Bruno da Silva Rodrigues

PLASMAS FLUORADOS COM ACOPLAMENTO INDUTIVO

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

São Paulo
2006

Bruno da Silva Rodrigues

PLASMAS FLUORADOS COM ACOPLAMENTO INDUTIVO

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Microeletrônica
Orientador: Prof. Dr. Patrick B. Verdonck.

São Paulo
2006

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Rodrigues, Bruno da Silva

Plasmas Fluorados com acoplamento indutivo. São Paulo 2006.

105 p

Dissertação (Mestrado- Programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica. Área de concentração: Microeletrônica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos

1. Caracterização de plasmas. 2. Plasmas de acoplamento indutivo. Espectrometria.

Dedico este trabalho a algumas pessoas que fazem parte da minha vida:
Meu pais Emílio Abreu Rodrigues e Maria A. da Silva Rodrigues
por tudo que fizeram por mim,
A minha namorada Adriana que sempre me incentivou
A meu irmão Mauro.

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Patrick, B. Verdonck, pela ajuda, orientação, discussões, amizade e companheirismo ao longo desse trabalho.

Aos Professores. Ronaldo D. Mansano e Luiz Zambom, pelo auxílio, e discussões que tivemos durante o trabalho.

A minha amiga Laura Swart, pela amizade, ajuda nesse trabalho.

Aos técnicos, Nelson Ordonez, Alexandre Camponucci, Antônio Moreira, Adir Moreira e Renato Franzin, pelo auxílio e suporte dado ao trabalho.

A minha namorada Adriana, pela paciência, compreensão, companheirismo e motivação.

Ao amigos de laboratório, Acácio Siarkowski, Alexander Tressino, Rodrigo Amorin, Peter Polak, Michele Rodrigues e Sara Elizabeth e Carolina Davanzo por compartilharem meus problemas, pela amizade, e por todas as coisas que passamos juntos durante o trabalho.

Resumo

Este trabalho de mestrado tem o intuito de caracterizar plasmas do tipo indutivo (ICP)

Para a caracterização do plasma, foram usadas técnicas de espectroscopia e medidas elétricas.

Foram analisados plasmas de Argônio, por ser um gás inerte, oxigênio, por ser um pouco eletronegativo, SF_6 , por ser um gás muito eletronegativo e útil para a corrosão de silício, misturas de oxigênio e SF_6 com Ar, CF_4 e misturas de CF_4 com Ar.

Observou-se que obtêm-se plasmas indutivamente acoplados quando se cria uma condição de concentração mínima de elétrons livres no plasma. Isso acontece quando há uma certa potência aplicada no eletrodo e outra potência aplicada na bobina. Quanto menos eletronegativo o gás, menores são estas potências. Nos casos estudados significa que é mais fácil obter acoplamento indutivo com Ar puro, depois com as misturas dos gases. Em nosso reator foi mais difícil conseguir obter plasmas indutivamente acoplados com O_2 e SF_6 puros, pois não tivemos condições de “hardware” para aplicar as potências altas as suficientes para criar o plasma indutivo.

Também estudamos dois materiais como material de eletrodo, estanho e alumínio e observamos que para o SF_6 há uma maior concentração de F com eletrodo de Sn enquanto para CF_4 a concentração de F é maior com eletrodo de Al.

Abstract

In this work, inductively coupled plasmas have been studied, using optical emission spectroscopy and electrical measurements. Four gases were analysed : argon, being an inert gas, oxygen because it is slightly electronegative, SF₆ because it is very electronegative and also etches silicon and its compounds and CF₄ because it also etches silicon and its compounds and is slightly electronegative. Also the mixtures of oxygen, SF₆, important to silicon etching and CF₄ with argon were studied.

The studies indicated that it is necessary to have a minimum concentration of free electrons in the plasma to obtain an inductively coupled plasma. This depends very strongly on the power levels applied to the cathode and the coil of the reactor, The less electronegative the gas, the lower these power levels. Hence it was easiest to obtain argon inductively coupled plasmas, followed by the argon mixtures and with the pure gases it more difficult to obtain ICP plasmas with the available hardware.

Two materials were studied as cathode material: tin and aluminium. When using SF₆, the highest F concentration was obtained with the tin electrode, but for CF₄ gases, the highest fluorine concentration was obtained with the aluminium electrode.

Lista de Ilustrações

Figura 1: Curva de Paschen ^[11]	3
Figura 2: Potencial DC no plasma entre os dois eletrodos ^[12]	4
Figura 3 : Gráfico de V_f em relação à V_p ^[12]	6
Figura 4: Esquema de reator tipo ICP.....	12
Figura 5 : Esquema do reator ICP.....	16
Figura 6: Foto do reator fechado	16
Figura 7: Foto do reator aberto	17
Figura 8: Circuito utilizado na malha de acoplamento da bobina.	18
Figura 9: Esquema de ligação do sistema de medidas à linha de RF que alimenta o eletrodo.22	
Figura 10: Tensão DC no eletrodo inferior (V_{dc}) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de Ar, a pressão de 10 mTorr....	24
Figura 11: Tensão DC no eletrodo inferior (V_{dc}) em função da potência aplicada no eletrodo sem potência na bobina, para uma pressão de 10 mTorr.	25
Figura 12 : Tensão de pico a pico (V_{pp}) em função da potência aplicada na bobina e da potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de Ar, a uma pressão de 10 mTorr. 26	
Figura 13: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas capacitivos com 10 W e 200 W no eletrodo.....	28
Figura 14: Intensidade em função da potência no eletrodo para as raias de 421 nm, 596 nm, 702 nm 750 nm 811 nm e 840nm.	28
Figura 15: Fragmento de esquema do níveis energéticos envolvidos na formação de emissão de Ar na faixa ~700 a 811 nm (m significa nível metaestável) e alguns canais de excitação eletrônica (e) e emissão óptica (hv) . ^[31]	29
Figura 16: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de Ar com 0 W de potência no eletrodo para potências de 50 W, 200 W e 400 W na bobina.	30

Figura 17 : Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas com 100 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.	30
Figura 18: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas com 200 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.	31
Figura 19: Intensidade em função da potência no bobina para as raias de 750 nm 811 nm e 840 nm para plasmas de Argônio puro com 0 W de potência no eletrodo.	32
Figura 20: Intensidade em função da potência no bobina para as raias de 750 nm 811 nm e 840 nm para plasmas de argônio puro com 0 W de potência no eletrodo e 50 W, 100 W e 150 W de potência na bobina.	32
Figura 21: Intensidade em função da potência no bobina para as raias de 750 nm 811 nm e 840 nm para plasmas de argônio puro com 100 W de potência no eletrodo.	33
Figura 22: Intensidade em função da potência no bobina para as raias de 750 nm 811 nm e 840 nm para plasmas de argônio puro com 200 W de potência no eletrodo.	33
Figura 23: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de O ₂ , a pressão de 10 mTorr....	35
Figura 24: Tensão de pico a pico (Vpp) em função da potência aplicada na bobina e da potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de O ₂ , a uma pressão de 10 mTorr.	36
Figura 25: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de O ₂ com 0 W de potência no eletrodo para potências de 50 W, 200 W e 400 W na bobina.	38
Figura 26: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de O ₂ com 100 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.	38
Figura 27: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de O ₂ com 200 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.	39

Figura 28: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de O_2+Ar , a pressão de 10 mTorr.	40
Figura 29: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de O_2 e misturas de O_2+Ar , a pressão de 10 mTorr.	41
Figura 30: Tensão de pico a pico (Vpp) em função da potência aplicada na bobina e da potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de O_2+Ar , a uma pressão de 10 mTorr.	42
Figura 31: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de O_2+Ar com 0 W de potência no eletrodo para potências de 50 W, 200 W e 400 W na bobina.	43
Figura 32: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de O_2+Ar com 100 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.	43
Figura 33: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de O_2+Ar com 200 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.	44
Figura 34: Intensidade em função da potência no bobina para as de argônio de 750 nm 811 nm e 840 nm para plasmas de O_2+Ar com 200 W de potência no eletrodo.	45
Figura 35: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para plasmas de SF_6 , a pressão de 10 mTorr.	46
Figura 36: Tensão de pico a pico (Vpp) em função da potência aplicada na bobina e da potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de SF_6 , a uma pressão de 10 mTorr.	47
Figura 37: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF_6 com 0 W de potência no eletrodo para potências de 50 W, 200 W e 400 W na bobina.	48

Figura 38: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF ₆ com 100 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.....	49
Figura 39: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF ₆ com 200 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.....	49
Figura 40: Intensidade em função da potência no bobina para as raias de 581 nm 678 nm e 703 nm para plasmas de SF ₆ puro com 0 W de potência no eletrodo.	50
Figura 41: Intensidade em função da potência no bobina para as raias de 581 nm 678 nm e 703 nm para plasmas de SF ₆ puro com 100 W de potência no eletrodo.	51
Figura 42: Intensidade em função da potência no bobina para as raias de 581 nm 678 nm e 703 nm para plasmas de SF ₆ puro com 200 W de potência no eletrodo.	51
Figura 43: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para plasmas de SF ₆ +Ar, a pressão de 10 mTorr.	53
Figura 44: Tensão de pico a pico (Vpp) em função da potência aplicada na bobina e da potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de SF ₆ +Ar, a uma pressão de 10 mTorr.	54
Figura 45: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF ₆ +Ar com 0 W de potência no eletrodo para potências de 50 W, 200 W e 400 W na bobina.....	55
Figura 46: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF ₆ +Ar com 100 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.	56
Figura 47: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF ₆ +Ar com 200 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.	56
Figura 48: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF ₆ e SF ₆ +Ar com 200 W de potência no eletrodo para potências de 0 W na bobina.	57

Figura 49: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF ₆ e SF ₆ +Ar com 200 W de potência no eletrodo para potências de 400 W na bobina.	58
Figura 50: Tensão DC no eletrodo inferior (V _{dc}) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para plasmas de CF ₄ , a pressão de 10 mTorr...	59
Figura 51: Tensão de pico a pico (V _{pp}) em função da potência aplicada na bobina e da potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de CF ₄ , a uma pressão de 10 mTorr.	60
Figura 52: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF ₄ com 0 W de potência no eletrodo para potências de 50 W, 200 W e 400 W na bobina.	61
Figura 53: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF ₄ com 100 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.....	61
Figura 54: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF ₄ com 200 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.....	62
Figura 55: Tensão DC no eletrodo inferior (V _{dc}) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para plasmas de CF ₄ +Ar, a pressão de 10 mTorr.	63
Figura 56: Tensão de pico a pico (V _{pp}) em função da potência aplicada na bobina e da potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de CF ₄ +Ar, a uma pressão de 10 mTorr.	64
Figura 57: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF ₄ +Ar com 0 W de potência no eletrodo para potências de 50 W, 200 W e 400 W na bobina.....	65
Figura 58: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF ₄ +Ar com 100 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.	65
Figura 59: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF ₄ +Ar com 200 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.	66

Figura 60: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF_4 e CF_4+Ar com 0 W de potência no eletrodo para potências de 400 W na bobina.	66
Figura 61: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF_4 e CF_4+Ar com 200 W de potência no eletrodo para potências de 400 W na bobina.	67
Figura 62: Tensão DC no eletrodo inferior (V_{dc}) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para plasmas de Ar, a pressão de 10 mTorr.	68
Figura 63: Tensão de pico a pico (V_{pp}) em função da potência aplicada na bobina e da potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de Ar, a uma pressão de 10 mTorr.	69
Figura 64: Tensão DC no eletrodo inferior (V_{dc}) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para plasmas de Ar com eletrodo de estanho e eletrodo e alumínio, a pressão de 10 mTorr.	70
Figura 65: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de Ar com 0 W de potência no eletrodo para potências de 50 W, 200 W e 400 W na bobina.	71
Figura 66: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de Ar com 100 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.	72
Figura 67: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de Ar com 200 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.	72
Figura 68: Intensidade em função da potência no eletrodo para as raias de 750 nm 811 nm e 840 nm para plasmas de Argônio puro com 0 W de potência no eletrodo.	73
Figura 69: Intensidade em função da potência no eletrodo para as raias de 750 nm 811 nm e 840 nm para plasmas de Argônio puro com 100 W de potência no eletrodo.	73
Figura 70: Intensidade em função da potência no eletrodo para as raias de 750 nm 811 nm e 840 nm para plasmas de Argônio puro com 200 W de potência no eletrodo.	74

Figura 71: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de Ar com 0 W de potência no eletrodo para potência de 50 W na bobina e diferentes materiais no eletrodo.	75
Figura 72: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de Ar com 0 W de potência no eletrodo para potência de 400 W na bobina e diferentes materiais no eletrodo.	75
Figura 73: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de Ar com 200 W de potência no eletrodo para potência de 0 W na bobina e diferentes materiais no eletrodo.	76
Figura 74: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de Ar com 200 W de potência no eletrodo para potência de 400 W na bobina e diferentes materiais no eletrodo.	76
Figura 75: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para plasmas de SF ₆ , a pressão de 10 mTorr. ..	78
Figura 76: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para diferentes tipos de material no eletrodo em plasmas de SF ₆ , a pressão de 10 mTorr.	79
Figura 77: Tensão de pico a pico (Vpp) em função da potência aplicada na bobina e da potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de SF ₆ , a uma pressão de 10 mTorr.	80
Figura 78: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF ₆ com 0W de potência no eletrodo para potências de 50 W, 200 W e 400W na bobina.	81
Figura 79: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF ₆ com 100W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400W na bobina.....	81
Figura 80: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF ₆ com 200W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400W na bobina.....	82

