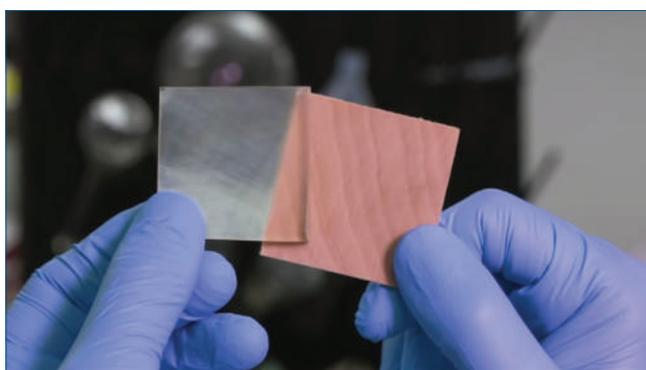




# LEGNO E BAMBÙ TRASPARENTI

***Il legno e il bambù trasparenti saranno materiali 'smart' in un prossimo futuro. Numerosissime pubblicazioni e reviews hanno evidenziato sia i procedimenti per ottenerli, sia le possibili applicazioni: finestre a risparmio di energia, schermi di cellulari, componenti elettronici, nanomateriali ecosostenibili e molti altri utilizzi.***



## Introduzione

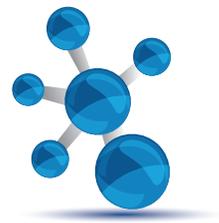
Attualmente i principali materiali trasparenti sono costituiti dai vetri e da alcune plastiche. Si tratta di manufatti non rinnovabili o rinnovabili con elevati consumi di energia e molto spesso privi di biodegradabilità. Il settore delle costruzioni, che nel suo insieme contribuisce a circa un terzo del consumo globale di energia e a un rilevante effetto serra, pone alcuni problemi di non semplice risoluzione legati al loro utilizzo. Ad esempio, la produzione industriale dei vetri causa l'emissione di circa 25 kt/anno di CO<sub>2</sub>. Inoltre, la loro alta conducibilità termica comporta un'elevata dissipazione di calore. Se, infine, teniamo conto dei rischi di sicurezza legati alla fragilità dei vetri e della limitata disponibilità di materiali plastici trasparenti si comprende l'attuale notevole interesse per il legno e il bambù trasparenti sia a livello di ricerca scientifica, sia nei più svariati settori applicativi [1]. Il legno e il bambù non sono trasparenti alla luce principalmente a causa della presenza di lignina, che conferisce loro i tipici colori. L'estrazione della lignina o dei suoi

gruppi cromofori rende il materiale un bio-composito bianco, ma non trasparente a causa dell'eccessiva diffusione della luce dovuta alla presenza di numerosissimi canali. Se si riempiono i canali con un polimero a indice di rifrazione molto vicino a quello della cellulosa, si ottiene il cosiddetto legno o bambù trasparente, più precisamente un composito multicomponente.

Il legno trasparente è un materiale economico, ecosostenibile, rinnovabile, leggero e con buone proprietà meccaniche (ad es. ha un elevato carico di rottura). Ha però anche alcuni punti deboli, quali la sensibilità agli agenti atmosferici e la fotodegradabilità, migliorabili solo mediante sua funzionalizzazione.

Il bambù è ancora migliore rispetto al legno quale materiale di partenza dal punto di vista ambientale: rilascia più ossigeno (+35%) rispetto agli alberi e presenta una superiore resistenza alla corrosione, all'abrasione, all'acqua, agli insetti e alle muffe. In sintesi, è un materiale bio-composito a basso costo, alta efficienza e prestazioni elevate, ottimo per la sua trasformazione in bambù trasparente.

Negli ultimi anni (meno di un decennio) sia per il legno sia per il bambù si sono sviluppate numerose ricerche ed applicazioni mirate all'ottenimento e all'utilizzo di materiali di buona trasparenza. In particolare, molte sono state le possibili modifiche e le molteplici applicazioni del legno e del bambù trasparenti comparse nella letteratura scientifica e brevettuale, dai materiali trasparenti colorati a quelli magnetici, da quelli elettricamente conduttivi a quelli fluorescenti, da quelli luminescenti a quelli



reattivi agli stimoli esterni o schermanti ai raggi UV ecc. Particolarmente interessante risulta il loro utilizzo per finestre a risparmio di energia.

