

傍熱型光照射熱電子コンバータに関する研究

Study on Light Irradiation Thermionic Converter of Indirectly Heated Type

川口 朋秀[†]、津田 紀生^{††}、山田 諄^{††}

Tomohide Kawaguchi, Norio Tsuda, Jun Yamada

Abstract Thermionic generation is remarkable as one of new technology of generation of electricity in the future. It is one of direct generation, and it has many advantages. But a thermionic converter is not practically used yet. The thermionic converter generally works at high temperature. But it causes to shortening of emitter's life and problem of stability. To improve these problems the light is irradiated to the thermionic converter at lower temperature. In this experiment the thermionic converter of indirectly heated type is used, and the characteristic of output is measured. An accurate estimation of output density became to be possible by using the indirectly heated type. As a result of the experiment, it was founded that the higher output was obtained at the relatively lower temperature of emitter.

1. はじめに

将来の新しい発電技術の一つとして、熱電子発電が利用される可能性がある。熱電子発電器は以下のような利点を有している。可動部がない静止器であるために静粛性に優れ、保守が容易である。機械的なエネルギーを介さずに電気エネルギーに変換されるために発電効率が低い。また小型化が可能である。これらのことから太陽光等を利用した分散型発電等への応用に適していると考えられる。

ところが熱電子発電器は未だ実用化には至っていない。熱電子コンバータは一般に高温で動作する。しかし高温動作による陰極の寿命、あるいはその安定性が問題となる。また陰極から放出される電子は電極間空間に空間電荷としてとどまり、負の空間電位を形成し、陽極に向かう電子に対して障壁となるため、出力が制限される等の問題がある。この負の空間電位を低減するためには電極間の間隔を数 μm 以下にするか、発電器内にセシウムを封入し、セシ

ウムイオンを生成して空間電荷を中和することが考えられる。電極間隔を狭めることは非現実的であるので、現在の研究の対象はセシウム封入型の熱電子コンバータとなっている。

本研究で用いたコンバータもセシウム封入型のものであり、直熱型の熱電子コンバータを用いた研究結果¹⁾より、熱電子コンバータに光照射を行うと出力の増大効果が起こり、光照射を行わない場合と比較すると、出力が改善されることを明らかになっている。しかしこの研究では十分な出力の改善が行われなかった。今回の研究では傍熱型の熱電子コンバータを用いた。傍熱型のコンバータを用いることで、直熱型のコンバータでは困難であった出力の密度評価を正確に行えるようになった。そして電極へ効率よく光照射を行うことが可能となり、またより低温領域での動作条件を検討できるようになった。このことは本研究の重要な目的の一つでもある。

2. 実験装置

2・1 低圧セシウム封入型熱電子コンバータ

本研究で使用した低圧セシウム封入型熱電子コンバータの外観概略を図 1 に示す。コンバータ管は

[†] 愛知工業大学大学院 工学研究科
電気電子工学専攻 (豊田市)

^{††} 愛知工業大学 電子工学科 (豊田市)

パイレックスガラス製で直径約 50mm、長さ約 140mm で、照射用の窓が二方向に設けられている。コンバータは構造が非常に簡単で、エミッタ、コレクタのみから構成される二極管である。高温に加熱されるエミッタから熱電子放出が起こり、放出される電子をコレクタで捕集し出力を得る。エミッタは渦巻き状のヒータが直径約 15mm の円筒形のニッケルで覆われた傍熱型の構造になっている。

このため次のような利点がある。

- 1) 電極の面積評価を正確に行うことができる。
- 2) 電極に効率的に光照射できる。
- 3) 陰極面を等電位にできる。
- 4) 加熱に交流電源を使用しているために生じるハム雑音を低減することができる。

エミッタは 60Hz 半波整流電流を用いて加熱し、エミッタの表面温度を変化させている。半波整流電流を用いているのは、加熱電流により生じる電界により、コンバータの出力に影響を及ぼすのを避けるためである。よって測定は全て、半波整流電流休止間に行った。

またコレクタは直径約 40mm のステンレス製で、エミッタに光照射されるように中心が約 15mm のモリブデンメッシュ（メッシュ線径 ϕ 0.1mm、20mesh/inch）でできており、この部分の光の透過率は約 85% である。エミッタ、コレクタの両電極の間隔は約 15mm となっている。