Figura 81: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF_6 com 0W de potência no eletrodo para potência de 400 W na bobina e diferentes materiais no eletrodo.	83
Figura 82: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF_6 com 200W de potência no eletrodo para potência de 400 W na bobina e diferentes materiais no eletrodo.	83
Figura 83: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para plasmas de SF_6+Ar a pressão de 10 mTorr.	85
Figura 84: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para diferentes tipos de material no eletrodo em plasmas de SF_6+Ar , a pressão de 10 mTorr.	86
Figura 85: Tensão de pico a pico (Vpp) em função da potência aplicada na bobina e da potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de SF_6+Ar , a uma pressão de 10 mTorr.	87
Figura 86: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF_6+Ar com 0W de potência no eletrodo para potências de 50 W, 200 W e 400W na bobina.	88
Figura 87: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF_6+Ar com 100W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400W na bobina.	88
Figura 88: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF_6+Ar com 200W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400W na bobina.	89
Figura 89: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF_6+Ar , com 0W de potência no eletrodo para potência de 400 W na bobina e diferentes materiais no eletrodo.	90

Figura 90: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF_6+Ar , com 200W de potência no eletrodo para potência de 400 W na bobina e diferentes materiais no eletrodo.	90
Figura 91: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para plasmas de CF_4 a pressão de 10 mTorr....	92
Figura 92: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para diferentes tipos de material no eletrodo em plasmas de CF_4 , a pressão de 10 mTorr.....	93
Figura 93: Tensão de pico a pico (Vpp) em função da potência aplicada na bobina e da potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de CF_4 , a uma pressão de 10 mTorr.	94
Figura 94: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF_4 com 0 W de potência no eletrodo para potências de 50 W, 200 W e 400 W na bobina	95
Figura 95: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF_4 com 100 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.....	95
Figura 96: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF_4 com 200 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.....	96
Figura 97: : Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF_4 , com 0 W de potência no eletrodo para potência de 400 W na bobina e diferentes materiais no eletrodo.	97
Figura 98: : Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF_4 , com 200 W de potência no eletrodo para potência de 400 W na bobina e diferentes materiais no eletrodo.	97

Figura 99: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para plasmas de CF ₄ +Ar, a pressão de 10 mTorr.	99
Figura 100: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para diferentes tipos de material no eletrodo em plasmas de CF ₄ +Ar, a pressão de 10 mTorr.	100
Figura 101: Tensão de pico a pico (Vpp) em função da potência aplicada na bobina e da potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de CF ₄ +Ar, a uma pressão de 10 mTorr.	101
Figura 102: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF ₄ +Ar com 0 W de potência no eletrodo para potências de 50 W, 200 W e 400 W na bobina	102
Figura 103: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF ₄ +Ar com 100 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina	102
Figura 104: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF ₄ +Ar com 200 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.	103
Figura 105: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF ₄ +Ar, com 0 W de potência no eletrodo para potência de 400 W na bobina e diferentes materiais no eletrodo.	104
Figura 106: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF ₄ +Ar, com 200 W de potência no eletrodo para potência de 400 W na bobina e diferentes materiais no eletrodo.	104

Lista de Tabelas

Tabela 1: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para plasmas de Ar com eletrodo de estanho e eletrodo e alumínio, a pressão de 10 mTorr.....	69
Tabela 2: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para diferentes tipos de material no eletrodo em plasmas de SF ₆ , a pressão de 10 mTorr.	79
Tabela 3: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para diferentes tipos de material no eletrodo em plasmas de SF ₆ +Ar, a pressão de 10 mTorr.....	86
Tabela 4: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para diferentes tipos de material no eletrodo em plasmas de CF ₄ , a pressão de 10 mTorr.....	93
Tabela 5: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para diferentes tipos de material no eletrodo em plasmas de CF ₄ +Ar, a pressão de 10 mTorr.....	100

Lista de Siglas

RIE	Reactive Ion Etching
Vf	Potencial flutuante
Vp	Potencial de plasma
E.E.D.F	Função de distribuição de energia dos elétrons
n_e'	Densidade de elétrons que chegam ao substrato
n_e	Densidade de elétrons no plasma
Ar	Argônio
e^-	Eletron
F	Flúor
CF ₄	Tetrafluoreto de carbono
SF ₆	Hexafluoreto de enxofre
O ₂	Oxigênio
ICP	Inductively Coupled Plasma
RF	Radio Frequência
W	Watts
Vdc	Tensão DC no eletrodo
V	Volts
Vpp	Tensão de pico a pico
λ	Comprimento de onda
nm	Nanometro
u.a.	Unidade arbitraria
eV	Eletron Volts

SUMÁRIO

1	JUSTIFICATIVAS	1
2	INTRODUÇÃO	2
2.1	Plasmas	2
2.2	Plasma de rádio frequência	4
2.3	Formação de bainha	5
2.4	Processos colisionais que ocorrem no plasma	6
2.4.1	Ionização	7
2.4.2	Excitação	7
2.4.3	Dissociação	8
2.4.4	Associação	8
2.5	Formação de flúor a partir de CF_4	9
2.6	Formação de flúor a partir de SF_6	11
2.7	Plasma de acoplamento indutivo.	12
3	EQUIPAMENTOS	15
3.1	Equipamentos utilizados	15
4	CARACTERIZAÇÃO DE PLASMA	19
4.1	Espectrometria de emissão	19

4.2	Medidas elétricas de RF	21
5	TESTE COM ELETRODO DE ALUMÍNIO	23
5.1	Teste de Argônio	23
5.1.1	Medidas elétricas	23
5.1.2	Medidas óticas	27
5.2	Plasmas de oxigênio puro	35
5.2.1	Medidas elétricas	35
5.2.2	Espectrometria de emissão	38
5.3	Plasmas de oxigênio e argônio	40
5.3.1	Medidas elétricas	40
5.3.2	Espectrometria de emissão	42
5.4	Plasmas de SF₆ puro	46
5.4.1	Medidas elétricas	46
5.4.2	Espectrometria de emissão	48
5.5	Testes em plasmas de SF₆ + Argônio	53
5.5.1	Medidas elétricas	53
5.5.2	Espectrometria de emissão	55
5.6	CF₄ puro	59
5.6.1	Medidas elétricas	59
5.6.2	Espectrometria de emissão	61
5.7	CF₄ e Argônio	63
5.7.1	Medidas elétricas	63

5.7.2	Espectrometria de emissão	65
TESTES COM ELETRODO DE ESTANHO		68
5.8	Teste de Argônio	68
5.8.1	Medidas elétricas	68
5.8.2	Medidas óticas	71
5.9	Plasmas de SF₆ puro	78
5.9.1	Medidas elétricas	78
5.9.2	Espectrometria de emissão	81
5.10	Teste em plasmas de SF₆ + Argônio	85
5.10.1	Medidas elétricas	85
5.10.2	Espectrometria de emissão	87
5.11	CF₄ puro.	92
5.11.1	Medidas elétricas.	92
5.11.2	Espectrometria de emissão	95
5.12	CF₄ e Argônio	99
5.12.1	Medidas elétricas	99
5.12.2	Espectrometria de emissão	101
6	CONCLUSÕES.	106
7	TRABALHOS FUTUROS	109
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA.	110

1 justificativas

Plasmas acoplados indutivamente (inductively coupled plasmas - ICP) estão sendo usados na indústria de semicondutores e de micromáquinas, e também para outras aplicações como caracterização química. Este tipo de plasma está ficando cada dia mais importante, tomando muitas vezes o lugar de plasmas tipo “Reactive Ion Etching “ (RIE).

Um plasma tipo ICP tem a vantagem sobre o plasma RIE que ele induz uma densidade de plasma maior que o RIE possa fazer. Desta maneira podem-se utilizar plasmas para corrosão de estruturas sub-micrométricas em baixas pressões, com taxas de corrosão ainda razoavelmente altas. Além disso, primeiros testes no laboratório mostraram que estes tipos de plasma geram estruturas com maior inclinação de paredes (paredes mais verticais) e com menos nível de rugosidade, ambas características muito desejadas para a fabricação de microdispositivos.

No Laboratório de Sistemas Integráveis, começamos desenvolver os primeiros processos de plasma tipo ICP em 1996. Porém, o uso dos processos é bastante empírico. Não existem bons modelos que explicam porque este tipo de plasma funciona melhor que plasmas tipo RIE. Também observamos alguns artefatos nas nossas corrosões que não conseguimos explicar até agora. Para tanto gostaríamos de fazer este tipo de estudo de plasmas tipo ICP em primeiro lugar para caracterizarmos e entendermos melhor os fenômenos que acontecem.

2 Introdução

2.1 Plasmas

Um plasma é um gás totalmente ou parcialmente ionizado ou seja, composto por espécies neutras, íons positivos e negativos e elétrons. Teoricamente, um plasma constitui um corpo neutro.

Costumam-se dividir os plasmas em dois grupos principais: os plasmas quentes ou de fusão, que é quando as espécies têm temperaturas bastante altas, o que permite que estejam em equilíbrio térmico e o grau de ionização é alto, e os plasmas frios. Em plasmas frios o grau de ionização é baixo (tipicamente $< 1\%$) e as espécies não estão em equilíbrio térmico, em geral, a temperatura dos elétrons supera a dos íons.

Essas descargas podem ser usadas para tratamento de materiais e de superfícies, através de processos como corrosão e deposição de filmes, entre muitos outros utilizados em processos de Microeletrônica^[1-3] e na fabricação de MEMS^[4 - 10]

Os processos de fabricação de CI's assistidos por plasma são realizados em uma câmara de vácuo onde são inseridos um ou mais gases e aplicado um campo elétrico responsável para gerar e manter a ionização. Em geral, utiliza-se vácuo na geração de plasmas, pois o vácuo favorece uma maior pureza ao processo e o campo elétrico necessário para formar o plasmas é bem menor como mostra a a curva de Paschen na figura 1.

Figura 1: Curva de Paschen^[11]

A formação do plasma começa quando um primeiro que pode ser formado por diferentes eventos como por exemplo um raio cósmico que passa pelo reator, ou a entrada de um foton energetico libera esse primeiro elétron. Esse elétron é acelerado pelo campo elétrico, e se choca com uma molécula ou com um átomo do gás que está sendo usado, liberando outro elétron. Este fenômeno se repetira varias vezes: pode-se dizer que por efeito de avalanche os elétrons irão gerar mais elétrons. Uma vez presentes, os elétrons são permanentemente acelerados pelo campo aplicado e colidem com as moléculas ou átomos do gás e ocasionam diversos tipos de colisões que serão discutidos no item 2.3. O maior mecanismo de perda dos elétrons são as colisões com as paredes e para gases eletronegativos a ligação dos elétrons com a molécula formando um íon negativo.

2.2 Plasma de rádio frequência

Há muitas maneiras de gerar um plasma. A maneira usada para gerar nossos plasmas é a aplicação de uma tensão alternada de alta frequência, de 13,56 MHz. A utilização deste tipo de excitação permite que o plasma se forme mesmo quando existe material dielétrico sobre os eletrodos, o que não acontece em descargas geradas por por exemplo plasmas de descargas DC, pois se o eletrodo estiver recoberto por um isolante, não passará corrente.

Para descargas RF é possível operar a pressões mais baixas que para plasmas DC.

Em geral, em sistemas de corrosão por íons reativos (Reactive Ion Etching – RIE), utilizam-se um capacitor de bloqueio e uma malha de acoplamento entre o gerador de RF e o cátodo para a proteção do gerador, e a configuração é assimétrica, ou seja, a área do cátodo é menor que a do anodo, como ilustrado na figura 2:

Figura 2: Potencial DC no plasma entre os dois eletrodos^[12].

Essa diferença nas áreas do cátodo e do ânodo se dá pelo fato que a área aterrada do ânodo será muito maior que a área do cátodo, portanto a queda de tensão no cátodo será muito

maior, e levando em conta que a razão da queda de tensão na bainha é proporcional ao inverso da razão da área dos eletrodos, teremos dois efeitos desejados. O primeiro que um aumento da aceleração dos íons de encontro ao catodo causando assim um bombardeamento iônico intenso nessa região e uma diminuição desse bombardeamento no anodo^[12].

2.3 Formação de bainha

Considere um substrato isolado eletricamente, colocado no plasma, como mostra a figura 3. Os elétrons apresentam uma mobilidade muito maior que os íons por serem menores e mais leves; conseqüentemente, quando o substrato é colocado em contato com o plasma, no momento inicial o fluxo de elétrons que incidem na superfície do substrato, é muito maior que o dos íons e conseqüentemente os elétrons começam a carregar negativamente a superfície do substrato criando uma região de campo elétrico de modo a repelir o excesso de elétrons que chegam à superfície. O estado de equilíbrio é atingido quando ambos os fluxos se igualam. Neste momento, surge a bainha que é uma região, geralmente escura, pois a densidade de elétrons nesta região é reduzida devido à repulsão daqueles pelo campo elétrico formado. Sabe-se que os elétrons são essenciais nos processos de excitação e ionização, dos quais provém a fotoemissão ocasionado pela deexcitação ou recombinação dos metaestáveis ou dos íons, respectivamente.

