

ナノインプリント技術を応用した 光通信用レーザの作製

柳 沢 昌 輝*・辻 幸 洋・吉 永 弘 幸
河 野 直 哉・平 塚 健 二

Application of Nanoimprint Lithography to Fabrication of Laser Diodes for Optical Communication Networks — by Masaki Yanagisawa, Yukihiko Tsuji, Hiroyuki Yoshinaga, Naoya Kouno and Kenji Hiratsuka — The authors have succeeded in employing nanoimprint lithography (NIL) to form diffraction gratings of distributed feedback laser diodes (DFB LDs) that are increasingly used in optical communication. Uniform gratings and phase-shifted gratings with a period of 232 nm were formed by reversal NIL in combination with the use of a step-and-repeat imprint tool. Line edge roughness kept sufficiently low with the fabricated gratings. DFB LDs fabricated by NIL have indicated characteristics comparable to those by electron beam lithography, and have also shown high long-term stability in the threshold current.

The authors have also demonstrated that phase-shifted DFB LDs show better uniformity in characteristics than uniform-grating ones. The results of this study indicate that NIL has high potential for fabricating DFB LDs.

Keywords: nanoimprint, distributed feedback laser, optical communication, diffraction grating

1. 緒 言

1-1 光通信市場におけるレーザ需要の現状 近年、インターネットや動画配信サービスの普及により、ネットワーク上を流れる通信トラフィックは急速に増大しつづけており、それにしたがって、ネットワーク機器の高性能化、低価格化に対する要求が、ますます高まっている。そうした中、一昔前までは高速、長距離伝送用を中心に普及していた光通信インフラが、近年では中～短距離フィールドでも急速な広がりを見せている。光通信の発光源として用いられるレーザダイオード (LD) にも、高性能化、低価格化の波は押し寄せ、かつては長距離通信市場で使われていたハイエンド用の分布帰還型LD (DFB LD) が中～短距離でも使用されるようになり、その傾向はますます強まっている。当社は、光通信用DFB LDをデバイス事業の主力製品の一つとして展開しているが、上記のような高性能化、低価格化のニーズに対し、革新的なプロセス技術の開発による抜本的なコストダウンが必要となってきた。

1-2 ナノインプリント技術 ナノインプリント技術は、あらかじめ微細なパターンを形成した「型」を基材上に塗布した樹脂に押し付けて、パターンを転写する技術である。原理的には古来からある型押しと同様であるが、1995年、Princeton大のChouらにより、100 nm以下の極微細パターンが形成可能であることが示唆され⁽¹⁾、一躍脚光を浴びることとなった。ナノインプリントは、解像度が電子ビーム描画法 (EBL)*1と同等 (数nmオーダー) である一方、スループットがEBLの数倍から数十倍と高いため、量産技術としての応用が期待されている。また、設備

への初期投資やランニングコストを比較的安く抑えることができることから、近年、幅広い用途で応用研究がなされている。たとえば、次世代の記憶メディア⁽²⁾や波長フィルターなどの光学素子⁽³⁾、バイオ用途のナノ流路⁽⁴⁾などであるが、応用分野によって形成するパターンの形状やサイズは多種多様であり、それに応じて様々なプロセス方式や装置が提案・研究されている。

2. 動 機

DFB LDは、レーザ光が発生する部分である活性層の近傍に、線幅100 nm～130 nmの周期的凹凸形状 (回折格子) を持ち (図1)、その周期で決まる単一の波長 (縦モー

