

Personnalisation de composants de montre utilisant un nouveau procédé de revêtement (PVD) interchangeable

Evert Merx^a, Lokeshwar Bandhu^a, Smriti Keshkar^a,
John Norton^a, Luc Lai^a, Albert Tsai^a, Andrew Pauza^a,
Harish Bhaskaran^{a,b} et Peiman Hosseini^a

^a Bodle Technologies Ltd
Begbroke Science Park, Begbroke Hill, Oxford, OX5 1PF, UK
pei@bodletechnologies.com – www.bodletechnologies.com

^b Department of Materials University of Oxford, Oxford, OX1 3PH, UK

L'ajout d'un revêtement métallique, d'une protection ou d'autres éléments ornementaux aux composants d'une montre est souvent effectué par des procédés de Dépôt Physique en phase Vapeur (PVD). Dans cet article, nous présentons un nouveau type de procédé de revêtement PVD hautement polyvalent et interchangeable ayant la capacité d'afficher des couleurs de haute qualité avec une dépendance angulaire presque nulle sur tout type de substrat. Par ailleurs, le revêtement peut être changé de manière réversible entre deux ou trois couleurs en employant un système de laser pulsé et en n'ayant recours à aucune source constante d'énergie (piles, électronique, etc.) pour maintenir un état de couleur spécifique. La modulation de couleurs est réalisée par le changement réversible de la phase physique d'une couche continue ultra-mince (<10 nanomètres) de Matériau à Changement de Phase (PCM) se trouvant entre deux couches transparentes. La polyvalence de cette nouvelle technique sans-encre, sans-modelage et non-destructive est proposée comme un nouveau modèle distinctif de création et de personnalisation de masse des composants de montre.

Mots-clés: Dépôt physique en phase vapeur, revêtements, personnalisation, couleur, interchangeable, écriture au laser.

Introduction

La coloration de composants de montre comporte traditionnellement des limites considérables, à savoir le choix de couleurs et la présence non-désirée d'une dépendance angulaire sur les couleurs reflétées, ou tout simplement la difficulté de fabrication. De plus, aucune modification ne peut être exécutée sur le design après la fabrication sans complètement désassembler la montre et sans retirer le cadran pour le remplacer. Dans cet article, nous présentons un nouveau type de procédé de revêtement (PVD) hautement polyvalent qui peut être utilisé non seulement pour ajouter toute couleur souhaitée à un cadran de montre ou à toute autre surface d'une montre, mais qui peut être aussi utilisé pour ajouter des décorations multicolores à n'importe quelle phase de fabrication, ou même après la vente d'une montre. Pour parvenir à une telle conception technologique,

nous nous sommes inspirés de la nature. Les animaux et les plantes exposent différentes couleurs à des fins spécifiques comme pour s'accoupler, attirer les proies ou éviter les prédateurs. Bien que les couleurs dans la nature soient le résultat d'une pigmentation ou dues aux traits d'absorption de lumière de composés spécifiques, il existe plusieurs organismes qui utilisent des techniques complexes d'interférences lumineuses pour filtrer la lumière ambiante en des couleurs incroyablement intenses et pures. Prenons par exemple, les ailes bleues du papillon morpho ou les écailles réfléchissantes d'un blanc éclatant du coléoptère cyphochilus. Étrangement, ces insectes arborent ces couleurs exceptionnelles, mais ils ne les possèdent pas en tant que tel; ces couleurs sont le résultat d'interférences lumineuses de curieuses structures à l'échelle nanométrique qui sont particulières à leurs corps. Modifier ces structures particulières en les détruisant ou en les couvrant d'un liquide

