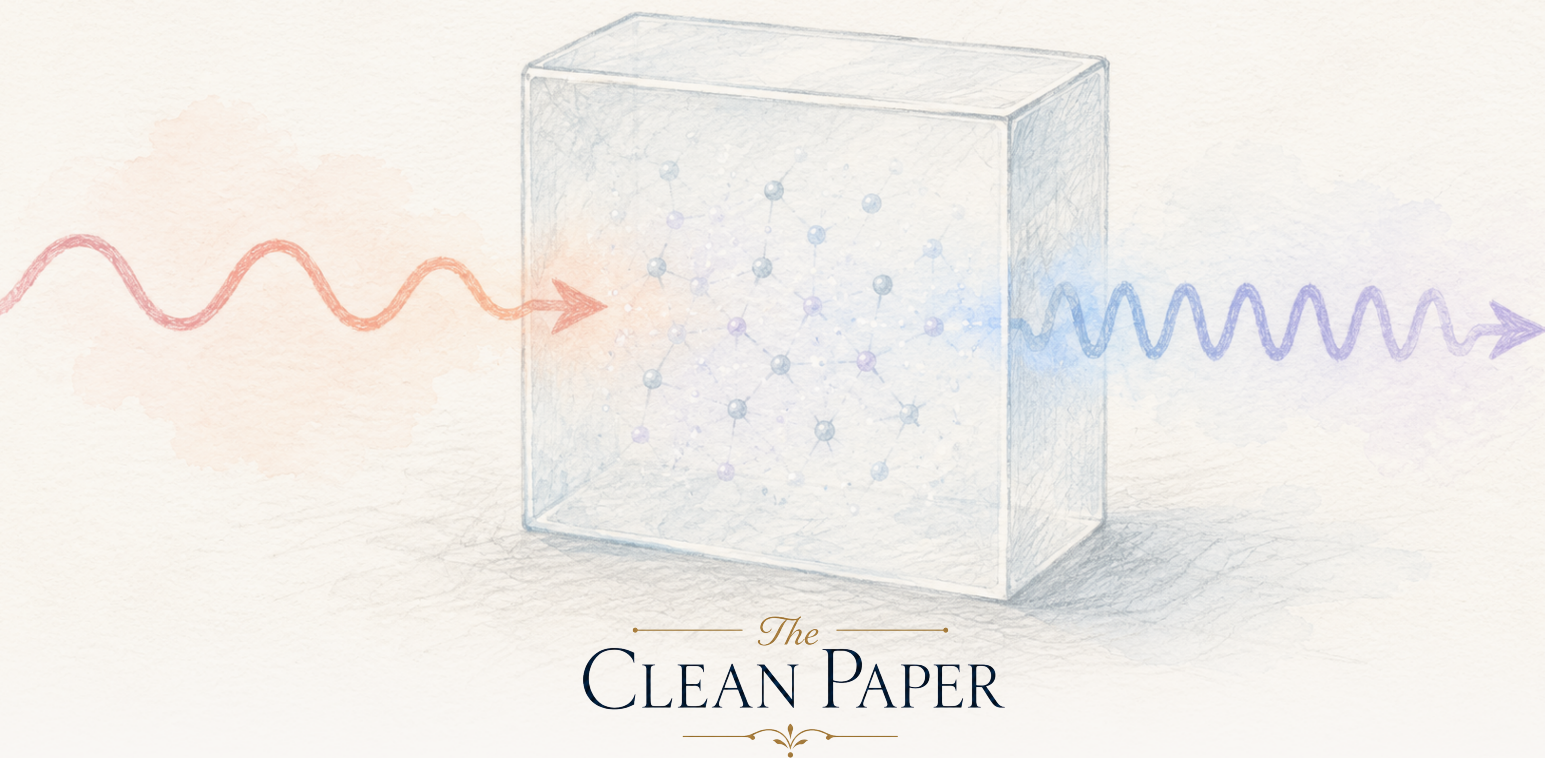




WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Ένα στερεό υλικό μετατρέπει ορατό μπλε φως σε UV σε ένταση αντίστοιχη του ηλιακού φωτός — αλλά δεν είναι μηχανή ηλιακής ενέργειας

