

Kommunikation

Photochrome Eigenschaften einer anorganisch-organischen Verbindung im sichtbaren Licht

Dünner Hybridfilm aus Phosphormolybdänsäure und Polythiophen

Zhao Wanqing ¹, Zhao Hongmei ¹, Wei Feng ²  und Honggang Zhao ^{1,*}¹ Fakultät für Chemie und Chemieingenieurwesen, Xinjiang Normal University, Ürümqi 830054, China Key Lab² of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130021, China * Korrespondenz:

xjnu1609@xjnu.edu.cn

Zusammenfassung: Ein photochromer Hybridfilm mit sichtbarem Licht wurde synthetisiert, indem Phosphormolybdänsäure (PMoA) mit einer Polythiophenmatrix (PTh) kombiniert wurde. Die Mikrostruktur und die photochromen Eigenschaften der Materialien wurden mithilfe von Rasterkraftmikroskopie (AFM), Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie (FTIR), Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) und ultraviolett-sichtbaren Spektren (UV-vis) analysiert. Laut FTIR-Spektren blieben die Geometrien von PMoA und PTh im Hybridfilm gut erhalten und es besteht eine starke Wechselwirkung an der Schnittstelle von PMoA und PTh. Die XPS-Spektren zeigten die Veränderung der chemischen Mikroumgebung und die Reduktion von Mo⁶⁺-Atomen in der Photoreduktionsreaktion. Unter Bestrahlung mit sichtbarem Licht änderte sich der Verbundfilm von transparent zu blau und wurde allmählich dunkler, wodurch Heteropolyblau entstand. Der Hybridfilm zeigt auch Reversibilität in Gegenwart von Sauerstoff. Die Ergebnisse zeigten, dass die photochrome Reaktion nicht mit dem photoinduzierten Elektronentransfermechanismus übereinstimmte.

Schlüsselwörter: Phosphormolybdänsäure, Polythiophen, Photochromie, Hybridfilm



Zitat: Zhao, W.; Zhao, H.; Feng, W.; Zhao, H.

Photochrome Eigenschaften eines

dünnen, anorganischen und organischen

Phosphormolybdänsäure/Polythiophen-Hybridfilms

im sichtbaren Licht. *Chemistry* **2024**, *6*, 469–475. <https://doi.org/10.3390/chemistry6030026>

Wissenschaftlicher Redakteur: Matthias Lehmann

Empfangen: 25. April 2024

Überarbeitet: 1. Juni 2024

Akzeptiert: 5. Juni 2024

Veröffentlicht: 7. Juni 2024



Copyright: © 2024 bei den Autoren.

Lizenznehmer MDPI, Basel, Schweiz.

Dieser Artikel ist ein Open Access-Artikel

vertrieben unter den Bedingungen und

Bedingungen der Creative Commons

Namensnennungslizenz (CC BY)

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Einleitung

Photochrome Materialien galten als vielversprechender Forschungsschwerpunkt bei Funktionsmaterialien und wurden in den Bereichen optische Informationsspeichermaterialien, photoelektrische Geräte, optische Schalter und biomedizinische Forschung eingesetzt [1–4]. In den letzten Jahren wurden durch die Entwicklung anorganischer/organischer Verbundmaterialien und die Einführung von Selbstassemblierungstechnologie, Templatechemie und anderen Methoden in die Herstellung die photochromen Eigenschaften der Materialien erheblich verbessert, was eine breitere Anwendung

Heteropolyoxometallate zählen aufgrund ihrer hohen Oxidationsreduzierbarkeit, hohen Protonenleitfähigkeit und ausgezeichneten Löslichkeit zu den beliebtesten photochromen Materialien [7,8]. Um das Anwendungspotenzial von Heteropolyoxometallaten zu erhöhen, versuchte man, sie in Polymernetzwerke einzuführen, um die physikalischen Eigenschaften der photochromen Materialien wie mechanische Festigkeit, optische Transparenz und Bearbeitbarkeit zu verbessern [9–11]. Heteropolyoxometallate wurden als anionische Ladungsträger in ungeordneten Filmen wie Sol-Gel-Filmen verwendet, indem sie sich über schwache Wechselwirkungen wie Wasserstoffbrücken, elektrostatische Kräfte und Van-der-Waals-Kräfte an kationische Gruppen an organischen Polymerketten binden. Sun und Kollegen [12] synthetisierten einen PMoA/Polyvinylpyrrolidon (PVP)-Hybridfilm und entdeckten, dass die Hauptursache der photochemischen Reaktion der Protonentransfer zwischen PMoA und der PVPd-Matrix war. Die Wechselwirkung von Polyoxometallaten und Polymer über nichtkovalente Bindungen bot einen nützlichen Ansatz zur Verbesserung der physikalischen und chemischen Eigenschaften der anorganischen/organischen photochromen Materialien.

