

太陽光励起半導体レーザーの研究

Research on a Solar-Pumped Laser Diode

総合技術研究本部 高度ミッション研究センター 藤田和久*

Kazuhisa Fujita*, Advanced Mission Research Center

Abstract

Aiming at realization of a solar-pumped laser diode, experimental examination was performed from a viewpoint of energy transportation. It turns out that photo luminescence excitation was measured after checking the activity layer function from the fluorescence characteristic, and the absorption energy in a waveguide has contributed to luminescence most from an active layer. While advancing improvement in transportation from an indispensable cladding layer, employing this characteristic efficiently, it is necessary to advance examination of the structure which promotes still more spatial carrier concentration.

1. はじめに

レーザーを用いた宇宙エネルギーシステムにおいて、太陽光エネルギーを伝送形態であるレーザー光に変換するシステムとして太陽光励起レーザーが検討されている。電気エネルギーを介さずに光-光変換を直接行うことで、よりシンプルで軽量のシステムを構築することができる可能性があるからである。

レーザー材料に半導体を用いる方式は、固体材料に比してさらに格段に軽くできる可能性から 2002 年より旧航空宇宙技術研究所の LE-NET グループで調査、試作研究を開始して現在に至っている。この太陽光励起半導体レーザーは、太陽光をレーザー光に直接変換する半導体素子であり、太陽電池と半導体レーザーが一体化したものであるというのがわかりやすいイメージである。材料や構造に関する設計提案は米露で 90 年代初頭にあったが、発振はもとより試作報告もなく研究としては初期の段階にある。

半導体材料による太陽光励起レーザーの特徴は、システム面では極めて高い出力重量比である。電気駆動型の高出力半導体レーザーの実績からは、チップのみで MW/kg レベルの出力重量比が実現されている。これを太陽光励起型でどこまで実現できるか、冷却も含めたシステム重量がどこまで抑制できるかが課題であろう。

レーザーとしての特徴は、半導体の利用に起因するその機能・性能の制御性の高さである。長距離かつ大気中の伝送特性を考慮してレーザー波長は近赤外領域が適当とされており、これに対応する現有的高出力半導体レーザー材料には AlGaAs 系がある。この 3-5 族混晶系の材料は、Al と Ga の混晶比により禁制帯エネルギーの制御が可能であり、太陽光の吸収からレーザーの発振までの過程における最適な構造を構築することのできるツールとなり得ることが魅力である。さらにこの制御性は、既に CD プレーヤーのピックアップ用素子などに発現している成熟した技術の上であり、それをいかに使いこなして目的を達成するかという状況にある。

これまで、基本構造に関する禁制帯構造の最適化に関する検討[1]と権利化、電流駆動型の半導体レーザーの単色光励起による発振実証などを進めてきた。平成 15 年度では、太陽光の吸収からレーザー発振に至るエネルギーの輸送に関する知見を得るため、試作したいくつかの構造を持つ半導体チップに対する光学的特性について検討を行った。

2. 研究概要

図1に既存の電流駆動型半導体レーザーの構造をベースにした太陽光励起半導体レーザーの基本構造を示す。広く実用化されている電流駆動型の半導体レーザーは図のような禁制帯構造を持っており、図の左右に電極をつないで大量の電流を注入している。一方から電子、他方から正孔を注入して中央にある活性層と呼ばれる谷のところで両キャリアを閉じこめて再結合発光・誘導放射を行わせ、紙面垂直方向のチップ両端面を共振器ミラーとして紙面垂直方向にレーザー光が出力される。クラッド層・導波路層による禁制帯の谷構造は、屈折率に関しては逆に山構造となるためレーザー光の閉じ込めにも寄与し、活性層からの発光が導波路層内に閉じ込められて出力方向に導かれる機能を与えている。活性層では効率のよい量子井戸がよく用いられる。

太陽光励起型では、これをベースにしたいくつかの提案がなされている[1]。電流駆動型との最大の違いはキャリア注入法であり、片面（図中左側）から照射された光の吸収による電子・正孔対の生成である。禁制帯エネルギーより大きい光子エネルギーを持つ光が強い吸収をうけることとなり、AlGaAs 結晶では可視光領域においてミクロン程度以下の吸収長である。半導体レーザーチップの深さは数ミクロン程度が一般的であり、素子内ではほぼ吸収できることが考えられる。生成された電子と正孔は、拡散過程を主としてポテンシャルの低い方へと輸送され、活性層への閉じ込めと再結合発光、レーザー発振に至る。この①吸収、②キャリア輸送、③レーザー発振のそれぞれの過程のメカニズムについてよく理解し、制御することが必要である。

