

Communication

# Propriétés photochromiques à la lumière visible d'un inorganique-organique Film mince hybride acide phosphomolybdique/polythiophène

Wanqing Zhao <sup>1</sup>, Hongmei Zhao <sup>1</sup>, Wei Feng <sup>2</sup>  et Honggang Zhao <sup>1,\*</sup><sup>1</sup> École de chimie et de génie chimique, Université normale du Xinjiang, Urumqi 830054, China Key Lab of<sup>2</sup> Groundwater Resources and Environment, Ministère de l'Éducation, Jilin University, Changchun 130021, Chine \* Correspondance :

xjnu1609@xjnu.edu.cn

**Résumé :** Un film hybride photochromique à lumière visible a été synthétisé en combinant l'acide phosphomolybdique (PMoA) avec la matrice polythiophène (PTh). La microstructure et les propriétés photochromiques des matériaux ont été analysées par microscopie à force atomique (AFM), spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), spectroscopie photoélectronique à rayons X (XPS) et spectres ultraviolet-visible (UV-vis). Selon les spectres FTIR, les géométries de PMoA et de PTh étaient bien préservées dans le film hybride et il existe une forte interaction à l'interface de PMoA et de PTh. Les spectres XPS ont révélé le changement du microenvironnement chimique et la réduction des atomes Mo<sup>6+</sup> dans la réaction de photoréduction. Sous irradiation par la lumière visible, le film composite est passé du transparent au bleu et s'est approfondi progressivement, générant un bleu hétéropoly. Le film hybride présente également une réversibilité en présence d'oxygène. Les résultats ont indiqué que la réaction photochromique était incompatible avec le mécanisme de transfert d'électrons photoinduit.

**Mots clés :** acide phosphomolybdique; le polythiophène; photochromisme; film hybride



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

Zhao, H. Propriétés

photochromiques à la lumière visible

d'un film mince hybride acide

phosphomolybdique/polythiophène

inorganique-organique. Chimie 2024, 6,

469–475. [https://doi.org/10.3390/](https://doi.org/10.3390/chemistry6030026)

chemistry6030026

Rédacteur académique : Matthias Lehmann

Reçu : 25 avril 2024

Révisé : 1er juin 2024

Accepté : 5 juin 2024

Publié : 7 juin 2024



Copyright : © 2024 par les auteurs.

Licencié MDPI, Bâle, Suisse.

Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et

conditions des Creative Commons

Licence d'attribution (CC BY) ([https://creativecommons.org/licenses/by/](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

4.0/).

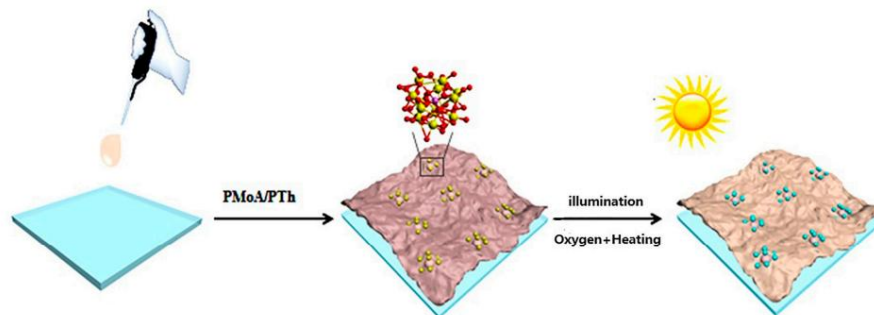
## 1. Introduction

Les matériaux photochromiques ont été considérés comme un axe de recherche prometteur dans le domaine des matériaux fonctionnels et appliqués dans les domaines des matériaux de stockage optique d'informations, des dispositifs photoélectriques, de la commutation optique et de la recherche biomédicale [1–4]. Ces dernières années, le développement de matériaux composites inorganiques/organiques et l'introduction de la technologie d'auto-assemblage, de la chimie des modèles et d'autres méthodes dans la préparation ont considérablement amélioré les propriétés photochromiques des matériaux, offrant ainsi une direction d'application plus large.