Polythiophen (PTh) hat eine gute photoelektrische Stabilität, gute Filmbildungseigenschaften, eine hohe Leitfähigkeit und eine geringe Bandlückenbreite von 2,02 eV, was ein großes Anwendungspotenzial in der photoelektrischen Chemie bietet. PTh hat ein großes π -konjugiertes Elektronensystem und seine Elektronenabgabefähigkeit ist besser als die von Polypyrrol und Polyanilin. PTh k

2. Materialien und Methoden 2. Materialien und Methoden

2.1. Vorbereitung

Nr. 9: 0,1 g PTH wird mit 20 ml n-Butyl-Verpropanol (PMF) gemischt, um Lösung Nr. 0,02 g PTH werden mit 20 ml d, mit einer Konzentration von 0,1 mg/ml. 20 ml PMF wird mit 20 ml Ethanol gemischt mit 20 mL Ethanol zu bilden mit einer Konzentration von 0,2 mg/mL. Die übrigen Lösungen wurden mit Lösung Nr. 2 mit einer Konzentration bilden, um Lösung Nr. 3 zu bilden. Eine Plattenprobe wurde verwendet, um diese gemischte Lösung auf ein Quarzsubstrat zu bilden, indem PMF (n-Butyl-Verpropanol) mit einer Menge von 100 μ L, als ein Quarzsubstrat zur

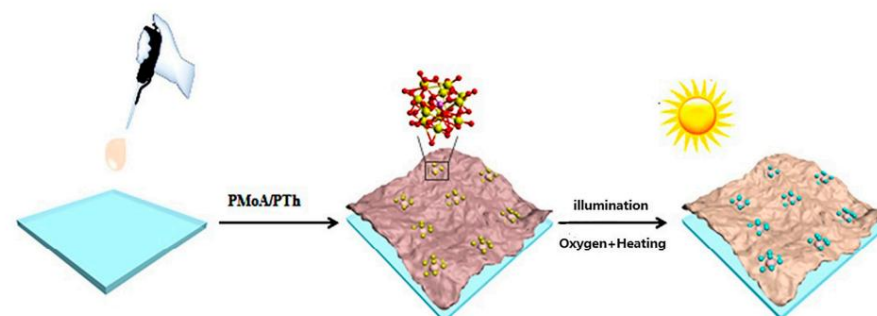


Abbildung 1. Syntheseprozess und photochrome Reaktion.

Tokio, Japan). FTIR-Spektren wurden mit einem Nicolet 550 Fourier-Transform-Infrarot-Spektrometer (Nicolet, Madison, WI, USA) im Wellenzahlenbereich von 500–4000 cm^{-1} aufgenommen. AFM-Bilder der Proben wurden mit einem 300 HV Rasterkraftmikroskop (Seiko, Tokio, Japan). FTIR-Spektren wurden mit einem Nicolet 550 bestimmt. Fourier-Transformations-Infrarotmessungen wurden mit einem ESCALAB 250 Photoelektronenspektrometer (Thermo, Waltham, MA, USA) im Wellenzahlenbereich von 500–4000 cm^{-1} aufgenommen. XPS Waltham, MA, USA), um die chemische Zusammensetzung der Proben zu ermitteln.

Photochrome Experimente wurden mit einer 300 W Xe-Lampe (PLS-SXE, Beijing) durchgeführt. Perfectlight Technology Co., Ltd., Beijing, China) mit einem UV-Filter (über 400 nm durchlassen

Wellenlänge) als sichtbare Lichtquelle ohne andere Lichtquellen. Der Abstand zwischen Die Lampe und der Film wurden auf 150 mm eingestellt. Bestrahlungsversuche mit sichtbarem Licht wurden in der Luft durchgeführt, um eine Reihe von Absorptionskurven unter verschiedenen Bestrahlungsverhältnissen zu erhalten

Photochrome Experimente wurden mit einer 300 W Xe-Lampe (PLS-SXE, Beijing Perfectlight Technology Co., Ltd., Peking, China) mit einem UV-Filter (über 400 nm Wellenlänge) als sichtbare Lichtquelle ohne andere Lichtquellen durchgeführt. Der Abstand zwischen der Lampe und dem Film wurde auf 150 mm eingestellt. Experimente mit sichtbarer Lichtbestrahlung wurden in der Luft durchgeführt, um eine Reihe von Absorptionskurven bei unterschiedlichen Bestrahlungszeiten zu erhalten. Dann wurde der Verbundfilm im Dunkeln aufbewahrt, um die Bleichzeiten zu beobachten. Dann wurde der Verbundfilm im Dunkeln aufbewahrt, um den Bleichprozess zu beobachten. Der Prozess und die entsprechende Absorption wurde gemessen. Alle Experimente wurden durchgeführt, und die entsprechende Absorption wurde gemessen. Alle Experimente wurden durchgeführt, bei Raumtemperatur durchgeführt. bei

