していることが分

かった。変化させたレーザー照射繰り返し数毎の照射エネルギー密度変更によるグレーティング形成実験からは、同一の繰り返し数の場合はエネルギー密度が高いほうがより短時間で書き込むことが分かった。同程度の照射エネルギー密度では、繰り返し数が大きいほうがより短時間で書き込むことが出来たが、それぞれの照射繰り返し数である程度のエネルギー密度を下回るとグレーティング形成時間が大幅に増大する、またはグレーティングが形成できなくなってしまった。これらは照射エネルギー密度がグレーティング形成に大きく影響を及ぼすことを示している。これは紫外光誘起屈折率変化を引き起こす欠陥に吸収される光子のエネルギーの閾値を割ってしまうためではないかと考えられる。

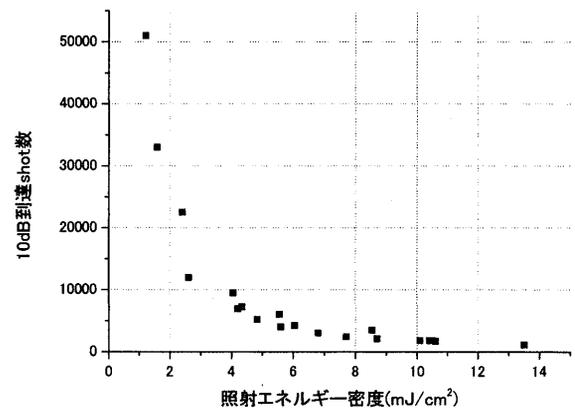


図6 照射エネルギー密度と 10dB 到達 shot 数の関係

3.3 照射長さ依存性

光ファイバーにエキシマレーザー光を照射してファイバークレーティングを形成させる際の、ファイバーへの照射長さによる書き込みへの影響を調べるために実験を行った。位相マスクの上方にスリットをいれ間隔を変えることでファイバー長手方向照射長さを変化させた。この実験では、可能な限り位相マスクの中央からの長さが均等になるようにスリット幅を変えていき照射長さを 5~20mm の時に形成されたスペクトル波形を観測した。

図7にファイバー長手方向照射長さの変化に対する反射スペクトル 10dB 到達時の半値幅の実験結果を示す。それぞれ同条件で3回の平均を示してある。照射長さが大きくなるに従い、半値幅は小さくなった。目標値である 100pm 以下になるのは、照射長さ

が8mm以下の場合であった。他の実験では、主に15mm以上での書き込みを行ったため平均して40~50pm程度の半値幅が得られた。

ファイバー長手方向照射長さの変化の実験からは照射長さが長いほど、反射スペクトルの半値幅が狭くなり、反射強度10dBのときの目標仕様値100pm以下は照射長さ8mm以下のときに得られる事が分かった。実験では30pm程度の半値幅が得られた事もあるが、使用している波形観測用のスペクトルアナライザーの波長分解能が30pmなので、より狭い半値幅の観測は出来ないが40~50pm程度の値をコンスタントに出せるため、問題はないと考えられる。

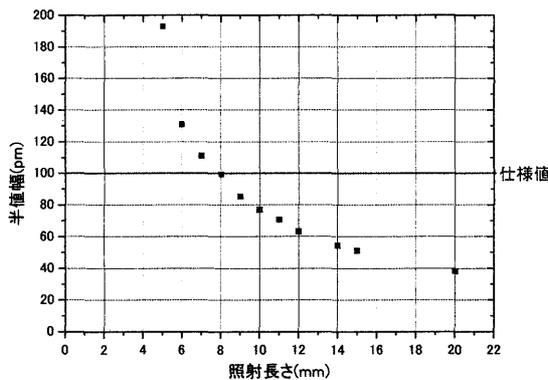


図7 照射長さと半値幅の関係

3.4 破断歪みへの影響

それぞれの実験で得られたファイバをブルーメーターを使用した張力試験装置でファイバーの軸方向への張力試験を行った。実用に耐え得るための目標値は3.05Kgの荷重がかかったときのファイバの歪み3.5%である。表2に古河SMFの荷重と歪みの関係を示す。

表2 荷重と歪みの関係

古河SMF d=125 μm	
歪み%	荷重Kg
0.5	0.43
1	0.86
1.5	1.29
2	1.73
2.5	2.16
3	2.59
3.5	3.02
4	3.45
4.5	3.88
5	4.32

図8にレーザー照射エネルギー密度変更による破断歪みの結果を示す。エネルギー密度が14mJ/cm²で書き込みを行ったファイバは歪みの最小値、最大値共に小さい。エネルギー密度が小さくなるにつれて、最大値は測定可能値の5%台に達するが、最小値は高い値を示した。つまり照射エネルギー密度を落とす事で破断歪みは仕様値の3.5%を得やすくなる事が分かった。

