

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

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

^[3] joachiberio@gmail.com, ^[5] wacchar@gmail.com. Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

^[4] vambertomonteirodasilva@yahoo.com.br. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB)

*autora correspondente

Resumo

Os materiais a base de tungstênio têm crescido em interesse nos últimos anos em virtude das suas propriedades únicas e 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, dentre outros aspectos. Foram realizadas buscas nas plataformas de pesquisa: 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 critérios. O método de produção mais utilizado foi o *Sputtering*, seguido de Deposição de Vapor Químico (DVQ), Sol-gel e *Tape Casting*. As principais propriedades estudadas pelos trabalhos foram a resistividade elétrica e a curva IV. Quanto à composição, o trióxido de tungstênio foi o composto usado por mais trabalhos na confecção dos filmes. A aplicação mais indicada foi em dispositivos eletrocromicos, 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 interessantes propriedades para diferentes aplicações, sendo um material versátil e 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 had grown in interest in the past few years due their unique properties and possibility of use in a wide range of applications. In view of this, in this work a systematic literature review (SLR) was carried out on films produced with tungsten compounds as base material. The deposition methods employed to manufacture the films were analyzed, as well as the electrical, dielectric and optoelectronic properties studied in the analyzed works, the main applications studied and/or suggested, film composition, among other aspects. Searches were carried out in the search platforms: Periodicals 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 stage of the search, 187 articles were found, of which 36 were selected for full reading after applying the criteria. The most used production method was Sputtering, followed by Chemical Vapor Deposition (CVD), Sol-gel and Tape Casting. The main properties studied by the works were the electrical resistivity and the IV curve. Regarding the composition, tungsten trioxide was the compound used in most works to manufacture the films. The

most indicated application was in electrochromic devices, such as smart windows, displays and other optoelectronic applications. Applications such as supercapacitors, solar cells, sensors, energy storage and photodetectors were also reported. Based on the analyzed articles, it is possible to affirm that tungsten films have interesting properties for different applications, being a versatile material and potential for further investigations.

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

1 Introdução

Nos últimos anos, as questões relacionadas ao esgotamento dos combustíveis fósseis têm recebido bastante atenção dos pesquisadores, e trouxe à tona a necessidade de desenvolver tecnologias de geração de energia limpa e renovável. Desse modo, materiais à base de tungstênio cresceram em interesse para essa indústria devido às suas propriedades físico-químicas únicas e seu ótimo desempenho eletroquímico, sendo usados como componentes de células solares, janelas inteligentes, sensores e dispositivos de armazenamento de energia como supercapacitores e baterias. Além disso, a facilidade em produzir esses materiais por diferentes métodos, e algumas vezes de bom custo benefício, torna-se uma grande vantagem (SHINDE; JUN, 2020).

O tungstênio (W) é um elemento pertencente ao grupo dos metais de transição, conhecido por possuir propriedades como alto ponto de fusão, menor coeficiente de expansão térmica e maior resistência à tração em temperaturas acima de 1650 °C dentre todos os metais puros. Essas características tornam o tungstênio amplamente utilizado em condições de alta temperatura, como o uso em filamentos de lâmpadas e componentes bélicos e militares. Além das ótimas propriedades mecânicas, o tungstênio também apresenta resistência à corrosão e condutividade térmica e elétrica, o que o torna um elemento versátil em termos de aplicações (BROWN; PITFIELD, 2014).

O elemento não é encontrado na Terra na forma de metal livre, sendo normalmente observado na forma de minérios como scheelita (CaWO_4) e wolframita ($\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{WO}_4$). A primeira etapa para obtenção do tungstênio é a dissolução em alta temperatura e pressão dos minérios para formar soluções de batimento de tungstênio, seguida de outros processos como filtração, purificação e cristalização final para obtenção do paratungstato de amônio (APT) (POLINI *et al.*, 2020). O APT é, então, utilizado como matéria-prima de diferentes compostos de tungstênio, desde formas estequiométricas e não estequiométricas como WO_3 e $\text{W}_{18}\text{O}_{49}$, pela aplicação de métodos como calcinação e decomposição por micro-ondas, até o carbeto de tungstênio, por meio de síntese de plasma, por exemplo (PFEIFER *et al.*, 1996; RYU *et al.*, 2009; SADEGHI *et al.*, 2020).