### Il legno

Il legno è un materiale bio-composito tipico delle piante vascolari, formato, cioè, in prevalenza dalle pareti derivanti da lunghe cellule vegetali morte disposte in fasci longitudinali, e costituisce il fusto delle piante a crescita secondaria, cioè radiale (alberi, arbusti, liane e alcune erbe) [2]. Da un punto di vista istologico, questa crescita secondaria è evidenziata da un aumento del diametro del fusto, che è tipico delle gimnosperme e delle dicotiledoni. Il legno è caratterizzato da una struttura gerarchica unica e complessa con una peculiare micro-, meso- e macro-porosità. Sia le fibre, sia i canali aperti sono orientati nella direzione di crescita dell'albero. Il legno presenta un'elevata anisotropia e una bassa densità, una facilità di lavorazione, un'elevata resistenza meccanica e tenacità, un'eccellente biodegradabilità ecc. Si tratta di un materiale abbondante e rinnovabile, un eccellente isolante termico e una risorsa versatile.

I tre principali componenti del legno sono la cellulosa (ca. 45%), l'emicellulosa (ca. 30%) e la lignina (ca. 23%). La cellulosa è caratterizzata da zone cristalline, in cui le catene macromolecolari lineari di unità di *D*-glucosio sono altamente allineate in fasci paralleli, e da zone amorfe ad elevato disordine.

### Il legno trasparente

L'idea originale è relativamente recente [3], intesa però solamente come un nuovo approccio allo studio funzionale della struttura del legno, in analogia a quanto fatto già da molto tempo in anatomia. Solo nel 2016 vengono pubblicate sia dal Royal Institute of Technology (KTH) svedese [4], sia dalla University of Maryland (USA) [5] le prime ricerche indirizzate all'ottenimento di un nuovo materiale trasparente 'smart' dalle molteplici possibilità applicative. A testimonianza della sua importanza in termini di strategie sostenibili volte a conseguire la 'carbon neutrality', in meno di un decennio si è acceso un grande interesse non solo scientifico sull'argomento con numerosi articoli, reviews e brevetti. Il legno trasparente presenta una trasmittanza nel visibile superiore all'80%, una luce diffusa (*haze*) spesso

maggiore del 70%, che lo rende traslucido, e una conducibilità termica inferiore a  $0,23 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , che gli conferisce l'interessante proprietà di essere un ottimo isolante. Può essere perciò considerato un 'building block' [1] per la progettazione di nuovi sistemi funzionali e strutturali quali, ad esempio, finestre a risparmio di energia, celle solari, schermi per cellulari e computer, componenti optoelettroniche, interi edifici in grado di trasmettere la luce, materiali per l'industria automobilistica, materiali luminescenti, magnetici, decorativi ecc.

### Il bambù trasparente

Negli stessi ultimi anni si è molto sviluppato un settore di ricerca parallelo focalizzato sul bambù trasparente, la cui principale caratteristica, molto positiva, è di provenire da biomasse velocemente rinnovabili, conformi all'assunto di uno sviluppo sostenibile ed ecologico, e da processi a basso costo e poco inquinanti.

Il bambù è un materiale completamente differente dal legno. Si tratta di un'erba appartenente alla famiglia delle poacee e alla classe delle monocotiledoni, che comprende almeno 1400 specie e un centinaio di generi [1]. Ha un'elevata velocità di crescita e un'alta resa (4 volte quella del legno). Può raggiungere altezze superiori a 40 metri con un alto 'aspect ratio' e viene attualmente coltivato nel mondo su una superficie complessiva di circa 36 milioni di ettari [6]. A differenza del legno ha un fusto cavo molto duro e fibroso con un alto contenuto in silice e un aspetto esterno legnoso con nodi e internodi. È caratterizzato dagli stessi componenti primari del legno (cellulosa, emicellulosa e lignina in gerarchia altamente allineata) e da buone proprietà chimiche e fisiche, oltre ad eccellenti proprietà meccaniche e a una buona resistenza al fuoco.

Molto utilizzato è il bambù Moso (*Phyllostachys edulis*) che può raggiungere un'altezza di 15 metri e un diametro di 12-15 cm, una velocità di crescita di 60 cm/giorno e un ciclo di crescita di 3÷5 anni a confronto con i 20÷60 anni del legno.

