レーザーレーター

X線予備電離KrFレーザー

—予備電離電子数のレーザー出力に及ぼす影響—

住田 真*・鎗木雅裕*
小原 実*・藤岡知夫*

(昭和54年7月20日 受理)

KrF Laser with x-ray Preionization

—Effect of Initial Electron Number Density on Laser Energy—

Shin SUMIDA,* Masahiro KABURAGI,*
Minoru OBARA,* and Tomoo FUJIOKA*

(Received July 20, 1979)

Output performance of x-ray preionized KrF laser is reported. Flash x-ray generator used in this work produced 1.5×10^8 electrons/cm³ in laser gas. Output energy of 140 mJ obtained with x-ray preionization, indicating an electrical efficiency of 0.93% is greater than 70 mJ obtained with wire corona preionization. KrF laser emission was detected from the initial electron density of about 10^6 /cm³ and the laser energy was found to increase with increasing the initial electron number density.

1. はじめに

希ガスハライドレーザーは、紫外域の高効率、高出力レーザーである。これまで、このレーザーの特性改善の研究が、種々な方面からなされてきた。その応用分野としては、同位体分離¹⁾、色素レーザー励起²⁾、誘導ラマン散乱³⁾、プラズマ生成⁴⁾などがあり、有用である。レーザー励起方式としては、電子ビーム励起⁵⁾、電子ビーム制御放電励起⁶⁾、UV(コロナ、スパーク)予備電離自己持続型放電励起^{7,8)}などが開発されているが、それぞれに特徴がある。また、それぞれの励起技術が発展段階にあるので今後の発展が期待できる。

大体積、高圧力エキシマレーザーの励起には電子ビーム直接励起が現在では最も有効である。が、放電励起型エキシマレーザーは小型で比較的高ピークパワーで発生でき、かつ高速繰返し動作も可能である。現在、XeFレーザーで2 kHzの動作が報告されている⁹⁾。予備電離方式としてもスパーク放電、コロナ放電によるUV光が広く用いられている。UV光は、レーザーガスに対する透過力が弱く、高圧力、大体積のレーザーガスを均一に予備電離するのはむずかしい。また、最近の封じ切り型エキシマレーザーの長寿命動作には、スパーク、コロナ放電は不適である。なぜなら、レーザーガス中でのスパーク、コロナ放電は、レーザーガスの劣化を促進する

* 慶応大学工学部 (〒223 横浜市港北区日吉3-14-1)

* Keio University, (3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-shi, 223)

からである。これらの欠点を補なう予備電離技術として、著者らはX線を用い、その有効性を実証した。¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾ X線は電子ビーム、UV光より大きな透過力を有し、高圧力大体積のレーザーガスを一様に電離することができる。X線源はレーザーガスセルの外部にあるので、予備電離源によるレーザーガスの劣化がほとんどない。

本論文では、X線予備電離KrFレーザーの予備電離電子数とレーザー特性との関係を報告する。また、通常のワイヤコロナ予備電離方式とX線予備電離方式とを比較すると、後者の方が優れていることが明らかにされた。

2. X線の特性¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾

2.1 X線の発生機構とスペクトル

X線は、高速度の電子の流れ、すなわち電子線が、急激に減速を受けるときに発生する。このように高速荷電粒子が物質を構成する原子核の強い電界により大きな減速を受けて、その運動エネルギーの一部を電磁波として放出する過程を、制動放射という。この減速の程度は、個々の電子によって異なるため、制動放射によるX線は連続スペクトルを有するので、このX線を白色X線という。

X線の照射線量、スペクトルは、管電圧によって変化する。また、陽極ターゲットの原子番号(z number)が大きいほどX線の発生効率、高くなる。したがって、我々は陽極ターゲットに、タングステン(W, z=74)を使用した。

2.2 X線と物質との相互作用

X線と物質との相互作用のうち主なものは、次の4つである。¹⁴⁾

- 1) 光電効果 (photoelectric effect)
- 2) コンプトン効果 (Compton effect)
- 3) トムソン効果 (Thomson effect)
- 4) 電子対生成 (pair creation)

これらの相互作用の衝突断面積は、X線のスペクトルに強く依存する。我々の実験では、100 keV以下のX線をレーザーガス(He, Kr, F₂)