Os métodos de fabricação de filmes e fitas apresenta-se como uma alternativa viável para a produção de materiais a base de tungstênio. Os métodos de confecção de filmes apresentam algumas vantagens como a facilidade, controle de porosidade de espessura, possibilidade de produzir materiais com geometrias mais complexas, além de que alguns deles 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, dentre elas o uso em componentes eletrônicos, fotovoltaicos e fotoluminescentes, sensores, células solares, dentre outros (ALVES; RONCONI; GALEMBECK, 2002; BRINKER *et al.*, 1992).

Apesar de apresentarem produtos finais muito semelhantes, cada uma das técnicas possui suas particularidades. A DVF é um método de revestimento no qual filmes finos são depositados pela condensação de uma forma vaporizada do material do filme desejado sobre o substrato. Os processos de DVF são realizados à vácuo, e incluem diferentes tipos, tais como: deposição de arco catódico, deposição física de vapor por feixe de elétrons, deposição evaporativa, pulverização catódica, galvanoplastia e pulverização avançada. 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; 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 aplicações, como aeroespacial, automotiva, cirúrgica, médica, corantes e 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).

Ao mesmo tempo, 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 o 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 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).

Semelhantemente, 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. Este método também apresenta benefícios como a simplicidade e o 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 a 500 nm, por diferentes métodos de revestimento como de *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 filmes com compostos de tungstênio em sua composição, buscando apontar as principais aplicações estudadas, os métodos de produção empregados e a forma de tungstênio que foi utilizada, a fim de servir como base para estudos com temática semelhante.

2 Metodologia

A Revisão Sistemática da Literatura (RSL), método utilizado na realização do presente estudo, conceitua-se como modalidade de pesquisa que segue protocolos específicos, parâmetros delimitados, focada na reprodutibilidade e que apresenta os resultados encontrados de forma explícita, bem como as plataformas de pesquisa consultadas, os processos de seleção, análise, inclusão e exclusão de artigos. Assim como os 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 até mesmo a replicação da pesquisa em diferentes escalas, observando as falhas, recursos necessários buscando propor temas que acrescentem e respondam a questões ainda não resolvidas em estudos prévios (GALVÃO; RICARTE, 2019).

A pesquisa buscou analisar artigos científicos publicados em inglês ou português na última década que tratam da confecção de filmes por diferentes técnicas de fabricação, que contenham compostos de tungstênio em sua composição e tenham avaliado algum tipo de propriedade elétrica ou optoeletrônica a partir de pesquisa nas bases de dados: Periódicos CAPES, Science Direct, Scopus e Google Acadêmico. As plataformas foram selecionadas de acordo com sua relevância e por disporem de uma 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, abreviatura de População, Intervenção, Comparação e *Outcomes* (resultados). Esse método pode ser 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. Desse modo, as descrições dos componentes PICO do presente estudo estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Determinação dos critérios PICO utilizados na 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

Fonte: dados da pesquisa

Outra estratégia utilizada para a realização das buscas, nas plataformas de pesquisas, foi a de *strings*, onde palavras específicas foram usadas para a seleção dos artigos, buscando a partir de títulos, palavras-chave e resumos, em português e Inglês, sendo excluídos os artigos em idiomas diferentes desses mencionados. Posteriormente, foi realizada a triagem dos artigos selecionados, sendo analisados os títulos e resumos, destes foram excluídos os anteriores a 2012, artigos de revisão, artigos duplicados e aqueles que não estavam relacionados ao tema da pesquisa. Na Tabela 2 é apresentada a forma na qual foram realizadas as pesquisas com utilização do método.

