



Kinetic Effects in RF Discharges

Philipp Hacker

Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät
Institut für Physik
Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald

3. Dezember 2017

Betreuer: Prof. Dr. R. Schneider
Gutachter: Prof. Dr. J. Meichsner



1. Motivation

2. Experiment

3. Particle-in-Cell Methode

4. 1D Simulation

5. Simulationen in 2D

6. Ausblick

7. Referenzen

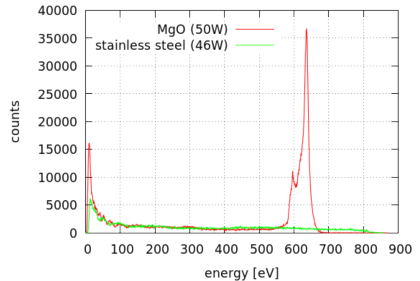
Kapazitive gekoppelte RF-Plasmen

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456

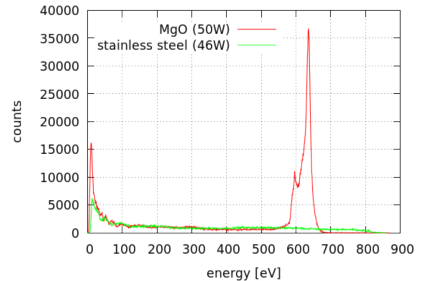
- Anwendung in Halbleiter- und Computerchip-Industrie
- in elektronegativen CCRF-Entladungen treffen schnelle Ionen auf die Elektroden
- Oberflächenprozesse an der Elektrode mit negativen Ionen



(Negative Ionen Energieverteilung in Sauerstoffentladungen) [2]

Kapazitive gekoppelte RF-Plasmen

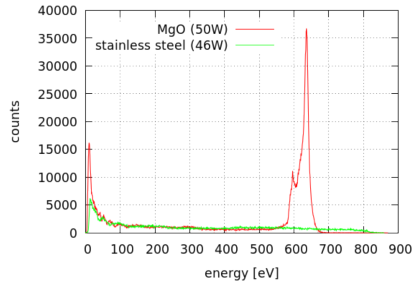
- Anwendung in Halbleiter- und Computerchip-Industrie
- in elektronegativen CCRF-Entladungen treffen schnelle Ionen auf die Elektroden
- Oberflächenprozesse an der Elektrode mit negativen Ionen



(Negative Ionen Energieverteilung in Sauerstoffentladungen) [2]

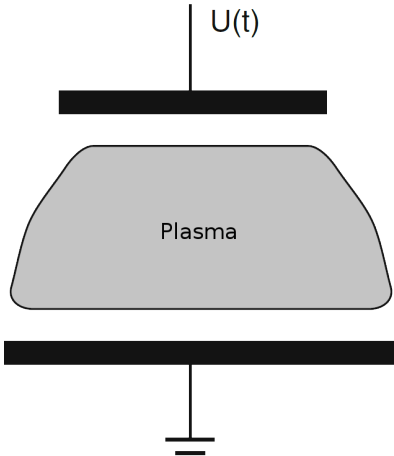
Kapazitive gekoppelte RF-Plasmen

- Anwendung in Halbleiter- und Computerchip-Industrie
- in elektronegativen CCRF-Entladungen treffen schnelle Ionen auf die Elektroden
- Oberflächenprozesse an der Elektrode mit negativen Ionen



(Negative Ionen Energieverteilung in Sauerstoffentladungen) [2]

Randschichteffekte



(Schema einer Entladung) [1]

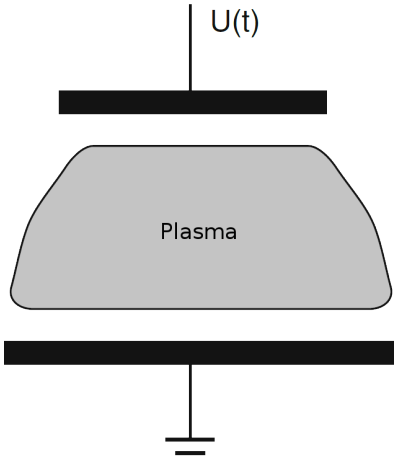
- negative Aufladung der Wände durch schnellere Elektronen
→ Self-Bias

- Ionen werden auf Bohm-Geschwindigkeit beschleunigt

$$v_{i,B} = \sqrt{\frac{k_B T_e}{m_i}}$$

- Asymmetrie der getriebenen/geerdten Elektroden

Randschichteffekte



(Schema einer Entladung) [1]

