



# Otimização do processo de deposição de filmes finos de prata sobre vidro para a fabricação de refletores solares ópticos rígidos aplicados no controle térmico de satélites artificiais.

MEDEIROS, F. I.<sup>1</sup>, MELLO, C. B.<sup>2</sup>

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

<sup>1</sup>Aluno de doutorado do curso ETE/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores - CMS.

<sup>2</sup>Orientadora – docente do curso ETE/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores - CMS

fiusuti@gmail.com

---

**Resumo.** *Variações no processo de deposição da prata sobre o vidro foram aplicadas para o estudo da diminuição da porosidade do filme de prata a fim de melhorar suas propriedades ópticas para a aplicação em refletores solares ópticos rígidos. As diferentes condições de deposição experimentadas mostraram que o aumento energético das espécies pulverizadas e o aumento da temperatura de deposição favoreceram a redução da porosidade dos filmes que foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura. Tal redução da porosidade resultou na diminuição da absorvidade do espectro solar, com isso, foi possível aproximar as propriedades ópticas destes filmes finos de prata com os dados da literatura.*

---

**Palavras-chave:** Pulverização catódica; Descarga de catodo oco; Refletores solares ópticos; Filmes finos de prata.

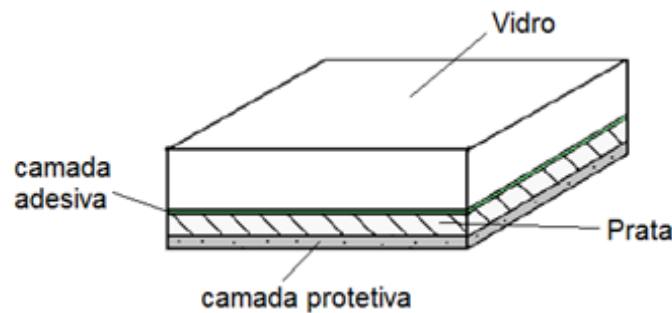
## 1. Introdução

Filmes finos de prata tem aplicações importantes em diversos setores industriais, dentre eles o setor aeroespacial. Sua principal aplicação ocorre em diferentes tipos de sistemas ópticos como, por exemplo, a aplicação em faróis para o setor automotivo e em refletores solares ópticos para o setor espacial [Carton, *et al.* 2013].

O refletor solar óptico (*optical solar reflectors – OSR*) é utilizado para auxiliar no controle térmico de satélites artificiais. A prata é escolhida para essa aplicação por possuir excelentes propriedades de reflexão e baixa absorvidade do espectro solar. Assim, os refletores solares atuam como uma espécie de espelho de segunda superfície que reflete a luz solar limitando a absorção de calor na região em que esteja instalado [Boato, *et al.* 2017]. A Figura 1 mostra esquematicamente a composição de um refletor solar óptico que é basicamente formado por um substrato de vidro (borossilicato) recoberto por um filme fino de prata. No entanto, para maximizar a aderência da prata sobre o vidro, uma intercâmara adesiva é usualmente depositada entre o vidro e a prata. Por fim, após as



deposições da camada de adesão e do filme refletivo de prata, há a deposição de uma camada protetiva para evitar a contaminação da prata, impedindo a alteração de suas propriedades ópticas e diminuição da eficiência do refletor.



**Figura 1.1 - Representação esquemática de um radiador solar óptico rígido**

De acordo com Gilmore, OSRs de prata possuem valores típicos de absorvidade do espectro solar entre 7 e 10%, porém, a prata sólida polida apresenta 4% de absorvidade. O aumento da absorvidade é algo indesejável para um refletor solar óptico, o ideal seria obter OSRs com valor de absorvidade solar o mais próximo possível da prata sólida polida. Um dos fatores contribuintes para o aumento da absorvidade do OSR em comparação à prata polida é a adição da intercâmara de adesão entre o vidro e a prata que atua como uma espécie de máscara sobre a prata. Embora essa camada seja extremamente fina, da ordem de 20 nm, há uma influência na diminuição da eficiência do refletor. Outro fator importante no aumento da absorvidade dos OSRs é a qualidade do filme de prata depositado. Filmes finos metálicos porosos normalmente exibem menor refletância e maior absorvidade do espectro visível em comparação ao mesmo material sólido e polido [Carton, *et al.* 2013]. Por esse motivo, é desejável que estes filmes de prata sejam densos e apresentem pequena quantidade de poros e defeitos.

