

SUBMETIDO 24/03/2023

APROVADO 02/06/2023

PUBLICADO ON-LINE 15/06/2023

VERSÃO FINAL DIAGRAMADA 01/11/2024

EDITORA ASSOCIADA
Mariana Amorim Fraga

 Nívia Luciana Costa
de Siqueira ^[1] *

 Paulo Henrique Chibério ^[2]

 João de Medeiros
Dantas Neto ^[3]

 Vamberto Monteiro
da Silva ^[4]

 Wilson Acchar ^[5]

[1] nivialcsiqueira@gmail.com

[2] phchiberio@gmail.com

[3] joaochiberio@gmail.com

Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais,
Universidade Federal do Rio Grande
do Norte (UFRN), Natal, Rio Grande
do Norte, Brasil

[4] vambertomonteirodasilva@yahoo.com.br
Instituto Federal da Paraíba (IFPB),
João Pessoa, Paraíba, Brasil

[5] wacchar@gmail.com
Universidade Federal do Rio Grande
do Norte (UFRN), Natal, Rio Grande
do Norte, Brasil

* Autor para correspondência.

Filmes produzidos com compostos de tungstênio para aplicações elétricas e optoeletrônicas: uma revisão

RESUMO: Os materiais à base de tungstênio têm despertado interesse nos últimos anos devido às suas propriedades únicas e à possibilidade de utilização em uma ampla gama de aplicações. Em vista disso, neste trabalho, foi realizada uma revisão sistemática da literatura (RSL) acerca de filmes produzidos com compostos de tungstênio como material base. Foram analisados os métodos de deposição empregados na confecção dos filmes bem como as propriedades elétricas, dielétricas e optoeletrônicas estudadas nos trabalhos analisados, as principais aplicações estudadas e/ou sugeridas, composição do filme, entre outros aspectos. As buscas foram realizadas nas plataformas: Periódicos CAPES, Science Direct, Scopus e Google Acadêmico. Os critérios de análise, seleção e exclusão de trabalhos foram definidos de acordo com a estratégia PICO – População, Intervenção, Comparação e Resultados (*outcomes*). Na primeira etapa da busca, foram encontrados 187 artigos, dos quais 36 foram selecionados para leitura integral após a aplicação dos referidos critérios. O método de produção mais utilizado foi o *Sputtering*, seguido dos de Deposição de Vapor Químico (DVQ), Sol-gel e *Tape Casting*. As principais propriedades estudadas nos trabalhos foram a resistividade elétrica e a curva IV. Quanto à composição, o trióxido de tungstênio foi o composto mais investigado nos trabalhos sobre confecção dos filmes. A aplicação mais indicada foi em dispositivos eletrocromáticos, como películas para janelas inteligentes, displays e outras aplicações optoeletrônicas. Também foram indicadas aplicações como supercapacitores, células solares, sensores, armazenamento de energia e fotodetectores. Com base nos artigos analisados, é possível afirmar que filmes de tungstênio possuem propriedades interessantes para diferentes aplicações, sendo um material versátil e com potencial para mais investigações.

Palavras-chave: filmes de tungstênio; filmes finos; métodos de deposição; óxido de tungstênio; *sputtering*.

Films produced with tungsten compounds for electrical and optoelectronic applications: a review

ABSTRACT: Tungsten-based materials have garnered increasing interest in recent years due to their unique properties and potential for various applications. This

work conducted a Systematic Literature Review (SLR) on films produced with tungsten compounds as the base material. The deposition methods used in the film fabrication, the electrical, dielectric, and optoelectronic properties studied in the reviewed works, the main investigated and/or suggested applications, and the film composition, among other aspects, were analyzed. Searches were performed on research platforms: Periódicos CAPES, Science Direct, Scopus, and Google Scholar. The criteria for analysis, selection, and exclusion of papers were defined according to the PICO strategy – Population, Intervention, Comparison, and Outcomes. In the first search stage, 187 articles were found, of which 36 were selected for full reading after applying the criteria. Sputtering was the most used production method, followed by Chemical Vapor Deposition (CVD), Sol-gel and Tape Casting. The main properties studied in the works were electrical resistivity and the IV curve. Regarding composition, tungsten trioxide was the compound most used in film fabrication. The most indicated application was in electrochromic devices, such as films for smart windows, displays and other optoelectronic applications. Other suggested applications included supercapacitors, solar cells, sensors, energy storage, and photodetectors were also reported. Based on the analyzed articles, it is possible to assert that tungsten films possess interesting properties for different applications, making them versatile materials with potential for further investigations.

Keywords: deposition methods; sputtering; thin films; tungsten films; tungsten oxide.

1 Introdução

Nos últimos anos, a crescente preocupação com o esgotamento dos combustíveis fósseis tem impulsionado pesquisas focadas no desenvolvimento de tecnologias de geração de energia limpa e renovável. Nesse contexto, os materiais à base de tungstênio têm despertado grande interesse na indústria, em virtude de suas propriedades físico-químicas únicas e do excelente desempenho eletroquímico. Esses materiais são amplamente utilizados em células solares, janelas inteligentes, sensores e dispositivos de armazenamento de energia, como supercapacitores e baterias, destacando-se também pela sua produção relativamente simples, o que melhora a relação custo-benefício (Shinde; Jun, 2020).

O tungstênio (W) é um metal de transição que se destaca por suas características excepcionais entre os metais puros, como seu alto ponto de fusão, baixa expansão térmica e elevada resistência à tração em temperaturas superiores a 1650 °C. Essas propriedades o tornam ideal para aplicações em altas temperaturas, como em filamentos de lâmpadas e componentes bélicos e militares. Além disso, o tungstênio possui ótima resistência à corrosão e boa condutividade térmica e elétrica, o que o torna um elemento versátil para diversas aplicações (Brown; Pitfield, 2014).

Na natureza, o tungstênio não é encontrado em sua forma metálica livre, mas sim em minérios como a scheelita (CaWO_4) e a wolframita ($\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{WO}_4$). Para a obtenção do tungstênio, os minérios são dissolvidos sob alta temperatura e pressão, seguidos por processos de filtração, purificação e cristalização para produzir o paratungstato de amônio (APT), que serve como matéria-prima para diversos compostos de tungstênio, como WO_3 , $\text{W}_{18}\text{O}_{49}$ e carbetos de tungstênio, obtidos por técnicas como calcinação, decomposição por micro-ondas e síntese de plasma (Pfeifer *et al.*, 1996; Ryu *et al.*, 2009; Sadeghi *et al.*, 2019).

Os métodos de fabricação de filmes e fitas apresentam-se como uma alternativa viável para a produção de materiais à base de tungstênio. Esses métodos oferecem vantagens como facilidade no controle de porosidade e espessura e possibilidade de produzir materiais com geometrias mais complexas. Além destas, alguns entre esses métodos ainda têm um baixo custo de operação (Nishihora *et al.*, 2018). Algumas das principais técnicas para fabricar filmes são as Deposições de Vapor Físico (DVF), *Magnetron Sputtering*, *Tape Casting* e Sol-Gel. Filmes e sólidos apresentam uma infinidade de aplicações tecnológicas, entre elas o uso em componentes eletrônicos, fotovoltaicos e fotoluminescentes, sensores, células solares e outros (Alves; Ronconi; Galembeck, 2002; Brinker *et al.*, 1992).