3. Ergebnisse

Die FTIR-Spektren von reinem PMoA, PTh und PMoA/PTh-Hybridfilm im Bereich von 4000–400 cm⁻¹ sind in Abbildung 2 dargestellt. Die Absorptionspeaks bei 1542 cm⁻¹ und 1487 cm⁻¹ sind die charakteristischen Schwingungsspitzen des Polythiophenrings, die als asymmetrische und symmetrische Streckschwingungen des Polythiophenrings. Der charakteristische Absorptionspeak bei 1325 cm⁻¹ ist der C-S-Streckschwingung und der Polythiophenrings. Der Absorptionspeak bei 1031 cm⁻¹ und 1169 cm⁻¹ wird der Biegeschwingung in der Ebene der C-H-Bindung und der C-H-Bindung zugeordnet. Die Absorption der Absorptionspeak bei 783 cm⁻¹ wird der Biegeschwingung außerhalb der Ebene der C-H-Bindung zugeschrieben. Die von PMoA-Signalen überlagert wurde. Diese weisen darauf hin, dass die Struktur von PTh intakt ist und im Hybridfilm nicht zerstört wird, und die geometrische Struktur von PMoA bleibt im Verbundfilm erhalten.

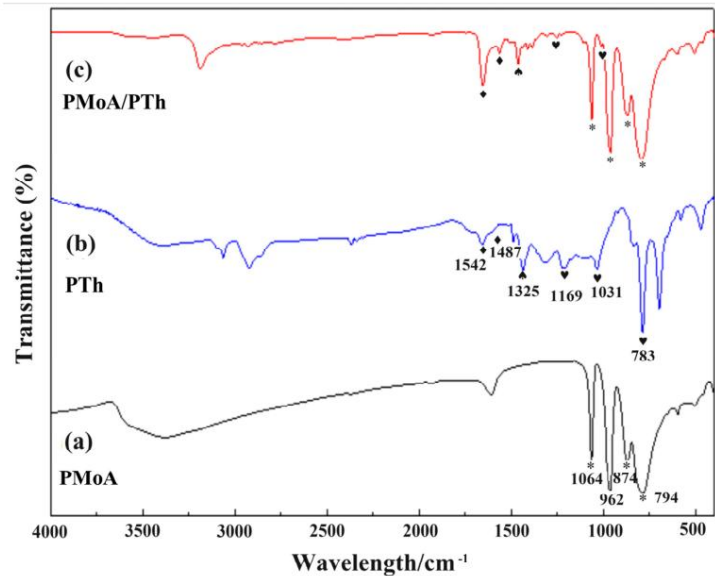


Abbildung 2. FTIR-Spektren von PMoA-, PTh- und PMoA/PTh-Hybridfilm.

Im Spektrum von PMoA/PTh gibt es vier typische Bänder bei 1064, 962, 874 und 794 794 cm⁻¹, die den Schwingungsbanden von $\gamma(\text{P-Oa})$, $\gamma(\text{Mo-Od})$, $\gamma(\text{Mo-Oh-Mo})$ und $\gamma(\text{Mo-}\gamma(\text{Mo-Oc-Mo})$ entsprechen, die denen von reinem PMoA ähnlich sind und nur einige Verschiebungen aufweisen. Es zeigt, dass die Keggin-Geometrie von PMoA im Verbundfilm erhalten bleibt. Die Infrarot- Infrarot-Wellenlänge von PMoA im Verbundfilm wird aufgrund der verstärkten Wechselwirkung zwischen PMoA und Polymersubstrat transformiert und es kommt zur Ladungsübertragung. AFM-Bilder (Abbildung 3) zeigen die Oberflächenmorphologie von reinem PTh und PMoA/PTh-Hybridfilmen vor und nach der Bestrahlung mit sichtbarem Licht. Der PTh-Film (Abbildung 3a) zeigt die spitzenförmige Struktur mit ähnlicher Partikelgröße und dem quadratischen Mittelwert der Rauheit (RMS) betrug 7 nm. Wie in Abbildung 3b,c gezeigt, änderte sich die Morphologie des Films offensichtlich nach der Kombination von PTh und PMoA; der RMS von PMoA/PTh-Hybridfilmen betrug 18 nm (im Vergleich mit 7 nm für PTh). Man kann davon ausgehen, dass die Wechselwirkung von Wasserstoffbrücken zwischen PTh Polymerketten werden durch die Einwirkung von PMoA-Partikeln unter der Wechselwirkung Kraft der Wasserstoffbrücken zwischen PMoA- und PTh-Polymerketten. Nach optischer Beleuchtung erhöhte sich der RMS von PMoA/PTh-Kompositfilmen von 18 auf 31 nm, was zeigte die Bildung von Heteropolyblau in der Photoreduktionsreaktion und dem Protonentransfer vergrößerte den Raumwinkel des PTh-Polymers.

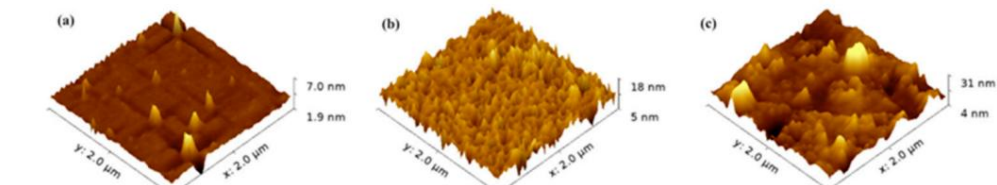


Abbildung 3. AFM-Bilder von (a) reinen PTh- und PMoA/PTH-Verbundfilmen (b) vor und (c) nach der Bestrahlung mit sichtbarem Licht.

