



orifice probe-DCレーザー光脱離法による 負イオンプラズマ診断

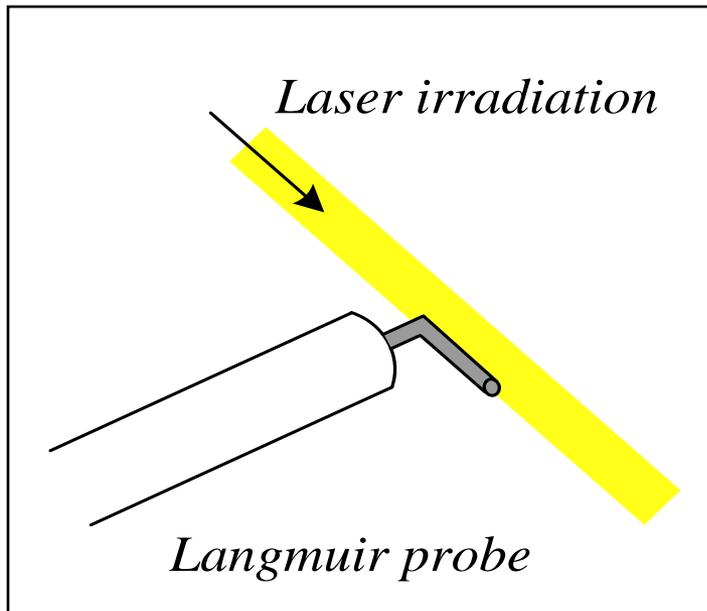
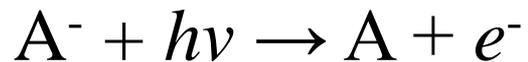
*Negative ion plasma diagnostics for DC laser photodetachment
method with an orifice probe.*

同志社大学大学院工学研究科電気電子工学専攻
応用物理研究室 島本 敏史



研究背景

- プラズマ中の負イオン密度は、一般的にLangmuir probeを用いたパルスレーザー光脱離法により測定。



- 照射領域の負イオンを全て脱離するため、プラズマに与える擾乱が大。
- プロブ表面で、吸着物のアブレーションが生じ、負イオン密度を過大評価。
- 反応性プラズマ中では、プラズマ-光子-表面化学反応により、プロブが破壊。



研究背景

DCレーザー光脱離法

パルスレーザーと比較して出力が小さく、プラズマに与える擾乱が少なくなるため、信号の不安定性を低減して測定可能.

密度摂動の小さな条件でパルスレーザーを用いて負イオン密度の結果と等しくなった¹.

酸素プラズマ中で、密度摂動を考慮したモデルで信号波形を計測することに成功し、拡散理論による予測と良い一致を得た².

1. H. Takahashi, T. Kasuya, M. Wada, Rev. Sci. Instrum. **77**, 03A513 (2006).
2. Y. Matsuda, T. Kasuya, M. Wada, Rev. Sci. Instrum. **79**, 02A517 (2008)



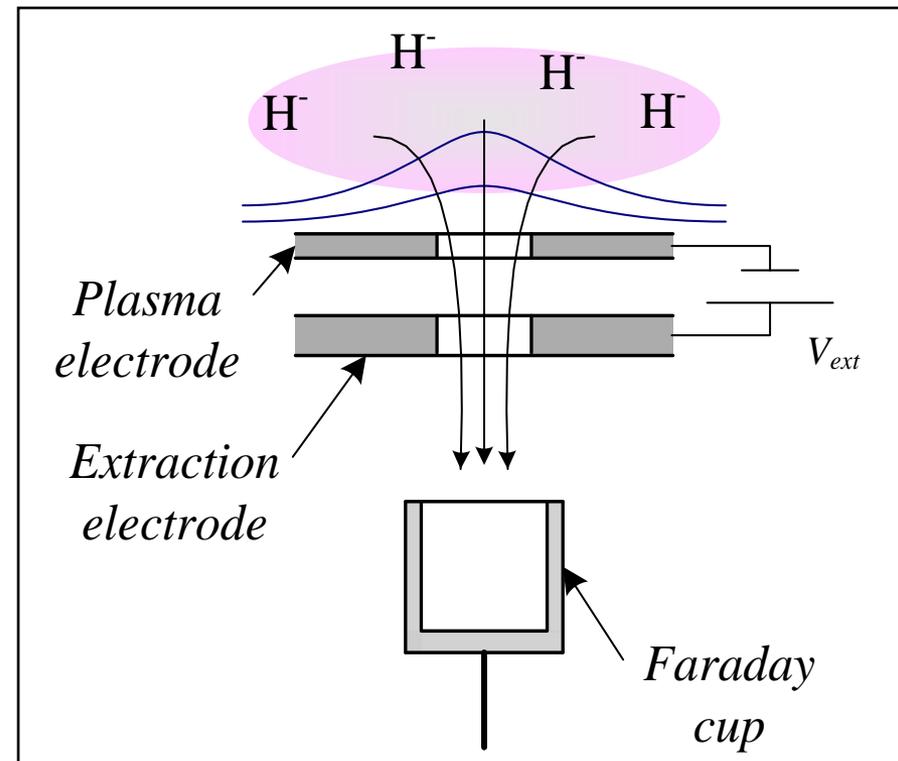
研究背景

ビーム引き出し光脱離法

Langmuir probeを挿入することによる、プラズマへの擾乱を避けるため、ビーム引き出し系を用いて測定.

- 数%の負イオン引き出し確率を求めることに成功³.
- 引出電圧の増加にともない、引出孔からプラズマ領域へ電界が染み出す影響の定量評価がされている⁴.

3. Y. Matsumoto, M. Nishiura, K. Matsuoka, M. Wada, M. Sasao, H. Yamaoka, Rev. Sci. Instrum. **77**, 03B705 (2006).
4. Y. Matsumoto, M. Nishiura, M. Sasao, H. Yamaoka, K. Shinto, M. Wada, Rev. Sci. Instrum. **79**, 02B909 (2008).





