

# 常温接合を用いたレーザ結晶と金属ホルダとの原子レベル接合

## Atomic bonding of a laser crystal and a metal holder by use of room-temperature bonding

電気電子情報通信工学専攻 松井 鵬樹

16N5100055L Tomoki MATSUI

### 1. 研究背景, 研究目的

固体レーザにおいて高出力のレーザ光を得るためには高出力の励起が必要である。しかし、高出力で励起し続けると、レーザ結晶が発熱する。レーザ結晶自身の熱が高くなるにつれて、熱レンズ効果や熱複屈折性によって、レーザの効率やビーム品質が低下してしまう。更に熱を溜め続けると、熱破壊の原因となる。これらのことから、固体レーザの高出力化を目指す上で排熱効率の向上が求められてくる。この発熱の問題の解決策として、レーザ結晶の排熱を目的としたホルダ構造がある。通常、レーザ結晶を銅のホルダに固定する際には、間にインジウムを挿入するが、インジウムの熱伝導率は $81.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ と、銅の $401 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (表1[1])に比べて低く、また銅とインジウムとの密着性が悪いと隙間には空気が混入しうる。したがって、レーザ結晶からの排熱においてインジウム部分が熱抵抗となる可能性がある。

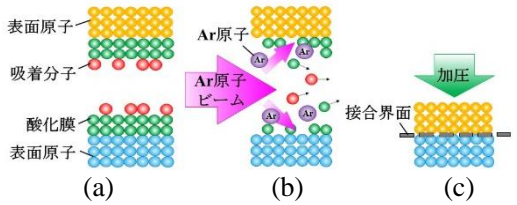
表 1 熱伝導率

材料	熱伝導率(W/(m・K))
YAG	10.0
Cu	401
Ag	429
In	81.6
Air	0.0241

そこで本研究では、レーザ結晶であるYAGと銅とを常温接合法により直接接合することで、排熱効率のより高いレーザを作製することを目的とする。

### 2. 常温接合法

本研究において、レーザ結晶であるYAGと銅との直接接合には常温接合法[2]を用いた。ここで、常温接合法の原理について説明する。まず、高真空中で、試料の接合面にアルゴン原子ビームを照射する(図1(b))。試料の接合面にアルゴン原子ビームが照射されると、接合面の酸化膜や吸着分子などが取り除かれ、表面が活性化された状態となる。その後、活性化された試料同士を接触させ、加圧することで接合する(図1(c))。これにより、原子レベルでの接合が可能となる。



従来、レーザデバイスの作製には拡散接合が使われてきたが、高温プロセスを含むため、熱膨張係数の異なる材料同士の接合は困難であった。それに対し、常温接合法は常温で接合を行うため高温プロセスが存在せず、熱膨張係数の異なる材料同士でも接合することができるというメリットがある。今回、接合に使用した材料の熱膨張係数を表2に示す。YAGの線膨張係数は $8.0 \times 10^{-6} / \text{K}$ であるのに対し、銅の線膨張係数は $16.8 \times 10^{-6} / \text{K}$ と、約2倍線膨張係数が異なる。したがって、熱膨張係数の異なる材料同士の接合が可能な常温接合法を用いることで、高品質なホルダ構造が作製できる可能性があると考えた。

表 2 線膨張係数

材料	線膨張係数( $\times 10^{-6}/K$ )
YAG	8.0
Cu	16.8
Ag	18.9

### 3. YAG と銅との直接接合

まず、我々は YAG(2.5 mm $\times$ 3.5 mm $\times$ 3.0 mm)と銅(2.5 mm $\times$ 3.5 mm $\times$ 3.0 mm)との直接接合を行った。今回は原理実験のため、無添加 YAG を使用した。また、通常のホルダ構造は YAG の周りを囲むようにして作製するが、今回は YAG の 1 つの面に対してのみ接合を行った。

