

# 細管 Ar-Kr レーザープラズマにおける Ar(II) 及び Kr(II) 線の発光強度

間 順一\*・後藤 みき\*\*・荒井 俊彦\*\*

Intensities of Spontaneous Emission at Ar(II) and Kr(II)  
Lines in Narrow Tube Ar-Kr Laser Plasma

Jun-ichi HAZAMA, Miki GOTO and Toshihiko ARAI

## Abstract

The intensities of the 488.0, 514.5 nm Ar(II) laser lines, and 647.1 nm Kr(II) laser line in spontaneous emission were measured as a function of the ratio of Kr pressure to total Ar-Kr pressure in narrow tube Ar-Kr discharge laser plasma. The relationship between gas concentration and Ar(II) and Kr(II) intensities was obtained. Moreover, from the analysis of the rate equation for the Ar and Kr upper laser level populations, the intensities of Ar(II) and Kr(II) laser lines were shown to be proportional to the fractional gas concentrations.

## 1. ま え が き

光三原色を同時に発振する白色レーザーには、おもにホローカソード型 He-Cd<sup>+</sup> レーザー<sup>1,2)</sup>、陽光柱型 He-Se<sup>+</sup> レーザー<sup>3)</sup>の金属蒸気レーザーと Ar-Kr イオンレーザー<sup>4)</sup>の希ガスイオンレーザー等がある。金属蒸気レーザーの場合、金属蒸気の制御及び電極からのスパッタリング等に問題がある。一方、希ガスイオンレーザー<sup>4)</sup>は取り扱いが容易ではあるが、直径約 5 mm の放電管に数十 A の電流を流すために金属蒸気レーザー(数百 mA)と比較して大きな入力電力を必要とする。それを解決する一つの方法として、希ガスイオンレーザーの放電管の管径を小さくすることにより低い放電電流でレーザー作用に必要な電流密度が得られる。さらに、レーザー装置の小型化も可能と思われる。そこで我々は小型で入力電力の小さい Ar-Kr イオン白色光レーザーを開発するための第一段階として、管径 1 mm の白色レーザー用 Ar-Kr 放電プラズマ中の Ar-Kr の混合比を変化させたときの、Ar(II)

488.0 nm (青), Ar(II) 514.5 nm (緑), Kr(II) 647.1 nm (赤) レーザー線の自然放射強度を測定した。それらの結果について述べる。

## 2. 実験装置及び測定方法

実験に用いた装置の構成を Fig. 1 に示す。レーザー管の細管部は大電流で連続放電をさせるため、材質は耐熱、熱伝導率の良いベリリア磁器 (BeO) を使用している。細管部の内径は 1 mm、長さは 36 mm である。また細管部には放熱フィンが取り付けられており、ファンで強制空冷できるようにしてある。カソードはコイル状直熱型バリウムを使用し、この部分は封入ガスの吸

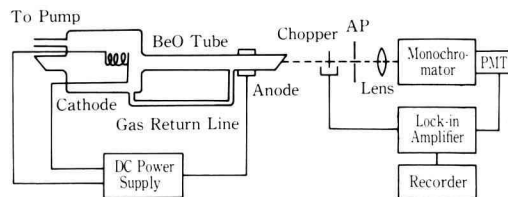


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental arrangement.

1994 年 9 月 16 日受理

\* 電気工学専攻院生

\*\* 電気工学科

着により希ガスの減少を防ぐためにガス溜めとして管径を太くしてある。大電流放電のためにカソード部とアノード部とでガスの圧力差を生じるので、それをさけるためにカソード部とアノード部を細管とは別に接続し、ガス帰還路を付けてある。レーザー管へのAr-Krガス封入は、真空排気装置を使って十分真空度を高めた上で ( $\times 10^{-7}$  [Torr] 程度)、任意の圧力の Ar-Kr ガスを封入して測定した。

Ar(II) 488.0 nm, 514.5 nm 及び Kr(II) 647.1 nm 線の管軸方向に放射する自然放射強度はモノクロメータ、光電子増倍管、ロックインアンプを用いて測定した。

### 3. 実験結果と考察

Fig. 2 はガス圧力 1 Torr 一定とし、Ar 及び Kr の単一ガスを用いたとき、Ar(II) 488.0, 514.5 nm レーザー線と Kr(II) 647.1 nm レーザー線の自然放射強度の電流依存性を一緒に示したものである。Ar(II), Kr(II)