研究目的

- DCレーザーを用いたビーム引き出し光脱離計測を模擬.

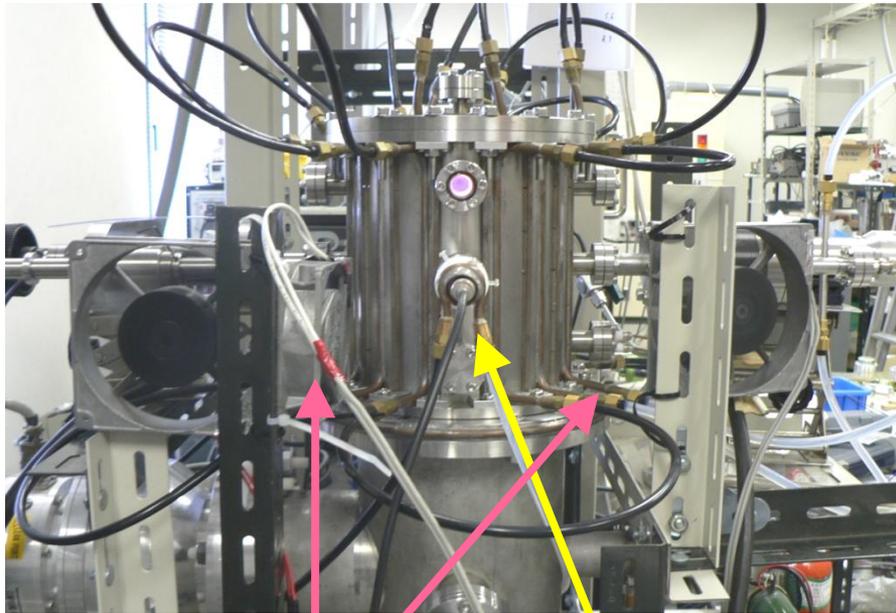
- ✓ 引出構造を持つプローブの設計.
- ✓ ビーム引き出し光脱離計測.

- 負イオンプラズマの輸送を調査.

- ✓ プローブ電圧を変化させて光脱離計測.
- ✓ 電界の染み出しを確認.



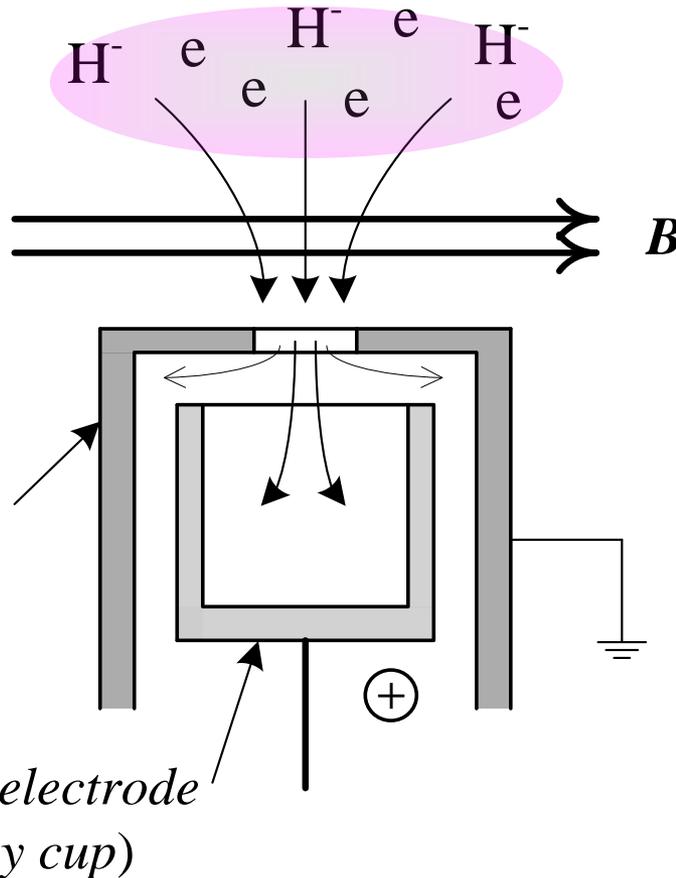
実験装置



- 装置周辺の磁石によりプラズマを閉じ込め.
- DCアーク放電により, 水素プラズマを生成.
- カソードを2本用いて, プラズマを安定化.
- 半導体レーザーをプラズマ中に照射.
- プローブを装置横から挿入して光脱離計測.



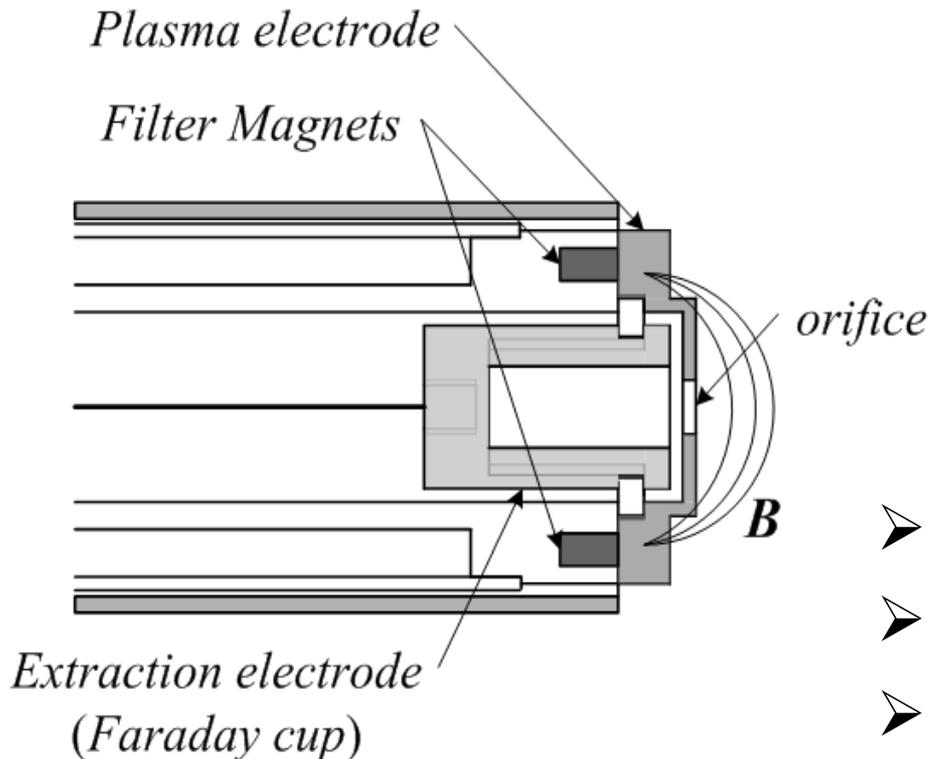
ビーム引き出し系(*orifice probe*)