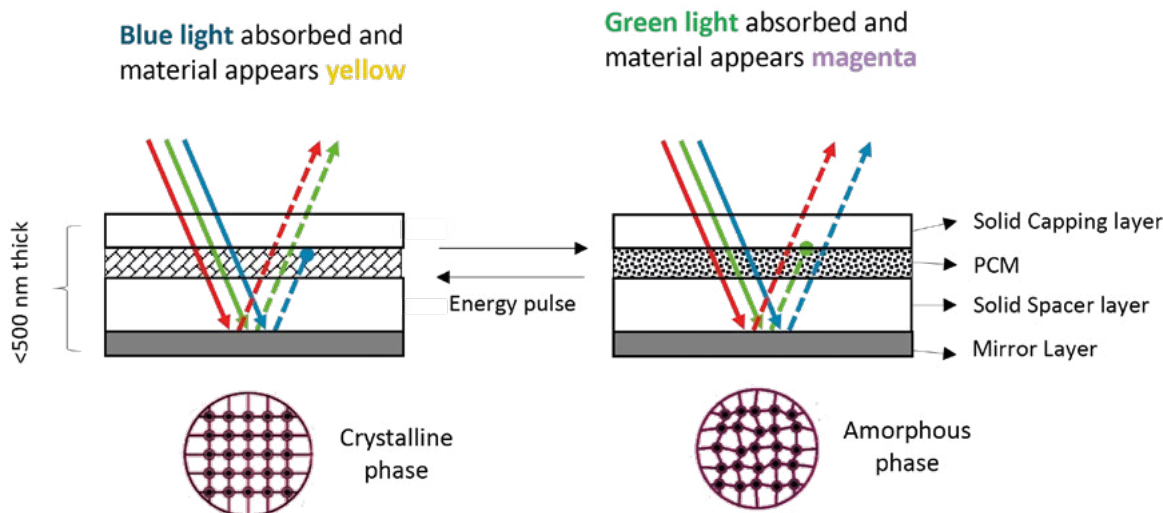


Fig. 1: Structure fondamentale de l’interchangeabilité de la technologie couleur à base de PCM. L’empilement contient une couche miroir, une couche d’espaceur solide, une couche de PCM et une couche supérieure, toutes déposées séquentiellement sans rupture d’aspiration avec un procédé PVD de pulvérisation cathodique. La couleur reflétée en surface peut être spécifiée en choisissant l’épaisseur de chaque matériau lors du dépôt. Les couches de PCM peuvent activement changer avec précision la condition d’interférence, c’est-à-dire la couleur de la cavité optique selon dans l’état dans lequel elles se trouvent dans une période définie.

transparent neutralisera l’effet d’interférence lumineuse qui dévoile leur pigmentation intrinsèque pourtant de couleur ordinaire. Notre nouveau procédé de revêtement PVD utilise des propriétés optiques réglables d’une classe particulière de matériaux inorganiques à l’état solide formés de chalcogénure communément appelé Matériau à Changement de Phase or Phase Change Materials (PCM) pour créer d’uniques couleurs vives entièrement par interférences lumineuses [1]. Les PCM sont des matériaux fonctionnels bien connus ayant un long historique dans la commercialisation de technologies de stockage de données telles que les disques optiques réenregistrables (DVD-RW et Blu-Ray) [2].

Résultats et discussion

La structure de base du procédé de revêtement PVD est illustrée à la figure 1. Cet empilement contient plusieurs couches: une couche miroir, une couche d’espaceur solide, une couche de PCM et une couche supérieure, toutes déposées séquentiellement par un procédé standard PVD de pulvérisation cathodique. La couleur reflétée en surface peut être spécifiée en choisissant l’épaisseur de chaque matériau lors du dépôt. L’exemple simple d’empilement de quatre couches à la figure 1 démontre qu’il est possible d’afficher une grande variété de couleurs vives et saturées. La figure 2 montre un modèle de couleurs stimulé pour cet empilement et qui a été calculé en utilisant l’approche de transfert de matrice (pour une couche mince et robuste) en changeant l’épaisseur de la couche d’espaceur solide et des couches de PCM par étapes de 1 nm. Il

est important de noter que les couleurs les plus vives, ainsi que les simples couleurs noires et blanches, sont obtenues d’une épaisseur d’environ 10 nm pour les couches de PCM et d’une épaisseur moins de 250 nm pour la couche d’espaceur solide. Il est intéressant d’observer que ce type ultra-mince de revêtement produit une faible dépendance angulaire en ce qui concerne les couleurs, et offre ainsi une flexibilité mécanique inhérente.