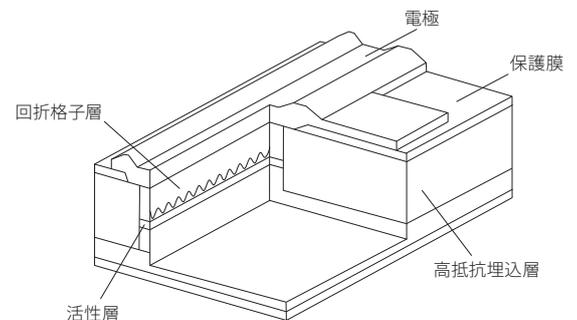


図1 DFB LDの模式図

ド)で発振するため、波長選択性、モード安定性に優れるという特長を持つ⁽⁵⁾。しかし、回折格子の加工には極めて高精度の作製プロセスが必要であるため、加工コストの低減が難しいという課題がある。加えて、レーザ端面における回折格子の位相(端面位相^{*2})によって、しきい電流値や光出力といったレーザの基本特性が大きくばらついてしまう⁽⁶⁾ため、歩留まりに限界があり、やはり低コスト化の大きな障害となっている。これを克服するために、レーザの共振器内で回折格子の位相を意図的に半周期ずらした構造($\lambda/4$ 位相シフト回折格子; λ はLD内を伝播する光の波長)が用いられている(図2)。位相シフト回折格子の採用により、端面位相の影響を軽減し、レーザ特性のばらつきを抑制することができる⁽⁷⁾ため、歩留まりの向上によるコスト低減が期待される。位相シフト回折格子の作製には、原理的に従来の二光束干渉露光法^{*3}が使えないため、通常はEBLが用いられる。しかし、EBLは電子線によってパターンを一つずつ直接描画する方法であるため、プロセス時間が非常に長く、量産プロセスとして適しているとはいえない。

筆者らは、ナノインプリント技術を、位相シフトDFB LDの回折格子形成に応用する研究を行ってきた^{(8),(9)}。ナノインプリントは、前述のようにEBLよりもスループットが高く、しかも設備コストが低いため、EBLに代わる位相シフトDFB LDの低コスト作製プロセスとして有望であると考えている。

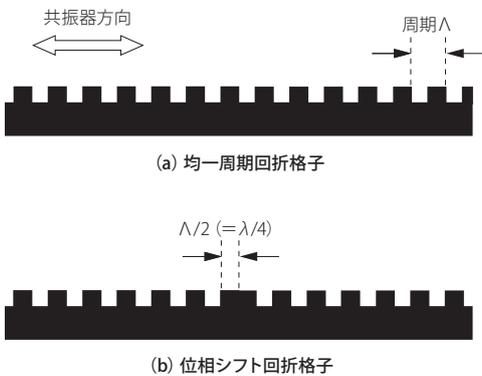


図2 DFB LDの回折格子の概念図

3. 課題と戦略

LD作製にナノインプリントを応用するにあたり、筆者らは2つの大きな課題に着目した。ひとつは、インプリントの際の押し付け圧力による半導体結晶へのダメージの問題である。LDに使用されるInP基板^{*4}は、Si基板などと比較して非常に脆弱であるため、機械的圧力によって結晶

欠陥が生じたり増加したりすることで、デバイスの特性、信頼性に深刻な影響が与えられることを懸念した⁽¹⁰⁾。もうひとつの課題は、基板表面の凹凸に起因する、インプリント後の樹脂の膜厚不均一性である。一般的に入手可能なInP基板はSi基板にくらべて平坦度が劣るため、膜厚のばらつきが相当程度発生することが避けられず、これがデバイス特性の不均一性につながることを懸念した。これら2つの課題はトレードオフの関係にあり、たとえば膜厚の均一性を改善するためにインプリント圧力を上げることは、すなわち基板へのダメージの増大につながるため、両者を同時に解決することは難しい課題である。筆者らは本研究において、前者に対しては、結晶へのダメージを非接触な測定方法を用いて評価を行い、後者に対しては、反転インプリントプロセスを採用するとともに、インプリント後に行う樹脂のエッチング方法に工夫を行うことで、パターン均一性の向上を図った。また、これらの検討を踏まえて実際にデバイスを作製し、基本的特性およびその長期信頼性を調べることで、ナノインプリントを応用した本プロセスにより、高信頼な位相シフトDFB LDの作製が可能であることを実証することとした。