コンバータ内にはセシウムが封入されている。このセシウムの主な役割として、

- 1) 電離することで、セシウムイオンを生成し、熱電子放出の際に生ずる空間電荷を中和し出力の減少を低減すること。
- 2) 電極表面に吸着し、仕事関数を低下させ電子を放出しやすくすること。

といった事が挙げられる。

なおセシウムはコンバータ下方に位置するセシウム溜まりより管内に供給される。

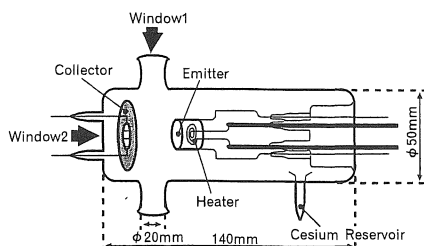


図1 低圧セシウム封入型熱電子コンバータ

2・2 実験装置

実験装置の概略を図 2 に示す。装置は熱電子コンバータ、光源である色素レーザー、色素レーザーをポンピングするためのエキシマレーザー、及び測定のための外部回路で構成される。コンバータ管は電気炉内に設置され、この炉温度を調節することで、管内のセシウム蒸気圧を制御する。セシウム蒸気圧は管内の最も温度が低い場所で決定されるため、コンバータ下方に位置するセシウム溜まりのところに、クロメル-アルメル熱電対を設置し炉温度を測定した。エミッタの温度測定は光高温計（Chino 社製パイロスタ MODEL IR-U）を用いた。測定したヒータ電流に対するエミッタ温度特性を図 3 に示す。この光高温計では 1000 (K) 以下の温度測定は困難であるので、ヒータ電流が低い領域においては測定結果を外挿して用いた。エミッタ温度はヒータ電流にほぼ比例していることが分かる。またエミッタとコレクタの電極間空間に光照射を行う時を空間照射、コレクタを通過してエミッタ電極方向に光照射を行う時を電極照射と呼ぶことにする。また光照射実験の際には、レーザー光を二枚のレンズ

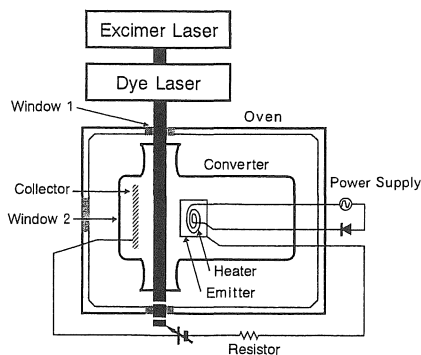


図2 実験装置概略

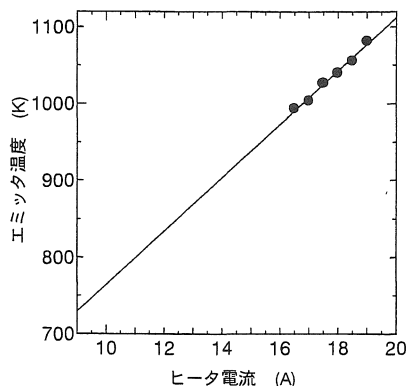


図3 エミッタ温度 vs. ヒータ電流

を用いてビーム径約 10mm の平行ビームにして光照射実験を行った。

2・3 色素レーザー

光照射実験で用いた光源は、Lambda Physic 社製の LPD3002A 色素レーザー光である。レーザー媒質はローダミン 640 の色素をメタノール溶解したものをを用いている。レーザー光の半値幅は 33ns で、発振波長はエシュレット格子を回転させることによって 615~660nm の範囲で変化させることができる。この範囲にはセシウム分子の吸収帯が存在しており、効率よくセシウムプラズマが生成される領域である。なおレーザーエネルギーの測定は Lambda Physic 社製のパワーメータを用いた。

2・4 エキシマレーザー

色素レーザー発振させるためのポンピング光源には、Lambda Physic 社製の LPX205i エキシマレーザー光を用いた。レーザー媒質は XeCl であり、その発振波長は 308nm である。ビーム断面は縦 11mm×横 24mm の長方形であり、半値幅は 30ns、最大エネルギーは約 500mJ である。

3. 光照射実験

3・1 実験方法

光照射実験を行うときに用いたレーザー駆動パルスとレーザーパルスの波形を図 4 に示す。この図から駆動パルスが立ち上がりしてからレーザー発振の起こるまでの時間はおよそ 1.4 μ s 程であることが分かる。この駆動パルスを、出力波形を観測するときのトリガとして用いた。

