レーザーの核反応ポンピング法の現状

平野武彦*

(1973年 7月19日 受 理)

(1973年 8月11日 再受理)

Present Status of Pumping Methods of Lasers Using Nuclear Reactions

By Takehiko HIRANO

A review is presented, which summarizes both experimental and theoretical studies reported during the nine-year period 1964~73 on pumping methods for lasers using nuclear reactions either with or without electrical discharge (Nuclear Pumped Lasers or else Direct Nuclear Pumped Lasers). In much of the reported experimental work, the $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ and $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ nuclear reactions have been utilized as source for high energy heavy particles with neutron fluxes ranging from 10^8 to 10^{17} n/cm 2 .sec. Most of the theoretical work has been focused on the calculation of threshold neutron flux requirements for noble gases or CO $_2$ lasers. The threshold estimates fall in the range $1.2 \times 10^9 \sim 10^{18}$ n/cm 2 .sec on ^{10}B . A theoretical model was proposed by Guyot *et al.* which predicts the behavior of the metastable densities in noble-gas plasmas created by nuclear radiations. The present author is now undertaking jointly with Shipman a study of the electron energy distribution function in nuclear pumped lasers using the combined Boltzmann-Fokker-Planck equation.

KEYWORDS: pumping method, lasers, nuclear reaction, neutrons, boron 10, neutron beams, alpha particles, lithium 7, helium 3, proton, tritium, metastable states, plasma, distribution function, Boltzmann-Fokker-Planck equation

I. まえがき

レーザーのポンピング法には、周知のように、光ポンピング法、気体放電による方法、電流注入法、電子ビーム法、化学的ポンピング法などがあるが、最近原子炉を用いたレーザーのポンピング法に関する研究がさかに行われている。その方法は、従来の気体放電を利用したレーザー装置に重粒子源(^{10}B , ^3He など)を併用し、原子炉からの中性子束あるいは加速器からの陽子を照射し、前記重粒子源との核反応により発生した高エネルギー重粒子とレーザー媒質との衝突により、電離あるいは励起状態を促進させてプラズマを多量に発生させることにより、ポンピングを助長してレーザーの性能を向上させる方法である(以後、原子力ポンピング・レーザーと記述する。なお、放電を利用しないで直接原子力ポンピングを行う場合もある)。

原子力ボンピング・レーザーの実験は、最初米国の Argonne National 研究所(1965年)⁽¹⁾で行われ、続いて Northrop Corporate 研究所(1967年)⁽²⁾、モスクワ大学(1968, 1970年)⁽³⁾⁽⁴⁾、NASA Langly とフロリダ大学(1970年)⁽⁵⁾、イリノイ大学(1970年)⁽⁶⁾⁽⁷⁾で行われた。最近はイリノイ大学グループ、フロリダ大学グループ、モスクワ大学グループがそれぞれ実験、理論の両面から意欲的な研究を行なっている^{(8)~(16)}。

ここでは、これらの研究の現状を簡単に述べる。

II. 実験の現状

原子力ポンピング・レーザーの実験装置の概要は、第1図に示すように従来の気体放電を利用するレーザー管を石英ガラス製とし、その内壁に重粒子源として ^{10}B

* 防衛大学校 電気工学教室 (Dept. of Electrical Eng., Defense Academy)