4. 作製プロセス

本研究では、回折格子は活性層の直上に形成される(図1)。活性層ストライプは、半絶縁性FeドープInP層で埋め込まれる形となっている。

回折格子作製プロセスの流れを、図3に示す。まず、活性層を含むエピタキシャル層^{*5}を形成したInP基板上にプライマー剤を回転塗布する。次に、紫外線硬化樹脂を滴下し、これに石英製のモールドを押し付ける(図3(a))。モールドには、所望の周期と線幅で作製した回折格子パターンが刻み込んである。本実験では、発振波長1490 nmのLDを作製するため、回折格子の周期を232.4 nmとした。押し付け圧力は0.1 MPaほどと非常に低いが、紫外線硬化樹脂は粘度が比較的低いため面方向に十分に広がり、モールドのパターン内に充填される。モールドを通して紫外線を照射し樹脂を硬化させた後、モールドを離型する(図3(b))。1回の転写が終わると、基板を載せたステージが移動し、別のフィールドに逐次的にインプリントを繰り返す(ステップ&リピート式)。1つのフィールドの大きさは約9 mm×約7 mmである。インプリント後、全面に平坦化樹脂を回転塗布する(図3(c))。この平坦化樹脂はSiを含有しており、膜厚は約240 nmである。次に、紫外線硬化樹脂の凸部の上面を露出させるために、誘導結合プラズマ反応性イオンエッチング(ICP-RIE)装置を用いて平坦化樹脂をエッチバックする(図3(d))。使用したガスはCF₄とO₂である。さらに、露出した紫外線硬化樹脂を貫通させるため、同じくICP-RIE装置にて、選択エッチングする(図3(e))。使用したガスはO₂とN₂である。最後に、

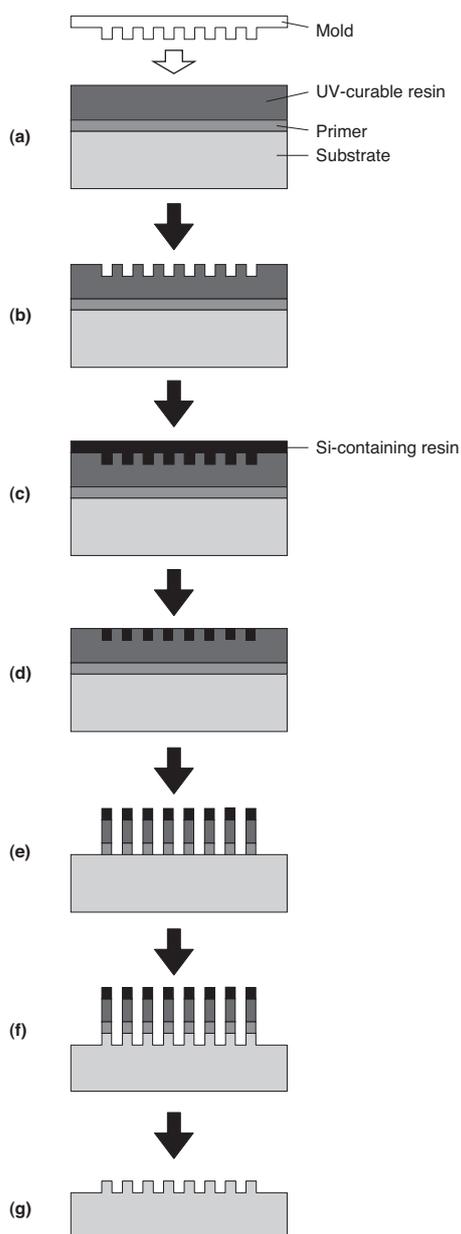


図3 回折格子作製プロセスフロー

基板をCH₄とH₂の混合ガスを用いたICP-RIEでエッチングし(図3(f))、樹脂を剥離して、目的とする回折格子形状を得る(図3(g))。以上のように、Si含有平坦化樹脂を用いた反転インプリントプロセスを採用することにより、基板の凹凸による残膜厚分布がパターン線幅に与える影響を、ある程度軽減することができる。

DFB LDの作製においては、当社で標準的に用いている作製プロセスをベースとして、回折格子形成工程のみにナノインプリントを適用した。実績が十分に蓄積されたプロセスを最大限に利用することで、実用化への障壁をできるだけ小さくすることを意図している。

5. 機械的圧力による影響の評価

インプリントの押し付け圧力による結晶への影響を調べるため、エピタキシャル層のフォトルミネッセンス(PL)強度の変化を評価した。もし、インプリントの際の機械的圧力によって活性層に深刻なダメージが及ぼされるとすると、インプリント前に対してPL強度が相対的に低下するはずである。

