



# Universidade de São Paulo

Projeto Acadêmico

17 de Abril de 2019

## 1. Identificação

**Docente:** 51067-Masao Matsuoka

**Unidade:** Instituto de Física

**Departamento:** Física Nuclear

**Função:** Prof  
Associado

**Jornada:** RDIDP

**Mérito:** MS-5

**Projeto interdisciplinar:** Não

## 2. Objetivos e metas articulados com o Projeto Acadêmico do Depto e/ou Unidade e com o Perfil Docente

### 2.1 Objetivos

Ensino:

Contribuir para a formação de alunos de graduação de diversos cursos e alunos de pós-graduação.

Pesquisa:

Realizar pesquisas na área "Física Aplicada com Partículas e Radiação", no intuito de formação e caracterização de filmes finos no Grupo de Cristais Iônicos, Filmes Finos e Datação, pertencente ao DFN.

Extensão:

Divulgar as atividades, áreas de pesquisa e conhecimento técnico desenvolvidos no departamento para estudantes e público em geral.



# Universidade de São Paulo

Projeto Acadêmico

17 de Abril de 2019

## 2.2 Metas

Ensino:

(1) Reformar cursos de graduação experimentais (laboratórios) oferecidos pelo IF para alunos da EP; (2) Ministrando cursos de graduação para alunos do IF; (3) Oferecer uma disciplina, relacionada com atividades do DFN, na pós-graduação; (4) Aumentar o número de alunos de IC, mestres e/ou doutores.

Pesquisa:

Produção de filmes finos semicondutores de: (1) InN e (2) Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, com auxílio de feixes iônicas, e caracterização dos filmes finos assim produzidos, visando suas aplicações optoeletrônicas.

Neste item, a frase “auxílio de feixes iônicos” se refere neste contexto ao método ion beam assisted deposição, IBAD, que emprega simultaneamente duas técnicas: a deposição em vácuo de material, sobre substratos em temperatura ambiente a 500 °C, usando um evaporador por feixe de elétrons; o bombardeamento de íons energéticos oriundos de uma fonte de íons com energia de 70-1200 eV, podendo formar compostos de elementos de material evaporado e de íons. O Grupo de Cristais Iônicos, Filmes Finos e Datação disponibiliza a máquina IBAD, financiada pela FAPESP (Proc.: 1999/00013-06) e montada no Grupo. Uma das vantagens do método IBAD é que, como as duas técnicas empregadas trabalham dentro de uma câmara de vácuo independentemente, pode variar separadamente três parâmetros de deposição: a energia e fluxo de íons, e o fluxo de átomos evaporados, possibilitando a formação de filmes estequiométricos. Um dos parâmetros importantes e fundamentais no processo IBAD é a arrival rate ratio, ARR(I/A), definida pela razão do fluxo de íons incidentes relativa ao fluxo de átomos evaporados e transportados ao substrato.

Extensão:

Oferecer palestras, minicursos ou oficinas em edições anuais do Curso de Verão organizado pelo IF.



# Universidade de São Paulo

Projeto Acadêmico

17 de Abril de 2019

## 2.3 Como este projeto se articula com o do Departamento e/ou Unidade?

Ensino:

O objetivo deste projeto está de acordo com os Objetivos 04 e 05 do DFN. As metas (1), (3) e (4) acima correspondem, respectivamente, à Ação “Estimular um discussão constante para a criação e reformulação de disciplinas ...”, ao Indicador “Efetivo oferecimento das disciplinas de graduação e pós-graduação de competência do DFN”, à Meta “Manter ou ampliar o número de orientações de mestres e doutores nas varias áreas de atuação do DFN”, que estão descritos no projeto do DFN.

Pesquisa:

As frases “Física Aplicada com Partículas e Radiação” e “formação e caracterização de filmes finos” no objetivo deste projeto correspondem, respectivamente, a uma das três linhas de pesquisa descritas no projeto do DFN e ao Objetivo 03 do Grupo de Cristais Iônicos, Filmes Finos e Datação. A meta do projeto está de acordo com a ação do Grupo “Realizar pesquisas em filmes finos produzidos com auxilio de feixes iônicos para aplicações mecânicas, óticas e eletrônicas”.

Extensão:

O objetivo e a meta acima escritos são de acordo com os respectivos do projeto do DFN.

## 2.4 Como este projeto se articula com o Perfil Docente almejado?

Trabalhar e pesquisar com alunos são importantes e essenciais para aumentar a produção científica (orientações de alunos e publicação de artigos em revistas científicas). Tenho enfrentado dificuldade enorme em atrair novos alunos de graduação e de pós-graduação. Para captar novos alunos, enviei cartazes de propaganda à CPG, também os afixei no IF e dei uma palestra numa edição do Curso de Verão oferecido pelo IF, mas não houve sucesso.

Uma das prováveis razões é que, durante anos, tenho dado aula para alunos da EP nos cursos de graduação experimentais (laboratórios) e assumia



# Universidade de São Paulo

Projeto Acadêmico

17 de Abril de 2019

ocasionalmente a coordenação do curso, reduzindo a oportunidade de encontrar e conhecer alunos do IF. Pois, como sou formado em engenharia, prefiro ministrar estes cursos pragmáticos e considero que todos os alunos de engenharia devem conhecer o tratamento de dados experimentais e manuseios de equipamentos básicos.