第 1 表 原子力ポンピング・レーザーの実験状況

研究所, 著者 (年)	源	中性子束 (n/cm ² ·sec)	混合気体	重粒子源	気体放電	結 果	文献
Argonne National 研究所 DeShong, J.A. (1965)	熱 炉	2×10^{10}	CO ₂ :N ₂ : ⁴ He =1:1.3:11 14 Torr 流れなし	¹⁰ B をコー ティング	有	5×10^8 n/cm ² ·sec にすると入力 が減少し出力が増加, 中性子の みでは発振せず。	(1)
Northrop Corporate 研究所 Eerkens, J.W. Rusk, J.R. (1967)	パルス 熱 炉	$< 10^{17}$	Ne-O ₂ 10~300 Torr Ar Ne } O ₂ - ⁴ He Kr Xe CO ₂ -N ₂ - ⁴ He 10~300 Torr 流れあり	¹⁰ B と ²³⁵ U を コーティ ング	無	レーザー出力のピークは炉の出 力のピークに対応しなかった。 添加剤の効果は Ar-Ne-O ₂ の ときのみあった。6,684 Å で約 50W。効率約 1%	(2)
モスクワ大学 Andriakhin, V.M., et al. (1968)	陽 子 加速器		CO ₂ :N ₂ : ³ He =1:2:5 10 Torr 流れあり	3MeV の陽 子(20W)の 粒子線エネ ルギーの約 半分はプラ ズマに吸収 される。	5~30 mA 5.3kV 長さ 1,000mm 直径 22mm	陽子の照射により入力が増減し 出力が 2~3 倍に増加した。	(3)
モスクワ大学 Andriakhin, V.M., et al. (1970)	パルス 熱 炉	5×10^{16}	Hg+ ³ He ~350 Torr	³ He (n, p) ³ H 反 応	無	6,150 Å の光, 約 10mW を放射。	(4)
NASA-Langley とフロリダ大学 Allario, F., et al. (1970)	パルス 熱 炉 準臨界	$< 10^8$	CO ₂ :N ₂ : ³ He =1.5:1.5:3.5 14 Torr	³ He (n, p) ³ H 反 応	有 定常状態	レーザー出力が数%増加。	(5)
イリノイ大学 Guyot, J.C., et al. (1970)	速い バースト 炉	10^{15}	⁴ He-Ne-Ar ⁴ He-Ne-Air	¹⁰ B をコー ティング	無	3.39μm のレーザー・ビームをゲ インセルに通し 15% の利得を得 た。	(6) (7)
イリノイ大学 Guyot, J.C., et al. (1971)	パルス炉	10^{15}	⁴ He:Ne =9:1 5~163 Torr	¹⁰ B をコー ティング	無	1.15μm, 3.39μm のレーザー・ ビームをゲインセルに通し 4 % 毎メートルの利得を得た。	(8) (9)
イリノイ大学 Ganley, T., et al. (1971)	ゆっくり したパル ス炉	10^{11}	⁴ He:N ₂ :CO ₂ =8:1:1 5~20 Torr	¹⁰ B をコー ティング	有 定常状態	約 20% のピーク出力の増加。 (第 2 図参照)	(10) (11)
イリノイ大学 Ganley, T., et al. (1971)	ゆっくり したパル ス炉	10^{11}	⁴ He-N ₂ -CO ₂ 0.5atm	¹⁰ B をコー ティング	有 TEA パルス	出力は 2 倍以上になった。レー ザー・パルスは電流パルスより も 75 μsec 遅れたが照射により 小さくなった ⁽¹⁷⁾ 。	(12)
イリノイ大学 Ganley, T., et al. (1971)	ゆっくり したパル ス炉	10^{11}	⁴ He:N ₂ :CO ₂ =8:1:1 5~20 Torr	¹⁰ B をコー ティング	有 パルス	レーザー出力は 2~3 倍になっ た。	(12)
フロリダ大学 Rhoads, H.S., et al. (1971)	定常状態 炉	10^8	CO ₂ :N ₂ : ³ He =1:1:8 6 Torr	³ He (n, p) ³ H 反 応	有 定常状態	レーザーの効率と出力が 2 倍に なった。 (第 2 表参照)	(13)
モスクワ大学 Andriakhin, V.M., et al. (1972)	パルス 熱 炉	5×10^{16}	CO ₂ :N ₂ : ³ He =0.8:0.7:1 2.5atm	³ He (n, p) ³ H 反 応	パルス放 電 36kV 長さ 550mm 直径 37mm	L=1.5μH, C=0.7μF, R= 0.05Ω で, パルスあたり 1J の レーザー出力。 電子密度 $n_e=10^{18}$ /cm ³	(14)

第3図 希ガスを $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 核反応で励起した場合の準安定状態密度の光吸収実験装置の構成図(主要な部分は明瞭にするために誇張してある)。