インプリント用樹脂を塗布したエピタキシャル基板と、塗布していない基板の両者に対し、パターンが何も無い石英板を押し付けた。石英板の大きさは10 mm角、押し付け圧力は0.8 MPaである。その後、樹脂を塗布した基板については溶剤により樹脂を除去し、両者のPL強度マッピング測定を行って、PL強度分布を比較した。

図4に示すように、樹脂なしで押し付けたサンプルについては、PL強度の明らかな低下が見られる。これに対し、樹脂ありサンプルについては強度低下が見られず、押し付けによる顕著な影響が無いことがわかる。この結果から、インプリント用樹脂が一種のクッションの役割を果たし、エピタキシャル層への致命的ダメージが回避されていると考えられる。

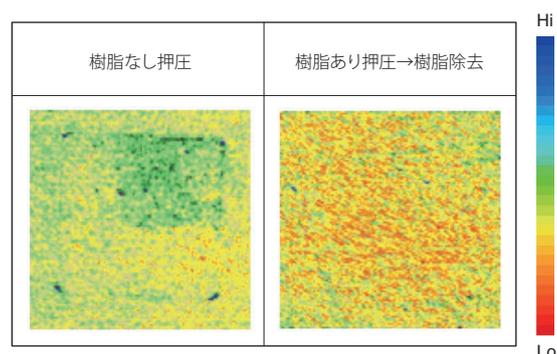


図4 フォトルミネッセンス強度を用いたインプリント圧力の影響評価

6. パターン均一性の改善

前記のように、基板の平坦性の低さに起因する残膜厚ばらつきは、ナノインプリントのLD応用において重要な課題である。前述のように、反転インプリントプロセスの採用によって、この問題はある程度軽減されるが、十分とは言えない。筆者らは、樹脂の貫通エッチング(図3(e))において、アンダーカットが無視できるほど小さければ、ある程度残膜厚ばらつきがあっても、均一なパターンを形成することができる考えた。そこで、アンダーカット⁶を極力抑制したエッチング条件を探索した。その結果、N₂をエッチングガスとして添加することで、アンダーカットが抑制されることを見出した。これは、エッチング中にN

原子を含む反応生成物が堆積し、被エッチング部である回折格子溝部の側壁を保護する役割を果たしていることによるものと考えられる。さらに側壁保護効果を高めるため、基板を -10°C に冷却することで、残膜厚分布が約 300 nm ほど存在する状態においても、 2 インチ 径基板内で $3\sigma < 10\text{ nm}$ という極めて線幅均一性の高いエッチングを可能にした。図5は、これにより得られた貫通エッチング後のサンプルの断面走査電子顕微鏡 (SEM) 像である。

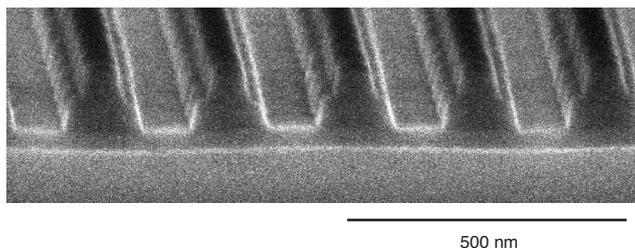


図5 樹脂貫通エッチング後の断面SEM像

7. 位相シフトDFB LDの作製と評価

作製した回折格子のSEM像を図6に示す。これは、結晶エッチング後に樹脂を剥離した後の状態である (図3 (g))。パターン線幅の揺らぎやラフネスなどは十分に小さく、良好な回折格子形状が得られていることがわかる。回折格子周期については、波長 364 nm のレーザー光を入射させて得られる回折光の回折角度から計算し、狙い通り $232.4\text{ nm} \pm 0.1\text{ nm}$ となっていることを確認した。