Para reverter esta situação, pretendo: (i) ministrar cursos de graduação oferecidos para alunos do IF [Meta (2) em Ensino do projeto acima escrita]; (ii) oferecer uma disciplina na pós-graduação [Meta (3) em Ensino]; (iii) divulgar as atividades desenvolvidas por mim em eventos científicos [Meta em Extensão]; (iv) pesquisar semicondutores que atraem muita atenção [Meta em Pesquisa].

## 3. Planejamento das atividades para cumprir as metas

### 3.1 Ensino em Graduação

Tenho ministrado, durante alguns anos, duas disciplinas de graduação experimentais: Física Experimental A (primeiro semestre) e B (segundo semestre), para os estudantes da EP. Elaborei dois experimentos: Choque Bidimensional e Circuito RC, nas respectivas disciplinas, levando em conta: (a) a simplificação de aparelhagem para facilitar o transporte de equipamentos didáticos do IFUSP ao laboratório no campus da USP em Santos; (b) a modernização dos guias de estudo (apostila) e de trabalho (relatório), introduzindo a cada experimento os equipamentos mais modernos disponíveis; (c) a percepção clara de leis da natureza físicas nos procedimentos experimentais.

Respeito ao item (a), por exemplo, o experimento Choque Bidimensional no IF usa uma aparelhagem consistindo de: (i) uma mesa de vidro (60 x 60 cm<sup>2</sup>) com uma tampa metálica paralela à mesa, que fica em cima da mesa; (ii) dois discos metálicos, um lado de cada disco tendo uma coluna central, que podem se mover entre a mesa e a tampa com auxílio de ar comprimido



# Universidade de São Paulo

Projeto Acadêmico

17 de Abril de 2019

para diminuir o atrito entre a mesa e o corpo; (iii) uma alta tensão pulsada de 10 kV aplicada entre a coluna e a tampa, para registrar a trajetória de cada corpo em um papel encerado fixado à tampa.

Substitui a aparelhagem acima citada por uma nova, composta de: (I) uma rampa de 20 cm de comprimento; (II) duas esferas de ferro de 2 cm de cada. Uma esfera desce pela rampa e se choca com outra na extremidade da rampa; (III) um papel de carbono para registrar o local de queda de cada esfera. Essa nova aparelhagem eliminou a mesa de vidro com tampa pesadas, uso de compressor de ar e de fonte de alta tensão pulsada que pode dar choques elétricos ao operador, e o papel encerado que falta no mercado.

Pretendo aperfeiçoar os dois experimentos acima citados e/ou elaborar novos experimentos relacionados com as disciplinas, e depois migrar para cursos destinados a alunos do IF.

## 3.2 Ensino em Pós-Graduação

Pretendo ministrar aula sobre minha área de pesquisa, baseada em um curso de pós-graduação, titulado "Ion Beam Assisted Deposition and Applications", dado por mim em inglês durante quatro dias, na "Kumamoto University", Kumamoto, Japão, em 2010.

O conteúdo do curso foi o seguinte:

1. Vacuum Science and Technology
2. Deposition Methods
  - 2.1. Physical vapor deposition
  - 2.2. Chemical vapor deposition
  - 2.3. Deposition processes
3. Ion Beam Assisted Deposition (IBAD) Systems
  - 3.1. Motivation for IBAD processing
  - 3.2. IBAD system
    - 3.2.1. Vapor sources
    - 3.2.2. Quartz deposition rate monitor
    - 3.2.3. Ion sources
  - 3.3. Deposition parameters



# Universidade de São Paulo

Projeto Acadêmico

17 de Abril de 2019

- 3.3.1. Arrival rate ratio
- 3.3.2. Calculation of arrival rate ratio
- 4. Ion-Surface Interactions in Solids
  - 4.1 General features, energy, units, and Bohr model
  - 4.2 Dynamics of elastic collisions
    - 4.2.1 Kinematic of elastic collisions
      - (a) Laboratory coordinate system
      - (b) Center of mass coordinate system
      - (c) Relative coordinate system
    - 4.2.2 Motion under a central force
    - 4.2.3 Rutherford backscattering
  - 4.3 Cross section
    - 4.3.1. Angular differential cross-section
    - 4.3.2. Energy-transfer cross-section
  - 4.4 Ion stopping
    - 4.4.1. Electronic stopping
    - 4.4.2. Nuclear stopping
  - 4.5 Interatomic potentials
  - 4.6 Ion-solid simulations
- 5. Characterizations of thin films and surfaces
  - 5.1 Film thickness and hardness
    - 5.1.1. Profilometry
    - 5.1.2. Hardness
  - 5.2 Structural characterization
    - 5.2.1. X-ray diffraction (XRD)
    - 5.2.2. Scanning Electron Microscopy (SEM)
  - 5.3 Chemical characterization
    - 5.3.1. Auger Electron spectroscopy (AES)
    - 5.3.2. X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)
    - 5.3.3. Elastic Recoil Detection Analysis (ERDA)
  - 5.4. Examples of analysis results
    - 5.4.1. CNx
    - 5.4.2. Ni metallization
    - 5.4.3. ZrNx



