

JAERI-Research

95-020



ラングミュアプローブで測定した  
共鳴イオン化生成プラズマの電子温度

1995年3月

小倉浩一・柴田猛順

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1995

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 ㈱原子力資料サービス

ラングミュアプローブで測定した共鳴イオン化生成プラズマの電子温度

日本原子力研究所東海研究所燃料研究部

小倉 浩一・柴田 猛順

(1995年2月10日受理)

ガドリニウム原子にパルスレーザー光を照射して2波長2段階共鳴イオン化でガドリニウムプラズマを生成した。レーザー波長を選択して光電子のエネルギーを0.006eVにし、プラズマ生成後40 $\mu$ sのガドリニウムプラズマの電子温度をラングミュアプローブを用いて測定した。得られたプラズマの電子温度は0.02~0.03eVであった。プローブ表面の仕事関数の不均一性のため測定値はプラズマの電子温度の上限値である。真のプラズマの電子温度は0.02eV以下と推定され0.05~0.08eVの原子励起温度よりかなり低い。本測定時の原子密度が低かったのでプラズマ内の電子・原子間の励起・脱励起反応による電子温度が原子励起温度に近づく現象がみられなかったと思われる。

Electron Temperature of Resonance Photoionization Plasma Measured  
with Langmuir Probe

Koichi OGURA and Takemasa SHIBATA

Department of Chemistry and Fuel Research  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 10, 1995)

Gadolinium plasma was produced in such a way that gadolinium atoms were ionized by two-wavelength two-step laser photoionization with pulsed lasers. Here, an ionization scheme was chosen so as to emit a photoelectron with the kinetic energy of 0.006eV. The electron temperature of plasma was measured with a Langmuir probe 40 $\mu$ s after plasma production. The electron temperature of 0.02~0.03eV was obtained. The real electron temperature was considered to be below 0.02eV considering the uneven work function on probe surface. The electron temperature was much lower than the atomic excitation temperature of 0.05 to 0.08eV. The temperature did not approach to the atomic excitation temperature through excitation and de-excitation reactions between gadolinium atoms and electrons, since the atomic density was low in this experiment.

Keywords: Laser, Resonance Photoionization, Plasma, Electron Temperature, Langmuir Probe, Gadolinium Atom, Atomic Excitation Temperature, Excitation and De-excitation Reaction

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 実 験 .....	1
2.1 実験装置 .....	1
2.2 イオン化スキームとイオン化時放出電子エネルギー .....	2
3. 実験結果 .....	3
3.1 電子温度 .....	3
3.2 プラズマ電位 .....	4
4. 考 察 .....	4
5. ま と め .....	5
参考文献 .....	5

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Experiment .....	1
2.1 Experimental Apparatus .....	1
2.2 Ionization Scheme and Energy of Photoelectron Emitted by Photoionization .....	2
3. Experimental Results .....	3
3.1 Electron Temperature .....	3
3.2 Plasma Potential .....	4
4. Discussion .....	4
5. Conclusion .....	5
References .....	5

## 1. はじめに

原子法レーザー同位体分離では原子ビーム中の目的同位体原子のみを線幅の狭いレーザー光を用いて選択的に励起、イオン化し、これを電場により電極に回収する<sup>(1)</sup>。生成したイオンは放出された電子と共にプラズマを形成する。電子温度の0.5乗に比例するボーム速度程度<sup>(2)</sup>で膨張するプラズマから空間電荷制限電流に従う割合でイオンが電極に回収される<sup>(3)(4)(5)</sup>。従って、イオン回収でのレーザー生成プラズマの挙動を明らかにしイオン回収部を設計する上でプラズマの電子温度を知ることが重要となる。著者等は、1波長2段階または1波長3段階共鳴イオン化でガドリニウム原子をイオン化して生成したプラズマの電子温度をラングミュアプローブを用いて測定した<sup>(6)</sup>。得られた電子温度は0.05～0.07eVであった。1波長2段階または1波長3段階共鳴イオン化したときガドリニウム原子に吸収された光のエネルギーからイオン化ポテンシャル<sup>(7)</sup>を差し引くと約0.3eVになるので、放出電子のエネルギーは約0.3eVと考えた。0.3eVの電子が熱平衡になれば電子温度は約0.2eVになる。しかし、測定で得られた電子温度は、予想よりも非常に低く、別に測定していた原子励起温度<sup>(8)</sup>と同程度であった。このため、放出電子が基底状態または励起状態にあるガドリニウム原子と衝突し励起または脱励起して、電子温度が原子励起温度に近くなっているのではないかと考察した。しかしながら、ガドリニウムイオンにも、基底状態付近に多くの準位がある<sup>(9)</sup>。共鳴イオン化でできたイオンが基底状態のみならば放出電子のエネルギーは上記のように、約0.3eVであるが、生成したイオンが準安定準位の場合は放出される電子のエネルギーは0.3eVより小さくなる。前報では、放出電子のエネルギーが最初から低いため、低い電子温度が得られたのであって、これが偶然原子励起温度に近かった可能性がある。

ここでは、ガドリニウム原子を2波長2段階共鳴イオン化で自動電離準位に励起してイオン化し、プラズマの電子温度を測定した。このときの自動電離準位のエネルギーはイオン化ポテンシャルよりは高くイオンの第一励起準位 $262\text{cm}^{-1}$ よりは低くした。したがって、生成イオンはすべて基底準位にあり、放出電子のエネルギーは自動電離準位のエネルギーからイオン化ポテンシャルを差し引いたものになり、0.05～0.08eVである原子励起温度より非常に低いものになる。もし、電子温度が原子励起温度に近くなれば、原子・電子衝突で励起・脱励起反応が速いことが確認でき、逆に電子温度が0.05eV以下であるならば、励起・脱励起反応が十分速くないことが判る。また、レーザー生成プラズマからイオンを回収するための正負の電位を回収電極に印加するとプラズマの電位は正電極の電位にほぼ等しくなることを多くの実験によって確かめている<sup>(3)(4)(10)</sup>。ここでは、プローブ測定で、この事実を確認する実験も行った。

## 2. 実験

### 2.1 実験装置

図1に実験装置の全体を示す。2系列のエキシマレーザー励起パルス色素レーザーを用いて2波長のレーザー光を発生させた。ビームエキスパンダーを用いて拡大した2波長の

## 1. はじめに

原子法レーザー同位体分離では原子ビーム中の目的同位体原子のみを線幅の狭いレーザー光を用いて選択的に励起、イオン化し、これを電場により電極に回収する<sup>(1)</sup>。生成したイオンは放出された電子と共にプラズマを形成する。電子温度の0.5乗に比例するボーム速度程度<sup>(2)</sup>で膨張するプラズマから空間電荷制限電流に従う割合でイオンが電極に回収される<sup>(3)(4)(5)</sup>。従って、イオン回収でのレーザー生成プラズマの挙動を明らかにしイオン回収部を設計する上でプラズマの電子温度を知ることが重要となる。著者等は、1波長2段階または1波長3段階共鳴イオン化でガドリニウム原子をイオン化して生成したプラズマの電子温度をラングミュアプローブを用いて測定した<sup>(6)</sup>。得られた電子温度は0.05～0.07eVであった。1波長2段階または1波長3段階共鳴イオン化したときガドリニウム原子に吸収された光のエネルギーからイオン化ポテンシャル<sup>(7)</sup>を差し引くと約0.3eVになるので、放出電子のエネルギーは約0.3eVと考えた。0.3eVの電子が熱平衡になれば電子温度は約0.2eVになる。しかし、測定で得られた電子温度は、予想よりも非常に低く、別に測定していた原子励起温度<sup>(8)</sup>と同程度であった。このため、放出電子が基底状態または励起状態にあるガドリニウム原子と衝突し励起または脱励起して、電子温度が原子励起温度に近くなっているのではないかと考察した。しかしながら、ガドリニウムイオンにも、基底状態付近に多くの準位がある<sup>(9)</sup>。共鳴イオン化でできたイオンが基底状態のみならば放出電子のエネルギーは上記のように、約0.3eVであるが、生成したイオンが準安定準位の場合は放出される電子のエネルギーは0.3eVより小さくなる。前報では、放出電子のエネルギーが最初から低いため、低い電子温度が得られたのであって、これが偶然原子励起温度に近かった可能性がある。

ここでは、ガドリニウム原子を2波長2段階共鳴イオン化で自動電離準位に励起してイオン化し、プラズマの電子温度を測定した。このときの自動電離準位のエネルギーはイオン化ポテンシャルよりは高くイオンの第一励起準位 $262\text{cm}^{-1}$ よりは低くした。したがって、生成イオンはすべて基底準位にあり、放出電子のエネルギーは自動電離準位のエネルギーからイオン化ポテンシャルを差し引いたものになり、0.05～0.08eVである原子励起温度より非常に低いものになる。もし、電子温度が原子励起温度に近くなれば、原子・電子衝突で励起・脱励起反応が速いことが確認でき、逆に電子温度が0.05eV以下であるならば、励起・脱励起反応が十分速くないことが判る。また、レーザー生成プラズマからイオンを回収するための正負の電位を回収電極に印加するとプラズマの電位は正電極の電位にほぼ等しくなることを多くの実験によって確かめている<sup>(3)(4)(10)</sup>。ここでは、プローブ測定で、この事実を確認する実験も行った。