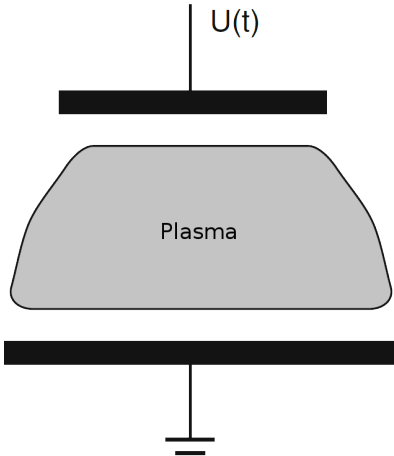
- negative Aufladung der Wände durch schnellere Elektronen
→ Self-Bias

- Ionen werden auf Bohm-Geschwindigkeit beschleunigt

$$v_{i,B} = \sqrt{\frac{k_B T_e}{m_i}}$$

- Asymmetrie der getriebenen/geerdten Elektroden

Randschichteffekte



(Schema einer Entladung) [1]

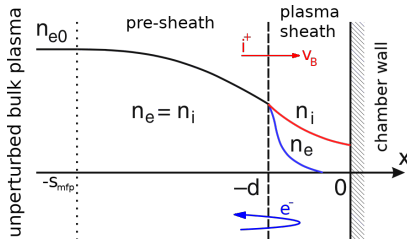
- negative Aufladung der Wände durch schnellere Elektronen
→ Self-Bias

- Ionen werden auf Bohm-Geschwindigkeit beschleunigt

$$v_{i,B} = \sqrt{\frac{k_B T_e}{m_i}}$$

- Asymmetrie der getriebenen/geerdten Elektroden

Randschichteffekte

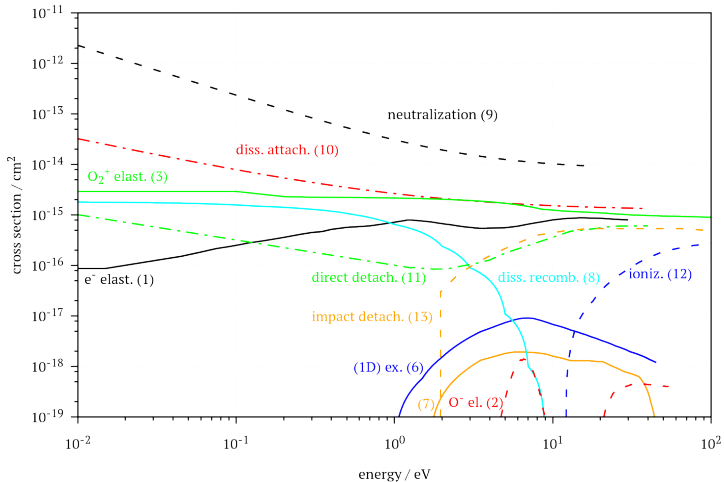


(Dichte und Potential vor einer Wand) [1]

- ...
- Kapazitive Kopplung führt zur Verschiebung des Plasma-Potentials



Oberflächen- und Stoßprozesse



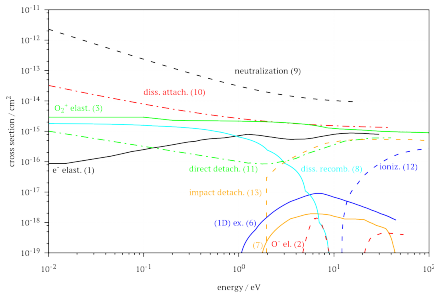
(ausgewählte Stoßquerschnitte in Sauerstoff)