に照射しているので、主な相互作用は、光電効果とコンプトン効果である。

2.2.1 光電効果

光電効果とは、物質が光やX線のエネルギーを吸収し電子を放出する現象である。

光子エネルギー $h\nu$ が電子の結合エネルギー E_b より大きい場合、この光量子が電子を原子の外に追い出す。そしてX線のエネルギー $h\nu$ は、消滅する。原子の外に放出された電子の運動エネルギー E は

$$E = h\nu - E_b \quad (1)$$

となる。ここで E_b は原子に対する電子の結合エネルギー (ionization potential) で、次式のようにになる。

$$E_b = 13.6 \frac{(z - \sigma)^2}{n^2} \quad [\text{eV}] \quad (2)$$

z : 原子番号

σ : シャーヘイ定数

n : それぞれの電子軌道の主量子数

(K殻の電子に対しては、 $n=1$, $\sigma=3$)
(L殻の電子に対しては、 $n=2$, $\sigma=5$)

光電子のエネルギー E は非常に大きいので、これが多くの2次電子を生成する。

2.2.2 コンプトン効果

光子のエネルギーが電子の結合エネルギーに比して十分大きくなって、電子を自由電子とみなすことができるようになると、光子は電子により非弾性散乱をうける。これをコンプトン効果という。

電子の運動エネルギーに転化する量 E は、次式で表わされる。

$$E = h\nu - h\nu' \quad (3)$$

$h\nu$: 衝突前の量子エネルギー

$h\nu'$: 衝突後の量子エネルギー

コンプトン散乱の衝突断面積は、量子力学によって精密に計算され、電子1個あたりの衝突断面積 σ_c はクライン・仁科の式で表わされる。¹⁵⁾

$$\sigma_c = 2\pi \left(\frac{e^2}{mc^2} \right)^2 \left[\frac{1+\alpha}{\alpha^2} \left\{ \frac{2(1+\alpha)}{1+2\alpha} - \frac{1}{\alpha} \ln(1+2\alpha) \right\} \right]$$

$$+\frac{1}{2\alpha} \ln(1+2\alpha) - \frac{1+3\alpha}{(1+2\alpha)^2} \quad (4)$$

$$\text{ここで } \alpha = \frac{h\nu}{mc^2}$$

2.3 X線の減衰と吸収

細いX線束が厚さ x の吸収体を通過すると、通過後の強度 I は、

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (5)$$

で減衰する。ここで I_0 は吸収体に入射する前のX線の強度であり、 μ は全吸収係数で、前に述べた4つの主な効果の吸収係数の和である。

$$\mu = \tau + \sigma_c + \sigma_t + \chi \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (6)$$

τ : 光電効果による吸収係数

σ_c : コンプトン効果による吸収係数

σ_t : トムソン効果による吸収係数

χ : 電子対生成による吸収係数

この全吸収係数は、光子のエネルギーによって変化する。Fig. 1にHe, Kr, F, Nの全吸収係数を示す。¹⁸⁾ Krは、14.323keVにK吸収端があり、

Fig.1 Absorption coefficient as a function of photon energy for various elements.

$$n = 2.69 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

この付近では他のガスより吸収係数が大きくなっている。

2.4 白色X線のスペクトル

我々のX線装置から発生するX線は、連続スペクトルをもつ白色X線である。このような白色X線の線質を正確に表わすには、スペクトルの形で表わす以外にないが、スペクトルを測定するには、X線分光計や波高分析器のような装置を必要とするうえ、スペクトルの全形を簡単な数式で表わすことができない。そこで便宜上平均的な波長とか、光量子エネルギーの平均値という概念を用い、連続スペクトルを単色X線に置き換えて考えるのが一般的である。本実験においても、X線の吸収係数はこの平均光量子エネルギーにおける値を用いた。

2.5 物質のW値

X線は、前述した相互作用によって物質を電離する。しかし物質によって1組のイオン-電子対を作るのに必要な平均エネルギーが違う。これをW値といい典型的なものをTable 1に示す。レーザーガスのW値は、He, Kr混合ガス中でのペニング効果を考慮して決定しなければならない。すなわち、Heの第一準定状態 2^1S が19.7eV、 (2^3S) が20.7eVであるのに対して、Krの電離電圧は13.9eVである。したがって

Table 1 Average energy (w-value) required to produce an electron-ion pair.