Abbildung 3. AFM-Bilder von (a) reinen PTh- und PMoA/PTH-Verbundfilmen (b) vor und (c) nach sichtbarer Lichtbestrahlung.

Die UV-Vis-Absorptionsspektren von PMoA/PTH mit unterschiedlicher Bestrahlungsdauer sind in Abbildung 4a dargestellt. Die Absorptionsspektren von PMoA/PTH bei unterschiedlichen Bestrahlungsdauern sind in Abbildung 4b dargestellt. Die UV-Vis-Absorptionsspektren von PMoA/PTH mit unterschiedlichen Bestrahlungsdauern sind in Abbildung 4c dargestellt. Die Absorptionsspektren von PMoA/PTH mit unterschiedlichen Bestrahlungsdauern sind in Abbildung 4d dargestellt.

Die UV-Vis-Absorptionsspektren von PMoA/PTH mit unterschiedlichen Bestrahlungsdauern sind in Abbildung 4a dargestellt. Die Absorptionsspektren von PMoA/PTH bei unterschiedlichen Bestrahlungsdauern sind in Abbildung 4b dargestellt. Die UV-Vis-Absorptionsspektren von PMoA/PTH mit unterschiedlichen Bestrahlungsdauern sind in Abbildung 4c dargestellt. Die Absorptionsspektren von PMoA/PTH mit unterschiedlichen Bestrahlungsdauern sind in Abbildung 4d dargestellt.

Die UV-Vis-Absorptionsspektren von PMoA/PTH mit unterschiedlichen Bestrahlungsdauern sind in Abbildung 4a dargestellt. Die Absorptionsspektren von PMoA/PTH bei unterschiedlichen Bestrahlungsdauern sind in Abbildung 4b dargestellt. Die UV-Vis-Absorptionsspektren von PMoA/PTH mit unterschiedlichen Bestrahlungsdauern sind in Abbildung 4c dargestellt. Die Absorptionsspektren von PMoA/PTH mit unterschiedlichen Bestrahlungsdauern sind in Abbildung 4d dargestellt.

von Heteropolyblau während des photochromen Prozesses änderte sich der Hybridfilm von transparent zu blau und vertieft sich allmählich.

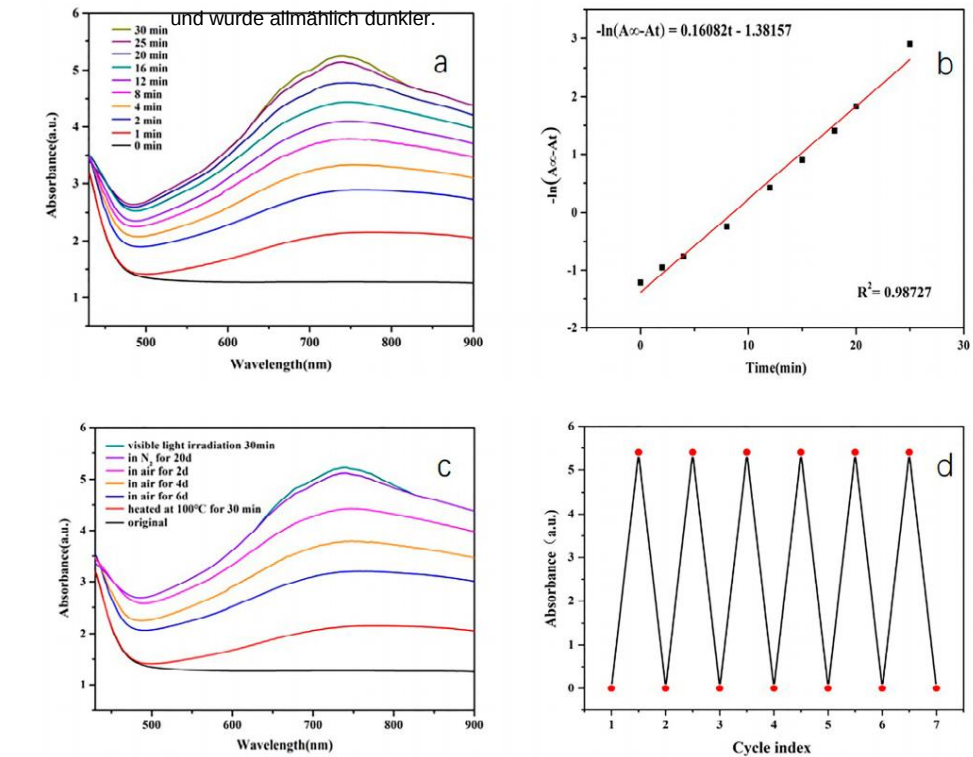


Abbildung 4. (a) UV-Vis-Absorptionsspektren von PMoA/PTH mit unterschiedlicher Bestrahlungsdauer in der Färbung Prozess, (b) Kinetische Darstellung des photochromen Prozesses erster Ordnung des PMoA/PTH-Films, (c) UV-Vis Absorptionsspektren von PMoA/PTH unter verschiedenen Bedingungen im Entfärbungsprozess, (d) Die Reversibilität des Farbzyklus des PMoA/PTH-Films.