Oberflächen- und Stoßprozesse

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456



Nr.	Reaction	Type
Elastic scattering		Energy loss
(1)	$e^- + O_2 \rightarrow O_2 + e^-$	
(2)	$O^- + O_2 \rightarrow O_2 + O^-$	
(3)	$O_2^+ + O_2 \rightarrow O_2 + O_2^+$	
Electron energy loss scattering		Energy loss
(4)	$e^- + O_2 \rightarrow O_2^* + e^-$	Vibrational excitation ($\nu = 1, \dots, 4$)
(5)	$e^- + O_2 \rightarrow O_2(Ryd) + e^-$	Rydberg excitation
(6)	$e^- + O_2 \rightarrow O(1D) + O(3P) + e^-$	Dissociative excitation at 8.6 eV
(7)	$e^- + O_2 \rightarrow O_2(a^1\Delta_g, b^1\Sigma_g)$	Meta-stable excitation
Electron and ion reactions		Creation and loss
(8)	$e^- + O_2^+ \rightarrow 2O$	Dissociative recombination
(9)	$O^- + O_2^+ \rightarrow O_2 + O$	Neutralization
(10)	$e^- + O_2 \rightarrow O + O^-$	Dissociative attachment
(11)	$O^- + O_2 \rightarrow O + O_2 + e^-$	Direct detachment
(12)	$e^- + O_2 \rightarrow 2e^- + O_2^+$	Impact ionisation
(13)	$e^- + O^- \rightarrow O + 2e^-$	Impact detachment

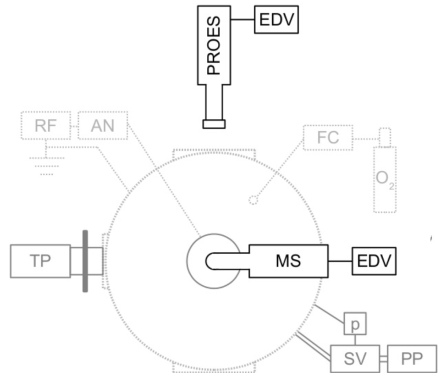
Das Experiment

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456

- große Asymmetrie zwischen geerdeter Kammer und CCRF-Elektrode
- niedrige Gasflüsse und -drücke (≤ 5 sccm, 15 Pa)
- Elektrodenabstand ~ 5 cm



(Draufsicht des Experimentes) [2]

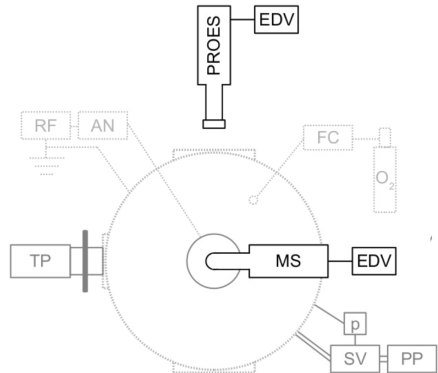
Das Experiment

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456

- große Asymmetrie zwischen geerdeter Kammer und CCRF-Elektrode
- niedrige Gasflüsse und -drücke (≤ 5 sccm, 15 Pa)
- Elektrodenabstand ~ 5 cm



(Draufsicht des Experimentes) [2]

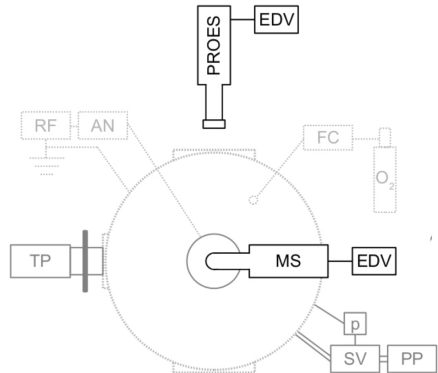
Das Experiment

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD

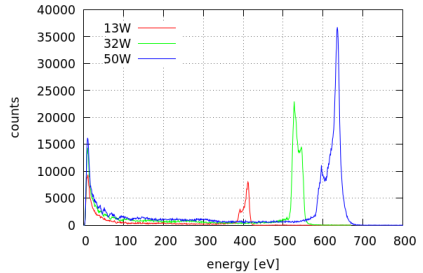
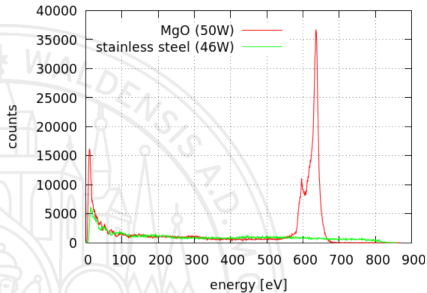