No equilíbrio, o substrato adquire um potencial V_f , denominado potencial flutuante, que é negativo em relação ao potencial de plasma V_p , como mostrado na figura 3.

Para plasmas onde a função de distribuição de energia dos elétrons (E.E.D.F.) é maxwelliana, a relação entre V_f e V_p é:

$$\frac{n_{e'}}{n_e} = \exp - \frac{e(V_p - V_f)}{KT_e} \quad (1)$$

Onde temos que n_e' é a densidade de elétrons que chegam ao substrato, n_e a densidade de elétrons no plasma, $e(V_p - V_f)$ é energia adquirida pelo elétron, k é a constante de Boltzmann e T_e a temperatura efetiva dos elétrons no corpo do plasma.

Figura 3 : Gráfico de V_f em relação à V_p ^[12]

A bainha serve para acelerar os íons de encontro com o substrato, o íon se choca com a superfície do substrato, causando uma colisão entre o íon e os átomos do substrato, e é de extrema importância no processo de corrosão.

2.4 Processos colisionais que ocorrem no plasma

As reações químicas que ocorrem no plasma, principalmente quando se utilizam gases reativos, são bastante complexas. Geralmente, as reações são iniciadas pelas colisões de elétrons energéticos com as moléculas do gás, formando várias espécies reativas, que são importantes para os processos de corrosão de materiais por plasma. Dependendo da energia da de impacto do elétron na molécula pode ocorrer formação de íons, metaestáveis ou radicais livres.

As colisões entre elétrons e moléculas podem ser tanto elásticas como inelásticas^[12]. Nas colisões elásticas, a transferência de energia do elétron para a molécula é desprezível, havendo somente a alteração da direção do elétron, sem haver mudança significativa na sua velocidade.

As principais reações para corrosão por plasma dos átomos quando se chocam inelasticamente com elétrons são:

2.4.1 Ionização

Neste processo um primeiro elétron choca-se com o átomo removendo um outro elétron, e produzindo íons positivos, assim produzindo a ionização. Abaixo temos um exemplo de ionização em argônio:

Estes dois elétrons produzidos pela ionização podem ser acelerados por um campo elétrico, e podem se chocar novamente com outros átomos e consequentemente produzir mais ionização.

2.4.2 Excitação

Neste processo, um elétron colide com um átomo, e ele aumenta o nível de energia dentro do átomo. Este processo é conhecido como excitação. Esse processo é o principal responsável pela emissão de luz no plasma. Essa luz emitida durante o processo de excitação é muito importante para nós, pois as análises de espectrometria de emissão irão medir as intensidades e os comprimentos de onda dessa luz^[13].

Abaixo temos um exemplo de excitação de Ar:

2.4.3 Dissociação

O processo de dissociação é considerado como uma quebra da estrutura da molécula, ou seja, quando se tem uma estrutura composta por dois elementos; esse elétron que se choca poderá fazer a dissociação entre esses elementos como mostra a equação abaixo:

Esse processo é muito importante para nossa pesquisa, pois pela dissociação ocorre a liberação de flúor, fundamental para o processo de corrosão.

2.4.4 Associação

Em plasmas eletronegativos ocorre a associação de um elétron com uma molécula neutra com alta frequência. Quanto mais baixa a energia do elétron, maior a seção de choque para se associar a uma molécula:

2.5 Formação de flúor a partir de CF_4

A formação de flúor-carbono em plasmas depende diretamente das colisões citadas acima.

Geralmente a primeira reação do impacto do elétron no átomo de CF_4 forma em predominância íons de CF_3^+ devido às altas seções de choque na ionização; esses íons de CF_3^+ ao serem acelerados pela bainha, ganham uma alta energia de bombardeamento.

Uma forte tendência é usar argônio nos plasmas de CF_4 para uma tentativa de tornar os plasmas mais indutivos. Porém, a adição de argônio em plasmas de CF_4 , com intuito de aumentar as taxas de corrosão para baixas pressões, irá influenciar outras características do plasma como, por exemplo, na distribuição de energia dos íons e na ionização e dissociação do CF_4 , o que deve ser estudado^[14].

Abaixo mostramos algumas reações que acontecem no plasma:

Por um processo muito complexo, podem ocorrer algumas formações indesejadas. Por exemplo podem ocorrer ligações com hidrogênio na forma de CFH^+ e CF_3H^+ gerados a partir de fontes de contaminações^[15].

2.6 Formação de flúor a partir de SF₆

A formação de flúor em plasmas de SF₆, assim como nos plasmas de CF₄ depende diretamente das colisões citadas acima.

O bombardeamento iônico também pode induzir a desorção de espécies não saturadas SiF_x (x<4)

No plasma de SF₆ devido às colisões inelásticas dos elétrons com as moléculas do gás, ocorrem principalmente as seguintes reações:

A dissociação:

dissociação com ionização:

dissociação com captura de elétrons:

Associação:

2.7 Plasma de acoplamento indutivo.

Os reatores de plasmas indutivos (ICP – *Inductively Coupled Plasma*) têm uma configuração muito parecida com os reatores de placas paralelas usados em plasmas capacitivos, porém a configuração de seu reator possui uma bobina geralmente planar, em espiral, localizada na parte superior do reator onde será aplicada uma potência RF como mostra a figura 4.

Figura 4: Esquema de reator tipo ICP

Poderemos utilizar dois tipos de reatores para obter estes tipos de plasma: um com bobina interna e um com bobina externa. Os dois tipos de configuração estão disponíveis no laboratório.

O sistema com bobina interna tem a vantagem de criar plasmas com densidade maior devido ao fato da bobina estar em contato direto com o plasma. A grande desvantagem da bobina interna é que provavelmente teremos contaminação das lâminas com o material da

bobina, isso devido ao alto bombardeamento que irá ocorrer na mesma, causando um sputtering do material que foi usado em sua fabricação. Em segundo lugar, quando usarmos plasmas com gases reativos, por exemplo, plasmas de SF_6 para corrosão de Si, a superfície da bobina vai se modificando durante o próprio processo, o que deixa o processo mais difícil para controlar. Em terceiro lugar, o fato que a bobina entra em contato com o plasma faz com que o potencial de plasma fica muito alto. A tensão DC na bobina fica zero, mas durante o ciclo positivo da tensão, o plasma deve seguir esta tensão positiva. Com uma bobina externa, o plasma não fica em contato com a bobina e o potencial de plasma fica menor. Este último fato pode ter conseqüências positivas ou negativas, dependendo da aplicação, como já observado em testes realizados anteriormente nesse reator^[30].

Um plasma tipo ICP tem a vantagem sobre o plasma RIE que ele induz uma densidade de plasma maior que plasmas RIE. Desta maneira podem-se utilizar plasmas para corrosão de estruturas sub-micrométricas em baixas pressões, com taxas de corrosão ainda razoavelmente altas isso porque para altas densidades, o fluxo de íons e de espécies reativas também são mais altos. A energia dos íons que interagem com a amostra, depende da tensão de polarização DC.

Como vantagens de trabalhar a baixas pressões, além de possuir menos contaminantes, os caminhos livres médios são maiores, produzindo pouca dispersão dos íons antes de chegar na superfície da lâmina. Além disso, primeiros testes no laboratório mostraram que estes tipos de plasma geram estruturas com maior inclinação de paredes (paredes mais verticais) e com menos nível de rugosidade, ambas características muito desejadas para a fabricação de microdispositivos.

A princípio essa maior densidade no plasma, ocorre pelo fato de que a bobina cria uma região de interação de elétrons como mostra a figura 4, logo abaixo do isolante que cria um campo elétrico RF contrario ao campo magnético RF criado pela bobina. Quando

aumentamos a potência na bobina, a profundidade dessa região diminui aumentando assim a densidade de elétrons.

Em plasmas ICP essa região de interação tende a ficar muito fina e gerar uma alta corrente^[16].

Em muitos casos ocorrem instabilidades nessa região onde a densidade dos elétrons varia muito, alternando entre altas e baixas densidades. Isso ocorre antes dos plasmas se tornarem completamente indutivos.

Porém, o uso dos processos é bastante empírico. Não existem bons modelos que explicam porque este tipo de plasma funciona melhor que plasmas tipo RIE. Também observamos alguns artefatos nas nossas corrosões que não conseguimos explicar até agora. Para tanto gostaríamos de fazer este tipo de estudo de plasmas tipo ICP em primeiro lugar para caracterizarmos e entendermos melhor os fenômenos que acontecem.

3 Equipamentos

Neste capítulo mostramos tanto o reator que foi construído para realização desses teste quanto os equipamentos utilizados para a caracterização do plasma.

Por ser um equipamento novo, além das caracterizações realizadas, também são descritas aqui algumas alterações feitas nos equipamentos de medida e nos geradores com a finalidade de obter melhores processos, processos mais confiáveis, plasmas com alta reprodutibilidade.

3.1 Equipamentos utilizados

Neste trabalho, como mostra a Figura 5 foi utilizado um reator ICP com bobina planar. O eletrodo mede 150 mm de diâmetro e está ligado a um gerador RF. Esse gerador de RF, possui um capacitor de bloqueio qual possibilita a caracterização elétrica do plasma.

Também há outro gerador de RF ligado a uma bobina de alumínio de aproximadamente 6 polegadas de diâmetro externo e três voltas, que fica localizada em cima do dielétrico que a isola do plasma.

A malha de acoplamento RF é usada para converter a complexa impedância dos plasmas a 13.56 MHz para uma resistência de 50 Ω . Esse ajuste é feito através de dois capacitores de Ar variáveis, movido por um circuito de controle que ajusta os capacitores de acordo com o erro recebido a partir da fase integral e do detetor de magnitude.

Medidas como tensão de autopolarização Dc e potência refletida no eletrodo, podem ser medidas e monitoradas no painel de controle, também é possível fazer um ajuste dos capacitores manualmente, observando a posição através de LED que indicam a posição do ajuste.

Tanto o eletrodo quanto a bobina tem um sistema de refrigeração a água.

Figura 5 : Esquema do reator ICP.

A Figura 6 e a Figura 7 mostram nosso reator:

Figura 6: Foto do reator fechado

Figura 7: Foto do reator aberto

Devido a problemas com superaquecimento do sistema quando aplicada potência na bobina, foram feitas algumas alterações como troca de conectores, cabos e um novo sistema de refrigeração para o gerador de RF o que possibilitou aplicar potências maiores na bobina sem danificar o equipamento, favorecendo assim nossos processos.

Na Figura 8 segue o esquema do controle da malha de acoplamento da bobina.

Figura 8: Circuito utilizado na malha de acoplamento da bobina.

A malha de acoplamento da bobina pode ser dividida em duas partes. A primeira parte, o ajuste dos capacitores Shunt e Serie, é feito de maneira automática.

Na segunda parte do sistema, no qual chamamos de malha manual, como o próprio nome já revela os capacitores Shunt e Serie são ajustados manualmente. No princípio tivemos muitos problemas para fazer o ajuste desses capacitores, principalmente para gases eletronegativos o acoplamento é muito difícil.

Após alguns testes, foi possível achar um ponto, onde conseguimos um bom acoplamento para gases eletronegativos, e um comportamento com características indutivas para os outros plasmas.

4 Caracterização de plasma

4.1 Espectrometria de emissão

Todos os plasmas emitem luz e as intensidades dessa luz são originadas a partir da excitação eletrônica das espécies do plasma e são proporcionais à densidade das espécies eletronicamente excitadas^[17], em diferentes comprimentos de onda. Esses diferentes comprimentos de onda são características do gás que é usado e das condições como pressão, potência e outros parâmetros utilizados na geração de plasmas.

Os estados excitados geralmente são instáveis/metaestáveis e essa excitação ocorre quando um elétron ganha energia suficiente para passar para um nível mais energético onde fica em órbita um determinado tempo, e na maioria dos casos retorna à sua configuração original. Esta transição pode causar a emissão de um fóton pelo átomo. O conjunto de fótons é o responsável pela luminosidade das descargas.

O comprimento de onda do fóton pode ser determinada pela lei de Planck que é dada pela equação:

$$E = \frac{h\nu}{\lambda} \quad (17)$$

onde E é a energia, h é a constante de Planck, λ é o comprimento de onda do fóton e ν é a velocidade da luz.

Essa descarga luminosa é importante, pois a técnica de espectrometria óptica mede as intensidades das raias emitidas pelo plasma. A partir dos dados obtidos, é possível analisar alguns pontos da função de distribuição de energia.

Essas emissões podem ser medidas através de um espectrômetro de emissão óptica (OES), que possibilita analisar com muita precisão características do plasma sendo uma técnica muito eficiente na caracterização de espécies no plasma.