常温接合法を用いた YAG と銅との接合に成功したものの、試料の接合界面には図 2 のように干渉縞が見られた。



図 2 干渉縞

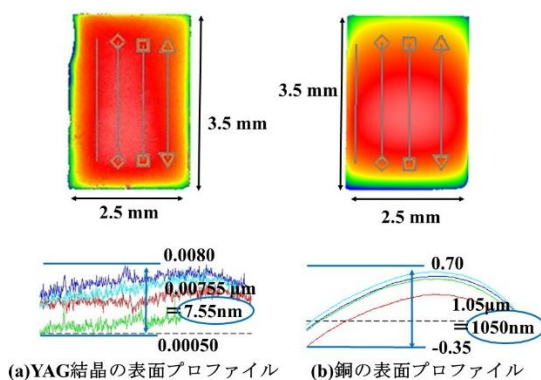


図 3 YAG と銅の表面プロファイル

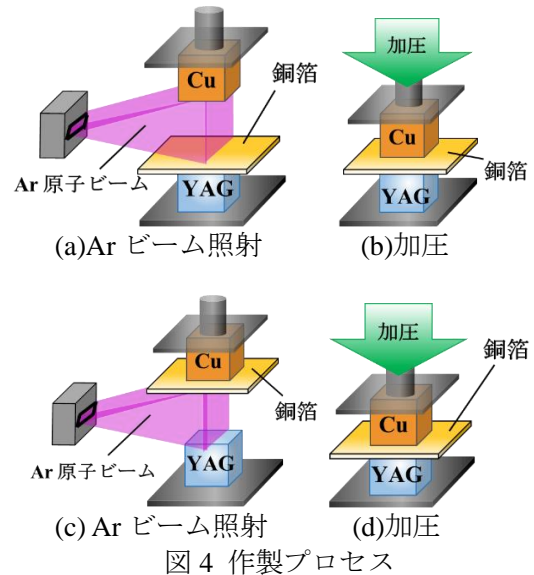
図 3(a)を見ると、YAG の表面の高低差が 7.55 nm と平坦性が高いことが分かる。それに対して、銅の研磨は YAG の研磨よりも困難なため、表面平坦性が悪く、銅箔の表面の高低差が 1.05  $\mu$ m もある(図 3(b)).

したがって、YAG と銅は面全体ではなく、一部分での接合となってしまう、YAG と銅との間に隙間が生じてしまったと考えられる。排熱効率を向上させるためには、YAG と銅との密着性を高める必要があると考えた。

### 4. 銅箔を介した新規構造

YAG と銅との間の隙間を小さくするために、YAG と銅との間に銅箔を介して常温接合を行う方法を新たに考案した。接合時に試料を加圧する際、銅箔が展性によって YAG と銅との間の隙間を埋めるように変形することが期待される。両面研磨した銅箔(10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 20  $\mu$ m)を用い、常温接合を行った。

ここで、新規構造の作製プロセスを説明する。まず、YAG の上に銅箔を置き、銅と銅箔とを常温接合で直接接合する(図 4(a)). この加圧の際に、銅箔の YAG と接触している面が展性により、YAG の表面の形に変形すると期待される(図 4(b)). その後、接合した銅と銅箔を引き上げ、銅箔と YAG との常温接合を行う(図 4(c),(d)).



今回我々は、図 5 に示すように銅箔を介した YAG と銅との常温接合に初めて成功した。

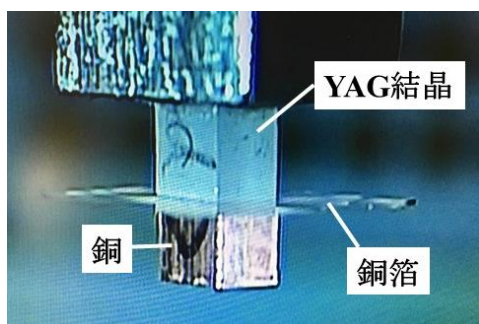


図 5 作製した新規構造

## 5. 排熱効率評価

作製した新規構造に対して排熱効率の評価を行った。比較として YAG と銅とを常温接合したもの、従来のホルダの構造である YAG と銅との間にインジウムシート(厚さ 0.5 mm)を挿んだものを用意した。