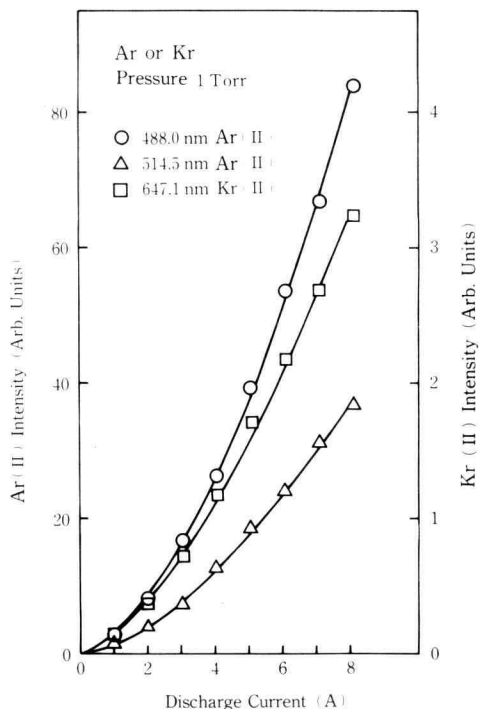


Fig. 2. Relative intensities of spontaneous emission of Ar(II) and Kr(II) lines as a function of discharge current in Ar and Kr discharges.

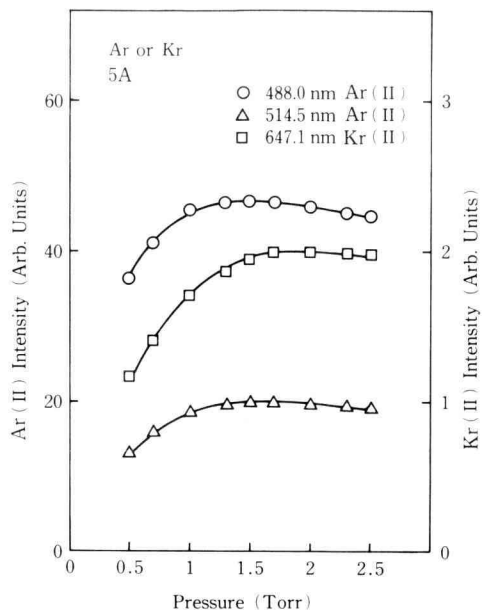


Fig. 3. Relative intensities of spontaneous emission of Ar(II) and Kr(II) lines as a function of gas pressure in Ar and Kr discharges.

線の自然放射強度は放電電流とともに急激に増加する。これらの強度は放電電流の二乗にほぼ比例して増加している。

Fig. 3 は放電電流 5A 一定とし、Ar ガスを封入したときの Ar(II) 線自然放射強度の Ar 圧力依存性と Kr ガスを封入したときの Kr(II) 線自然放射強度の Kr 圧力依存性を一緒に示したものである。Ar(II) 488.0, 514.5 nm 線自然放射強度は Ar 圧力とともに増加し、1.5 Torr 付近で最大を示す。Kr(II) 647.1 nm 線自然放射強度は Ar の場合とほぼ同じ圧力で最大を示す。Ar(II), Kr(II) レーザー線の上準位への励起確率は電子エネルギーによって与えられ、封入圧力  $P$  と管の内径  $D$  の積によって決定される。したがってレーザー細管部における利得を上げるため、 $PD$  積の値に最適値が存在する。Ar イオンレーザーの場合、実験的に  $PD = 0.5 \sim 1$  Torr $\cdot$ mm が求められている<sup>5)</sup>。この関係は管径 5 $\sim$ 15 mm のときに示されたもので、我々の用いた細管 (1 mm) では Ar(II), Kr(II) 線の自然放射強度は Ar, Kr とも  $PD = 1.5$  Torr $\cdot$ mm のとき最適となることがわかった。

Fig. 4 は全 (Ar-Kr) 圧力 1.5 Torr, 放電電流 5A 一定のとき Ar(II), Kr(II) 線の自然放射強度を  $P_{Kr}/P_{Ar}$

