

分布計測用長尺FBGアレイの製造技術

光応用技術R&Dセンター 山中 智 貴¹・ミハイルイラリオノフ²・安間 淑 通³・奥出 聡⁴・
大森 賢 一⁵

Manufacturing Technology of Long-gauge FBG Arrays for Distributed Sensing

T. Yamanaka, M. Illarionov, Y. Amma, S. Okude, and K. Ohmori

紫外レーザー光を用いて光ファイバのコア中に直接グレーティングを形成したFiber Bragg Grating (FBG) は、光ファイバセンシングの分野で大きな注目を集めている。当社は被覆上からグレーティングの形成が可能な光ファイバと、長尺FBGアレイの製造技術を開発した。本稿では、分布計測において課題となる測定時の多重反射を抑制し、FBGの連結点において安定した連続性を有するFBGアレイの製造技術を確立したため紹介する。

Fiber Bragg Grating (FBG), which is formed directly in the core of an optical fiber using ultraviolet laser light, has attracted much attention in the field of optical fiber sensing. We have developed an optical fiber that enables the writing of gratings through a coating and a technology for manufacturing long-gauge FBG arrays. We introduce the manufacturing method that enables to suppress the multiple reflections and the stable continuity at concatenation points, which is essential for distributed fiber sensing.

1. ま え が き

Fiber Bragg Grating (FBG) とは、光ファイバの側方より紫外レーザー光を照射し、周期的な屈折率変化を生じさせることによって回折格子（グレーティング）を形成した光ファイバ型光部品である。FBGはブラッグ波長の変化を測定することで、温度やひずみ、圧力などの物理量を計測することが可能である。FBGを用いたセンシング技術は、1980年代後半に提案され¹⁾、以降、構造物のヘルスマニタリングや形状センシングなどの用途で使用されており、高いセンシング精度や電磁干渉に対する耐性、高い柔軟性、小型化等の利点から、様々な用途に適用されることが期待されている^{2, 3)}。

当社は、形状センシングに使用可能な分布計測用の長尺FBGアレイの製造技術を開発した。本稿では、当社独自で開発した被覆上照射可能な光ファイバとReel to Reel FBG製造装置、そして長尺FBGアレイの特長について説明する。

2. FBGを用いた光ファイバセンシング

FBGを用いた光ファイバセンシングの方式として、ポイント計測と分布計測がある。ポイント計測は複数のFBGを、不連続に一本のファイバに形成し、各位置のFBGを用いてひずみを測定する。一方、分布計測は光ファイバにFBGが連続して形成されたFBGアレイを使用し、連続的なひずみを測定する。分布計測におけるFBGの反射スペクトル特性は、Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR) を用いて測定する。OFDRの特徴として、空間分解能が10 μmで、長さ数10 mにわたり連続的な計測が可能である。また、マルチコア光ファイバの各コアに連続的なFBGを形成した光ファイバ形状センサが提案されており⁴⁾、FBGの波長変化から光ファイバのひずみ量を計算し、各コアのひずみ量から光ファイバの曲率とねじれ方向を導出して、光ファイバの形状を三次元で高精度に計測することが可能である⁵⁾。当社は高精度の形状センサを実現するため、分布計測用の長尺FBGセンサの製造技術を開発した。

1 FOSグループ

2 FOSグループ 主査

3 光通信研究部

4 光通信研究部グループ長

5 FOSグループ長

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説明
FBG	Fiber Bragg Grating	光ファイバ内で周期的に屈折率が変化する構造を持ち、特定の波長の光を反射/遮断する素子
WTC	Writing Through Coating	紫外光に透過性を有する被覆材を用いた光ファイバに対し、被覆の上から紫外光を照射してFBGを形成する技術
OFDR	Optical Frequency Domain Reflectometry	光周波数領域反射測定法とも呼ばれ、光ファイバ内にて反射する光の位置と強度、周波数情報を高い空間分解能で測定することができる
レイリー散乱レベル	Rayleigh scattering level	光の波長よりも小さいサイズの粒子による光の散乱であり、光ファイバ内においては、構造不均一性に起因して生じる。このレイリー散乱による信号レベルを、レイリー散乱レベルと定める
SN比	Signal to Noise ratio	信号と雑音の比率