Les hétéropolyoxométallates sont l'un des matériaux photochromiques les plus populaires en raison de leur haute réductibilité d'oxydation, de leur conductivité protonique élevée et de leur excellente solubilité [7,8]. Afin d'augmenter le potentiel d'application des hétéropolyoxométallates, des efforts ont été faits pour les introduire dans des réseaux polymères afin d'améliorer les propriétés physiques des matériaux photochromiques telles que la résistance mécanique, la transparence optique et l'usinabilité [9–11]. Les hétéropolyoxométallates, en tant que porteurs de charge anionique, ont été utilisés dans des films désordonnés tels que des films sol-gel en se liant à des groupes cationiques sur des chaînes de polymères organiques via des interactions faibles telles que la liaison hydrogène, la force électrostatique et la force de Van der Waals. Sun et ses collègues [12] ont synthétisé un film hybride PMoA/polyvinylpyrrolidone (PVP) et ont découvert que la cause principale de la réaction photochimique était le transfert de protons entre la matrice PMoA et PVPd. L'interaction des polyoxométallates et du polymère via des liaisons non covalentes a offert une approche utile pour améliorer les propriétés physiques et chimiques des matériaux photochromiques inorganiques/organiques.

Le polythiophène (PTh) présente une bonne stabilité photoélectrique, de bonnes propriétés filmogènes, une conductivité élevée et une faible largeur de bande interdite de 2,02 eV, ce qui présente un grand potentiel d'application en chimie photoélectrique. PTh possède un grand système électronique  $\pi$ -conjugué et sa capacité à donner des électrons est meilleure que le polypyrrole et la polyaniline. PTh peut former

de P et de mélange avec 20 mL de N,N-diméthylformamide (DMF) pour former la solution n° 0,02 g d'acrylate de polyéthylène glycol (PEG) et de PMAA mélange à 20 mg/mL dans le DMF pour former une solution n°2 à la concentration de 0,2 mg/mL. Les solutions ci-dessus ont été mélangées à la solution n°2 à la son agitation pour former la solution n°3. Un pipette à pipeter a été utilisé pour déposer cette solution mixte sur une surface de quartz pour former un film mince hybride PMAA/PPy avec une quantité de 100 µL, comme montré sur la figure 1 indiquée sur la figure 1. Les films de PMAA/PPy formés de PMAA/PPy formés étaient d'épaisseur 100 nm. Le spectre ultraviolet-visible de l'échantillon a été testé sur un quartz de quartz, la 2,0 µm. Le test de l'absorption de la lumière visible (AFM) de l'échantillon a été effectué sur une surface de silicium et le test de la conductivité a été effectué sur une feuille de verre.



## Figure 1. Processus de synthèse et réaction photochromique

Des expériences photochromiques ont été réalisées à l'aide d'une lampe Xe de 300 W (PLS-SXE, Pékin Perfectlight Technology Co., Ltd., Pékin, Chine) avec un filtre UV (passe au-dessus de 400 nm longueur d'onde) comme source de lumière visible sans aucune autre source de lumière. La distance entre la lampe et le film ont été réglés à 150 mm. Des expériences d'irradiation par la lumière visible ont été réalisée dans l'air pour obtenir une série de courbes d'absorbance sous différentes irradiations

Des expériences photochromiques ont été réalisées en utilisant une lampe Xe de 300 W (PLS-SXE, Beijing Perfectlight Technology Co., Ltd., Pékin, Chine) avec un filtre UV (passant au-dessus d'une longueur d'onde de 400 nm) comme source de lumière visible sans aucune autre lumière. sources. La distance entre la lampe et le film a été ajustée à 150 mm. Des expériences d'irradiation par la lumière visible ont été réalisées dans l'air pour obtenir une série de courbes d'absorbance sous différentes durées d'irradiation. Ensuite, le film composite a été conservé dans l'obscurité pour observer les processus de blanchiment, et l'absorbance correspondante a été mesurée. Toutes les expériences ont été réalisées et effectuées à température ambiante.