## 2. 実 験

### 2.1 実験装置

図1に実験装置の全体を示す。2系列のエキシマレーザー励起パルス色素レーザーを用いて2波長のレーザー光を発生させた。ビームエキスパンダーを用いて拡大した2波長の

レーザー光をエッジフィルターを用いて結合し、直径10mmのスリットを通して真空容器内のガドリニウム原子ビームに照射した。レーザー光のエネルギーは真空容器を透過した後ジュールメータを用いて測定した。一段目のレーザー光の波長をガドリニウムの共鳴波長に合わせるのに蛍光検出器を用いた。真空容器内の概略図を図2に示す。水冷銅るつぼ中のガドリニウム金属を電子ビームを用いて加熱蒸発させてガドリニウム原子ビームを生成した。14mm×80mmのスリットを通過した原子ビームは間隔20mmの2枚の160mm×100mmの平行平板の回収電極1,2の間を通る。電子温度測定時は回収電極1,2は常に接地した。るつぼから高さ413mmの位置で2波長のレーザー光をガドリニウム原子ビームに照射した。2波長のレーザー光のパルス幅は約10nsであり2段目のレーザー光は1段目のレーザー光照射の約10ns後に照射した。るつぼから高さ973mmに置いた水晶振動子式膜厚計を用いて蒸着速度を測定した。図3は高さ973mmの水晶振動子膜厚計で測定した蒸着速度と高さ413mmのレーザー照射部での原子密度との関係<sup>(11)</sup>で、これを用いて蒸着速度より原子密度を推定した。

レーザー光の中心から35mm上にラングミュアプローブを置き電子温度を測定した。前報ではレーザー光中心から10mm上にプローブを置いたが、今回は実験の目的が電子による原子の励起・脱励起が起こるかどうかをみることなので電子・原子間の相互作用の時間をなるべく長くできるようにプローブの位置をレーザー照射位置からできるだけ離れた。プローブは直径0.7mmのタングステン線製で、長さ3mmであった。除去電極<sup>(12)</sup>に-200Vを印加して、蒸発部で生成したプラズマがプローブ測定部に流れ込まないようにした。図4にプローブ特性を測定するために用いた測定回路を示す。前報ではレーザー光照射ごとプローブ電流、プローブ電圧波形のオシロスコープ表示を写真撮影して記録した。電子温度は0.1eV以下で低いためにプローブ電圧0.1V以下の範囲でプローブ電流は急激に変化する。電子電流がプローブ電圧に関して指数関数的に変化する電子電流反発領域<sup>(13)</sup>で急激な電子電流の変化をとらえるのには多くの測定点が必要である。しかし、多くの測定を行うのに長時間を要し測定中に蒸着速度が変化してしまうことが多かった。そこで、今回はプローブ電圧印加用電源の電圧をゆっくり連続的に掃引して特定の時間のプローブ電流とプローブ電圧をボックスカー積分器型平均化回路で平均し、その出力をX-Yレコーダに記録した。なお、プローブ電圧もボックスカー積分器型平均化回路を用いたのは、電子電流がプローブに流れることによってプローブ電圧も変化するためである。

正電圧印加時のプラズマ電位測定時は、ラングミュアプローブをレーザー光中心から10mm上に置き、レーザー照射300nsに回収電極1に正電位を印加し、回収電極2は接地のままとした。ボックスカー積分器型平均化回路を用いず、レーザー照射毎にオシロスコープ表示を写真撮影してプローブ電流波形を記録した。

## 2.2 イオン化スキームとイオン化時放出電子エネルギー

図5に実験に用いた2波長2段階共鳴イオン化スキームを示す。波長441.25nmの1段目レーザー光によって準安定準位 $533\text{cm}^{-1}$ のガドリニウムを中間準位 $23196\text{cm}^{-1}$ に励起した。プローブに正の電圧を印加し、2段目のレーザー光の波長を掃引しながらプローブに流れる電子電流を測定して電離スペクトルを測定した。得られた電離スペクトルを図6に示す。図6の矢印で示した自動電離準位を用いて電子温度の測定を行った。この自動電離準位へ



の励起に必要な2段目の波長は377.94nmであるので、中間準位から $26459\text{cm}^{-1}$ 上の準位に励起される。従ってこの自動電離準位のエネルギーは $49655\text{cm}^{-1}$ である。ガドリニウムのイオン化ポテンシャル<sup>(7)</sup> $49603\text{cm}^{-1}$ より $52\text{cm}^{-1}$ 高い。図5のようにイオンの第1励起準位は $262\text{cm}^{-1}$ なので、自動電離準位から生成するイオンは基底準位のみとなり、放出される電子のエネルギーは $52\text{cm}^{-1}$ 、すなわち、 $0.006\text{eV}$ である。放出された電子が互いに衝突して熱平衡になりエネルギー分布がボルツマン分布になると仮定すると電子温度は $0.004\text{eV}$ となる。

### 3. 実験結果

#### 3.1 電子温度

図7(a), (b)にレーザー照射位置から35mm上のラングミュアプローブで測定した電流波形の一例を示す。レーザー照射位置の原子密度は $1.8 \times 10^{11}\text{cm}^{-3}$ である。図7(a)はプローブに負の電圧 $-2\text{V}$ を印加した場合のイオン飽和電流である。また、図7(b)はプローブに正の電圧 $0.11\text{V}$ を印加した場合の電子電流である。プラズマは原子ビームとほぼ同じ速度でプローブの場所を通過するのでプローブ電流はパルス波形となる<sup>(14)</sup>。ここでは、プローブ電位を掃引しながら、ボックスカー積分器型平均化回路を用いてレーザー照射後 $40 \sim 48\ \mu\text{s}$ 後の電流電圧特性を測定した。プローブの電流電圧特性の一例を図8(a)に示す。本測定時の原子密度は $2.3 \times 10^{11}\text{cm}^{-3}$ である。また、図8(a)のプローブ電流から得られる電子電流を対数プロットしたものが図8(b)である。○印は図8(a)のAから、△印は図8(a)のBから得られた電子電流である。図8(b)の傾きから電子温度を求めると $0.02\text{eV}$ となる。また、プラズマ電位は $0.1\text{eV}$ 程度で接地した電極電位よりも僅かに高い。図9にレーザー照射部の原子密度を変化させたときの電子温度を示す。また、図9には共鳴イオン化法を用いて別に測定した原子励起温度<sup>(15)</sup>を実線で示している。得られた電子温度は、 $0.02 \sim 0.03\text{eV}$ で原子励起温度よりも低い。また、レーザー照射部の原子密度依存性があるかどうか確認できない。これについては、次節で考察する。

今回の測定では、図8(a)に示すようなプローブ特性を取得する毎に電子ビーム加熱による原子ビーム発生を止めた。原子ビームの発生、停止を繰り返していると、突然それまでと全く異なるプローブ特性になることが多数回発生した。その例を図10(a), (b), (c)に示す。図10(a)は、図8(a)の再録であるが、その後の測定結果が図10(b), (c)である。図10(c)の電子電流の対数プロットをとると得られる電子温度が高くプラズマ電位も求まりにくくなる。これは、プローブ表面に蒸着した金属が測定を中断しているときに、残留ガス等と反応して、金属表面の仕事関数が変化したためではないかと考えられる。この現象は前報の報告では観察されなかった。今回の測定では、前節で述べたようにプローブ測定法を改良したのでプローブ特性を採るのに必要な時間は $10 \sim 20$ 秒に短縮できた。逆に、その結果、1回の測定時の蒸着量が以前に比べ数十分の一になってしまい、蒸着量が少ないために、プローブ下面の表面状態が大きく変化したのではないかとと思われる。図10(c)のようなプローブ特性はプローブ表面の仕事関数が一様でない時の特徴を表していると考えられる。なお、

の励起に必要な2段目の波長は377.94nmであるので、中間準位から $26459\text{cm}^{-1}$ 上の準位に励起される。従ってこの自動電離準位のエネルギーは $49655\text{cm}^{-1}$ である。ガドリニウムのイオン化ポテンシャル<sup>(7)</sup> $49603\text{cm}^{-1}$ より $52\text{cm}^{-1}$ 高い。図5のようにイオンの第1励起準位は $262\text{cm}^{-1}$ なので、自動電離準位から生成するイオンは基底準位のみとなり、放出される電子のエネルギーは $52\text{cm}^{-1}$ 、すなわち、 $0.006\text{eV}$ である。放出された電子が互いに衝突して熱平衡になりエネルギー分布がボルツマン分布になると仮定すると電子温度は $0.004\text{eV}$ となる。

