

# ホローカソード He-Cd<sup>+</sup> レーザー放電中の Cd (II) 441.6 nm 線の減衰波形

荒 井 俊 彦

Decay of Cd (II) 441.6 nm Line Intensity in Hollow  
Cathode He-Cd<sup>+</sup> Laser Discharge

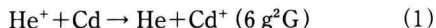
Toshihiko ARAI

## Abstract

The decays of the endlight intensity of Cd (II) 441.6 nm line and the He 2<sup>3</sup>S metastable state density in the hollow cathode He-Cd<sup>+</sup> laser discharge have been measured by utilizing the quasi-cw excitation. The measurement has been made under the near-optimum conditions for laser action. The ratios of electron and Penning excitation rates for the upper level of Cd (II) 441.6 nm laser line have been estimated. It is shown that the upper level of Cd (II) 441.6 nm laser line is populated not only by the Penning excitation process but also by the electron excitation process.

## 1. ま え が き

ホローカソード He-Cd<sup>+</sup> レーザーは Cd<sup>+</sup> イオン線による 441.6 nm (青), 533.7 nm, 537.8 nm (緑), 635.5 nm, 636.0 nm (赤) の光の三原色を同時発振でき、白色レーザーとなるので注目されている。これらの発振線のレーザー上準位に対する主要な励起過程は、次のように考えられている。すなわち、Cd (II) 635.5 nm, 636.0 nm レーザー線の上準位 6g<sup>2</sup>G は、式 (1) に示すように、主に He<sup>+</sup> イオンと Cd 原子との衝突による電荷交換過程<sup>1)</sup> によって励起される。



Cd(II) 533.7 nm, 537.8 nm レーザー線の上準位 4f<sup>2</sup>F は 6g<sup>2</sup>G 準位からの光カスケード過程<sup>2)</sup>、あるいは He<sup>+</sup> イオン (He<sup>+</sup> イオン) と Cd 原子との衝突による電荷交換過程<sup>3,4)</sup> で励起される。そして Cd(II) 441.6 nm レーザー線の上準位 5s<sup>2</sup>D は、式 (2) に示してあるように、主に He 準安定原子と Cd 原子との衝突によるペニング励起過程<sup>5,6)</sup> によって励起される。



一方、別の考え方として、式 (3) に示される電子による直接励起過程<sup>3,7)</sup> が重要であるとの報告もある。



このように 4f<sup>2</sup>F, 5s<sup>2</sup>D 準位への主要な励起機構はまだ十分に解明されていない状況である。

本研究の目的は Cd(II) 441.6 nm レーザー線の上準位に対する主要な励起過程がペニング励起によるか電子励起によるかを明らかにすることにある。

著者らは、以前にホローカソード He-Cd<sup>+</sup> レーザー (441.6 nm) の励起機構を解明するために Cd 原子密度を測定した<sup>8)</sup>。その結果レーザー発振の最適 Cd 原子密度は陽光柱 He-Cd<sup>+</sup> レーザーのものより約 1 桁大きいことがわかった。さらに準定常放電を利用して He 2<sup>3</sup>S 準安定原子密度と Cd(II) 441.6 nm 自然光強度の放電電流依存性を調べた<sup>9)</sup>。その結果 He 2<sup>3</sup>S 準安定原子密度と Cd(II) 441.6 nm 線強度は準定常電流 100 mA 以上では異なる変化を示すことが観測され、ペニング励起が支配的であることに疑問を生じた。本研究ではレーザー作用領域で準定常放電を用いてホローカソード He-Cd<sup>+</sup> レーザー Cd(II) 441.6 nm 線のエンドライト強度の減衰波形を観測し、励起機構を考察した。その結果 Cd (II) 441.6 nm レーザー線の上準

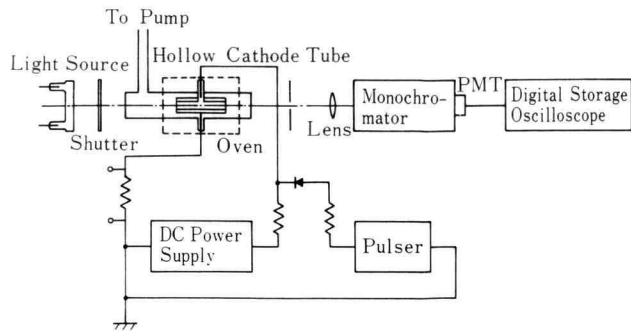


Fig. 1. Schematic diagram of experimental arrangement.