Der kinetische Prozess der Färbung von PMoA/PTH bei 740 nm wurde weiter analysiert (Abbildung 4b). Es zeigt sich, dass der photochrome Prozess die folgende erste Ordnung erfüllt kinetische Gleichung:

$$\ln(A_{\infty} - A_t) = kt + b$$

wobei A_{∞} der Absorptionswert bei Sättigung ist; A_t der Absorptionswert bei verschiedenen Bestrahlungszeiten während des Färbungsprozesses; k ist die Geschwindigkeitskonstante. Die Geschwindigkeitskonstante k des Färbeprozesses beträgt $0,16 \text{ min}^{-1}$, was auf die Vorteile von Verbundfolien in der photochrome Reaktion.

In Abbildung 4c wurde der Verblassungsprozess des PMoA/PTh-Hybridfilms dargestellt. Der PMoA/PTh-Hybridfilm würde in die Luft gelegt, die Farbe würde allmählich verblässen, aber wenn Der Hybridfilm wurde 20 Tage lang in eine N₂- Atmosphäre gelegt, die Farbe des Verbundfilms würde nicht verblässen. Dieses Phänomen deutete darauf hin, dass Sauerstoff eine Schlüsselrolle bei der Förderung der Verfärbung des Hybridfilms. Es wurde auch festgestellt, dass Erhitzung das Verblässen beschleunigen kann Prozess, da die Absorption um 80 % abnahm, als der Film bei 373 K erhitzt wurde für 30 Minuten.

Die Färbungs-Entfärbungszyklus-Experimente wurden durchgeführt, um die Reversibilität des PMoA/PTh-Hybridfilms. Nach Bestrahlung mit sichtbarem Licht, um die Sättigungsabsorption zu erreichen , konnte der Film durch Wärmebehandlung wiederverwendet werden. Wie in Abbildung 4d gezeigt, Es gab nur eine geringe Veränderung der Absorption nach 7-maligem Recycling, was zeigt, dass Der PMoA/PTh-Hybridfilm wies günstige photochrome Eigenschaften auf und war hochstabil und gute Reversibilität des photochromen Films [13].
Wie in Tabelle 1 gezeigt, wies der PMoA/PTh-Hybridfilm im Vergleich zu den anderen repräsentativen Proben eine hohe maximale Absorption auf, was darauf hindeutet, dass der Protonierungseffekt von PMoA gegenüber PTh im PMoA/PTh-Hybriddünnfilm die maximale Absorption und verbesserte die photochromen Eigenschaften des PMoA/PTh Hybridfilm.

Tabelle 1. Vergleich der maximalen Absorption von photochromen Materialien.

Photochromes Material	Die Dicke der Proben	Die maximale Absorption	Referenz
PMoA/PANI Hybridisierende Dünnschicht	1,8 µm	3,46	[10]
ZnO/PMoA	-	0,21	[14]
WO3 -x QDs	-	2,75	[15]
PVP/HTA-Hybriden	-	0,78	[16]
CsPbBr3-Quantenpunktfilme	-	0,78	[17]
PMoA/ZnO/PVP-Verbundfolie	-	0,32	[18]
Aromatische Sulfoniumoctamolybdate	fester Zustand	3.2	[19]
PMoA/PTh-Verbundfolie	2,0 µm	5.27	Diese Arbeit

Um die Veränderung der chemischen Mikroumgebung im Prozess der Photochromie weiter zu analysieren, XPS-Spektren von Mo 3d für den PMoA/PTh-Hybridfilm ohne und mit Bestrahlung sind in Abbildung 5 und Tabelle 2 dargestellt. Für den PMoA/PTh-Hybridfilm ist die Peaks traten bei 232,9 eV und 236,0 eV auf, die 3d_{3/2} bzw. 3d_{5/2} von Mo⁶⁺ zugeordnet wurden . und die Peaks bei 235,5 eV und 231,8 eV wurden 3d_{3/2} und 3d_{5/2} von Mo⁵⁺ zugeordnet ., Das Auftreten der charakteristischen Peaks von Mo⁵⁺ kann hier wie folgt gefolgert werden : Röntgenanregung. Nach der Bestrahlung verschieben sich die Peaks von Mo⁶⁺ auf 233,0 eV und 236,2 eV und Die Peaks von Mo⁵⁺ liegen bei 231,7 eV und 235,0 eV. Im Vergleich zum Spektrum vor Bestrahlung erhöht sich die Bindungsenergie von 3d von Mo⁶⁺ , und auch der Anteil von Mo⁵⁺ von 0,09 auf 0,33, was auf die Umwandlung von Mo⁶⁺ in Mo⁵⁺ zurückzuführen ist. Es kann schlussfolgerten, dass sich die chemische Mikroumgebung der Mo-Atome durch die Photoreduktionsreaktion.

