

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289085

研究課題名(和文)化合物半導体の常温接合と高放熱構造への応用

研究課題名(英文) Room-temperature bonding of compound semiconductors and its application to high heat dissipation structure

研究代表者

日暮 栄治 (Higurashi, Eiji)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60372405

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：近年、小型・高出力半導体光源が、レーザディスプレイ、分析(蛍光分光分析)、照明、光通信、加工、光データ記録などの分野で求められ、開発が進められている。これら高出力半導体光源の諸特性は、活性層の温度と密接な関係があり、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が重要となっている。

本研究では、高放熱基板として炭化ケイ素(SiC)に着目し、直接遷移型化合物半導体(GaAs)ウェハとSiCウェハの直接常温接合および極めて平滑な(二乗平均平方根粗さ< 0.5 nm)金(Au)薄膜を介した大気中常温接合により、半導体光源の高放熱構造を形成することが可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：Compact and high power semiconductor lasers are key components in various scientific and industrial instruments including laser displays and fluorescence analysis systems such as confocal microscopes and flow cytometers. The temperature rise of the active region in the high power semiconductor lasers strongly affects the threshold and output power characteristics and causes degradation of the lasers exponentially. Thus, efficient heat dissipation and thermal management are highly important.

In this study, we have developed a direct bonding method and a bonding method using a smooth gold thin-film interlayer (root-mean-square roughness < 0.5 nm) for GaAs/SiC heterogeneous integration. The improved heat dissipation structure for high power semiconductor lasers was demonstrated in the wafer scale at room temperature.

研究分野：光実装工学

キーワード：常温接合 低温接合 直接接合 中間層接合 異種材料集積 高出力半導体レーザ 熱抵抗 金薄膜

1. 研究開始当初の背景

小型・高出力半導体レーザーや発光ダイオードなどの高出力光源が、レーザーディスプレイ(高輝度ディスプレイ、レーザー 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。例えば、垂直外部共振器面発光レーザー VECSEL (Vertical External Cavity Surface Emitting Laser)[1]、光励起半導体レーザー OPSL (Optically Pumped Semiconductor Laser)、または半導体ディスクレーザー SDL (Semiconductor Disk Laser)と呼ばれる次世代高出力レーザーの開発が進められている。図1に典型的な VECSEL の構造を示す。半導体ゲイン領域を別の光源で光励起することで光学利得として用い、半導体素子を固体レーザー結晶のように用いることで、近紫外から中赤外領域の幅広い範囲の発振波長設計が可能で、ビーム品質を保ったまま高出力化が可能である。

半導体レーザーの諸特性は、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、半導体レーザーの劣化速度は、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 ~ 0.9 eV)から、寿命は1/2~1/3に著しく低下する。すなわち、高出力レーザーでは、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。

従来、ゲイン領域(量子井戸構造)と DBR (Distributed Bragg Reflector)からな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]や Liquid Capillary bonding[3]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高温のアニール処理が必要であり、ボイドの発生や熱

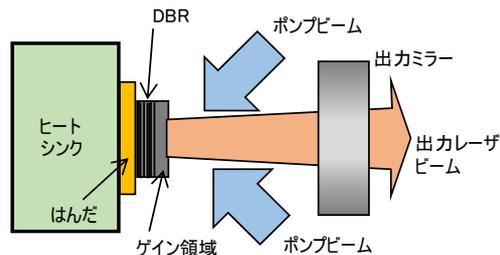


図1 典型的な垂直外部共振器面発光レーザー VECSEL (Vertical External Cavity Surface Emitting Laser) の構造模式図

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。そのため、半導体素子の活性層に熱応力が発生しないような低温接合プロセスが求められていた。

2. 研究の目的

半導体素子(発光領域)と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、直接遷移型 III-V 族化合物半導体(GaAs, InP など)と大きな熱伝導率を有する IV-IV 族化合物半導体の炭化ケイ素(SiC)を表面活性化接合(Surface Activated Bonding)技術により常温で張り合わせた基板の作製技術を確立することを目的とする。SiCの熱伝導率は、Siと比べて約3倍大きく、光デバイスの典型的なヒートシンク材料であるCuよりも大きな値をもつ。