- コレクタ(引出電極)は、ビーム引出構造を持つようファラデーカップ形状に.
- 引出電極に正電圧を印加して、負イオン・電子を引き出す.
- 磁場により、負イオンと同時に引き出される低速電子の流入を抑制.



orifice probe



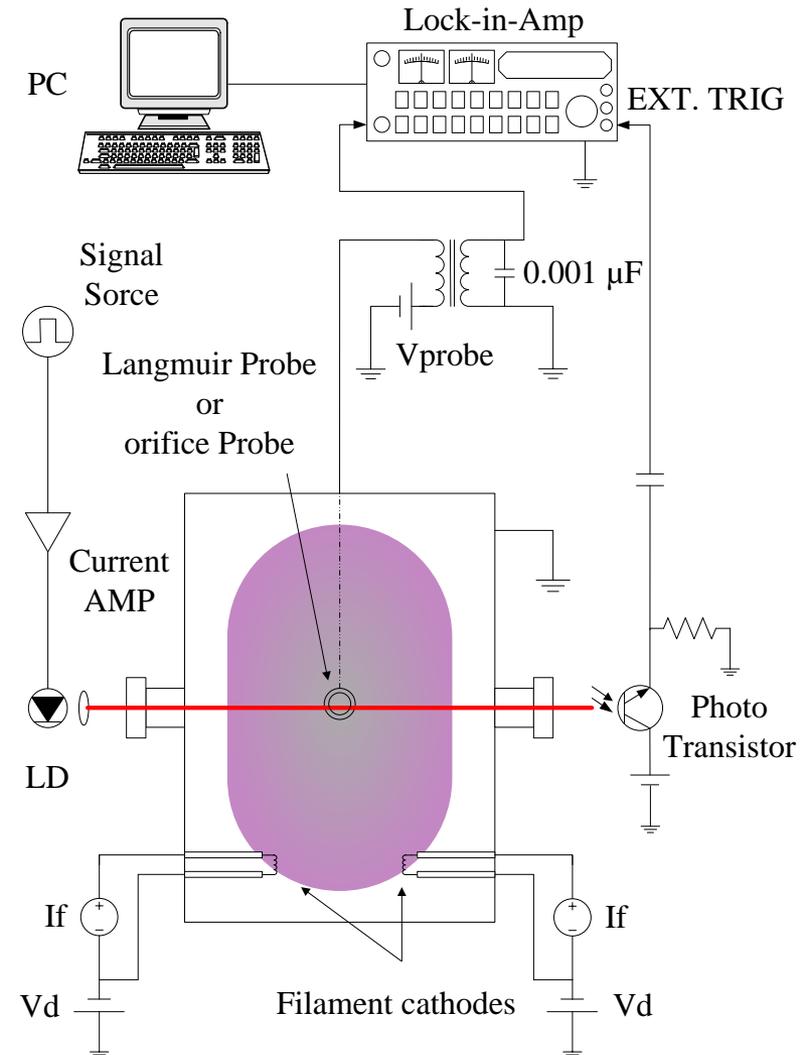
- orifice(孔)の径は $\phi 2.5$ mm
- 外側の電極(プラズマ電極)は接地.
- 磁石が作るフィルター磁場は, orifice正面で約80 Gauss.
- 引出電圧150 Vのとき, ビーム電流は約0.4 mA.



1. DCレーザー光脱離法による負イオン計測

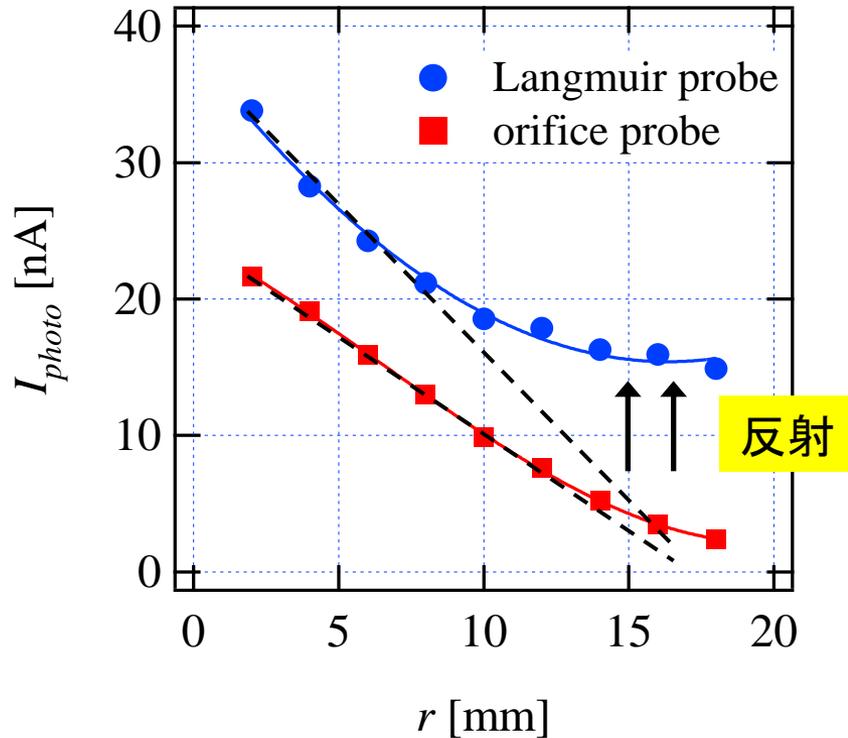
- 飽和電子領域になるよう正にバイアスしたプローブで光脱離電子を捕集. (Langmuir probe : 14 V)
- orifice probe : 150 VでHを引出す.
- バンドパスフィルター構造を持つ測定回路を通し, ロックインアンプを用いて計測.