### 3. 実験結果

#### 3.1 電子温度

図7(a), (b)にレーザー照射位置から35mm上のラングミュアプローブで測定した電流波形の一例を示す。レーザー照射位置の原子密度は $1.8 \times 10^{11}\text{cm}^{-3}$ である。図7(a)はプローブに負の電圧-2Vを印加した場合のイオン飽和電流である。また、図7(b)はプローブに正の電圧0.11Vを印加した場合の電子電流である。プラズマは原子ビームとほぼ同じ速度でプローブの場所を通過するのでプローブ電流はパルス波形となる<sup>(14)</sup>。ここでは、プローブ電位を掃引しながら、ボックスカー積分器型平均化回路を用いてレーザー照射後40~48 $\mu\text{s}$ 後の電流電圧特性を測定した。プローブの電流電圧特性の一例を図8(a)に示す。本測定時の原子密度は $2.3 \times 10^{11}\text{cm}^{-3}$ である。また、図8(a)のプローブ電流から得られる電子電流を対数プロットしたものが図8(b)である。○印は図8(a)のAから、△印は図8(a)のBから得られた電子電流である。図8(b)の傾きから電子温度を求めると $0.02\text{eV}$ となる。また、プラズマ電位は $0.1\text{eV}$ 程度で接地した電極電位よりも僅かに高い。図9にレーザー照射部の原子密度を変化させたときの電子温度を示す。また、図9には共鳴イオン化法を用いて別に測定した原子励起温度<sup>(15)</sup>を実線で示している。得られた電子温度は、 $0.02 \sim 0.03\text{eV}$ で原子励起温度よりも低い。また、レーザー照射部の原子密度依存性があるかどうか確認できない。これについては、次節で考察する。

今回の測定では、図8(a)に示すようなプローブ特性を取得する毎に電子ビーム加熱による原子ビーム発生を止めた。原子ビームの発生、停止を繰り返していると、突然それまでと全く異なるプローブ特性になることが多数回発生した。その例を図10(a), (b), (c)に示す。図10(a)は、図8(a)の再録であるが、その後の測定結果が図10(b), (c)である。図10(c)の電子電流の対数プロットをとると得られる電子温度が高くプラズマ電位も求まりにくくなる。これは、プローブ表面に蒸着した金属が測定を中断しているときに、残留ガス等と反応して、金属表面の仕事関数が変化したためではないかと考えられる。この現象は前報の報告では観察されなかった。今回の測定では、前節で述べたようにプローブ測定法を改良したのでプローブ特性を採るのに必要な時間は10~20秒に短縮できた。逆に、その結果、1回の測定時の蒸着量が以前に比べ数十分の一になってしまい、蒸着量が少ないために、プローブ下面の表面状態が大きく変化したのではないかとと思われる。図10(c)のようなプローブ特性はプローブ表面の仕事関数が一様でない時の特徴を表していると考えられる。なお、

図9の電子温度は、プローブ特性がおかしくなる前の測定結果を示している。

### 3.2 プラズマ電位

回収電極2を接地し、回収電極1に正電圧50Vを印加した場合のプローブ電流波形をオシロスコープで記録し、レーザー照射後12 $\mu$ sの電流値をプローブ電圧に対してプロットしたものを図11に示す。プローブに流れる電子電流はプローブ電圧が回収電極1に印加した電圧50Vと等しい電圧で急に立上がっている。レーザー生成プラズマのポテンシャルが回収電極の高い方の電位とほぼ等しいことは、これまでイオン回収挙動の評価<sup>(3)(4)</sup>、回収イオンのエネルギー測定<sup>(10)</sup>から明らかであったが、プローブ測定によってもこのことが確認された。

## 4. 考 察

図9について考察する。前報で考察したような電子・原子衝突で励起・脱励起の反応が速ければ、原子密度が高くなるにつれて、電子温度が、原子励起温度に近づかずであるが、そのような傾向があるとは言えない。

小池<sup>(16)</sup>は2~3eV以下の電子とウラン原子との散乱による励起または脱励起の断面積 $\sigma$ の計算を試みている。それによれば $\sigma$ は $10^{-16}$ cm<sup>2</sup>程度である。原子密度を $n$ 、衝突速度を $v$ とすれば励起または脱励起の反応速度 $k$ は

$$k = n\sigma v$$

と書ける。 $\sigma = 10^{-16}$ cm<sup>2</sup>とし原子密度 $n = 3 \times 10^{11}$ cm<sup>-3</sup>、衝突速度 $v$ を電子の平均速度 $v$ と等しいとすると電子温度0.02eVの場合 $v = 1 \times 10^7$ cm/sであり、反応速度 $k$ は $3 \times 10^2$ s<sup>-1</sup>となる。従って電子温度が原子励起温度に近くなるのに要する時間は、

$$\tau = 3 \text{ ms}$$

程度となる。本実験での測定時間はレーザー照射後約40 $\mu$ sなので電子による原子の励起・脱励起反応はほとんど起こらないと推測される。この推定は電子温度が原子密度が高くなって原子励起温度に近づく傾向が見えないと言う図9の実験結果と矛盾しない。逆に、励起・脱励起反応が起こらず、0.006eVの光電子が電子間の衝突でエネルギー交換して熱平衡になれば電子温度は、0.004eVとなるはずである。図8の場合のプラズマ密度は、 $4 \times 10^9$ cm<sup>-3</sup>であり、このときの電子・電子の衝突周波数は $1 \times 10^7$ s<sup>-1</sup>なので、レーザー照射後約43 $\mu$ sでは、十分熱平衡に達していると推定される。測定結果は、0.02~0.03eVで0.004eVよりもはるかに高い。プローブによる電子温度の測定は、プローブ表面の仕事関数が全表面にわたって一定であることを仮定している<sup>(13)</sup>。しかし、本測定では、プローブ下面のみにガドリニウム原子が蒸着しているので、上面と下面では、仕事関数は同じではない。また、下面でも円筒状のため様な蒸着膜はできていない。このため下面の仕事関数も一定ではなく、測定される電子温度は、実際の値よりも高くなってしまったものと考えられる。また、ばらつきが大きいのも、表面状態の変化によるものではないかと思われる。従って、本実験では、得られたプラズマの電子温度が0.02eVより低いということを示していると思われる。

図9の電子温度は、プローブ特性がおかしくなる前の測定結果を示している。

### 3.2 プラズマ電位

回収電極2を接地し、回収電極1に正電圧50Vを印加した場合のプローブ電流波形をオシロスコープで記録し、レーザー照射後12 $\mu$ sの電流値をプローブ電圧に対してプロットしたものを図11に示す。プローブに流れる電子電流はプローブ電圧が回収電極1に印加した電圧50Vと等しい電圧で急に立上がっている。レーザー生成プラズマのポテンシャルが回収電極の高い方の電位とほぼ等しいことは、これまでイオン回収挙動の評価<sup>(3)(4)</sup>、回収イオンのエネルギー測定<sup>(10)</sup>から明らかであったが、プローブ測定によってもこのことが確認された。

## 4. 考 察

図9について考察する。前報で考察したような電子・原子衝突で励起・脱励起の反応が速ければ、原子密度が高くなるにつれて、電子温度が、原子励起温度に近づくはずであるが、そのような傾向があるとは言えない。

小池<sup>(16)</sup>は2~3eV以下の電子とウラン原子との散乱による励起または脱励起の断面積 $\sigma$ の計算を試みている。それによれば $\sigma$ は $10^{-16}$ cm<sup>2</sup>程度である。原子密度を $n$ 、衝突速度を $v$ とすれば励起または脱励起の反応速度 $k$ は

$$k = n\sigma v$$

と書ける。 $\sigma = 10^{-16}$ cm<sup>2</sup>とし原子密度 $n = 3 \times 10^{11}$ cm<sup>-3</sup>、衝突速度 $v$ を電子の平均速度 $v$ と等しいとすると電子温度0.02eVの場合 $v = 1 \times 10^7$ cm/sであり、反応速度 $k$ は $3 \times 10^2$ s<sup>-1</sup>となる。従って電子温度が原子励起温度に近くなるのに要する時間は、

$$\tau = 3 \text{ ms}$$

程度となる。本実験での測定時間はレーザー照射後約40 $\mu$ sなので電子による原子の励起・脱励起反応はほとんど起こらないと推測される。この推定は電子温度が原子密度が高くなって原子励起温度に近づく傾向が見えないと言う図9の実験結果と矛盾しない。逆に、励起・脱励起反応が起こらず、0.006eVの光電子が電子間の衝突でエネルギー交換して熱平衡になれば電子温度は、0.004eVとなるはずである。図8の場合のプラズマ密度は、 $4 \times 10^9$ cm<sup>-3</sup>であり、このときの電子・電子の衝突周波数は $1 \times 10^7$ s<sup>-1</sup>なので、レーザー照射後約43 $\mu$ sでは、十分熱平衡に達していると推定される。測定結果は、0.02~0.03eVで0.004eVよりもはるかに高い。プローブによる電子温度の測定は、プローブ表面の仕事関数が全表面にわたって一定であることを仮定している<sup>(13)</sup>。しかし、本測定では、プローブ下面のみにガドリニウム原子が蒸着しているので、上面と下面では、仕事関数は同じではない。また、下面でも円筒状のため様な蒸着膜はできていない。このため下面の仕事関数も一定ではなく、測定される電子温度は、実際の値よりも高くなってしまったものと考えられる。また、ばらつきが大きいのも、表面状態の変化によるものではないかと思われる。従って、本実験では、得られたプラズマの電子温度が0.02eVより低いということを示していると思われる。