A deposição por pulverização catódica (*magnetron sputtering*) tem sido bastante utilizada para o crescimento de filmes finos de prata para fins ópticos [Asainov, *et al.* 2016]. Estudos anteriores [Helmersson, 2006; Shuyoung, 2011; Ferreira, 2016] mostram que as condições e parâmetros de deposição exercem determinante influência na qualidade dos filmes. Visando otimizar os parâmetros de deposição de prata para a obtenção de filmes com absorvidade próxima à da prata sólida polida, esse trabalho estudou a deposição destes filmes em diferentes configurações do sistema de deposição.

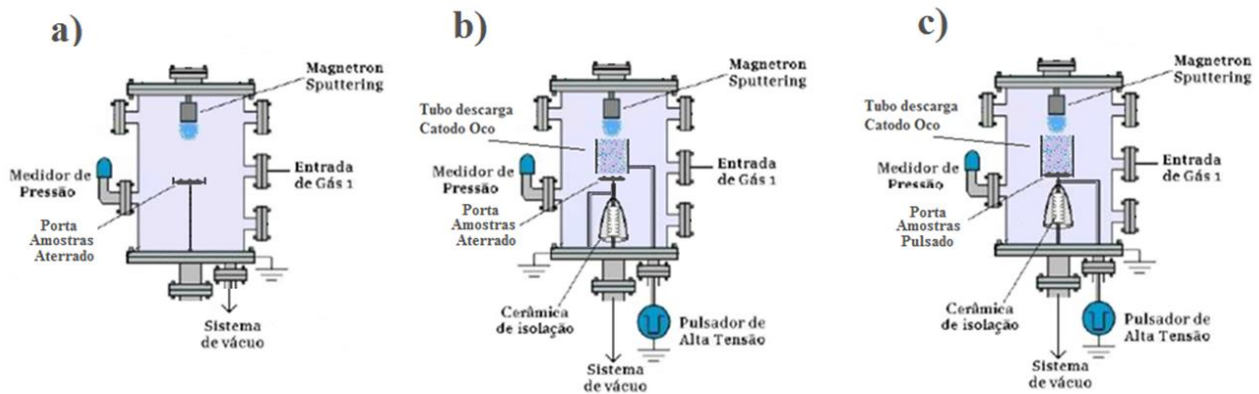
## 2. Metodologia

No processo de deposição por *magnetron sputtering* (MS), o material-alvo é pulverizado do estado sólido ao vapor através da incidência de íons em sua superfície, no interior de uma câmara de vácuo operada em baixa pressão. Os átomos pulverizados do alvo sólido são, portanto, depositados sobre um substrato formando um filme fino [Helmersson *et al.* 2006].

Neste trabalho, filmes finos de prata foram depositados sobre lâminas de vidro de dimensões 40mm x 20mm x 0,1mm. As deposições ocorreram em três configurações diferentes do sistema de deposição, apresentados esquematicamente na Figura 2.1. A configuração de deposição convencional por *direct current magnetron sputtering* (DC-MS)



foi denominada deposição A (Fig. 2.1a). A deposição B ocorreu através da associação entre DC-MS e descarga secundária de catodo oco com o porta-amostras aterrado (Fig 2.1b). Na configuração da deposição C, os pulsos de alta tensão negativa aplicados no catodo oco para a geração da descarga secundária foram aplicados simultaneamente no porta-amostras (Fig 2.1c). O catodo oco (tubo inserido no sistema para a geração da descarga secundária) recebe pulsos de alta tensão negativa e fica posicionado entre o material-alvo e o substrato, como mostrado esquematicamente nas Figuras 2.1b e 2.1c. Com isso, os átomos pulverizados do material-alvo atravessam o plasma denso no interior do tubo durante seu trajeto de deposição e sofrem sucessivas colisões. Essa assistência iônica oriunda da descarga secundária de catodo oco tende a promover um aumento energético na superfície do substrato, além de fornecer energia cinética aos átomos de prata que estão sendo depositados.



