

太陽光駆動レーザーの研究

電子工学科光エレクトロニクス講座 龍満 知秀

指導教官

植田 憲一 教授

第1章 序論

現在、主要なエネルギー源として使用されている化石燃料は、無限ではない。代替エネルギーとして研究・開発が行われているものの中に、太陽光エネルギーがある。太陽光をエネルギー源として利用する方法には、光起電力効果を用いた太陽電池や、太陽熱発電などがあるが、今回は太陽光よりも高品質な光といえるレーザーに変換することについて考えたいと思う。

しかし、それには問題がある。その一つが、太陽光の特徴でもある紫外から遠赤外に至るほど広いスペクトルである。もう一つの問題が密度の低さにある。地球に降り注ぐ太陽光の総エネルギーは、 $1.7 \times 10^{14} \text{kW}$ に達するほど巨大なものであるが、そのエネルギー密度は高くとも $1 \text{kW} / \text{m}^2$ ($100 \text{mW} / \text{cm}^2$) ほどにしかない。従って、現在のところは、必要な光強度を得られるまで集光を行わなければならない。

これらの問題を解決するためには、単純に言えばエネルギー密度を向上させればよい、そこで本研究では、太陽光を用いたレーザーを、集光を行わずに得るにはどうすればよいかについて、エネルギー密度の変化という面から論じ、エネルギー密度の変化とパワー圧縮について考えたいと思う。

第2章 太陽光励起ファイバーレーザー

励起光源に太陽光を用いることが出来れば、これまでのレーザー装置の中で最も小型化、軽量化、そして簡略化されたレーザー装置が出来、更に、身近に手頃なエネルギー源を得ることが困難な宇宙空間でもレーザーという高エネルギーを、得ることが出来るのではないだろうか。そのために、本章において太陽光による直接励起レーザーについて考えたいと思う。

2.1 光増幅の原理

レーザー発振は、利得と損失によって決まる。4準位レーザーの2準位間（レーザー発振上準位と下準位）について考える。定常状態における増幅の基本的な関係は

$$\text{増幅の基本方程式} \quad \frac{\partial I}{\partial z} = \left(\frac{g_0}{1 + I/I_s} - a \right) I \quad \dots (2-1)$$

$$\text{上準位の分布密度} \quad \frac{\partial n_2}{\partial t} = R_p - \left(\frac{SI}{h\nu} + \frac{1}{t} \right) n_2 \quad \dots (2-2)$$

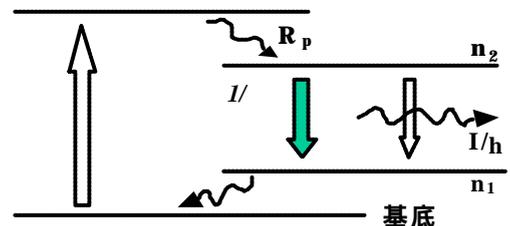
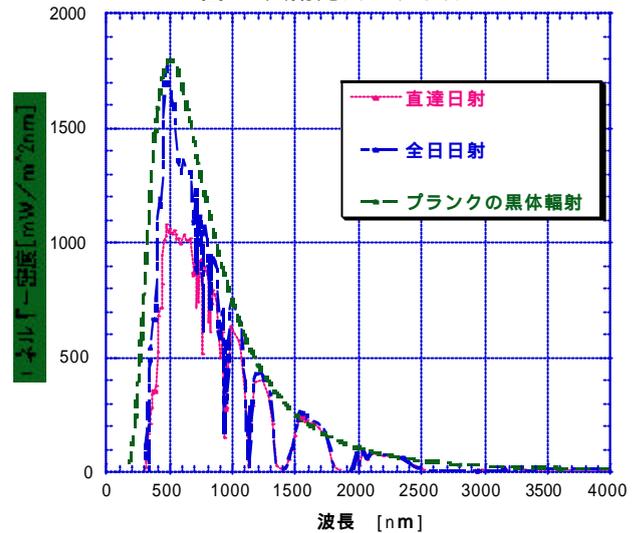
(I : 光子場の強度 I_s : 飽和光強度 g_0 : 利得係数 a : 損失係数 n_2 : 上準位分布密度 R_p : ポンプ率 S : 誘導放出断面積 t : 蛍光寿命) となる。

