

高出力半導体レーザの高放熱化に向けた 固相低温接合による放熱構造の形成

東北大学 大学院工学研究科電子工学専攻

教授 日暮 栄治

(2022 年度 一般研究開発助成 AF-2022210-B2)

キーワード：表面活性化接合，高放熱構造，テンプレートストリッピング

1. 研究の目的と背景

近年、小型・高出力半導体レーザや発光ダイオードなどの高出力光源が、レーザディスプレイ（高輝度ディスプレイ、レーザTV、携帯プロジェクタ）、照明（レーザーヘッドライト）、分析（蛍光分光分析）などの分野で求められ、活発な開発が進められている。半導体レーザの諸特性は、活性層の温度と密接な関係があり、活性層の温度上昇は、最大光出力の低下を招く。また、半導体レーザの劣化速度は、温度上昇により指数関数的に上昇する。例えば、 10°C の温度上昇に対して、アレニウスの式と典型的な活性化エネルギー $0.7 \sim 0.9\text{ eV}$ から、寿命は $1/2 \sim 1/3$ に著しく低下する³⁾。すなわち、高出力レーザでは、発生した熱をいかに効率よく放熱させ、活性層の温度上昇を抑えるかというサーマルマネジメントが重要となる。ゲイン領域（量子井戸構造）を有する半導体素子とヒートシンク（高熱伝導基板）が近接した高放熱構造光デバイスを実現するためには、格子定数の違いからヘテロエピタキシャル成長が困難であるため、はんだを用いた接合^{2,4)} や Liquid Capillary bonding⁵⁾ と呼ばれる親水処理した接合方法が試みられてきた。しかしながら、AgSn (3.5 wt% Ag, 融点: 221°C) や AuSn (80 wt% Au, 融点: 280°C) のようなダイアタッチ用はんだの熱伝導率は銅(Cu) や金(Au)などの金属と比較すると $1/10 \sim 1/5$ と小さく、はんだなどの接着層での熱障壁が問題となる。また、親水処理を利用した接合は、高い接合強度を求めるとき高温のアニール処理が必要であり、ボイドの発生や熱膨張係数差に起因する熱応力発生による素子の劣化という課題があった。

そこで我々は、Au-Au 表面活性化接合技術を開発し、大気中での半導体レーザチップなどの光素子の低温接合技術($\sim 150^{\circ}\text{C}$)を世界に先駆けて実現した⁶⁾。しかしながら、本技術は、活性化された固体表面を原子間の凝着力により接合させる方法であるがゆえに、極めて平滑な接合面(rms 表面粗さ: 1 nm 以下)が必要という大きな制約があり、適用できる素子が極めて限的であり、市販されている素子にそのまま適用できないという大きな課題があった。一般にスパッタリングなどで成膜した厚さ 500 nm 以上の厚い金属薄膜電極の表面は、rms 表面粗さが数 nm 以上となり、オーミックコンタクト形成のためにシントリング処理などを行うとさらに表面粗さが大きくなり、Si ウェハのような超平滑 (rms 表面粗さ: 0.2 nm) な表面は得られない

いため、低温 (150°C 以下)、低荷重 (200 MPa 以下) での接合は困難であった。また、放熱基板として用いられるダイヤモンドやセラミックスなどの難加工材料では、化学機械研磨(Chemical Mechanical Polishing: CMP)などの超精密ポリッピングを用いても、表面粗さ 1 nm 以下の平滑面を得るには加工速度が遅く、極めて高コストという課題があつた⁷⁾。

一方、我々は、Au 薄膜を剥離・転写するプロセス（テンプレートストリッピング、Template-stripping）を検討している中で、活性な Au 薄膜の塑性変形と表面拡散や粒界拡散などを積極的に利用した付加加工により、表面粗さの大きな面を平滑化できる可能性を見出した⁸⁾。これを利用すると光素子と高放熱基板に平滑面の形成が可能になり、新規低温接合プロセスを構築できる可能性がある。