Wissen
lockt.
Seit 1456

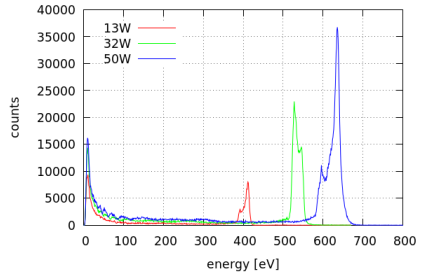
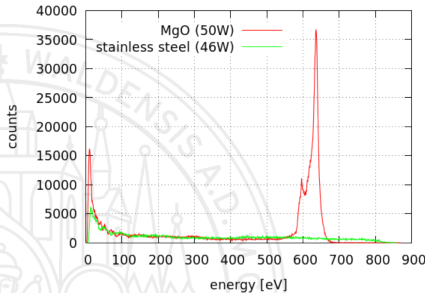
- große Asymmetrie zwischen geerdeter Kammer und CCRF-Elektrode
- niedrige Gasflüsse und -drücke (≤ 5 sccm, 15 Pa)
- Elektrodenabstand ~ 5 cm



(Draufsicht des Experimentes) [2]

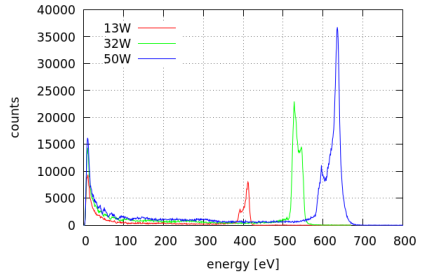
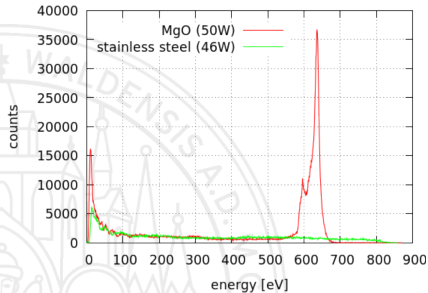


Struktur in EVF der negativen Ionen in Sauerstoff, Scheuer et. al [2]
Hochenergetische Spitze in Abhängigkeit der Leistung
⇒ Anionen von der Elektrode?



Struktur in EVF der negativen Ionen in Sauerstoff, Scheuer et. al [2]
Hochenergetische Spitze in Abhängigkeit der Leistung

⇒ Anionen von der Elektrode?

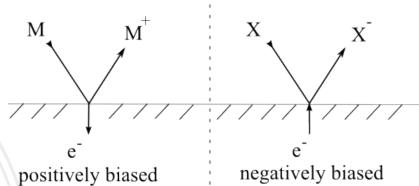


Struktur in EVF der negativen Ionen in Sauerstoff, Scheuer et. al [2]
Hochenergetische Spitze in Abhängigkeit der Leistung
⇒ Anionen von der Elektrode?

"vacuum"

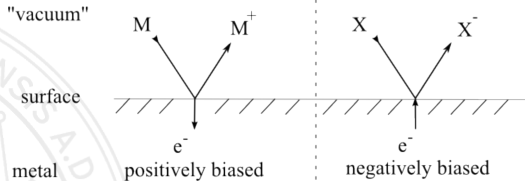
surface

metal



Saha-Langmuir Gleichung:

Ionisation hängt ab von Austrittsarbeit, Ionisationsenergie, Oberflächentemperatur, Spannung und quantenmechanischen Koeffizienten des Materials

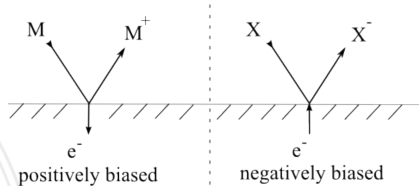


Saha-Langmuir Gleichung:
Ionisation hängt ab von Austrittsarbeit, Ionisationsenergie,
Oberflächentemperatur, Spannung und quantenmechanischen
Koeffizienten des Materials

"vacuum"

surface

metal



Saha-Langmuir Gleichung:

~~Ionisation hängt ab von Austrittsarbeit, Ionisationsenergie,
Oberflächentemperatur, Spannung und quantenmechanischen
Koeffizienten des Materials~~