図7は、LDの基本特性である光出力とスロープ効率の電流依存性を示している。しきい電流値は 8 mA であり、良好なレーザー発振特性を示している。

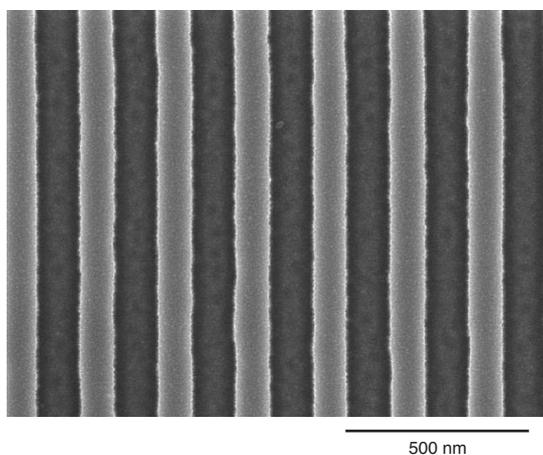


図6 作製した回折格子の上面SEM像

図8に、発光スペクトルを示す。ストップバンドの中心、すなわちブラッグ波長でDFBモード発振が得られており、位相シフト回折格子が正常に機能していることを示している。

次に、ナノインプリントおよびEBLのそれぞれを用いて作製した位相シフトDFB LDを比較した。比較した特性はサイドモード抑圧比 (Side-mode suppression ratio : SMSR) で、DFBモードの発振安定性を示すパラメータのひとつである。図9は、両者のSMSRの分布をヒストグラムにして比較したものである。これより、中心値、分散ともに同等であることがわかる。すなわち、EBLを使った従来のプロセスで作製されたDFB LDと比較して、絶対値、ばらつきともに遜色ないデバイスが、本プロセスにより作製できていることが実証された。

次に、位相シフト回折格子の効果を検証するために、位相シフトDFB LDと均一周期回折格子DFB LDの比較を行った。比較したパラメータは最大光出力であり、同一基板上にナノインプリントによって作製された位相シフト

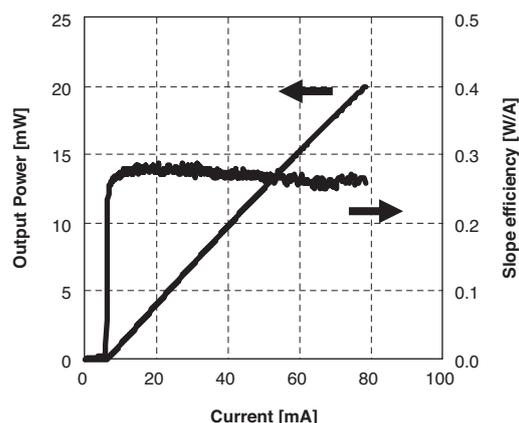


図7 位相シフトDFB LDの電流—光出力特性およびスロープ効率特性

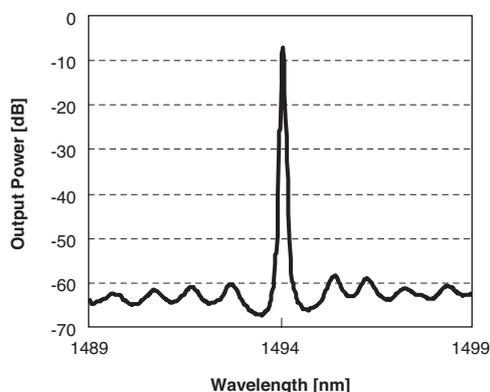


図8 位相シフトDFB LDの波長スペクトル

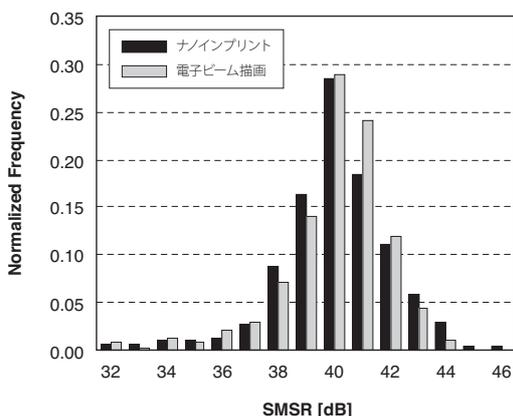


図9 サイドモード抑圧比 (SMSR) のヒストグラム (ナノインプリント vs. 電子ビーム描画)