### 3. Résultats

Les spectres FTIR des films hybrides PMoA/PTH et PTh et PMoA/PTH purs dans la gamme de 4000 à 400  $\text{cm}^{-1}$  sont illustrés à la figure 2. L'absorption cumulée à 1542  $\text{cm}^{-1}$  et 1487  $\text{cm}^{-1}$  sont les pics d'absorption caractéristiques du phényle, qui sont classés comme des pics d'absorption asymétriques et des vibrations. Les représentations typiques de la structure du polythiophène, respectivement. Le pic d'absorption caractéristique à 1325  $\text{cm}^{-1}$  a été attribué à la vibration d'étirement CS du planneau polythiophène, et le pic d'absorption à 1031  $\text{cm}^{-1}$  et 1169  $\text{cm}^{-1}$  est attribué à la vibration de flexion dans le plan de liaison CH sur l'anneau polythiophène. Le pic d'absorption à 783  $\text{cm}^{-1}$  est attribué à la vibration de flexion hors plan de la liaison C-H, qui a été superposée par les signaux PMoA. Ces signaux indiquent que la structure de la PTh est intacte. La PTh est intacte et non détruite dans le film hybride, et la structure géométrique de la PTh était toujours conservée dans le film composite.

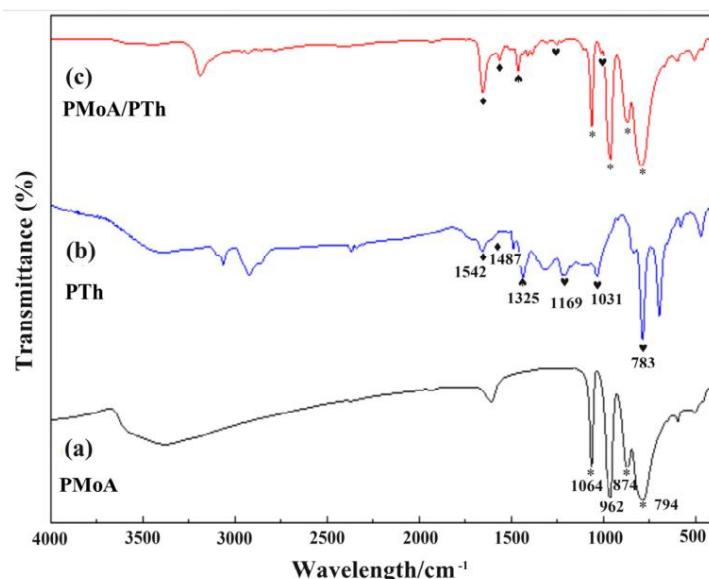
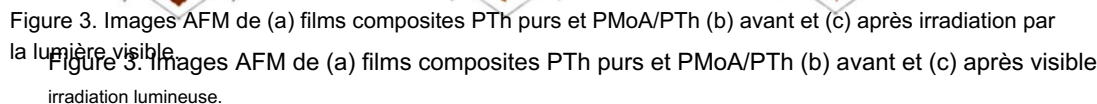


Figure 2. Spectres FTIR du film hybride PMoA, PTh et PMoA/PTH.

Dans le spectre PMoA/PTH, il existe quatre bandes typiques à 1064, 962, 874 et 794  $\text{cm}^{-1}$  correspondant aux bandes de vibration de  $\nu(\text{P-Oa})$ ,  $\nu(\text{Mo-Od})$ ,  $\nu(\text{Mo-Ob})$ ,  $\nu(\text{Mo-Oc})$ , qui sont similaires à celles de PMoA pur et ne présentent que quelques décalages. Il démontre que la géométrie Keggin du PMoA est préservée dans le film composite. La longueur d'onde du PMoA dans le film composite est transformée en raison de l'amélioration de l'interaction coulombienne entre le PMoA et le substrat polymère, et le transfert de charge se produit.

Les images AFM (Figure 3) représentent la morphologie de surface du PTh pur et du PMoA/PTH purs et PMoA/PTH avant et après irradiation par la lumière visible. Le film PTh (Figure 3a) montre la structure en forme de pic-pic de taille de particule similaire et la rugosité quadratique moyenne (RMS) était de 7 nm. Comme le montre la figure 3b, c, la morphologie du film a évidemment changé après la combinaison de PTh et de PMoA ; le RMS des films hybrides PMoA/PTH était de 18 nm (par rapport à la combinaison de PTh et de PMoA ; le RMS des films hybrides PMoA/PTH était de 18 nm (contre 7 nm pour le PTh). On peut en déduire que l'interaction des liaisons hydrogène entre PTh

Les chaînes polymères sont perturbées par l'action des particules de PMoA sous l'interaction force des liaisons hydrogène entre les chaînes polymères PMoA et PTh. Après la lumière optique illumination, le RMS des films composites PMoA/PTH est passé de 18 à 31 nm, ce qui a indiqué la formation de bleu hétéropoly dans la réaction de photoréduction et le transfert de protons augmenté l'angle spatial du polymère PTh.