**Figura 2.1 - Representação esquemática dos sistemas utilizados.**

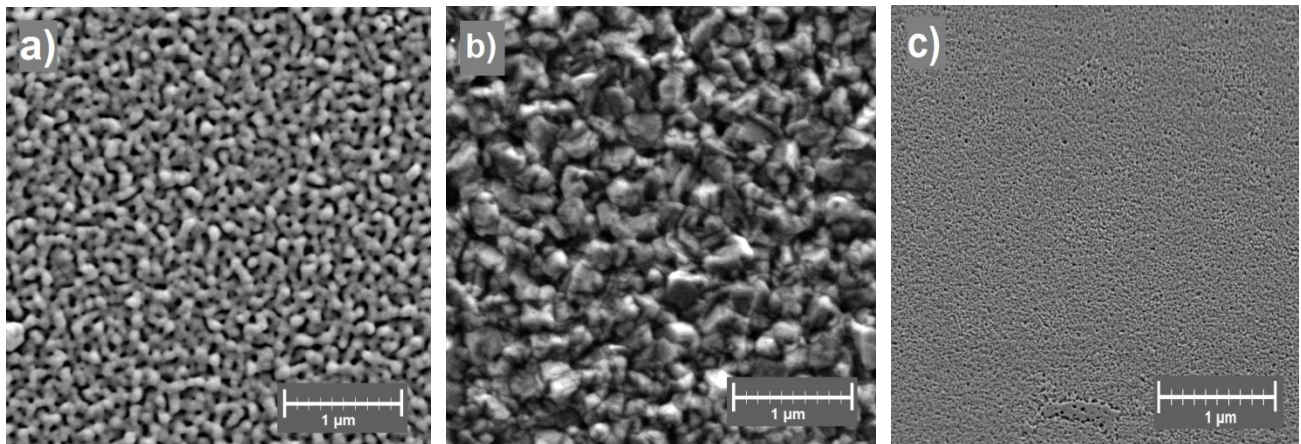
Antes de cada experimento as amostras de vidro foram limpas para a eliminação de contaminantes orgânicos. A pressão de argônio durante a deposição foi regulada em 3 Pa. No alvo de prata de alta pureza (99,99%) de 50 mm de diâmetro e espessura 3 mm, a potência média aplicada foi de 50 W para todas as deposições. Nos experimentos realizados com a inserção da descarga secundária de catodo oco, os pulsos de alta tensão negativa aplicados no tubo foram de -2 kV/ 20 $\mu$ s/ 500Hz. As dimensões do tubo são 110 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento, com isso, a distância entre alvo e substrato foi ajustada em 70 mm. O tempo de deposição de cada experimento foi de 60 minutos. Os filmes depositados nas diferentes condições foram analisados em sua morfologia e seção transversal por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a absorvidade do espectro solar de cada filme foi analisada com um refletômetro solar

### 3. Resultados e Discussão

A Figura 3.1 apresenta as diferentes morfologias obtidas para os filmes de prata observados por MEV. O filme da deposição A (Fig 3.1a) apresenta aspecto granular com quantidade significativa de poros. O filme da deposição B (Fig 3.1b) apresentou grãos maiores, com geometrias diversas e poucos espaços vazios aparentes em sua superfície, caracterizando um crescimento colunar. Já o filme da deposição C (Fig.3.1c), apresentou morfologia refinada com a geometria dos grãos indefinida e nanoporos superficiais. Essas

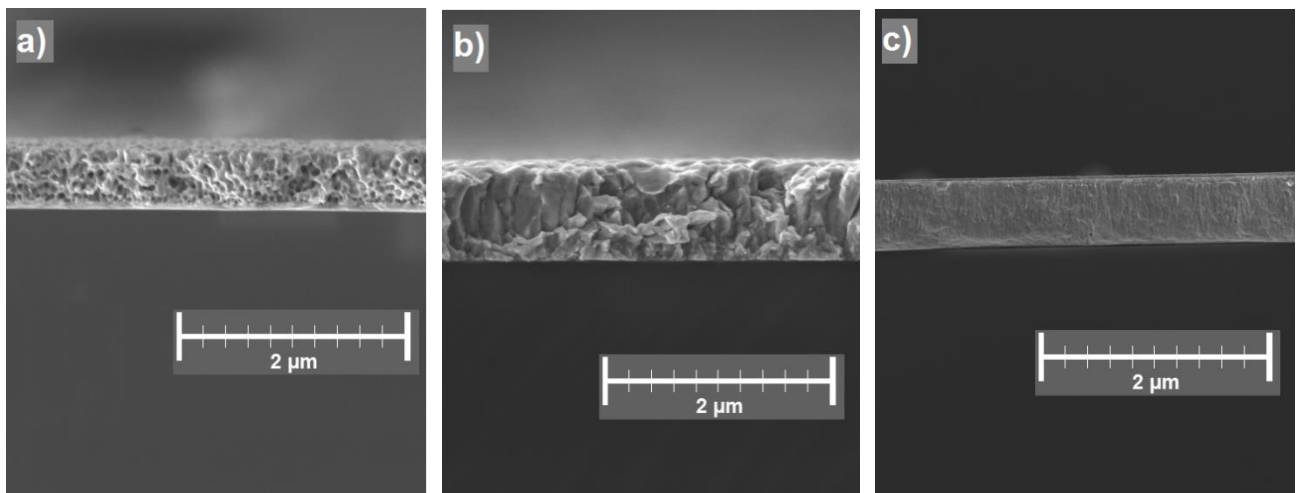


podem ser características de filme com baixo grau de cristalinidade, possivelmente causados pelo bombardeio iônico acentuado com a polarização do substrato [Ferreira, *et.al.* 2016].