今回行なった実験条件のなかでは特に照射エネルギー密度を落としてグレーティング形成を行なうことで、ファイバー破断歪みを向上できる事が分かった。得られる絶対値としては破断試験機の測定限界値である5.79%を超えることはできないが照射エネルギー密度を落とす事で最小値については高い値を得る事が出来た。ファイバー破断歪みはグレーティング形成だけではなく、それ以前のUV層除去工程におけるファイバーの取り扱い等で大きく影響を受ける。そのため実験で得られた数値がそのままグレーティ

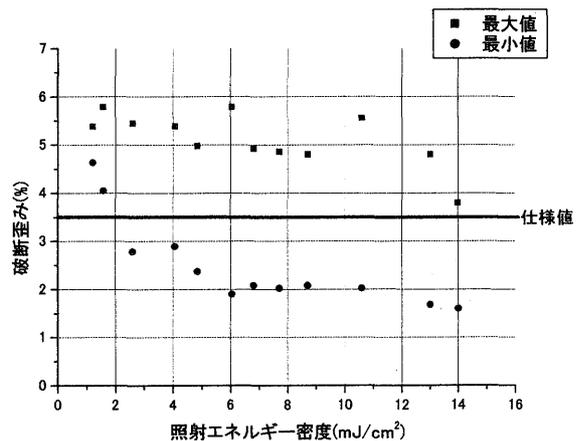


図8 照射エネルギー密度と破断歪みの関係

ング書き込み条件に対応しているとは限らないが、今回の実験では破断歪みの照射エネルギー密度依存性がみられたことから、ファイバー破断歪みに影響を与える多くの要因のなかでも特に大きなものであると考えられる。今後は他の破断歪み劣化要因を可能な限り除去し併せて、細かくエネルギー密度を制御したグレーティングを測定範囲がより広く精度の高い破断試験機を用いて試験することにより更に破断歪みを向上させることが出来ると考えられる。

4. まとめ

紫外レーザーを用いたファイバグレーティングセンサーの作製と評価を目指し、ファイバセンサーとして使用するために必要な仕様値を満たす条件を検討した。その結果、

- 200Hz程度以上の高繰り返しKrFエキシマレーザーを用いて短時間でグレーティング形成が出来る。
- 長手方向照射長さを一定以上の長さにする事で狭帯域のスペクトルピークを得ることが出来る。
- 照射エネルギー密度を落とすことで充分大きな破断強度を持たせることが出来る。

この事からファイバセンサーとして使用するために必要な仕様値を満たすグレーティングを形成するには、レーザー繰り返しを上げる、エネルギー密度を落とす、ファイバ長手方向照射長さを一定以上の長さにする事が有効であることが分かった。照射エネルギー密度を落としながら、短時間でのグレーティング形成が出来る高繰り返し数を最適化することでより高精度のファイバセンサーを作製できると考えられる。

参考文献

- 1) 中井 貞雄, レーザー工学 共立出版 1999年
- 2) 黒澤 宏, レーザー基礎の基礎
- 3) 葛生 伸, 石英ガラスの世界 工業調査会 1995年
- 4) 水野 博之, オプトエレクトロニクスの基礎 日刊工業新聞社 1985年
- 5) 大久保 勝彦 ISDN時代の光ファイバ技術 理工学社 1997年
- 6) 黒澤 宏・横田 光広 ファイバ光学の基礎 オプトロニクス社 2003年
- 7) 藤岡 知夫・小原 寛・斎藤 英明 共著
光量子エレクトロニクス コロナ社 2004
- 8) 桜庭 一郎・高井 伸勝・三島 瑛人 共著
光エレクトロニクスの基礎 森北出版株式会社
2002年
- 9) 野田 健一 光ファイバ伝送 電子通信学会
- 10) 応用物理学会 オプトエレクトロニクス-材料と加工技術 朝倉書店
- 11) 株式会社 東横エルメス 土木計測運用マニュアル
株式会社 東横エルメス 1997年
- 12) 松平 升・大槻 義彦・和田 正信 共著
理工教養 物理学 I 改訂版 培風館
- 13) 和田 純夫・大上 雅史・根本 和昭 単位が分かる
ベレ出版 2002年
- 14) L. Dong, J. Archambeault, L. Reekie, P. St. J. Russell,
, and D. N. Payne
Photoinduced absorption charge in
germanosilicate perfoms: evidence for
thecolor-center model of photosensitivity
APLID OPTICS / Vol. 34, No. 18/20 June 1995
- 15) J. Albert, B. Malo, K. O. Hill, F. Bilodeau,
D. C. Johnson, and S. Theriault
Compwrison of one-photon and two-photon
effects in the photosensitivity of germanium-doped
silica optical fiber exposed to intense ArF
Appl. Phys. Lett. 67 (24), 11 December 1995
- 16) Brian Culshaw, John Dakin, Optical Fiber Sensors
Vol. 3 Artech House, 1996