[illegible]

s'est approfondi progressivement.

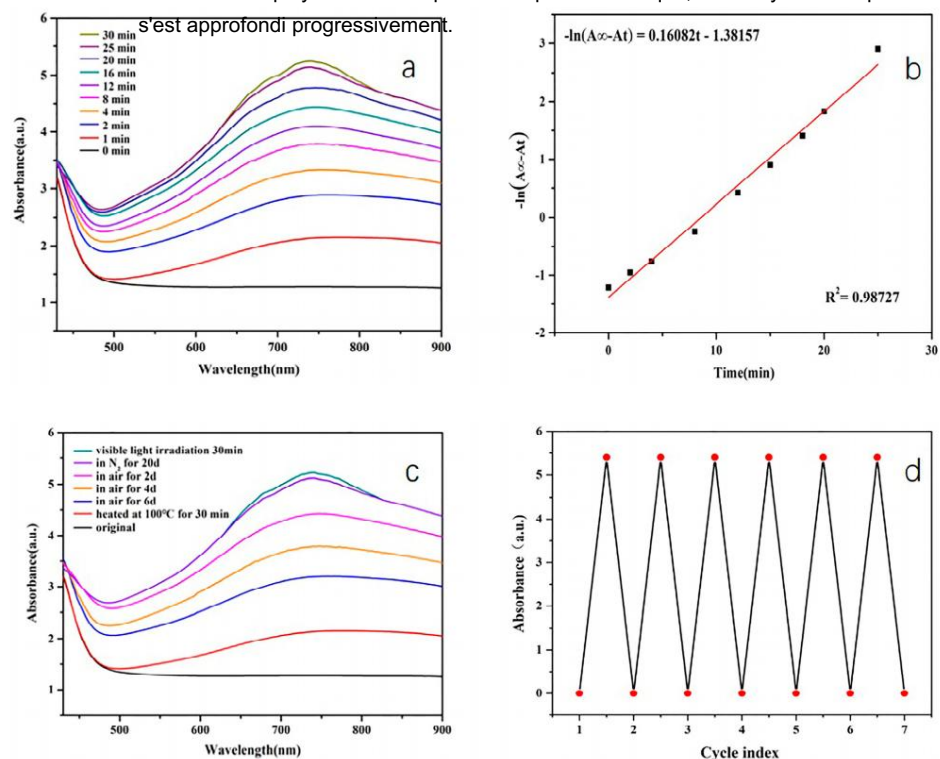


Figure 4. (a) Spectres d'absorption UV-Vis de PMoA/PTh avec un temps d'irradiation varié dans la coloration processus, (b) Tracé cinétique du processus photochromique de premier ordre du film PMoA/PTh, (c) UV-Vis spectres d'absorption de PMoA/PTh dans différentes conditions du processus de décoloration, (d) Le réversibilité du cycle de coloration du film PMoA/PTh.

Le processus cinétique de coloration de PMoA/PTh à 740 nm a été analysé plus en détail (Figure 4b). Il est révélé que le processus photochromique satisfait au premier ordre suivant équation cinétique :

$$-\ln(A^\infty - A_t) = kt + b$$

où  $A_{\infty}$  est la valeur d'absorbance à saturation ;  $A_t$  est la valeur d'absorbance sur différents temps d'irradiation à travers le processus de coloration ;  $k$  est la constante de vitesse. La constante de taux  $k$  du processus de coloration est de  $0,16 \text{ min}^{-1}$  , indiquant les avantages du film composite dans le réponse photochromique.