Ερευνητές σχεδίασαν οργανικούς κρυστάλλους βασισμένους στο DHI, των οποίων οι αλκυλικές πλευρικές αλυσίδες προστατεύουν το πηλεκτρονικό σύστημα χωρίς να εμποδίζουν τη μεταφορά τριπλέτας ενέργειας. Το καλύτερο στερεό φιλμ iBu-DHI/Ir(ppy)₃ παρήγαγε upconversion από ορατό σε UV μέσω αλληλοεξουδετέρωσης τριπλέτας-τριπλέτας, με απόλυτη κβαντική απόδοση 1.9% και κατώφλι 1.2 mW cm⁻², κοντά στην ηλιακή ένταση γύρω στα 445 nm. Είναι πραγματική πρόοδος στα υλικά για στερεά photon upconversion. Δεν είναι λειτουργική ηλιακή συσκευή, δεν είναι «δωρεάν UV» και δεν αποδεικνύει ότι το ορατό ηλιακό φως μπορεί ήδη να τροφοδοτήσει χρήσιμη χημεία UV σε μεγάλη κλίμακα.

Written by Laura Nesso · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

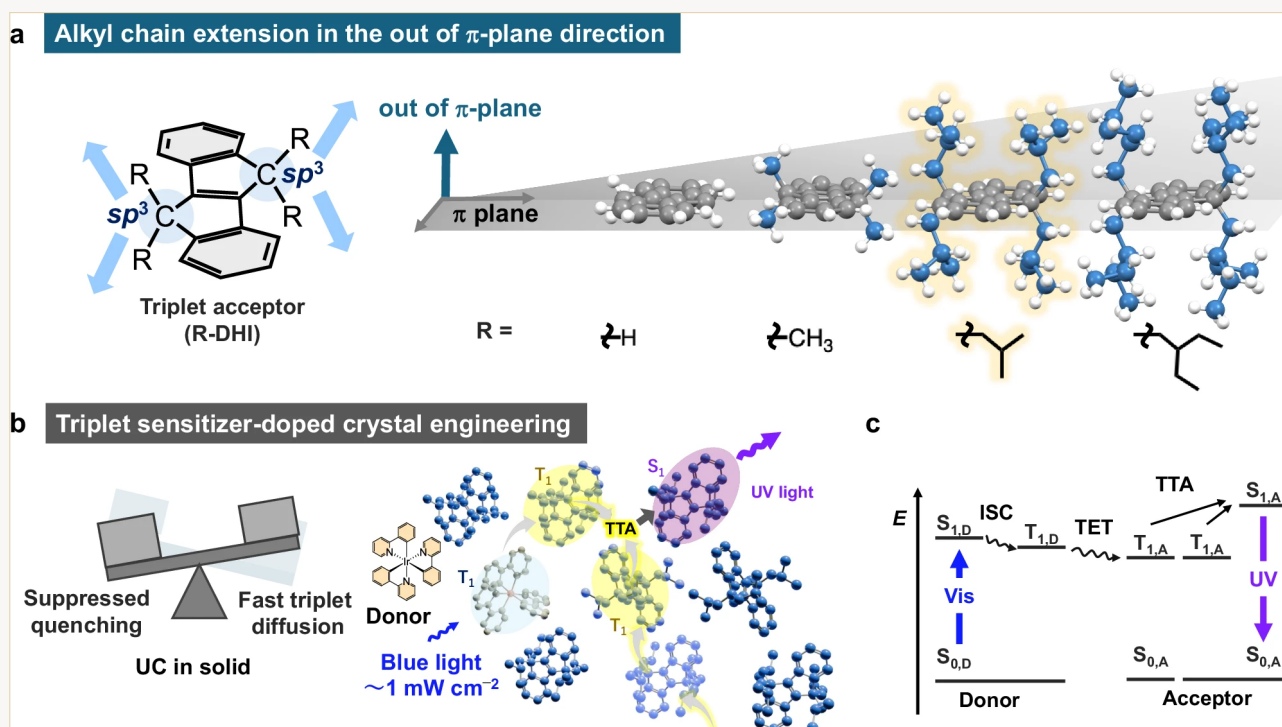
Paper: *Sterically protected π -electron systems for efficient solid-state photon upconversion*, Naoyuki Harada, Hayato Shoyama, Nutnicha Boonmong, Kiichi Mizukami, Yuya Watanabe, Pei Zhao, Masahiro Ehara, Yoichi Sasaki, and Nobuo Kimizuka, Nature Communications 17, 5134 (2026) · DOI: 10.1038/s41467-026-73898-0