Ainda que apresente produtos finais muito semelhantes, cada técnica tem suas particularidades. A DVF é um método de revestimento por meio do qual filmes finos são depositados pela condensação de uma forma vaporizada do material do filme desejado sobre o substrato. Os processos de DVF se apresentam em diversos tipos – deposição de arco catódico, deposição física de vapor por feixe de elétrons, deposição evaporativa, pulverização catódica, galvanoplastia e pulverização avançada –, porém todos são realizados a vácuo. No DVF, o material de revestimento sólido é evaporado por calor ou por bombardeamento com íons (*sputtering*). Ao mesmo tempo, também é introduzido um gás reativo que forma um composto com o vapor metálico e se deposita sobre o substrato como um filme com revestimento altamente aderente. Tais revestimentos são usados em uma ampla gama de áreas, como aeroespacial, automotiva, cirúrgica, médica, além de serem úteis na produção de corantes e de moldes para todos os tipos de processamento de materiais – ferramentas de corte, armas de fogo, óptica, filmes finos e têxteis (Shahidi; Moazzenchi; Ghoranneviss, 2015; Silva *et al.*, 2007).

Na técnica de *Magnetron Sputtering* (MS), por exemplo, um fluxo de átomos ou moléculas é produzido por meio do bombardeamento de íons de plasma em um alvo eletricamente polarizado. Os átomos pulverizados são então depositados em um substrato disposto estrategicamente próximo ao alvo (Barranco *et al.*, 2016).

A técnica de *Tape Casting* é uma das mais bem estabelecidas. O processo consiste, basicamente, em produzir filmes a partir de uma suspensão de natureza pseudoplástica, composta por um solvente – orgânico ou inorgânico –, aditivos – como dispersantes, plastificantes e surfactantes, que cumprem funções particulares nas propriedades da suspensão e, conseqüentemente, do filme – e por um pó precursor. A suspensão é, então, depositada em um substrato carreador e, através da lâmina niveladora (*doctor blade*), a espessura da fita é controlada. O produto desse processo é um filme com espessura que pode variar entre 50 μm e 1000 μm , que pode ser submetido a processos subsequentes como corte, sinterização e prensagem (Carter; Norton, 2013; Hotza *et al.*, 2019; Shen *et al.*, 2017).

Similarmente, o método de Sol-Gel produz filmes a partir de uma solução. Nessa técnica, o precursor é dissolvido em solvente adequado e a solução é convertida em gel por aquecimento e agitação por hidrólise/alcoólise. Esse método também apresenta benefícios como simplicidade e baixo custo, a possibilidade de produção de materiais com propriedades físicas modificadas, como baixo coeficiente de expansão térmica, alta transparência óptica, produzindo filmes com espessura na faixa de 50 nm a 500 nm, por diferentes métodos de revestimento como *spin* e *dip coating*, que podem ser aplicados em indústrias químicas e eletrônicas, por exemplo (Bokov *et al.*, 2021).

O objetivo do presente estudo é apresentar uma revisão sistemática acerca da produção de filmes produzidos com compostos de tungstênio, buscando apontar as aplicações estudadas, os métodos de produção empregados e a forma de tungstênio utilizada, a fim de servir como base para estudos com temática semelhante.

2 Metodologia

A Revisão Sistemática da Literatura (RSL), método utilizado no presente estudo, é uma modalidade de pesquisa que segue protocolos específicos e parâmetros delimitados, focada na reprodutibilidade, e que apresenta os resultados de forma explícita, além das plataformas de pesquisa consultadas e dos processos de seleção, análise, inclusão e exclusão de artigos. Assim como outros métodos de revisão de literatura, a RSL tem como objetivo expor os conhecimentos já obtidos sobre determinado tema, de forma a evitar a ocorrência de pesquisas duplicadas, ou a replicação da pesquisa em diferentes escalas, observando as falhas, recursos necessários e buscando propor temas que acrescentem informações e respondam a questões ainda não resolvidas em estudos prévios (Galvão; Ricarte, 2019).

A pesquisa analisou artigos científicos publicados em inglês ou português, na última década, que tratam da confecção de filmes por diferentes técnicas de fabricação, contendo compostos de tungstênio em sua composição e que tenham avaliado algum tipo de propriedade elétrica ou optoeletrônica. As bases de dados utilizadas foram: Periódicos CAPES, Science Direct, Scopus e Google Acadêmico, selecionadas por sua relevância e quantidade considerável de publicações que atendem à temática proposta.

Os critérios de análise, seleção e exclusão de trabalhos foram definidos de acordo com a estratégia PICO, sigla de População, Intervenção, Comparação e *Outcomes* (resultados). Esse método é utilizado na construção de pesquisas de naturezas diversas, buscando estabelecer elementos fundamentais da questão da pesquisa e construção de perguntas para a busca bibliográfica (Santos; Pimenta; Nobre, 2007), de forma delimitada e direcionada. As descrições dos componentes PICO do presente estudo estão dispostas no Quadro 1.

Quadro 1 ►

Determinação dos critérios PICO utilizados na pesquisa.

Fonte: dados da pesquisa

Abreviação	Definição	Descrição
P	População	Filmes que contenham compostos de tungstênio em sua composição
I	Intervenção	Análise dos materiais, métodos de produção e ensaios empregados
C	Comparação	Apresentação das principais características e aplicações sugeridas/estudadas
O	Resultados (<i>outcomes</i>)	Avaliação dos resultados

Outra estratégia de busca para a seleção de artigos nas plataformas de pesquisa foi o uso de *strings*, inserindo-se palavras específicas, a partir de títulos, palavras-chave e resumos, exclusivamente em português e em inglês, excluindo-se, portanto, artigos em idiomas diferentes destes mencionados. Posteriormente, foi realizada a triagem dos artigos selecionados, analisando-se seus títulos e resumos. Não foram considerados artigos anteriores a 2012, artigos de revisão, artigos duplicados e aqueles que não estavam relacionados ao tema da pesquisa. No Quadro 2, é apresentada a forma como as pesquisas foram realizadas com utilização desse método.

Quadro 2 ►

Strings de buscas de acordo com as plataformas de pesquisa consultadas e critérios de exclusão.

Fonte: dados da pesquisa

Strings de buscas
Scopus, Science Direct, Periódicos CAPES, Google Acadêmico
“Tungsten thin films”; “Tungstênio filmes”; “Métodos de deposição tungstênio”; “tungsten tapes”; “Tape casting tungstênio”; “Thin film tungsten deposition”
Crítérios de exclusão
Ano de publicação anterior a 2012 Fuga do tema de pesquisa (exemplo: aplicações mecânicas) Idiomas diferentes de Português e Inglês Artigos de revisão

Para as pesquisas no Scopus e Science Direct, foram utilizadas somente palavras em inglês, uma vez que a grande maioria dos artigos foi publicada nesse idioma. Nas demais plataformas, foram usadas palavras tanto em português quanto em inglês. Os resultados primários obtidos a partir das pesquisas foram organizados em planilha do Excel para posterior análise e seleção.