コンクリートでシールドした TRIGA 原子炉の隣に吸収セルを置く。吸収セルは外径 33 mm, 長さ 6 ft, プリュスタ角約 54° , 石英ガラス製, この中にアルミニウム管の内面に ^{10}B (純度 96%) を 0.4 mg/cm^2 コーティングしたものを入れ真空系と結合してある。中性子束をモニターするための中性子箱を吸収セルの二等分線上に置いてある。吸収セルに資料を封入し中性子束を適当に照射し, レーザーおよび放電管により光源 ($3,889, 5,016, 6,217, 6,266 \text{ \AA}$) を作り, それを機械的に 2.5 kHz にチョップした光を吸収セルに通した後カガミ 2 で偏光し, フィルタを通して光検出器 (PM) に入れ, その出力電圧とモニター用中性子箱の出力電圧を対応させるために, 同時にオシロスコープで観測する。

第4図 中性子束をパラメータとした場合の ^4He の圧力に対する $\text{He}(2^1\text{S})$ の密度 ($^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 核反応を利用)

いての彼らの結果は, Wilhelm の理論式⁽²¹⁾で計算した値によく一致していたと報告している。これらの基礎的研究は, 原子力ポンピング・レーザーの励起機構を解析するための基礎的データを得るために大へん重

第5図 中性子束をパラメータとした場合の ^4He の圧力に対する $\text{He}(2^3\text{S})$ の密度 ($^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 核反応を利用)

第6図 分光器を用いた希ガスの励起状態密度の測定装置。(^{210}Po (550 mCi), α 粒子 5.3 MeVH^{++} を利用)

要である。

Ⅲ. 理論の現状

原子力ポンピング・レーザーの理論的研究は実験よりも大へん遅れている。その理由は, この問題が本質的に難しいことと, 計算を行うための基礎的実験データの不足によるものである。ほとんどの理論的研究は各種ガスレーザーについて, 照射する中性子束のしきい値の計算に焦点をしばっている。その方法は核反応によって発生したエネルギーがレーザー媒質中に沈積していると, その後は電氣的にポンピングされたレーザーと同じようになると仮定して計算している。これらのしきい値の計算例を第4表に示す。この表から, ^{10}B をコーティングのときは炭酸ガスレーザーの方が希ガスを用いたレーザーの場合よりも, しきい値

第3表 α 粒子による ${}^4\text{He}$ プラズマの光放射と励起状態密度比, (${}^4\text{He}$:340 Torr, ${}^{210}\text{Po}$ (550 mCi), α 粒子 5.3 MeV H^{++} を使用)

遷移	波長 (Å)	励起状態密度比 3^1P の密度に正規化
三重項		
$3^3\text{S}-2^3\text{P}$	7,065	4.100
$3^3\text{D}-2^3\text{P}$	5,876	0.237
$3^3\text{P}-2^3\text{S}$	3,889	0.730
$4^3\text{S}-2^3\text{P}$	4,713	0.301
$4^3\text{D}-2^3\text{S}$	4,472	0.042
$4^3\text{P}-2^3\text{S}$	3,187	0.029
$5^3\text{S}-2^3\text{P}$	4,120	0.143
一重項		
$3^1\text{D}-2^1\text{P}$	6,678	1.450
$3^1\text{P}-2^1\text{S}$	5,016	1.000
$3^1\text{S}-2^1\text{P}$	7,280	1.845
$4^1\text{D}-2^1\text{P}$	4,922	0.237
$4^1\text{P}-2^1\text{S}$	3,968	0.315
$4^1\text{S}-2^1\text{P}$	5,047	0.163

が小さくてよいことがわかる。前述の仮定の良否について, Russell が討論している⁽¹⁶⁾⁽²²⁾。それによると, 温度が低いガスの直接原子力励起は電氣的に励起した CW レーザーの力学的過程とは全く異なった機構で新しい型の反転をつくるはずだと述べている。

第4表 中性子束のしきい値 (${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ 核反応を利用した場合)