3. 研究の方法

(1) III-V族化合物半導体/SiCヒートシンク構造の熱解析

直接遷移型 III-V 族化合物半導体(GaAs, InP など)基板と SiC 高熱伝導基板の間の接着層がどの程度半導体レーザーの熱特性に影響を与えるのかを見積もるために、熱抵抗の数値解析を行う。

(2) 直接ウェハ接合

GaAs ウェハと SiC ウェハの表面活性化接合を行い、接合強度や接合界面の微細構造を明らかにする。

(3) 金(Au)薄膜を介したウェハ接合

GaAs ウェハと SiC ウェハを Au-Au 表面活性化接合を行い、接合強度や接合界面の微細構造を明らかにする。

4. 研究成果

(1) III-V族化合物半導体/SiCヒートシンク構造の熱解析

半導体レーザーの熱特性を評価するパラメータとして、熱抵抗が用いられる。発熱量が P_{heat} [W] のとき、活性層の温度が ΔT [K] だけ上昇したとすると、このときレーザー素子の熱抵抗 R_{th} [K/W] は次式で与えられる。

$$R_{th} = \Delta T / P_{heat}$$

このように熱抵抗とは発熱量 1 W あたりの活性層温度上昇量に相当する。熱抵抗の上昇により活性層温度は上昇するため、熱抵抗をできるだけ小さくする必要がある。有限要素法による2次元熱伝導解析を MEMS 用設計・解析支援システム「MemsONE」[4]で行った。熱抵抗の解析に用いた典型的な VECSEL 構造の解析モデルを図2に示す。なお、薄膜の場合、フォノンの境界での散乱の影響が大きくなり、熱伝導率がバルクの場合に比べて低下することが報告されているが、解析にはバルクの値を用いた。図2の解析モデルにあるように、VECSEL に用いられる半導体素子はエピタキシャル成長により成膜されたゲイン領域(GaAs)や DBR (GaAs/AlAs) が接着層を介し、ヒートシン

ク材 (SiC) に接合されている。熱源は、ゲイン領域の $\Phi 200 \times 2.5 \mu\text{m}$ の円筒領域である。ヒートシンクは、外部ペルチェ素子に取り付けられるためヒートシンク底面を一定温度 (25°C) とした。また、半導体レーザでは、固体を通じての熱伝導が支配的なため、外気への熱放散は無視した (外気に流出する熱流束はゼロと仮定した)。図 3 は、有限要素法解析による熱抵抗解析結果 (熱源とヒートシンク底面間の全熱抵抗で、チップ熱抵抗, 接着層熱抵抗, ヒートシンク熱抵抗の和で示される) である。図 3(a) は、接着層なしに各種ヒートシンク材を半導体素子に直接接合させた場合の熱抵抗とヒートシンク材の熱伝導率の関係である。熱伝導率 500 W/mK 以上では熱抵抗が著しく低下しており、SiC をヒートシンクとして使用すれば効率的に熱抵抗を低減でき、Si に比べて熱抵抗を約 $1/2$ と