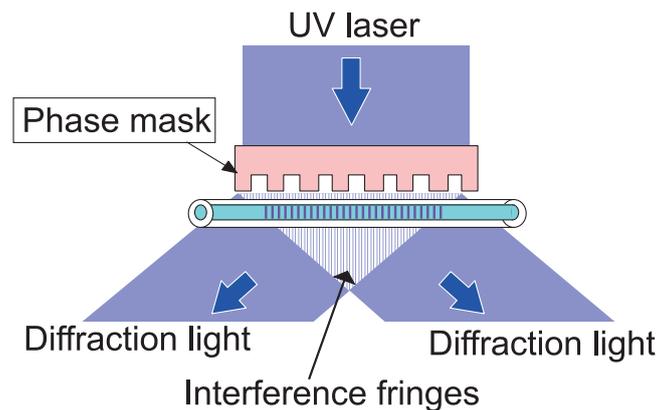


図1 位相マスク法

Fig. 1. Phase mask method.

3. FBG形成手法

3.1 光ファイバ設計

FBGの形成には、光ファイバのコアとなるGe添加シリカガラスが、波長240 nm近傍の紫外光を吸収し、その屈折率が上昇する現象を利用する。グレーティングの形成手法として、二光束干渉法と位相マスク法があり、当社では位相マスク法を採用している。その模式図を図1に示す。位相マスクをかいして紫外レーザー光を照射することで、一回折光による干渉縞を光ファイバに照射しFBGを形成する方法である。一般的には、光ファイバの被覆に用いられる樹脂は紫外光を透過しないため、光ファイバ被覆を除去したのち、クラッドの側面から紫外レーザー光を照射することで、光ファイバのコアに屈折率変化を生じさせてグレーティングを形成し、露出したクラッドの保護のため再

被覆（リコート）するプロセスが用いられる。しかし、この手法では製造プロセスが複雑なうえに、FBG形成プロセス中にクラッド表面に微小な傷が入ることによる光ファイバの強度低下が懸念される。そのため、被覆を除去し連続した長尺FBGアレイを形成することは、工数を要するうえに前述の強度低下による光ファイバ破断のリスクをとまう。

被覆材料に紫外光透過性材料を用いることで、被覆を除去することなくFBGを形成する手法であるWriting through coating (WTC) が報告されている^{4, 6)}。当社はこの手法に着目し、被覆上からのFBG形成が可能な被覆樹脂材料を開発した。WTCでは被覆表面より紫外レーザー光を照射するため、被覆表面に凹凸が存在すると入射した紫外光が被覆表面にて散乱され、光ファイバのコアに不均一

な屈折率変化を生じさせるため、FBGの品質が悪化する。したがって、樹脂表面を均一にするため、表面平滑性に優れた樹脂材料を選定した。

図2に、表面平滑性の異なる光ファイバを用いて形成したFBGのスペクトルを示す。図2 (a) は表面平滑性が悪い光ファイバであり、前述のようにWTCによるFBG形成ではFBGの品質が低下し、反射スペクトルにノイズが多く存在してしまう。一方、図2 (b) は表面平滑性の優れた

光ファイバを使用しており、WTC技術を用いても紫外光が散乱されることなくクラッドまで到達し、一定の屈折率変化を生じさせるため、ノイズが少なく高品質なFBGを形成できている。形状センシングにおいては、ノイズの少ないFBGを使用することで高いセンシング精度を実現できる。当社は、表面平滑性の優れた樹脂材料を選定することで、製造プロセスを簡略化しつつ高品質なFBGを形成可能な光ファイバの開発に成功した。

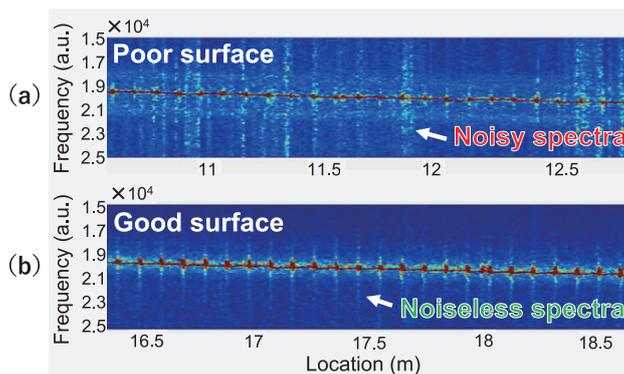


図2 (a) 表面平滑性の悪い光ファイバを用いたFBGのスペクトル
(b) 表面平滑性の優れた光ファイバを用いたFBGのスペクトル

Fig. 2. (a) Spectrogram of manufactured FBG array (a) with poor surface smoothness and (b) with good surface smoothness of coating of optical fiber.