システム	$n/\text{cm}^2 \cdot \text{sec on } {}^{10}\text{B}$	研究者名, 年	文献番号
$\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-}{}^4\text{He}$ (10.6 μm)	1.2×10^9	DeShong, J.A., (1967)	(23)
$\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-}{}^3\text{He}$ (10.6 μm)	1×10^{10}	Allario, F., <i>et al</i> , (1970)	(5)
${}^4\text{He-Ne}$ (3.39 μm)	3×10^{12}	{ Herwig, L.O., (1964) DeShong, J.A., (1965) Ganley, T., (1969)	(24) (1) (25)
${}^4\text{He-Ne}$ (0.63 μm)	5×10^{14}		
Ar (neutral; infrared)	$\sim 10^{15}$	Russell, G.R., (1970)	(22)
Ne-O ₂ (0.84 μm)	3×10^{16}	Rusk, J.R., <i>et al</i> , (1968)	(26)
Ar ⁺ (ion; uv, blue lines)	$\sim 10^{18}$	Ganley, T., (1969)	(25)

IV. むすび

原子力ポンピング・レーザーの実験的研究および理論的研究の展望を簡単に行なった。実験に使用している中性子束は $10^8 \sim 10^{17} n/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ でかなり大きな値であるので, 原子炉をその都度使用しなければならず実用的ではないが, 学問的には大へん興味深い実験である。さらに励起媒質として UF_6 , BF_3 , BCl_3 等の気体を用いることにより, 小さな人工中性子源で実験を行うことも可能である。また, 10%程度の効率だと仮定

Guyot らは, (1) 式の核反応を利用して高エネルギー重粒子を発生させて希ガスをプラズマ状にした場合の準安定状態密度の変化を解析するためのモデルを提案して理論値を計算しているが, まだ不完全である。すなわち, 第4図を参照すると $\text{He}(2^1\text{S})$ の場合は理論値と実験値がかなりよく合っているが, 第5図を参照すると $\text{He}(2^3\text{S})$ の場合は理論値と実験値があまりよく合っていないことがわかる。また, 高エネルギー重粒子を通常の炭酸ガスレーザーや希ガスレーザーに照射した場合の電子エネルギーの分布関数を計算するための研究を Shipman (フロリダ大学) や筆者が行なっている。その方法は, Fokker-Planck の係数を用いた Boltzmann 方程式を使って, 速い荷電粒子と熱電子の弾性衝突を取り扱い, さらに速いイオンと分子および原子との非弾性衝突も含めて解析しようとしているが, まだ成果をあげていない。一方, Nighan は電氣的に励起されたガス分子 (N_2 , CO , CO_2 , ${}^4\text{He}$, Xe およびこれらの混合) 中の電子エネルギーの分布を解析している^{(27)~(30)}。それによると Boltzmann-Fokker-Planck の方程式を結合して計算している。これらの結果は非マクスウェル分布をしているので, 原子力ポンピング・レーザーの理論的解析を行うのに参考になると思う。

しても, 核反応エネルギーが大きいので, かなり大出力のレーザーが可能であり, また, 波長の短いコヒーレントな光を共振させることが可能であるといわれているので⁽⁶⁾⁽¹³⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾, 大出力レーザー照射による核融合反応への応用, エネルギー輸送用, 宇宙通信用として有望である。一方理論的研究は, 照射する中性子束のしきい値の計算に集中しているが, 高エネルギー重粒子を通常の気体レーザーに照射した場合のポンピング機構を解明するための研究を行うことも大へん重要で興味深い。この分野の研究は緒についたばかりである

が、将来、原子力エネルギーを直接レーザー光線へ変換するための励起媒質として、ウラニウム・プラズマを用いた高効率大出力直接原子力ポンピング・レーザー装置が開発され、そのポンピング機構も解明される日が来るであろう⁽¹³⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽²²⁾⁽³¹⁾。

終りに、平素ご指導いただく防衛大学校 室岡義広教授ならびに東京電機大学 窪田忠弘教授に感謝の意を表します。また、資料を提供していただいた Dr. J.C. Guyot, Dr. J.T. Ganley ならびに Dr. W.L. Nighan の諸氏に感謝いたします。