レーザー媒質からエネルギーを引き出せる割合は、式(2-1)で表されるので、

$$I = I_s \left(\sqrt{\frac{g_0}{a}} - 1 \right) \quad \dots (2-3)$$

となり、レーザー出力が最大の引き出し効率を持つ条件は、 g_0/a で決められる。

図1. 太陽光スペクトル



2.2 ファイバーレーザーの利点と太陽光励起の問題点

式(2-3)より、損失係数を小さくすることで発振できると判断できる。そこで、その影響の少ないファイバーならば、損失係数を他の形式に比べて、きわめて小さくできる。励起光の強度がきわめて低い太陽光励起に、損失の低いファイバーレーザーは、適しているものと言える。しかし、全体の効率には吸収効率、量子効率、引き出し効率が関係してくる。問題となるのは吸収効率である。

従来のLD端面励起ならば、吸収効率はほとんど100%とすることが可能である、しかし、太陽光はエネルギー密度が低いので、ファイバー端面はもちろん、側面から励起を行った場合でも、ほとんどの太陽光がファイバーに当たる事無く通過してしまう。その上、太陽光は紫外から赤外、遠赤外に至るほどの連続した幅広いスペクトルを持っているので、そのほとんどが吸収される事無く透過してしまう。そのため、太陽光により、側面から励起をし、レーザー発振を行う場合、例えばレーザー媒質をNd³⁺:Y2O3とし、楽観的概算値を当てはめて計算を行ってみると、

太陽光のエネルギー密度 . . . 1kW/m²
 断面積 . . . 1.5 × 10⁻⁶m²/m
 吸収効率 . . . ~ 10⁻³

よって、吸収される励起光強度は、1.5 μW/mとなる。

次に、当研究室において、1996年に行われたdouble clad fiberを用いたレーザー発振実験により得られた値より

ファイバーの発振閾値 200mW/50m~4mW/m、利得係数~170dB/km、損失係数~1dB/kmと仮定すると、発振に必要な励起光強度は24 μW/mとなる。

結果、18倍もの強度が必要になることが、推測できる。

しかもこの値は、端面の反射率100%とし、発振を起こすのみでエネルギーを取り出すことはできない。「そのままの太陽光」では、強度が不十分である事が解かった。

ではどうすればよいのか？以後の章において、エネルギー密度と言う面から、集光をしない太陽光による励起によって発振に達するには、どのようにすればよいのかを論じる。

第3章 エネルギー密度を上げるには

エネルギー密度を上げるといふ点において、光と電気には違いがある。光では、光子そのものを蓄えることはできない。電気では、電子そのものを蓄えることができる。

以上のことを踏まえて、光のエネルギー密度を上げる方法について書く。

3.1 集光(発振するのは当然)によるエネルギー密度の変化

集光器には、レンズを用いる集光効率が比較的低い透過系集光器と、反射鏡を用いる高効率な反射系集光器があり、最近は後者が主流である。反射系集光器の利点は、色収差が無いことである。全波長領域に対して高い反射率が得られることで、放物面鏡が一般的に用いられている。代表的集光装置には、太陽炉がある。