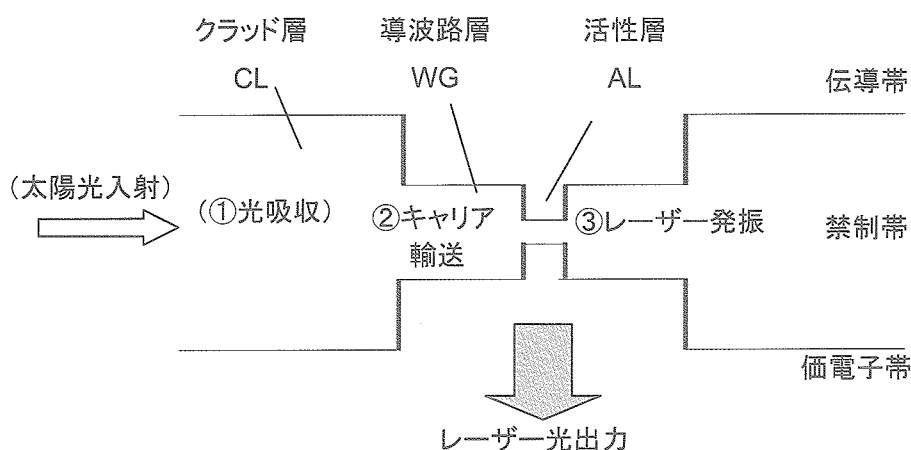


図1 (太陽光励起) 半導体レーザーの基本構造

そこで、光吸収からキャリア輸送を通してレーザー発振に至る過程に対して素子構造の及ぼす影響を調べるために、電極の付いていない光照射が可能な半導体レーザーチップに対して蛍光特性を計測した。表1に試作した2種類の半導体チップの仕様を示す。クラッド層、導波路層、活性層の材料と厚さ及び禁制帯エネルギーとそれに対応する波長が書かれている。チップは図1にあるような左右対称（チップ深さ方向でいう上下対称）構造である。この基本構造を最適化するためには、3層それぞれの材料（AlとGaの混晶比）と厚みをパラメータとして大変多くの条件に対する検討をする必要がある中、導波路層の禁制帯エネルギーの差異に対する検討から始めることとし、表1の仕様設定を行った。活性層にはInGaAs量子井戸を採用した。

表1 試作した2種類(H-WG, L-WG)の半導体チップの仕様

Layer	Material	H-WG 9081				L-WG 9151			
		Thickness (nm)	x	Eg (eV)	(nm)	Thickness (nm)	x	Eg (eV)	(nm)
クラッド層	Al(x)Ga(1-x)As	1000	0.70	2.40	517	1000	0.70	2.40	517
導波路層	Al(x)Ga(1-x)As	400	0.60	2.23	556	400	0.45	2.00	621
活性層	In(x)Ga(1-x)As	10	0.22	1.11		10	0.22	1.11	

試作チップの評価には、蛍光 (PL: photo luminescence) と蛍光励起強度 (PLE: photo luminescence excitation) の計測を利用した。図2(a)にPL測定の設定アップ概略図を示す。試料のチップに波長632.8nmのHe-Neレーザーを照射してその蛍光を分光観測するものである。目的は活性層の蛍光スペクトルが期待されるレーザー波長970nm付近にのみ現れるかどうか、活性層の機能を確認することである。図2(b)にPLE測定の設定アップ概略図を示す。Xeランプを光源とし分光器を通した単色光をサンプルに集光照射して、その蛍光強度を赤外領域に限り観測するものである。PL測定にて蛍光がレーザー発振波長である970nm付近のみにあることが確認できれば、ここでの観測光は970nmの蛍光のみとすることができる。照射単色光の波長を近赤外から紫外領域までスキャンしながら蛍光強度を測定し、どの照射波長成分がレーザー発振波長の蛍光に寄与しているかを明らかにし、吸収・輸送・発光の3プロセスについての理解を進めることを目的としている。