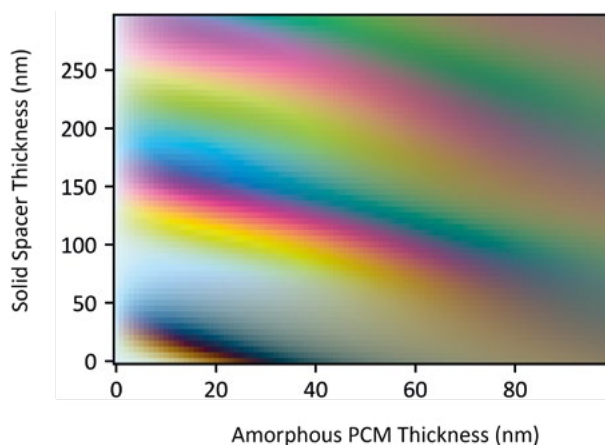


Fig. 2: Dépendance de l’épaisseur physique de la couche de PCM (état amorphe) et de la couche d’espaceur solide à la couleur reflétée de l’empilement. Ces couleurs sont calculées en utilisant l’approche de transfert de matrice basée sur une couche mince et robuste.

La capacité de déployer de belles couleurs et des effets spéciaux sur tout substrat en utilisant un procédé PVD avec couches minces n’est qu’une infime partie des possibilités



Fig. 3: Plusieurs couleurs obtenues en réglant l'épaisseur de la couche de PCM de l'empilement à couches minces. Chaque empilement est illustré dans les deux états: l'état amorphe et l'état cristallin. Chaque modèle d'empilement est photographié sous deux angles différents pour montrer la faible dépendance angulaire obtenue avec cette technologie.

que la technologie PCM peut offrir aux créateurs de montre. Comme mentionné plus tôt, les PCM sont des matériaux fonctionnels avec des propriétés optiques réglables formulées pour l'industrie des disques optiques pour le stockage de données. Les PCM sont des matériaux inorganiques capables de changer entre au moins deux états stables: l'état amorphe et l'état cristallin. Ces états ont différentes caractéristiques optiques: l'état amorphe a des propriétés semi-isolantes et semi-transparentes, et l'état cristallin a des propriétés semi-métalliques et des caractéristiques réfléchives. Lorsque les PCM sont intégrés dans une cavité optique telle qu'illustrée à la figure 1, ils peuvent activement changer avec précision la condition d'interférence, c'est-à-dire la couleur de la cavité optique selon leur état. Par exemple, l'empilement peut être conçu pour exposer une nuance spécifique de jaune lorsque le PCM est dans un état amorphe et une couleur magenta lorsqu'il est dans un état cristallin. De manière plus importante, le PCM peut être modifié réversiblement entre les états des millions de fois sans que cela n'affecte la performance optique; les applications de stockage de données utilisent cette capacité de réenregistrement pour inscrire les données «0» et «1» sur les disques DVD-RW et Blu-Ray. La figure 3 illustre une variété d'échantillons de couleurs déposés qui utilisent les mêmes matériaux avec différents modèles d'empilement. Chaque paire de couleurs est affichée dans les deux états: amorphe et cristallin. Chaque modèle d'échantillons est photographié sous deux angles différents pour montrer la faible dépendance angulaire des couleurs.