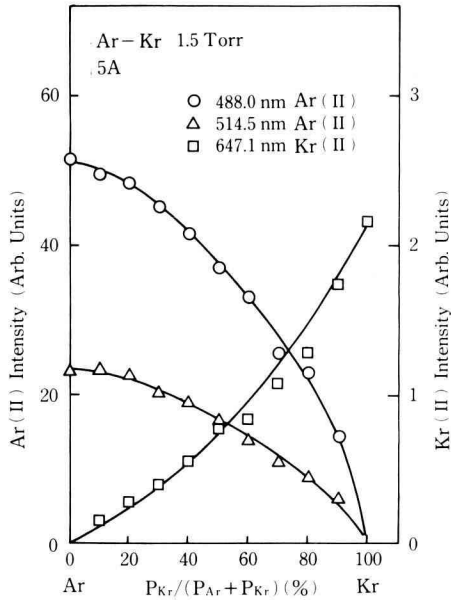


Fig. 4. Relative intensities of spontaneous emission of Ar(II) and Kr(II) lines as a function of  $P_{Kr}/(P_{Ar} + P_{Kr})$ .

+ $P_{Kr}$ ) の関数として示したものである。ただし、 $P_{Ar}$ 、 $P_{Kr}$  はそれぞれ Ar, Kr の圧力である。Ar(II) 線の強度は Kr ガス圧の分圧比の増加とともに緩やかに減少するのに対し、Kr(II) 線の強度は急激に増加している。Kr(II) 647.1 nm 線強度は Ar(II) 488.0 nm, 514.5 nm 線強度と比較してかなり弱い。この結果、Ar-Kr 放電により白色光レーザーを得るためには、Kr ガス圧の分圧比を大きくする必要がある。

Fig. 5 は Ar と Kr のエネルギー準位図をまとめたものである。Ar イオン及び Kr イオンレーザーは電子衝突によって励起がなされる。この励起の構造は直接レーザー上準位に励起する一段励起のものと、まず、イオンの基底準位まで励起してから、次にレーザー上準位へ励起する二段励起のものとがある。レーザー上準位は中性基底準位より  $Ar^+$  で約 34 eV,  $Kr^+$  で約 31 eV と高エネルギー準位にある。したがって、レーザー上準位への励起はパルス放電では一段励起を起こしやすいが、連続放電では二段励起の反応の方が主要と言われている<sup>5)</sup>。Ar イオンレーザーについてこの二段励起の過程は次式のように表される。

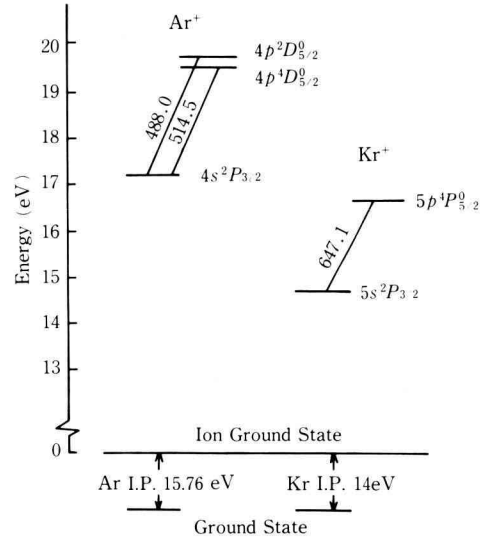
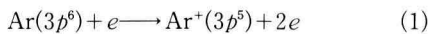
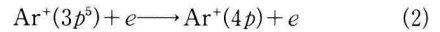


Fig. 5. Energy level diagram of simply ionized Ar and Kr (wavelengths in nm).



$Ar^+(3p^5)$  基底準位の  $Ar^+$  は中性 Ar 原子と電子との衝突によって生成され、そして管壁への拡散によって消滅すると仮定する。したがって、 $Ar^+(3p^5)$  基底準位に関するレート方程式は次のようになる。

$$\frac{dN_a^+}{dt} = n_e N_a S_a - \frac{1}{\tau_a} N_a^+ \quad (3)$$

ここで  $N_a^+$  は基底準位の  $Ar^+$  密度、 $n_e$  は電子密度、 $N_a$  は中性 Ar 原子密度、 $S_a$  は電子衝突による電離係数、 $\tau_a$  は基底準位の  $Ar^+$  の寿命時間である。

$Ar^+(4p)$  レーザー上準位の  $Ar^+$  は基底準位の  $Ar^+$  と電子の衝突によって生成され、そして放射によって消滅すると仮定する。したがって、 $Ar^+(4p)$  レーザー上準位に関するレート方程式は次のようになる。

$$\frac{dN_{ua}^+}{dt} = n_e N_a^+ M_a - \frac{1}{\tau_{ua}} N_{ua}^+ \quad (4)$$