Matter	Wvalue (eV)	Reference
He	46.0	(15)
Ne	36.8	(15)
Ar	26.4	(15)
Kr	24.1	(15)
Xe	21.9	(15)
Air	33.7	(17)
CO ₂	32.9	(14)

Fig. 2 Schematic of x-ray preionized KrF laser.

なるペニング反応を起こす。これにより純粋なHeに比べてW値が低くなる。このW値の減少の割合は、Kr濃度0.1%以上の混合ガスで、イオン化が純粋なHeの1.48倍になる¹⁹⁾ことからW値は、

$$46.0 \times \frac{1}{1.48} = 31 \quad [\text{eV}] \quad (8)$$

とした。

レーザーガスに吸収されたX線のエネルギーをこのW値で割れば、レーザーガス中に生成される電子-イオン対数が求まる。

3. 実験

Fig. 2に実験装置の概略図を示す。実験装置は、フラッシュX線発生装置とレーザー装置から構成される。

3.1 フラッシュX線装置

Fig. 3にフラッシュX線装置の断面図を示す。

Fig. 3 Cross-sectional view of the flash x-ray generator.

この装置では同軸型2段マルクスジェネレータと、X線管が直結されている。マルクスジェネレータの全静電容量は、4nFである。出力電圧は最大120kVである。

X線発生部は、タングステンターゲット（アノード）とメッシュカソードより成る。電子ビームは、メッシュカソードより電界放出で発生する。X線放出窓は200μm厚のマイラフィルムである。ダイオード内圧は、 5×10^{-5} torr以下になっている。

X線は点光源で、X線の照射拡がり角は、 $\pm 50^\circ$ である。照射口から60cmの距離をとることにより、1mのレーザー管にX線を照射できる。

3.2 レーザー装置

レーザー管は3気圧に耐えるように、厚さ15mmの亚克力で作られている。電極は厚さ1cm、長さ90cmのアルミニウムバーで、エッジには適度な曲率をつけてある。電極間隔は2cmで、放電体積は0.18ℓである。ワイヤコロナ予備電離との比較のため、陽極の両側に真ちゅう製の予備電離ワイヤを装着している。レーザー窓は、CaF₂を光軸に対して少し傾けて取り付けてある。

主放電回路は、速いパルス放電励起が可能な低インピーダンスブルームライン回路である。線路としては、比誘電率4.0のガラスエポキシ樹脂の両面に銅はくを付けたプリント基板を用いている。基板の厚みは0.8mmで耐電圧は25kVである。またその大きさは、92cm×92cmである。

したがって平板コンデンサーの静電容量は、 $2 \times 37 \text{ nF}$ で、特性インピーダンスは、 0.32Ω である。

レーザーガスは、ミキシングタンクで用意され、レーザー管の耐圧、寿命を考慮し封入圧力 2.5 atm で、実験は行なわれた。

共振器は、全反射鏡に、波長 248 nm において反射率 98% 、曲率半径 10 m の誘電体多層蒸着膜ミラー、取出し鏡として、透過率 94% の CaF_2 を用いた。共振器は、 1.2 m 間隔で構成した。

X線は、空気中を 60 cm 伝播し、 15 mm 厚のアクリルを透過後レーザーガスに照射される。

レーザー出力エネルギー、波形の測定には、それぞれ、ジュールメータ (GEN-TEC ED-500)、パイプラインフォトチューブ (浜松テレビ, S-5) とオシロスコープ (Tektronix 7904) を用いた。X線の照射線量、波形の測定は、それぞれ、電離箱 (VICTREEN 420A)、ハイレスポンスプラスチックシンチレータ (応用光研) を用いた。

4. 実験結果及び考察

4.1 X線管の出力特性

Table 2 に X線管電圧 100 kV 、照射口から 60 cm の位置における、X線の照射線量、パルス幅 (FWHM)、平均エネルギーを示す。X線の平

Table 2 Output performance of the flash x-ray generator used in this experiment.