Tabela 2 – *Strings* de buscas de acordo com as plataformas de pesquisa consultadas e critérios de exclusão

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

Fonte: dados da pesquisa

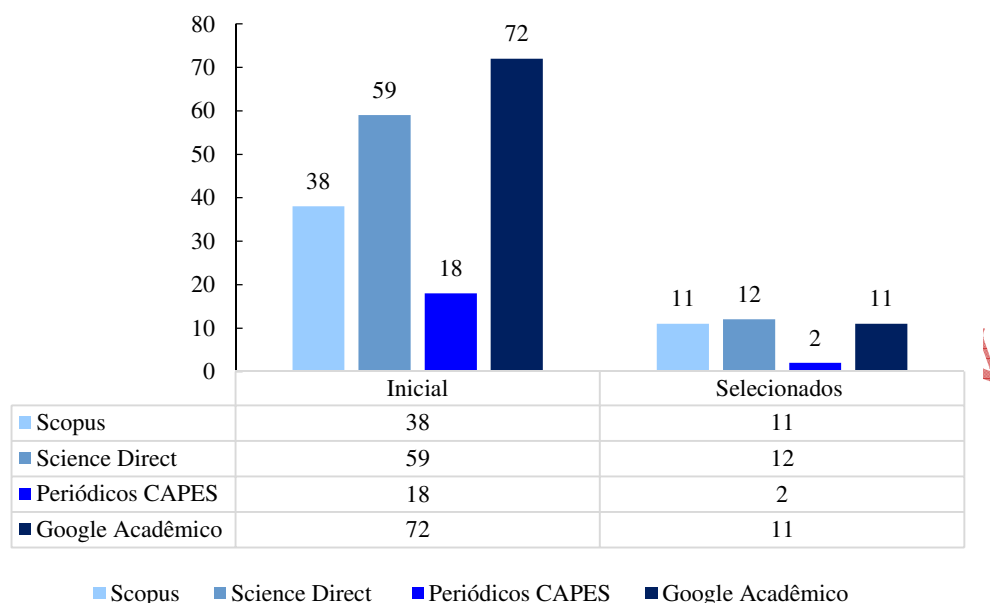
Para as pesquisas no *Scopus* e *Science Direct* foram utilizadas somente palavras em inglês, devido a grande maioria dos artigos serem publicados nesse idioma. Para as demais plataformas foram usadas tanto palavras em português quanto em inglês. Os resultados primários obtidos a partir das pesquisas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

3 Resultados e discussão

Foram encontrados 187 artigos nas plataformas e *strings* aplicados. Logo, foram aplicados os critérios de exclusão para a seleção dos artigos para leitura integral. Os artigos foram classificados em três categorias: os 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; observou-se a existência de 9 artigos duplicados. Portanto, foram excluídos 151 artigos, totalizando 36 artigos destinados à leitura integral.

A Figura 1 apresenta os artigos da pesquisa inicial classificados por quantidade encontrada em cada plataforma de busca e os artigos selecionados para a leitura. Como exposto, grande parte das publicações selecionadas após a aplicação dos critérios exclusão são originárias da plataforma *Scopus* (11) e Google acadêmico (11), enquanto que os demais artigos foram encontrados nas plataformas *Science Direct* (6) e Periódicos CAPES (2).

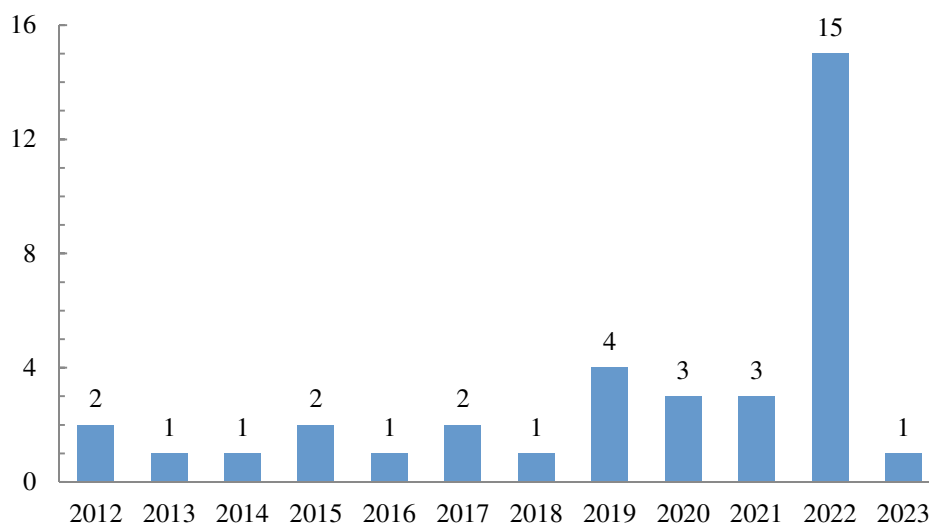
Figura 1 – Amostragem total dos artigos encontrados nas plataformas de pesquisa