Sur la figure 4c, le processus de décoloration du film hybride PMoA/PTh a été montré. Quand le film hybride PMoA/PTh était placé dans l'air, la couleur s'estomperait progressivement, mais si le film hybride a été placé en atmosphère N2 pendant 20 jours, la couleur du film composite ne s'estomperait pas. Ce phénomène indique que l'oxygène joue un rôle clé dans la promotion de la décoloration du film hybride. Il a également été constaté que le chauffage peut accélérer la décoloration. processus car l'absorbance a été réduite de 80 % lorsque le film a été chauffé à 373 K pendant 30 minutes.

Les expériences de cycle de coloration-décoloration ont été réalisées pour déterminer la réversibilité du film hybride PMoA/PTh. Après irradiation par la lumière visible pour atteindre l'absorbance de saturation, le film pourrait être réutilisé par traitement thermique. Comme le montre la figure 4d, il n'y a eu qu'un léger changement d'absorbance après recyclage 7 fois, démontrant que Le film hybride PMoA/PTh présente des propriétés photochromiques favorables, avec une grande stabilité et une bonne réversibilité du film photochromique [13].

Comme le montre le tableau 1, le film hybride PMoA/PTh présentait une absorbance maximale élevée par rapport aux autres échantillons représentatifs, ce qui indiquait que l' effet de protonation du PMoA vers la PTh dans le film mince hybride PMoA/PTh pourrait augmenter la absorbance maximale et amélioration considérable des propriétés photochromiques du PMoA/PTh film hybride.

Tableau 1. Comparaison de l'absorbance maximale des matériaux photochromiques.

| Matériau photochromique                 | L'épaisseur des échantillons | L'absorbance maximale | Référence  |
|-----------------------------------------|------------------------------|-----------------------|------------|
| Film mince hybridant PMoA/PANI          | 1,8 µm                       | 3,46                  | [dix]      |
| ZnO/PMoA                                | -                            | 0,21                  | [14]       |
| WO3 -x QD                               | -                            | 2,75                  | [15]       |
| Hybrides PVP/HTA                        | -                            | 0,78                  | [16]       |
| Films à points quantiques CsPbBr3       | -                            | 0,78                  | [17]       |
| Film composite PMoA/ZnO/PVP             | -                            | 0,32                  | [18]       |
| Octamolybdates de sulfonium aromatiques | état solide                  | 3.2                   | [19]       |
| Film composite PMoA/PTh                 | 2,0 µm                       | 5.27                  | Ce travail |

Pour analyser plus en détail le changement du microenvironnement chimique dans le processus de photochromisme, spectres XPS de Mo 3d pour le film hybride PMoA/PTh sans et avec L'irradiation est présentée à la figure 5 et au tableau 2. Pour le film hybride PMoA/PTh, le des pics sont apparus à 232,9 eV et 236,0 eV attribués respectivement à 3d3/2 et 3d5/2 de Mo6+ , et les pics situés à 235,5 eV et 231,8 eV ont été attribués à 3d3/2 et 3d5/2 de Mo5+, respectivement. L'apparition des pics caractéristiques de Mo5+ ici peut être déduite comme Excitation aux rayons X. Après irradiation, les pics de Mo6+ se déplacent vers 233,0 eV et 236,2 eV, et les pics de Mo5+ apparaissent à 231,7 eV et 235,0 eV. Par rapport au spectre d'avant irradiation, l'énergie de liaison du 3d du Mo6+ augmente, et la proportion de Mo5+ également augmente de 0,09 à 0,33, ce qui est attribué à la conversion du Mo6+ en Mo5+. Ça peut être a conclu que le microenvironnement chimique des atomes de Mo a été modifié en raison de la réaction de photoréduction.

Tableau 2. Énergies de liaison du niveau d'énergie Mo3d et des rapports Mo5+/Mo du film hybride PMoA/PTh avant et après l'éclairage.

| Échantillon | Mo5+  |       | Mo6+  |       | Ratios Mo5+/Mo |
|-------------|-------|-------|-------|-------|----------------|
|             | 3d3/2 | 3d5/2 | 3d3/2 | 3d5/2 |                |
| Avant       | 231,8 | 235,5 | 232,9 | 236,0 | 0,09           |
| Après       | 231,7 | 235,0 | 233,0 | 236.2 | 0,33           |

0,09 à 0,33, ce qui est attribué à la conversion du Mo6+ en Mo5+. On peut conclure que le microenvironnement chimique des atomes de Mo a été modifié en raison de la photoréduction réaction.