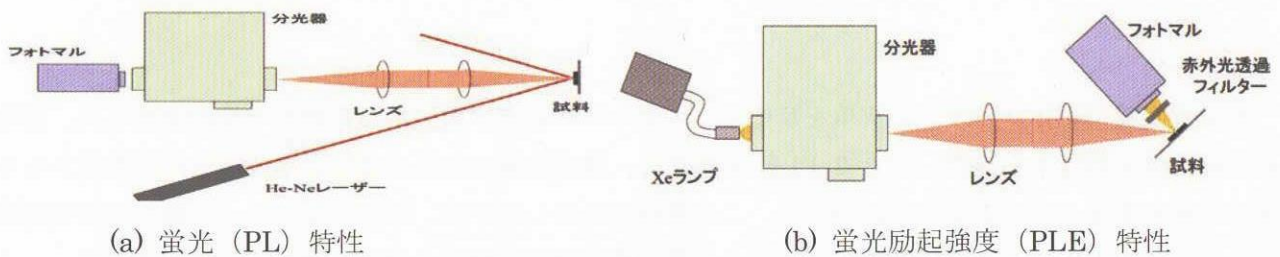


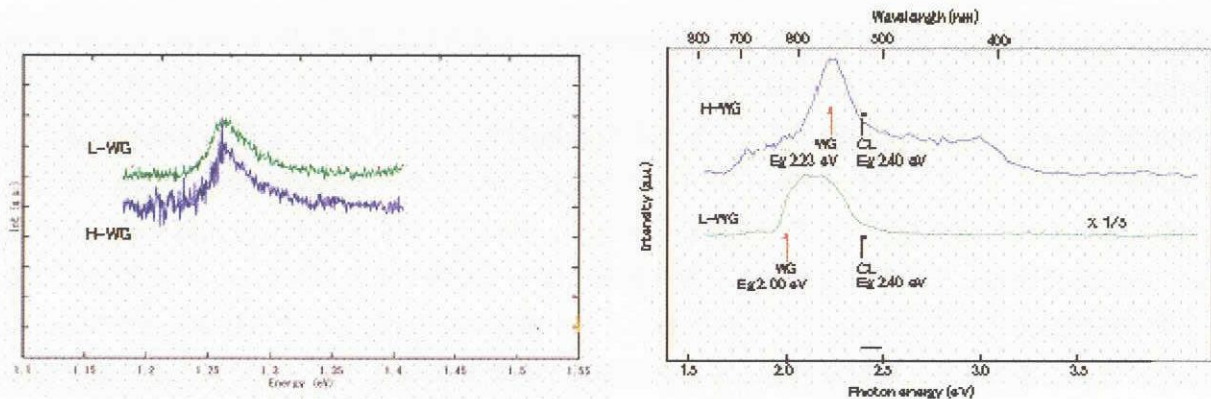
図2 評価セットアップ概略図

3. 成果概要

図3(a)にPLスペクトルを示す。いずれの試料も970nm(1.27eV)付近にのみ蛍光が見られ、InGaAs活性層が正常に機能していることを示している。図3(b)にPLEスペクトルを示す。各試料のクラッド層及び導波路層の禁制帯幅の位置(直接遷移によるもの)も同時に示してある。いずれの試料もクラッド層と導波路層の禁制帯幅の間付近に強い蛍光強度が見られ、その両側では強度が低くなっている。クラッド層の禁制帯幅より大きい光子エネルギーの照射で蛍光強度が低く、クラッド層で吸収を受けたと見られるこの波長領域の照射光エネルギーは活性層からの発光にあまり寄与していないことがわかる。導波路層の禁制帯幅より小さい光子エネルギーの照射で蛍光強度が低いのは、吸収自体が小さいからと考えられる。導波路層の禁制帯幅付近で蛍光強度が強いことから、導波路層内で吸収された光子エネルギーが最も効率よく活性層からの発光に寄与していることがわかる。この傾向は、L-WGの場合に特に

顕著に見られる。H-WG の場合は、導波路層の直接遷移禁制帯幅よりも小さいところで依然強い蛍光が観測されている。H-WG では導波路層の Al の混晶比が 0.7 と大きくこのとき最小禁制帯幅は間接遷移の 2.05 eV となる。直接遷移の禁制帯幅 2.23 eV との間では間接遷移に起因する比較的弱い吸収が存在するために蛍光に寄与しているものと考えられる。L-WG の Al 混晶比 0.45 では、禁制帯幅は直接遷移で 2.00 eV、間接遷移で 1.98 eV と近接しているため、H-WG で見られた直接遷移の禁制帯幅以下の蛍光はほとんど見られないものと考えられる。

クラッド層での吸収よりも導波路層での吸収が活性層からの発光に寄与していることがわかった。クラッド層からの輸送を改善することも必要であるが、レーザー光の閉じ込め性能を損なわない範囲でクラッド層を薄くしなるべく多くの光を導波路層に吸収させる工夫が必要であると考えられる。



(a) PLスペクトル

(b) PLEスペクトル

図3 計測結果

4. まとめ

太陽光励起半導体レーザーの実現を目指し、エネルギー輸送の観点から実験的な検討を行った。活性層機能を蛍光特性から確認した上で PLE を測定し、導波路層における吸収エネルギーが活性層からの発光に最も寄与していることがわかった。この特性を生かしながら、不可欠なクラッド層からの輸送向上を進めるとともに、さらに空間的なキャリア集中を促進する構造の検討を進める必要がある。

5. 謝辞

蛍光等の測定にご協力頂いた早稲田大学材料技術研究所の小林正和教授に謝意を表す。実験結果について有益な議論をして頂いた大阪大学の山中正宣博士、浜松ホトニクスの方田浩一氏、三菱重工業の方塚博誠博士、レーザー技術総合研究所の方河裕之博士に謝意を表す。

6. 参考文献

[1] K.Fujita, et al., Materials Science Forum, 423-425, 807 (2003).

*日本学術振興会 科学技術特別研究員 *Domestic Research Fellow from Japan Society for Promotion of Science.