**Figura 3.1 - Morfologia superficial: a) deposição A, b) deposição B, c) deposição C.**

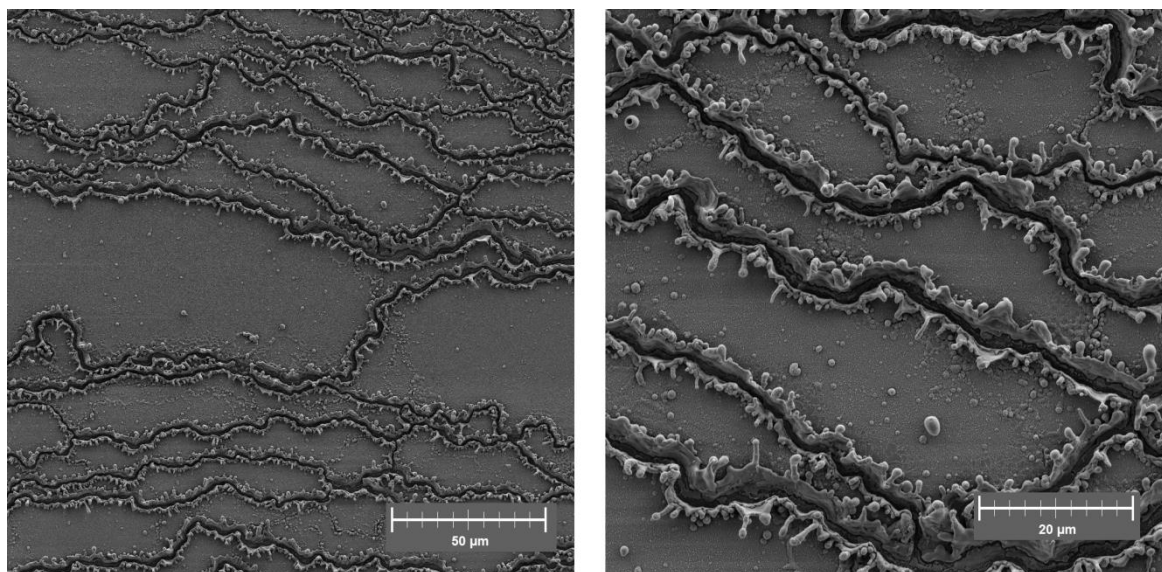
As imagens da seção transversal dos filmes confirmam as considerações observadas na superfície das amostras. Observa-se na Figura 3.2a a existência de poros em todo o volume do filme da deposição A. Os filmes da deposição B apresentaram crescimento colunar com pequenos espaços vazios entre colunas, o que caracteriza maior compactação do filme em comparação com a deposição A. Na deposição C, a análise da seção transversal revelou um filme de morfologia densa e compacta. O possível aumento de energia e temperatura promovidos pela inserção da descarga secundária e dos pulsos de alta tensão negativa no substrato podem ter contribuído para o aumento da mobilidade e difusividade dos átomos, favorecendo suas acomodações na coalescência do filme [Shuyong *et al.* 2011; Zou *et al.* 2009].



**Figura 3.2 - Imagens da seção transversal dos filmes da: a) deposição A, b) deposição B, c) deposição C.**



A espessura dos filmes foi de 530 nm para o filme A, 800 nm para o filme B e 580 nm para o filme C. Apesar da diminuição da quantidade de poros na deposição C, a polarização do substrato com pulsos de alta tensão induz a formação de arcos elétricos sobre o substrato de vidro devido ao seu caráter isolante. O resultado é a formação de ranhuras nas bordas do filme, causadas pela condução dos arcos elétricos pelo filme de prata durante a deposição. O aquecimento pontual causado pelos arcos elétricos fundiu a prata que estava pelo caminho do arco elétrico. A figura 3.3 mostra a região da superfície do filme danificada pela formação dos arcos elétricos.