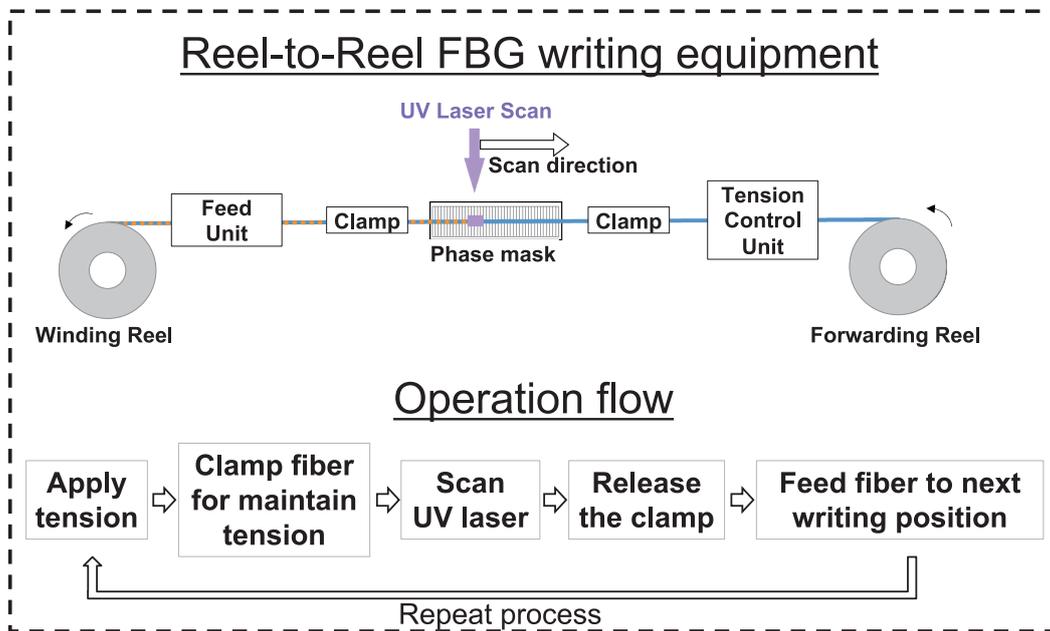


図3 Reel to Reel FBG製造装置とその動作フロー

Fig. 3. Reel to Reel FBG writing equipment and its operation flow.

3. 2 Reel to Reel FBG製造装置

図3に当社独自で開発したReel to Reel FBG製造装置とその動作フローを示す⁷⁾。光ファイバをリールからリールに巻き返しつつ、張力を維持し紫外レーザー光を照射する。

光ファイバと並行して紫外レーザー光を走査（スキャン）し、1ユニットのFBGを形成する。スキャン完了後に張力を開放し次のFBGを形成する位置に光ファイバを移動させる。このプロセスを繰り返すことで、光ファイバが続くか

ざりFBGを連続して形成できる。また、印加張力制御装置を用いることで張力を可変としており、同一の位相マスクでブラッグ波長をずらしたFBGを形成可能であり、最大でnmオーダーの範囲でブラッグ波長を変化させることが可能である。さらに、FBGユニット同士の連結精度を高めるため、スキャンステージにはリニアエンコーダ付きのステージを用い、光ファイバの送り量を高精度で制御している。

4. FBGの特長

4.1 分布計測用長尺FBGアレイ

分布計測用FBGセンサのOFDRでの測定において、単一のブラッグ波長を有する長尺FBGを形成した場合、測定時に特定の波長で多重反射が生じ、ゴースト信号が発生し得る。また、FBGの全長が長くなるにつれて反射光量が増えるため、検出器が飽和しやすくなる。しかし、この飽和を抑制するためにFBGの反射信号レベルを低下させると、反射信号の検出に必要なSN比を確保できないという問題が生じる。