3 Resultados e discussão

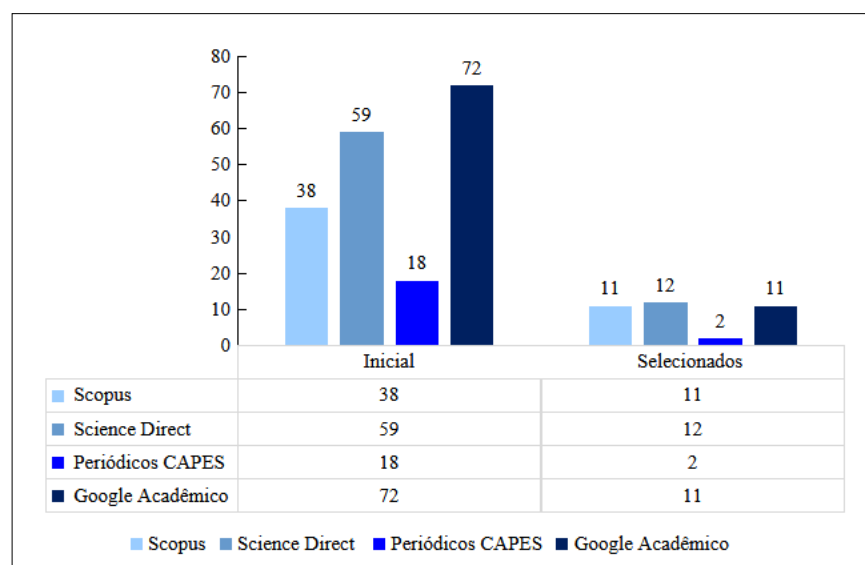
Foram encontrados 187 artigos nas plataformas e *strings* aplicadas, sobre os quais foram aplicados os critérios de exclusão para nova seleção e posterior leitura integral. Os artigos foram classificados em três categorias: duplicados, rejeitados (por aplicabilidade ou tipo de artigo) e aceitos para leitura integral. Na etapa seguinte, verificou-se que 59 foram rejeitados por não atenderem ao critério do ano ou tema; 5 artigos foram rejeitados por serem artigos de revisão; 78 artigos foram rejeitados por aplicabilidade diferente da avaliada; e 9 artigos foram identificados como duplicados. Ao final, foram excluídos 151 artigos, restando 36 artigos destinados à leitura integral.

A Figura 1 apresenta os artigos da pesquisa inicial classificados pela quantidade encontrada em cada plataforma de busca e os artigos selecionados para leitura integral. Como exposto, grande parte das publicações selecionadas após a aplicação dos critérios de exclusão é originária das plataformas Science Direct (12), Scopus (11) e Google Acadêmico (11), e apenas dois artigos foram encontrados na plataforma Periódicos CAPES.

Figura 1 ►

Amostragem total dos artigos encontrados nas plataformas de pesquisa.

Fonte: dados da pesquisa

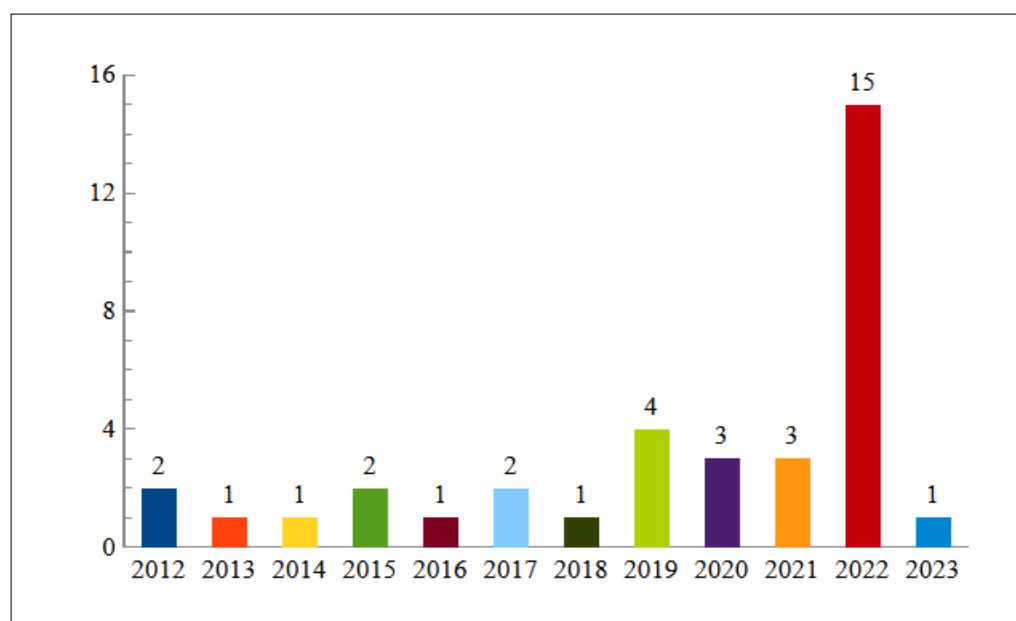


É possível observar que a ocorrência de trabalhos com a temática desta escrita teve um aumento significativo a partir de 2019. Isso pode estar associado ao fato de que, de acordo com Velmurugan *et al.* (2022), pesquisas sobre dispositivos de armazenamento de energia, especificamente por meio de filmes finos, têm despertado interesse nos últimos anos. Karuppaiah *et al.* (2022) destacam ainda que a crescente escassez de recursos energéticos convencionais e o aquecimento global têm recebido maior atenção na sociedade moderna. A distribuição da quantidade de pesquisas ao longo dos anos está ilustrada na Figura 2. Assim, Karuppaiah *et al.* (2022) apontam que, a fim de solucionar e/ou mitigar questões inerentes a esse tipo de escassez – ou fenômenos dessa ordem –, pesquisadores e engenheiros estão se dedicando à busca de recursos energéticos alternativos, mais eficientes e ecologicamente corretos para dispositivos de armazenamento de energia.

Figura 2 ►

Distribuição de periódicos por ano de publicação.

Fonte: dados da pesquisa



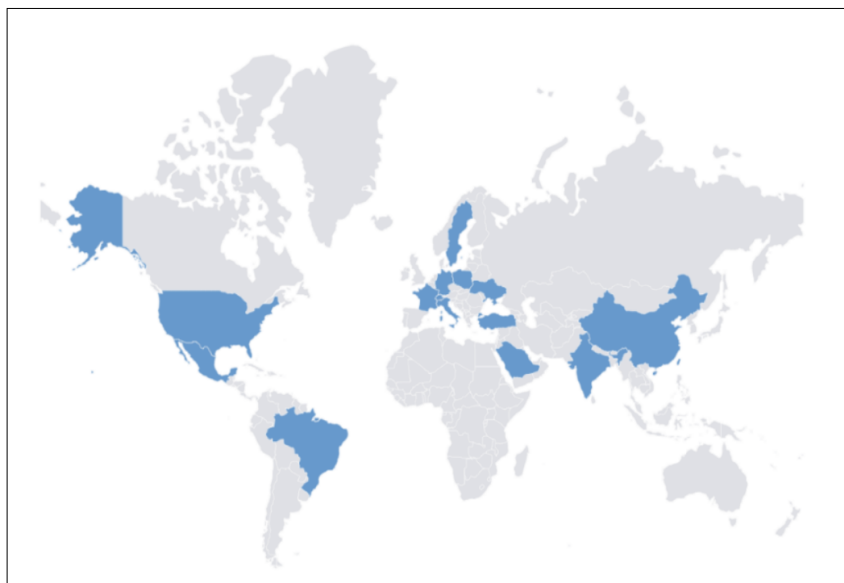
O Fator de Impacto (FI) é um dos principais métodos utilizados para qualificar as revistas científicas com base nas citações que recebe. Uma das formas de calcular o FI é somando as citações recebidas no ano do cálculo do fator de impacto e dividindo esse número de recepções pela quantidade de artigos publicados nos dois anos anteriores a esse cálculo. Assim, através das buscas nas plataformas de pesquisa, foi possível observar que as revistas com maior fator de impacto foram o *Journal of Energy Chemistry*, *ACS Applied Materials & Interfaces*, *Applied Surface Science*, *Electrochimica Acta*, *Solar Energy Materials & Solar Cells* e *International Journal of Hydrogen Energy*, respectivamente.