ここで  $N_{ua}^+$  は  $Ar^+$  レーザー上準位密度、 $M_a$  は電子衝突励起による  $Ar^+$  レーザー上準位の励起係数、 $\tau_{ua}$  はレーザー上準位の  $Ar^+$  の放射の寿命時間である。

定常状態で、式 (3)、(4) により、レーザー上準位密度は次のように表される。

$$N_{ua}^+ = n_e^2 N_a S_a M_a \tau_a \tau_{ua} \quad (5)$$

同様な方法で  $\text{Kr}^+$  レーザー上準位密度は次式で示される。

$$N_{uk}^+ = n_e^2 N_k S_k M_k \tau_k \tau_{uk} \quad (6)$$

ここで  $N_{uk}^+$  は  $\text{Kr}^+$  レーザー上準位密度,  $N_k$  は中性 Kr 原子密度,  $S_k$  は電子衝突による電離係数,  $M_k$  は電子衝突励起による  $\text{Kr}^+$  レーザー上準位の励起係数,  $\tau_k$  は基底準位の  $\text{Kr}^+$  の寿命時間,  $\tau_{uk}$  はレーザー上準位の  $\text{Kr}^+$  の放射の寿命時間である。

Fig. 2 の  $\text{Ar}^+$  及び  $\text{Kr}^+$  レーザー線の放射強度の測定結果は式 (5), (6) から定性的に次のように説明できる。電子温度は放電電流に依存せず, 電子密度は放電電流に比例することから, 式 (5), (6) は次式のようになる。

$$N_{ua}^+ \sim n_e^2 \sim I^2 \quad (7)$$

$$N_{uk}^+ \sim n_e^2 \sim I^2 \quad (8)$$

ここで  $I$  は放電電流である。したがってレーザー上準位からの放射強度は放電電流の二乗にほぼ比例することから, レーザー上準位への励起は一段励起でなく二段励起が主要と考えられる。

次に Ar-Kr 放電中の電子温度を計算してみる。単原子ガスの混合体においては Dorgelo 等による Schottky 理論の拡張がある<sup>6)</sup>。Young<sup>7)</sup> はこれを He-Ne 放電に適用した。Young と同じ方法で Ar-Kr 放電に適用した。電子温度  $T_e$  の算出式は次式に示される。

$$\begin{aligned} f_1 c_1^2 (PD)^2 (eV_1/kT_e)^{-\frac{1}{2}} \left[ 1 + \frac{1}{2} (eV_1/kT_e) \right] \exp(-eV_1/kT_e) \\ + f_2 c_2^2 (PD)^2 (eV_2/kT_e)^{-\frac{1}{2}} \left[ 1 + \frac{1}{2} (eV_2/kT_e) \right] \exp(-eV_2/kT_e) \\ = \left[ (2/300 \pi)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{1}{2.4} \right)^2 \left( \frac{e}{m} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{-1} = 1.72 \times 10^{-7} \text{ V}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-1} \end{aligned} \quad (9)$$

ここで,  $c_1^2 = \frac{a_1 V_1^{1/2}}{b_1 P}$ ,  $c_2^2 = \frac{a_2 V_2^{1/2}}{b_2 P}$  で与えられ,  $V_1, V_2$  は Ar, Kr の電離電圧,  $a_1, a_2$  は Ar, Kr の初期勾配の電離係数,  $b_1, b_2$  は  $\text{Ar}^+, \text{Kr}^+$  の混合ガス中の移動度定数,  $P$  は全ガス圧,  $f_1$  は  $\text{Ar}/(\text{Kr} + \text{Ar})$  の混合比 ( $f_1 + f_2 = 1$ ),  $D$  は管直径,  $k$  はボルツマン定数,  $e/m$  は電子の比電荷である。

式 (9) に各量の数値<sup>8,9)</sup> を代入して Ar-Kr 放電に対する電子温度の計算結果を Fig. 6 に示す。  $PD = 1.5 \text{ Torr} \cdot \text{mm}$  の条件のとき Ar 100% から Kr 100% までの混合比の変化に対し, 電子温度は約 20% 変化する。