Ένα τέχνασμα σε ένταση ηλιακού φωτός, όχι μηχανή ηλιακής ενέργειας

Το μεγαλύτερο μέρος του ηλιακού φωτός φτάνει στη Γη ως ορατό και υπέρυθρο φως. Η υπεριώδης ακτινοβολία είναι μόνο ένα μικρό κομμάτι, αλλά τα φωτόνια UV είναι χημικά ισχυρά: μπορούν να οδηγήσουν αντιδράσεις που τα ορατά φωτόνια χαμηλότερης ενέργειας δεν μπορούν. Αυτό κάνει το **photon upconversion** μια ελκυστική ιδέα. Αν ένα υλικό μπορούσε να πάρει δύο ορατά φωτόνια χαμηλότερης ενέργειας και να επιστρέψει ένα φωτόνιο UV υψηλότερης ενέργειας, τότε το ορατό ηλιακό φως θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για χημεία που συνήθως απαιτεί UV.

Αυτή η εργασία αφορά μια δύσκολη εκδοχή του προβλήματος: upconversion από ορατό σε UV μέσα σε **στερεό**, σε **ένταση αντίστοιχη του ηλιακού φωτός**, χωρίς να βασίζεται σε μόρια που διαχέονται ελεύθερα σε διάλυμα. Αυτό έχει σημασία επειδή τα συστήματα διαλύματος μπορούν να είναι αποδοτικά, αλλά είναι άβολα για συσκευές: οι διαλύτες εξατμίζονται, διαρρέουν ή περιορίζουν τη μακροχρόνια χρήση. Τα στερεά είναι πρακτικότερα, αλλά συνήθως καταστρέφουν ακριβώς τις διεγερμένες καταστάσεις που χρειάζεται το upconversion.

Άρα το πραγματικό αποτέλεσμα δεν είναι «δωρεάν UV από το ηλιακό φως». Είναι μια λύση χημείας υλικών σε μια συγκεκριμένη αντίφαση: σε ένα στερεό, τα μόρια πρέπει να βρίσκονται αρκετά κοντά ώστε να μετακινείται η ενέργεια τριπλέτας, αλλά όχι τόσο κοντά ώστε να αποσβένουν το ένα το άλλο.



Η λογική σχεδιασμού της εργασίας σε ένα σχήμα. Τα μόρια-δέκτες τροποποιούνται με αλκυλικές πλευρικές αλυσίδες που προεξέχουν από το επίπεδο π , αλλάζοντας τον τρόπο συσκευασίας τους στον

κρύσταλλο. Στόχος είναι ένα στερεό όπου η ενέργεια τριπλέτας μπορεί ακόμη να μετακινείται γρήγορα ανάμεσα στα μόρια, αλλά είναι λιγότερο πιθανό να χαθεί μέσω απόσβεσης. Ένας ευαίσθητοποιητής απορροφά πρώτα ορατό μπλε φως και μεταφέρει ενέργεια τριπλέτας στους δέκτες· όταν συναντηθούν δύο τριπλέτες δεκτών, η αλληλοεξουδετέρωση τριπλέτας-τριπλέτας μπορεί να δημιουργήσει ένα φωτόνιο UV υψηλότερης ενέργειας. Το σχήμα συνοψίζει τον μοριακό σχεδιασμό, τον συμβιβασμό της στερεάς κατάστασης και τη διαδρομή μεταφοράς ενέργειας — όχι μια άμεση μέτρηση επίδοσης συσκευής.