O espectro óptico dos átomos é determinado pelos níveis de energia de um átomo^[18]. Os níveis de energia são determinados pelas configurações e acoplamentos dos elétrons ao núcleo. Por exemplo no estado base, os elétrons e flúor são $1s^2$, $2s^2$ e $2p^5$ e para altos níveis de energia o átomo de flúor pode ter, por exemplo, a configuração $1s^2$, $2s^2$, $2p^4$ e $3s$.

A caracterização de plasmas por espectrometria óptica fornece dados em tempo real, e por o analisador não entrar em contato com o plasma (porque a análise pode ser feita através de uma janela de vidro feita no reator), não há o problema de contaminação e não se mudam assim as características dos plasmas como o que acontece com sondas.

Há muitas aplicações para o uso de espectrômetro de emissão óptica como detecção do ponto final de corrosão^[19-21], monitoramento de corrosão uniforme, análise de impurezas e de contaminação por partículas e o mais importante para nós, são as indicações dos mecanismos de formação de plasma para entender os processos^[18].

A falha ou o sucesso de um processo de corrosão depende da interação dos plasmas com as espécies. Com um espectrômetro de emissão óptica é possível coletar os dados em tempo real, quantificar e qualificar, a fim de entender os mecanismos presentes durante o processo.

Alem dos dados obtidos na espectrometria óptica já conhecidos como controle de impurezas e detecção de espécies e quantificação das espécies ativas, também é possível medir a temperatura dos elétrons, densidade dos elétrons e temperatura dos gases^[22].

Para plasmas com gases eletronegativos como SF_6 e O_2 , será necessário cuidado especial, isso devido a problemas de instabilidade nos plasmas^[23].

4.2 Medidas elétricas de RF

Essa técnica é usada para medir a tensão e a corrente a partir de duas pontas de prova colocadas próximas do eletrodo. Essas pontas são conectadas a um osciloscópio, que mostra os gráficos de tensão e corrente^[24].

Basicamente, hoje, mede-se o sinal de tensão no eletrodo alvo. E a partir do sinal de tensão medido, podem-se extrair informações como o potencial de autopolarização DC, o potencial do plasma e a amplitude do sinal RF no eletrodo, sendo possível fazer o modelamento elétrico e diagnóstico das descargas, observar as propriedades do plasma, observação de não linearidades no comportamento elétrico da descarga. Para obter o potencial de autopolarização DC a partir do sinal de tensão RF no eletrodo basta calcular o valor médio do sinal RF. Já o potencial do plasma é calculado dividindo o valor máximo da tensão RF no eletrodo por dois^[4].

Apesar dessa técnica ser relativamente simples é possível obter resultados qualitativos, pois fica muito fácil observar as variações elétricas em um mesmo processo e analisar as variações elétricas quando são mudadas algumas variáveis como pressão ou fluxo de gás. Também analisando parâmetros como potencial de plasma e o potencial de autopolarização, é possível analisar a reprodutibilidade dos plasmas.

Na figura 9 temos um esquema de como foram feitas as medidas elétricas do plasma.

Figura 9: Esquema de ligação do sistema de medidas à linha de RF que alimenta o eletrodo.

5 Teste com eletrodo de Alumínio

5.1 Teste de Argônio

5.1.1 Medidas elétricas

A caracterização de nosso reator começou com a realização dos testes de argônio.

Por ser um gás inerte, o sistema de plasma fica bastante simples e muito mais fácil a caracterizar que outros plasmas. Além disso, o argônio é usado para fazer actinometria^[17,20,25] em nossos testes assim é interessante fazer uma caracterização desse gás. Essas caracterizações são importantes, pois possibilitam analisar o comportamento do argônio em nosso reator e como principal finalidade, comparar os dados obtidos nessas caracterizações com os resultados que serão obtidos nos processos que faremos com os gases de base fluorada, que serão usados em nossos processos de corrosão.

Para estes testes foi usado Ar puro com um fluxo de 10 sccm, a ~10 mTorr, e como mostra a Figura 10, o primeiro parâmetro que foi analisado foi o Vdc.

Figura 10: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de Ar, a pressão de 10 mTorr.

A Figura 10 mostra a tensão de autopolarização do eletrodo (Vdc) em função da potência aplicada na bobina para diferentes potências aplicadas no eletrodo.

Como mostra a Figura 11, com o aumento da potência no eletrodo, o Vdc tende a ficar mais negativo, o que é um forte indicativo que a temperatura dos elétrons deve estar aumentando.

Porem quando aplicamos potência na bobina, o comportamento do Vdc é o inverso, ou seja, com o aumento da potência aplicada na bobina o Vdc aumenta o que é um forte indicativo que possivelmente esta ocorrendo uma diminuição da temperatura dos elétrons.

Figura 11: Tensão DC no eletrodo inferior (V_{dc}) em função da potência aplicada no eletrodo sem potência na bobina, para uma pressão de 10 mTorr.

Outro parâmetro importante que iremos analisar com as medidas elétricas, é a tensão de pico a pico (V_{pp}).

Na Figura 12 temos a medida de tensão de pico a pico (V_{pp}).

Figura 12 : Tensão de pico a pico (Vpp) em função da potência aplicada na bobina e da potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de Ar, a uma pressão de 10 mTorr.

O gráfico da Figura 12 mostra a Vpp em função da potência aplicada na bobina para diferentes potências aplicadas no eletrodo.

Na Figura 12, as tendências observadas nos levam a crer que há uma diminuição da temperatura dos elétrons quando aplicamos potência na bobina.

O gráfico de Vpp (figura 12), também tem a mesma tendência, ou seja, o Vpp aumenta com o aumento da potência no eletrodo e diminui com o aumento da potência na bobina.

Observando os gráficos (Figura 10 a Figura 12), com o aumento da potência no eletrodo, o plasma é acoplado em modo capacitivo, e com esse aumento da potência no eletrodo, há um forte indicativo que a temperatura dos elétrons aumenta.

Já com o aumento da potência na bobina, onde acredita-se que o plasma acoplar em modo indutivo, a temperatura dos elétrons tende a diminuir.

Outra característica importante que pode ser notada nos gráficos de V_{dc} e V_{pp} (Figura 10 e Figura 12), é que para plasmas com potências mais altas no eletrodo, a influencia da bobina é muito maior.

Esta é uma clara indicação que se precisa de uma certa densidade eletrônica para que o acoplamento indutivo seja o suficiente.

5.1.2 Medidas óticas

Como já citado acima, também fizemos caracterizações dos plasmas com espectrometria de emissão. A seguir mostraremos o comportamento do plasma para diferentes potências aplicadas no eletrodo e na bobina em plasmas de argônio a uma pressão de 10 mTorr e um fluxo de 10 sccm.

Iniciamos os testes com plasmas de argônio puro com parâmetro de plasmas capacitivos. Na figura 13 temos um gráfico de intensidade em função do comprimento de onda.

Figura 13: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas capacitivos com 10 W e 200 W no eletrodo.

Abaixo na figura 14, mostra um gráfico de intensidades em função da potência no eletrodo para diferentes comprimentos de onda do espectro de argônio.

Figura 14: Intensidade em função da potência no eletrodo para as raiais de 421 nm, 596 nm, 702 nm 750 nm 811 nm e 840nm.

Ambas as figuras (13 e 14) mostraram um comportamento típico de plasmas capacitivos, onde com o aumento da potência aplicada no eletrodo, de uma forma geral, gera um aumento das intensidades dos espectros, e a raia de 750 nm é sempre a mais intensa.

Na Figura 15, temos um esquema dos níveis energéticos envolvidos na formação de emissão de Ar na faixa de 750 nm a 811 nm.

Figura 15: Fragmento de esquema do níveis energéticos envolvidos na formação de emissão de Ar na faixa ~700 a 811 nm (m significa nível metaestável) e alguns canais de excitação eletrônica (e^-) e emissão óptica ($h\nu$).^[31]

No espectro são visualizadas várias linhas de emissão do Ar e algumas destas linhas têm uma forte contribuição dos níveis metaestáveis (Figura 15). Como resultado, tais espécies têm altos tempos de vida e continuam participando nas reações^[31].

Abaixo nas figuras de 16-18, temos os gráficos de intensidades em função do comprimento de onda em plasmas de argônio uma pressão de 10 mTorr e fluxo de 10 sccm.

Figura 16: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de Ar com 0 W de potência no eletrodo para potências de 50 W, 200 W e 400 W na bobina.

Figura 17 : Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas com 100 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.

Figura 18: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas com 200 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.

Ao contrario do que mostram as figures 13 e 14, quando aplicada uma potência na bobina, as tendências mudam um pouco em relação aos plasmas capacitivos onde só era aplicada potência no eletrodo, pois há um aumento mais significativos das raias de menor energia de excitação.

Nas figuras de 19 - 22, temos alguns gráficos de intensidade em função da potência aplicada na bobina para diferentes potências aplicadas no eletrodo. Também foram escolhidas as raias de 750 nm, 810 nm e 840 nm, que são as raias de maior intensidade no espectro e também correspondem à região que sofre maior influência quando aplicada a potência na bobina.

Figura 19: Intensidade em função da potência no bobina para as raiais de 750 nm 811 nm e 840 nm para plasmas de Argônio puro com 0 W de potência no eletrodo.

Figura 20: Intensidade em função da potência no bobina para as raiais de 750 nm 811 nm e 840 nm para plasmas de argônio puro com 0 W de potência no eletrodo e 50 W, 100 W e 150 W de potência na bobina.

Figura 21: Intensidade em função da potência no bobina para as raiais de 750 nm 811 nm e 840 nm para plasmas de argônio puro com 100 W de potência no eletrodo.

Figura 22: Intensidade em função da potência no bobina para as raiais de 750 nm 811 nm e 840 nm para plasmas de argônio puro com 200 W de potência no eletrodo.

Tanto para os plasmas onde só era aplicada potência no eletrodo como para os plasmas onde eram aplicadas potências no eletrodo e na bobina, as intensidades das raiais de uma

maneira geral aumentam com o aumento da potência, no entanto as tendências no ICP são um pouco diferentes e essa diferença é facilmente notada quando observamos a raia de 811 nm em relação à raia de 750 nm.

Para plasmas com acoplamento capacitivo a intensidade da raia de 750 nm sempre é maior que as outras raia e como mostra a figura 13; essa raia tem um aumento maior que as outras raia com o aumento da potência aplicada no eletrodo.

Já quando aplicamos potência na bobina, a raia de 811 nm se torna a mais intensa do espectro e também é a que tem a maior variação com o aumento da potência na bobina. Isso é um forte indicativo que esta havendo uma alteração na função de distribuição dos elétrons, e levando em consideração que em plasmas de argônio, a energia de excitação necessária para emitir fótons em um comprimento de onda de 811 nm é de 1,53 eV contra 1,76 eV que é a energia necessária para excitar a raia de 750 nm, há uma forte tendência a afirmar que para plasma do tipo ICP de argônio a temperatura dos elétrons tende a diminuir.

A diminuição das intensidades para potências na bobina de 300 W e 350 W mostradas na figura 19, provavelmente ocorrem devido a uma mudança de “modo” do plasma e/ou a não otimização da transferência de potência do gerador RF para a bobina.

5.2 Plasmas de oxigênio puro

5.2.1 Medidas elétricas

A próxima sequência de caracterização são caracterizações feitas em plasmas de oxigênio puro.

Essa caracterização é importante devido ao fato do oxigênio ser um gás ligeiramente eletronegativo. Como já conhecido através da literatura, gases eletronegativos influenciam em plasmas do tipo ICP^[27], e como um dos gases operacionais é o SF₆ (muito eletronegativo), decidimos por fazer esses testes com oxigênio que não é tão eletronegativo quanto o SF₆, para analisar o comportamento dos plasmas.

Para estes testes foi usado O₂ puro com um fluxo de 10 sccm, a ~10 mTorr, e como mostra a figura 23, o primeiro parâmetro que foi analisado foi o Vdc.

Figura 23: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de O₂, a pressão de 10 mTorr.

Para plasma de oxigênio, também é possível ver um comportamento típico de plasmas capacitivos quando aumentamos a potência no eletrodo, pois o valor do V_{dc} diminui com o aumento da potência, e um comportamento indutivo com o aumento da potência na bobina.

No entanto como já era esperada, a variação do valor de V_{dc} com o aumento da potência na bobina não é muito grande. Isso comprova que a geração de plasmas eletronegativos em modo ICP é mais difícil.

E na figura 24 temos a de tensão de pico a pico (V_{pp}) nos plasmas de oxigênio.

Figura 24: Tensão de pico a pico (V_{pp}) em função da potência aplicada na bobina e da potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de O_2 , a uma pressão de 10 mTorr.

Assim como na figura 23, a curva de tensão de pico-pico (figura 24) para os plasmas de oxigênio seguem o mesmo comportamento que seguiram para os plasmas de argônio, porem a potência na bobina não influencia esses plasmas com tanta facilidade.

Embora a influência da bobina não seja muito grande nos plasmas de oxigênio em relação aos de argônio, as tendências mostradas nas caracterizações elétricas são as mesmas.

Sendo assim, o comportamento do plasmas deve ser o mesmo, a temperatura dos elétrons aumenta quando aplicada potência no eletrodo e diminui quando aplicada potência na bobina.