Tabelle 2. Bindungsenergien des Mo3d-Energieniveaus und Mo⁵⁺/Mo⁶⁺-Verhältnisse des PMoA/PTh-Hybridfilms vor und nach der Beleuchtung.

Probe	Mo5+		Mo6+		Mo5+/Mo- Verhältnisse
	3W3/2	3W5/2	3W3/2	3W5/2	
Vor	231,8	235,5	232,9	236,0	0,09
Nach	231,7	235,0	233,0	236.2	0,33

0,09 bis 0,33, was auf die Umwandlung von Mo6+ in Mo5+ zurückzuführen ist. Daraus kann geschlossen werden, dass Die chemische Mikroumgebung der Mo-Atome wurde durch die Photoreduktion verändert Reaktion.

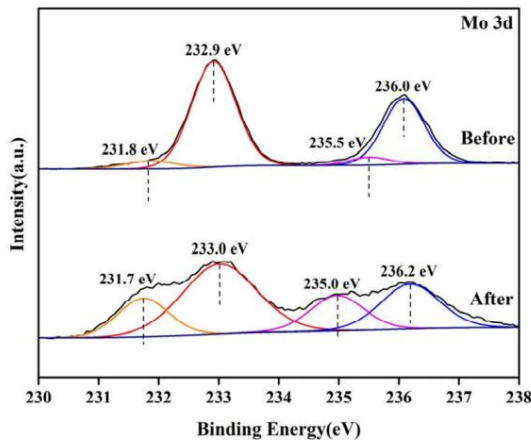


Abbildung 5. XPS-Spektren Mo 3d für PMoA/PTH-Hybridfilm ohne und mit Bestrahlung.

Um das obige photochrome Verhalten zu erklären, wurde der Mechanismus des Hybridfilms untersucht. Die photochromen Eigenschaften der anorganisch/organischen Hybridfilme in diesem

Papier hängt hauptsächlich von den Wechselwirkungen zwischen anorganischen und organischen Komponenten ab. Metallionen in den oxidierten Polyoxometallaten haben eine d0- Elektronenkonfiguration. Daher Vor d- Orbitale bei Bestrahlung, dem sogenannten Sauerstoff-Metall (OM) Ligand-Metall Ladungstransfer (LMCT). Dadurch wurden die Elektronen- und Lochladungen getrennt, was zu

Voraussetzung für eine stabile Färbung des Verbundfilms. Das Loch, das am Sauerstoffatom zurückbleibt mit nichtbindenden Elektronen am Schwefelatom des PTH interagiert. Dabei wird das Mo6+ Atom wurde zum Mo5+ Atom reduziert, wodurch Heteropolyblau entstanden. Wenn das Bleichmittel Prozess fand statt, ein Elektron wurde vom Mo5+ -Atom auf das Sauerstoffmolekül übertragen unter aerobe Bedingungen, so dass die Polyoxometallate oxidiert wurden.

Das Diagramm des photochromen Mechanismus des PMoA/PTH-Hybridfilms wird gezeigt in Abbildung 6. Aufgrund der Protonierung verringerte sich die Elektronendichte von PMoA während der Ladungstransfer (LMCT). Dadurch wurden die Elektronen- und Lochladungen getrennt, was zu einer Wechselwirkung mit PTH, wodurch die spektrale Rotverschiebung verursacht wurde, die die Existenz von Grenzflächeninteraktion zwischen PMoA und PTH. Nach Belichtung wird die Heteropolysäure zu Heteropolblau reduziert und die Protonen werden auf PMoA übertragen.

Atom wurde zum Mo5+ Atom reduziert, wodurch Heteropolyblau entstanden. Wenn das Bleichmittel Prozess fand statt, ein Elektron wurde vom Mo5+ -Atom auf das Sauerstoffmolekül übertragen, und unter aeroben Bedingungen, so dass die Polyoxometallate oxidiert wurden.

Das Diagramm des photochromen Mechanismus des PMoA/PTH-Hybridfilms ist in Abbildung 6. Aufgrund der Protonierung verringerte sich die Elektronendichte von PMoA während der Wechselwirkung mit PTH, was die spektrale Rotverschiebung verursachte, die die Existenz der Grenzfläche bestätigte Wechselwirkung zwischen PMoA und PTH. Nach Belichtung wird die Heteropolysäure reduziert zu Heteropolblau und die Protonen werden auf PMoA übertragen.

