

光導波路内に設けられた光波長以下の微細な周期構造である導波路型グレーティングは、導波光に対して波面変換、波長分散、光波結合など多くの機能を実現できます。平面パターンのみ異なる構造で多くの異なる機能を実現でき、複合的な機能を単一素子で実現できるという特徴もあります。ここでは光集積デバイスを構成する重要な素子である導波路型グレーティングをいくつか紹介し、その作製方法や工夫などについてお話ししたいと思います。

導波路型グレーティングの代表例は、分布帰還型 (DFB) レーザーや分布ブラッグ反射型 (DBR) レーザーに用いられる DFB および DBR グレーティングです。いずれのレーザーも優れたスペクトル純度と波長安定性を有し、現在の高速光通信を支えるキーデバイスであるといえます。発振波長約 1.55 μm 帯の光通信用半導体レーザーにおいて、DFB・DBR グレーティングはともに導波路内での光波長の半分にあたる周期 240 nm 程度の非常に微細な構造です。活性領域内部にグレーティングを有する DFB レーザーでは、数百 μm の共振器長全域にわたって非常に均一な周期構造が必要となります。この構造により非常に高いスペクトル純度の半導体レーザーを実現でき、このような半導体レーザーを光源として用いれば 1 本の光ファイバーに波長の異なる複数のレーザー光を同時に伝送することができます。近年のインターネットの爆発的な成長に対応するため、1 本の光ファイバーに波長間隔 0.4 nm で 100 チャンネル (波長) もの信号を伝送する高密度波長分割多重方式 (DWDM) による光通信が実用化されています。DFB や DBR レーザーの発振波長はグレーティング周期によってほぼ決まるため、このような応用にはチャンネルごとに異なる発振波長のレーザーを必要とします。この波長間隔 0.4 nm をグレーティング周期に換算すると、わずか 0.06 nm の差にしかありません。

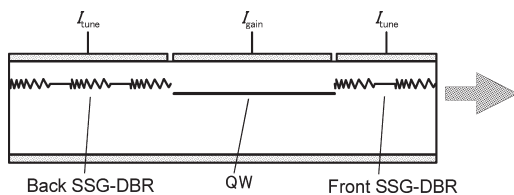


図1 超周期構造グレーティング DBR レーザー。

一方、周期が均一でないグレーティングも重要な素子のひとつです。チャープドグレーティングや超周期構造グレーティング (super structure grating) のように徐々に周期が変化する DBR グレーティングを用いることで、波長可変範囲を大幅に拡大した半導体レーザー (図 1) が提案されています¹⁾。その中には 1 つのレーザーで DWDM 100 チャンネル分の波長範囲をカバーできるものもあるため、どのチャンネルのレーザーが故障したときでも対応できるバックアップ光源として用いられます。また DBR 領域への電流注入による波長チューニングは高速に波長を切り替え可能なため、光パケットスイッチ用光源としても応用が期待されています。なめらかにグレーティング周期を変化させる必要があるため、この種のグレーティングの作製にもやはり高度な微細加工技術が要求されます。

また曲線の導波路型グレーティングも報告されています。図 2 は曲線 DBR グレーティングを用いた半導体レーザーを光源とし、テーパ型パワー増幅器、表面放射型グレーティング結合器をモノリシック集積した高出力半導体レーザーです²⁾。平面パターンの異なるグレーティングを用いることにより、導波光を基板表面から直接平行ビームまたは集光ビームとして取り出せるグレーティング結合器が実現されています。

さてここまでいくつかの導波路型グレーティング素子を紹介してきましたが、次はこれらの作製方法とそのときの工夫についてお話ししたいと思います。作製方法を簡単に説明すると、まず半導体基板上に電子ビーム (EB) レジストをスピコートにより薄く塗布し、任意のパターンを EB 描画して現像することでレジストパターンを形成します。これを