3.2 太陽電池(光電気変換)によるエネルギー密度の変化

3.2.1 太陽電池の原理

半導体の光起電力効果を原理とし、光エネルギーを直接電気エネルギーに変換する素子のことを太陽電池という。光起電力効果とは、光伝導効果とドリフト効果のことである。

半導体に光が照射されると(図.3.1)、光子は、半導体内で電子に衝突し吸収される。これにより、電子や正孔がバンド間遷

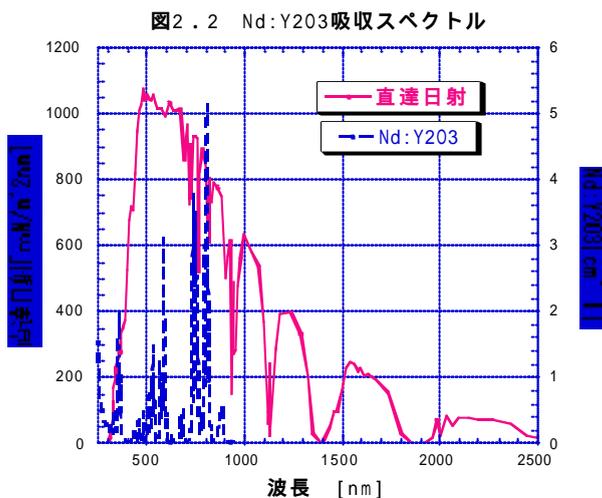
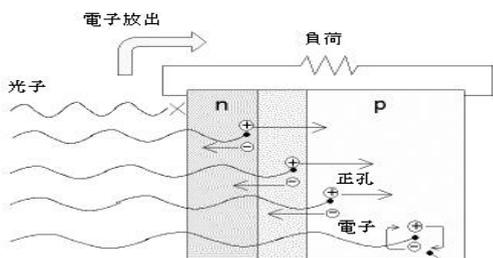


図.3.1 太陽電池素子内でのキャリアの発生



移によって、伝導帯と荷電子帯に励起こされる。生成されたキャリアは自由キャリアとして振る舞うので、導電率が増加する。このとき、pn 接合により内臓電界を生じさせるとドリフト効果が起こり、接合部付近で生じた電子-正孔対は分極し、起電力が生じる。一方、接合部から離れたところで生じた電子-正孔対は、分極できずに再結合してしまう。したがって、光起電力効果において重要なのは、電子-正孔対を生成できるエネルギーを持つ光が入射することと、電子-正孔対が生成する地点が、接合部付近であることの2つである。

3.2.2 太陽電池の現状

太陽電池は、電気を作り出す際には、ほとんど CO2 や他の有害な物質を作り出すことがない、しかも、太陽電池パネル以外に発電に係る施設を必要とせず、発電の規模に関係なく変換効率が変わらない、これは、砂漠や山奥、海上など僻地や、物品の軽量化や小型化が課題となる宇宙空間での利用にも適している。

太陽電池を巨大なエネルギー供給施設とする計画もあるが、太陽電池が基幹エネルギー源となるには、低コスト化や高効率化、高効率な伝送技術の開発などの課題を解消することが重要であり、まだ分散型のエネルギー源でしかない。

太陽電池に用いられる半導体素子の変換効率は、a-Si や多結晶 Si のもので 14% ほど、最も高い単結晶 Si や GaAs のものでも 27% ほどしかない。現在、CdTe などの新素材による高効率化の研究が進められている。

3.2.3 変換効率の支配要素

太陽電池を用いて発電を行う過程では、様々な要素により損失を受ける。その影響による、変換効率の予想値は、14.5% となる。

今回使用した太陽電池パネル(図 3.3)は、a-Si 製で、最大定格が 2V250mA、サイズ 63mm x 82mm (1 枚)、直達日射 (0.75kW/m²) での形状因子 (F.F) が 0.75 のもので、5 枚直列のものを 2 段並列に接続してある。

IV 特性を図 3.5 に、入射光に対する出力 IV 特性を図 3.6 に示す。その光-電気の変換効率は、入射光強度約 70mW/m² において、10% 程度となった。これは、計算による予測値に近い値を示しているが、計算値より効率は悪い。その原因は半導体素子の劣化によるものと思われる。特に a-Si 製の太陽電池は紫外線による劣化が激しく、屋外での長時間の使用には向いていない。対して、単結晶 Si や GaAs などを使用した太陽電池は、紫外線や放射線に対して耐久性が高い、そのため宇宙空間において、人工衛星の電力源としても用いられている。