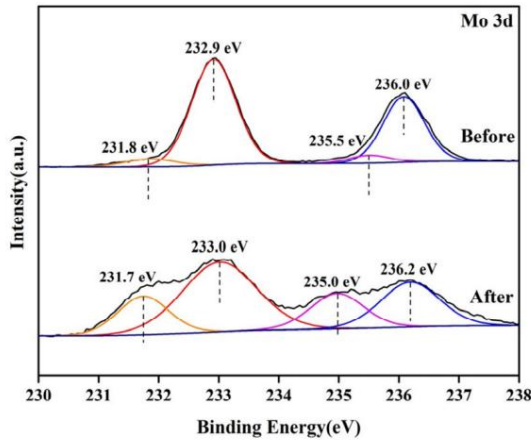


Figure 5. Spectres XPS Mo 3d pour film hybride PMoA/PTH sans et avec irradiation.

Pour expliquer le comportement photochromique ci-dessus, le mécanisme du film hybride a été étudié. Les propriétés photochromiques des films hybrides inorganiques/organiques dans ce

Le papier dépend principalement des interactions entre les composants inorganiques et organiques. Le ions métalliques Mo5+ dans les polyoxométalates oxydés ont des configurations électroniques d0 ; donc, Échantillonnez les électrons de faible énergie des orbitales de l'oxygène 2p qui ont été excités vers un état de métal à haute énergie Avant 231,8 235,5 232,9 236,0 les orbitales d lors de l'irradiation, qui est ce que l'on appelle le ligand oxygène-métal (OM) Après 233,0 231,7 235,0 236,2 transfert de charges (LMCT). Ainsi, les charges d'électrons et de trous ont été séparées, fournissant ainsi

une condition pour une coloration stable du film composite. Le trou laissé au niveau de l'atome d'oxygène Pour interagir avec des électrons non liants sur l'atome de soufre du PTh. Dans ce processus, le Mo6+ enquête. Les propriétés photochromiques des films hybrides inorganiques/organiques dans ce L'atome a été réduit à l'état Mo5+, générant des bleus d'hétéropôle. Quand le blanchiment Le papier dépend principalement des interactions entre les composants inorganiques et organiques. Le processus s'est produit, un électron a été transféré de l'atome Mo5+ à la molécule d'oxygène sous les ions métalliques dans les polyoxométalates oxydés ont des configurations électroniques d0 ; donc, conditions aérobies de sorte que les polyoxométalates soient oxydés. les électrons de faible énergie des orbitales 2p de l'oxygène ont été excités jusqu'à un état de métal à haute énergie

Le schéma du mécanisme photochromique du film hybride PMoA/PTH est présenté sur la figure 6. En raison de la protonation, la densité électronique du PMoA a diminué au cours de la d orbitales lors de l'irradiation, qui est ce qu'on appelle le ligand oxygène-métal (O-M) sur métal sur la figure 6. En raison de la protonation, la densité électronique du PMoA a diminué au cours de la transfert de charges (LMCT). Ainsi, les charges d'électrons et de trous ont été séparées, fournissant ainsi un condition pour une coloration stable du film composite. Le trou laissé au niveau de l'atome d'oxygène interaction d'interface entre PMoA et PTh. Après exposition à la lumière, l'hétéropolyacide est interagi avec des électrons non liants sur l'atome de soufre de PTh. Dans ce processus, le Mo6+ réduit au bleu hétéropoly et les protons sont transférés au PMoA. L'atome a été réduit à l'état Mo5+, générant des bleus d'hétéropôle. Quand le blanchiment processus s'est produit, un électron a été transféré de l'atome Mo5+ à la molécule d'oxygène sans der conditions aérobies de sorte que les polyoxométalates soient oxydés.

Le schéma du mécanisme photochromique du film hybride PMoA/PTH est présenté dans Figure 6. En raison de la protonation, la densité électronique du PMoA a diminué au cours de l'interaction. tion avec PTh, provoquant ainsi le redshift spectral, qui a vérifié l'existence de l'interface interaction entre PMoA et PTh. Après exposition à la lumière, l'hétéropolyacide est réduit au bleu hétéropoly et les protons sont transférés au PMoA.