位に対する主要な励起過程がペニング励起だけでなく電子励起にもよることが示された。これらについて述べる。

## 2. 実験装置と方法

実験に用いた装置の構成を Fig. 1 に示す。ホローカソード放電管はビンアノードタイプの構造で、カソードの長さは 60 mm, 内径は 4 mm である。Cd 金属をカソードの内側に入れ, Cd 蒸気圧は放電管をオープンに入れ, そのオープンの温度を変えることにより制御された。放電の励起は直流放電 (2 mA) に方形波パルス (幅 80  $\mu$ s, 繰り返し周波数 1 pps, 立ち下がり時間 1  $\mu$ s) を重畳した。この方法によって, 実際の連続 He-Cd<sup>+</sup> レーザー放電と同じ条件をもつ準定放電を得ることができる。この場合, 放電電流が増加しても熱が発生しないので, Cd 蒸気圧は一定に保たれる。

このホローカソード He-Cd<sup>+</sup> レーザーの最適な放電条件下 (Cd 原子密度は  $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ <sup>8)</sup>) では, He 2<sup>3</sup>S 準安定原子の拡散係数とペニング電離断面積<sup>10)</sup>を用いて計算された He 2<sup>3</sup>S 準安定原子密度の時定数は 2 ~ 3  $\mu$ s となる。したがって最適 Cd 原子密度が 1 桁小さい陽光柱 He-Cd<sup>+</sup> レーザーで行われたように<sup>11)</sup>, Cd (II) 441.6 nm 線のエンドライト強度の減衰波形から電子衝突励起割とペニング励起割合を分離することは困難である。そこで本研究では最適 Cd 原子密度より低い Cd 原子密度領域で Cd (II) 441.6 nm 線のエンドライト強度の減衰波形および He 2<sup>3</sup>S 準安定原子密度の減衰を測定した。

He (I), Cd (II) 線のエンドライト強度の減衰波形はモノクロメータ, 光電子増倍管, シグナルアベレージング付デジタルストレージオシロスコープを用いて

観測した。準定常励起しゃ断後の He 2<sup>3</sup>S 準安定原子密度の減衰は, 光源として別の He 放電管を用いて吸収法で測定した。この測定に使用した波長は He (I) 388.9 nm 線である。

## 3. 実験結果と考察

Fig. 2 は He 圧力 10 Torr, Cd 原子密度  $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  のとき 100 mA の準定常電流と He (I) 388.9 nm 線のエンドライト強度の波形の一例を示している。準定常電流は直流 2 mA レベルから立ち上がり, 80  $\mu$ s の後 ( $T=0$ ) 1  $\mu$ s 以下の時定数で零レベルまで減少する。それから約 60  $\mu$ s の間アフターグロー領域になり放電が切れる。その後再び直流放電がつく。He (I) 388.9 nm 線のエンドライト強度  $I_{388.9}$  は約 1  $\mu$ s の時定数で零レベルにおちる。その上準位は主に電子励起過程によって生成されるので, 立ち下がり時間は測定回

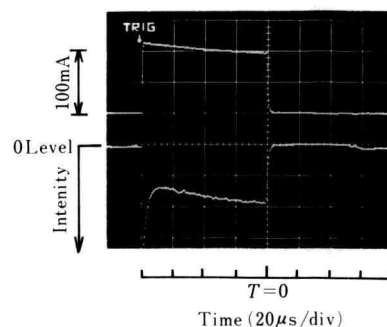


Fig. 2. Waveforms of a quasi-cw discharge current and endlight intensity of the He (I) 388.9 nm line at a He pressure of 10 Torr, a quasi-cw discharge current of 100 mA and a Cd atom density of  $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ .

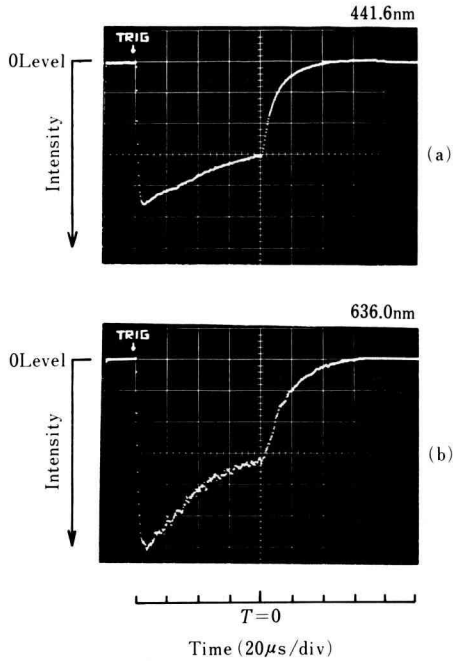


Fig. 3. Waveforms of endlight intensities of (a) the Cd (II) 441.6 nm line and (b) the Cd (II) 636.0 nm line at a He pressure of 10 Torr, a quasi-cw discharge current of 100 mA and a Cd atom density of  $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ .

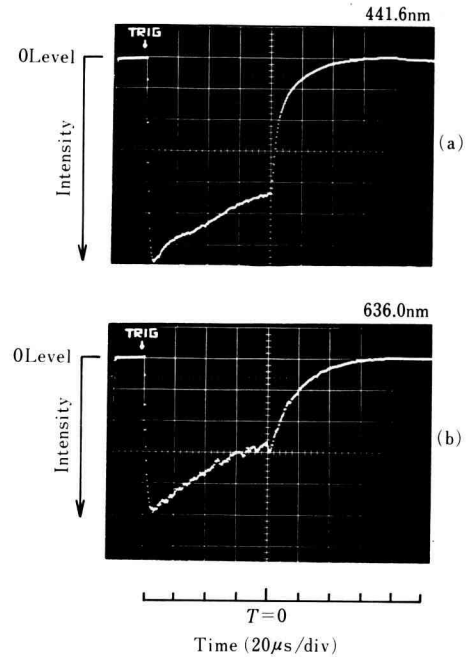


Fig. 4. Waveforms of endlight intensities of (a) the Cd (II) 441.6 nm line and (b) the Cd (II) 636.0 nm line at a He pressure of 10 Torr, a quasi-cw discharge current of 200 mA and a Cd atom density of  $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ .

路の応答時間に等しい。

Fig. 3 および Fig. 4 は Fig. 2 と同じ He 圧力, Cd 原子密度のとき準定常電流 100 mA および 200 mA の場合に得られた Cd (II) 441.6 nm 線, Cd (II) 636.0 nm 線のエンドライト強度の波形を示したものである。100 mA の場合, Cd (II) 441.6 nm 線のエンドライト強度  $I_{441.6}$  は 100 mA 近くのレベルからゆっくり減少する。しかし 200 mA の場合,  $I_{441.6}$  は準定常励起しゃ断後急激にあるレベルまで低下し, その後ゆっくり減少する。このような現象は数 10 mA の領域では顕著に現われず, 100 mA (16 mA/cm) 以上の電流で生じてくる。一方 Cd (II) 636.0 nm 線のエンドライト強度  $I_{636.0}$  は 100 mA および 200 mA のいずれの場合にも定常レベルからゆっくり減少する。

Fig. 5 は半対数グラフ上に描いた Fig. 4 の準定常励起しゃ断後の  $I_{441.6}$ ,  $I_{636.0}$  と He 2<sup>3</sup>S 準安定原子密度  $N_{\text{He}}^*$  の減衰部を示している。  $T = 15 \mu\text{s}$  以上の領域では,  $I_{441.6}$  と  $N_{\text{He}}^*$  の減衰はほぼ一致し, ペニング励起が重要であることを示している。また  $I_{441.6}$  の減衰は電荷

交換過程で励起されると考えられている  $I_{636.0}$  の減衰ともほぼ一致している。したがってこの領域では,  $I_{441.6}$  の減衰はペニング励起あるいは電荷交換励起のような長寿命の粒子による励起過程の存在を示している。

$T = 15 \mu\text{s}$  以上の領域で,  $I_{441.6}$  の主要な励起過程は電荷交換励起によらずペニング励起によることが次のことから説明できる。Fig. 5 で示される  $I_a$  は  $T = 15 \mu\text{s}$  以降の  $I_{441.6}$  を  $T = 0$  まで外挿したときに得られる値である。Fig. 6 は  $I_a$  と  $N_{\text{He}}^*$  の電流依存性を示したものである。 $I_a$  は 100 mA 以上で飽和し,  $N_{\text{He}}^*$  と同じ相対変化を示す。一方,  $T = 0$  での  $I_{636.0}$  は電流とともに直線的に増加した。したがって  $T = 15 \mu\text{s}$  以上の領域では, 441.6 nm 線の上準位 5s<sup>22</sup>D 準位は主にペニング励起過程によって励起される。 $I_a$  の値は次式で与えられる。