| | |
|--------------|----------------|
| 放電電流 : 1.0 A | レーザー出力 : 1.0 W |
| 放電電圧 : 100 V | 変調周波数 : 5 kHz |
| ガス圧 : 1.0 Pa | |





1. DCレーザー光脱離法による負イオン計測



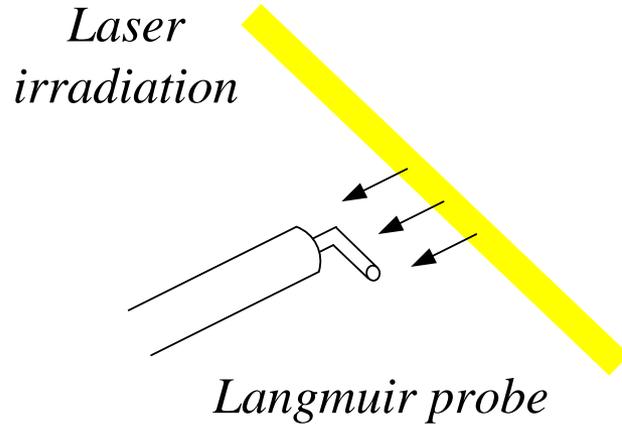
➤ $r=15$ mmの位置において,

Langmuir probeで約15 nA
orifice probeで数 nA

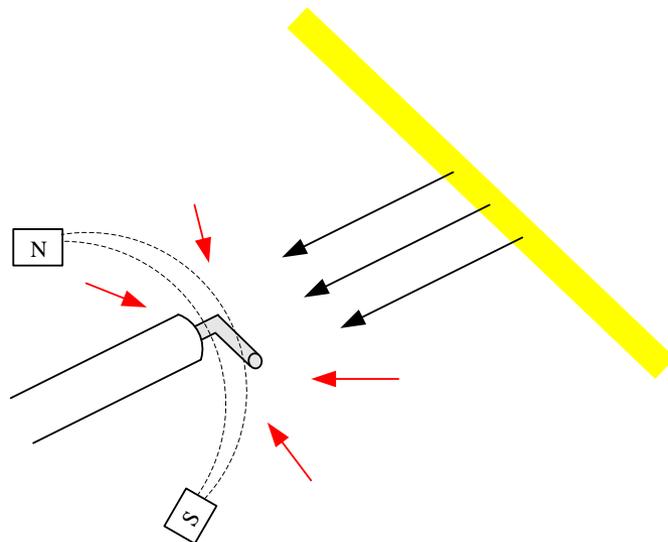
➤ orifice probeを用いることで、マルチカस्प磁場で反射した光脱離電子の成分を抑制した計測が可能となっている。