## 5. ま と め

ガドリニウム原子にパルスレーザー光を照射して2波長2段階共鳴イオン化でガドリニウムプラズマを生成した。レーザー波長を選択して光電子のエネルギーを0.006eVにし、プラズマ生成後40 $\mu$ sのガドリニウムプラズマの電子温度をラングミュアプローブを用いて測定した。得られたプラズマの電子温度は0.02~0.03eVであった。本測定ではラングミュアプローブ表面にガドリニウムが蒸着しプローブ表面の仕事関数が一様でないので得られた値は上限値であり真のプラズマの電子温度は0.02eV以下と推定される。もし、電子・原子間の励起脱励起反応が十分速ければ、プラズマの電子温度は、0.05~0.08eVである原子励起温度に近づくはずであるが、測定された電子温度は原子励起温度よりかなり低いので、励起・脱励起反応で電子温度と原子励起温度が平衡に達する時間はプラズマ生成からプローブ測定までの時間40 $\mu$ sよりも長いと推定される。また、レーザー誘起プラズマのプラズマ電位は回収電極電位の高い方の電位と等しくなることがプローブ測定によっても確かめられた。

## 参 考 文 献

- (1) P.T.Greenland, *Contemporary Phys.* **31**, 405 (1990).
- (2) F.F.Chen (内田岱二郎訳) : プラズマ物理学入門, (丸善、東京、1977), p.76.
- (3) 小倉浩一、有澤 孝、柴田猛順 : 日本原子力研究所研究報告書 JAERI-M 91-222 (1992).
- (4) K.Ogura, T.Arisawa, and T.Shibata, *Jpn.J.Appl.Phys.* **31**, 1485 (1992).
- (5) K.Ogura, H.Kaburaki, and T.Shibata, *J.Nucl.Sci.Technol.* **30**, 1248 (1993).
- (6) 小倉浩一、有澤 孝、小堀 章、柴田猛順 : 日本原子力研究所研究報告書 JAERI-M 90-162 (1990).
- (7) E.F.Worden, R.W.Solarz, J.A.Paisner, and J.G.Conway, *J.Opt.Soc.Am.* **68**, 52 (1978).
- (8) 西村昭彦、有澤 孝、小倉浩一、大場弘則、柴田猛順 : 真空 **35**, 305 (1992).
- (9) J.Blaise, J.Chevillard, J.Verges, J.F.Wyart, and Th.A.M.van Kleef, *Spectrochimica Acta* **26**, 1 (1971).
- (10) K.Ogura and T.Shibata, *Jpn.J.Appl.Phys.* **33**, L131 (1994).
- (11) K.Ogura and T.Shibata, *J.Mass Spectrom.Soc.Jpn.* **41**, 37 (1993).
- (12) H.Ohba, A.Nishimura, K.Ogura, and T.Shibata, *Rev.Sci.Int.* **65**, 657 (1994).
- (13) 雨宮 宏、坂本雄一 : 真空 **28**, 177 (1992).
- (14) K.Ogura and T.Shibata, *Rev.Sci.Int.* **65**, 3455 (1994).
- (15) K.Ogura and T.Shibata, *J.Phys.Soc.Jpn.* **63**, 834 (1994).
- (16) F.Koike, *Phys. Lett.A* **176**, 439 (1993).

## 5. ま と め

ガドリニウム原子にパルスレーザー光を照射して2波長2段階共鳴イオン化でガドリニウムプラズマを生成した。レーザー波長を選択して光電子のエネルギーを0.006eVにし、プラズマ生成後40 $\mu$ sのガドリニウムプラズマの電子温度をラングミュアプローブを用いて測定した。得られたプラズマの電子温度は0.02~0.03eVであった。本測定ではラングミュアプローブ表面にガドリニウムが蒸着しプローブ表面の仕事関数が一様でないので得られた値は上限値であり真のプラズマの電子温度は0.02eV以下と推定される。もし、電子・原子間の励起脱励起反応が十分速ければ、プラズマの電子温度は、0.05~0.08eVである原子励起温度に近づくはずであるが、測定された電子温度は原子励起温度よりかなり低いので、励起・脱励起反応で電子温度と原子励起温度が平衡に達する時間はプラズマ生成からプローブ測定までの時間40 $\mu$ sよりも長いと推定される。また、レーザー誘起プラズマのプラズマ電位は回収電極電位の高い方の電位と等しくなることがプローブ測定によっても確かめられた。

## 参 考 文 献

- (1) P.T.Greenland, *Contemporary Phys.* **31**, 405 (1990).
- (2) F.F.Chen (内田岱二郎訳) : プラズマ物理学入門, (丸善、東京、1977), p.76.
- (3) 小倉浩一、有澤 孝、柴田猛順 : 日本原子力研究所研究報告書 JAERI-M 91-222 (1992).
- (4) K.Ogura, T.Arisawa, and T.Shibata, *Jpn.J.Appl.Phys.* **31**, 1485 (1992).
- (5) K.Ogura, H.Kaburaki, and T.Shibata, *J.Nucl.Sci.Technol.* **30**, 1248 (1993).
- (6) 小倉浩一、有澤 孝、小埜 章、柴田猛順 : 日本原子力研究所研究報告書 JAERI-M 90-162 (1990).
- (7) E.F.Worden, R.W.Solarz, J.A.Paisner, and J.G.Conway, *J.Opt.Soc.Am.* **68**, 52 (1978).
- (8) 西村昭彦、有澤 孝、小倉浩一、大場弘則、柴田猛順 : 真空 **35**, 305 (1992).
- (9) J.Blaise, J.Chevillard, J.Verges, J.F.Wyart, and Th.A.M.van Kleef, *Spectrochimica Acta* **26**, 1 (1971).
- (10) K.Ogura and T.Shibata, *Jpn.J.Appl.Phys.* **33**, L131 (1994).
- (11) K.Ogura and T.Shibata, *J.Mass Spectrom.Soc.Jpn.* **41**, 37 (1993).
- (12) H.Ohba, A.Nishimura, K.Ogura, and T.Shibata, *Rev.Sci.Int.* **65**, 657 (1994).
- (13) 雨宮 宏、坂本雄一 : 真空 **28**, 177 (1992).
- (14) K.Ogura and T.Shibata, *Rev.Sci.Int.* **65**, 3455 (1994).
- (15) K.Ogura and T.Shibata, *J.Phys.Soc.Jpn.* **63**, 834 (1994).
- (16) F.Koike, *Phys. Lett.A* **176**, 439 (1993).