本研究では、高出力半導体レーザの高放熱化をめざし、粗い接合面 (rms 表面粗さ: 数 nm～数 10 nm) を有する半導体レーザチップおよび放熱基板のテンプレートストリッピングに基づく平滑化と低温接合（常温～ 150°C ）を実現し、半導体レーザの新規高放熱構造を実現することを目的とする。

2. 研究手法

2・1 テンプレートストリッピング

テンプレートストリッピング(Template stripping)プロセスの模式図を図 1 に示す。(a) 平滑な表面を有するテンプレート(Template)基板を準備し、(b) 蒸着やスパッタにより、金属薄膜を堆積する。次に、(c) テンプレート基

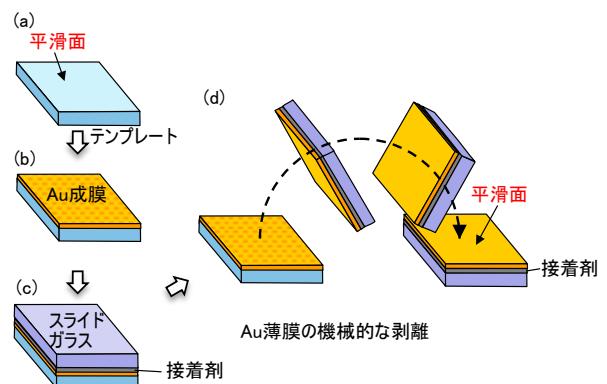


図 1. テンプレートストリッピングの模式図。

板上に堆積した薄膜をエポキシ樹脂などの接着剤でスライドガラスなどに固定し、(d)機械的に剥離することで、テンプレート基板側に接していた平滑な表面を有する金属薄膜を得ることができる。このようにして得られた平滑面を利用して表面プラズモン分析が行われている⁹⁾。しかしながら、一般にこれらの接着剤は、耐熱性がなく、デバイス製造の後工程でアウトガスが発生するため、半導体デバイス構造の中には用いることが困難である。

2・2 テンプレートストリッピングに基づく接合面平滑化

本研究で提案するテンプレートストリッピングに基づく接合面平滑化手法の模式図を図2に示す⁸⁾。ここでは、表面の粗いターゲット基板にAu薄膜やAuめっき膜が成膜されており、このターゲット基板を平滑化する様子を示している。(a)平滑な表面を有するテンプレート基板を準備し、スパッタ等により、Au薄膜を堆積する。(b)対象とするターゲット基板とテンプレートに堆積したAu薄膜表面をアルゴンプラズマ照射により表面活性化を行う⁶⁾。次に、(c)活性化したAu表面同士をコンタクトさせ、テンプレートとターゲット基板のAu薄膜同士の凝着力を利用して、テンプレート上のAu薄膜を機械的に剥離することにより、ターゲット基板側に転写させる。これらの転写プロセスを繰り返すことで平滑化を実現する。

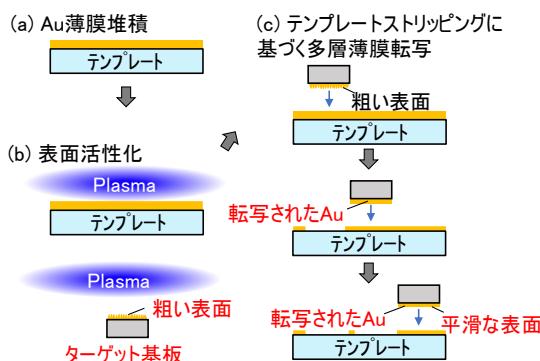


図2. テンプレートストリッピングに基づく接合界面付加加工。

2・3 圧力分布のシミュレーション

テンプレート基板に堆積したAu薄膜を機械的に剥離し、ターゲット基板に転写するためには、テンプレート基板とAu薄膜間の凝着力は十分に小さい必要がある。これまでテンプレート基板として、熱酸化膜付Si基板⁸⁾やSi基板上のポリイミドフィルム（ヤング率：9.5 GPa）¹⁰⁾を用いてきた。しかしながら、弾性変形により圧力の不均一が生じ、中央部の圧力が不均一になる課題があった。そこで、ポリジメチルシロキサン(PDMS)（ヤング率：5.8 MPa）フィルム上にポリイミドフィルムを配置したテンプレートを検討した。PDMS層が転写時の圧力分布に与える影響を調査するため、有限要素法(Finite element method: FEM)シミュレーションを行なった。図3は、シミュレーションの模式図である。粗いターゲット基板は、後述する理由か