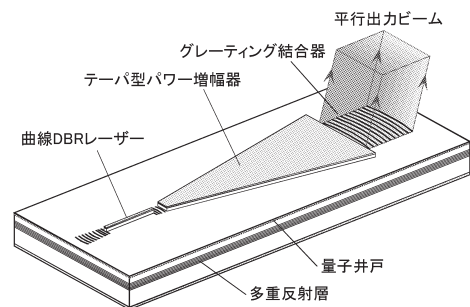


図2 表面放射型高出力半導体レーザー。

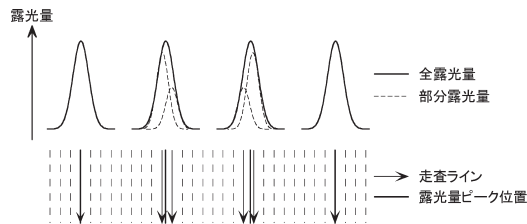


図3 重み付け EB 描画露光法の概念図。

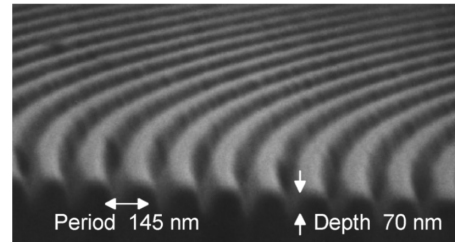


図4 曲線 DBR グレーティング。

マスクとして、反応性イオンエッチングなどで半導体に転写します。このとき使用するガスや条件によっては選択比が十分とれず、レジストが耐えきれない場合があります。そのようなときは SiO_2 膜などを中間層として用い、レジストパターンを SiO_2 膜に転写しさらに半導体に転写するといった方法をとることもあります。

この中で一番困難なプロセスはやはり EB 描画です。筆者の使用している EB 描画装置で、980 nm 帯一次 DBR グレーティング (周期約 150 nm) を描画する工夫を紹介します。EB 描画装置は走査型電子顕微鏡 (SEM) に似た装置で、任意のパターンで電子ビームを走査させることができます。微細なパターンを描画するためには、この電子ビームのビーム径を描画したい線幅の半分以下に細くする必要があります。そのためには、加速電圧を高く、対物レンズアパチャー (OLA) を大きく、ビーム電流を少なくします。このうち加速電圧は最大値である 30 kV とし、OLA は最大の $0.2 \text{ mm}\phi$ 、フィールドサイズは $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ としています。最後にビーム電流ですが、小さくしすぎると像が暗くなりピントを合わせづらくなってしまいますので、0.04 nA で描画を行っています。慎重に調整を行って、なんとか 30 nm 以下のビーム径が得られています。

次は電子ビーム走査に関する工夫です。EB 走査位置はフィールド (描画領域) を 60000×60000 に分割して指定できるので、最小アドレス単位は 3.3 nm になります。直線グレーティングの場合、これではとても DWDM に要求される波長間隔でグレーティングを作製することはできません。この周期制御の限界を克服するべく提案された方法が重み付け EB 露光法です³⁾。これは 1 つのラインを 2 つのラインの走査によって描画する方法で、2 つのライ

ン間で徐々に露光量を変化させることで露光量のピーク位置をほぼ線形にシフトさせることができます (図 3)。ビーム電流は固定していますので、走査速度を変化させることで露光量を制御し、ここで使用した条件では最小アドレス単位の 30 分の 1 程度の精度でラインの位置を制御できることとなります。一方、比較的曲率の高い曲線グレーティングの場合、このような面倒な方法は必要ありません。曲線パターンを細かい直線に分割して走査することになりますが、1 ラインを 1 回の走査で描画した場合でも理想のパターンとのずれの二乗平均平方根は十分小さくなります。作製した曲線 DBR グレーティングの SEM 写真を図 4 に示します。このように周期 145 nm でなめらかな曲線パターンの作製に成功しています。

現在周期 120 nm 程度の曲線 DBR グレーティングの作製に成功しており、今後 EB レジストを薄くするなどしてさらに微細周期のグレーティングの作製を行っているところです。どのパラメーターもあちらを立てればこちらが立たずという傾向があり、作製技術を改善していくということはいかにすべてが最適となるポイントを探るかという地道な作業になります。最先端の装置でなくても、このように創意と工夫を重ねることで最先端の研究はできるものです。
(大阪大学 上向井正裕)

文 献

- 1) Y. Tohmori *et al.*: IEEE J. Quantum Electron., **29** (1993) 1817.
- 2) M. Uemukai *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **39** (2000) 1503.
- 3) Y. Muroya *et al.*: IEEE Photon. Technol. Lett., **9** (1997) 288.