Figure 6. Le schéma du mécanisme photochromique du film hybride PMoA/PTH. (a) PTh (b) PTh après protonation, film composite PMoA/PTH (c) avant et (d) après irradiation par la lumière visible.

#### 4. Conclusions

Les matériaux photochromiques PMoA/PTH ont été préparés en laissant tomber l'hybride sur le substrat pour former un film. Les géométries de PMoA et PTh étaient bien préservées dans le film hybride selon les spectres FTIR. Lors de l'irradiation, les protons dans le film hybride selon les spectres FTIR. Lors de l'irradiation, les protons du ou des polymères organiques sont excités et transférés au PMoA via un pont de transfert de charge. Le bleu hétéropolymère a été généré lors d'une réaction de photoréduction accompagnée d'un changement de Le poly bleu a été généré lors d'une réaction de photoréduction accompagnée d'un changement de microenvironnement chimique. Le processus de blanchiment s'est produit lorsque les atomes de Mo5+ ont été oxydés en atomes de Mo6+ en présence d'oxygène. De plus, le film hybride présentait des avantages aux atomes Mo6+ en présence d'oxygène. De plus, le film hybride présentait une réversibilité et une stabilité favorables. Le processus de protonation entre PMoA et la matrice PTh a été considéré comme la cause majeure de la réaction photochimique.

Contributions d'auteur.: WZ a contribué à l'organisation globale de toutes les expériences et à la rédaction du projet original. HZ (Hongmei Zhao) a contribué aux expériences sur les propriétés photochromiques,

réversibilité et stabilité. Le processus de protonation entre PMoA et la matrice PTh a été considéré comme la cause majeure de la réaction photochimique.

Contributions de l'auteur : WZ a contribué à l'organisation globale de toutes les expériences et à la rédaction du projet original. HZ (Hongmei Zhao) a contribué aux expériences sur les propriétés photochromiques, à l'analyse et à la visualisation des données. WF a contribué à la préparation et à la caractérisation des échantillons. HZ (Honggang Zhao) a contribué à fournir des idées pour toutes les expériences, la méthodologie et la supervision. Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche n'a reçu aucun financement externe.

Déclaration de disponibilité des données : les données sont contenues dans l'article.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