ら、窒化アルミニウム(AIN)セラミックスとした。実際の実験では、ポリイミドフィルム上のAu薄膜とAINセラミックス基板上のAu薄膜を加圧により接触させ、AINセラミックス基板側に転写させる。転写時の圧力分布をCOMSOL Multiphysicsを使用して解析し、PDMS層の有無で圧力分布の比較を行なった。

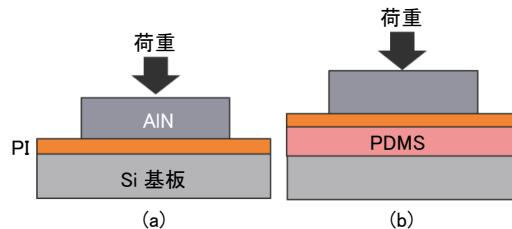


図3. 転写シミュレーションの模式図(PI: ポリイミド),(a) PDMS無し,(b) PDMS有り。

2・4 セラミックス基板の平滑化

本研究では、サブマウント材料として広く用いられている、優れた熱伝導性と高い電気絶縁性を備えたAlNセラミックスを放熱基板として用い、粗いAlN基板表面の平滑化とAu-Au表面活性化による常温接合を試みた。ポリイミド/PDMSテンプレートを用いたAu薄膜転写により、AlN基板の平滑化を行い、表面の観察を行った。最大で3回Au薄膜を転写した。AlN基板の表面粗さの変化を原子間力顕微鏡(Atomic force microscopy: AFM)により測定した。また、Au薄膜転写による、AlN基板表面の空間周波数成分の変化を観察するため、AFM測定データから2次元のパワースペクトル密度(Power spectrum density: PSD)を算出した。

2・5 常温接合

セラミックス基板平滑化の効果を検証するため、AlNセラミックス基板上にAu薄膜付きSiチップ(Ti: 5 nm/Au: 100 nm, rms表面粗さ: 1.4 nm)を常温接合した。SiチップとAlN基板にAr高速原子ビーム(Fast atom beam: FAB)を照射してAu表面の活性化を行い、大気雰囲気中でAu-Au接合(接合圧力: 30 MPa, 加圧時間: 10分間)を行った。接合圧力は、荷重をチップの面積($1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$)で割った値である。Au薄膜を転写していないAlNセラミックスと3回Au薄膜を転写したAlNセラミックスで接合を行い、ダイシェア強度を比較した(n=3)。

また、端面発光型半導体レーザチップ(Roithner Chip-650-P10)を平滑化したAlNセラミックス基板上に、大気中でAu-Au表面活性化接合(接合温度: 150°C, 接合圧力: 30 MPa)し、接合前後の光出力-電流-電圧(L-I-V)特性を測定し、接合ダメージを評価した。

3. 結果

3・1 圧力分布のシミュレーション

図4は、転写時のポリイミドフィルム表面の圧力分布のシミュレーション結果である。PDMS無しの場合は圧力が転写部の端部に集中するのに対し、PDMS有りの場合は応

力が転写部全体に均一に分布しており、基板全体への Au 薄膜転写が期待できる。

3・2 AlN 基板の平滑化

図 5 は、転写後のポリイミドフィルムと AlN 基板の写真である。転写部の Au 薄膜がポリイミドフィルムから残らず剥離し、AlN 基板全体 ($10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$) へ転写することに成功した。最大 3 回まで Au 薄膜転写を行なった AlN チップの RMS 表面粗さの AFM 観察に基づく変化を図 6 に示す(測定長: $10 \mu\text{m}$)。転写前の AlN チップの表面粗さは約 16.8 nm であったが、Au 薄膜の転写を繰り返すことによって表面粗さは減少し、転写を 3 回繰り返すことで約 1.7 nm となった。転写前後の PSD の変化を図 7 に示す(走査範囲: $10 \times 10 \mu\text{m}^2$)。1 回目の Au 薄膜の転写により、広