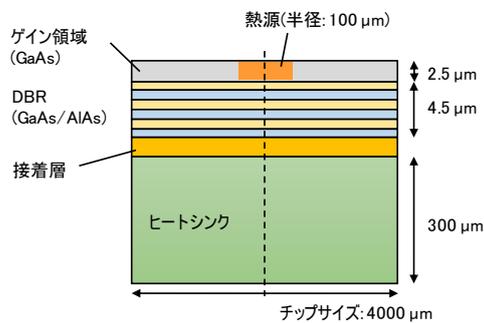
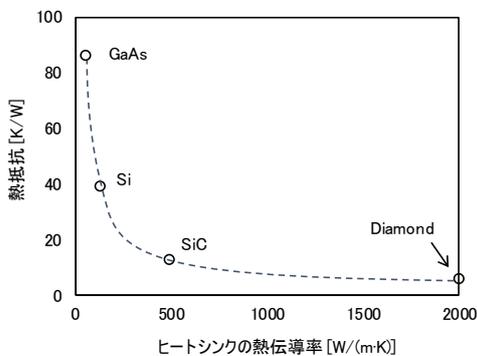
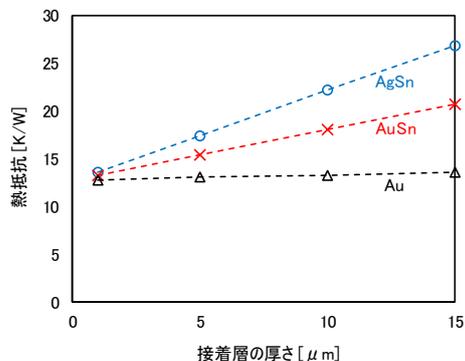


図 2 高出力半導体レーザの解析モデル



(a)



(b)

図 3 熱抵抗解析結果, (a)熱抵抗とヒートシンク材の熱伝導率の関係, (b)熱抵抗と接着層厚さの関係

できることがわかる。図 3(b)は、接着層 (はんだおよび Au) の厚さと熱抵抗の関係である。はんだには、光素子実装に用いられる AuSn (融点: 280°C) およびエレクトロニクス実装に用いられる AgSn (融点: 221°C) を用いた。ヒートシンク材は、SiC とした。はんだ (AuSn, AgSn) による接合では、はんだ厚さ $10 \mu\text{m}$ で約 $5 \sim 10 \text{ K/W}$ の熱抵抗増加がみられる。すなわち、発熱量 1 W のレーザを仮定すると活性層温度上昇量は $5 \sim 10^\circ\text{C}$ となる。半導体素子とヒートシンクの直接接合や薄い金属中間層を介した接合が放熱に有効である。

(2) 直接ウエハ接合

表面活性化接合法は、中性高速原子ビームやイオンビームなどの物理的衝撃やラジカルなどによる化学的処理を用いて、表面の酸化物や吸着物などの不活性な層を除去することにより活性化し、固体表面間に働く凝着力を利用して常温・低温で接合する技術である。本実験で使用した接合装置は、高真空チャンバ内に二つの高速原子ビーム源 FAB (Fast Atom Beam) を備えており、接合する 2 枚のウエハ試料表面に同時にアルゴン (Ar) の FAB を照射可能である。接合は以下の手順で行った。接合試料を真空チャンバ内に導入し、高真空に排気する。バックグランド真空度 $5 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ 以下になったところで、Ar FAB (電圧: 1.5 kV , 電流: 60 mA) を照射 (400 s) して表面を活性化する。活性化後に真空チャンバ内で速やかに荷重 (250 kgf) を印加 (300 s) して接合した。

接合には、CMP (chemical mechanical polish) 処理をした 2 インチの SiC (0001) ウエハ (ポリタイプ: 4H または 6H, 厚さ: $350 \mu\text{m}$) と 3 インチ GaAs (100) ウエハ (厚さ: $350 \sim 450 \mu\text{m}$) を使用した。

半導体ウエハの直接接合では、表面が接触した後の塑性変形によって接触面積が大きく拡大することは期待できないため、原子レベルでの表面の密着を実現するためには、接合材料表面が十分に平滑である必要がある。SiC および GaAs ウエハ接合試料がどの程度の表面粗さを持つのか、また Ar-FAB 照射により表面粗さがどのように変化するかを調べるために、原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope: AFM) で分析した。走査範囲: $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ での rms 表面粗さ (R_{rms}) は、GaAs: 0.45 nm , SiC: 0.22 nm であり、直接接合に十分な表面粗さである。一般に Ar-FAB 照射時間が長くなれば、それに伴い表面粗さも増大するが、 400 s 程度 Ar FAB を照射した時のそれぞれのウエハの表面粗さ (R_{rms}) は、GaAs: 0.40 nm , SiC: 0.39 nm であり、大きな表面粗さの増加は見られなかった。