Dose per pulse at 60 cm	38 mR
Radiation pulse duration (FWHM)	400 ns
Average photon energy	21 keV

均エネルギーは、X線をアルミニウムで減衰させることにより求めた。すなわちアルミニウム透過前後の照射線量を、(5)式に代入し、 μ 値を算出する。アルミニウムの吸収係数 μ は、X線のエネルギーの関数として求められている。なので、これよりX線の平均エネルギーが求められる。このようにして求めた。X線の平均エネルギーは 21 keV と、管電圧 100 kV に比してかな

り小さい。しかし、診断用X線装置を、管電圧 100 kV 、管電流 100 mA で動作させ、照射口から 150 cm の位置にフィルムバッジを置き測定したX線の平均エネルギーは 30.5 keV である²⁰⁾。この装置はCW X線装置である。したがって電圧パルスが時間的に変化することを考慮すると、X線の平均エネルギーは、この程度になると考えられる。

Fig. 4 (A), (B)にそれぞれ、レーザー管内における照射線量、及び予備電離電子数の分布を示す。すなわち、レーザー管の位置 (X線照射口から 60 cm) に、レーザー管と同じ厚さ 15 mm のアクリルを置き、その背後でX線の線量を電離箱で測定した。

Fig. 4 Distribution of initial electron number density (A) and exposure dose (B) in the laser chamber for various tube voltages.

X線は、厚さ 15 mm のアクリルを透過することにより、 38 mR が 6.7 mR と約 $1/6$ に減衰している。

これらの値は、実際のレーザーガスが受ける線量と考えられる。中心から左右にずれるにつれて照射線量は変化し、中心で 6.7 mR (管電圧 100 kV) に対して、左右 40 cm の位置では 2 mR 程度に減少している。X線管が点光源であり、レーザー管の中心に照射しているため、このような分布になる。

Fig. 4 (A) に示した図は、管電圧 100 kV における照射X線によって 2.5 気圧 のレーザーガス中に生成される電子-イオン対数を算出したものである。ガス混合比は、最適値で $\text{Kr}/\text{F}_2/$

Table 3 A list of KrF laser parameters with wire and x-ray preionizations

Preionization method (Initial electron number density)	Gas content (Kr/F ₂ /He)	Laser energy (Efficiency)	Pulse width (FWHM)	Peak power
X-ray: $1.5 \times 10^8 / \text{cm}^3$	3/.15/balance	136.9mJ (.93%)	28nsec	3.6MW
: $5.2 \times 10^6 / \text{cm}^3$	3/.15/balance	19.5mJ (.13%)	18nsec	2.5MW
Wires	1/.3/balance	69.5mJ (.46%)	22nsec	3.2MW

He = 3 % / 0.15 % / バランスである。レーザーガスの吸収係数は、各ガスの質量比により求め、W値は31eVとして計算した。この時、生成される電子-イオン対数は、レーザー管中心で 1.5×10^8 個/cm³ である。

4.2 X線予備電離とワイヤコロナ予備電離の比較

Fig. 5 に、X線予備電離及びワイヤコロナ予備電離における、ガス混合比とレーザー出力の関係を示す。全圧力は 2.5気圧、主放電の充電電圧は20kVである。Table 3 に、それぞれの予備電離における最適ガス混合比、レーザー出力、効率などを示す。レーザー出力は、X線予備電離において、136.9mJ (効率0.93%) と、

Fig. 5 KrF laser energy and electrical efficiency as a function of Kr concentration for various F₂ concentrations.

ワイヤコロナ予備電離の69.5mJ (効率0.46%) を上まわっている。なお効率の計算には、X線のエネルギーは考慮されていない。

最適Kr濃度は、ワイヤコロナ予備電離で1%である。一方、X線予備電離では3%と大きくになっている。これはFig. 3に示すように、Krの吸収係数が大きく、Kr濃度を増すことにより、X線照射でガス中に生成される電子-イオン対数が増えることが主因と考えられる。このことは、Fig. 6においてX線管電圧60kV、Kr濃度1%で、単位時間当りの生成電子-イオン対数が 7.6×10^8 個/cm³・sであるのに対し、Kr

Fig. 6 Electron number density formed by cw x-ray vs Kr concentration for various tube voltages.

濃度3%では 1.5×10^{10} 個/cm³・sと増加していることから裏付けられる。

Fig. 6は、工業用CW X線装置を使用し、照射口より15cmの位置に電離箱を置き、そこに単位時間に生成される電子-イオン対数を実測したものである。電離箱中には、He, Kr混合ガスを全圧力590 torrで封入してある。グラフは、生成電子-イオン対数とKr濃度の関係を示し、X線管電圧をパラメータにとってある。管電圧10kV, 20kVにおいては、Kr濃度の増加に対する生成電子-イオン対数の増加がゆるやかである。これは、前述したように、KrのK吸収端が14.323keVにあり、管電圧10kV, 20kVの照射X線の平均エネルギーは、これ以下と考えられるので変化が顕著に現われないのである。