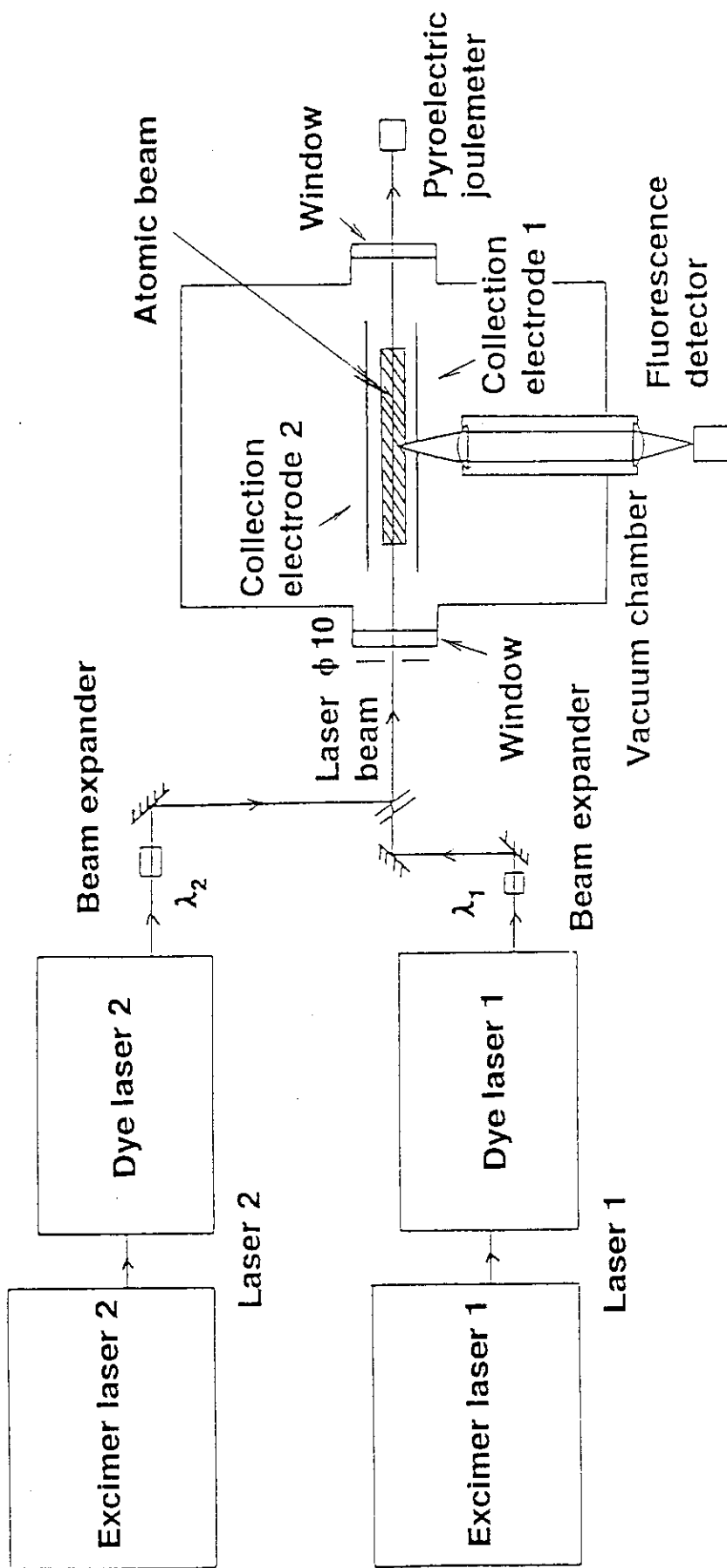


图1 実験装置全体図

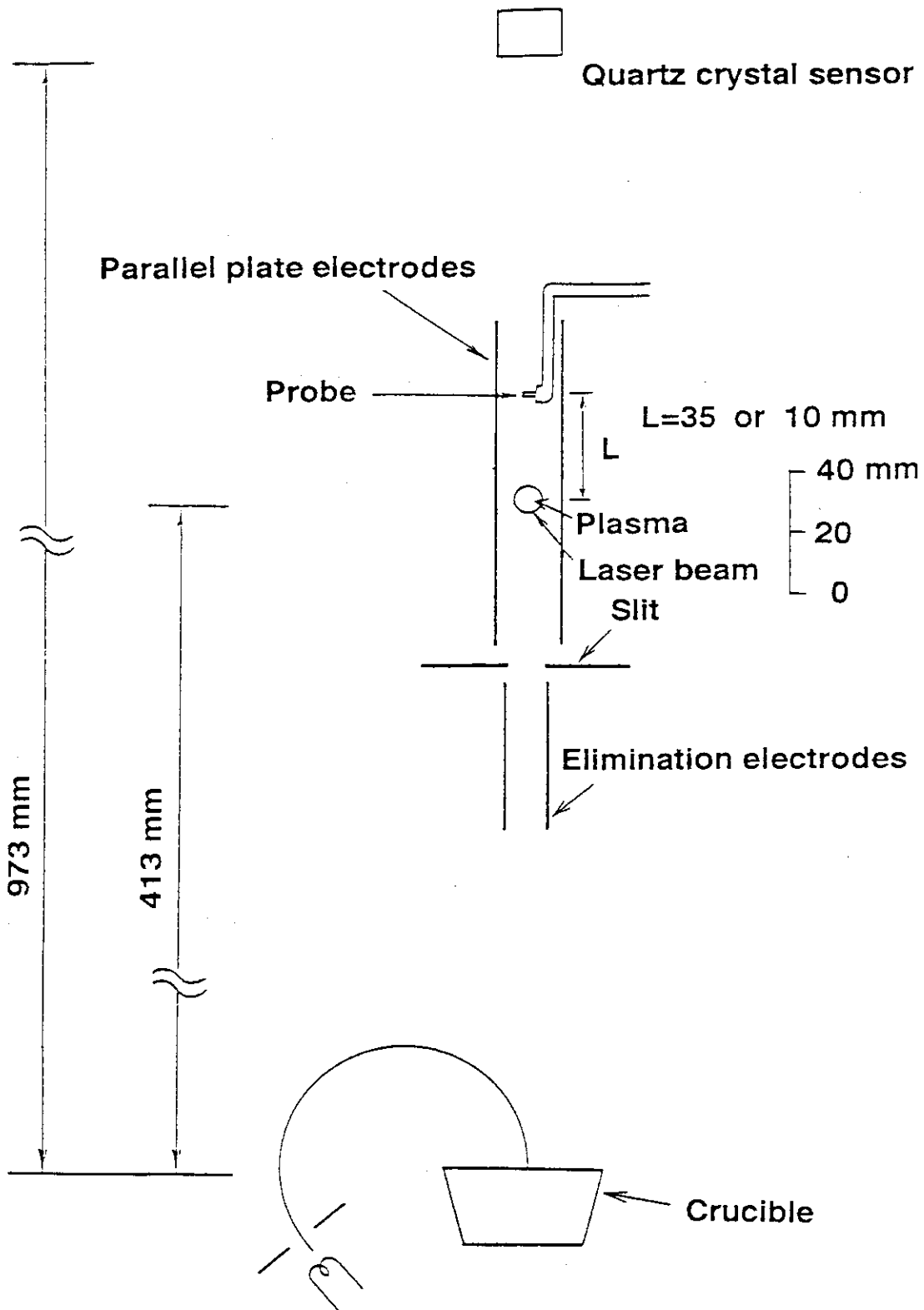


図2 真空容器内の概略図



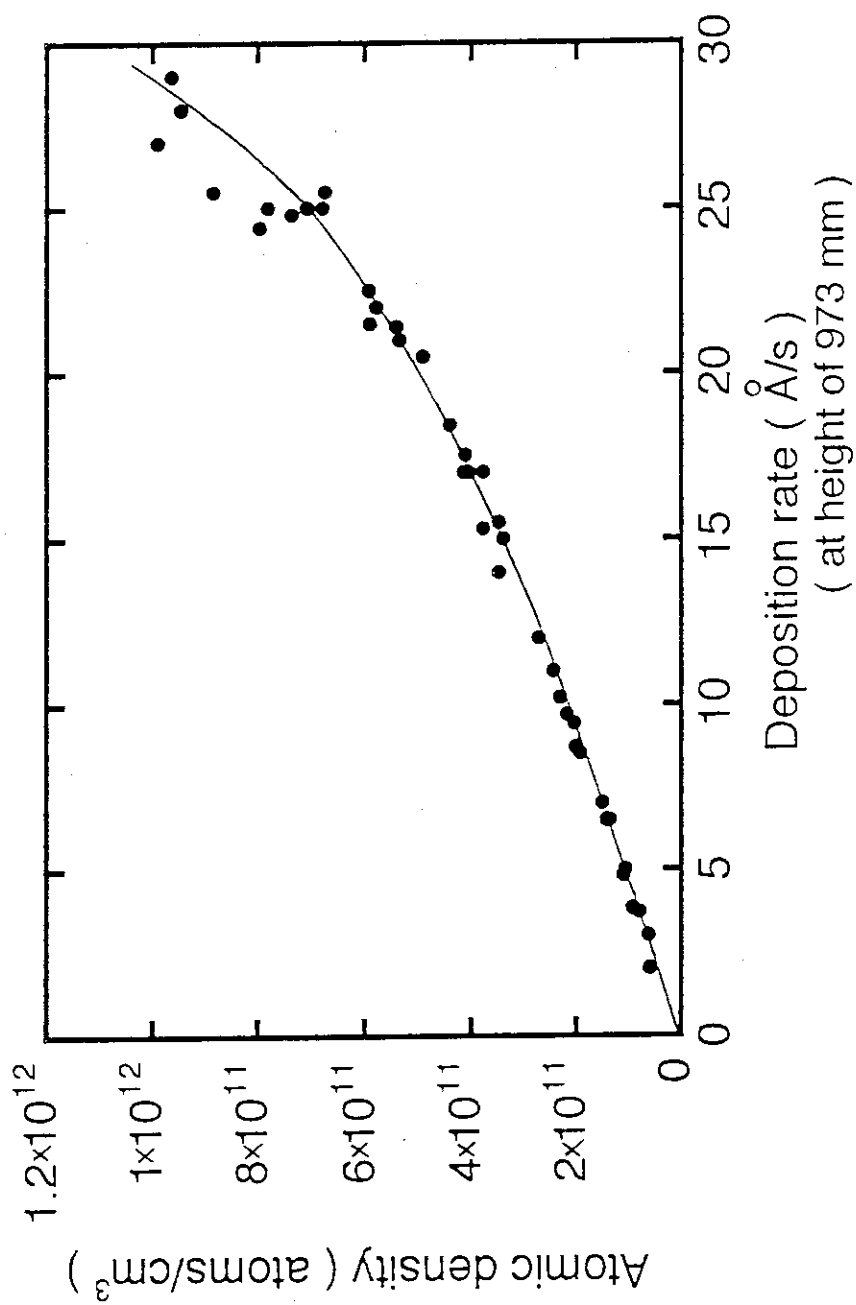


図3 高さ 978mmに置いた水晶振動子で測定した蒸着速度と  
レーザー照射部での原子密度の関係

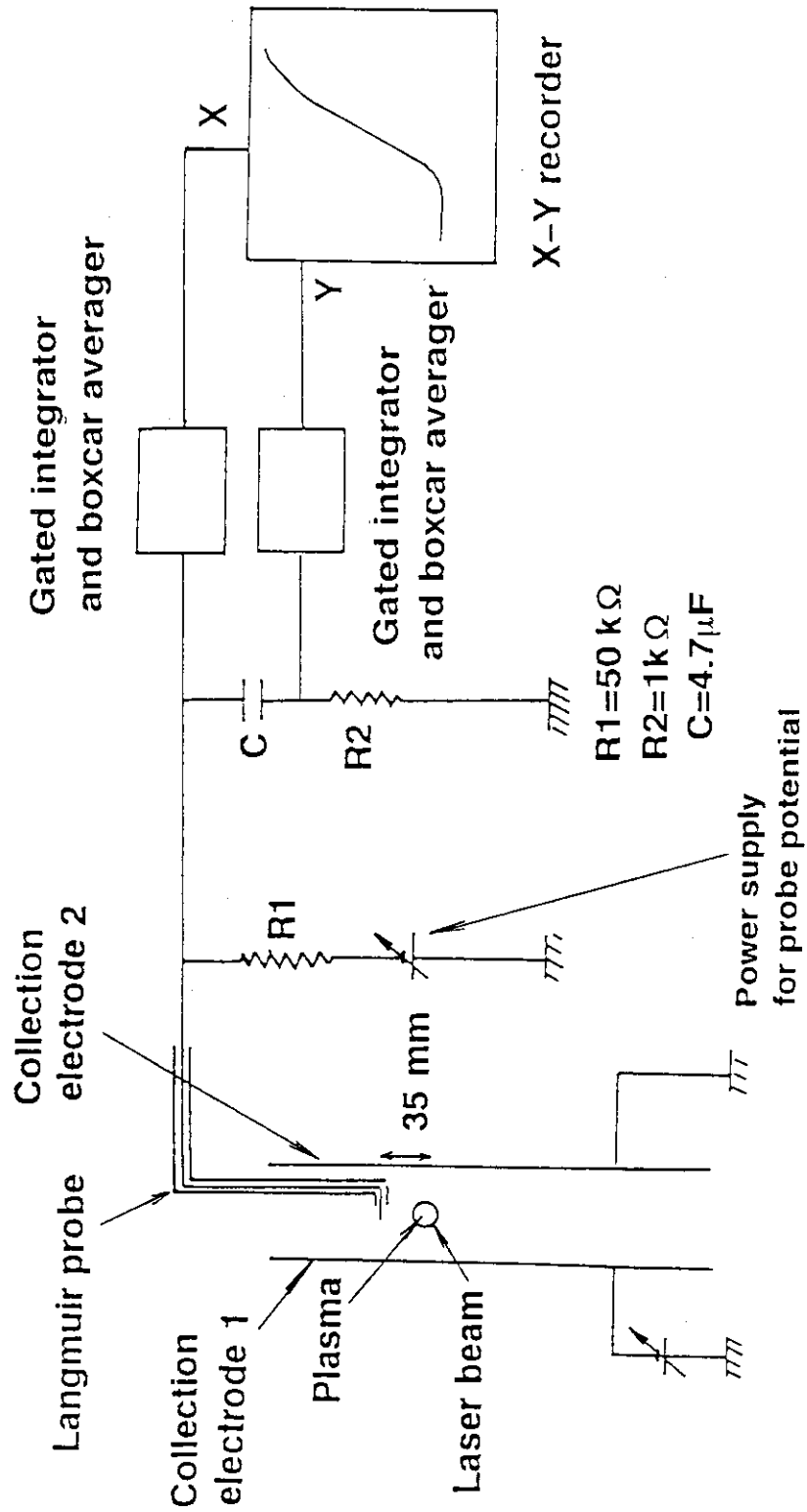


図4 プローブ測定回路

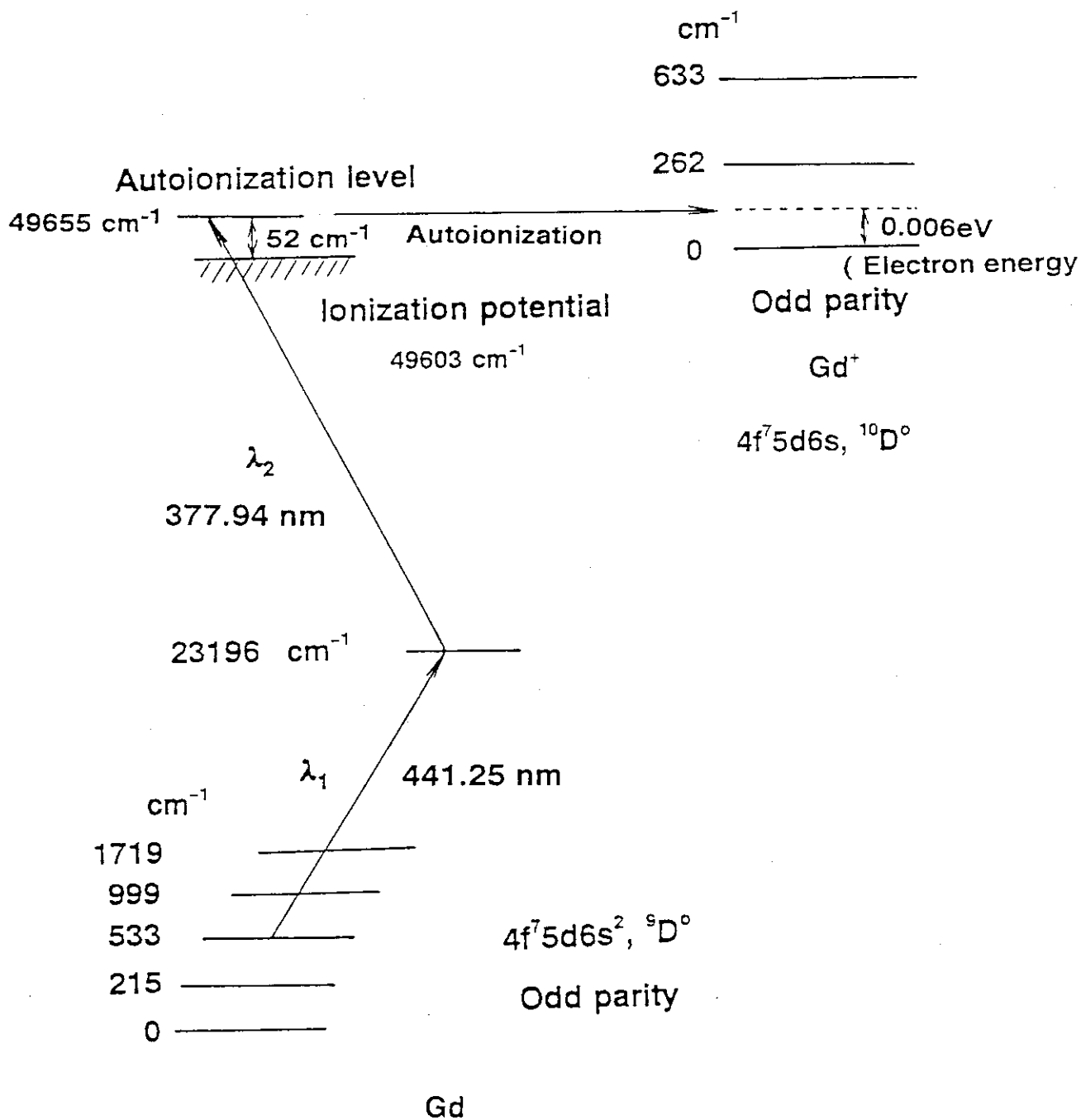