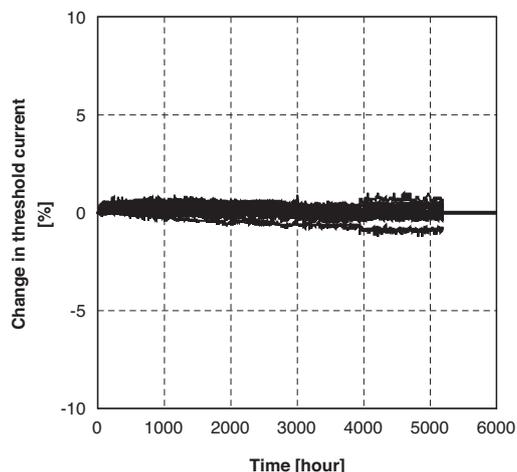


図11 位相シフトDFB LDの長期信頼性試験

LDと均一周期LDを比較した。図10を見ると、位相シフトLDでは光出力のばらつきが明らかに抑制されていることがわかる。光出力の標準偏差は、位相シフト、均一周期のそれぞれについて、1.27 mW、0.74 mWとなっており、40%以上の改善である。これは、位相シフト回折格子、均一周期回折格子の両者ともに、ナノインプリントを用いた新プロセスによって、所望の形状に加工されていることを示している。

最後に、長期信頼性試験の結果を図11に示す。環境温度85℃、光出力10 mW (一定) の条件下で5000時間に亘って通電試験を行ったところ、しきい電流値の変動量は±1%以内と、非常に安定であった。これは、先に課題として挙げたインプリント圧力による結晶品質への悪影響が無いことを証明するだけでなく、たとえば樹脂による汚染など、信頼性上で悪影響を与える可能性のある他の要因を含めて、問題が無いことを示している。

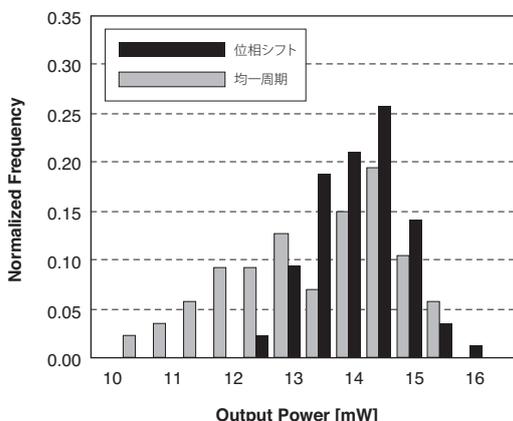


図10 光出力のヒストグラム比較 (位相シフト vs. 均一周期)

8. 結 言

光通信用位相シフトDFB LDの低コスト作製プロセスとして、ナノインプリント技術を応用した。反転インプリントプロセスの採用、および樹脂貫通エッチング方法の工夫により、線幅均一性 $3\sigma < 10 \text{ nm}$ (2インチ基板面内) を実現し、これを適用して実際に位相シフトDFB LDを作製した。作製したLDが、EBLを用いた従来プロセスによって作製されたLDと遜色ない基本特性を持つことを示し、また特性均一性も同等であることを実証した。また、5000時間に亘る長期信頼性試験を実施し、しきい電流値の変動量が±1%以内と極めて安定であることを示し、インプリント圧力による基板へのダメージなど、ナノインプリントを導入することによる特性、信頼性への悪影響が生じないことを実証した。

以上のことから、筆者らが確立した、ナノインプリント技術を応用した位相シフトDFB LD作製プロセスが、実用上、高いポテンシャルを持っていると結論付けられる。本プロセスは、将来的に量産プロセスへの適用が期待されるだけでなく、ナノメートル級のパターン形成技術を必要とする他の様々な用途においても、その作製技術として有用であると筆者らは考えている。

用語集

※1 電子ビーム描画法

電子ビームを用いて、レジスト上にパターンを直接描画する方法。ナノメートルサイズのパターンを描くことが可能だが、パターン形成する面積に比例してプロセス時間が長くなる。

※2 端面位相

レーザの端面は機械的な分割によって形成され、位置精度は高々数 μm 程度である。一方、回折格子の凹凸の周期は約0.2 μm であるため、「凹凸のどの部分で端面が形成されるか (=端面位相)」は制御できない。