Particle-in-Cell Methode

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



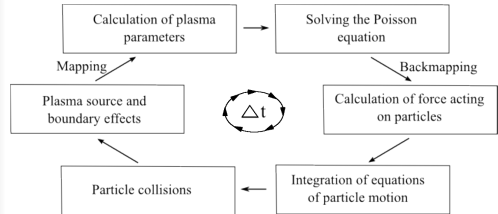
Wissen
lockt.
Seit 1456

$$[1] : \Delta \Phi_k(r_{i,j}, t_k) = - \frac{\rho_k(r_{i,j}, t_k)}{\epsilon_0}$$

$$[2] : \vec{E}_k = -\vec{\nabla} \Phi_k$$

$$[3] : \frac{d\vec{v}_{k,n}}{dt} = \frac{q_n}{m_n} \vec{E}_k(r_n, t_k)$$

$$[4] : \frac{d\vec{x}_{k,n}}{dt} = \vec{v}_{k,n}$$





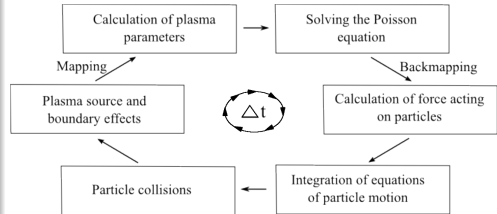
Particle-in-Cell Methode

$$[1] : \Delta \Phi_k(r_{i,j}, t_k) = -\frac{\rho_k(r_{i,j}, t_k)}{\epsilon_0}$$

$$[2] : \vec{E}_k = -\vec{\nabla} \Phi_k$$

$$[3] : \frac{d\vec{v}_{k,n}}{dt} = \frac{q_n}{m_n} \vec{E}_k(r_n, t_k)$$

$$[4] : \frac{d\vec{x}_{k,n}}{dt} = \vec{v}_{k,n}$$



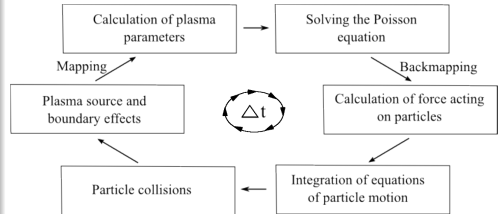
Particle-in-Cell Methode

$$[1] : \Delta \Phi_k(r_{i,j}, t_k) = -\frac{\rho_k(r_{i,j}, t_k)}{\epsilon_0}$$

$$[2] : \vec{E}_k = -\vec{\nabla} \Phi_k$$

$$[3] : \frac{d\vec{v}_{k,n}}{dt} = \frac{q_n}{m_n} \vec{E}_k(r_n, t_k)$$

$$[4] : \frac{d\vec{x}_{k,n}}{dt} = \vec{v}_{k,n}$$





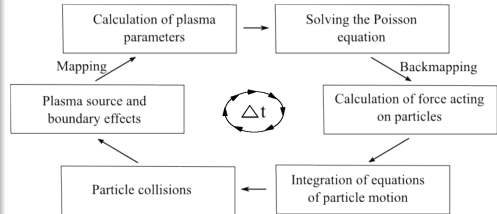
Particle-in-Cell Methode

$$[1] : \Delta \Phi_k(r_{i,j}, t_k) = -\frac{\rho_k(r_{i,j}, t_k)}{\epsilon_0}$$

$$[2] : \vec{E}_k = -\vec{\nabla} \Phi_k$$

$$[3] : \frac{d\vec{v}_{k,n}}{dt} = \frac{q_n}{m_n} \vec{E}_k(r_n, t_k)$$

$$[4] : \frac{d\vec{x}_{k,n}}{dt} = \vec{v}_{k,n}$$





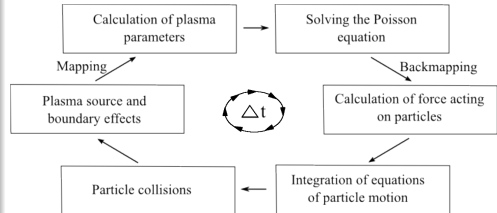
Particle-in-Cell Methode

$$[1] : \Delta \Phi_k(r_{i,j}, t_k) = -\frac{\rho_k(r_{i,j}, t_k)}{\epsilon_0}$$

$$[2] : \vec{E}_k = -\vec{\nabla} \Phi_k$$

$$[3] : \frac{d\vec{v}_{k,n}}{dt} = \frac{q_n}{m_n} \vec{E}_k(r_n, t_k)$$

$$[4] : \frac{d\vec{x}_{k,n}}{dt} = \vec{v}_{k,n}$$



1D Simulation

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456



Energieverteilungen

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456



Dynamik negativer Ionen

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456



Simulationen in 2D

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456



Vergleich mit 1D

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456



Negative Ionen EVF

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456



Asymmetrische Ranbedingungen

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456



Einfluss des Self Bias

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456



Ausblick

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456



Referenzen

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456