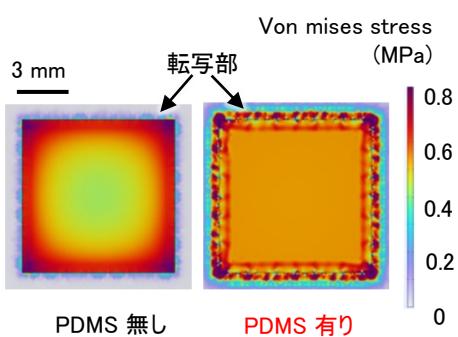


図4. 加圧時のポリイミドフィルム上の圧力分布シミュレーション結果。

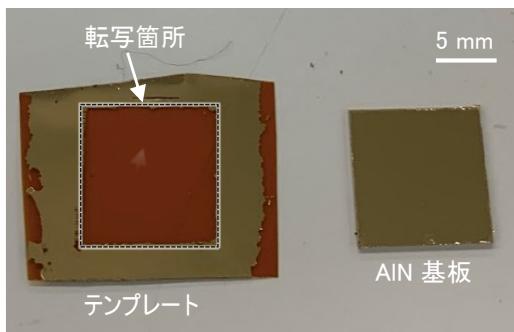


図5. 転写後のポリイミドフィルムと AlN 基板。

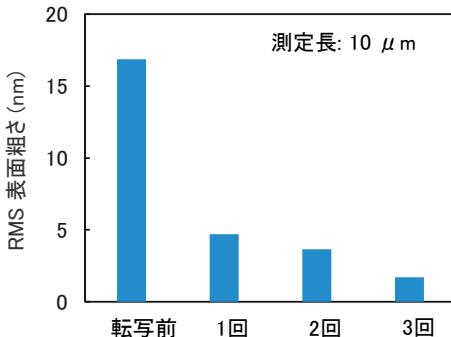


図6. Au薄膜転写による表面粗さの変化。

い空間周波数帯において PSD が減少し、基板表面が平滑化されたことを確認した。2 回目以降の Au 薄膜転写では、PSD の変化は小さかった。

3・3 接合実験

Au-Au 接合した試料のダイシェア試験の結果を図 8 に示す。ダイシェア強度は、破断時の荷重をチップの面積($1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$)で割った値である。AlN 基板に Au 薄膜を転写し接合面を平滑化することで、室温で MIL-STD-883 × 1.0, 6 MPa を十分に超えるダイシェア強度が達成された。一方、Au 薄膜を転写しない場合、接合は弱かつた。