5.2.2 Espectrometria de emissão

Abaixo, mostraremos os gráficos de intensidade para plasmas de oxigênio para as potências no eletrodo de 0 W figura 25, 100 W figura 26 e 200 W figura 27.

Figura 25: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de O_2 com 0 W de potência no eletrodo para potências de 50 W, 200 W e 400 W na bobina.

Figura 26: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de O_2 com 100 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.

Figura 27: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de O_2 com 200 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.

Em todos os casos mostrados acima, há um aumento das intensidades das raiais tanto para o aumento da potência no eletrodo quanto para o aumento da potência na bobina, e assim como nos plasmas de argônio, há um aumento das intensidades principalmente nos comprimentos de onda maiores que 700 nm, e a raia que tem o maior aumento de intensidade é a raia de 763 nm.

No próximo capítulo, iremos mostrar a influência do oxigênio em plasma de argônio.

5.3 Plasmas de oxigênio e argônio

5.3.1 Medidas elétricas

Nos próximos testes, adicionamos argônio aos plasmas de oxigênio. Como já conhecemos o comportamento dos plasmas de argônio, e dos plasmas de oxigênio, com essa mistura será possível analisar o comportamento elétrico dos plasmas, e o quanto argônio influencia os plasmas de oxigênio.

Para estes testes foi usado O_2 puro com um fluxo de 10 sccm de oxigênio e 10 sccm de Ar, a ~ 10 mTorr, e como mostra a figura 28, o primeiro parâmetro que foi analisado foi o Vdc.

Figura 28: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de O_2+Ar , a pressão de 10 mTorr.

A adição de argônio nos plasmas de oxigênio fez com que os valores de Vdc variassem mais quando aplicada potência tanto no eletrodo quanto na bobina.

A figura 29 mostra a diferença do Vdc para plasmas de oxigênio puro e oxigênio com argônio.

Figura 29: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de O_2 e misturas de O_2+Ar , a pressão de 10 mTorr.

A figura 29 mostra claramente a influência do argônio no plasma, porem a influência foi muito pequena. O Vdc da mistura se parece muito mais com o Vdc dos plasmas de O_2 que com o Vdc dos plasmas de Ar. Para plasmas com acoplamento capacitivo, os valores são quase os mesmos nas três condições mostradas na figura 29.

A mudança de Vdc para plasmas ICP(o que não ocorreu para plasmas capacitivos), também nos leva a crer que em ICP a temperatura dos elétrons é menor. Há muitos mais elétrons de baixa energia e não exatamente estes elétrons podem se associar ao oxigênio formando íons negativos.

Abaixo na figura 30, mostraremos o gráfico da tensão de pico a pico.

Figura 30: Tensão de pico a pico (V_{pp}) em função da potência aplicada na bobina e da potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de O_2+Ar , a uma pressão de 10 mTorr.

Como os valores das caracterizações elétricas quase sempre seguem a mesma tendência, na figura 30, o comportamento do plasmas se mostrou o mesmo, ou seja, com o aumento da potência na bobina, há uma diminuição da temperatura dos elétrons.

5.3.2 Espectrometria de emissão

As figuras de 31-33, mostram o espectro dos plasmas discutidos acima:

Figura 31: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de O_2+Ar com 0 W de potência no eletrodo para potências de 50 W, 200 W e 400 W na bobina.

Figura 32: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de O_2+Ar com 100 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.

Figura 33: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de O_2+Ar com 200 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.

Os gráficos de intensidade mostram uma influência muito grande do oxigênio no espectro de argônio.

Nos plasmas de argônio puro, o aumento da intensidade da raia de 811 nm que se tornava a raia mais intensa do espectro mesmo para baixas potências, não acontece mais para plasmas de oxigênio com mistura de argônio. Como já citado, plasmas eletronegativos são mais difíceis de acoplar indutivamente.

As figuras 31 – 33 mostram que com o aumento da potência no eletrodo, a diferença entre as raia de 750 nm e 811 nm diminui e como mostra a figura 34, é possível notar uma transição entre essas raia para uma alta potência aplicada no eletrodo.

Figura 34: Intensidade em função da potência no bobina para as de argônio de 750 nm 811 nm e 840 nm para plasmas de O_2+Ar com 200 W de potência no eletrodo.

Esses resultados nos levam a acreditar que quanto mais energia for aplicada ao plasmas através do eletrodo, menor potência na bobina é necessária para haver o acoplamento indutivo.

5.4 Plasmas de SF₆ puro

5.4.1 Medidas elétricas

Iniciando nossos testes com gases operacionais, os primeiros plasmas que caracterizamos, foram os plasmas de SF₆ puro.

Como em testes anteriores, nesses testes iremos medir a tensão de autopolarização no eletrodo (Vdc) e a tensão de pico a pico (Vpp) variando as potências aplicadas no eletrodo e na bobina.

Para estes teste foi usado SF₆ puro com um fluxo de 10 sccm, a ~10 mTorr, e o primeiro parâmetro que foi analisado foi o Vdc.

Figura 35: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para plasmas de SF₆, a pressão de 10 mTorr.

Na figura 35, mostramos o Vdc em função da potência na bobina. Para todas as potências no eletrodo, quando aplicamos potência na bobina, os plasmas se comportam de duas formas diferentes.

Em uma primeira parte para baixas potências na bobina, o Vdc fica mais negativo com o aumento dessa potência e só a partir de certa potência o Vdc se torna um pouco menos negativo.

Esse comportamento ocorre devido à dificuldade de acoplamento para plasmas de SF_6 quando aplicada potência no eletrodo. Geralmente a potência refletida nesses plasmas pode chegar a 20%, no entanto quando aplicamos potência na bobina, essa potência refletida no eletrodo diminui.

Como essa potência refletida diminui, ou seja, há uma maior potência aplicada ao plasmas através do eletrodo, o comportamento do Vdc é típico de plasmas RIE. Quando a potência refletida chega aos valores considerados aceitáveis, o Vdc começa a ficar constante.

Abaixo na figura 36, temos o gráfico de tensão de pico a pico.

Figura 36: Tensão de pico a pico (Vpp) em função da potência aplicada na bobina e da potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de SF_6 , a uma pressão de 10 mTorr.

No gráfico de Vpp, a tendência são as mesmas mostradas na figura 35, ou seja devido ao problema de acoplamento do eletrodo, quando aplicamos potência na bobina, em um

primeiro momento, a temperatura dos elétrons aumentam. Quando a potência refletida está normalizada, a temperatura dos elétrons começa a não aumentar mais.

Para altas potências no eletrodo, é mais difícil chegar ao ponto que os plasmas se acoplam indutivamente devido à alta potência refletida gerada.

5.4.2 Espectrometria de emissão

As figuras 37 a 39 mostram os gráficos de intensidade por comprimento de onda para os plasmas de SF_6 puro com fluxo de 10 sccm e pressão de 10 mTorr.

Figura 37: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF_6 com 0 W de potência no eletrodo para potências de 50 W, 200 W e 400 W na bobina.

Figura 38: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF_6 com 100 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.

Figura 39: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF_6 com 200 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.

Para plasmas de SF_6 puro, todas as raia têm um aumento de intensidade tanto com o aumento da potência aplicada no eletrodo, como o aumento da potência na bobina. Porém a

raia de 581 nm que provavelmente corresponde a alguma composto CF, aumenta sua intensidade principalmente quando aplicamos potência na bobina.

Nas figuras de 40 a 42, mostraremos os gráficos de intensidade das raias de 581 nm, 678nm que correspondem as raias mais significativas do espectro e a raia de 703 nm que corresponde a raia de Flúor.

Figura 40: Intensidade em função da potência no bobina para as raias de 581 nm 678 nm e 703 nm para plasmas de SF_6 puro com 0 W de potência no eletrodo.

Figura 41: Intensidade em função da potência no bobina para as raiais de 581 nm 678 nm e 703 nm para plasmas de SF₆ puro com 100 W de potência no eletrodo.

Figura 42: Intensidade em função da potência no bobina para as raiais de 581 nm 678 nm e 703 nm para plasmas de SF₆ puro com 200 W de potência no eletrodo.

Os gráficos de intensidade das raiais de 581 nm, 678nm e 703 nm assim como já relatado antes, apresentam um aumento no geral.

As intensidades para 200 W no eletrodo são menores que para 100 W no eletrodo. A razão é possivelmente um pior acoplamento da potência da bobina aos plasmas. Este mesmo fenômeno explica provavelmente porque as intensidades têm seu valor mínimo ao redor de 50 W – 100 W de potência na bobina.

Para todas as potências, as intensidades são muito baixas, indicando que há acoplamento capacitivo da bobina com o plasma.

5.5 Testes em plasmas de SF₆ + Argônio

5.5.1 Medidas elétricas

Continuando os testes com plasmas à base de SF₆, iremos caracterizar plasma de SF₆ e Ar.

Como em teste anteriores, nesses testes medimos a tensão de autopolarização no eletrodo (Vdc) e a tensão de pico a pico (Vpp) variando as potências aplicadas no eletrodo e na bobina.

Para estes testes foi usado 10 sccm de SF₆ + 10 sccm de Ar, a 10 mTorr, e o primeiro parâmetro que foi analisado foi o Vdc.

Figura 43: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para plasmas de SF₆+Ar, a pressão de 10 mTorr.

A adição de argônio nos plasmas, induz uma melhora no comportamento Vdc em relação aos plasmas de SF₆ puro. Somente para potência de 50 W na bobina a temperatura dos

elétrons aumenta, para potências maiores que 50 W, embora que de maneira pouco significativa, o comportamento do V_{dc} é normal.

Na figura 44 mostramos o gráfico de tensão de pico a pico em função da potência aplicada na bobina e no eletrodo.

Figura 44: Tensão de pico a pico (V_{pp}) em função da potência aplicada na bobina e da potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de SF_6+Ar , a uma pressão de 10 mTorr.

Como já era esperado, o gráfico de V_{pp} apresentam a mesma tendência mostrada no gráfico de V_{dc} , onde há um aumento da temperatura dos elétrons até 50 W de potência no eletrodo e a partir desse ponto a temperatura começa a diminuir.

Uma coisa importante nesses plasmas, é que a adição de argônio ajudou no acoplamento, não ocorrendo o mesmo problema de potência refletida relatado no item anterior.

A pouca variação dos valores de V_{dc} e V_{pp} já eram esperadas devido ao fato que o SF_6 é um gás muito eletronegativo o que influencia muito no acoplamento.

5.5.2 Espectrometria de emissão

As figuras 45 a 47 mostram os gráficos de intensidade por comprimento de onda para os plasmas de SF_6 e argônio com fluxo de 10 sccm para cada gás e pressão de 10 mTorr.

Figura 45: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF_6+Ar com 0 W de potência no eletrodo para potências de 50 W, 200 W e 400 W na bobina.

Figura 46: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF_6+Ar com 100 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.

Figura 47: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF_6+Ar com 200 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.

Os gráficos de intensidade, em todos os casos mostram um aumento das intensidades quando aplicamos potência no eletrodo e na bobina.

Em nenhum dos plasmas houve a transição entre as raías de 750 nm e 811 nm.

Seguindo as tendências mostradas nos testes de oxigênio, os plasmas eletronegativos influenciam muito no acoplamento e na função de distribuição dos elétrons no plasmas, e como o SF_6 é um gás muito mais eletronegativo que o oxigênio, já era esperado uma maior influência nas intensidades dos plasmas.

O importante nesses testes é analisar se o argônio influencia positivamente nas intensidades das raías do SF_6 . Nas figuras 48 e 49, mostraremos um comparativo entre as intensidades das raías para plasmas de SF_6 puro e SF_6 com Ar.

Figura 48: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF_6 e $\text{SF}_6\text{+Ar}$ com 200 W de potência no eletrodo para potências de 0 W na bobina.

Figura 49: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF₆ e SF₆+Ar com 200 W de potência no eletrodo para potências de 400 W na bobina.

A figura 48 mostra as intensidades para plasmas de SF₆ e SF₆+Ar para uma potência de 200 W no eletrodo e 0 W na bobina. Nesse gráfico é possível notar que apesar de algumas raias serem influenciadas pelo Ar, no geral, nos dois casos as raias estão com seus valores muito próximos, o que não acontece quando aplicamos uma potência de 400 W na bobina (figura 49).

Na figura 49, as raias dos plasmas de SF₆ são diretamente influenciados pelo Ar, e as intensidades características do espectro de SF₆, se tornam mais intensas que nos plasmas de SF₆ puro. Isso é um indicativo que apesar da raia correspondente ao espectro de 811 nm não estar mais intensa que a raia de 750 nm, o Ar esta exercendo uma importante função nesses plasmas. A adição de Ar aumenta a densidade de elétrons e assim há mais excitação também das espécies que formam o plasma de SF₆.

5.6 CF₄ puro

5.6.1 Medidas elétricas

Finalizando nossos testes com o eletrodo de alumínio caracterizamos plasmas de CF₄ puro.

Como em testes anteriores, nesses testes iremos medir a tensão de autopolarização no eletrodo (Vdc) e a tensão de pico a pico (Vpp) variando as potências aplicadas no eletrodo e na bobina.

Para estes testes foi usado CF₄ puro com um fluxo de 10 sccm, a ~10 mTorr, e o primeiro parâmetro que foi analisado foi o Vdc.