1. DCレーザー光脱離法による負イオン計測



- 十分近い領域では、ほぼレーザー照射領域で光脱離した電子を得る。



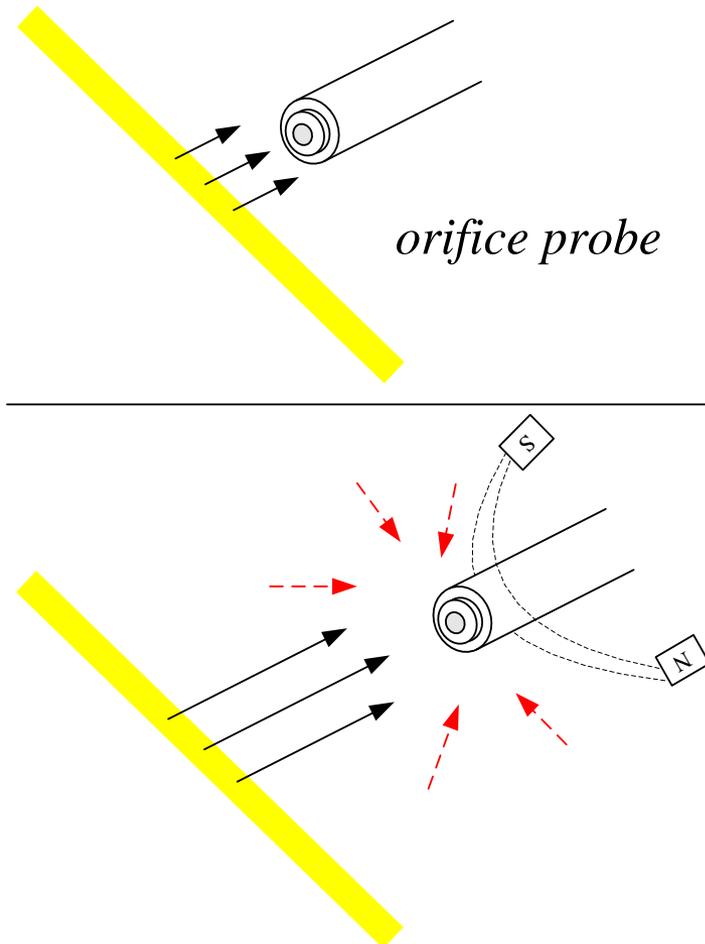
- 離していくにつれて、光脱離電子の反射成分を捕集しやすくなる。

Langmuir probeでは、反射成分を含む可能性がある。



1. DCレーザー光脱離法による負イオン計測

*Laser
irradiation*



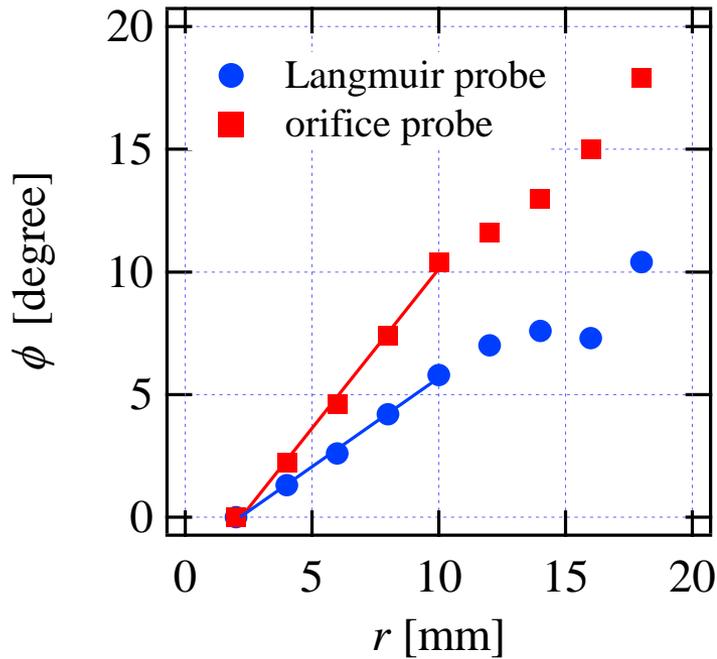
- 引出電極の正面に引出孔 (orifice)があることにより、ビームの引き出せる領域は、ほぼ正面から.

- 十分離しても、光脱離電子の反射成分を捕集しづらい.

orifice probeを用いることで、反射成分の影響を低減した測定が可能.



1. DCLレーザー光脱離法による負イオン計測



➤ 光脱離電子の伝播速度

$$v_e(r) = 2\pi f \left(\frac{d\phi(r)}{dr} \right)^{-1}$$

Langmuir probe → 約 3.0×10^5 cm/s

orifice probe → 約 1.5×10^5 cm/s

➤ 伝播速度に約2倍の差.

➤ orifice probeを用いることで、反射成分を抑制した計測ができていると考えられる.



1. DCレーザー光脱離法による負イオン計測

➤ 負イオン/電子密度比

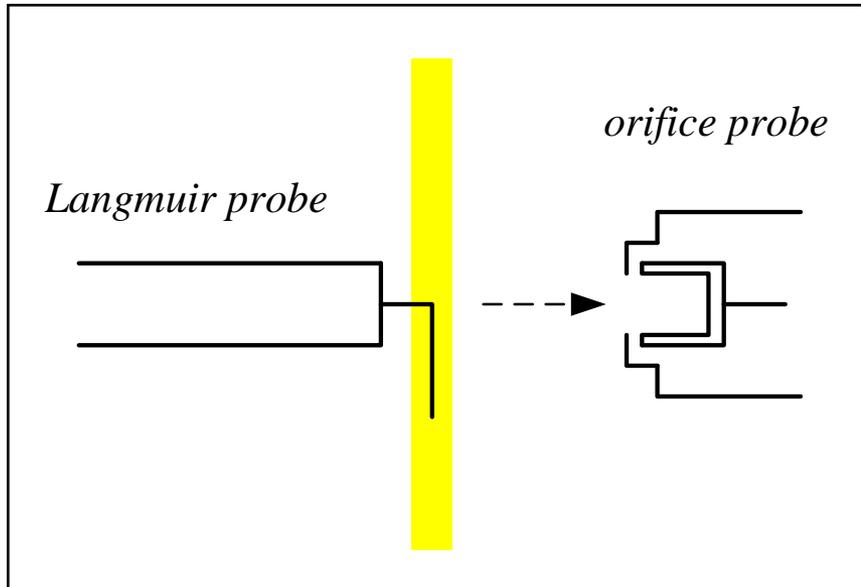
$$\frac{N_{H^-}}{N_e} = 2\pi \frac{h\nu}{\sigma_{pd} W_L} \frac{r \delta I_{photo}(r) v_e(r)}{I_p}$$

- Langmuir probe : 約1.5 %
- orifice probe : 約5 %

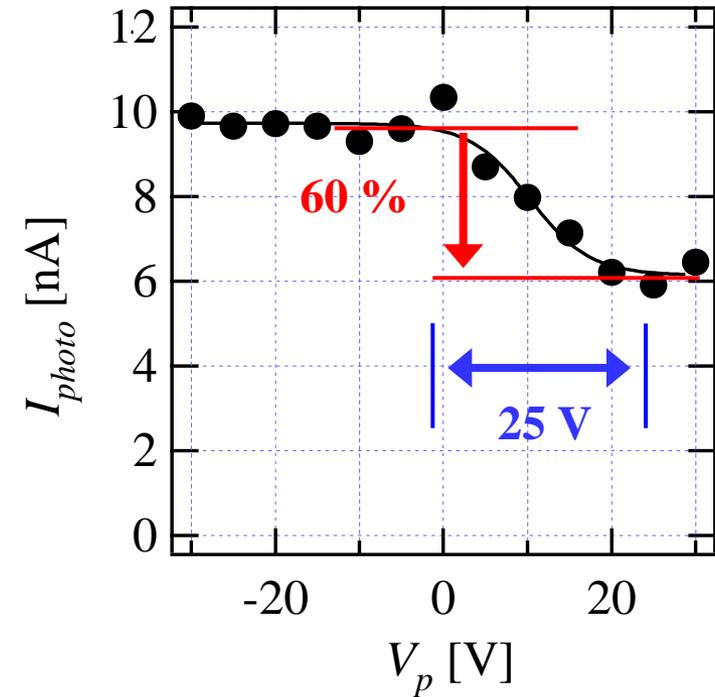
- orifice probeを用いることでも、拡散モデルによる伝播速度、負イオン密度比の公式を用いることができる。