排熱効率測定方法を以下に示す。まず、ペルチェ素子によって加熱用の銅板を 60℃ にし、その上に試料を置き、試料を置いた直後から試料最上部の銅にどのくらいの時間で熱が伝わるのか、最上部の銅に熱電対を接触させ、温度を測定した(図 6)。試料を置いた瞬間を 0 秒とし、5 分間測定を行った。測定結果を図 7 に示す。

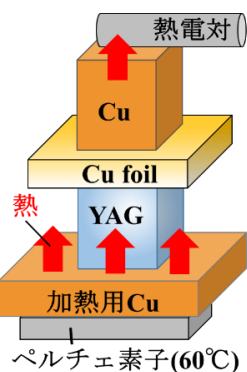


図 6 排熱効率評価方法

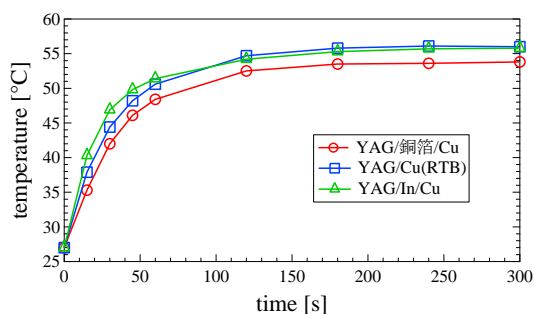


図 7 排熱効率測定結果

測定の結果、インジウムを挿んだ構造 (YAG/In/Cu)が最初の温度の立ち上がりが最も良く、最終到達温度も高いという結果になった。対して、新規構造は最も効率が悪いという結果になった。

このような結果となってしまった原因として 2 つ考えられる。1 つ目は、銅箔の展性が YAG と銅との隙間を埋めるまでに至っていないために、銅箔と YAG の接合界面に大きな干渉縞ができてしまったということである。2 つ目は、銅箔の表面の平坦性が悪いということである。銅箔の表面プロファイル(図 8)を見てみると、9.0  $\mu\text{m}$  の高低差があり、平坦性が悪いことが分かる。また、銅箔の表面の Ra(平均粗さ)が悪いため、干渉縞が生じていない接合されている部分の品質も YAG と銅との直接接合より悪いと考えられる。

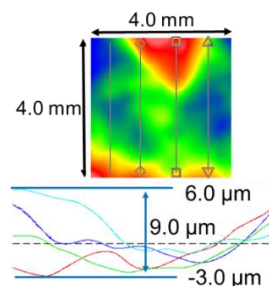


図 8 銅箔の表面プロファイル

## 6. 銀箔を介した構造の提案

そこで、銅箔の代わりに銀箔を用いることにした。銀は融点が高く、熱伝導率が金属の中で最も高いのに加え、展性が銅よりも大きい。したがって、銅箔以上に YAG と銅との間の隙間を埋めるように変形することが期待できる。

まず我々は、銅箔と銀箔の表面に銅を押し当てることで、箔の表面がどのくらい変形するのかを確かめた。表 3 に示すように、銀箔の変化量が大きく、展性が高いといえる。

表 3 展性評価

	加圧前	加圧後	変化量
銅箔	10.0 $\mu\text{m}$	9.4 $\mu\text{m}$	-0.6 $\mu\text{m}$
銀箔	37.9 $\mu\text{m}$	36.5 $\mu\text{m}$	-1.4 $\mu\text{m}$