### I procedimenti per l'ottenimento del legno trasparente

Per l'ottenimento del legno trasparente è necessario effettuare la rimozione (totale o parziale) della lignina o dei suoi gruppi cromofori e, successivamente,

riempire i numerosi canali del legno con un'adatta resina polimerica trasparente a indice di rifrazione molto vicino a quello della cellulosa. La classe di polimeri di gran lunga più utilizzati finora è rappresentata dalla famiglia delle resine epossidiche. In alternativa e in misura molto minore sono stati utilizzati il polimetilmetacrilato e altri poliacrilati, il polivinilalcol, le resine poliesteri insature ecc.

I problemi più critici riguardano l'eliminazione della lignina. Se si vuole operare per una delignificazione completa, ci si deve aspettare un elevato consumo di reagenti e di energia, lunghi tempi di processo (6÷12 h), difficoltà di riciclo e problemi ambientali, oltre a un notevole peggioramento delle proprietà meccaniche rispetto al legno originario. Se si sceglie l'eliminazione solo parziale della lignina, si registrano tempi di processo ridotti e migliori proprietà meccaniche, ma restano i problemi legati ai grandi volumi delle soluzioni di

reagenti tossici e alle conseguenti difficoltà del loro smaltimento [1].

In alternativa, si può procedere all'eliminazione dei soli gruppi cromofori della lignina con il mantenimento della stessa, ottenendo una riduzione significativa dei tempi di processo e un netto miglioramento delle proprietà meccaniche. Restano però i problemi legati alle grandi quantità di reagenti (anche se non tossici) da smaltire e all'elevato consumo di energia. Il mantenimento della maggior parte della lignina, che è un naturale legante per cellulosa ed emicellulosa e fornisce loro una robusta impalcatura avvolgendo efficacemente le microfibrille di cellulosa, permette di conservare le buone proprietà meccaniche del legno, favorendo anche la successiva infiltrazione della resina polimerica. I relativi trattamenti chimici possono essere effettuati sia con acidi, sia con alcali a

caldo. Si è anche tentato un trattamento con enzimi [7], potenzialmente un processo molto interessante dal punto di vista ambientale.

Il legno trasparente risultante si comporta da ottimo isolante con una conducibilità termica pari a  $0,157 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  se rivestito superficialmente con ossido di zinco. Senza rivestimento, la conducibilità è comunque molto bassa ( $0,195 \div 0,225 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ).

Un rilevante miglioramento dei procedimenti per ottenere il legno trasparente è stato pubblicato di recente [8] da ricercatori della University of Maryland, USA. Un asse di legno di balsa lungo un metro e spesso un millimetro, trattato superficialmente con un sottilissimo strato di NaOH al 30% e spennellato successivamente con  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 30%, è stato sottoposto a irraggiamento con lampada UV per 12 h ottenendo una sbiancatura totale a testimonianza della