2. プローブに印加する電圧がプラズマに及ぼす影響



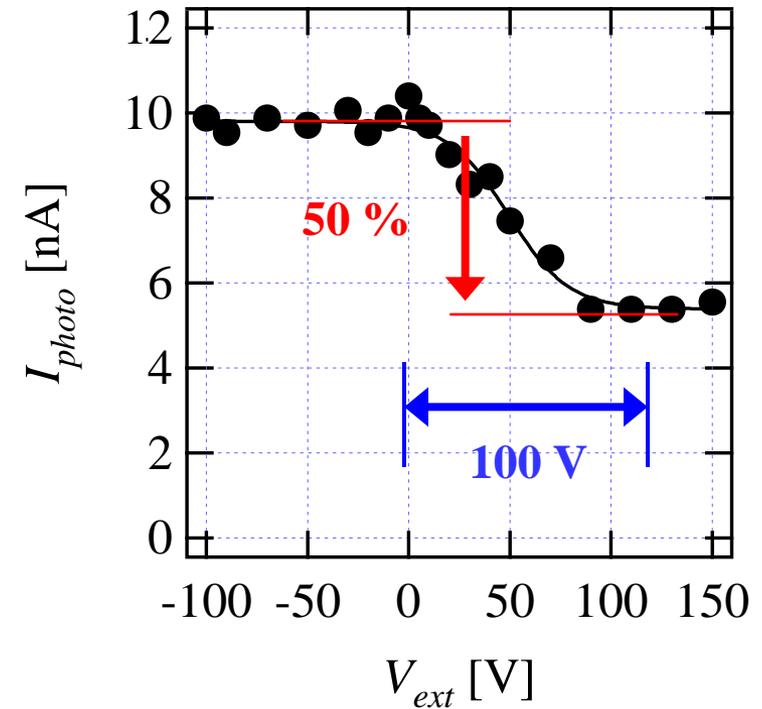
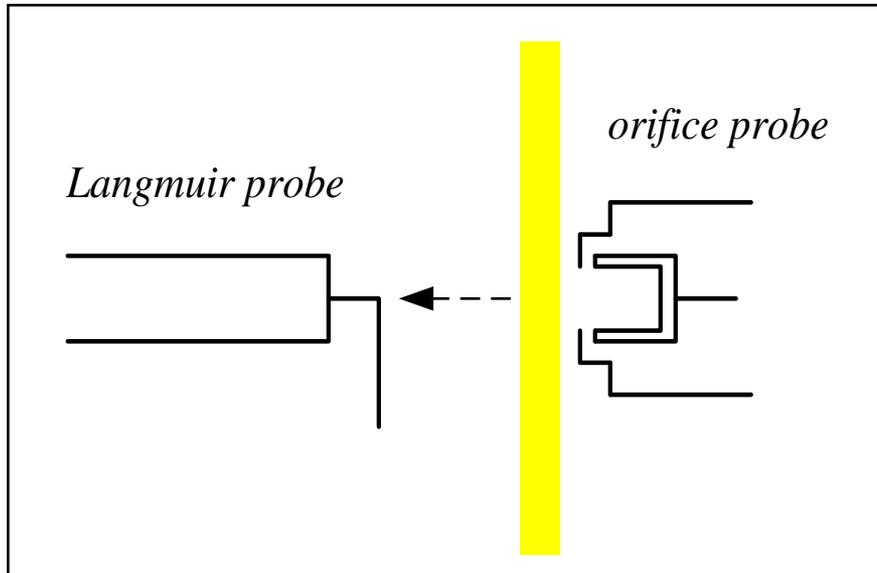
- Langmuir probeに印加する電圧を-30~+30 Vで変化.
- orifice probeが得る光脱離電流を計測.



- プローブ正電圧の印加により、光脱離電子を含む負イオンプラズマの輸送が変化.



2. プローブに印加する電圧がプラズマに及ぼす影響



- orifice probeの引出電極に印加する電圧を-100~+150 Vで変化.
- Langmuir probeが得る光脱離電流を計測.

- 引出電極への正電圧の印加により, 光脱離電子を含む負イオンプラズマの輸送が変化.