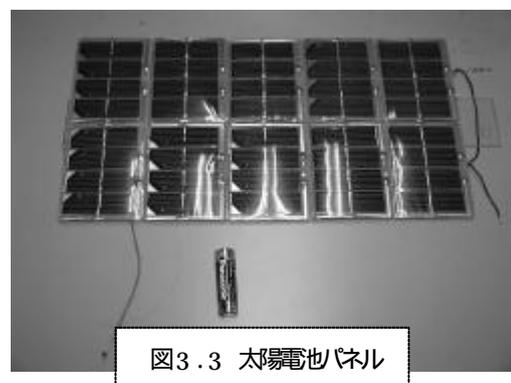


図3.3 太陽電池パネル

図3.5 I V 特性

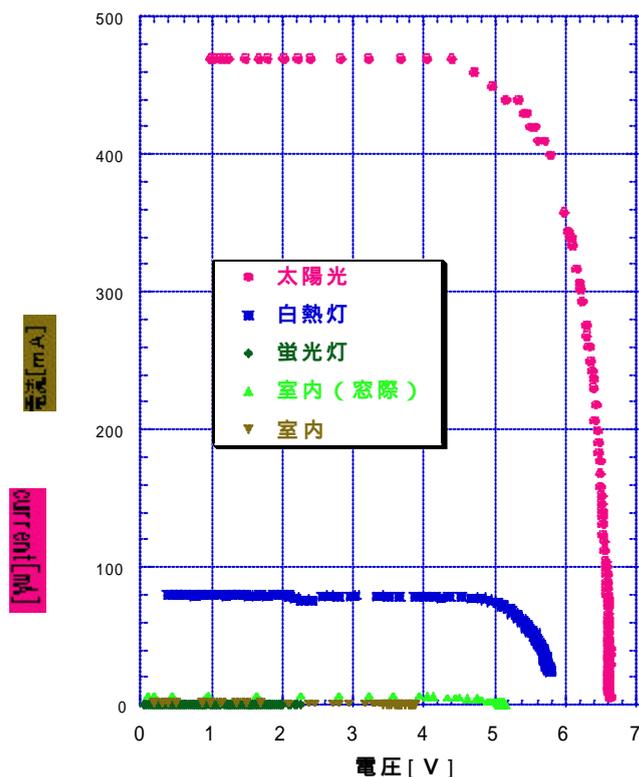
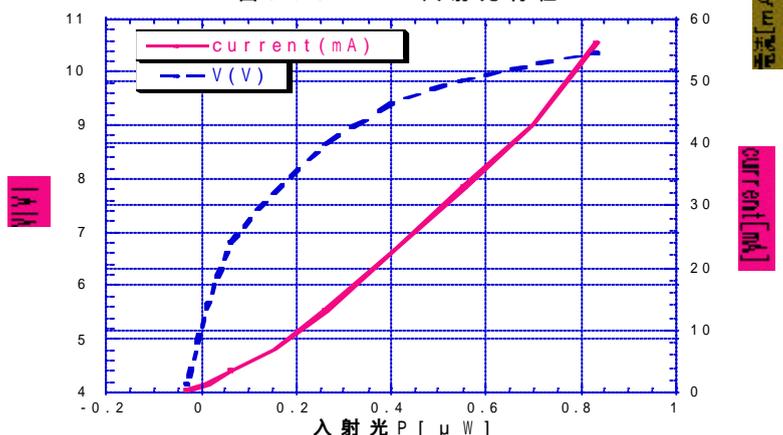


図 3.6 I V - 入射光 特性



3.2.4 太陽電池駆動 LD

光のエネルギー密度を上げる手段として、スペクトル幅を狭めて、パワー圧縮をする方法が考えられる。結果として、太陽光のスペクトル幅を狭める手段として、太陽電池を用いて LD を駆動することにした。太陽電池による光-電気の変換では、変換中の損失のため全体のエネルギーは減少してしまう。しかし、インコヒーレントで低品質な光である太陽光を、電気を介することにより、コヒーレントで高品質な光であるレーザーに変換することで、パワー圧縮ができることを示したい。光源には太陽光の代わりに、白熱電灯 (200 W) を用いる。

使用した LD (HL7806MG) の定格は、発振波長 785nm、閾値電流 40mA、光出力 5mW である。LD は低電流での直接励起が可能なので、太陽電池での使用ができるはずである。

電圧制御に三端子レギュレータ (78L05) を、電流制御に pnp トランジスタ (C2120 O) を用いて、LD ドライバを試作した。(図 3.8)

測定の結果、LD と入射光のスペクトルを図 3.12 に記す。入射光源と LD の間のエネルギー変換効率は 14.4% ほどとなった。出射時の光束径は 9 μm ほどなので、出力が 5mW の場合、パワー密度は $19.6 \times 10^3 \text{ kW/m}^2$ となる。これは入力エネルギーである白熱灯の光パワー密度より、遥かに高い値である。つまり、太陽電池と LD を用いて、光-電気-光のエネルギー変換を行うことにより、パワー圧縮がなされたことになる。