Quanto à localização geográfica das publicações, foram encontrados trabalhos de 17 países, em sua maioria europeus. O maior número de publicações, entretanto, veio da Ásia, somando 23 publicações. A Figura 3 (próxima página) apresenta o mapa de distribuição dos países. Apenas a África e a Oceania não mostraram participação entre as publicações.

Figura 3 ►

Ocorrência de publicações
nos países.

Fonte: dados da pesquisa



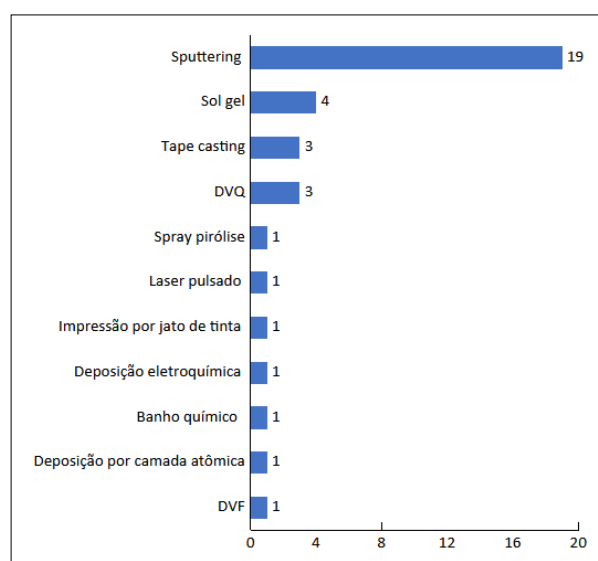
Os países de maior destaque em número de publicações foram a China e a Índia, com nove publicações cada um, seguidos de Suíça, Itália, Turquia e Suécia, com duas cada um deles. A expressividade da China pode ser atribuída ao fato de que o país concentra os maiores depósitos e reservas de tungstênio mundiais, além de ser o maior consumidor e exportador entre os países (USGS, 2022).

Em relação ao método de deposição do filme, foram encontrados onze métodos diferentes. O mais utilizado foi o *sputtering*, com 19 trabalhos que utilizaram esse método, seguido por sol-gel, com quatro; *tape casting* e DVQ, com três trabalhos cada. Quanto aos outros métodos, houve um trabalho com utilização de cada um deles, quais sejam: DVF; laser pulsado; *spray* pirólise; deposição em banho químico (DBQ); deposição de laser atômico; por jato de tinta; deposição eletroquímica. Esses dados estão registrados na Figura 4 a seguir.

O método de *sputtering* é apontado como vantajoso por ser um processo simples e porque utiliza apenas gases não perigosos como argônio e nitrogênio (Addonizio *et al.*, 2012). Além disso, o método é usado para fabricar revestimentos de filmes finos compostos em uma ampla variedade de substratos diferentes (Berg; Nyberg, 2005).

Figura 4 ►

Métodos de
deposição utilizados.
Fonte: dados da pesquisa



As propriedades investigadas estão diretamente relacionadas com a aplicação desejada. Foram estudadas diversas propriedades, como: resistividade elétrica (6), condutividade elétrica (4), curva IV (6), constante dielétrica (2), voltametria cíclica (3), espectroscopia de impedância (1), espectroscopia de carga (1), impedância eletroquímica (1), capacitância (4), comportamento eletrocromico (3), resistência elétrica (1), potência (1), potencial elétrica (4), densidade de corrente (2), propriedade magnética (1), indutância (1), densidade eletrônica (1), potencial termoelétrica (1) e tensão térmica (1). Destacam-se a resistividade elétrica e curva IV, que foram as propriedades mais analisadas nos artigos selecionados. A Tabela 1 apresenta um resumo dessas publicações, relacionando aplicação, forma de tungstênio utilizado e sua quantidade na composição, método de deposição e espessura.

Tabela 1 ▼

Resumo das publicações selecionadas.

Fonte: dados da pesquisa

Autor e ano	Aplicação	Forma de W utilizada	Quantidade de W	Método de fabricação	Espessura
Addonizio <i>et al.</i> (2012)	Não especificado	W ₂ N	100	<i>Sputtering</i>	100 nm
Green <i>et al.</i> (2012)	Dispositivos eletrocromicos	Ni _x W _{1-x} oxide	100	<i>Sputtering</i>	150 - 250 nm
Huang <i>et al.</i> (2014)	Fotodetector	W ₁₈ O ₄₉	100	Sol-gel	1.43 - 1.11 μm
Luo <i>et al.</i> (2014)	Functionally Graded Material (FGM)	W-Cu	10-20-30-40-50-60 %w	Tape casting	214 μm**
Hao, Chen, Xiao (2015)	Spintrônica	β-W	100	<i>Sputtering</i>	3 - 26,7 nm
Wang <i>et al.</i> (2015)	Dispositivos optoeletrônicos	WO ₃	100	<i>Sputtering</i>	-
Pawbake <i>et al.</i> (2016)	Células solares e cocatalise	WC	100	DVQ	-
Wang <i>et al.</i> (2017)	FGM	WCu	60	<i>Tape casting</i>	-
Gabhale <i>et al.</i> (2018)	Células solares e cocatalise	WC	100	DVQ	-
Zhang <i>et al.</i> (2018)	Par termoelétrico	WRe	95 e 74 %w	<i>Sputtering</i>	-
Kumar e Subrahmanyam (2019)	Dispositivos eletrocromicos	WO ₃	100	<i>Sputtering</i>	190 - 712 nm
Prakash <i>et al.</i> (2019)	Supercapacitor	W ₂ N	100%	<i>Sputtering</i>	-
Zhang <i>et al.</i> (2019)	Par termoelétrico	WRe	95 e 74 %w	<i>Sputtering</i>	-
Atak <i>et al.</i> (2020)	Dispositivos eletrocromicos	WO ₃	17,5 e 22,2 at%	<i>Sputtering</i>	300 ± 15 nm
Abdelhameed <i>et al.</i> (2020)	Sensores	W	100	<i>Sputtering</i>	-
Korkmaz, Tezel e Kariper (2020)	Supercapacitor	WO ₃	49.65, 6.37 e 58.8 %w	<i>Chemical bath</i>	867, 1167, 2100 e 440 nm
Rozman <i>et al.</i> (2020)	Dispositivos eletrocromicos	WO ₃	-	Impressão por jato de tinta	-
Mazur <i>et al.</i> (2021)	Dispositivos optoeletrônicos	WO _x	-	<i>Sputtering</i>	410 e 1000 nm