ヒータ加熱用の 60Hz 半波整流電流が休止している半サイクル間に照射光を単発で照射した。照射光の波長は大きな出力が得られる 627nm とした。コンバータの出力はエミッタとコレクタの両電極間に、予め 2V の直流バイアスをコレクタ側が正電位になるように印加し、外部抵抗の電圧降下から求めた。

また図 5 は出力のピーク時間と半値幅の定義を説明するために出力波形を模式的に表したものである。横軸は時間を表し、縦軸は出力値を示している。レーザーのパルス幅に比べると、実験で得られる出力波形の幅は非常に大きく数百 μ s にも達する。実際のレーザー光は図 4 に示したように駆動パルスの立

ち上がりから約 1.4 μ s 後に発振し、半値幅は 33ns であるので、図 5 の t=0 の地点に一本の線として表される。よってここを時間の原点とし、ここからピーク出力値までの時間をピーク時間とした。半値幅は図 5 に示すように、ピーク出力の半分の値となるとききの時間幅とした。

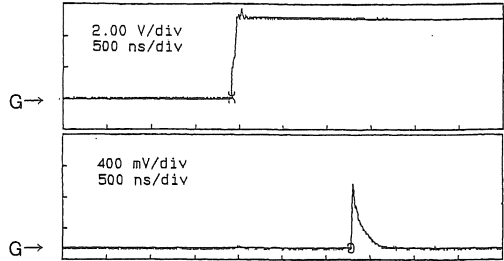


図 4 レーザ駆動パルス波形（上）vs. レーザパルス波形（下）

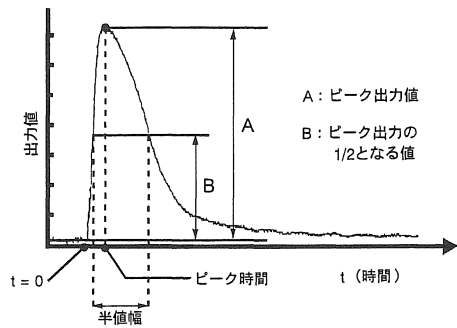


図 5 出力ピーク時間及び半値幅の説明

3・2 出力波形

出力波形の一例を図 6 に示す。図中のカーソル X は光照射前の出力であり、カーソル O は光照射後の

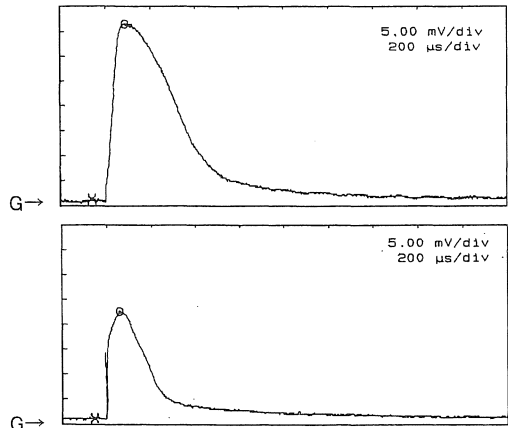


図 6 空間照射（上）、電極照射（下）の出力波形

ピーク出力である。これらの波形の実験条件、測定条件は共通であり、セシウム蒸気圧は 2.8 (Pa)、電極温度は 870 (K) である。また上図は空間照射、下図は電極照射の例である。両者を比較すると、空間照射の方が遅く立ち上がり、電極照射では鋭く立ち上がった後、ゆっくり立ち上がっていることが分かる。電極照射ではエミッタに光照射されるため光電子放出が起こり、立ち上がりの鋭いものとなると考えられる。

4. 光照射の実験結果

4・1 光照射の出力特性

実験で用いたコンバータのエミッタとコレクタの間隔は約 15mm であり、照射するレーザー光のビーム径は約 10mm である。最初に、光照射の最適な位置が存在するかを調べてみた。なお、この時は空間照射について記述している。熱電子放出が行われるエミッタに、照射光がほぼ当たらないようにした位置を 0mm とし、この位置から照射光をコレクタ方向へ 0.5mm ずつ移動させ測定を行った。また電子を捕集するコレクタに照射光をほぼ当たらないような位置は 7mm のところであった。