— 参 考 文 献 —

- (1) DESHONG, J.A.: ANL-7030, (1965).
- (2) EERKENS, J.W., RUSK, J.R.: Northrop, AF33 (615)-5000, (1967).
- (3) ANDRIAKHIN, V.M., VELIKHOV, E.P., GOLUBEV, S.A., et al.: JETP Lett., 8, 214~216 (1968).
- (4) ANDRIAKHIN, V.M., VASIL'NOV, V.V., KRASIL'NIKOV, S.S., et al.: Zh. Eksp. Teor. Fiz., Pis. Red., 12[2], 83~85(1970).
- (5) ALLARIO, F., SCHNEIDER, R.T., LUCHT, R.A., et al.: "Research on Uranium Plasmas and Their Technological Applications", pp. 397~400 (Jan. 7~8, 1970), Univ. of Florida, Gainesville, Florida.
- (6) GUYOT, J.C., MILEY, G.H., VERDEYEN, J.T., et al.: ibid., pp. 357~368.
- (7) GUYOT, J.C., MILEY, G.H., VERDEYEN, J.T., et al.: Trans. Amer. Nucl. Soc., 13, 77~78 (1970).
- (8) GUYOT, J.C., MILEY, G.H., VERDEYEN, J.T.: ibid., 14, 135~136 (1971).
- (9) GUYOT, J.C., MILEY, G.H., VERDEYEN, J.T.: J. Appl. Phys., 42, 5379~5391(1971).
- (10) GANLEY, T., VERDEYEN, J.T., MILEY, G.H.: Trans. Amer. Nucl. Soc., 14, 133~134 (1971).
- (11) GANLEY, T., VERDEYEN, J.T., MILEY, G.H.: Appl. Phys. Lett., 18, 568~569 (1971).
- (12) GANLEY, T., VERDEYEN, J.T., MILEY, G.H.: 2nd Symp. Uranium Plasmas, Research and Applications, Atlanta, pp. 39~44 (Nov. 1971).
- (13) RHOAD, H.S., SCHNEIDER, R.T., ALLARIO, F.: ibid., pp. 53~57.
- (14) ANDRIAKHIN, V.M., VELIKHOV, E.P., VASIL'TSOV, V.V., et al.: Zh. Eksp. Teor. Fiz., Pis. Red., 15[11], 637~639 (1972).
- (15) THOM, K., SCHNEIDER, R.T.: AIAA, P. 71~110, (1971).
- (16) RUSSELL, G.R.: 2nd Symp. Uranium Plasmas, Research and Applications, Atlanta, pp. 31~38 (1971).
- (17) CHEN, C.J.: J. Appl. Phys., 42, 1016~1020 (1971).
- (18) THIESS, P.E., MILEY, G.H.: Trans. Amer. Nucl. Soc., 14, 134~135 (1971).
- (19) THIESS, P.E., MILEY, G.H.: 2nd Symp. Uranium Plasmas, Research and Applications, Atlanta, pp. 90~98 (1971).
- (20) ELLIS, W.H., IMANI, K.: ibid., pp. 45~52.
- (21) WILHELM, H.E.: J. Chem. Phys., 47, 4356~4365 (1967).
- (22) RUSSELL, G.R.: "Research on Uranium Plasmas and Their Technological Applications", pp. 53~62 (Jan. 7~8, 1970), Univ. of Florida.
- (23) DESHONG, J.A.: ANL-7310, (1967).
- (24) HERWIG, L.O.: Trans. Amer. Nucl. Soc., 7, 131~132 (1964).
- (25) GANLEY, T.: Internal Rep., Nucl. Eng. Progr., Univ. of Illinois, (Aug. 1, 1969).
- (26) RUSK, J.R., COOK, R.D., EERKINS, J.W., et al.: AFAL-TR-68-256, (1968).
- (27) NIGHAN, W.L., BENNETT, J.H.: Appl. Phys. Lett., 14, 240~243 (1969).
- (28) NIGHAN, W.L.: ibid., 15, 355~357 (1969).
- (29) NIGHAN, W.L.: Phys. Rev., A2, 1989~2000 (1970).
- (30) NIGHAN, W.L.: Appl. Phys. Lett., 20, 96~99 (1972).
- (31) 平野武彦: 応用物理, 42, 410~412 (1973).