La figure 4a est une brève explication de PCM démontrant le procédé d'interchangeabilité réversible. Les matériaux PCM ont deux températures de transition bien définies qui jouent un rôle fondamental dans le mécanisme

d'interchangeabilité réversible: une température de cristallisation (T_c) et une température de fonte (T_f). Pour débiter, les couches minces de PCM en état amorphe sont déposées utilisant les procédés standards (PVD) de pulvérisation à température ambiante. L'augmentation de la température de la couche amorphe au-dessus de la T_c produit la cristallisation de la couche ultra-mince de PCM en moins d'une microseconde. Une fois cristallisé, l'empilement complet a changé de façon permanente de couleur et aucune énergie supplémentaire n'a été requise pour maintenir le nouvel état. Pour retourner le matériau à l'état amorphe, la température de la couche doit désormais être augmentée au-dessus de la T_f (point de fonte de la couche de PCM) et refroidie assez rapidement pour que la couche de PCM n'ait pas le temps de se recristalliser, retournant ainsi la couche à l'état initial amorphe. La procédure de fonte est entièrement passive, c'est-à-dire que la couche de PCM n'a pas besoin d'être activement refroidie; la couche continue miroir est utilisée en tant que moyen de dissipation de chaleur. En pratique, les traitements de chaleur d'une durée comptée en nanosecondes peuvent être réalisés par des méthodes d'excitation au laser ou d'excitation électrique. L'excitation au laser offre un grand avantage en termes de personnalisation de revêtement: la modification est plus locale et précise, et dans le cas de la technologie PCM, offre plus d'opportunités de personnalisation et de modifications au cours de la durée de vie du produit. La figure 4b offre un exemple d'une écriture au laser sur un empilement optique à base de PCM. Le revêtement est déposé sur une couche de verre (borofloat33) de 2 pouces et a été conçu pour passer de la couleur d'origine dorée (état amorphe) à une couleur violet foncé (état cristallin) par la méthode d'excitation au laser. Un système de balayage