光の照射位置に対する出力電流密度特性を図 7 に示す。照射光の位置を変化させると出力も変わっていく様子が分かる。光の照射位置はエミッタのすぐ近くの位置より、多少離れた位置の方が出力は大きく、その差は約 2 倍ほどの違いがある。しかしピーク位置は、蒸気圧にあまり関係なく、およそ 2~5mm の位置で比較的大きな出力が得られている。

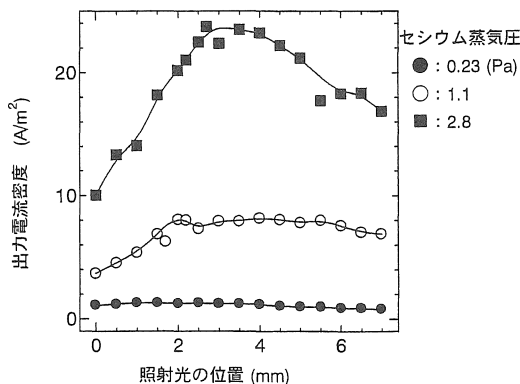


図 7 出力電流密度 vs. 照射光の位置
照射光の波長 627 (nm)、

レーザーエネルギー 15 (mJ)、電極温度 935 (K)

これはある初速度を持った電子がエミッタから放出され、この辺りを中心に空間電荷密度が最も大きくなっていると考えられる。そしてこの部分に光照射されると、効率よく空間電荷が中和され、出力も大きくなるものと思われる。同様の実験を電極照射時でも行ったが、照射位置による出力の依存はほとんどなく実験誤差の範囲内であった。これ以後は出力が最大となるような照射位置で測定を行った。

次に空間照射時の光照射の効果を見るために、光照射前と光照射後の出力の比をとったものを図 8 に表す。但しコンバータの保護を考え、ヒータ電流は 16 (A) までとした。いずれの蒸気圧の場合でも増加率に極大値が現れる。そしてこの付近の電極温度の時、出力値そのものも比較的大きなものとなった。極大付近の電極温度領域まではエミッタへのセシウムの吸着量が大きい。従ってエミッタの仕事関数はかなり低下しており、電子を放出しやすい状態にあると思われる。そこに光照射を行いセシウムを電離させ、電極間の空間電荷を中和することで、出力が非常に増加するものと思われる。またピークを迎えた後、増加率は減少していく。この領域ではエミッタ温度の上昇と共に、電極表面のセシウムの蒸発が起こる。そして電極の仕事関数がニッケル本来の大きな値に近づき、電子が放出されにくくなり増加率も減少していくと考えられる。また増加率のピークは、セシウム蒸気圧が高くなるにつれ、電極温度の高い方向へシフトしている。これは蒸気圧の上昇に伴い、電極表面に吸着するセシウム層も厚くなり、表面のセシウムを蒸発させるのに、より高い電極温度が必要となるためと思われる。

これまでの直熱型コンバータの実験ではエミッタ温度 1000 (K) 以上の領域で測定が行われ、そのため出力増加率も数倍程度であった。今回用いた傍熱型のものでは、エミッタ温度が 750~1000 (K) 以内の温度領域で測定を行うことができた。その結果、エミッタ温度 870 (K) 程度の時、出力増加率の極大が現れ、その値は数百倍にも達することが明らかとなった。

同様の実験を電極照射について行ったものを図 9 に示す。出力増加率はセシウム蒸気圧 9.9 (Pa) の時のものを除いて、空間照射時の半分ほどの値である。電極照射ではエミッタへの光照射で加熱効果が起こる。このために吸着しているセシウムの蒸発が起こり、被覆度が減少してしまうと考えられる。従

ってエミッタの仕事関数が大きくなり電子が放出されにくくなる。よって出力は、空間照射のものより小さな値になると考えられる。

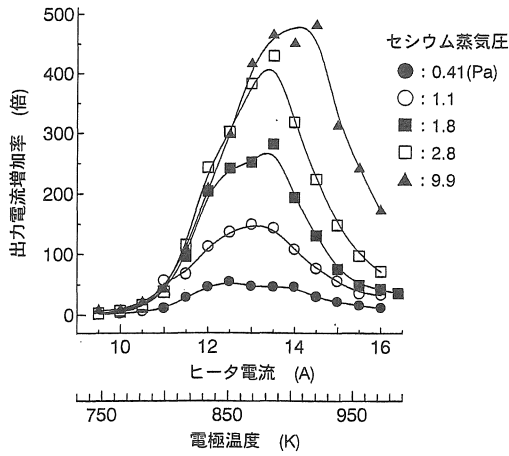


図8 出力電流増加率 vs.電極温度
空間照射、照射光の波長 627 (nm)、
レーザーエネルギー 15 (mJ)