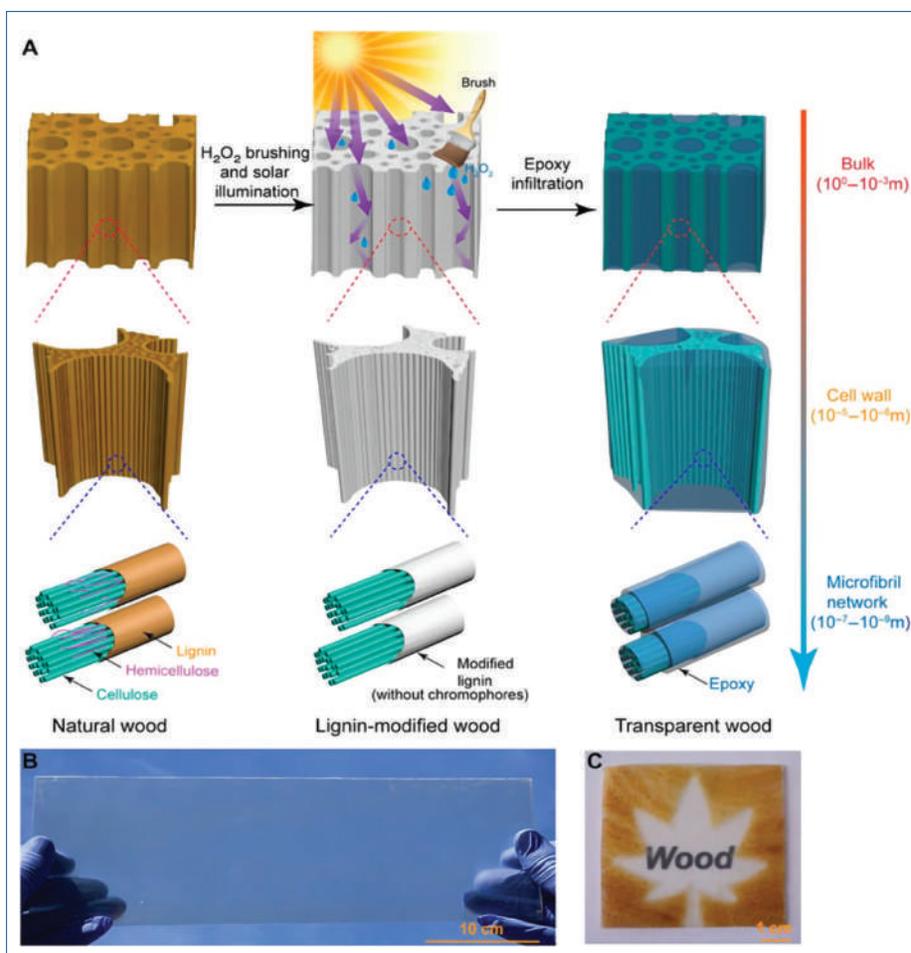
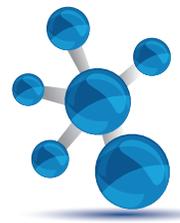


Fig. 1 - A) Illustrazione schematica del procedimento di fabbricazione del legno trasparente; B) immagine digitale di un'asse di legno trasparente (400x110x1 mm) lungo la direzione delle fibre; C) immagine digitale del legno trasparente decorato con una foglia d'albero [8]



completa rimozione dei gruppi cromofori della lignina. Successivamente, il legno è stato impregnato sottovuoto con una resina epossidica e mantenuto a  $T_{amb}$  fino a suo completo indurimento, ottenendo così un legno trasparente di ottima qualità.

In Fig. 1 sono illustrate schematicamente le varie fasi del procedimento utilizzato e le caratteristiche di trasparenza e di decorazione ottenute. Possono essere utilizzati svariati tipi di legno, dalla quercia alla balsa.

Questa procedura consente di avere più del 90% di luce trasmessa e un haze superiore al 60%. Se usato come materiale per finestre al posto del vetro, il nuovo sistema multicomponente risulta molto più resistente alla rottura, più leggero, con proprietà isolanti di gran lunga superiori e un processo di produzione con minor consumo di energia e di sostanze chimiche, e tempi minori.