Fonte: dados da pesquisa

É possível observar, ainda, que a ocorrência de trabalhos com essa temática 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. Logo, Karuppaiah *et al.* (2022) apontam que a fim de solucionar e/ou mitigar questões inerentes a isto, os pesquisadores e engenheiros estão dedicando-se 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 utilizado para qualificar as revistas científicas com base nas citações que ela recebe. Uma das formas de calcular o FI é realizando-se a soma das citações recebidas, no ano do cálculo do fator de impacto, dividido pela quantidade de

artigos publicados nos dois anos antecedentes 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 Scienc, 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. Apesar disso, o maior número de publicações veio da Ásia, somando 23 publicações. A Figura 3 apresenta o mapa de distribuição dos países. Apenas a África e a Oceania não obtiveram participação dentre as publicações.

Figura 3 – Ocorrência de publicações nos países

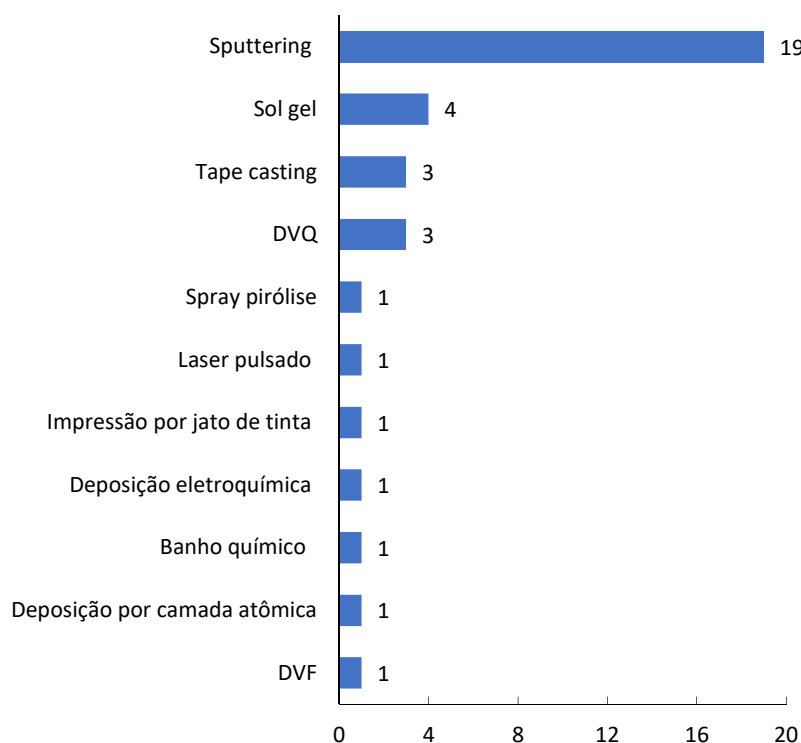


Fonte: dados da pesquisa

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

Em relação ao método de deposição do filme, foram encontrados onze métodos diferentes. O mais utilizado foi o *sputtering*, somando 19 trabalhos que utilizaram esse método, seguido por sol gel, com quatro; *tape casting* e DVQ, com três trabalhos, respectivamente, e um de cada dos outros métodos, de acordo com a Figura 4: DVF; laser pulsado; *spray* pirólise; deposição em banho químico (DBQ); deposição de laser atômico, por jato de tinta; deposição eletroquímica. O método de *sputtering* é apontado como vantajoso por ser um processo simples e que 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 electrocrômico (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 realizadas dentre os artigos analisados. A Tabela 4 apresenta um resumo das publicações selecionadas, relacionando aplicação, forma de tungstênio utilizado e sua quantidade na composição, método de deposição e espessura.