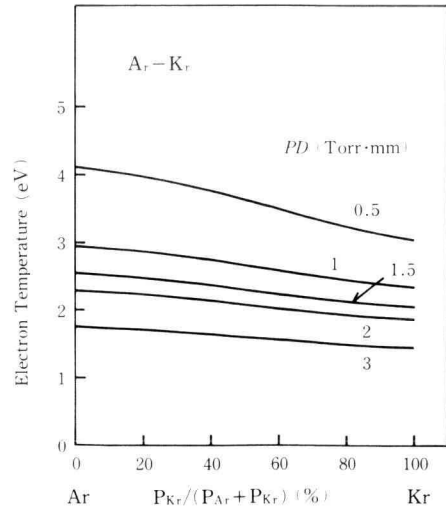


Fig. 6. Electron temperature as a function of  $P_{\text{Kr}}/(P_{\text{Kr}} + P_{\text{Ar}})$  for various values of  $PD$ .

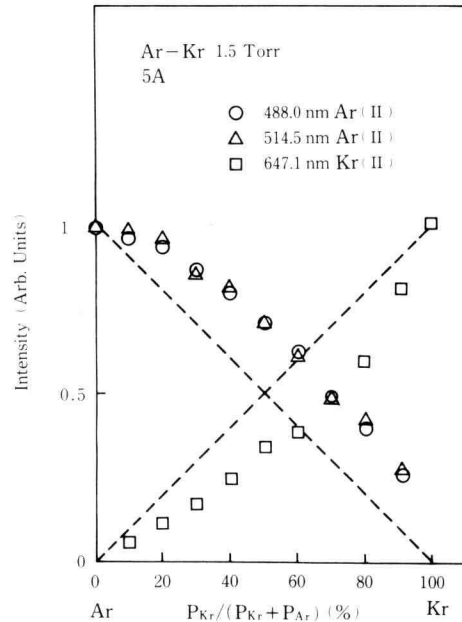


Fig. 7. Ar(II) and Kr(II) intensities shown in Fig. 4. Intensities are normalized to unity. The calculated results are shown by the dashed lines.

したがって Ar-Kr 混合放電での電子温度の値はほぼ一定とみなせる。放電電流, 全ガス圧一定のとき, Ar-Kr 放電での Ar(II), Kr(II) 線の強度は式 (5), (6) からそれぞれ  $N_a, N_k$  の混合比に比例することになる。

Fig. 7 に Fig. 4 の Ar(II), Kr(II) 線の自然放射強度の最大強度を 1 に規格化して描いたものと上述の方法で計算された Ar(II), Kr(II) 線強度を破線で示した。この結果, 計算値は測定値の傾向とほぼ一致している。Ar(II), Kr(II) 線のレーザー上準位の密度はそれぞれ Ar と Kr ガスの混合比にほぼ比例することが示された。

#### 4. あ と が き

管径 1 mm の細管 Ar 及び Kr 放電での Ar(II), Kr(II) レーザー線の自然放射強度の最適圧力は両方とも約 1.5 Torr で得られ, 管径の太い放電管のものより高いことがわかった。Ar-Kr 混合放電で Ar(II), Kr(II) レーザー線の自然放射強度は, それぞれ Ar, Kr 濃度に比例することと, Kr(II) レーザー線の自然放射強度は Ar(II) レーザー線の自然放射強度に比較してかなり弱いことから, 白色レーザー光を得るためには Kr の混合比を大きくする必要があることがわかった。

終わりに試作レーザー管を提供して下さった東芝

(株) 生産技術研究所主幹の後藤達美氏に心から感謝いたします。また, 実験に従事した当研究室の平成 5 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) K. Fujii, T. Takahashi and Y. Asami: IEEE J. Quantum Electron. **QE-11** (1975) 111.
- 2) W. Kin-Hung and C.G. Morgan: J. Phys. D: Appl. Phys. **16** (1983) L1.
- 3) H.P. Popp and E. Schmidt: IEEE J. Quantum electron. **QE-15** (1979) 840.
- 4) S.A. Ahmed and W.M. Keefe: J. Appl. Phys. **45** (1974) 182.
- 5) C.S. Willett: *Introduction to Gas Lasers: Population Inversion Mechanisms* (Pergamon Press, London, 1974).
- 6) H.B. Dorgelo, H. Alting and C.J. Boers: Physica Haag. **2** (1935) 959.
- 7) R.T. Young: J. Appl. Phys. **36** (1965) 2324.
- 8) A. Von Engel: *Ionized Gases* (Oxford Press, 1964).
- 9) S.C. Brown: *Basic Date of Plasma Physics* (MIT Press, 1966).