最近、コロナ予備電離においても高圧力化が進められ、KrFレーザーで、全圧力8気圧において280mJ (3.243/l) の報告がある。⁸⁾ しかしこの装置においても、全圧力10気圧では放電の不均一性により、レーザー出力、効率とも低下すると報告されている。我々は、X線予備電離を使用し、小型放電セルにおいて、全圧力10気圧で均一なグロー放電を得ている。²¹⁾

Fig. 7(A), (C)に両予備電離方式の最適ガス混合比における、レーザー発振波形を示す。X線予備電離と、ワイヤコロナ予備電離では、レーザー発振波形が異なる。パルス幅 (FWHM) は、X線予備電離で28ns, ワイヤコロナ予備電離では22nsと、前者が1.27倍となっている。ピークパワーは、X線予備電離で3.6MW, ワイヤコロナ予備電離で3.2MWと、やはり前者が1.1倍大きくになっている。

4.3 予備電離電子数とレーザー出力の関係

Fig. 8に予備電離電子数とレーザー出力の関係を示す。縦軸にレーザー出力を、横軸に予備電離電子数を対数目盛りで示す。この予備電離電子数は、X線をアクリル板で減衰させ、照射線量を変えることにより変化させた。レーザーガスの吸収係数は、各ガスの質量比より求め、X線の平均エネルギーの変化を考慮し、空気と

Fig. 7 Temporal history of KrF laser pulses with x-ray and wire corona preionizations.
(A) x-ray preionization, initial electron density; $1.5 \times 10^8/\text{cm}^3$.
(B) x-ray preionization, initial electron density; $5.2 \times 10^8/\text{cm}^3$.
(C) wire corona preionization, time scale; 20 nsec/div.

レーザーガスの吸収係数の比より、2.5気圧レーザーガス中に生成される予備電離電子数を算出した。ガス混合比は、Kr/F₂/He = 3%/0.15%/バランス, Kr/F₂/He = 3%/0.05%/バランスの2種について実験を行ない、全圧力はも

Fig. 8 Effect of initial electron number density on KrF laser energy for two gas mixtures.

もに2.5気圧、主放電の充電電圧は20kVである。

レーザー出力は、2種のカス混合比とも、予備電離電子数が増すにつれて増加している。また、KrFレーザー発振を得るためには、予備電離において、およそ 10^6 個/cm以上の電子を作る必要があることがわかる。

現在、予備電離電子数とエキシマレーザー出力の関係を定量的に明らかにした報告はなく、わずかに、計算よりもとめた必要予備電離電子数のJ. Haiaによる報告²²⁾や、R. C. Szeによる実験の報告²³⁾があるだけである。J. Hsiaは予備電離によって生成された電子は、解離付着によりF⁻として蓄えられ、主放電が加えられた時、このF⁻が 10^8 個/cm³の電子を放出しアーキングを防ぐと報告している。この 10^8 個/cm³は電子を放出するためには、 10^{11} 個/cm³のF⁻が必要であり、すなわち予備電離により 10^{11} 個/cm³以上の電子が生成されなければならない。この値は我々が測定した値、最低 10^6 個/cm³と比べてかなり大きい。しかし、R. C. Szeは、UV予備電離によるKrFレーザー出力は、UV光がピークに達した時最大出力が得られ、これはF⁻からの電子ではなく初期に生じた電子が予備電離電子として働くと報告している。このように考えると予備電離電子数は 10^8 個/cm³程度でよいことになる。R. C. Szeの装置では予備電離電子数は 10^{10} 個/cm³と報告している。

R. C. Szeは、UV予備電離の電源の容量を減化させた時の、カス中に注入されるエネルギーは、ほとんど変化しないが、レーザー出力は、パルス幅が短くなり、小さくなっている。この原因はよくわかっていないが、予備電離に支配される動力学が関係すると説明されている。我々の実験では、Fig. 7(A), (B)に示すように、レーザー波形は予備電離電子数を減らすことによりピーク値、パルス幅とも小さくなっている。カス中に注入されたエネルギーは測定されていないので、どのような機構により予備電離電子数がレーザー出力に変化を及ぼすかはっきりしないが、予備電離電子数が増すにつれて、アーキングに移行する時間が長くなるとも考えられ