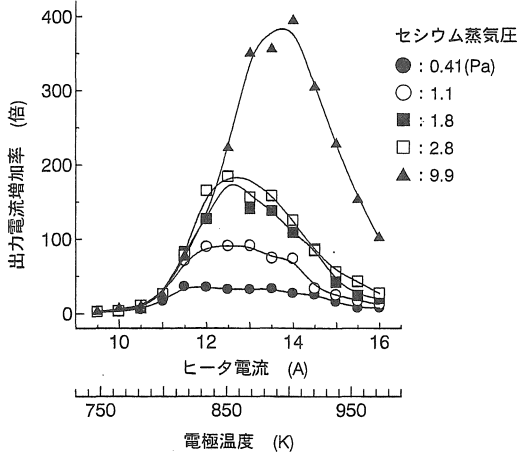


図9 出力電流増加率 vs. 電極温度
電極照射、照射光の波長 627 (nm)、
レーザーエネルギー 15 (mJ)

続いてセシウム蒸気圧に対する出力電流密度特性を図 10 に示す。傍熱型のコンバータで測定を行ったので出力密度を正確に評価することが可能となった。光照射出力はある蒸気圧でピークが現れる。蒸気圧が高くなると、管内のセシウム密度も高くなり、光照射により生成されるイオンの数が増加し、空間電荷が効率よく中和されるため出力も増加する。し

かしセシウム密度が高くなりすぎると、放出された電子はセシウム原子と頻繁に衝突するようになる。このことが電流の流れを妨げる抵抗となり、コレクタに捕集される電子の減少として現れる。従って出力にピークが現れたものと考えられる。また、エミッタ電極温度が高くなると、出力のピークはセシウム蒸気圧の高い方向へ移動している。

電極照射時のセシウム蒸気圧に対する出力電流密度特性を、図 11 に示す。電極温度の低温時では、空間照射時と同様、出力にピークを生じる。ところが電極温度が高くなるとピークは現れず、増加を続けているのが分かる。これはエミッタの加熱効果の影響で、放出電子の初速度も非常に増加し、コレクタに到達しやすくなるためと思われる。

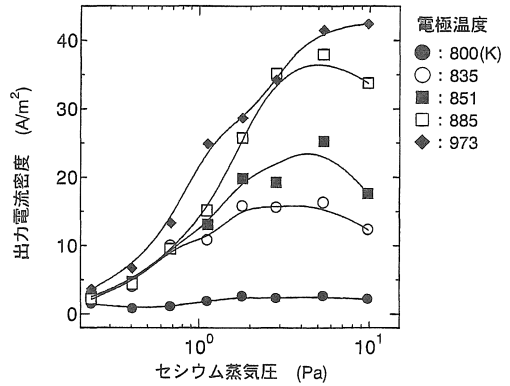


図10 出力電流密度 vs.セシウム蒸気圧
空間照射、照射光の波長 627 (nm)、
レーザーエネルギー 15 (mJ)

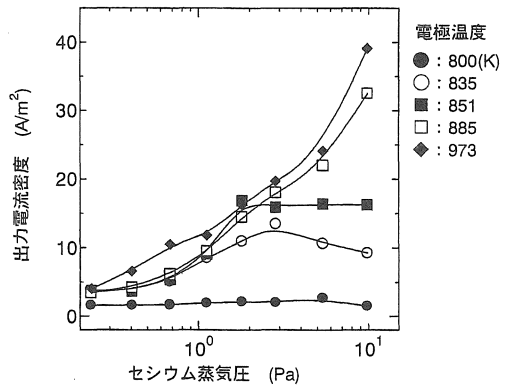


図11 出力電流密度 vs. セシウム蒸気圧
電極照射、照射光の波長 627 (nm)、
レーザーエネルギー 15 (mJ)