Figura 50: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para plasmas de CF₄, a pressão de 10 mTorr.

Nos plasmas de CF₄, houve um acoplamento melhor nos plasmas em comparação com os plasmas de SF₆.

Na figura 50, para todas potências no eletrodo, quando aplicamos potência na bobina, há uma aumento do valor do Vdc, e a diferença entre os valores onde a potência na bobina é 0 W e o valor onde é 400 W, é maior para valores maior de potência no eletrodo.

Na figura 51, temos os gráficos da tensão de pico a pico.

Figura 51: Tensão de pico a pico (Vpp) em função da potência aplicada na bobina e da potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de CF₄, a uma pressão de 10 mTorr.

Nas caracterizações elétricas desse plasmas é possível observar características de um plasmas indutivos. O Vdc diminui com o aumento da potência no eletrodo e aumenta com a potência na bobina, no gráfico de Vpp também há um comportamento normal ou seja, quando aplicamos potência no eletrodo o Vpp aumenta, quando aplicada uma potência na bobina esse valor diminui.

5.6.2 Espectrometria de emissão

As figuras de 52-54, mostram o espectro dos plasmas discutidos acima:

Figura 52: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF_4 com 0 W de potência no eletrodo para potências de 50 W, 200 W e 400 W na bobina.

Figura 53: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF_4 com 100 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.

Figura 54: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF_4 com 200 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.

Os espectros de intensidade dos plasmas de CF_4 , mostram um aumento geral das raiais com o aumento da potência no eletrodo e com o aumento da potência na bobina. No entanto com o aumento da potência na bobina, a raia de 581 nm é a raia que sofre uma maior influência da potência na bobina.

5.7 CF₄ e Argônio

5.7.1 Medidas elétricas

Continuando os testes com plasmas à base de CF₄, iremos caracterizar plasma de CF₄ e Ar.

Como em testes anteriores, nesses testes iremos medir a tensão de autopolarização no eletrodo (V_{dc}) e a tensão de pico a pico (V_{pp}) variando as potências aplicadas no eletrodo e na bobina.

Para estes testes foi usado 10 sccm de Ar + 10 sccm de CF₄, a 10 mTorr, e o primeiro parâmetro que foi analisado foi o V_{dc}.

Figura 55: Tensão DC no eletrodo inferior (V_{dc}) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para plasmas de CF₄+Ar, a pressão de 10 mTorr.

Comparando com plasmas de CF₄ puro, a adição do argônio nos plasmas de CF₄, não influenciou muito o V_{dc}. Ainda não é possível dizer se não houve influencia do Ar nos plasmas.

Na figura 56, temos os gráficos da tensão de pico a pico.

Figura 56: Tensão de pico a pico (Vpp) em função da potência aplicada na bobina e da potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de CF_4+Ar , a uma pressão de 10 mTorr.

O gráfico de Vpp, os resultados também estão muito parecidos com os gráficos obtidos nos testes de CF_4 puro.

5.7.2 Espectrometria de emissão

As figuras de 57 - 61, mostram o espectro dos plasmas discutidos acima:

Figura 57: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF_4+Ar com 0 W de potência no eletrodo para potências de 50 W, 200 W e 400 W na bobina.

Figura 58: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF_4+Ar com 100 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.

Figura 59: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF₄+Ar com 200 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.

Figura 60: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF₄ e CF₄+Ar com 0 W de potência no eletrodo para potências de 400 W na bobina.

Figura 61: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF_4 e CF_4+Ar com 200 W de potência no eletrodo para potências de 400 W na bobina.

A figura 60 mostra as intensidades para plasmas de CF_4 e CF_4+Ar para uma potência de 0 W no eletrodo e 400 W, é possível notar uma influencia na maioria das intensidades do plasma principalmente na raia de 581 nm que para altas potências na bobina se mostrou a mais intensa em plasmas de CF_4 puro.

A figura 61 mostra as intensidade de plasmas de CF_4 e CF_4+Ar para uma potência de 200 W no eletrodo e 400 W na bobina. Em todas as raias do espectro de CF_4 , há um aumento das intensidades.

Embora não haja nenhuma transição entre as raias de 750 nm e 811 nm correspondente ao plasmas de Ar, a adição de Ar nos plasmas de CF_4 influenciou no aumento das intensidades do espectro de CF_4 .

6 Testes com eletrodo de Estanho

6.1 Teste de Argônio

6.1.1 Medidas elétricas

Nos próximos testes, iremos analisar a influência do material do eletrodo nos plasmas.

O eletrodo que usamos nesses testes, foi o eletrodo de estanho (Sn). O eletrodo de Sn, aumenta a emissão de elétrons secundários no plasmas^[28], sendo importante no processo de ionização.

As primeiras caracterizações que fizemos, pelos mesmos motivos já citados no item 5.1.1 foi para plasmas de Argônio.

Para estes teste foi usado Ar puro com um fluxo de 10 sccm, a ~10 mTorr, e como mostra a figura abaixo, o primeiro parâmetro que foi analisado foi o Vdc.

Figura 62: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para plasmas de Ar, a pressão de 10 mTorr.

A figura 63 temos a ultima medida elétrica realizada em nosso plasma. A medida de tensão de pico a pico (Vpp).

Figura 63: Tensão de pico a pico (V_{pp}) em função da potência aplicada na bobina e da potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de Ar, a uma pressão de 10 mTorr.

Na figura 63 que mostra a V_{pp} e, função da potência aplicada na bobina para diferentes potências aplicadas no eletrodo, as tendências observadas são as mesma observadas anteriormente para plasmas gerados com eletrodo de Alumínio.

Na tabela 1, temos uma comparação dos valores de V_{dc} , para diferentes potências aplicadas no eletrodo e diferentes potências aplicadas na bobina comparando o eletrodo de alumínio e o eletrodo de estanho.

Pot. Bobina (W)	0	50	100	150	200	250	300	350	400
0 W (Al)	-	11	11	11	10	9	8	8	7
0 W (Sn)	-	4	5	5	6	6	4	4	4
100 W (Al)	-534	-477	-442	-387	-316	-250	-193	-160	-141
100 W (Sn)	-530	-499	-464	-379	-282	-204	-154	-138	-122
200 W (Al)	-742	-670	-638	-589	-497	-422	-325	-290	-249
200 W (Sn)	-803	-771	-735	-645	-488	-372	-284	-248	-226

Tabela 1: Tensão DC no eletrodo inferior (V_{dc}) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para plasmas de Ar com eletrodo de estanho e eletrodo e alumínio, a pressão de 10 mTorr.

A figura 64, mostra a influência do eletrodo nos plasmas de argônio puro.

Figura 64: Tensão DC no eletrodo inferior (V_{dc}) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para plasmas de Ar com eletrodo de estanho e eletrodo de alumínio, a pressão de 10 mTorr.

A figura acima mostra que em plasmas de argônio puro, tanto para potências aplicadas no eletrodo quanto para potências aplicadas na bobina, o plasma sofre maior influência quando usado o eletrodo de estanho. Esse fato ocorre devido a um aumento da emissão de elétrons secundários gerados através do bombardeamento no eletrodo^[27].

6.1.2 Medidas óticas

A seguir mostramos o comportamento do plasma para diferentes potências aplicadas no eletrodo e na bobina em plasmas de usando o eletrodo de estanho.

Abaixo nas figuras de 65 a 67, temos os gráficos de intensidades em função do comprimento de onda em plasmas de argônio com os mesmo parâmetros ou seja, uma pressão de 10 mTorr e fluxo de 10 sccm.

Figura 65: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de Ar com 0 W de potência no eletrodo para potências de 50 W, 200 W e 400 W na bobina.

Figura 66: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de Ar com 100 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.

Figura 67: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de Ar com 200 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.

Abaixo nas figuras de 68 a 70, temos alguns gráficos de intensidade em da potência aplicada na bobina para diferentes potências aplicadas no eletrodo. Também foram escolhidas

as raiais de 750 nm, 810 nm e 840 nm, que são as raia de maior intensidade no espectro e também onde correspondem a região que sofre maior influência quando aplicada potência.

Figura 68: Intensidade em função da potência no eletrodo para as raiais de 750 nm 811 nm e 840 nm para plasmas de Argônio puro com 0 W de potência no eletrodo.

Figura 69: Intensidade em função da potência no eletrodo para as raiais de 750 nm 811 nm e 840 nm para plasmas de Argônio puro com 100 W de potência no eletrodo.

Figura 70: Intensidade em função da potência no eletrodo para as raia de 750 nm 811 nm e 840 nm para plasmas de Argônio puro com 200 W de potência no eletrodo.

Como nos teste realizados usando o eletrodo de alumínio, tanto os plasmas onde só eram aplicadas potência no eletrodo como os plasmas onde eram aplicadas potências no eletrodo e na bobina as intensidades das raia de uma maneira geral aumentam com a potência, e também é observado que a raia de 811 nm fica mais intensa em relação a raia de 750 nm para altas potências na bobina.

Por se tratar do mesmo fenômeno, a explicação é a mesma. Quando aplicamos potência na bobina a raia de 811 nm se torna mais intensa do espectro nos levando a crer que esta havendo uma alteração na função de distribuição dos elétrons. Assim como já relatado nos testes realizados com eletrodo de alumínio, pode-se dizer que para plasma do tipo ICP de argônio a temperatura dos elétrons tende a diminuir.

Abaixo, mostramos uma comparação entre os espectros dos plasmas de Ar para eletrodo de alumínio e os espectros dos plasmas de Ar usando eletrodo de estanho.

Figura 71: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de Ar com 0 W de potência no eletrodo para potência de 50 W na bobina e diferentes materiais no eletrodo.

Figura 72: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de Ar com 0 W de potência no eletrodo para potência de 400 W na bobina e diferentes materiais no eletrodo.

Figura 73: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de Ar com 200 W de potência no eletrodo para potência de 0 W na bobina e diferentes materiais no eletrodo.

Figura 74: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de Ar com 200 W de potência no eletrodo para potência de 400 W na bobina e diferentes materiais no eletrodo.

Para plasmas de Ar puro, quando aplicamos potência no eletrodo, há uma grande emissão de elétrons secundários nos plasmas com eletrodo de estanho que faz com que os a

intensidades dos plasmas sejam maiores do que as intensidades nos plasmas gerados com eletrodo de alumínio(Figura 73).

Porem quando aplicamos potência na bobina e mudamos a E.E.D.F, o eletrodo de alumínio faz com que aconteça um aumento das intensidades do espectro em comparação com o eletrodo de estanho(Figura 74).

6.2 Plasmas de SF₆ puro

6.2.1 Medidas elétricas

Iniciando nossos testes com gases operacionais com eletrodo de estanho, os primeiros plasmas que iremos caracterizar, são os plasma de SF₆ puro.

Como em testes anteriores, nesses testes iremos medir a tensão de autopolarização no eletrodo (V_{dc}) e a tensão de pico a pico (V_{pp}) variando as potências aplicadas no eletrodo e na bobina.

Para estes teste foi usado SF₆ puro com um fluxo de 10 sccm, a ~10 mTorr, e o primeiro parâmetro que foi analisado foi o V_{dc}.

Figura 75: Tensão DC no eletrodo inferior (V_{dc}) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para plasmas de SF₆, a pressão de 10 mTorr.

Independente do material utilizados no eletrodo, o acoplamento indutivo dos plasmas de SF₆ é mais difícil de ocorrer.

Na tabela 2, temos uma comparação dos valores de Vdc, para diferentes potências aplicadas no eletrodo e diferentes potências aplicadas na bobina comparando o eletrodo de alumínio e o eletrodo de estanho.

Pot. Bobina (W)	0	50	100	150	200	250	300	350	400
0 W (Al)	-	-8	-8	-7	-5	-1	11	14	15
0 W (Sn)	-	6	7	8	10	12	14	15	16
100 W (Al)	-312	-373	-392	-422	-439	-447	-450	-446	-440
100 W (Sn)	-323	-384	-410	-441	-461	-475	-478	-476	-471
200 W (Al)	-506	-577	-586	-606	-611	-624	-629	-627	-628
200 W (Sn)	-500	-624	-653	-670	-682	-694	-696	-691	-683

Tabela 2: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para diferentes tipos de material no eletrodo em plasmas de SF₆, a pressão de 10 mTorr.

Na figura 76, há uma comparação entre o Vdc de plasmas de SF₆ para eletrodo de estanho e alumínio.

Figura 76: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para diferentes tipos de material no eletrodo em plasmas de SF₆, a pressão de 10 mTorr.

A figura 76, mostra que à potência de 0W no eletrodo, usando o eletrodo de alumínio, há uma maior influência no Vdc quando aplicamos potência na bobina, no entanto usando eletrodo de estanho e altas potências, quando aplicamos potência na bobina o valor do Vdc

diminui muito mais que usando o eletrodo de alumínio, provavelmente esta ocorrendo um problema de potência refletida, semelhante ao já relatado, só que para o eletrodo de estanho esse fenômeno se agrava.

Na figura 77, temos o gráfico de tensão de pico a pico.

Figura 77: Tensão de pico a pico (Vpp) em função da potência aplicada na bobina e da potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de SF₆, a uma pressão de 10 mTorr.