**Figura 3.3 – Imagens do percurso dos arcos elétricos na superfície dos filmes da deposição C.**

A diferença entre morfologias e porosidade dos filmes também impactaram nos resultados de propriedade óptica da prata. O filme da deposição C, embora tenha apresentado significativa redução dos poros, apresentou resultados de absorvidade prejudicados possivelmente pelas ranhuras impressas no filme (Fig. 3.3). A Tabela 3.1 reúne os valores de absorvidade do espectro solar medidos nos filmes depositados pelas 3 configurações de sistema.

**Tabela 3.1 Absortividade do espectro solar  $\alpha$ .**

| <b>Amostra</b> | <b>Absortividade (<math>\alpha_{\text{solar}}</math>)</b> |
|----------------|---|
| A              | $0,067 \pm 0,005$   |
| B              | $0,056 \pm 0,004$   |
| C              | $0,092 \pm 0,011$   |

Dentre as configurações adotadas, a deposição B foi a que apresentou menor absorvidade do espectro solar ( $0,056 \pm 0,004$ ), embora não esteja tão próxima do valor de absorvidade da prata sólida polida (0,04). O filme poroso produzido pela deposição A apresentou valor intermediário ( $0,067 \pm 0,005$ ) entre os filmes da deposição B e da



deposição C ( $0,092 \pm 0,011$ ). É possível que o filme da deposição C pudesse apresentar melhores resultados de absorvidade caso não sofresse os danos causados pela formação de arcos elétricos durante a sua deposição.

#### 4. Conclusão

As variações no processo de deposição produziram filmes com características distintas, a inserção da descarga secundária no processo de deposição promoveu uma assistência iônica durante o crescimento do filme, aumentando a compactação da prata e diminuindo os poros e defeitos do filme. O filme depositado com o auxílio da descarga secundária e polarização do substrato apresentou a menor quantidade de poros, entretanto, o caráter não condutor do substrato estimulou o rompimento de arcos elétricos na superfície do filme quando submetido a pulsos de alta tensão negativa, danificando a prata depositada. A partir dessa constatação, visando obter filmes finos de prata com valores de absorvidade do espectro solar próximos da prata sólida polida (0,04), a melhor configuração de deposição dentre as experimentadas foi a deposição B (0,056), que associou DC-MS e descarga secundária de cátodo oco com o porta-amostras aterrado.

*Agradecimentos: Este projeto é financiado pela CAPES e MCTI.*

#### Referências

- Asainov, O.Kh.; Bainov, D.D.; Krivobokov, V.P.; Sidelev, D.V. (2016) “Magnetron Sputtering in rigid optical solar reflectors production”, *Journal of Physics: Conference Series* 729. 012012.
- Boato, D.G.; Garcia, E. C.; Santos, M. B.; Beloto, A. F. (2017) “Assembly and Testing of a Thermal Control Component Developed in Brazil”, *J. Aerosp. Technol. Manag.*, volume 9, pages. 249-256.
- Carton, O.; Ghaymouni, J.; Lejeune, M.; Zeinert, A. (2013) “Optical Characterization of Porous Sputtered Silver Thin Films”, *Hindawi Journal of Spectroscopy*, ID 307824.
- Ferreira, F.; Oliveira J.C.; Cavaleiro, A. (2016) “CrN thin films deposited by HiPIMS in DOMS mode”, *Surf. Coatings Technol.*, volume 291, pages 365-375.
- Gilmore, D.G., “Satellite Thermal Control Handbook: Fundamental Technologies”, (1994) The Aerospace Corporation Press, volume 1, edição 2.
- Helmersson, U.; Lattemann, M.; Bohlmark, J.; Ehasarian, A. P.; Gudmundsson, J. T., (2006) “Review Ionized physical vapor deposition (IPVD): a review of technology and applications”, *Thin Solid Films*, volume 513, pages 1 -24.
- Shuyong, T.; Xuhai, Z.; Xiangjun, W.; Feng, F.; Jianguing, J. (2011) “Comparison of chromium nitride coating deposited by DC and RF magnetron sputtering”, *Thin Solid Films*, volume 519, pages 2116-2120.



11º Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais  
18, 19 e 20 de agosto de 2020

Zou, C.W.; Wang, H.J.; Li, M.; Liu, C.S.; Guo, L.P.; Fu, D.J. (2009) “Characterization and properties of CrN films deposited by ion-source-enhanced middle frequency magnetron sputtering”, Vacuum, volume 83, pages 1086-1090.