# Universidade de São Paulo

Projeto Acadêmico

17 de Abril de 2019

5.4.4. ZrOx

5.4.5. TiNx

5.4.6. SiNxOy

## 3.3 Pesquisa

### (1) Filmes finos de InN

Nitretos do grupo III (AlN, GaN e InN) são semicondutores com o bandgap direto, podendo ser emissores de luz com alta eficiência. Sua fase cristalina estável é wurtzita (Wz) hexagonal. A energia de bandgap varia de 0,7 eV para InN hexagonal (h-InN) a 6,2 eV para h-AlN, através de 3,4 eV para h-GaN, e dois nitretos podem formar ligas. Cada liga ternária possui propriedades intermediárias entre os dois nitretos e a energia de bandgap, conforme a composição química, pode cobrir a região espectral de UV a IR. Como as propriedades de ligas dependem fortemente de InN, InN é um material chave.

#### (1.1) Fases politípicas

Existe outra estrutura metastável, zinc blende (ZB) cúbica. A diferença entre as fases Wz e ZB está na seqüência de empilhamento da camada de N e da camada de In ao longo eixo-c da célula unitária hexagonal: o hexagonal close-packing, hcp, e o cubic close-packing, ccp, respectivamente.

Descobrimos em medidas de difração de raios-X (DRX) um indício experimental de coexistência das fases Wz e ZB. O objetivo é correlacionar a formação das duas fases com os parâmetros de deposição: ARR(N/In), definida como a razão do fluxo de íons de N relativo a que de átomos de In evaporados, a energia de íons e temperatura de substrato. O procedimento tem as seguintes etapas: produzir filmes finos de InN com diferentes parâmetros de deposição; medir os filmes produzidos com DRX e analisar os resultados obtidos.

#### (1.2) Controle de condutividade elétrica e produção de junção p-n

Como InN tem a afinidade eletrônica alta, seu bandgap estreito e a presença de defeitos doadores, há o acúmulo extremo de elétrons na superfície e o filme de InN não-dopado é sempre do tipo-n. As propriedades elétricas de InN do tipo-p (InN dopado com Mg, InN:Mg) serão ocultadas pelo transporte



# Universidade de São Paulo

Projeto Acadêmico

17 de Abril de 2019

de elétrons acumulados na superfície.

Não há substrato adequado para o crescimento de InN devido à inadequação entre as constantes de rede de InN e do substrato. A safira, mais usada agora como o material de substrato, será adotada para a formação de InN, apesar de uma inadequação da constante de rede de 26% com h-InN. Serão produzidos filmes finos de h-InN mais puros possíveis, introduzindo uma camada intermediária entre o substrato e o filme, para minimizar o efeito da inadequação; em seguida, a condutividade elétrica e a concentração de elétrons residuais serão medidas. Uma vez que seja formado h-InN puro, serão produzidos filmes finos de InN:Mg e a junção p-n de InN e em seguida, serão determinados o efeito Hall e a condutividade elétrica.

(2) Filmes finos de Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pode ser usado para a eletrônica de potência, fotodetectores de UV, células solares, filmes semicondutores transparentes, devido ao campo de ruptura maior que Si e GaN e ao bandgap direto de 4,7 eV. Há cinco polimorfos conhecidos de Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e, dentre eles, a estrutura monoclinica (beta) é estável nas condições normais e o mais estudado.

Beta-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> não dopado apresenta a condutividade elétrica do tipo-n devida à presença de dopantes doadores não intencionais como Si e H. Há relato de que nanowires de Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:N indicam a condutividade elétrica do tipo-p. Serão formados e analisados filmes finos de beta-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e beta-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:N. O procedimento experimental é o seguinte: (i) evaporar um material Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e depositar o filme com irradiação de íons de Ar, variando os parâmetros de deposição; (ii) analisar os filmes finos assim formados em termos de DRX e condutividade elétrica; (3) preparar filmes finos de Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:N com irradiação de íons de Ar + N e analisar os filmes finos como descrito acima.

## 3.4 Cultura e Extensão

Propor uma palestra, minicurso ou oficina em uma edição do Curso de Verão à comissão organizadora.



# Universidade de São Paulo

Projeto Acadêmico

17 de Abril de 2019

## **3.5 Nacionalização e Internacionalização**

Nada a declarar.

## **3.6 Orientação**

Pretendo orientar dois alunos de graduação e dois alunos de pós-graduação no projeto de pesquisa “Produção de filmes finos semicondutores”. Os alunos podem aprender a tecnologia de vácuo (como operar a máquina IBAD), interação entre íons e sólido (colisão binária elástica, stopping power, ion range, danos de radiação, simulação computacional de íons e sólido, mecanismo IBAD) e técnicas de medidas elétricas e de DRX.

## **3.7 Gestão Universitária**

Nada a declarar.

## **3.8 Outros**

Nada a declarar.

## **3.9 Atividades Priorizadas [se pertinente]**

Nada a declarar.