図 4(a) は、接合した SiC (2 インチ)/GaAs (3 インチ) ウエハの写真である。SiC は比較的透明であるため、接合界面のボイド (未接合領域) の大きなものについては、肉眼でも

確認できる。この例ではパーティクルに起因すると思われるボイドが存在するが、ウェハ周辺を除く全面で接合可能である。

接合した試料の機械的特性は、引張試験機による接合強度評価を行った。まず、接合したウェハ試料をダイシングソーにより 10 mm 角に切断した。図 4(b)にダイシングした試料の写真を示す。ダイシングは、スピンドル回転数：20,000 rpm、送り速度：1 mm/sで行っており、接合界面はこのようなダイシングに耐えられる表面エネルギーを有すると考えられる。ダイシングした試料を真鍮製治具（断面 10 mm 角）に接着剤を用いて接着し、引張速度 0.1 mm/min で破断時の最大強度を測定した。平均 4.6 MPa の引張強度が得られた。破断面は、主に GaAs と SiC 接合界面であったが、一部 GaAs が SiC 側に移着している箇所も見られた。光学応用としては、

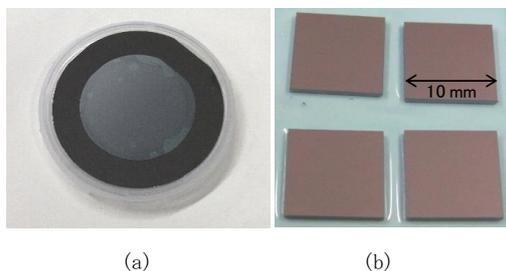


図4 接合試料の写真，(a)直接接合した GaAs (3 インチ) / SiC (2 インチ) / ウェハ試料，(b)ダイシングした GaAs / SiC 試料 (10×10 mm²)

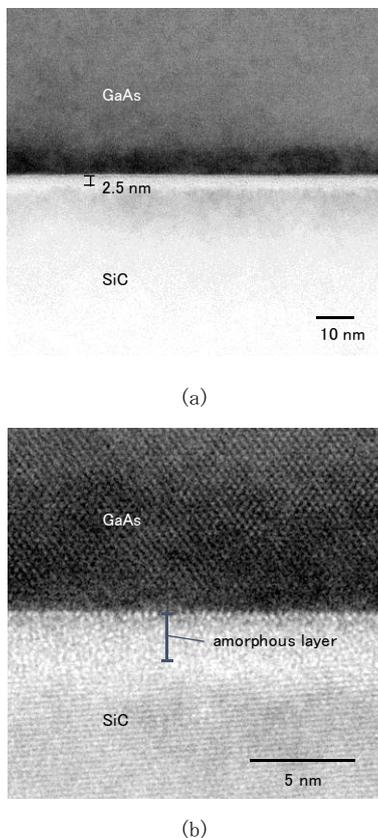


図5 表面活性化常温接合で形成した GaAs/SiC 界面の断面透過電子顕微鏡(TEM)像，(a)低倍率 TEM 像，(b)高倍率 TEM 像

十分な接合強度と考えられる。これまで、Ar-FAB により表面活性化接合した GaAs/Si の引張強度が 0.6 MPa と報告されており、これらと比較しても大きな値である。

接合界面の原子レベル微細構造観察には、加速電圧 300 kV 透過型電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope: TEM) を用いた。図 5 は、常温接合した GaAs/SiC 界面付近の透過電子顕微鏡による断面 TEM 像である。接合界面にボイドなどは観察されず、原子レベルでの接合が実現されていることがわかる。接合界面に厚さ 2.5 nm 程度の中間層が確認できる。この中間層では、結晶格子の像が消失しており、非晶質層 (アモルファス層) になっているものと考えられる。また、図 5(a)の接合界面から数十 nm の GaAs 領域に、コントラストが確認されるが、これは表面近傍の材料が弾性変形して密着が達成されたことによる残留ひずみによるものと考えられる。本研究の応用では、ゲイン領域は接合界面より 5 μm 程度離れているため (図 2)、この残留ひずみはレーザ特性に影響を与えないものと考えられる。