Harada et al. / Nature Communications CC BY 4.0

Τι έκαναν οι συγγραφείς

Ο μηχανισμός είναι **photon upconversion** μέσω αλληλοεξουδετέρωσης τριπλέτας-τριπλέτας-τριπλέτας (TTA-UC). Σε απλοποιημένη μορφή:

1. ένα μόριο-δότης απορροφά ορατό φως και σχηματίζει μια μακρόβια διεγερμένη κατάσταση τριπλέτας·
2. αυτή η ενέργεια τριπλέτας μεταφέρεται σε ένα μόριο-δέκτη·
3. δύο διεγερμένοι δέκτες συναντιούνται·
4. η ενέργειά τους συνδυάζεται σε μία μονήρη κατάσταση υψηλότερης ενέργειας·
5. ο δέκτης εκπέμπει φωτόνιο υψηλότερης ενέργειας — εδώ, υπεριώδες φως.

Στα υγρά, το βήμα 3 βοηθιέται από τη μοριακή διάχυση. Τα μόρια κινούνται και συγκρούονται. Σε έναν στερεό κρύσταλλο δεν το κάνουν. Η ενέργεια πρέπει να μεταναστεύσει μέσα από το πυκνά συσκευασμένο υλικό και η συσκευασία πρέπει να είναι ακριβώς σωστή.

Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν μια οικογένεια μορίων βασισμένων στο **dihydroindeno[2,1-a]indene** (DHI). Η κίνηση σχεδιασμού ήταν απλή ως ιδέα: προσάρτησαν αλκυλικές αλυσίδες πάνω και κάτω από το πηλεκτρονικό επίπεδο του μορίου. Αυτές οι πλευρικές αλυσίδες λειτουργούν σαν αποστάτες ή προφυλακτήρες. Εμποδίζουν το φθορίζον π-σύστημα να συσκευαστεί υπερβολικά πυκνά, μειώνοντας την απόσβεση, ενώ εξακολουθούν να επιτρέπουν το σωστό είδος επαφής τροχιακών για να μετακινείται η ενέργεια τριπλέτας.

Δοκίμασαν αρκετά παράγωγα και εντόπισαν το **iBu-DHI** — την ισοβουτυλο-υποκατεστημένη εκδοχή — ως τον καλύτερο συμβιβασμό. Το συνδύασαν με τον δότη τριπλέτας **Ir(ppy)₃**, κατασκεύασαν κρυσταλλικά στερεά φιλμ με spin-coating ή drop-casting και μέτρησαν φθορισμό, χρόνο ζωής τριπλέτας, συμπεριφορά διάχυσης τριπλέτας, κβαντική απόδοση upconversion, αντοχή στο οξυγόνο και κατώφλι έντασης διέγερσης.

Τι βρήκαν

Οι πλευρικές αλυσίδες προστάτευαν τις διεγερμένες καταστάσεις. Το απλό DHI φθορίζει πολύ καλά σε αραιό διάλυμα αλλά άσχημα στον κρύσταλλο: η κβαντική απόδοση φθορισμού πέφτει από 96% στο διάλυμα σε 10% στον κρύσταλλο. Με iBu-DHI, ο κρύσταλλος εξακολουθούσε

να φθορίζει ισχυρά — περίπου 69% πριν από άλεση και 83% μετά, συγκρίσιμο με την τιμή στο διάλυμα. Αυτό είναι το πρώτο μισό του τεχνάσματος: το στερεό δεν καταστρέφει πια τόσο εύκολα τη μονήρη διεγερμένη κατάσταση.