図5 ガドリニウム原子のイオン化に用いた2波長2段階共鳴イオン化スキーム  
0.006eV のエネルギーの電子が放出される

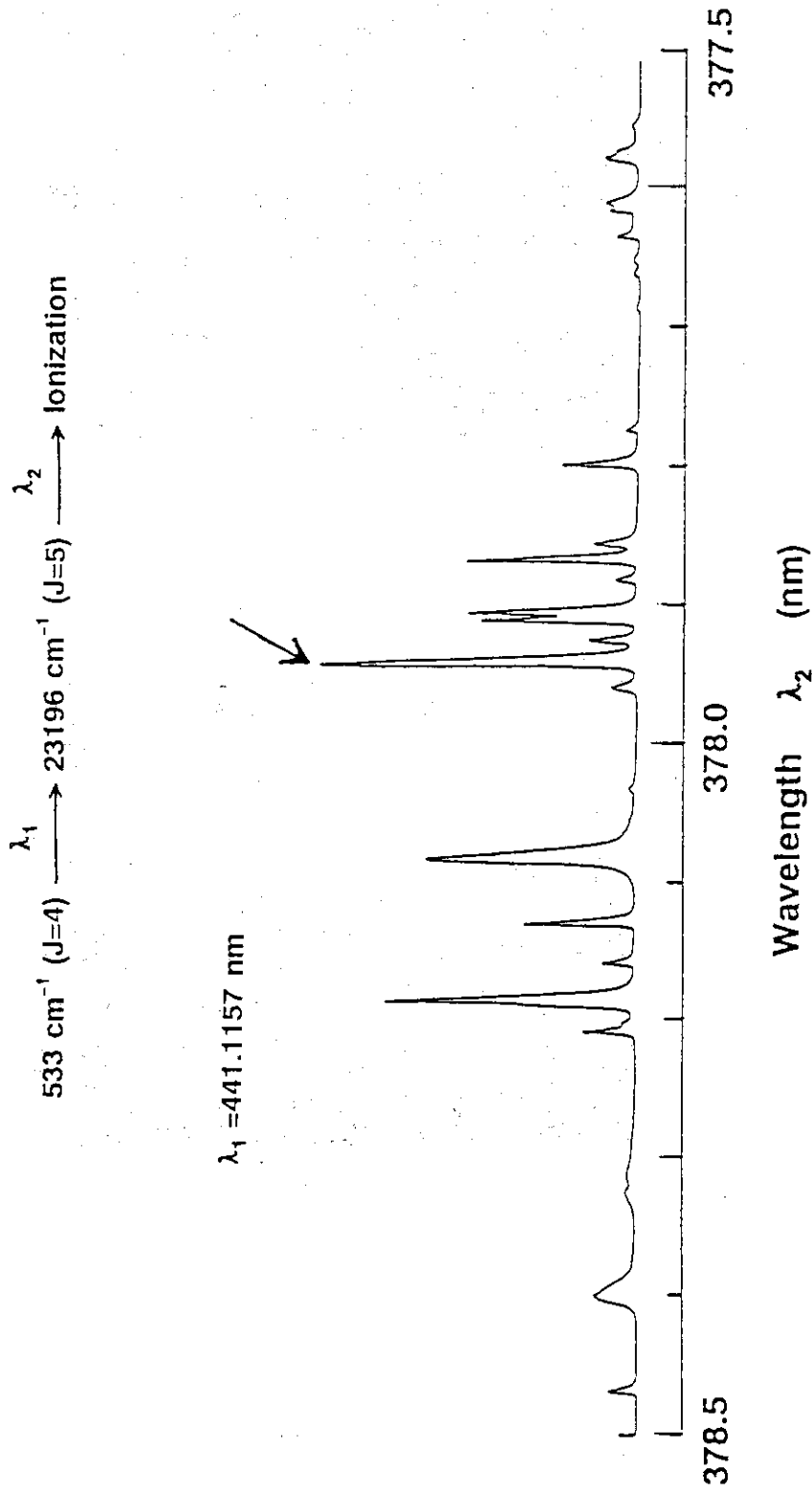


図 6 2 波長 2 段階共鳴イオン化スペクトル  
矢印の付いたスペクトルを用いてプラズマを生成した

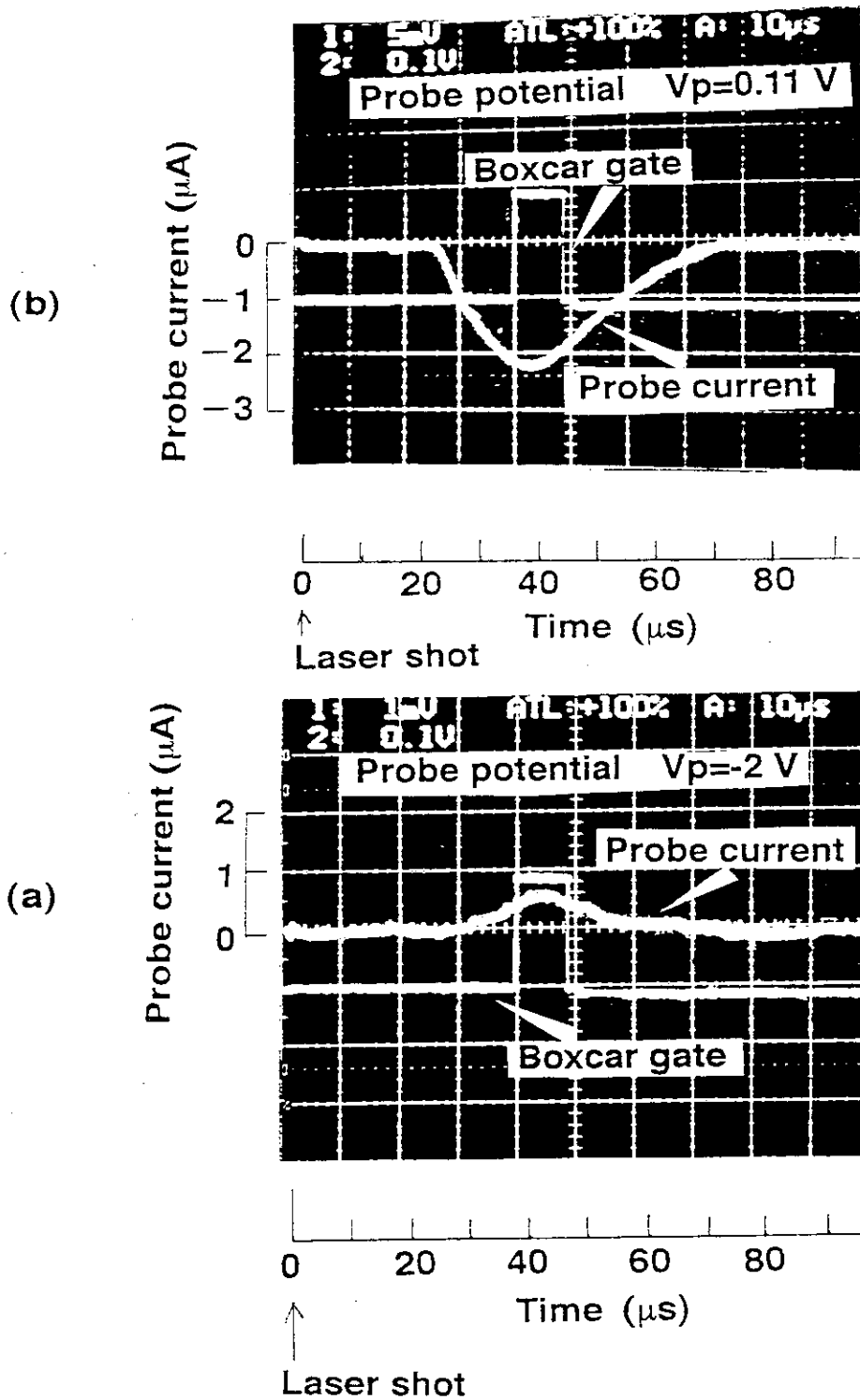


図7 測定した電流波形の一例  
 原子密度 $1.8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$   