当社では、多重反射と検出器の飽和を抑制するため、FBGユニットごとに異なるブラッグ波長で、高い反射信号レベルを有するFBGを1つの光ファイバに形成する技術を開発した。印加張力をステップ状に変化させて形成したFBGアレイのOFDRによる測定結果を図4に示す。図4 (a) は3 m以上にわたり均一な反射信号レベルのFBGを形成した結果を示す。100 mmのFBGユニットを連結し、FBGの全長にわたって反射信号レベルと光ファイバのレイリー散乱レベルとの比率を25 dB以上有する。そのため、ノイズの影響を受けずに反射信号を検出可能である。また、FBGユニットごとに30 pmステップでブラッグ波長を変化させることで、多重反射を抑制することができる。さらに、FBG形成時には紫外レーザー光を被覆樹脂が吸収して発熱することにより、光ファイバを膨張させ、微小チャープ (Thermally assisted small chirp) が発生する現象を利用し、FBGユニット内のブラッグ波長の重なりを軽減した。図4 (b) はFBGユニットごとの反射率を示す。ステップ状に変化したブラッグ波長と、FBGユニット内の微小チャープによりブラッグ波長を分散させ、全波長帯域において反射率を4%程度に抑制し、測定時の検出器の飽和を回避している。

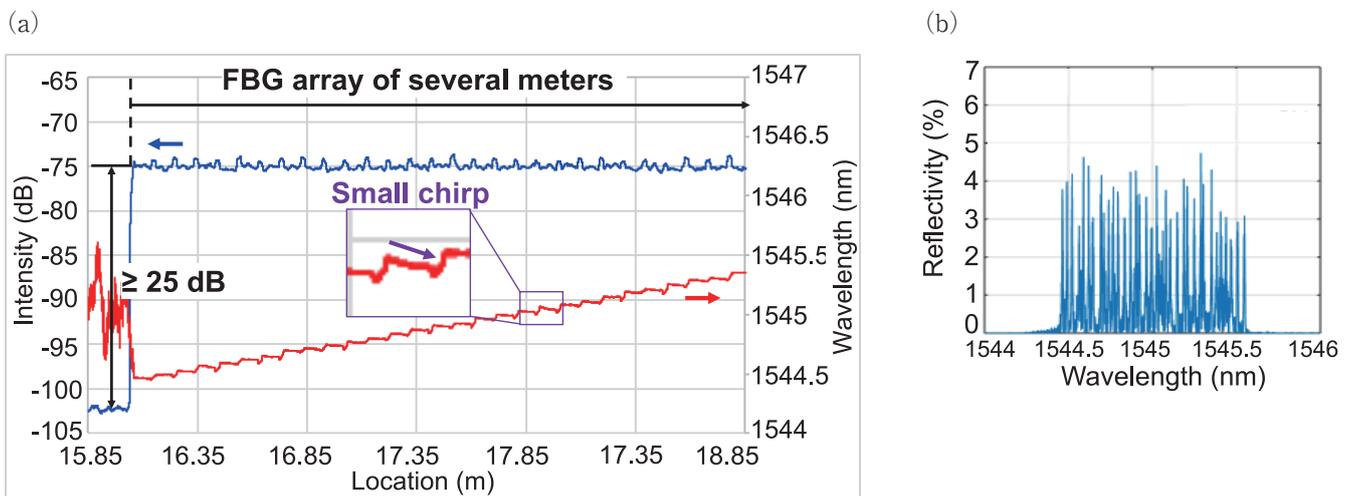


図4 (a) FBGアレイの位置ごとの反射信号レベルとブラッグ波長
(b) 反射スペクトル

Fig. 4. (a) Reflection intensity and reflected wavelength for each FBG array position.
(b) Reflection spectrum of the FBG array.