図 9 は、接合前後の半導体レーザチップの L-I-V 特性である。接合前後で、しきい値電流の変化も見られず、特性の劣化は見られなかった。

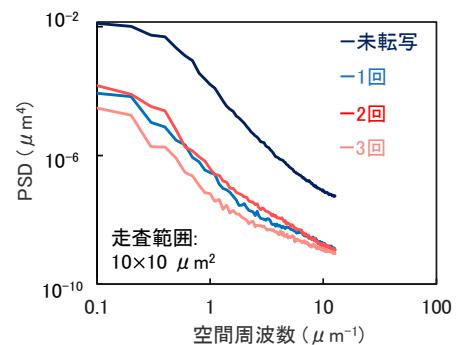


図7. Au薄膜転写によるPSDの変化。

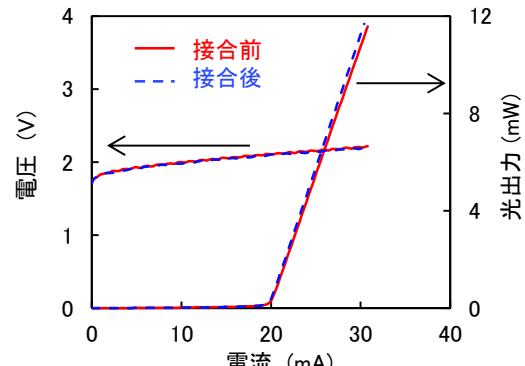


図8. ダイシェア試験結果。

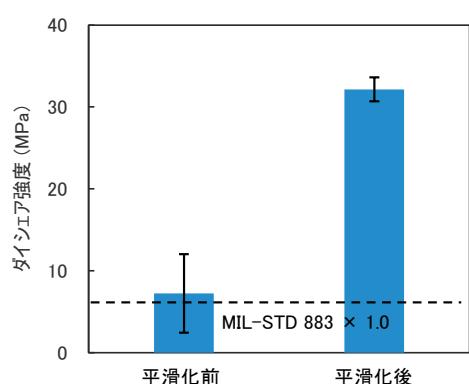


図9. 接合前後の半導体レーザチップL-I-V特性。

4. 結論

ポリイミドフィルムとPDMSフィルムを組み合わせたテンプレートを用いたAu薄膜の転写により, AlNセラミックス基板の平滑化および低温固相接合に成功した。FEMシミュレーションの結果, PDMSを用いることで転写部の荷重分布が均一になることが示された。Au薄膜の転写により平滑化したAlN基板とAu薄膜付きSiチップ間で, 室温でのAu-Au表面活性化接合により強力な接合が得られた。

また, 端面発光型半導体レーザチップを, 平滑化したAlNセラミックス基板上にAu-Au表面活性化接合した。接合前後で, 光出力-電流-電圧(L-I-V)特性が変化しないことを確認した。AuSnはんだなどを介さない半導体レーザの新規高放熱構造を実現した。

謝 辞

本研究を実施するにあたり, 公益財団法人天田財団2022年度一般研究開発助成AF-2022210-B2を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) J. V. Sandusky and S. R. J. Brueck, "A CW external-cavity surface-emitting laser," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 8, No. 3, pp. 313-315, 1996.
- 2) M. Kuznetsov, F. Hakimi, R. Sprague, and A. Mooradian, "High-power (>0.5-W CW) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM₀₀ beams," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 9, No. 8, pp. 1063-1065, 1997.
- 3) O. Ueda, "Reliability and Degradation of III-V Optical Devices," Artech House, 1996.
- 4) S. Giet, A. J. Kemp, D. Burns, S. Calvez, M. D. Dawson, S. Suomalainen, A. Harkonen, M. Guina, O. Okhotnikov and M. Pessa, "Comparison of thermal management techniques for semiconductor disk lasers," Proc. of SPIE, vol. 6871, 687115, 2008.
- 5) Z. L. Liau, "Semiconductor wafer bonding via liquid capillarity," Appl. Phys. Lett., Vol. 77, No. 5, pp. 651-653, 2000.
- 6) E. Higurashi, T. Imamura, T. Suga, and R. Sawada, "Low temperature bonding of laser diode chips on Si substrates using plasma activation of Au films," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 19, no. 24, pp. 1994-1996, 2007.
- 7) R. Sun, X. Yang, K. Arima, K. Kawai, K. Yamamura, "High-quality plasma-assisted polishing of aluminum nitride ceramic," CIRP Annals, vol. 69, no. 1, pp. 301-304, 2020.
- 8) E. Higurashi, M. Yamamoto, R. Nishimura, T. Matsumae, Y. Kurashima, H. Takagi, T. Suga, and T. Itoh, "Formation of smooth Au surfaces produced by multiple thin-film transfer process based on template stripping for low-temperature bonding," The 2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), pp. 223-228, June 3-30, 2020.
- 9) P. Nagpal, N. C. Lindquist, S.-H. Oh, D. J. Norris, "Ultrasmooth Patterned Metals for Plasmonics and Metamaterials", Science, vol. 325, no. 5940, pp. 594-597, 2009.
- 10) K. Takeuchi, S. Koseki, L. H. H. Thu, T. Matsumae, H. Takagi, Y. Kurashima, T. Tsuda, T. Tokuhisa, T. Shimizu, E. Higurashi, "Room Temperature Bonding of Au Plating through Surface Smoothing using Polyimide Template Stripping," Sensors and Actuators: A. Physical, vol. 383, 116211, 2025.