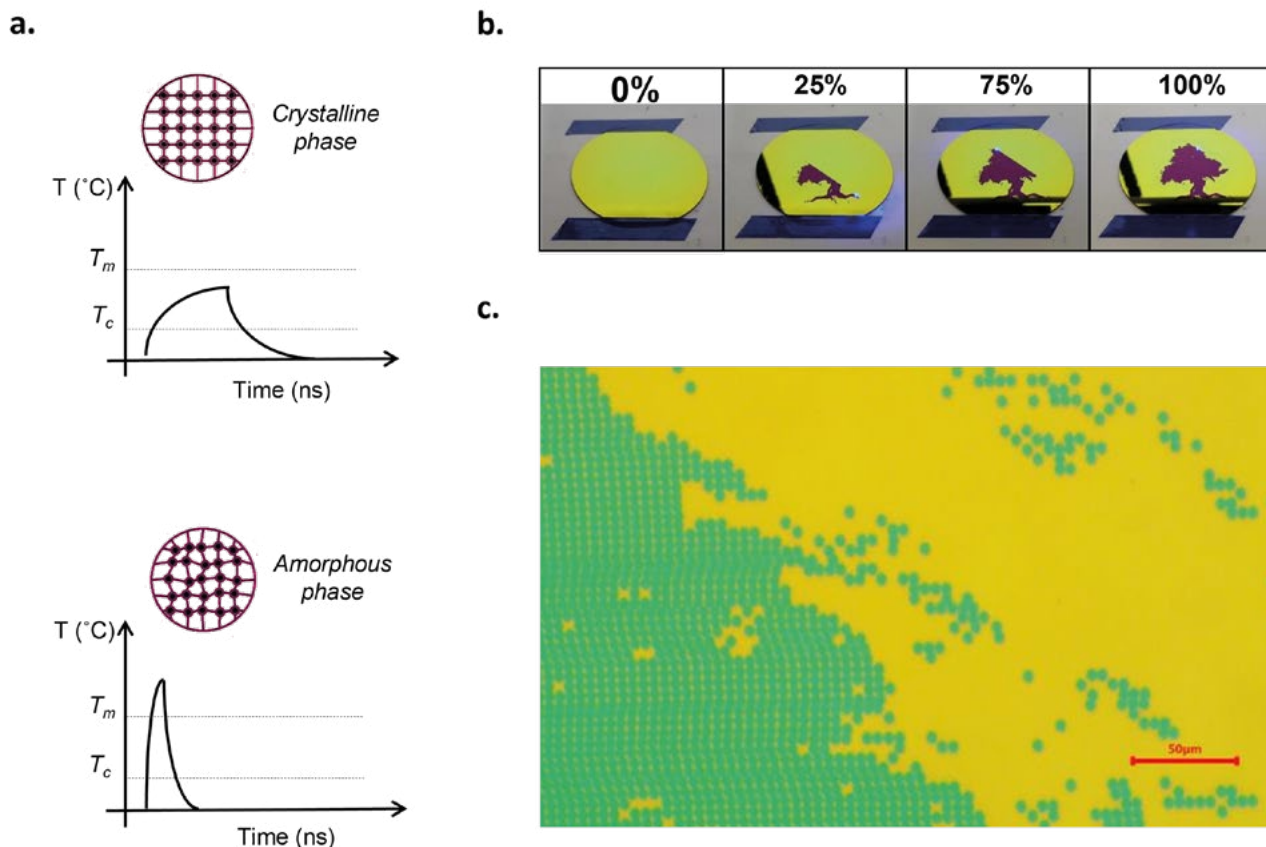


Fig. 4: **a.** Mécanisme d'interchangeabilité réversible de PCM à couches minces. Augmenter la température de la couche amorphe au-dessus de la T_c produira la cristallisation de la couche de PCM en moins d'une microseconde. Pour retourner le matériau à l'état amorphe, la température de la couche doit désormais augmenter au-dessus de la T_f (point de fonte de la couche de PCM) et être refroidie rapidement, retournant ainsi la couche à l'état initial amorphe. **b.** Exemple d'une écriture au laser sur un empilement optique à base de PCM. **c.** Exemple d'une image écrite par un système à résolution plus élevée. Chaque point mesure environ 5µm de diamètre.

au laser XY équipé de 5W, 405nm, diode laser bleue et contrôlé par un logiciel a été utilisé afin de passer entre les deux états de revêtement. La résolution de la technologie est théoriquement infinie. Cependant, en pratique, la résolution dépend de la taille du point de laser utilisé pour cristalliser localement l'empilement. Un exemple d'une image inscrite par un système à résolution plus élevée est illustré à la figure 4c où chaque point marqué mesure environ 5µm de diamètre. Des points d'une taille de 50 nm ont été antérieurement modifiés à l'aide d'un Microscope à Force Atomique Conductrice (CAFM). Cette démonstration permet de conclure que l'écriture au laser sans impression à très haute résolution est réalisable avec cette technologie [1].

Du point de vue thermodynamique, l'état amorphe est un état métastable qui se cristallisera définitivement si la période de temps allouée est infinie. Cependant, du point de vue de l'utilisateur et surtout à des températures de moins de 100°C, la cristallisation se produira naturellement uniquement après plusieurs décennies. Une fois cristallisé, le matériau pourra toujours être réinitialisé à son état amorphe en utilisant le traitement de fonte de l'état cristallin à l'état

amorphe tel que décrit plus tôt. Le procédé de passage amorphe-cristallin-amorphe peut être exécuté plusieurs millions de fois sans nuire à la performance optique de l'empilement. Suite à des années de développement, de meilleurs matériaux et des empilements plus avancés sont disponibles désormais, ce qui permet une plus ample flexibilité de design pour la technologie à base de PCM [3]. Par exemple, il y existe une capacité d'afficher des couleurs primaires hautement saturées avec une faible dépendance angulaire et avec moins d'effets goniochromatiques sur tout substrat sans que cela nécessite une modification ou un modelage de la surface. Finalement, l'irisation peut aussi être ajoutée comme option sur un ou deux ou aucun des états PCM, selon les exigences du design. Plusieurs exemples sont visibles à la figure 5 pour des substrats rigides (a) et flexibles (b). Il est important de souligner que toutes les couleurs ont été déposées par le même système PVD, sur les mêmes matériaux, seul le design est différent, c'est-à-dire, l'épaisseur de l'empilement. La cristallisation a été réalisée en utilisant une diode laser bleue pour toutes les couleurs et tous les substrats.