Tabela 4 – Resumo das publicações selecionadas

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 electrocrômicos	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)	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 co-catálise	WC	100	DVQ	-
Wang <i>et al.</i> (2017)	FGM ^{**}	WCu	60	<i>Tape casting</i>	-
Gabhale <i>et al.</i> (2018)	Células solares (DSSCs ^{****}) e co-catálise	WC	100	DVQ	-

Zhang <i>et al.</i> (2018)	Par termoeletrico	WRe	95 e 74 %w	Sputtering	-
Kumar e Subrahmanyam (2019)	Dispositivos electrocromicos	WO ₃	100	Sputtering	190 - 712 nm
Prakash <i>et al.</i> (2019)	Supercapacitor	W ₂ N	100%	Sputtering	-
Zhang <i>et al.</i> (2019)	Par termoeletrico	WRe	95 e 74 %w	Sputtering	-
Atak <i>et al.</i> (2020)	Dispositivos electrocromicos	WO ₃	17,5-22,2 at%	Sputtering	300 ± 15 nm
Abdelhameed <i>et al.</i> (2020)	Sensores	W	100	Sputtering	-
Korkmaz, Tezel e Kariper (2020)	Supercapacitor	WO ₃	49.65/ 6.37/ 58.8 %w	Chemical bath	867/ 1167/ 2100/ 440 nm
Rozman <i>et al.</i> (2020)	Dispositivos electrocromicos	WO ₃		Impressão por jato de tinta	
Mazur <i>et al.</i> (2021)	Dispositivos optoeletronicos	WO _x	Não especificado.	Sputtering	410 e 1000 nm
Tan <i>et al.</i> (2021)	Dispositivos optoeletronicos, fotovoltaicos e armazenamento de energia	WO ₃	100	DVO	-
Yang <i>et al.</i> (2021)	Dispositivos optoeletronicos	WS ₂	Não especificado.	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	Sputtering	100 nm
Velmurugan <i>et al.</i> (2022)	Microeletronica e biomédica	WO ₃	100	Laser pulsado	-
Yang <i>et al.</i> (2022)	Telas planas, células solares e diodos de emissão de luz	WN	Não especificado.	Sputtering	-
Khan <i>et al.</i> (2022)	Dispositivos electrocromicos	WO ₃	-	Sputtering	-
Chithambararaj <i>et al.</i> (2022)	Dispositivos electrocromicos	WO ₃		Deposição electroquímica	
Gv <i>et al.</i> (2022)	Dispositivos electrocromico	CeO ₂ /WO ₃	100	Sputtering	-
Karuppaiah <i>et al.</i> (2022)	Supercapacitor	WO ₃	100	Sputtering	-
Krüger <i>et al.</i> (2022)	Vidros fotocromicos	WO ₃ dopado com Zr, Nb, Ta e Ti.	Não especificado.	Sol-gel; Dip coating	-
Kumar <i>et al.</i> (2022a)	Dispositivos electrocromico	WO ₃	100	Sputtering	-
Kumar <i>et al.</i> (2022b)	Dispositivos electrocromicos	WO ₃	100	Sputtering	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 microeletronicos	WO ₃	0,7 %w	Tape casting	-
Ortiz, Acosta e Magaña (2022)	Dispositivos electrocromico	WO ₃	100	Spray pirólise	200 nm
Potin, Boukhalfa e Martin (2022)	Sensores, electroquímica e catálise	W	100	Sputtering	270 e 460 nm
Rizzuto, Barberi e	Dispositivos	WO ₃	100	Sol-gel	-

Castriota (2022)	eletrocromico				
Meng <i>et al.</i> (2023)	Dispositivos eletrocromicos	WO _x dopado de Ti	-	Sol-gel	283 nm**