$$I_a = K \frac{P_0}{A} \quad (4)$$

ここで  $K$  は定数,  $P_0$  は準定常励起時のペニング励起

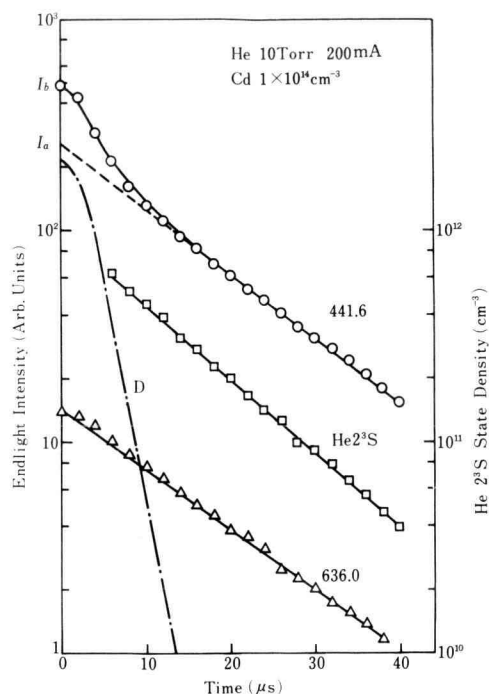


Fig. 5. Decay parts of Cd (II) 441.6 nm and Cd (II) 636.0 nm endlight intensities shown in Fig. 4, and that of He 2<sup>3</sup>S metastable state density. Curve D shows the difference of  $I_{441.6}$  and dashed line.

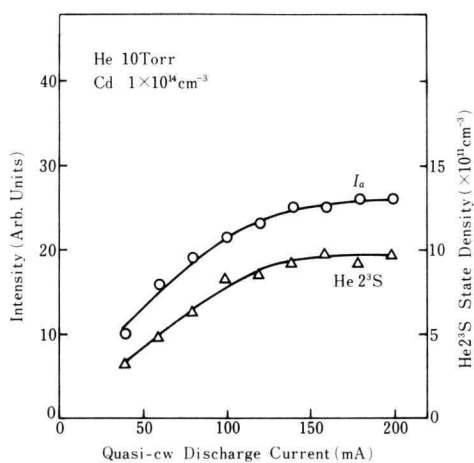


Fig. 6.  $I_a$  and He 2<sup>3</sup>S metastable state density as a function of quasi-cw discharge current.

割合,  $A$  は  $A$  係数である。

Fig. 5 で示される  $I_{441.6}$  と破線の差を表す曲線  $D$  は急激に減衰し, 測定回路の応答時間に等しいので電子励起割合の減衰を示していると考えられる。 $T=0\sim 15$  μs の領域で,  $I_{441.6}$  が  $I_{388.9}$  よりゆるやかに減少しているのは, 測定回路の応答に従って減衰する電子励起割合と  $N_{He^*}$  の時定数と一致するベニング励起割合とが重なっているためである。

そこで準定常励起時の  $I_{441.6}$  の値  $I_b$  (Fig. 5 の  $I_b$ ) が次式で与えられると仮定する<sup>11)</sup>。

$$I_b = K \frac{M_0 + P_0}{A + N_{e0} D_c} \quad (5)$$

ここで  $M_0$  は準定常励起時の電子励起割合,  $N_{e0} D_c$  は準定常励起時の電子衝突による脱励起の項である。最初式 (5) の  $N_{e0} D_c$  を無視すると, 電子励起割合とベニング励起割合の比は式 (4), (5) より次式で与えられる。

$$M_0/P_0 = (I_b - I_a)/I_a \quad (6)$$

Fig. 7 は  $I_a$ ,  $I_b$  の測定値から求めた  $M_0/P_0$  と準定常電流との関係を示す。 $M_0/P_0$  は電流 100(16.7), 150(25), 200 mA (33.3 mA/cm) においてそれぞれ 0.2, 0.5, 0.8 であった。なお  $M_0/P_0$  の測定値は電子励起割合とベニング励起割合の分離可能な Cd 原子密度のときに得られたものである。