No gráfico de Vpp assim como no gráfico de Vdc, não é possível notar nenhuma mudança que seja possível afirmar que houve um acoplamento indutivo. Analisando somente as medidas elétricas, os plasmas gerados com eletrodo de estanho apresentam um comportamento pior (para acoplamento indutivo) que os plasmas gerados com eletrodo de alumínio.

6.2.2 Espectrometria de emissão

Nas figuras 78 a 80 mostramos os gráficos de intensidade por comprimento de onda para os plasmas de SF_6 puro com fluxo de 10 sccm e pressão de 10 mTorr.

Figura 78: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF_6 com 0W de potência no eletrodo para potências de 50 W, 200 W e 400W na bobina.

Figura 79: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF_6 com 100W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400W na bobina.

Figura 80: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF_6 com 200W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400W na bobina.

Para plasmas de SF_6 puro, todas as raia têm um aumento de intensidade tanto com o aumento da potência aplicada no eletrodo, como o aumento da potência na bobina. Porém a raia de 581 nm aumenta sua intensidade principalmente quando aplicamos potência na bobina.

Nas figuras 81 e 82 temos uma comparação entre as intensidades para diferentes materiais no eletrodo.

Figura 81: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF₆ com 0W de potência no eletrodo para potência de 400 W na bobina e diferentes materiais no eletrodo.

Figura 82: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF₆ com 200W de potência no eletrodo para potência de 400 W na bobina e diferentes materiais no eletrodo.

Tanto para baixa quanto para alta potência no eletrodo, em geral o eletrodo de estanho apresentou um aumento das raiais em comparação com o eletrodo de alumínio.

Se levarmos em conta que os plasmas de SF_6 não tem um bom acoplamento quando aplicada potência no eletrodo, e esse acoplamento melhora quando aplicada potência na bobina, e também considerando que para plasmas gerados com eletrodo de estanho esse acoplamento é pior ainda, podemos deduzir que plasmas de SF_6 sofrem uma maior influência da potência aplicada no eletrodo, à única raia que se mostra mais sensível a potência na bobina é a raia de 581 nm.

O aumento das intensidade em geral nos plasmas que foi utilizado o eletrodo de Sn, pode ser explicado devido a uma ligação que ocorre entre o S do SF_6 e o eletrodo^[28].

6.3 Teste em plasmas de SF_6 + Argônio

6.3.1 Medidas elétricas

Continuando nossos testes de com SF_6 puro e eletrodo de estanho, medimos a tensão de autopolarização no eletrodo (V_{dc}) e a tensão de pico a pico (V_{pp}) variando as potências aplicadas no eletrodo e na bobina.

Para estes testes foi usado Ar puro com um fluxo de 10 sccm, a ~ 10 mTorr, e o primeiro parâmetro que foi analisado foi o V_{dc} .

Figura 83: Tensão DC no eletrodo inferior (V_{dc}) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para plasmas de SF_6 +Ar a pressão de 10 mTorr.

Na tabela 3, temos uma comparação dos valores de V_{dc} , para diferentes potências aplicadas no eletrodo e diferentes potências aplicadas na bobina comparando o eletrodo de alumínio e o eletrodo de estanho.

Pot. Bobina (W)	0	50	100	150	200	250	300	350	400
0 W (Al)	-	7	9	10	11	11	12	13	14
0 W (Sn)	-	-11	-11	-10	-10	-9	-7	-4	2
100 W (Al)	-386	-467	-477	-480	-477	-469	-459	-447	-435
100 W (Sn)	-394	-475	-490	-495	-496	-494	-488	-482	-477
200 W (Al)	-640	-728	-715	-704	-691	-684	-677	-669	-659
200 W (Sn)	-551	-703	-706	-708	-708	-707	-703	-698	-691

Tabela 3: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para diferentes tipos de material no eletrodo em plasmas de SF₆+Ar, a pressão de 10 mTorr.

Na figura 84 temos uma comparação do Vdc para os diferentes tipos de eletrodo para plasmas de SF₆+Ar, e nas figuras 84 os gráficos Vpp.

Figura 84: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para diferentes tipos de material no eletrodo em plasmas de SF₆+Ar, a pressão de 10 mTorr.

Figura 85: Tensão de pico a pico (Vpp) em função da potência aplicada na bobina e da potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de SF_6+Ar , a uma pressão de 10 mTorr.

Assim como nos plasmas com o eletrodo de alumínio, o argônio melhorou o acoplamento do plasmas e como mostra a figura 83, porem na figura 84 é possível notar que o eletrodo de estanho piorou o acoplamento do plasma.

Tanto no gráfico de V_{dc} quanto nos gráficos de V_p e V_{pp} não foi possível ver uma mudança na temperatura dos elétrons em alguns casos é possível notar um acoplamento menos capacitivo.

6.3.2 Espectrometria de emissão

As figuras 86 a 88 mostram os gráficos de intensidade por comprimento de onda para os plasmas de SF_6 e argônio com fluxo de 10 sccm para cada gás e pressão de 10 mTorr.

Figura 86: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF_6+Ar com 0W de potência no eletrodo para potências de 50 W, 200 W e 400W na bobina.

Figura 87: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF_6+Ar com 100W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400W na bobina.

Figura 88: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF_6+Ar com 200W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400W na bobina.

As figuras de intensidade, seguem as mesmas tendências já relatadas nos plasmas de SF_6+Ar com eletrodo de alumínio. A adição de argônio melhorou o acoplamento, mas as intensidades do espectro desses plasmas, não apresentam uma grande mudança na função de distribuição dos elétrons.

Nas figuras 89 e 90 mostramos uma comparação entre os plasmas gerados com eletrodo de alumínio e eletrodo de estanho.

Figura 89: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF₆+Ar, com 0W de potência no eletrodo para potência de 400 W na bobina e diferentes materiais no eletrodo.

Figura 90: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de SF₆+Ar, com 200W de potência no eletrodo para potência de 400 W na bobina e diferentes materiais no eletrodo.

Na figura 89, assim com nos teste de SF₆ puro, o eletrodo de estanho mostrou uma maior influência nos plasmas aumentando suas intensidades de uma maneira geral. Já na figura 90 as principais raias de Ar ou seja as raias de 750 nm, 811 nm e 840 nm sofrem uma

maior influência no eletrodo de alumínio, já as raías correspondente aos plasmas de SF_6 sofrem uma maior influência do eletrodo de estanho.

6.4 CF₄ puro.

6.4.1 Medidas elétricas.

Nos próximos testes, iremos caracterizar plasmas de CF₄ puro.

Para estes teste foi usado Ar puro com um fluxo de 10 sccm, a ~10 mTorr, e como mostra a figura abaixo, o primeiro parâmetro que foi analisado foi o Vdc.

Figura 91: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para plasmas de CF₄ a pressão de 10 mTorr.

Os plasmas de CF₄ com eletrodo de estanho também apresentam o mesmo comportamento que o eletrodo de alumínio, apresentando uma melhora no acoplamento do plasmas e mostrando uma maior influência da bobina no Vdc em comparação com os plasmas de SF₆.

O Vdc se torna mais negativo com o aumento da potência no eletrodo, e se torna mais positivo com o aumento da potência na bobina. Com o aumento da potência no eletrodo a bobina influência mais a variação entre os valores do Vdc.

Na tabela 4, temos uma comparação dos valores de Vdc, para diferentes potências aplicadas no eletrodo e diferentes potências aplicadas na bobina comparando o eletrodo de alumínio e o eletrodo de estanho.

Pot. Bobina (W)	0	50	100	150	200	250	300	350	400
0 W (Al)	-	5	8	9	8	10	10	10	9
0 W (Sn)	-	3	3	3	3	4	4	5	5
100 W (Al)	-528	-522	-519	-509	-495	-482	-461	-448	-432
100 W (Sn)	-576	-564	-564	-560	-555	-549	-541	-530	-523
200 W (Al)	-733	-717	-708	-697	-688	-674	-657	-638	-616
200 W (Sn)	-793	-776	-768	-762	-762	-757	-747	-738	-725

Tabela 4: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para diferentes tipos de material no eletrodo em plasmas de CF₄, a pressão de 10 mTorr.

Na figura 92 mostramos uma comparação entre plasmas de CF₄ gerados com eletrodo de alumínio de eletrodo de estanho.

Figura 92: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para diferentes tipos de material no eletrodo em plasmas de CF₄, a pressão de 10 mTorr.

Comparando os Vdc para diferentes materiais do eletrodo, é possível notar que o material do eletrodo influencia os plasmas quando aplicada potência no eletrodo, para potência na bobina o comportamento é normal em ambos os plasmas.

O eletrodo de estanho, faz com que os plasmas se tornem mais negativos, como o bombardeamento iônico não é tão depende da potência aplicada na bobina, quando aplicamos potência na bobina não há um aumento da emissão de elétrons secundários e o comportamento é o mesmo que para os plasmas gerados com eletrodo de alumínio.

Nas figuras 93 mostramos os gráficos de Vpp.

Figura 93: Tensão de pico a pico (Vpp) em função da potência aplicada na bobina e da potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de CF₄, a uma pressão de 10 mTorr.

Nas medidas elétricas realizadas nos plasmas de CF₄ com eletrodo de estanho, é possível observar no gráfico de Vpp o mesmo comportamento observado no Vdc, com o aumento da potência no eletrodo, os plasmas ficam mais sensíveis a variação de potência na bobina.

6.4.2 Espectrometria de emissão

Nas figuras 94 a 96, mostramos o gráfico de intensidade em função dos diferentes comprimentos de onda para potências aplicadas no eletrodo e na bobina.

Figura 94: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF_4 com 0 W de potência no eletrodo para potências de 50 W, 200 W e 400 W na bobina

Figura 95: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF_4 com 100 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina

Figura 96: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF_4 com 200 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina

Em todos os casos houve aumento das intensidades com o aumento da potência no eletrodo quanto para o aumento da potência na bobina. Nenhuma raia teve um aumento mais significativo, portanto o que pode estar acontecendo, é que não há uma mudança muito grande na função de distribuição dos elétrons.

Nas figuras 97 e 98 mostramos uma comparação entre os plasmas de CF_4 para eletrodo de alumínio e eletrodo de estanho.

Figura 97: : Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF₄, com 0 W de potência no eletrodo para potência de 400 W na bobina e diferentes materiais no eletrodo.

Figura 98: : Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF₄, com 200 W de potência no eletrodo para potência de 400 W na bobina e diferentes materiais no eletrodo.

Nos plasmas de CF_4 gerado com eletrodo de alumínio tiveram comportamento que se parece mais com um acoplamento indutivo. Em ambos os casos mostrados acima o eletrodo de alumínio fez com que os plasmas aumentam muito mais as intensidades do espectro.

Ao contrário dos teste com eletrodo de estanho, aparentemente o eletrodo de alumínio fez com que houvesse uma mudança na função de distribuição dos elétrons, diminuindo a temperatura dos elétrons com o aumento da potência na bobina.

6.5 CF₄ e Argônio

6.5.1 Medidas elétricas

Nos próximos testes, iremos caracterizar plasmas de CF₄ + Ar.

Para estes teste foi usado Ar puro com um fluxo de 10 sccm, a ~10 mTorr, e como mostra a figura abaixo, o primeiro parâmetro que foi analisado foi o Vdc.

Figura 99: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para plasmas de CF₄+Ar, a pressão de 10 mTorr.

As medidas de Vdc para plasmas de CF₄+Ar, apresentam uma maior variação do valor do Vdc em relação aos plasmas de CF₄ puro, mostrando que para o eletrodo de estanho, o argônio também tem uma influência no acoplamento do plasmas, melhorando o acoplamento indutivo.

Na tabela 5, temos uma comparação dos valores de Vdc, para diferentes potências aplicadas no eletrodo e diferentes potências aplicadas na bobina comparando o eletrodo de alumínio e o eletrodo de estanho.

Pot. Bobina (W)	0	50	100	150	200	250	300	350	400
0 W (Al)	-	10	10	10	10	9	9	8	8
0 W (Sn)	-	4	5	5	5	5	5	6	8
100 W (Al)	-529	-522	-516	-512	-499	-485	-462	-441	-419
100 W (Sn)	-551	-548	-544	-539	-533	-524	-511	-497	-483
200 W (Al)	-744	-724	-715	-704	-693	-678	-656	-637	-613
200 W (Sn)	-776	-767	-758	-753	-748	-743	-731	-716	-700

Tabela 5: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para diferentes tipos de material no eletrodo em plasmas de CF₄+Ar, a pressão de 10 mTorr.

Na figura 100 mostramos uma comparação entre os plasmas de CF₄+Ar gerados com eletrodo de estanho e eletrodo de alumínio.

Figura 100: Tensão DC no eletrodo inferior (Vdc) em função da potência aplicada na bobina e de potência aplicada no eletrodo inferior para diferentes tipos de material no eletrodo em plasmas de CF₄+Ar, a pressão de 10 mTorr.

Assim como observado anteriormente, o eletrodo de estanho aumenta a temperatura dos elétrons no plasmas, e aqui também essa temperatura vai diminuindo com o aumento da potência na bobina.

Nas figuras 101, mostraremos os gráficos de Vpp.