*razão atômica

**média

*** FGM (*Functionally Graded Materials*)

**** DSSC (*Dye Sensitized Solar Cell*)

Fonte: dados da pesquisa

Quanto à aplicação, destaca-se o emprego de filmes de compostos de tungstênio em aparelhos em que o eletrocromismo é requerido, como películas para janelas inteligentes e dispositivos optoeletrônicos. O eletrocromismo é um fenômeno onde há uma mudança reversível nas propriedades ópticas de determinado material quando uma voltagem é aplicada (HABIB, 1992; SVENSSON; GRANQVIST, 1985). O óxido de tungstênio é apontado como sendo um dos melhores materiais eletrocromicos, com alta eficiência de coloração, estabilidade química e boa atividade eletroquímica. Dentre os artigos encontrados, 8 deles 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 na performance 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, além de excelentes propriedades eletrocromicas, incluindo alta modulação ótica e eficiência de coloração e rápido tempo de mudança (KUMAR; SUBRAHMAYNAM, 2019; ORTIZ; ACOSTA; MAGAÑA, 2022; MENG *et al.*, 2023).

Também merece destaque as aplicações em células solares, dispositivos de geração e em armazenamento de energia. A necessidade de desenvolver tecnologias para geração de energia renovável já é conhecida, não só para alcançar os objetivos de um desenvolvimento sustentável, mas também para suprimento das 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 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 desse material no uso em células solares, dispositivos de armazenamento de energia e co-catalisadores 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 WO₃ por *sputtering* e deposição por banho químico, respectivamente, e aplicaram ensaios de voltametria cíclica, espectroscopia de impedância eletroquímica, constante dielétrica e capacitância, e observaram que o material apresentava características promissoras para tal aplicação. Prakash *et al.* (2019) também avaliaram essa aplicação, utilizando o W₂N como matéria prima e o *sputtering* como método de deposição, obtendo resultados satisfatórios.

Ainda foram apontadas outras aplicações como sensores, sensores ultra sensíveis 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), aplicações biomédicas e microeletrônicas (VELMURUGAN *et al.*, 2022) e transistores (SU *et al.*, 2022).

O óxido de tungstênio (WO₃) foi o material utilizado em 15 dos 30 trabalhos encontrados, mas outras formas como carbeto e nitreto 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 também óxido de grafeno (LUO *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2019; KRÜGER *et al.*, 2022).

Uma vez que o óxido de tungstênio foi o material mais utilizado, as análises de difração de raios X confirmaram a presença da fase WO₃ 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 e assim por

diante. Portanto, um profundo conhecimento da estrutura e estabilidade desse material é 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 W₅Re. Wang *et al.* (2017) destacam que existe mudança de fase quando a temperatura é alterada, observou-se que existe a fase W, porém a 800 °C a fase W₂C é observada e a 900 °C surge a fase WC. Rizzuto, Barberi e Castriota realizaram ensaio Ramam e identificaram duas bandas em 715 e 806 cm⁻¹ referente a 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, onde os autores avaliaram um filme feito de β -tungstênio por *sputtering*. Os dois trabalhos que apresentaram espessuras na ordem do micron foram os de Huang *et al.* (2014) e Luo *et al.* (2014), onde os autores produziram laminados a partir dos filmes, ou seja, utilizaram técnicas para unir mais de um filme, formando um gradiente de composição, formando um sistema metal-semicondutor-metal e FGM, respectivamente. É importante ressaltar que a espessura do filme pode ser ajustada de acordo com o método de deposição e a aplicação desejada, pois em alguns casos ela 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 produzir diferentes espessuras. Outros autores usaram o mesmo método de deposição, porém variando outros parâmetros como meio de deposição e composição para a mesma finalidade (MAZUR *et al.*, 2021; KORKMAZ; TEZEL; KARIPEL, 2020). 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 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 dentre os artigos selecionados para leitura integral. Tamaña 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 utilização em 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 dentre os artigos estudados foram: resistividade, curva IV, condutividade e capacitância;
- O composto mais utilizado para 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 feitos 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 (obrigatória; não deve ser numerada)

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 (obrigatória; não deve ser numerada)

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

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, p. 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, p. 1-21, 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**, p. 385-413, 2013. Ch. 16. 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, 03001-1, 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**. p. 51-62, 1992. 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. 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://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/ab093f>.

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>.

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.; TALU, 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, 2020. 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.ijrmhm.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. **Mineral commodity summaries**: Tungsten. 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, p. 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/acsaami.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>.