る。

5. まとめ

我々は、予備電離源として、フラッシュX線装置を製作し、KrFレーザーにおける、X線予備電離とワイヤコロナ予備電離の特性を比較した。また、予備電離電子数を変化させた時のレーザー出力への影響も研究した。以上の実験結果を要約すれば以下になる。

1. フラッシュX線装置の性能は、照射線量38 mR (照射口より60cm)、パルス幅 (FWHM) 400nsであった。
 2. X線予備電離における最適カス混合比は、Kr/F₂/He = 3%/0.15%/バランスであった。その時のレーザー出力は136.9mJ、効率0.93%、パルス幅 (FWHM) 28nsであった。
 3. ワイヤコロナ予備電離における最適カス混合比は、Kr/F₂/He = 1%/0.3%/バランスであった。その時のレーザー出力は69.5mJ、効率0.46%、パルス幅 (FWHM) 22nsであった。
- KrFレーザーは、予備電離電子数が 10^6 個/cm³程度から発振が確認され、レーザー出力は予備電離電子数の増加とともに対数的に増加した。

X線は、その大きな透過力により高圧力、大体積の予備電離源として興味がある。すなわちX線をレーザー管外部より照射することにより、レーザーカスを予備電離することができ、その数は、X線の照射線量を変えることにより変化させることができる。本実験では、生成電子-イオン対数は最高 1.5×10^8 個/cm³であるが、X線装置の照射口の前面においては、 10^{10} 個/cm³程度の電子-イオン対を生成することができる。

X線の照射線量を、さらに増加させた時、レーザー出力はどのように変化するか。予備電離電子数が増え、電子ビーム制御放電と、予備電離自己持続型放電の中間状態になった時どのようなかなどは今後の興味ある課題である。

謝辞

本研究を進めるにあたり実験に協力された慶応大学学生国友浩一君に深く感謝の意を表する次第です。

参 考 文 献

- 1) R. K. Sander, T. R. Loree, S. D. Rockwood and S. M. Freunder: Appl. Phys. Letters., 30 (1977) 150.
- 2) V. I. Tomin, A. J. Alcock, W. J. Sargeant, and K. F. Leopold: Opt. Comm., 26 (1978) 396.
- 3) T. R. Loree, R. C. Sze, and D. L. Barker: Appl. Phys. Letters, 31 (1977) 37.
- 4) F. B. Wampler, W. W. Rice, and R. C. Oldenborg: Opt. Letters, 4 (1979) 143.
- 5) G. L. Oomen and J. H. Jacob: Appl. Phys. Letters, 33 (1978) 878.
- 6) J. A. Mangano and J. H. Jacob: Appl. Phys. Letters, 27 (1978) 496.
- 7) W. J. Sargeant, A. J. Alcock, and K. E. Leopold: IEEE J. Quantum Electron., QE-14 (1978) 177.
- 8) T. S. Fahlen: IEEE J. Quantum Electron., QE-15 (1979) 311.
- 9) C. P. Wang and O. L. Gibb: IEEE J. Quantum Electron., QE-15 (1979) 318.
- 10) 戸嶋, 藤本: 電気学会論文誌98-C (1978) 22
- 11) S. C. Lin and J. Levatter: Appl. Phys. Letters, 34 (1979) 505.
- 12) S. Sumida, M. Obara, and T. Fujioka: Appl. Phys. Letters, 33 (1978) 913.
- 13) M. Obara, T. Okuno, R. Ikeda, S. Sumida, and T. Fujioka: 10th IQEC, 1978.
- 14) エックス線作業主任者用テキスト, 非破壊検査協会 (1975)
- 15) 放射線工学, 電気学会 (1976)
- 16) 山崎文男: 放射線, 共立出版 (1973)
- 17) W. Heitler: The Quantum Theory of Radiation (Oxford University Press, London, 1944).
- 18) 原子力工業, 日刊工業新聞社, 8, 1977
- 19) W. P. Jesse and J. Sadavskis: Phys. Rev., 100 (1955).
- 20) フィルムパッチニュース, 日本保安用品協会, 74
- 21) S. Sumida, M. Kaburagi, K. Kunitomo, M. Obara, and T. Fujioka (unpublished).
- 22) J. Hsia: Appl. Phys. Letters, 30 (1977) 101.
- 23) R. C. Sze and T. R. Loree: IEEE J. Quantum Electron., QE-14 (1978) 844.