※3 二光束干渉露光法

同じ波長の2つの光を、感光剤を塗布した基材上に角度を付けて照射することにより、干渉縞パターンを形成する方法。通常は、ひとつのレーザから出た光をミラーによって分け、基材上で干渉させる。基材全面に一括でパターン形成が可能であるが、原理的に均一周期の格子パターンしか形成できない。

※4 InP

Indium Phosphide (リン化インジウム) : 当社で製造する光通信用LDは、発光波長が1.3 μm ~1.6 μm 帯であり、基板としてはInPを用いている。

※5 エピタキシャル層

基板の結晶面に揃えて原子を配列した結晶層。ここでは、性質の異なる複数の半導体薄膜を、層状に形成している。

※6 アンダーカット

理想的には図3 (e) のように垂直方向にのみエッチングが進行し、マスクの寸法がそのまま被エッチング層に転写されることが望ましいが、実際には横方向にもエッチングが進む場合があり、そのため寸法が変化してしまう。この横方向エッチングをアンダーカットと呼ぶ。

参考文献

- (1) S. Y. Chou, P. R. Krauss and P. J. Renstrom, "Imprint of sub-25 nm vias and trenches in polymers", Appl. Phys. Lett., 67 (21), pp. 3114-3116 (1995)
- (2) S. Y. Chou, "Patterned magnetic nanostructures and quantized magnetic disks", Proceedings of the IEEE, 85 (4), pp. 652-671 (1997)
- (3) D. H. Kim, W. J. Chin, S. S. Lee, S. W. Ahn and K. D. Lee, "Tunable polymeric Bragg grating filter using nanoimprint technique", Appl. Phys. Lett., 88 (7), pp. 071120 (2006)
- (4) L. J. Guo, X. Cheng and C. F. Chou, "Fabrication of size-controllable nanofluidic channels by nanoimprinting and its application for DNA stretching", Nano Lett., 4 (1), pp. 69-73 (2004)
- (5) K. Iga and Y. Kokubun, Encyclopedic handbook of integrated optics, CRC (2006)
- (6) T. Matsuoka, H. Nagai, Y. Noguchi, Y. Suzuki and Y. Kawaguchi, "Effect of the grating phase at the cleaved facet on DFB laser properties", Jpn. J. Appl. Phys., 23 (3), pp. L138-L140 (1984)
- (7) M. Davis and R. O'Dowd, "A transfer matrix method based large-signal dynamic model for multielectrode DFB lasers", IEEE J. Quantum. Electron., 30 (11), pp. 2458-2466 (1994)
- (8) M. Yanagisawa, Y. Tsuji, H. Yoshinaga, N. Kono and K. Hiratsuka, "Application of Nanoimprint Lithography to Fabrication of Distributed Feedback Laser Diodes", Jpn. J. Appl. Phys., 48, pp. 06FH11 (2009)
- (9) M. Yanagisawa, Y. Tsuji, H. Yoshinaga, K. Hiratsuka and J. Taniguchi, "Evaluation of nanoimprint lithography as a fabrication method of distributed feedback laser diodes", Journal of Physics : Conference Series, 191, pp. 012007 (2009)
- (10) O. Ueda, S. Yamakoshi and T. Yamaoka, "Transmission Electron Microscope Observation of Mechanically Damaged InGaAsP/InP Double-Heterostructure Light-Emitting Diode", Jpn. J. Appl. Phys., 19 (5), pp. L251-L254 (1980)

執筆者

柳沢 昌輝* : 伝送デバイス研究所
次世代プロセス研究部
主査 博士 (工学)
光通信用化合物半導体デバイスの生産技術に関する研究開発に従事



辻 幸洋 : 伝送デバイス研究所 高集積プロセス研究部 主査
吉永 弘幸 : 伝送デバイス研究所 高集積プロセス研究部
河野 直哉 : 伝送デバイス研究所 高集積プロセス研究部
平塚 健二 : 伝送デバイス研究所 次世代プロセス研究部
集積プロセスグループ グループ長 理学博士

*主執筆者