continua

continuação

Tan <i>et al.</i> (2021)	Dispositivos optoeletrônicos, fotovoltaicos e armazenamento de energia	WO ₃	100	DVQ	-
Yang <i>et al.</i> (2021)	Dispositivos optoeletrônicos	WS ₂	-	DVF	-
Su <i>et al.</i> (2022)	Transistores	In ₂ O ₃ , ZnO, SnO ₂ e WO ₃	In:Zn:Sn:W = 1,1:1:0,1:0,01*	<i>Sputtering</i>	100 nm
Velmurugan <i>et al.</i> (2022)	Microeletrônica e biomédica	WO ₃	100	Laser pulsado	-
Yang <i>et al.</i> (2022)	Telas planas, células solares e diodos de emissão de luz	WN	-	<i>Sputtering</i>	-
Khan <i>et al.</i> (2022)	Dispositivos eletrocrômicos	WO ₃	-	<i>Sputtering</i>	-
Chithambararaj <i>et al.</i> (2022)	Dispositivos eletrocrômicos	WO ₃	-	Deposição eletroquímica	-
Gv <i>et al.</i> (2022)	Dispositivos eletrocrômicos	CeO ₂ /WO ₃	100	<i>Sputtering</i>	-
Karuppaiah <i>et al.</i> (2022)	Supercapacitor	WO ₃	100	<i>Sputtering</i>	-
Krüger <i>et al.</i> (2022)	Vidros fotocrômicos	WO ₃ dopado com Zr, Nb, Ta e Ti	-	Sol-gel e <i>Dip coating</i>	-
Kumar <i>et al.</i> (2022a)	Dispositivos eletrocrômico	WO ₃	100	<i>Sputtering</i>	-
Kumar <i>et al.</i> (2022b)	Dispositivos eletrocrômicos	WO ₃	100	<i>Sputtering</i>	500 nm
Lee <i>et al.</i> (2022)	Não especificado	W (EtC≡CEt)3(CO) (Et = C ₂ H ₅)	100	Deposição de camada atômica	8-9 nm
Luo <i>et al.</i> (2022)	Dispositivos microeletrônicos	WO ₃	0,7 %w	<i>Tape casting</i>	-
Ortiz, Acosta e Magaña (2022)	Dispositivos eletrocrômicos	WO ₃	100	<i>Spray</i> pirólise	200 nm
Potin, Boukhalfa e Martin (2022)	Sensores, eletroquímica e catálise	W	100	<i>Sputtering</i>	270 e 460 nm
Rizzuto, Barberi e Castriota (2022)	Dispositivos eletrocrômicos	WO ₃	100	Sol-gel	-
Meng <i>et al.</i> (2023)	Dispositivos eletrocrômicos	WO _x dopado de Ti	-	Sol-gel	283 nm**

* razão atômica

** média

Quanto à aplicação, destaca-se o emprego de filmes de compostos de tungstênio em aparelhos que requerem, como películas para janelas inteligentes e dispositivos optoeletrônicos. O eletrocromismo é um fenômeno a partir do qual ocorre uma mudança reversível nas propriedades ópticas de um material quando uma voltagem é

aplicada (Habib, 1992; Svensson; Granqvist, 1985). O óxido de tungstênio é apontado como um dos melhores materiais eletrocromicos, devido à sua alta eficiência de coloração, estabilidade química e boa atividade eletroquímica. Entre os artigos encontrados, oito estudaram as propriedades dos filmes para essa aplicação, avaliando a influência dos métodos e parâmetros, como poder e meio de deposição, dos substratos utilizados e da composição dos filmes no desempenho do material final e a viabilidade para tal aplicação (Green *et al.*, 2012; Gv *et al.*, 2022; Kumar *et al.*, 2022b). Além disso, comprovou-se não apenas a aplicabilidade desses materiais, mas também a estabilidade e durabilidade dos filmes, suas excelentes propriedades eletrocromicas, incluindo alta modulação ótica, eficiência de coloração e rápido tempo de mudança (Kumar; Subrahmaynam, 2019; Ortiz; Acosta; Magaña, 2022; Meng *et al.*, 2023).

Também merecem destaque as aplicações em células solares, dispositivos de geração e armazenamento de energia. A necessidade de se desenvolverem tecnologias para geração de energia renovável já é conhecida, não só para se alcançarem os objetivos de um desenvolvimento sustentável, mas também para suprir as demandas energéticas da sociedade atual. Nesse aspecto, a energia solar apresenta-se como uma das formas mais promissoras, por estar disponível para grande parte do globo e ser uma das mais adequadas fontes para substituição dos combustíveis fósseis (Qazi *et al.*, 2019). Diante desse panorama e das propriedades semicondutoras dos filmes de tungstênio, quatro autores apontaram a viabilidade de uso desse material em células solares, dispositivos de armazenamento de energia e cocatalisadores para a produção sustentável de hidrogênio (Pawbake *et al.*, 2016; Gabhale *et al.*, 2018; Tan *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2022).

O potencial para uso dos filmes de tungstênio como supercapacitores também deve ser mencionado. Karuppaiah *et al.* (2022) e Korkmaz, Tezel e Karipel (2020) produziram filmes de WO_3 por *sputtering* e deposição por banho químico, respectivamente, e aplicaram ensaios de voltametria cíclica, espectroscopia de impedância eletroquímica, constante dielétrica e capacitância, observando que o material apresentava características promissoras para tal aplicação. Prakash *et al.* (2019) também avaliaram essa aplicação, utilizando o W_2N como matéria prima e o *sputtering* como método de deposição, obtendo resultados satisfatórios.

Outras aplicações apontadas incluem sensores ultrasensíveis e fotodetectores (Potin; Boukhalfa; Martin, 2022; Abdelhameed *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2014), dispositivos optoeletrônicos (Wang *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2021; Mazur *et al.*, 2021), *Functionally Graded Materials* (FGMs), materiais cuja composição varia ao longo do volume (Luo *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2017), além de aplicações biomédicas e microeletrônicas (Velmurugan *et al.*, 2022) e transistores (Su *et al.*, 2022).

O óxido de tungstênio (WO_3) foi o material utilizado em 15 dos 30 trabalhos encontrados, mas outras formas, como carbetos e nitretos de tungstênio, também foram pesquisadas (Prakash *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2022; Gabhale *et al.*, 2018), além de formas dopadas com zircônio, nióbio, titânio e tântalo (Korkmaz; Tezel; Kariper, 2020) e combinadas com outros elementos como cobre, rênio e óxido de grafeno (Luo *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2019; Krüger *et al.*, 2022).

Como o óxido de tungstênio foi o material mais utilizado, as análises de difração de raios X confirmaram a presença da fase WO_3 na maioria dos trabalhos. As propriedades e aplicações dos filmes de óxido de tungstênio são regidas principalmente pela estrutura cristalina, composição química, morfologia da superfície, estabilidade química e térmica, estabilidade de fase, entre outras. Um profundo conhecimento da estrutura e estabilidade desse material é, portanto, importante para seu uso efetivo em aplicações práticas de dispositivos (Wang *et al.*, 2015).

Outras fases também foram observadas, como WC, W, W₂N, WO₂, WN e W₃Re. Wang *et al.* (2017) destacam que existe mudança de fase quando a temperatura é alterada – observou-se a presença da fase W; porém, com aumento da temperatura a 800 °C, surge a fase W₂C e, a 900 °C, a fase WC.

Rizzuto, Barberi e Castriota realizaram ensaio Ramam e identificaram duas bandas em 715 cm⁻¹ e 806 cm⁻¹ referentes à fase monoclinica γ -WO₃. Dos trabalhos selecionados e analisados, sete não realizaram ensaio de difração de raios X e, destes, dois realizaram Ramam.