続いて、接合を行う前に、YAG と銅の間に銀箔を介して密着させただけのもの(YAG /銀箔/Cu)、銅箔(厚さ 20  $\mu\text{m}$ )を介して密着させたもの(YAG /銅箔/Cu)、インジウムシート(厚さ 0.5 mm)を介して密着させたもの(YAG /In/Cu)、YAG と銅を密着させたもの(YAG /Cu)の4つで熱の伝わり方を比較した。図 9 に示すように、温度上昇が早くかつ到達温度が高いのは、銀箔を介したものであった。したがって、銀箔を用いることにより、従来よりも排熱効率が高く実用性の高いホルダ構造を実現できる可能性がある。

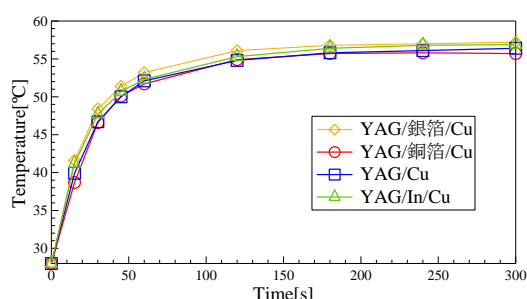


図 9 熱伝導性評価

## 7. 銀箔を介した接合

排熱効率評価後、両面研磨した銀箔(厚さ 20~40  $\mu\text{m}$ )を介した YAG と銅との常温接合を行った結果、図 10 に示すように、銅と銀箔との接合に成功した。しかし、YAG と銀箔との接合は接合成功条件が未だ分からず、成功には至っていない。

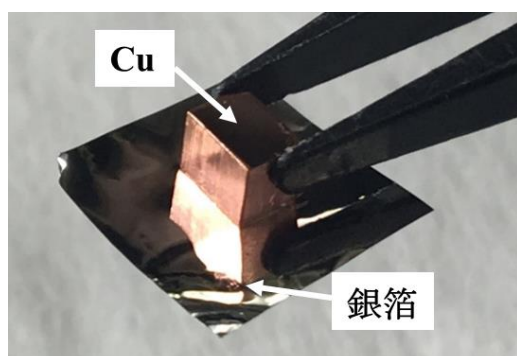


図 10 接合した銅と銀箔

## 8. 総括

従来のレーザ結晶と銅との間にインジウムを挿んだ構造よりも排熱効率の高いホルダ構造の作製を目指した。

今回、無添加 YAG と銅との直接接合と YAG と銅との間に銅箔を介しての常温接合に成功した。しかしながら、排熱効率はインジウムを介したものが最も良いという結果であった。改善策として銀箔を用いてホルダ構造を作製することにした。熱の伝わり方を比較した結果、銀箔を介したものが最も良いと分かった。また、両面研磨した銀箔と銅との常温接合には成功したものの、YAG との接合には成功していない。今後は YAG の接合面に銀を蒸着することで、YAG と銀箔との接合を目指す。加えて、作製したホルダ構造に対して、排熱効率評価を行う。

## 謝辞

本研究に取り組むにあたり、指導教官である中央大学庄司一郎教授には、本研究の全てにわたって親身のご指導を頂き、深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1]T. Taira, *et al.*, Opt. Express, **14**, 10528 (2006).
- [2]T. Suga, *et al.*, Acta metall, mater, **40**, S133-S137 (1992).
- [3]高柳幸之助, 修士論文, 大学院理工学研究科 (2011).

## 研究業績

### 国内外学会発表

- [1]松井 鵬樹, 勝又 紳, 庄司 一郎, レーザ学会学術講演会第 37 回年次大会講演, 2017年1月, 徳島 (B608pV05).
- [2]Tomoki Matsui, Shin Katsumata, and Ichiro Shoji, CLEO Pacific Rim2017, August 2017, Singapore (P1-031).
- [3]松井 鵬樹, 若松 将吾, 庄司 一郎, 第 78 回応用物理学会春季学術講演会, 2017 年 9 月, 福岡 (5p-C14-10).

### 共著

- [1]安達 亮次, 松井 鵬樹, 庄司 一郎, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016 年 3 月, 東京 (21a-S611-3).