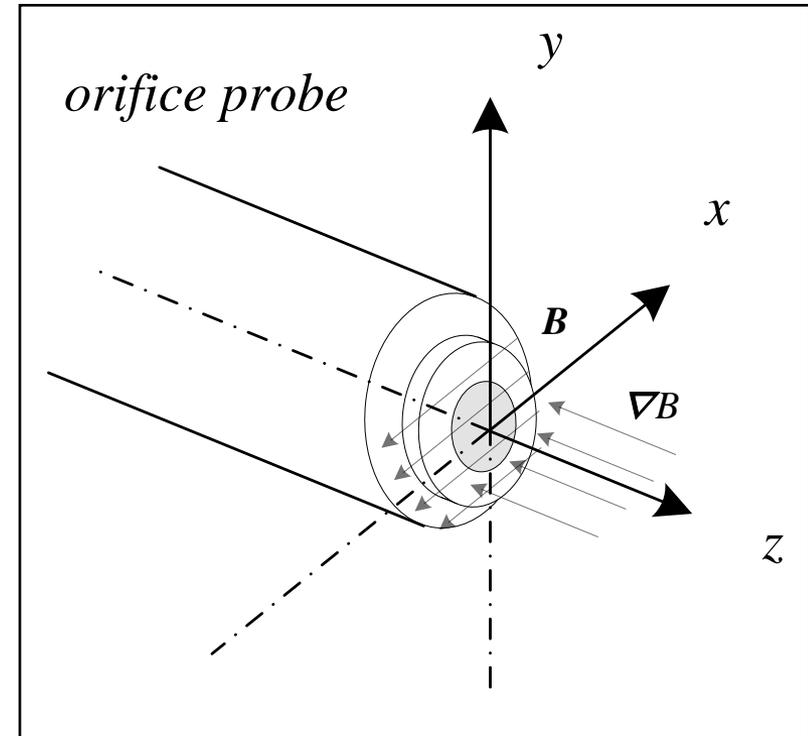


引出孔周辺のプラズマ電位構造の変化

引出電圧の印加により、プラズマ領域への電界の染み出しモデルが考えられる。

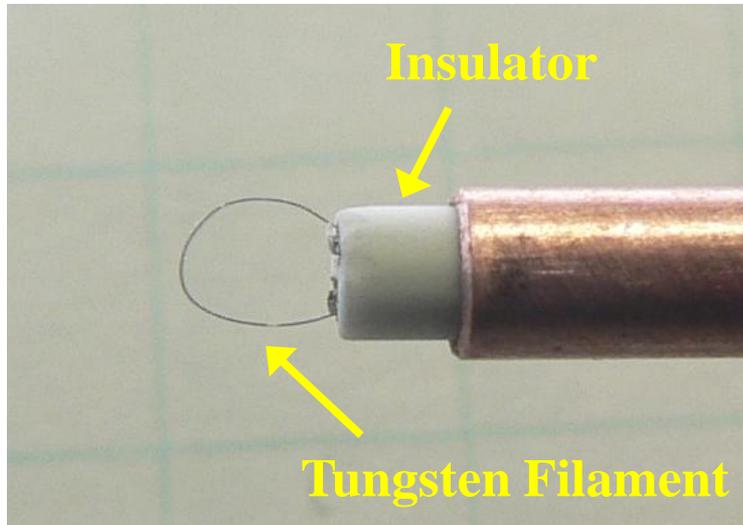


- 引出孔周辺のプラズマ電位を調査.
- 電界の染み出しを確認.