Apenas 15 trabalhos informaram a espessura do filme. As espessuras medidas variaram desde tamanhos nanométricos até valores na ordem do micron. Os menores valores foram reportados por Hao, Chen e Xiao (2015), de 3 e 26 nanômetros – os autores avaliaram um filme feito de tungstênio por *sputtering*. Os dois trabalhos que apresentaram espessuras na ordem de microns foram os de Huang *et al.* (2014) e Luo *et al.* (2014). Esses autores produziram laminados a partir dos filmes, utilizando técnicas para unir mais de um deles, formando um gradiente de composição, criando um sistema metal-semicondutor-metal e FGM. É importante ressaltar que a espessura do filme pode ser ajustada de acordo com o método de deposição e da aplicação desejada, pois, em alguns casos, essa espessura pode influenciar nas propriedades do produto final.

Kumar and Subrahmanyam (2019) produziram filmes pelo método de *sputtering* e variaram o tempo de deposição, a fim de obterem diferentes espessuras. Outros autores usaram o mesmo método de deposição, porém utilizando outros parâmetros, como meio de deposição e composição, para a mesma finalidade (Korkmaz; Tezel; Karipel, 2020; Mazur *et al.*, 2021). Em técnicas como *tape casting*, a espessura do filme pode ser ajustada antes da deposição, por exemplo, o que oferece um maior controle sobre esse parâmetro.

4 Conclusões

Foi realizada uma revisão sistemática da literatura, buscando-se artigos sobre filmes feitos com compostos de tungstênio. Diante dos resultados encontrados por meio dessa revisão, foi possível concluir que:

- O método de deposição mais utilizado para produção de filmes de tungstênio foi o *sputtering*, representando mais da metade dos artigos selecionados para leitura integral. Essa expressividade é atribuída ao fato de que o método é apontado como simples, seguro e possibilita a utilização de diferentes substratos;
- A aplicação mais indicada foi para dispositivos eletrocromicos, como janelas inteligentes e outros dispositivos optoeletrônicos. O tungstênio é um elemento com ótimas propriedades eletrocromicas, e os filmes feitos com compostos de tungstênio mostraram-se promissores para tal aplicação. Células solares, sensores, supercapacitores e transistores também foram aplicações indicadas;
- As propriedades elétricas mais avaliadas nos artigos estudados foram: resistividade, curva IV, condutividade e capacitância;
- O composto mais utilizado para a produção de filmes foi o trióxido de tungstênio (WO₃). Também foram utilizados carbetos e nitretos de tungstênio e formas dopadas com outros elementos químicos.

Os filmes produzidos com compostos de tungstênio são promissores não só por apresentarem métodos alternativos para o processamento do elemento, mas também por serem bastante versáteis e, na maioria dos casos, apresentarem as características finais desejadas pelos autores para as diversas aplicações indicadas.

Financiamento

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 – e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil (CNPq).

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Contribuições ao artigo

SIQUEIRA, N. L. C.; CHIBÉRIO, P. H.; DANTAS NETO, J. M.; SILVA, V. M.; ACCHAR, W.: concepção ou desenho do estudo/pesquisa; análise e/ou interpretação dos dados; revisão final com participação crítica e intelectual no manuscrito. Todos os autores participaram da escrita, discussão, leitura e aprovação da versão final do artigo.

Referências

ABDELHAMEED, A. H.; ANGLOHER, G.; BAUER, P.; BENTO, A.; BERTOLDO, E.; CANONICA, L.; FUCHS, D.; HAUFF, D.; IACHELLINI, N. F.; MANCUSO, M.; PETRICCA, F.; PRÖBST, F.; RIESCH, J.; ROTHE, J. Deposition of tungsten thin films by magnetron sputtering for large-scale production of tungsten-based transition-edge sensors. **Journal of Low Temperature Physics**, v. 199, n. 1-2, p. 401-407, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10909-020-02357-x>.

ADDONIZIO, M. L.; CASTALDO, A.; ANTONAIA, A.; GAMBALE, E.; IEMMO, L. Influence of process parameters on properties of reactively sputtered tungsten nitride thin films. **Journal of Vacuum Science & Technology A**, v. 30, n. 3, 031506, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1116/1.3698399>.

ALVES, O. L.; RONCONI, C. M.; GALEMBECK, A. Decomposição de precursores metalorgânicos: uma técnica química de obtenção de filmes finos. **Química Nova**, v. 25, n. 1, p. 69-77, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000100013>.

ATAK, G.; PEHLIVAN, İ. B.; MONTERO, J.; PRIMETZHOFFER, D.; GRANQVIST, C. G.; NIKLASSON, G. A. Electrochromism of nitrogen-doped tungsten oxide thin films. **Materials Today: Proceedings**, v. 33, n. 6, p. 2434-2439, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.332>.

BARRANCO, A.; BORRAS, A.; GONZALEZ-ELIPE, A. R.; PALMERO, A. Perspectives on oblique angle deposition of thin films: from fundamentals to devices. **Progress In Materials Science**, v. 76, p. 59-153, Mar. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.06.003>.

BERG, S.; NYBERG, T. Fundamental understanding and modeling of reactive sputtering processes. **Thin Solid Films**, v. 476, n. 2, p. 215-230, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2004.10.051>.

BOKOV, D.; JALIL, A. T.; CHUPRADIT, S.; SUKSATAN, W.; ANSARI, M. J.; SHEWAEL, I. H.; VALIEV, G. H.; KIANFAR, E. Nanomaterial by sol-gel method: synthesis and application. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2021, 5102014, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2021/5102014>.

BRINKER, C. J.; HURD, A. J.; SCHUNK, P. R.; FRYE, G. C.; ASHLEY, C. S. Review of sol-gel thin film formation. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 147-148, p. 424-436, 1992. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0022-3093\(05\)80653-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0022-3093(05)80653-2).

BROWN, T.; PITFIELD, P. Tungsten. In: GUNN, G. (ed.). **Critical Metals Handbook**. West Sussex: John Wiley & Sons, 2014. Ch. 16, p. 385-413. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9781118755341.ch16>.

CARTER, C. B.; NORTON, M. G. **Ceramic materials: science and engineering**. 2. ed. New York: Springer, 2013.

CHITHAMBARARAJ, A.; NANDIGANA, P.; KUMAR, M. K.; PRAKASH, A. S.; PANDA, S. K. Enhanced electrochromism from non-stoichiometric electrodeposited tungsten oxide thin films. **Applied Surface Science**, v. 582, 152424, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.152424>.

GABHALE, B.; JADHAWAR, A.; BHORDE, A.; NAIR, S.; BORATE, H.; WAYKAR, R.; AHER, R.; SHARMA, P.; PAWBAKE, A.; JADKAR, S. High band gap nanocrystalline tungsten carbide (nc-WC) thin films grown by hot wire chemical vapor deposition (HW-CVD) method. **Journal of Nano- and Electronic Physics**, v. 10, n. 3, 03001, 2018. DOI: [http://dx.doi.org/10.21272/jnep.10\(3\).03001](http://dx.doi.org/10.21272/jnep.10(3).03001).

GALVÃO, M. C. B.; RICARTE, I. L. M. Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e publicação. **Logeion: Filosofia da Informação**, v. 6, n. 1, p. 57-73, 2019. DOI: <https://doi.org/10.21728/logeion.2019v6n1.p57-73>.