 (a) プロープに2 Vを印加したときのイオン電流波形  
 (b) プロープに+0.11Vを印加したときの電子電流波形

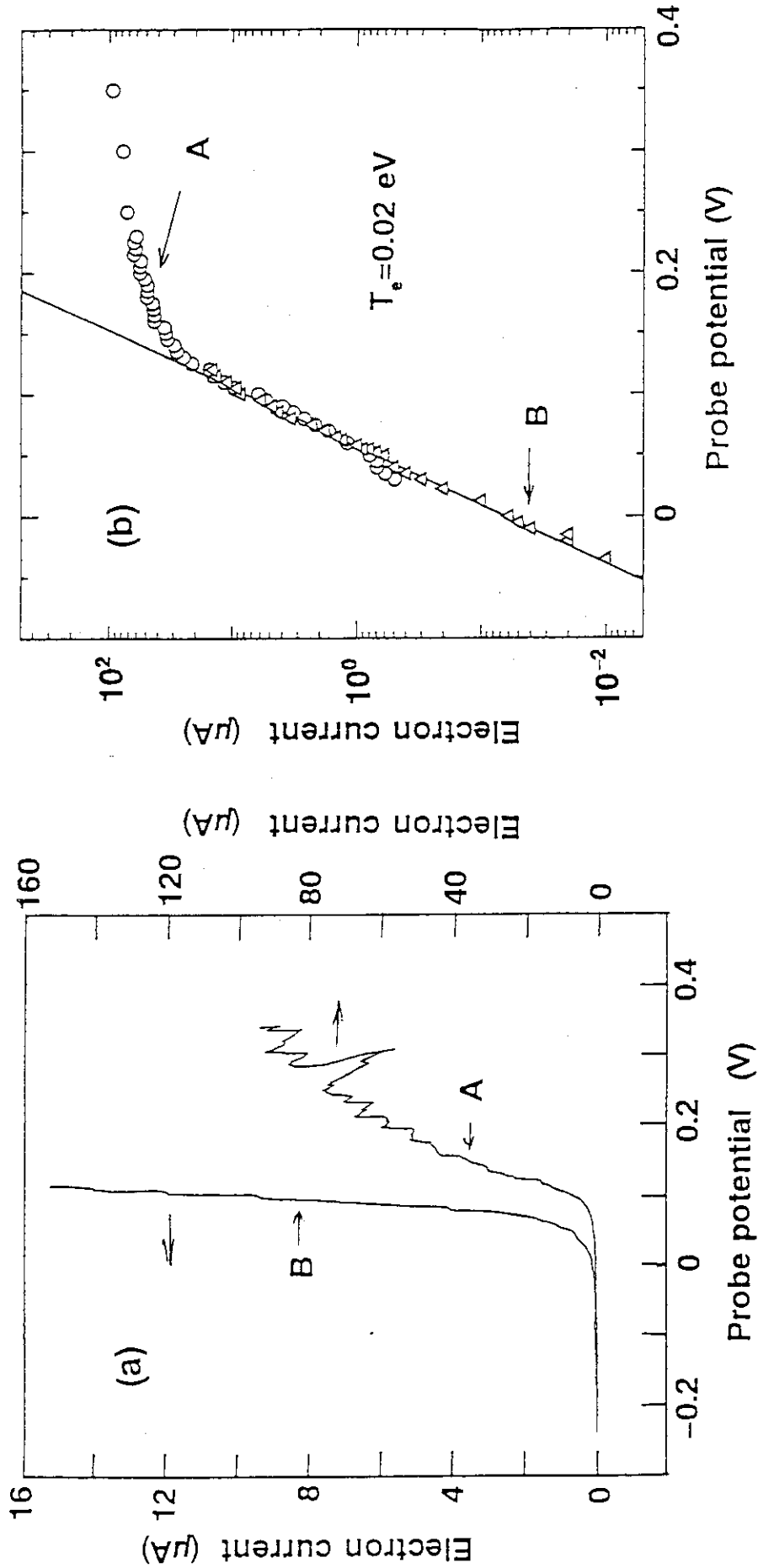


図8 プロープ測定結果の例  
 レーザー照射後 $45 \mu\text{s}$ , 原子密度  $2.3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ,  
 (a) 電流電圧特性 (b) 電子電流の対数プロット (電子温度 $0.02 \text{ eV}$ )