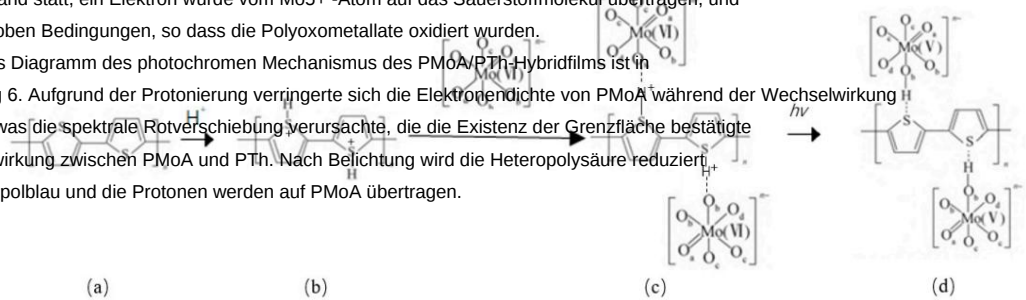


Abbildung 6. Das Diagramm des photochromen Mechanismus des PMoA/PTH-Hybridfilms. (a) PTH, (b) PTH nach der Protonierung, (c) PMoA/PTH-Verbundfilm (d) vor (c) und (d) nach Bestrahlung mit sichtbarem Licht.

4. Schlussfolgerung

Die photochromen PMoA/PTH-Materialien wurden hergestellt, indem man das Hybrid Substrat getropft wurde, um einen Film zu bilden. Die Geometrien von PMoA und PTH waren gut lution auf dem Substrat, um einen Film zu bilden. Die Geometrien von PMoA und PTH waren laut FTIR-Spektren im Hybridfilm gut erhalten. Bei der Bestrahlung wurden die Protonen in Polymer angeregt und über eine Ladungstransferbrücke auf PMoA übertragen. Heteropolyblau wurde in einer Photoreduktionsreaktion erzeugt, die von der Änderung von Polyblau wurde in einer Photoreduktionsreaktion erzeugt, die von einer Änderung der chemischen Mikroumgebung begleitet wurde. Der Bleichprozess erfolgte, als Mo5+ -Atome in Gegenwart von Sauerstoff zu Mo6+ -Atomen oxidiert wurden. Darüber hinaus war der Hybridfilm von günstiger zu Mo6+ -Atomen in Gegenwart von Sauerstoff. Darüber hinaus wies der Hybridfilm eine günstige Reversibilität und Stabilität auf. Der Protonierungsprozess zwischen PMoA und der PTH-Matrix wurde als Hauptursache der photochemischen Reaktion angesehen.

Autorenbeiträge: WZ hat zur allgemeinen Organisation aller Experimente beigetragen und den Originalentwurf verfasst. HZ (Hongmei Zhao) hat zu Experimenten zu photochromen Eigenschaften beigetragen.

Reversibilität und Stabilität. Der Protonierungsprozess zwischen PMoA und der PTh-Matrix wurde als Hauptursache der photochemischen Reaktion angesehen.

Autorenbeiträge: WZ hat zur allgemeinen Organisation aller Experimente und zur Erstellung des ursprünglichen Entwurfs beigetragen. HZ (Hongmei Zhao) hat zu Experimenten mit photochromen Eigenschaften, zur Datenanalyse und -visualisierung beigetragen. WF hat zur Probenvorbereitung und -charakterisierung beigetragen. HZ (Honggang Zhao) hat Ideen für alle Experimente, die Methodik und die Betreuung beigesteuert. Alle Autoren haben die veröffentlichte Version des Manuskripts gelesen und stimmen ihr zu.

Finanzierung: Diese Forschung erhielt keine externe Finanzierung.

Datenverfügbarkeitserklärung: Die Daten sind im Artikel enthalten.

Interessenkonflikte: Die Autoren erklären, dass keine Interessenkonflikte bestehen.