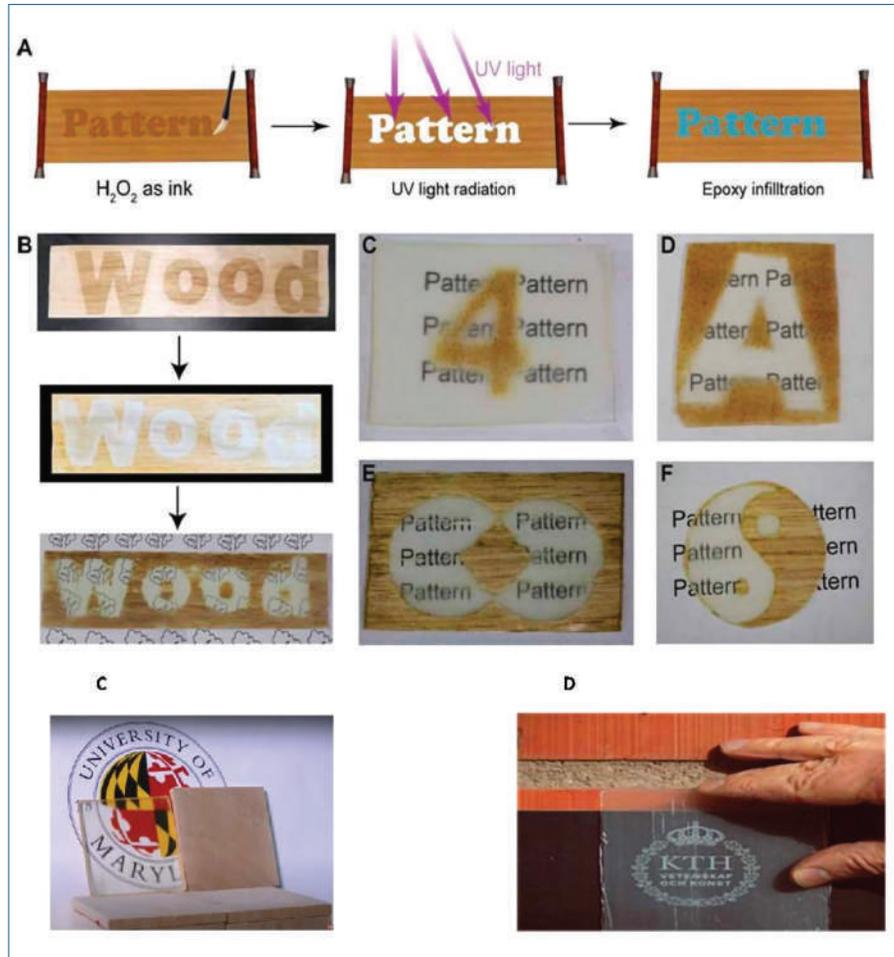


Fig. 2 - Elementi decorativi inseriti nel legno trasparente. A e B da [8]; C da video della University of Maryland; D da foto di Peter Larsson, KTH.

### Applicazioni del legno trasparente

Molte sono le possibili modifiche e applicazioni del legno trasparente comparse nella letteratura scientifica e brevettuale di questi ultimi anni: dal legno trasparente colorato a quello magnetico, da quello elettricamente conduttivo a quello fluorescente, da quello luminescente a quello reattivo agli stimoli esterni o schermante ai raggi UV ecc.

A titolo d'esempio, la Fig. 2 riporta alcune applicazioni di tipo decorativo.

### Il bambù trasparente

I principali problemi da affrontare per l'ottenimento di bambù trasparente sono legati alla sua elevata densità (ca.  $0,65 \text{ gcm}^{-3}$ ) in confronto ai valori molto più bassi dei tipi di legno utilizzati (ca.  $0,1 \div 0,4 \text{ gcm}^{-3}$ ). La sua alta densità, abbinata alla bassa porosità, comporta una bassa permeabilità ai reagenti, con tempi più lunghi di rimozione della lignina o dei suoi gruppi

cromofori, maggiori quantità di prodotti chimici e minore velocità di riempimento della resina polimerica. Analogamente al legno, i trattamenti chimici si effettuano con acidi o alcali ad alte temperature.

I risultati finora ottenuti sul bambù trasparente sono comunque molto buoni, con trasparenze fino al 92,4% nel caso di eliminazione della lignina con acidi o alcali, e fino all'87% quando si eliminano soltanto i suoi gruppi cromofori. Anche le proprietà meccaniche risultanti sono eccellenti. La conducibilità termica misurata per il bambù trasparente è pari a  $0,203 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , sostanzialmente analoga a quella del vetro trasparente ( $0,195 \div 0,225 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ), e pari a 1/5 di quella del vetro comune ( $0,974 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ).

Per il bambù trasparente vengono ipotizzate applicazioni analoghe a quelle intraviste per il legno trasparente: finestre a ridotte dispersioni di calore, elementi decorativi, materiali fluorescenti, lumines-

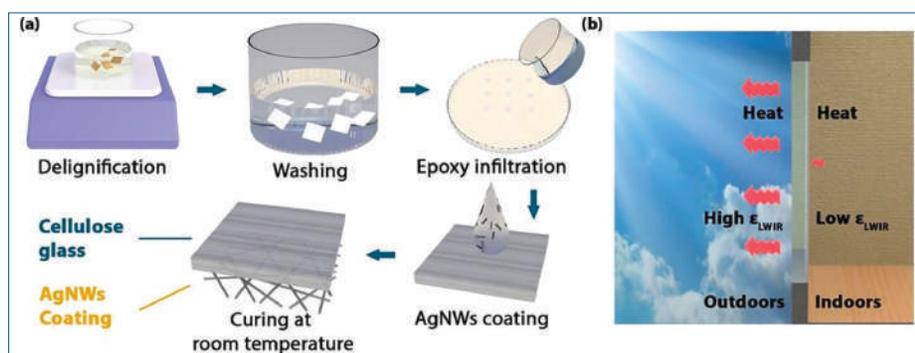


Fig. 3 - Rappresentazione schematica del meccanismo con cui opera una finestra a raffreddamento radiativo in bambù trasparente ( $T_{est}$ : 55 °C,  $T_{int}$ : 21 °C) [9]

scenti, magnetici per aggiunta di opportuni additivi, apparecchiature optoelettroniche ecc. [1].