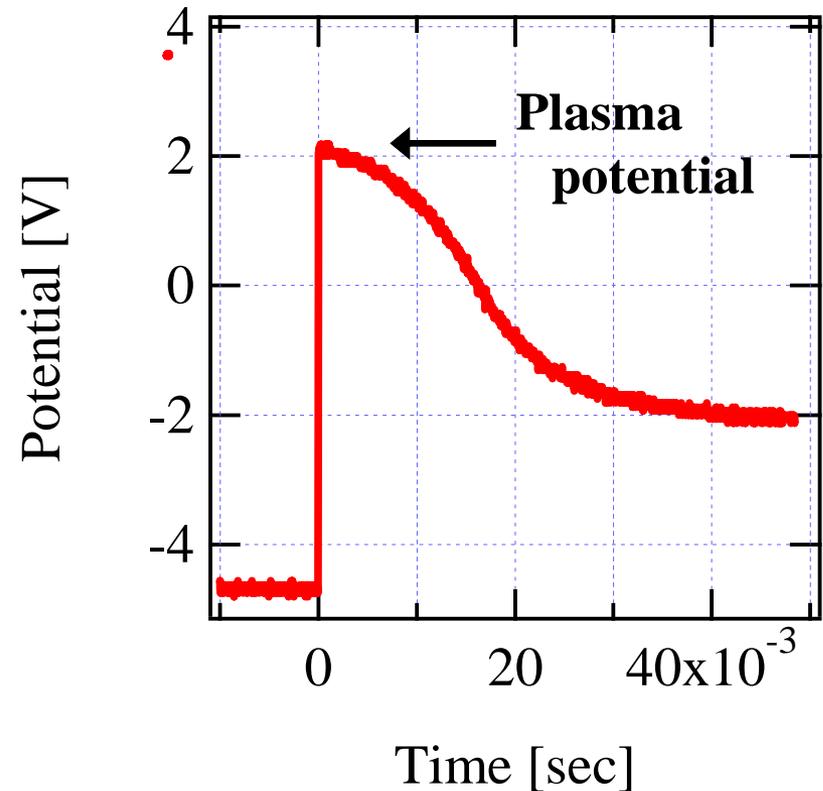




3. Emissive probeによるプラズマ電位計測



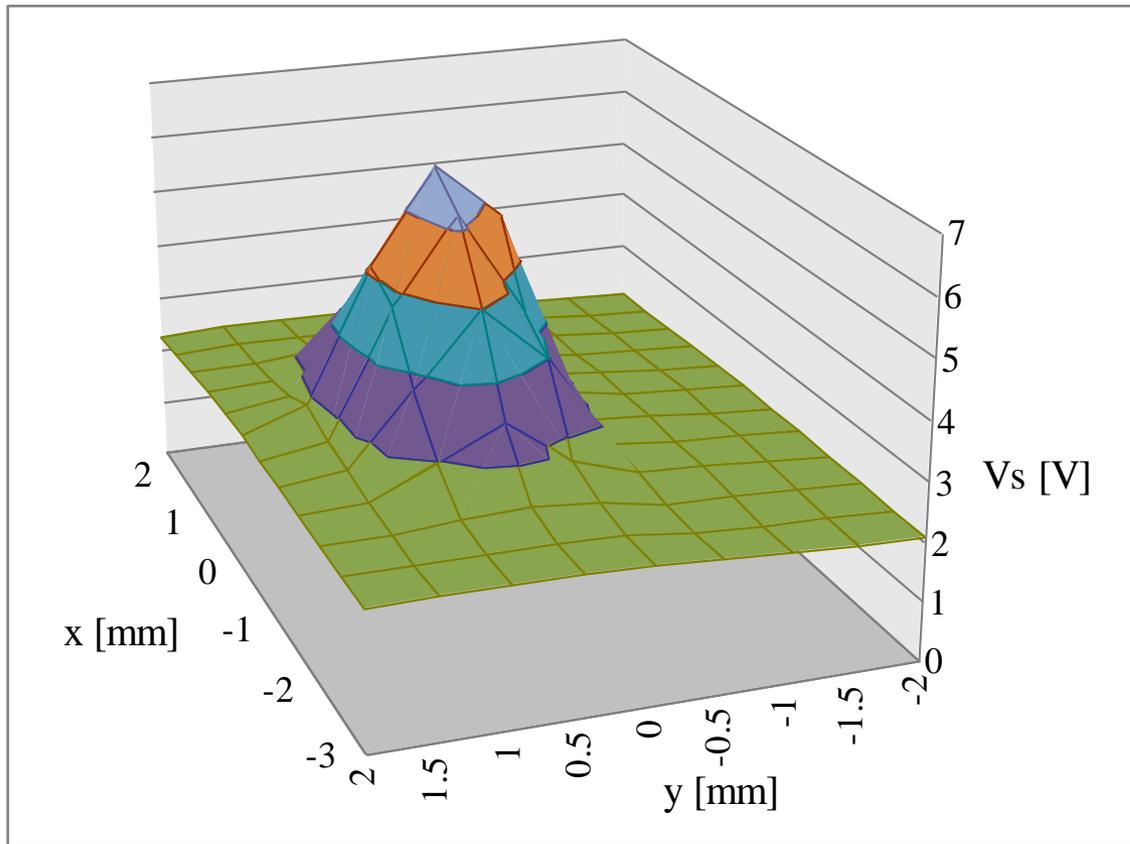
- $\phi 0.03$ mm, 長さ約10 mmのタングステンフィラメントを加熱.
- 通電を切った瞬間の波形をオシロスコープで観測.



- 通電を切った瞬間($t=0$)に上昇するポイントがプラズマ電位.



3. Emissive probeによるプラズマ電位計測

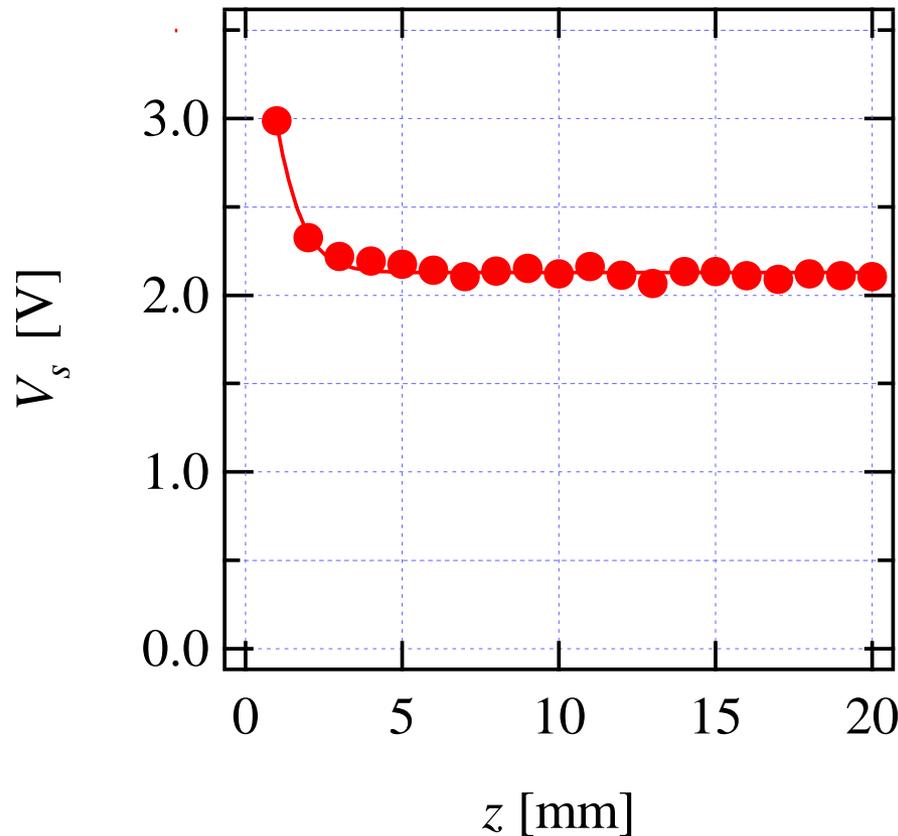


- x, y 軸を ± 2 mmで移動.
- 引出電圧は100 V, $z=1$ mmとして固定.

➤ プラズマ領域へ電界の染み出しが生じている.



3. Emissive probeによるプラズマ電位計測



- z 軸を1~20 mmで移動.
- 引出電圧は100 V,
(x, y)=(0,0) mmとして固定.

- プラズマ領域へ電界の染み出し長さは、引出孔から数mm程度.



結論

- ビーム引出構造を持つ orifice probe を用いて、DCレーザー光脱離法による計測を行ったところ、
 - ✓ プラズマ閉じ込め用の磁場による光脱離電子の反射成分を抑制した測定ができた.
 - ✓ 密度摂動を考慮した拡散モデルを用いて伝播速度および密度比の算出が可能である.

- 引出孔周辺のプラズマ電位構造を調査したところ、
 - ✓ 非常に狭い領域で電位が上昇しており、プラズマ領域への電界の染み出しが確認できた.
 - ✓ 光脱離電子を含む負イオンプラズマの輸送は、この電界により変化したと考えられる.