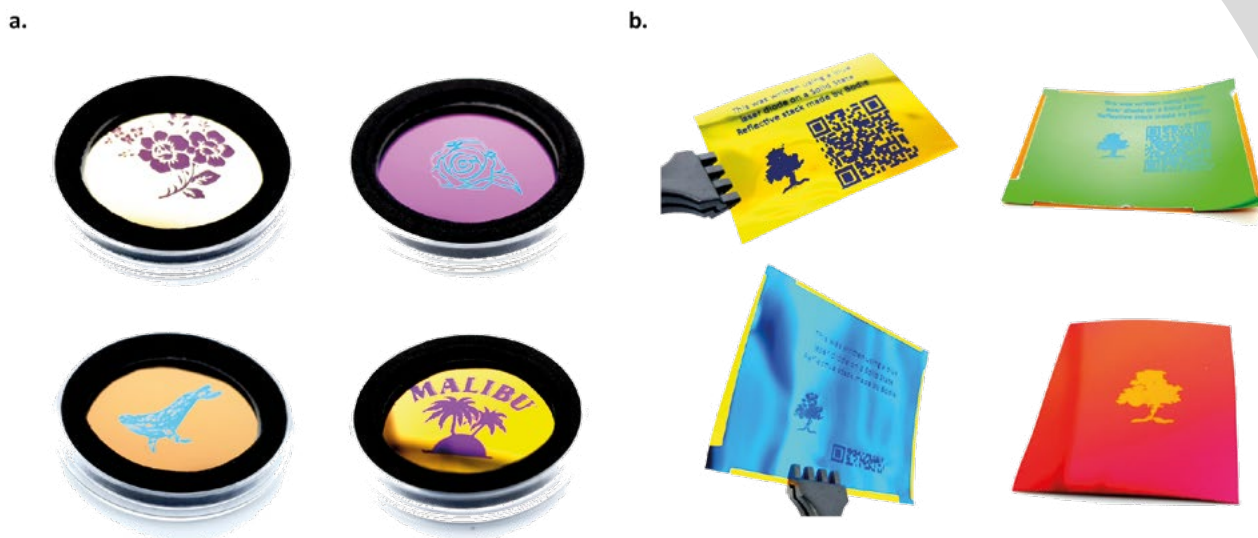


Fig. 5: Plusieurs exemples d'écriture au laser sur des empilements de PCM **a.** substrats rigides et **b.** substrats flexibles. Les échantillons d'écriture ont été réalisés en utilisant un système de diode laser bleue pulsée contrôlé par un logiciel.