4・2 ピーク時間、半値幅の温度特性

電極温度に対する出力波形のピーク時間特性を図 12 に表す。エミッタ温度が低温領域の時ほど、出力は遅く立ち上がっている。そしてエミッタ温度が高温になってくるにつれ、出力は速く立ち上がるようになり、電極温度 850 (K) 以上では、ピーク時間の値はほぼ一定値に近づいている。これはエミッタ温度が低温時では、放出電子の初速度も小さい。そして電極温度の上昇につれ、初速度が大きくなるのでピーク時間は速くなるものと思われる。また空

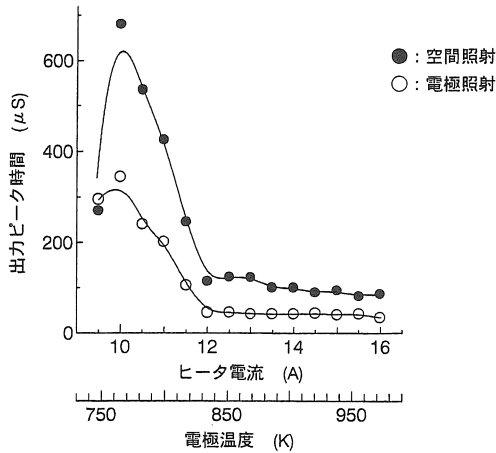


図 12 出力ピーク時間 vs. 電極温度
照射光の波長 627 (nm)、レーザーエネルギー 15 (mJ)、
セシウム蒸気圧 2.8 (Pa)

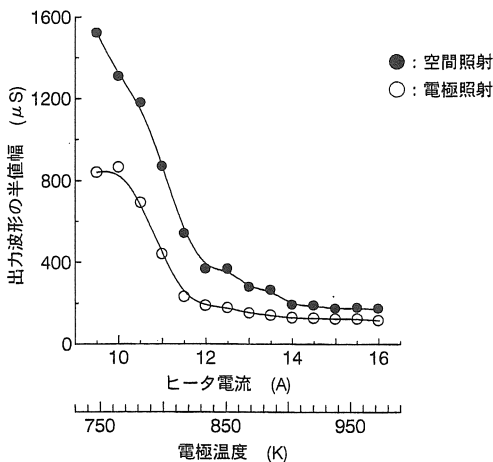


図 13 出力波形の半値幅 vs. 電極温度
照射光の波長 627 (nm)、レーザーエネルギー 15 (mJ)、
セシウム蒸気圧 2.8 (Pa)

間照射と電極照射のピーク時間を比較すると、電極照射の方が出力の立ち上がりは速くなっている。

電極温度に対する出力波形の半値幅を図 13 に示す。エミッタ温度の低い領域で、半値幅は広く、温度の上昇に伴い狭くなる。電極温度が高くなると多くの電子放出が起こる。そして、放出された電子とセシウムイオンとの再結合が起こり、セシウムイオンの消滅は速くなる。従って、出力波形の半値幅も狭くなると考えられる。空間照射と電極照射の半値幅を比較すると、電極照射の方が狭い。電極照射ではエミッタの加熱効果による熱電子放出、または光電子放出現象のために、多くの電子が放出されるのでセシウムイオンの消滅する時間が更に早まるためであると思われる。

5. 総括

本研究は熱電子コンバータに光を照射することで出力の増大効果を試みた。そして比較的低温領域での動作を目的としたものである。今回の研究はセシウムを封入した傍熱型熱電子コンバータを用いて研究を行った。ここでは実験で得られた結果をまとめておく。

直熱型熱電子コンバータの時より低いエミッタ温度で出力測定、評価を行うことが可能となった。その結果、出力増加率はある電極温度で極大を持つことが明らかとなり、増加率の値は数百倍にも達した。この値は直熱型コンバータの実験のものより非常に大きな値である。そして空間照射と電極照射を比較すると、空間照射の方が大きな増加率を得ることができた。また空間照射時では、光照射位置によって出力が大きく変わることが明らかとなった。

電極温度の低いときほど出力は遅く立ち上がり、出力波形の半値幅は広くなることが明らかとなった。

以上のことより動作条件を適切に選択することで熱電子コンバータの光照射出力は比較的大きなものが得られ、動作温度を低温化できるということがいえる。

参考文献

- 1) 大竹知博、山田諄
愛知工業大学研究報告、第 31 号 B、
pp.46~48、1996