## Les références

1. Qin, B. ; Chen, HY; Liang, H. ; Fu, L. ; Liu, X. ; Qiu, X. ; Liu, S. ; Chanson, R. ; Tang, Z. Fluorescence photocommutable réversible dans des films minces d'assemblages de nanoparticules inorganiques et de polyoxométalate. *Confiture. Chimique. Soc.* 2010, 132, 2886-2888. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
2. Gu, HX; Bi, LH; Fu, Y. ; Wang, N. ; Liu, S. ; Tang, Z. Commutation de photoluminescence à commande électrique multi-états. *Chimique. Sci.* 2013, 4, 4371-4377. [\[Référence croisée\]](#)
3. Lu, J. ; Zhang, X. ; Carte., Singh, V. ; Zhang, C. ; Niu, J. ; Wang, J. Comportement photochromique d'un nouveau polyoxomolybdate/alkylamine composite à l'état solide. *J. Mater. Sci.* 2018, 53, 3078-3086. [\[Référence croisée\]](#)
4. Graça, VC ; Sousa, CM; Coelho, P. Vers une coloration grise des matériaux photochromiques utilisant des vinylidène-naphtofuranes. *Colorant. Pigment.* 2020, 176. [\[Réf. croisée\]](#)
5. Bao, HF ; Wang, XY; Yang, GQ ; Li, H. ; Zhang, F. ; Feng, W. Photochromisme à la lumière UV et à la lumière visible des éléments inorganiques-organiques films multicouches à base de polyoxométalate et de poly(acrylamide). *Polymère colloïdal. Sci.* 2014, 292, 2883-2889. [\[Référence croisée\]](#)
6. Jing, SUP; Zou, DL; Meng, QQ ; Zhang, W. ; Zhang, F. ; Feng, W. ; Han, X. Fabrication et photochromisme en lumière visible d'un nouveau film hybride inorganique-organique à base de polyoxométalates et d'éthylcellulose. *Inorg. Chimique. Commun.* 2014, 46, 149-154. [\[Référence croisée\]](#)
7. Zhang, J. ; Zou, Q. ; Tian, H. Matériaux photochromiques : plus que ce que l'on voit. *Av. Maître.* 2013, 25, 378-399. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#) 8. Toshihiro, Y. Photo- et électrochromisme des polyoxométalates et matériaux associés. *Chimique. Rév.* 1998, 98, 307-326.
9. Chen, J. ; MeiAi, L. ; Feng, W. ; Xiong, DQ; Liu, Y. ; Cai, WM Préparation et photochromisme de couches minces nanocomposites à base sur polyoxométalate et polyéthylèneglycol. *Maître. Lett.* 2007, 61, 5247-5249. [\[Référence croisée\]](#)
10. Zeng, Oregon ; Guo, SY; Soleil, YB ; Li, Z. ; Feng, W. Propriétés photochromiques de lumière optique améliorées induites par la protonation d'un film mince hybride acide phosphomolybdique/polyaniline inorganique-organique. *Nanomatériaux* 2020, 10, 1839. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)
11. Lu, C. ; Soleil, Y. ; Liu, JL; Wang, X. ; Liu, SL; Feng, W. Photochromisme amélioré du composite hétéropolyacide/polyvinylpyrrolidone film par dopage TiO<sub>2</sub>. *J.Appl. Polyme. Sci.* 2015, 132, 41583. [\[Réf. croisée\]](#)
12. Soleil, Y. ; Wang, X. ; Lu, Y. ; Xuan, L. ; Xia, S. ; Feng, W. ; Han, X. Préparation et photochromisme en lumière visible du phosphomolybdique film hybride acide/polyvinylpyrrolidone. *Chimique. Rés. Menton. Univ.* 2014, 30, 703-708. [\[Référence croisée\]](#)
13. Wei, Y. ; Han, B. ; Dong, Z. ; Feng, W. Réseaux de nanotubes TiO<sub>2</sub> hautement organisés modifiés par l'acide phosphomolybdique avec des performances photochromiques rapides. *J. Mater. Sci. Technologie.* 2019, 35, 1951-1958. [\[Référence croisée\]](#)
14. Yue, T. ; Han, B. ; Wang, X. ; Caution., Feng, W. Performance photochromique instantanée à la lumière visible des poudres composites à base sur les nanotubes PMoA et ZnO. *Chimique. Lett.* 2019, 48, 851-854. [\[Référence croisée\]](#)
15. Liu Qi Hu Ch Wang, X. Synthèse hydrothermale de points quantiques d'oxyde de tungstène déficients en oxygène avec une excellente photochromie réversibilité. *Appl. Le surf. Sci.* 2019, 480, 404-409.
16. Li, D. ; Wei, J. ; Dong, S. ; Li, H. ; Xia, Y. ; Jiao, X. ; Wang, T. ; Chen, D. Nouveaux hybrides PVP/HTA pour papier réinscriptible multifonctionnel. *Application ACS. Maître. Interfaces* 2018, 10, 1701-1706. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
17. Qaid, SM ; Alharbi, FH; Bedja, I. ; Nazeeruddin, MK; Aldwayyan, AS réduisant le seuil d'émission spontanée amplifiée dans les films à points quantiques CsPbBr<sub>3</sub> en contrôlant la couche compacte de TiO<sub>2</sub>. *Nanomatériaux* 2020, 10, 1605. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)
18. Chanson, T. ; Li, J. ; Deng, Q. ; Gao, Y. Préparation, caractérisation, propriétés photochromiques et mécanisme du film composite PMoA/ZnO/PVP. *Molécules* 2023, 28, 7605. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)
19. Kumar, A. ; Gupta, AK ; Devi, M. ; Gonsalves, KE; Pradeep, CP Engineering Multifonctionnalité des polyoxométalates hybrides : octamolybdates de sulfonium aromatiques comme excellents matériaux photochromiques et catalyseurs auto-séparables pour l'époxydation. *Inorg. Chimique.* 2017, 56, 10325-10336. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)

Avis de non-responsabilité/Note de l'éditeur : Les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles du ou des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou du ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout préjudice corporel ou matériel résultant des idées, méthodes, instructions ou produits mentionnés dans le contenu.