GREEN, S. V.; PEHLIVAN, E.; GRANQVIST, C. G.; NIKLASSON, G. A. Electrochromism in sputter deposited nickel-containing tungsten oxide films. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 99, p. 339-344, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.12.025>.

GV, A. R.; KUMAR, K. N.; SHAIK, H.; JAFRI, R. I.; NAIK, R.; H, D. B. Optical and electrochromic properties of CeO₂/WO₃ hybrid thin films prepared by hydrothermal and sputtering. **International Journal of Engineering Trends and Technology**, v. 70, n. 5, p. 1-8, 2022. DOI: <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V70I5P201>.

HABIB, M. A. Electrochromism. In: MURPHY, O. J.; SRINIVASAN, S.; CONWAY, B. E. (ed.). **Electrochemistry in Transition: from the 20th to the 21st century**. New York: Plenum Press, 1992. p. 51-62. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4615-9576-2_4.

HAO, Q.; CHEN, W.; XIAO, G. Beta (β) tungsten thin films: structure, electron transport, and giant spin Hall effect. **Applied Physics Letters**, v. 106, n. 18, 182403, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4919867>.

HOTZA, D.; NISHIHORA, R. K.; MACHADO, R. A. F.; GEFFROY, P.-M.; CHARTIER, T.; BERNARD, S. Tape casting of preceramic polymers toward advanced ceramics: a review. **International Journal of Ceramic Engineering & Science**, v. 1, n. 1, p. 21-41, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/ces2.10009>.

HUANG, B.-R.; HUNG, S.-C.; LIN, C.-Y.; CHEN, Y.-J. Effect of gas enhanced metal-semiconductor-metal UV photodetectors based on thermal annealing tungsten oxide thin film prepared by sol-gel method. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 25, n. 1, p. 408-413, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10854-013-1602-7>.

KARUPPAIAH, M.; SAKTHIVEL, P.; ASAITHAMBI, S.; BALAJI, V.; VIJAYAPRASATH, G.; YUVAKKUMAR, R.; RAVI, G. In-situ deposition of amorphous Tungsten(VI) oxide thin-film for solid-state symmetric supercapacitor. **Ceramics International**, v. 48, n. 2, p. 2510-2521, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.10.033>.

KHAN, A.; AL-MUHAISH, N.; MOHAMEDKHAIR, A. K.; KHAN, M. Y.; QAMAR, M.; YAMANI, Z. H.; DRMOSH, Q. A. Oxygen-deficient non-crystalline tungsten oxide thin films for solar-driven water oxidation. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 580, 121409, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2022.121409>.

KORKMAZ, S.; TEZEL, F. M.; KARIPER, I. A. Facile synthesis and characterization of graphene oxide/tungsten oxide thin film supercapacitor for electrochemical energy storage. **Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures**, v. 116, 113718, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physe.2019.113718>.

KRÜGER, L. U.; CHOLANT, C. M.; RODRIGUES, M. P.; GOMEZ, J. A.; LANDARIN, D. M.; LUCIO, C. S.; LOPES, D. F.; BULHÕES, L. O. S.; AVELLANEDA, C. O. Photochromism of doped and undoped WO₃ sol-gel films: determination and analysis of optical constants. **Optical Materials**, v. 128, 112357, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112357>.

KUMAR, K. N.; NITHYA, G.; SHAIK, H.; HEMANTH, B.; CHETHANA, M.; KISHORE, K.; MADHAVI, V.; JAFRI, R. I.; SATTAR, S. A.; GUPTA, J.; REDDY, G. V. A. Simulation and fabrication of tungsten oxide thin films for electrochromic applications. **Physica B: Condensed Matter**, v. 640, 413932, 2022a. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physb.2022.413932>.

KUMAR, K. N.; SHAIK, H.; GUPTA, J.; SATTAR, S. A.; JAFRI, R. I.; PAWAR, A.; MADHAVI, V.; GV, A. R.; G, N. Sputter deposited tungsten oxide thin films and nanopillars: electrochromic perspective. **Materials Chemistry and Physics**, v. 278, 125706, 2022b. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125706>.

KUMAR, K. U.; SUBRAHMANYAM, A. Electrochromic properties of tungsten oxide (WO₃) thin films on lexan (polycarbonate) substrates prepared with neon as sputter gas. **Materials Research Express**, v. 6, n. 6, 065502, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1088/2053-1591/ab093f>.

LEE, J.-H.; HIDAYAT, R.; RAMESH, R.; ROH, H.; NANDI, D. K.; LEE, W.-J.; KIM, S.-H. Preparation of tungsten-based thin films using a F-free W precursor and *tert*-butyl hydrazine via 2- and 3-step atomic layer deposition process. **Applied Surface Science**, v. 578, 152062, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.152062>.

LUO, Q. G.; DAI, Y.; LIU, S. L.; YU, K.; SHEN, Q.; ZHANG, L. M. Fabrication and properties of W-Cu functionally graded material by tape-casting. **Key Engineering Materials**, v. 616, p. 66-71, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.616.66>.

LUO, X.; MA, Y.; SHAO, B.; LI, C.; LI, K.; GUO, D.; CHEN, D.; ZHOU, H. Preparation and electromagnetic properties of NiCuZn ferrites and multilayer chip inductors. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 917, 165380, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165380>.

MAZUR, M.; WOJCIESZAK, D.; WIATROWSKI, A.; KACZMAREK, D.; LUBAŃSKA, A.; DOMARADZKI, J.; MAZUR, P.; KALISZ, M. Analysis of amorphous tungsten oxide thin films deposited by magnetron sputtering for application in transparent electronics. **Applied Surface Science**, v. 570, 151151, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151151>.

MENG, Q.; CAO, S.; GUO, J.; WANG, Q.; WANG, K.; YANG, T.; ZENG, R.; ZHAO, J.; ZOU, B. Sol-gel-based porous Ti-doped tungsten oxide films for high-performance dual-band electrochromic smart windows. **Journal of Energy Chemistry**, v. 77, p. 137-143, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jechem.2022.10.047>.

NISHIHORA, R. K.; RACHADEL, P. L.; QUADRI, M. G. N.; HOTZA, D. Manufacturing porous ceramic materials by tape casting: a review. **Journal of The European Ceramic Society**, v. 38, n. 4, p. 988-1001, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.11.047>.

ORTIZ, J.; ACOSTA, D.; MAGAÑA, C. Long-term cycling and stability of crystalline WO₃ electrochromic thin films prepared by spray pyrolysis. **Journal of Solid State Electrochemistry**, v. 26, p. 1667-1676, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10008-022-05211-0>.

PAWBAKE, A.; WAYKAR, R.; JADHAVAR, A.; KULKARNI, R.; WAMAN, V.; DATE, A.; LATE, D.; PATHAN, H.; JADKAR, S. Wide band gap and conducting tungsten carbide (WC) thin films prepared by hot wire chemical vapor deposition (HW-CVD) method. **Materials Letters**, v. 183, p. 315-317, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2016.07.132>.

PFEIFER, J.; BADALJAN, E.; TEKULA-BUXBAUM, P.; KOVÁCS, T.; GESZTI, O.; TÖTH, A. L.; LUNK, H.-J. Growth and morphology of W₁₈O₄₉ crystals produced by microwave decomposition of ammonium paratungstate. **Journal of Crystal Growth**, v. 169, n. 4, p. 727-733, 1996. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-0248\(96\)00669-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-0248(96)00669-0).