A titolo d'esempio, è qui riportata un'applicazione molto interessante che si riferisce alle finestre a risparmio di energia [9]. Sulla faccia esterna di una lastra di bambù trasparente viene depositato un nanofilo di argento che consente di realizzare un ottimo raffreddamento radiativo sulla faccia interna, come evidenziato in Fig. 3. L'emissività infrarossa ad alte lunghezze d'onda ( $\epsilon_{LWIR}$ ) risulta infatti pari a 0,3 su una faccia della finestra e a 0,95 sull'altra faccia.

Il risparmio di energia così ottenuto risulta migliore (fino all'89%) rispetto al vetro a basso consumo energetico. Inoltre, a confronto con i complessi processi tradizionali di modifica superficiale del vetro, le finestre a risparmio di energia basate sul bambù trasparente risultano essere molto più facili da fabbricare, più economiche ed ecocompatibili, dimostrando di possedere un notevole potenziale applicativo.

### Prospettive future

Sia per il legno trasparente, sia per il bambù trasparente si aprono interessanti prospettive applicative in un futuro molto prossimo. Per entrambi i materiali, che sono almeno tre volte più forti delle plastiche trasparenti e almeno dieci volte più resistenti del vetro, si può pensare a un loro utilizzo quali schermi dei cellulari, finestre e tetti in grado di supportare carichi e di regolare scambi di calore, componenti elettronici flessibili, nanomateriali *green* ecc. Un'importante evoluzione in termini di ecosostenibilità è di recente comparsa nella letteratura scientifica ad opera dei ricercatori del KTH Royal Institute of Technology, che hanno utilizzato una bioplastica derivante dalle bucce degli agrumi (poliacrilato di limonene). Il processo non utilizza solventi e tutti i prodotti chimici impiega-

ti derivano da fonti biologiche [10].

Nel settore del legno e del bambù trasparenti sono molto attivi due gruppi di ricerca italiani, presso l'Università di Sassari (Alberto Mariani) e il Politecnico di Torino (Giulio Malucelli), che partecipano al Programma Europeo Al-TranspWood, in cui la ricerca sul legno trasparente è abbinata all'impiego dell'intelligenza artificiale.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Mariani, G. Malucelli, *Materials*, 2022, **15**, 9069, <https://doi.org/10.3390/ma15249069>.
- [2] Wood, *Encyclopedia Britannica*, <https://www.britannica.com/Science-Tech>.
- [3] S. Fink, *Holzforschung*, 1992, **46**, 403.
- [4] Y. Li *et al.*, *Biomacromolecules*, 2016, **17**, 1358, <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.6b00145>.
- [5] M.W. Zhu *et al.*, *Adv. Mater.*, 2016, **28**, 5181, <https://doi.org/10.1002/adma.201600427>.
- [6] Bamboo, *Encyclopedia Britannica*, <https://www.britannica.com/Science-Tech>.
- [7] J. Zhou, Y. Wu, *China For. Prod. Ind.*, 2020, **57**, 17.
- [8] Q. Xia *et al.*, *Science Adv.*, 2021, **7**, eabd7342, <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd7342>.
- [9] C. Zhou *et al.*, *ACS Mater. Lett.*, 2021, **3**, 883, <https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.1c00272>.
- [10] C. Montanari *et al.*, *Adv. Sci.* 2021, **8**, 2100559, <https://doi.org/10.1002/adv.202100559>.

### Transparent Wood and Bamboo

Transparent wood and bamboo will be 'smart' materials in the near future. A great number of publications and reviews have highlighted both the processes to obtain them and the possible applications: energy-saving windows, mobile phone screens, electronic components, eco-sustainable nanomaterials, and many other uses.