(3) Au 薄膜を介したウェハ接合

表面活性化接合技術は、半導体などの直接接合に限らず、任意の金属薄膜をウェハ表面に成膜することで、金属中間層を介した低温接合にも適用できる。特に、Au 薄膜を用いることで、大気中での接合が可能になる [5]。また、ウェハ表面にマグネトロンスパッタ法で微結晶 Au 薄膜を形成し、成膜直後に大気中、室温、低荷重で接合する原子拡散接合法が報告されている [6]。

例えば、接合するウェハに電子ビーム蒸着法により形成した薄い Ti (3 nm)/Au (30 nm) 薄膜を用いて、大気雰囲気下、常温、低荷重で接合することが可能である。一般に電子ビーム蒸着法等で厚さ数百 nm 程度の金属薄膜を形成すると粒界が成長し、表面粗さ (R_{rms}) は 1 nm を超えてしまうが、厚さ 50 nm 以下では、極めて平滑な表面が得られる。合成石英ガラスウェハ (R_{rms} : 0.19 nm) に Ti (3 nm)/Au (30 nm) 薄膜を電子ビーム蒸着した表面の表面粗さは (R_{rms}) は、0.43 nm 程度であり固相接合に十分平滑な表面が得られた。また、成膜から長時間大気暴露した Au 薄膜は表面エネルギーが低下し、接合強度が低下するが、このような場合には Ar 高周波プラズマ処理による活性化が有効であった。成膜後 2000 時間大気暴露した Au 薄膜付ウェハの接合では、ブレード挿入試験 (クラック・オープニング法) による接合エネルギーは、0.05 J/mm² と極めて小さな値であったが、Ar 高周波プラズマ処理 (100 W, 30 s) したウェハでは、ブレードの挿入が困難であった。図 6 に接合の様子を示す。Au 成膜後 2000 時間大気暴露したウェハに Ar 高周波プラズマ処理したウェハどうしを重ね合わせた。薄い空気層で浮いているが、ピンセット等で軽く加圧すると接合領域が自発的に広がり、お

よそ 0.5 秒でウェハ全面の接合が完了する様子が観察された。ダイシエア試験では 50~70 MPa 程度のシエア強度が得られ、破断は合成石英の母材からであった。図 7 は Au-Au 接合界面の TEM 像である。大気中の接合であっても原子レベルで接合されていることが確認できる。

本技術を GaAs と SiC ウェハの接合に適用した。図 8 (a)に接合したウェハの走査型超音波顕微鏡(Scanning Acoustic Microscope : SAM)像を示す。SAM 像からはパーティクルに起因すると考えられるボイドが見られる

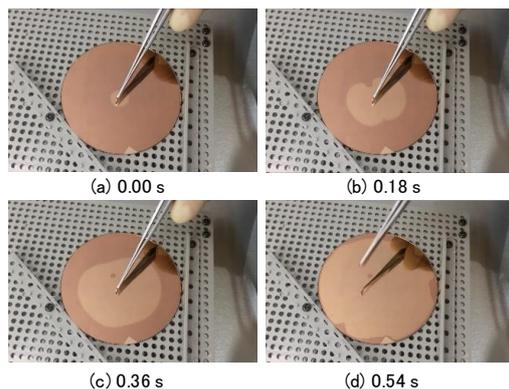


図 6 Au-Au 表面活性化接合 (大気中, 常温) において接合領域が広がる様子 (成膜後の大気暴露時間:

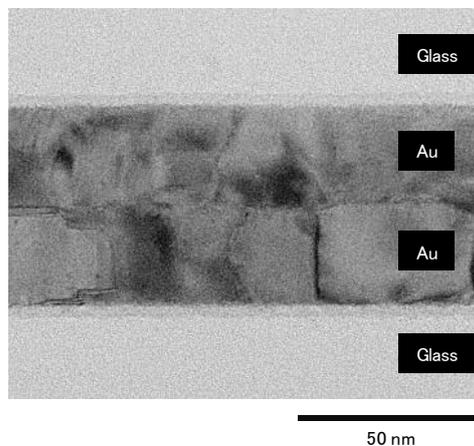


図 7 Au-Au 表面活性化接合 (大気中, 常温) で形成した Au (30 nm)-Au (30 nm) 接合界面の断面透過電子顕微鏡 (TEM) 像

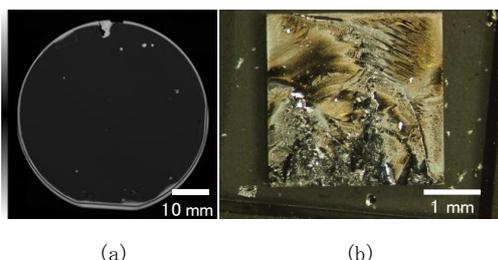


図 8 GaAs ウェハと SiC ウェハの Au-Au 表面活性化接合 (大気中, 常温), (a) 走査型超音波顕微鏡 (SAM) 像, (b) GaAs/SiC チップ (3 mm 角) のダイシエア試験後の破断面写真 (SiC 側)

が, ウェハ全面で接合されていることが確認できる。接合したウェハは 3 mm 角のチップ

にダイシングし, ダイシエア試験による強度評価を行った。ダイシエア強度は 10 MPa 前後であった。図 8(b)に SiC チップ側 (3 mm 角) の破断面写真を示す。GaAs の母材から破断が起きており, Au-Au 接合界面からの剥離は観察されなかったため, 十分強固に接合されていることがわかる。すなわち, 平滑な Au 薄膜を用いることで, 常温, 低荷重, 大気雰囲気での強固な接合が可能である。

以上, 表面活性化を用いた常温直接ウェハ接合および薄い Au 薄膜 (厚さ: 50 nm 以下) を介した大気中常温ウェハ接合により半導体素子の高放熱構造を実現した。格子定数や熱膨張係数の異なる異種材料の集積化では, 低温接合技術がキーテクノロジーである。

<引用文献>

- [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] Z. L. Liao, "Semiconductor wafer bonding via liquid capillarity," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 77, No. 5, pp. 651-653, 2000.
- [4] <http://mmc.la.coocan.jp/mems-one/>
- [5] 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 Photon. Tech. Lett.*, Vol. 19, No. 24, pp. 1994-1996, 2007.
- [6] 今一恵, 魚本幸, 島津武仁, "Au 薄膜を用いた大気中ウェハ室温接合における大気暴露時間と接合性能," *エレクトロニクス実装学会誌*, Vol. 17, No. 5, pp. 431-435, 2014.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 21 件)

- ① Eiji Higurashi, Michitaka Yamamoto, Takeshi Sato, Tadatomo Suga, and Renshi Sawada, Room-temperature gold-gold bonding method based on argon and hydrogen gas mixture atmospheric-pressure plasma treatment for optoelectronic devices integration, *IEICE Transactions on Electronics*, 査読有, vol. E99-C, no. 3, pp. 339-345, 2016, DOI:

- 10.1587/transele.E99.C.339.
- ② Eiji Higurashi, Ken Okumura, Kaori Nakasuji, and Tadatomo Suga, Surface activated bonding of GaAs and SiC wafers at room temperature for improved heat dissipation in high-power semiconductor lasers, *Japanese Journal of Applied Physics*, 査読有, vol. 54, no. 3, 030207, 2015, DOI: 10.7567/JJAP.54.030207.
- ③ 日暮栄治, 須賀唯知, 高出力半導体素子における高放熱構造を実現するウェハ常温接合技術, *エレクトロニクス実装学会誌*, 査読無, vol. 18, no. 7, pp. 463-468, 2015, DOI: 10.5104/jiep.18.463.
- ④ 日暮栄治, 須賀唯知, 低温接合技術と光エレクトロニクスデバイス応用に関するレビュー, *電気学会論文誌E (センサ・マイクロマシン部門誌)*, 査読有, vol. 134, no. 6, pp. 159-165, 2014, DOI: 10.1541/ieejsmas.134.159.
- ⑤ Ken Okumura, Eiji Higurashi, Tadatomo Suga, and Kei Hagiwara, Low-temperature GaAs/SiC wafer bonding with Au thin film for high-power semiconductor lasers, 2014 International Conference on Electronics Packaging (ICEP), 査読有, pp. 716-719, 2014, DOI: 10.1109/ICEP.2014.6826773.
- ⑥ Ken Okumura, Eiji Higurashi, Tadatomo Suga, and Kei Hagiwara, Room-Temperature Wafer Bonding With Smooth Au Thin Film in Ambient Air Using Ar RF Plasma Activation, 2014 4th IEEE International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTB-3D), 査読有, p. 26, 2014, DOI: 10.1109/LTB-3D.2014.6886165.

[学会発表] (計 24 件)

- ① Eiji Higurashi, Yutaka Kunimune, and Tadatomo Suga, Room-temperature wafer bonding using Al/Ti/Au layers for integrated reflectors in the ultraviolet spectral region, *The 66th Electronic Components and Technology Conference (ECTC 2016)*, June 2, 2016, Las Vegas, Nevada USA.
- ② 奥村拳, 日暮栄治, 須賀唯知, 高出力発光ダイオードの高放熱化のための超平滑な金薄膜を介した常温接合, 2016 年度精密工学春季大会学術講演会, 2016 年 3 月 17 日, 東京理科大学野田キャンパス (千葉県野田市) .
- ③ 日暮栄治, 常温接合技術の最新動向と光

デバイス応用, 電子情報通信学会 2015 年ソサイエティ大会, 2015 年 9 月 8 日, 東北大学川内北キャンパス (宮城県仙台市) .

- ④ 奥村拳, 日暮栄治, 須賀唯知, 萩原啓, 高出力光デバイス応用をめざした Ar 高周波プラズマ活性化処理による金薄膜を介したウェハ常温接合, 2015 マイクロエレクトロニクスショー・アカデミックプラザ, 2015 年 6 月 4 日, 東京ビッグサイト (東京都江東区) .
- ⑤ 日暮栄治, 奥村拳, 須賀唯知, 高出力デバイス応用をめざした常温ウェハ接合, 第 29 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, 2015 年 3 月 17 日, 東京大学本郷キャンパス (東京都文京区) .
- ⑥ 奥村拳, 日暮栄治, 須賀唯知, 萩原啓, Ar 高周波プラズマ活性化処理による金薄膜を介したウェハ常温接合, 第 31 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム (電気学会 センサ・マイクロマシン部門主催), 2014 年 10 月 21 日, くにびきメッセ(島根県松江市) .
- ⑦ 奥村拳, 日暮栄治, 須賀唯知, 萩原啓, 高出力半導体レーザの高放熱化のための金薄膜を介した GaAs/SiC ウェハの低温接合, 第 28 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, 2014 年 3 月 5 日, 拓殖大学文京キャンパス (東京都文京区) .
- ⑧ 日暮栄治, 中筋香織, 須賀唯知, 高出力半導体レーザの高放熱構造をめざした GaAs/SiC 常温接合に関する研究, 第 30 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム (電気学会 センサ・マイクロマシン部門主催), 2013 年 11 月 5 日, 仙台国際センター (宮城県仙台市) .

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.su.t.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

日暮 栄治 (HIGURASHI Eiji)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号: 60372405