Figura 101: Tensão de pico a pico (Vpp) em função da potência aplicada na bobina e da potência aplicada no eletrodo inferior, para plasmas de CF_4+Ar , a uma pressão de 10 mTorr.

Os gráficos de Vp e Vpp, mostram as mesmas tendência mostradas nos teste com eletrodo de alumínio no gráfico de Vdc, nos levando a crer na teoria que a temperatura dos elétrons diminui com o aumento da potência na bobina.

6.5.2 Espectrometria de emissão

Nas figuras 102 a 104, mostramos o gráfico de intensidade em função dos diferentes comprimentos de onda para potências aplicadas no eletrodo e na bobina.

Figura 102: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF_4+Ar com 0 W de potência no eletrodo para potências de 50 W, 200 W e 400 W na bobina

Figura 103: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF_4+Ar com 100 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina

Figura 104: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF_4+Ar com 200 W de potência no eletrodo para potências de 0 W, 200 W e 400 W na bobina.

Nos plasmas de CF_4+Ar gerados com eletrodo de estanho, tivemos uma aproximação maior entre as raías de 750 nm e 811 nm correspondente ao espectro dos plasmas de argônio, isso devido à emissão de elétrons secundários do eletrodo, e mostrando que a adição de Ar nos plasmas de CF_4 influenciam no acoplamento do plasma.

Nas figuras 105 e 106 mostramos uma comparação entre os plasmas de CF_4 para eletrodo de alumínio e eletrodo de estanho.

Figura 105: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF_4+Ar , com 0 W de potência no eletrodo para potência de 400 W na bobina e diferentes materiais no eletrodo.

Figura 106: Intensidade em função do comprimento de onda para plasmas de CF_4+Ar , com 200 W de potência no eletrodo para potência de 400 W na bobina e diferentes materiais no eletrodo.

Apesar da influência do argônio nos plasmas, como as figuras 105 e 106 mostram que com eletrodo de alumínio, é possível obter plasmas com acoplamento mais indutivo.

7 Conclusões.

Neste trabalho, caracterizamos plasmas em um novo reator ICP, com intuito de observar os mecanismos de geração do plasmas nesse reator.

Nessas caracterizações foram usados gases com propriedades não corrosivas como argônio, importante por ser um gás inerte e importante para realização de actinometria e o oxigênio devido à sua eletronegatividade, o que muito foi útil para comparar os resultados com os plasmas de SF₆ e observar a influência da eletronegatividade dos gases. Também foram usados gases que nós chamamos de gases operacionais, que são gases com base fluorada importantes na corrosão.

As técnicas de análises utilizadas foram a de medidas elétricas e a espectroscopia de emissão. Tanto a técnica de medidas elétricas como a técnica de espectroscopia foram importantes pois, como são técnicas independentes, comprovavam os resultados obtidos pelo outro método, ajudando na conclusões.

Plasmas de argônio

O primeiro gás analisado foi o argônio. O argônio se mostrou um gás muito fácil de trabalhar, com fácil acoplamento indutivo, sensível às variações de potência e com resultados muito consistentes para os diferentes materiais utilizados no eletrodo.

Para ambos materiais de eletrodo assim como para todas as potências aplicadas no eletrodo, foi possível notar a influência da potência na bobina, nos levando a crer que os plasmas realmente estavam acoplados indutivamente.

O eletrodo de estanho mostrou uma maior influência nas intensidade dos plasmas quando o acoplamento era capacitivo (somente aplicando potência no eletrodo). No entanto, quanto

aplicada uma potência na bobina, com o eletrodo de alumínio as intensidades foram mais influenciadas.

Plasmas de oxigênio

Embora o oxigênio seja um gás eletronegativo, foi verificado que é possível obter um acoplamento indutivo para esses plasmas.

Foi importante para observar que o acoplamento indutivo é ajudado pelas altas potências no eletrodo.

Também foi possível observar que a adição de argônio nesses plasmas, melhora o acoplamento do plasmas.

Plasmas de SF₆

Os plasmas de SF₆, são importantes devido à alta concentração de flúor presente no gás. Conseguimos dissociar bastante flúor (raia de 703 nm) o que vai ser muito importante em futuros teste de corrosão.

Por ser um gás muito eletronegativo, foi difícil obter um acoplamento indutivo dos plasmas, em ambos os eletrodos houve uma potência refletida alta, prejudicando um pouco as medidas, mesmo assim foi possível obter bons resultados qualitativos. A adição de argônio ajudou muito no acoplamento dos plasmas, e aparentemente houve um aumento das intensidades do espectro inclusive para as raias de flúor, o que também pode ser importante para a corrosão, aumentando as taxas de corrosão.

Comparando os dois eletrodos utilizados, o eletrodo de estanho se mostrou mais eficaz na excitação dos plasmas, para esse eletrodo houve um aumento de uma maneira geral das intensidades dos plasmas.

Plasmas de CF₄

Em plasmas de CF₄, além de possuir flúor, o carbono pode servir para fazer um polímero nas estruturas corroídas, e o que também pode ser muito interessante em futuros teste de corrosão para obter processos mais anisotrópicos.

Para esses plasmas, obtivemos um bom acoplamento indutivo do plasma, e quando aplicada potência na bobina também foi possível ver tendência que nos levaram a crer que os plasmas estavam acoplados indutivamente.

A adição de argônio também melhorou o acoplamento dos plasmas, aumentando também as intensidades do espectro inclusive para as raías de flúor.

Ao contrario dos testes de SF₆, os plasmas de CF₄ mostraram um acoplamento melhor com o eletrodo de alumínio. Todos os espectros obtidos em plasmas onde o eletrodo usado era alumínio, apresentaram uma maior intensidade. Houve um grande aumento de intensidade da raia de 581 nm (comparado com os plasmas de SF₆) para plasmas gerados com eletrodo de alumínio, fenômeno que não aconteceu com o eletrodo de estanho.

8 Trabalhos futuros

Inicialmente, podem-se fazer algumas medidas com outras misturas de gases como por exemplo CF_4+SF_6 ou $\text{CF}_4+\text{SF}_6+\text{Ar}$, para analisar se há um aumento das intensidades das raiais de flúor, ou fazer testes com diferentes porcentagens de ar com os outros gases.

Outras caracterizações feitas por sonda de fluxo de ions, também parecem ser uma boa indicação. Assim seria possível analisar a temperatura dos elétrons e o fluxo de ions nos plasmas^[29].

Também seria importante, e com certeza um dos intuitos desse trabalho, configurar o reator de uma tal maneira que fosse possível fazer testes de corrosão de silício. Seria importante analisar parâmetros como taxa de corrosão, anisotropia e rugosidade, parâmetros que se tornam difíceis de serem analisados usando espectroscopia de emissão e caracterizações por medidas elétricas.

A partir dessas corrosões , seria muito interessante o desenvolvimento de um sensor ou de algum dispositivo tipo MEMS.

9 Referencias bibliográfica.

- [1] T. Belmonte, C.D. Pintassilgo, T. Czerwiec, G. Henrion, V. Hody, J. M. Thiebaut, J. Loureiro “Oxygen plasma surface interaction in treatments of polyolefines”, *Surface & Coatings Technology* 200 (2005) 26– 30;
- [2] E. Gogolides *, C. Boukouras, G. Kokkoris, O. Brani, A. Tserepi, V. Constantoudis ”Si etching in high-density SF₆ plasmas for microfabrication: surface roughness formation”, *Microelectronic Engineering* 73–74 (2004) 312–318;
- [3] W.Y. Leong, C.F. Tsang, H.Y. Li,*, V. Bliznetsov, L.Y. Wong, W.H. Li ”Effects of plasma treatments on structural and electrical properties of methyl-doped silicon oxide low dielectric constant film ”, *Thin Solid Films* 496 (2006) 402 – 411;
- [4] V. O. Van Hoof, J. T. Deng and M. E. De Broe “How do plasma membranes reach the circulation? ”, *Clinica Chimica Acta*, Volume 266, Issue 1, 9 October 1997, Pages 23-31;
- [5] S. Bouaidat, B. Winther-Jensen, S. Flygenring Christensen, J. Jonsmann “Plasma-polymerized coatings for bio-MEMS applications ”, *Sensors and Actuators A* 110 (2004) 390–394;
- [6] Marshal Dhayal , Hyung Gon Jeong, Jeong Sik Choi “Use of plasma polymerisation process for fabrication of bio-MEMS for micro-fluidic devices ”, *Applied Surface Science* 252 (2005) 1710–1715;
- [7] J. Kiihamaki, H. Kattelus, J. Karttunen, S. Franssila, “Depth and profile control in plasma etched MEMS structures”, *Sensors and Actuators* 82 2000 234–238;

- [8] W.J. Park, Y.T. Kim, J.H. Kim, S.J. Suh, D.H. Yoon, “Etching characterization of shaped hole high density plasma for using MEMS devices”, *Surface & Coatings Technology* 193 (2005) 314– 318
- [9]Junting Liu, Nikolay I. Nemchuk, Dieter G. Ast , J. Gregory Couillard “Etch rate and surface morphology of plasma etched glass and glass-ceramic substrates ”, *Journal of Non-Crystalline Solids* 342 (2004) 110–115
- [10] Ivo W. Rangelow “Dry etching-based silicon micro-machining for MEMS ”, *Vacuum* 62 (2001) 279}291
- [11] http://www.teledynereynolds.co.uk/images/hivoltage_multipin_01.gif
- [12] B. Chapman, “Glow Discharges Processes: sputtering and plasma etching”, J. Wiley, NY, 1980;
- [13] Roberto Katsuhiko Yamamoto “Fundamentos Básicos sobre Plasmas Frios”, Apostila do curso Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos, FATEC, São Paulo , 1993;
- [14] Ronaldo D. Mansano “Corrosão de silício monocristalino por plasma”, Tese de doutorado, EPUSP, 1998;
- [15] Chang Ju Choi, O Sung Kwon, Yeo Song Seol, Yil Wook Kim and Hyun Choi. “Ar addition effect on mechanism of fluorocarbon ion formation in CF₄/Ar inductively coupled plasma“, *J. Vac. Sci. Technol. B* 18(2) Mar/Apr 2000;
- [16] U. Kortshagen, N. D. Gibson and J. E. Lawler, “On the E-H mode transition in RF inductive discharges”, *J. Phys D: Appl. Phys* 29 (1996) 1224-1236;
- [17] J. W. Coburn and M. Chen, “ Optical emission spectroscopy of reactive plasmas: A method for correlating emission intensities to reactive particle density”, *J. Appl Phys.* 51 (6) june 1980;
- [18] Gary S. Selwyn, “ Óptical Diagnostic Techniques For Plasma Processing”, The American Vacuum Society Education Committee, NY,1993;

- [19] Mansano, R. D., Yunaka, N. T., Maciel, H. S. “Detecção do ponto final da corrosão por plasma usando espectrometria de emissão para litografica de tres camadas”
- [20] Gottscho, R. A., Donnelly, V. M., “Optical emission actinometry and spectral line shapes in rf glow discharges”, J. Appl. Phys v56 n°2, 1984;
- [21] Livak, H. E., “End point control via optical emission spectroscopy” Jounal of Vacuum Science and Technology, B, v14, n°1, pg 516-20,1996;
- [22] M. J. Schabel, V. M. Donnelly, A. Kornblit and W. W. Tai, “Determination of electron temperature, atomic fluorine concentration, and gas temperature in inductively coupled fluorocarbon/rare gas plasma using óptical emission spectroscopy “,J. Vac. Sci. Technol. A 20(2) Mar/Apr 2002;
- [23] D. L. Goodman and N. M. P. Benjamin “Active control of instabilities for plasma processing with electronegative gase”, J. Phys. D: Appl. Phys. 36 (2003) 2845-2852;
- [24] PISANI, M. B., “Medidas Elétricas de RF em Reatores de Processamento a Plasma”, Tese de doutorado, EPUSP, 2001;
- [25] Coburn, J. W. “Diagnostics in plasma processing”, J. Vac. Sci. Technol., v15, n° 2, pg. 188-92, 1978;
- [26] Ronaldo Ruas, P. Verdonck, R.D. Mansano, N. St. J. Braithwaite, “The effect of electrode materials on etching mechanisms”, Czechoslovak Journal of Physics, vol 52, suppl. A, A465 - A475 (2002);
- [27] POPOV, O. A.; *High Density Plasma Sources – Design, Physics and Performance*; Noyes; Park Ridge – NJ (EUA); 1995;
- [28] Ronaldo Ruas, “Influência do material de eletrodo nas características de processo de corrosão por plasma” , tese de mestrado, EPUSP, 2001;

- [29] Laura Swart, Patrick Verdonck. *The influence of the AC component of the plasma potential on the measurements of ion flux*. XIX Symposium on Microelectronics Technology and Devices, 2004;
- [30] Bruno S. Rodrigues, Laura Swart e Patrick Verdonck – “*CHARACTERIZATION OF INDUCTIVELY COUPLED ARGON PLASMAS*” - Chip in Sampa, Student forum – São Paulo 2003;
- [31] Claudia Reyes Betanzo – “Corrosão por Plasma para Tecnologias CMOS e Microsistemas”, tese de doutorado, UNICAMP, 2003;