結論

太陽光は巨大なエネルギー源である。しかし、現在の技術では、そのままでは有効に使うことができない。同じく強力な光であるレーザーは、そのエネルギーを有効に使うことができる。その原因は、幅広いスペクトルを持ちインコヒーレントな太陽光と、狭いスペクトルを持ちコヒーレントなレーザーという、両者の違いによるところが、大きい。太陽電池による LD の駆動を行ってみてそれが良く理解できた。

総エネルギーでは太陽光の方が遥かに高いが、エネルギー密度では LD の方が遥かに高い。太陽光のエネルギー密度を上げる手段として、一般に広く出回っている a-Si 太陽電池による電気変換を行ったが、その効率は 10% ほどとなった。しかも、LD によるレーザーへの変換効率も 5% ほどとなり、入出力のエネルギー変換効率は 0.5% にしかならない。しかし、光強度は、3 桁も増しパワー圧縮がなされたことが解かった。

a-Si を使用した太陽電池の変換効率は、他の材料のものに比べて低い。しかし、宇宙開発などに使われている単結晶 Si や GaAs を用いた太陽電池は、変換効率 27% ほどもある、そして、今も材料の研究は進んでいる。今後、大出力 LD やエキシマレーザーを、小さな太陽電池で駆動し、更にパワー圧縮ができるだろう。

そして、集光をしない太陽光での直接励起レーザーが、損失の少ないファイバーを用いても現段階では不可能であることが解かったが、従来のレーザー媒質より吸収効率の高い物質の研究や、損失の低い励起方法や物質の研究を続けていく必要がある。最後に、太陽電池が大変有益なエネルギー源であることが、今回良く解かった。宇宙開発や環境の改善に役立つように、今後も研究を続けていく必要がある。

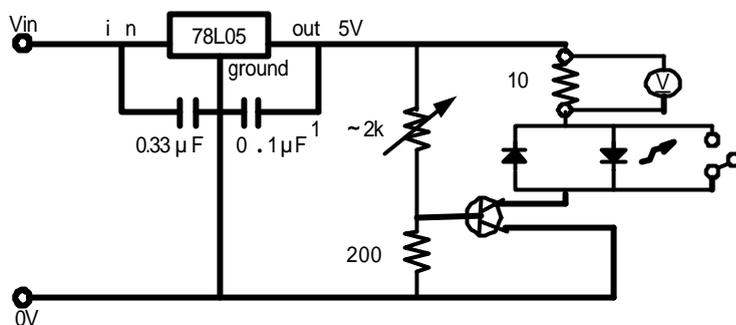


図 3.8 LD ドライバ回路図

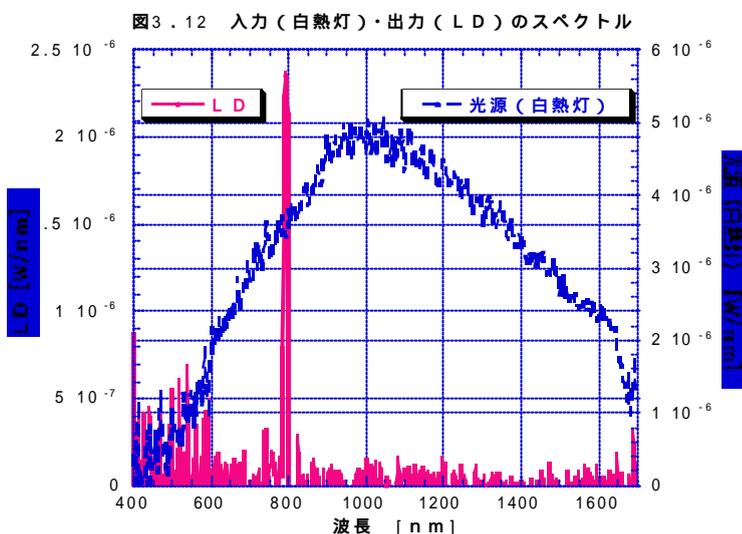


図 3.12 入力 (白熱灯)・出力 (LD) のスペクトル