Verweise

1. Qin, B.; Chen, HY; Liang, H.; Fu, L.; Liu, X.; Qiu, X.; Liu, S.; Song, R.; Tang, Z. Reversible photoschaltbare Fluoreszenz in dünnen Filmen aus anorganischen Nanopartikeln und Polyoxometallat-Anordnungen. *J. Am. Chem. Soc.* **2010**, *132*, 2886–2888. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
2. Gu, HX; Bi, LH; Fu, Y.; Wang, N.; Liu, S.; Tang, Z. Mehrstufiges elektrisch gesteuertes Photolumineszenzschalten. *Chem. Wissenschaften*. **2013**, *4*, 4371–4377. [\[CrossRef\]](#)
3. Lu, J.; Zhang, X.; Ma, P.; Singh, V.; Zhang, C.; Niu, J.; Wang, J. Photochromes Verhalten eines neuen Polyoxomolybdate/Alkylamins Verbundwerkstoffe im Festkörper. *J. Mater. Sci.* **2018**, *53*, 3078–3086. [\[CrossRef\]](#)
4. Graca, VC; Sousa, CM; Coelho, P. Auf dem Weg zur Graufärbung photochromer Materialien mit Vinylidennaphthofuranen. *Farbstoff. Pigment*. **2020**, *176*. [\[CrossRef\]](#)
5. Bao, HF; Wang, XY; Yang, GQ; Li, H.; Zhang, F.; Feng, W. UV-Licht und sichtbares Licht Photochromie von anorganisch-organischen Mehrschichtfilme auf Basis von Polyoxometallat und Poly(acrylamid). *Colloid Polym. Sci.* **2014**, *292*, 2883–2889. [\[CrossRef\]](#)
6. Jing, XF; Zou, DL; Meng, QQ; Zhang, W.; Zhang, F.; Feng, W.; Han, X. Herstellung und sichtbares Licht-Photochromie eines neuartigen hybriden anorganisch-organischen Films auf Basis von Polyoxometallaten und Ethylcellulose. *Inorg. Chem. Commun.* **2014**, *46*, 149–154. [\[CrossRef\]](#)
7. Zhang, J.; Zou, Q.; Tian, H. Photochrome Materialien: Mehr als man auf den ersten Blick sieht. *Adv. Mater.* **2013**, *25*, 378–399. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
8. Toshihiro, Y. Photo- und Elektrochromie von Polyoxometallaten und verwandten Materialien. *Chem. Rev.* **1998**, *98*, 307–326.
9. Chen, J.; MeiAi, L.; Feng, W.; Xiong, DQ; Liu, Y.; Cai, WM Herstellung und Photochromie von Nanokomposit-Dünfilmen auf Basis über Polyoxometallate und Polyethylenglykol. *Mater. Lett.* **2007**, *61*, 5247–5249. [\[CrossRef\]](#)
10. Zeng, OR; Guo, SY; Sun, YB; Li, Z.; Feng, W. Durch Protonierung induzierte verbesserte optische photochrome Eigenschaften eines anorganisch-organischen Phosphormolybdänsäure/Polyanilin-Hybrid-Dünfilms. *Nanomaterials* **2020**, *10*, 1839. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
11. Lu, C.; Sun, Y.; Liu, JL; Wang, X.; Liu, SL; Feng, W. Verbesserte Photochromie des Heteropolysäure/Polyvinylpyrrolidon-Komposits Film durch TiO₂- Dotierung. *J. Appl. Polym. Sci.* **2015**, *132*, 41583. [\[CrossRef\]](#)
12. Sun, Y.; Wang, X.; Lu, Y.; Xuan, L.; Xia, S.; Feng, W.; Han, X. Herstellung und Photochromie von Phosphormolybdän Säure/Polyvinylpyrrolidon-Hybridfilm. *Chem. Res. Chin. Univ.* **2014**, *30*, 703–708. [\[CrossRef\]](#)
13. Wei, Y.; Han, B.; Dong, Z.; Feng, W. Mit Phosphormolybdänsäure modifizierte hochorganisierte TiO₂- Nanoröhren-Arrays mit schneller photochromer Leistung. *J. Mater. Sci. Technol.* **2019**, *35*, 1951–1958. [\[CrossRef\]](#)
14. Yue, T.; Han, B.; Wang, X.; Bai, L.; Feng, W. Sofortige photochrome Leistung von Verbundpulvern im sichtbaren Licht basierend über PMoA und ZnO-Nanoröhren. *Chem. Lett.* **2019**, *48*, 851–854. [\[CrossRef\]](#)
15. Liu Qi Hu Ch Wang, X. Hydrothermale Synthese von sauerstoffarmen Wolframoxid-Quantenpunkten mit ausgezeichneter photochromer Reversibilität. *Appl. Surf. Sci.* **2019**, *480*, 404–409.
16. Li, D.; Wei, J.; Dong, S.; Li, H.; Xia, Y.; Jiao, X.; Wang, T.; Chen, D. Neue PVP/HTA-Hybride für multifunktionales wiederbeschreibbares Papier. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2018**, *10*, 1701–1706. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
17. Qaid, SM; Alharbi, FH; Bedja, I.; Nazeeruddin, MK; Aldwayyan, AS Reduzierung der verstärkten spontanen Emissionsschwelle in CsPbBr₃-Quantenpunktfilmen durch Kontrolle der kompakten TiO₂-Schicht. *Nanomaterials* **2020**, *10*, 1605. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
18. Song, T.; Li, J.; Deng, Q.; Gao, Y. Herstellung, Charakterisierung, photochrome Eigenschaften und Mechanismus des PMoA/ZnO/PVP- Verbundfilms. *Molecules* **2023**, *28*, 7605. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
19. Kumar, A.; Gupta, AK; Devi, M.; Gonsalves, KE; Pradeep, CP Engineering Multifunctionality in Hybrid Polyoxometalates: Aromatische Sulfoniumoctamolybdate als ausgezeichnete photochrome Materialien und selbsttrennende Katalysatoren für die Epoxidierung. *Inorg. Chem.* **2017**, *56*, 10325–10336. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

Haftungsausschluss/Anmerkung des Herausgebers: Die in allen Veröffentlichungen enthaltenen Aussagen, Meinungen und Daten sind ausschließlich die der einzelnen Autoren und Mitwirkenden und nicht die von MDPI und/oder den Herausgebern. MDPI und/oder die Herausgeber lehnen jegliche Verantwortung für Personen- oder Sachschäden ab, die aus den im Inhalt erwähnten Ideen, Methoden, Anweisungen oder Produkten resultieren.