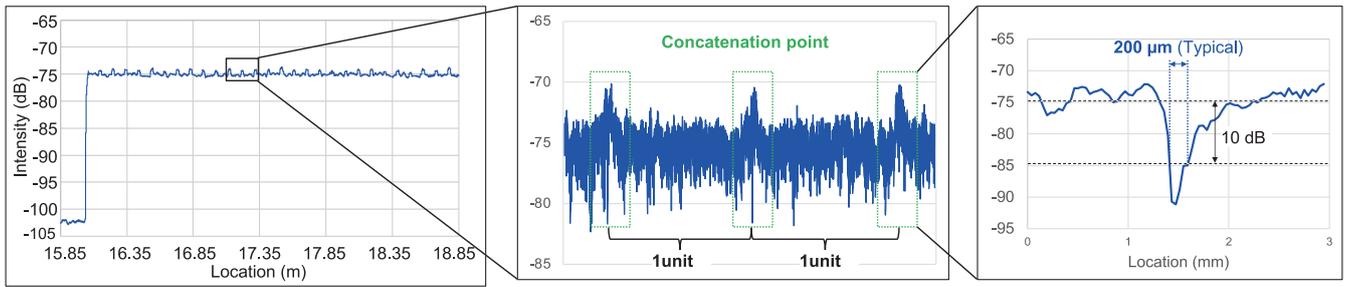


図5 FBGアレイの接続部における反射信号レベル

Fig. 5. Reflection intensity at concatenation point of FBG array.

4. 2 FBG連結精度

分布計測用FBGセンサにおいては、FBGユニットの連結部に不連続な箇所があると、ブラッグ波長の情報が欠落し、センサ精度の低下につながる。そのため、FBGユニット同士を高精度に連結させる必要がある。

Reel to Reel FBG製造装置において、FBGユニット間の接続部における安定した連続性を維持するためには、光ファイバの最適な位置に、最適な光量の紫外レーザ光を照射する必要がある。当社では、Reel to Reel FBG製造装置における紫外レーザ光の照射位置、スキャン速度、光ファイバの送り長を制御することで、高精度な連結性を持つFBGアレイの製作を可能にした。図5に接続部の反射信号レベルの拡大図を示す。FBGユニット間の連結点において隣接するFBG間の隙間を200 μm程度に制限し、FBGユニットを高精度に連結した長尺FBGアレイの製造技術を確立した。

5. むすび

当社は被覆上からグレーティング形成が可能な光ファイバと、長尺FBGアレイの製造技術を開発した。長尺FBGアレイにおいて課題となる測定時の多重反射を抑制し、連結点において安定した連続性を有する長尺FBGアレイの製造技術を確立した。

参考文献

- 1) G. Meltz, J. R. Dunphy, W. H. Glenn, J. D. Farina, and F. J. Leonberger, "Fiber optic temperature and strain sensors," Proc. SPIE, vol.0798, pp.104–114, 1987.
- 2) Amanzadeh, M., Aminossadati, S.M., Kizil, M.S., Rakić, A.D., "Recent developments in fibre optic shape sensing," Measurement 128, 119–137, 2018.
- 3) Al-Ahmad, O., Ourak, M., Roosbroeck, J.V., Vlekken, J., Poorten, E.V., "Improved FBG-based shape sensing methods for vascular catheterization treatment," IEEE Robot. Autom. Lett. 5 (3) , 4687–4694, 2020.
- 4) P. S. Westbrook, K. S. Feder, T. Kremp, T. F. Taunay, E. Monberg, J. Kelliher, R. Ortiz, K. Bradley, K. S. Abedin, D. Au and G. Puc, "Integrated optical fiber shape sensor modules based on twisted multicore fiber grating arrays," Proc. SPIE 8938, 89380H, 2014.
- 5) Khan, F., Denasi, A., Barrera, D., Madrigal, J., Sales, S., Misra, S., "Multi-core optical fibers with Bragg gratings as shape sensor for flexible medical instruments," IEEE Sensors Journal. pp.5878–5884, 2019.
- 6) P. S. Westbrook, K. S. Feder, T. Kremp, T. F. Taunay, E. Monberg, G. Puc and R. Ortiz, "Multicore optical fiber grating array fabrication for medical sensing applications," Proc. SPIE 9317, 93170C, 2015.
- 7) T. Yamanaka, M. Illarionov, Y. Amma, S. Okude and K. Ohmori, "Long-Gauge FBG Array for High Performance Quasi-Distributed Sensing," 28th International Conference on Optical Fiber Sensors, W4.43, 2023.