POLINI, R.; D'OTTAVI, C.; NUNZIANTE, P.; MARCHESELLI, G. Direct synthesis of highly reactive nanostructured scheelite from enriched wolframite and calcium oxide through planetary ball milling. **Materials Today Communications**, v. 24, 101032, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101032>.

POTIN, V.; BOUKHALFA, H.; MARTIN, N. Oblique angle co-deposition of nanocolumnar tungsten thin films with two W sources: effect of pressure and target current. **Materials Chemistry and Physics**, v. 281, 125864, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125864>.

PRAKASH, R.; KUMAR, A.; PANDEY, A.; KAUR, D. Binder free and high performance of sputtered tungsten nitride thin film electrode for supercapacitor device. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 21, p. 10823-10832, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.005>.

QAZI, A.; HUSSAIN, F.; RAHIM, N. A.; HARDAKER, G.; ALGHAZZAWI, D.; SHABAN, K.; HARUNA, K. Towards sustainable energy: a systematic review of renewable energy sources, technologies, and public opinions. **IEEE Access**, v. 7, p. 63837-63851, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/access.2019.2906402>.

RIZZUTO, C.; BARBERI, R. C.; CASTRIOTA, M. Tungsten and titanium oxide thin films obtained by the sol-gel process as electrodes in electrochromic devices. **Frontiers in Materials**, v. 9, p. 1-9, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fmats.2022.912013>.

ROZMAN, M.; ZENER, B.; MATOH, L.; GODEC, R. F.; MOURTZIKOU, A.; STATHATOS, E.; BREN, U.; LUKSIČ, M. Flexible electrochromic tape using steel foil with WO₃ thin film. **Electrochimica Acta**, v. 330, 135329, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135329>.

RYU, T.; SOHN, H. Y.; HWANG, K. S.; FANG, Z. Z. Plasma synthesis of tungsten carbide nanopowder from ammonium paratungstate. **Journal of The American Ceramic Society**, v. 92, n. 3, p. 655-660, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.02961.x>.

SADEGHI, M.; REZAEI, S.; ARMAN, A.; TÄLU, S.; LUNA, C.; SHAKOURY, R. Study of the formation of tungsten powder by hydrogen reduction of ammonium paratungstate and stereometric analyses of the powder texture. **Materials Research Express**, v. 6, n. 12, 1265f7, 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/ab6763>.

SANTOS, C. M. C.; PIMENTA, C. A. M.; NOBRE, M. R. C. A estratégia PICO para a construção da pergunta de pesquisa e busca de evidências. **Revista Latino-Americana de Enfermagem**, v. 15, n. 3, p. 508-511, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-11692007000300023>.

SHAHIDI, S.; MOAZZENCHI, B.; GHORANNEVISS, M. A review-application of physical vapor deposition (PVD) and related methods in the textile industry. **The European Physical Journal Applied Physics**, v. 71, n. 3, 31302, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjap/2015140439>.

SHEN, Q.; ZHOU, D.; ZHANG, J.; LUO, G.; ZHANG, L. Study on preparation and property of porous tungsten via tape-casting. **International**

Journal of Refractory Metals and Hard Materials, v. 69, p. 27-30, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmhm.2017.07.018>.

SHINDE, P. A.; JUN, S. C. Review on recent progress in the development of tungsten oxide based electrodes for electrochemical energy storage. **ChemSusChem**, v. 13, n. 1, p. 11-38, 9 jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/cssc.201902071>.

SILVA, F. T.; MACHADO, T. G.; SILVA, G. G.; SOUZA JÚNIOR, C. F. Obtenção de micropartículas de tungstênio metálico e carbeto de tungstênio para produção de ferramentas de corte: uma ideia. **Holos**, Natal, v. 3, n. 23, p. 233-240, 2007. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2007.146>.

SU, J.; YANG, H.; YANG, W.; ZHANG, X. Electrical characteristics of tungsten-doped InZnSnO thin film transistors by RF magnetron sputtering. **Journal of Vacuum Science & Technology B**, v. 40, n. 3, 032201, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1116/6.0001702>.

SVENSSON, J. S. E. M.; GRANQVIST, C. G. Electrochromic coatings for “smart windows”. **Solar Energy Materials**, v. 12, n. 6, p. 391-402, 1985. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0165-1633\(85\)90033-4](http://dx.doi.org/10.1016/0165-1633(85)90033-4).

TAN, G.-L.; TANG, D.; DASTAN, D.; JAFARI, A.; SILVA, J. P. B.; YIN, X.-T. Effect of heat treatment on electrical and surface properties of tungsten oxide thin films grown by HFCVD technique. **Materials Science in Semiconductor Processing**, v. 122, 105506, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105506>.

USGS – UNITED STATE GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral commodity summaries: Tungsten**. [S.l.]: USGS, 2022. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-tungsten.pdf>. Acesso em: 25 out. 2022.

VELMURUGAN, R.; AISHWARYA, M.; BALAMURUGAN, K.; NIVEDHA, K.; SUBRAMANIAN, B. Influencing *in situ* tuned nanostructures of pulsed laser ablated Co₃O₄ & WO₃ thin film electrodes for binder free flexible operando hybrid supercapacitor devices. **Electrochimica Acta**, v. 419, 140371, jul. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2022.140371>.

WANG, C. B.; SUN, K. F.; LUO, G. Q.; ZHANG, J.; SHEN, Q.; ZHANG, L. M. Hot-press sintering of the W-40wt.%Cu composite tape-casting film. **Key Engineering Materials**, v. 727, p. 966-971, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.727.966>.

WANG, M.; LEI, H.; WEN, J.; LONG, H.; SAWADA, Y.; HOSHI, Y.; UCHIDA, T.; HOU, Z. Effect of negative bias on the composition and structure of the tungsten oxide thin films deposited by magnetron sputtering. **Applied Surface Science**, v. 359, p. 521-525, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.10.099>.

YANG, X.; ZHU, Z.; LUO, F.; WANG, G.; PENG, G.; ZHU, M.; QIN, S. Strain-induced alternating photoluminescence segmentation in hexagonal monolayer tungsten disulfide grown by physical vapor deposition. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 13, n. 38, p. 46164-46170, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.1c13096>.

YANG, Y.; JI, P.; LI, M.; YU, Y.; HUANG, J.; YU, B.; WU, X.; HUANG, T. The application of a helicon plasma source in reactive sputter deposition of tungsten

nitride thin films. **Plasma Science and Technology**, v. 24, n. 6, 065503, 2022.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/2058-6272/ac5c27>.

ZHANG, Z.; TIAN, B.; DU, Z.; LIN, Q.; SHI, P.; REN, W.; ZHAO, N.; JIANG, Z. Effect of heat treatment on thermoelectric properties of tungsten-rhenium thin-film thermocouples by RF magnetron sputtering. **AIP Advances**, v. 8, n. 12, 125113, 2018.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.5074126>.

ZHANG, Z.; TIAN, B.; LIU, Y.; DU, Z.; LIN, Q.; JIANG, Z. Thermoelectric characteristics of silicon carbide and tungsten-rhenium-based thin-film thermocouples sensor with protective coating layer by RF magnetron sputtering. **Materials**, v. 12, n. 12, 1981, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/ma12121981>.