レーザー発振の最適 Cd 密度および最適放電電流での条件下では,  $M_0/P_0$  は次のように推定される。Fig. 8

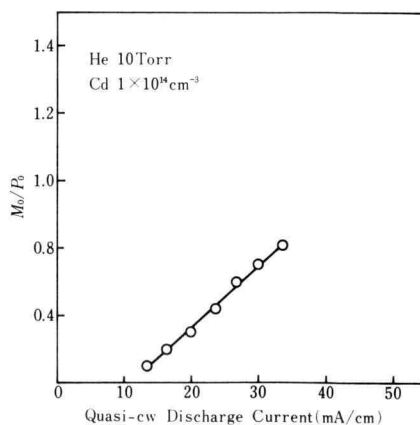
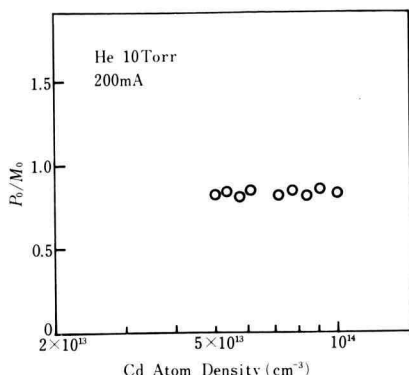


Fig. 7.  $M_0/P_0$  as a function of quasi-cw discharge current.


 Fig. 8.  $M_0/P_0$  as a function of Cd atom density.

は  $M_0/P_0$  と Cd 原子密度との関係を示したものである。Fig. 8 において  $M_0/P_0$  が Cd 原子密度に対してはほぼ一定であることから、レーザー発振の最適 Cd 原子密度のときにも  $M_0/P_0$  は一定であると考えられる。レーザー発振は放電電流 10 mA/cm 以上で生じ、その最適電流は 40~50 mA/cm と報告されている<sup>7)</sup>。Fig. 7 から  $M_0/P_0$  は電流とともに直線的に増加するので、最適電流 40~50 mA/cm のときの  $M_0/P_0$  を推定すると  $M_0/P_0 \approx 1 \sim 1.2$  となる。したがって  $N_{e0}D_c$  を無視したとき、レーザー発振の最適放電条件下での電子励起割合は 50~60% と評価される。この値は kim-Hung 等<sup>3)</sup> による電子励起割合が 60%、ペニング励起割合が 40% の結果とほぼ一致している。この結果は Cd(II) 441.6 nm レーザー線の上準位がペニング励起過程だけでなく電子励起過程によっても励起されることを示している。

$N_{e0}D_c$  が無視できない場合、 $M_0/P_0$  は上の値より大きくなり、電子励起割合も大きくなる。

#### 4. あとがき

本研究では、準定常放電励起によるホローカソード He-Cd<sup>+</sup> レーザー放電中の Cd(II) 441.6 nm レーザー

線のエンドライト強度を観測し、レーザー上準位に対する電子励起割合とペニング励起割合の比を決定した。この結果、上準位の励起過程において低電流領域ではペニング励起が主要であるが、電流の増加とともに電子励起の寄与が増加していくことが明らかにされた。

終りに本研究に対し日頃激励を与えて下さった明治大学工学部荻本忠一名誉教授並びに同工学部の仁平幸治教授に心からお礼申し上げます。また種々のご助言を頂いた名古屋大学工学部後藤俊夫教授、職業訓練短期大学校飯島徹穂教授に心から感謝致します。最後に実験に従事した当研究室の昭和 60 および 61 年度卒業研究生の諸君に対し感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) G.J. Collins, R.C. Jensen and W.R. Bennet, Jr.: Appl. Phys. Lett. **19** (1971) 125.
- 2) G.J. Collins: J. Appl. Phys. **44** (1973) 4633.
- 3) W. Kim-Hung and C.G. Morgan: Proc. Int. Conf. on Gas Discharges (1983 Dusseldorf) 216.
- 4) P. Baltayan, J.C. Pebay-Peroula and N. Sadaghi: J. Phys. B: At. Mol. Phys. **18** (1985) 3615.
- 5) L.A. Riseberg, W.F. Park and L.D. Scheerer: Phys. Rev. **A8** (1973) 1962.
- 6) M.D. Ainsworth and A.I. McIntosh: J. Phys. D: Appl. Phys. **16** (1983) L 189.
- 7) A.I. McIntosh and J.R. Grace: Aust. J. Phys. **32** (1979) 561.
- 8) T. Arai, K. Nihira, T. Iijima and T. Goto: J. Phys. D: Appl. Phys. **20** (1987) 414.
- 9) 荒井俊彦: 幾徳工業大学研究報告 B-11 (1987) 77.
- 10) S. Inaba, T. Goto and S. Hattori: J. Phys. D: Appl. Phys. **15** (1982) 421.
- 11) T. Goto: J. Phys. D: Appl. Phys. **15** (1982) 35.