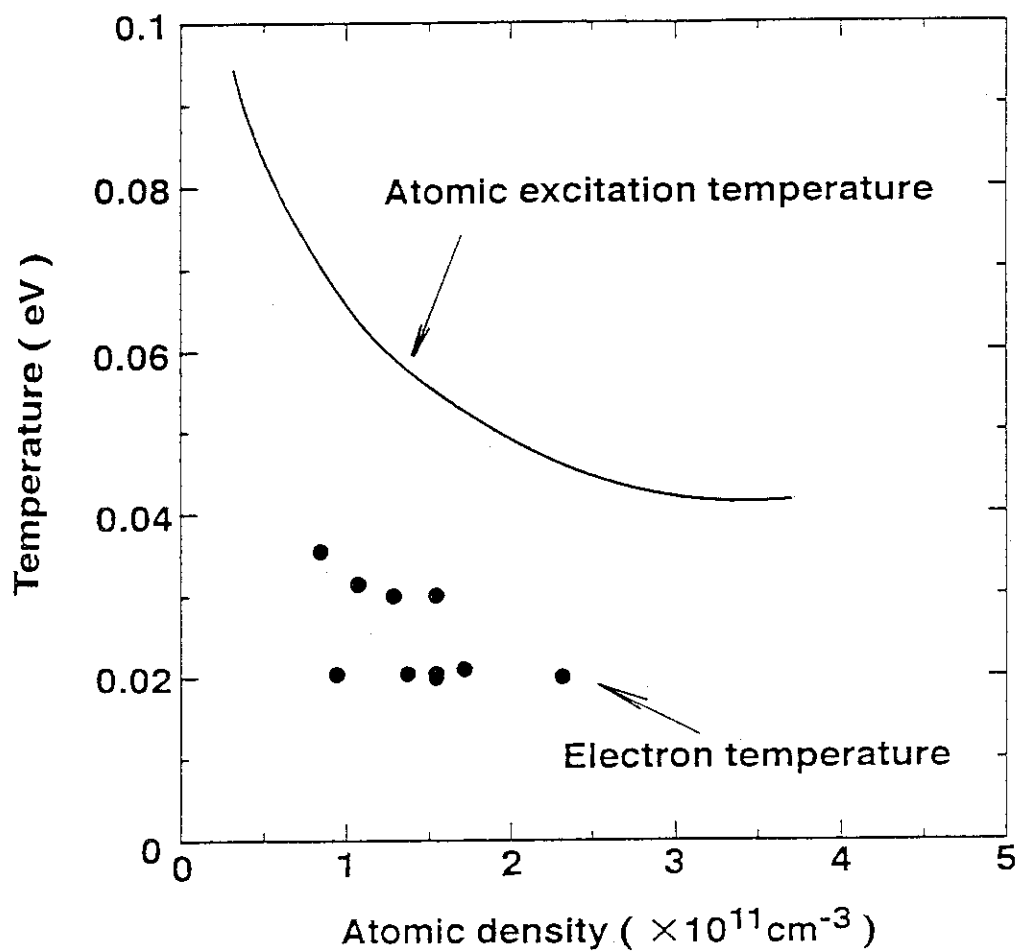


図9 電子温度の原子密度依存性  
 ●は測定した電子温度，—は共鳴イオン化法で測定した原子励起温度  
 (ref(2) から)

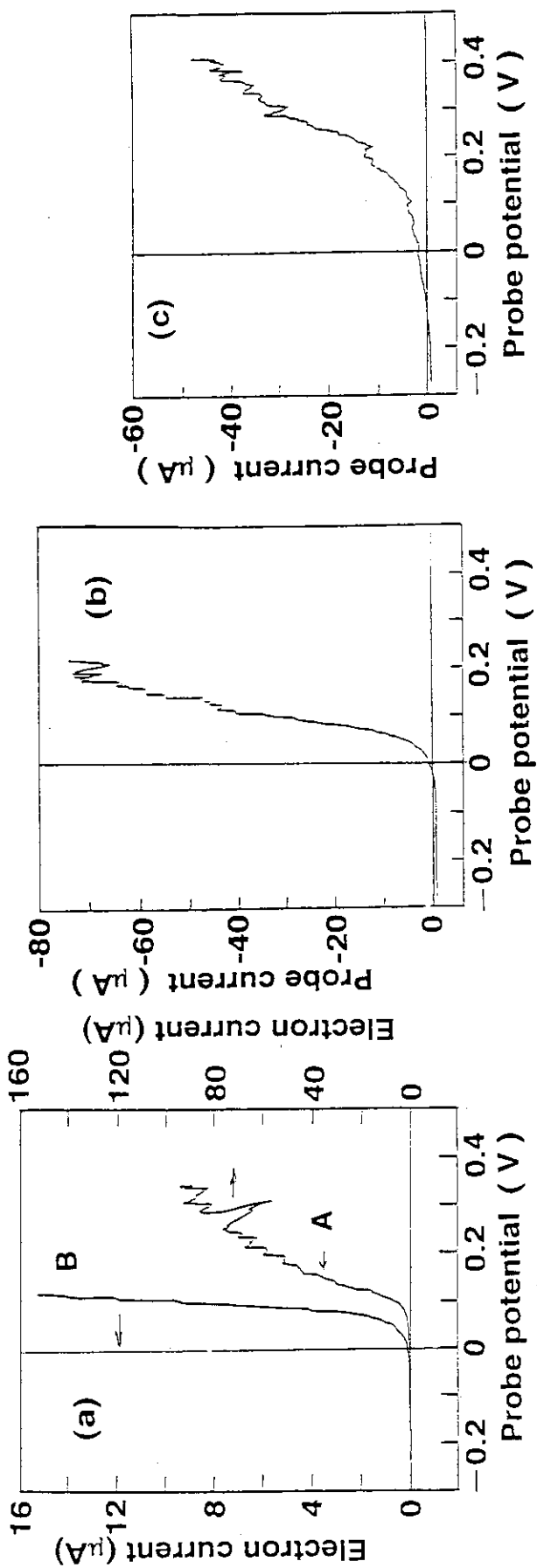


図10 電流電圧特性の時間変化  
 時間の経過とともに(a), (b), (c)の順にプローブ特性が変化する。  
 (a)は図9(a)の再録。



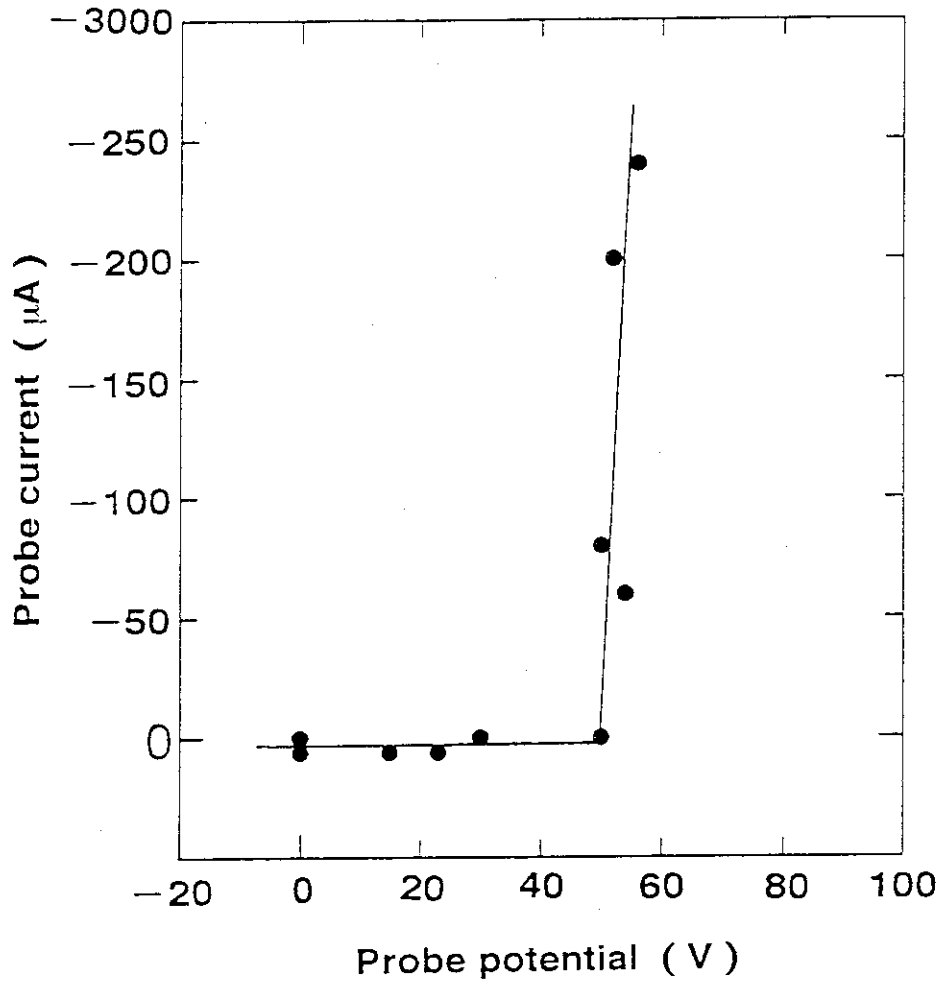


図11 プラズマポテンシャルの測定例  
 2つの回収電極のうち一方を50V, 他方を接地した場合の例