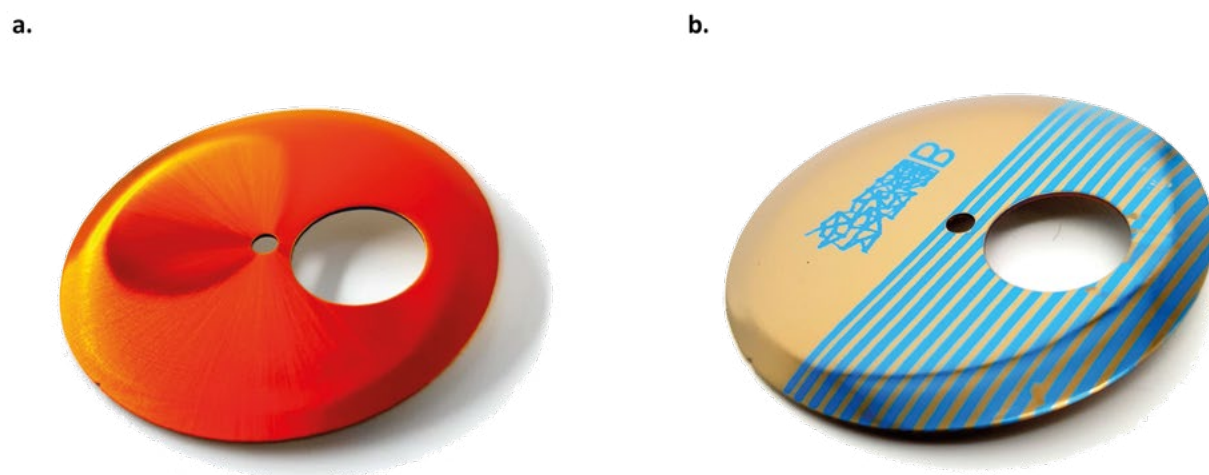


Fig. 6: Exemples de couches de PCM déposées directement sur deux différents types de cadran. **a.** cadran avec un motif soleil; le motif et l'effet optique correspondant subsistent après l'application d'un revêtement d'une couche ultra-mince de PCM. **b.** cadran avec une finition miroir (empilement de PCM doré à cyan); la qualité de la réflexion lumineuse demeure inaltérée après le dépôt de PCM. Un laser a été utilisé pour écrire un motif prédéfini directement sur le cadran après le dépôt de PCM. Le changement au laser n'introduit pas d'effets indésirables tels que l'endommagement diffusif, l'apparence floue, l'apparence laiteuse et l'apparence décolorée.

Application en horlogerie

Les couches minces de PCM ont le potentiel de créer toute une nouvelle gamme de revêtement ornemental élégant pour les créateurs de montres. Le fait de pouvoir combiner en un revêtement une multitude de matériaux ainsi que de composants (tels que les cadrans, les aiguilles, les index, etc.) avec la capacité unique de changer de couleur au laser, ouvre la voie à une nouvelle génération de produits personnalisables en masse, personnalisation qui peut être exécutée à la fois en manufacture et en magasin. Le caracté-

rière uniforme de revêtements des PCM s'intègre formidablement bien aux techniques actuelles de modelage de surface qui créent un fini rétro-réfléctif, prismatique ou diffusif sur les matériaux et composants de montres. La figure 6 illustre quelques exemples d'empilement de PCM déposés sur des cadrans de montre de type de finition courante. Concernant le cadran qui arbore un soleil, le motif et l'effet optique correspondant subsistent après l'application d'un revêtement d'une couche ultra-mince de PCM (Fig. 6a). De

manière similaire, le cadran qui arbore une finition miroir va retenir la nature spéculaire de la lumière reflétée en surface même après l'application d'un revêtement d'une couche ultra-mince de PCM (Fig. 6b). De façon plus importante, la figure 6b démontre comment un revêtement de PCM (dans ce cas, un empilement doré à cyan) peut être écrit directement au laser sans affecter la qualité de la réflexion. Les effets indésirables tels que l'endommagement diffusif, l'apparence floue, l'apparence laiteuse, et l'apparence décolorée n'apparaîtront pas, même au cours du temps.

De plus, le fait que ce type de revêtement soit ultra-mince, ultraléger et inaltérable, facilite encore plus l'intégration de ce procédé aux composants mécaniques et fonctionnels déjà existants. Finalement, la technologie pourrait particulièrement intéresser l'industrie horlogère pour la capa-

cité de conservation des modèles personnalisés sans avoir recours à des piles ou à une source d'énergie électronique quelconque. ■

Références bibliographiques

- [1] HOSSEINI, P., C.D. WRIGHT, and H. BHASKARAN, «An optoelectronic framework enabled by low-dimensional phase-change films». *Nature*, 2014. 511(7508): p. 206.
- [2] WÜTTIG, M. and N. YAMADA, «Phase-change materials for rewritable data storage». *Nature Materials*, 2007. 6: p. 824.
- [3] TALAGRAND, C., et al., «Solid-state reflective displays (SRD®) for video-rate, full color, outdoor readable displays». *Journal of the Society for Information Display*, 2018. 26(10): p. 619-624.

Décembre 2021

62

Bulletin SSC n° 92

Publicité

Innospace

Établi horloger primé

Développé en exclusivité pour Audemars Piguet
en collaboration avec SARDI STRATEGIC DESIGN



orma
1948
s w i s s

Créateur et fabricant de postes de travail ergonomiques

Confiez-nous votre développement

ORMA Swiss SA - info@orma.ch - Tél. +41 (0)848 848 849 - www.orma.ch