Το καλύτερο στερεό φιλμ μετέτρεπε ορατό φως σε UV σε χαμηλή ένταση. Σε φιλμ iBu-DHI/Ir(ppy)₃ που κατασκευάστηκε με spin-coating, οι συγγραφείς αναφέρουν απόλυτη κβαντική απόδοση upconversion **1.9%** μετά από διόρθωση για αυτοαπορρόφηση, με κατώφλι έντασης διέγερσης **1.2 mW cm⁻²** στα 445 nm. Το συγκρίνουν με την ηλιακή ακτινοβολία κοντά σε αυτό το μήκος κύματος, περίπου **1.4 mW cm⁻²** για 445 ± 5 nm. Με απλά λόγια: το υλικό λειτουργούσε στο εύρος έντασης του συνηθισμένου ηλιακού φωτός, όχι μόνο κάτω από πολύ ισχυρό λέιζερ.

Η επίδοση στη στερεά κατάσταση προέκυψε από συμβιβασμό, όχι απλώς από μεγαλύτερο όγκο. Η αύξηση της απόστασης μεταξύ μορίων μπορεί να μειώσει την απόσβεση, αλλά η υπερβολική απόσταση επιβραδύνει τη μετανάστευση ενέργειας τριπλέτας. Το ογκώδες παράγωγο 2-EtBu-DHI είχε μεγάλους χρόνους ζωής τριπλέτας αλλά κακή συμπεριφορά ως προς το κατώφλι upconversion. Ο κρύσταλλος iBu-DHI φαίνεται να βρίσκεται πιο κοντά στο χρήσιμο μέσο: αρκετή στερεοχημική προστασία για να περιορίζει την απόσβεση, αρκετή μοριακή επαφή για μεταφορά τριπλέτας και αλληλοεξουδετέρωση τριπλέτας-τριπλέτας.

Το υλικό δεν ήταν απλώς ένα σύστημα διαλύματος παγωμένο στη θέση του. Η εργασία υποστηρίζει ότι μετρούν η κρυσταλλική συσκευασία, η ομοιογενής κατανομή του δότη και η πυκνή μοριακή διάταξη. Χάρτες SEM-EDX δεν έδειξαν διαχωρισμό του δότη σε κλίμακα μικρομέτρων στα σχετικά φιλμ, ενώ η απόσβεση του φωσφορισμού του δότη υποδείκνυε αποτελεσματική μεταφορά ενέργειας τριπλέτας. Το συμπληρωματικό υλικό περιλαμβάνει επίσης θεωρητικές εκτιμήσεις των χρόνων μεταφοράς και αλληλοεξουδετέρωσης τριπλέτας για ζεύγη μορίων στους κρυστάλλους.

Έδειξε εκπομπή ανεκτική στο οξυγόνο. Το οξυγόνο συνήθως αποσβένει τις καταστάσεις τριπλέτας, σημαντική ενόχληση για TTA-UC. Τα πυκνά στερεά φιλμ εξακολουθούσαν να δείχνουν upconversion στον αέρα, μετά από μια αρχική περίοδο ενεργοποίησης κατά την οποία καταναλωνόταν οξυγόνο. Αυτό έχει πρακτική σημασία, αλλά δεν ισοδυναμεί με απόδειξη μακροχρόνιας σταθερότητας μιας υπαίθριας συσκευής.

Τι πιθανότατα σημαίνει αυτό

Η υπερασπίσιμη ανάγνωση είναι ότι πρόκειται για καθαρό αποτέλεσμα σχεδιασμού υλικού. Οι συγγραφείς βρήκαν τρόπο να ρυθμίσουν τη συσκευασία ενός οργανικού π-ηλεκτρονικού συστήματος ώστε ένα στερεό να κάνει upconversion ορατού σε UV, κάτι που συνήθως είναι πολύ ευκολότερο σε διάλυμα. Η πρόοδος δεν είναι ότι υπάρχει photon upconversion· είναι ότι το συγκεκριμένο σύστημα στερεάς κατάστασης συνδυάζει αρκετές ιδιότητες που συνήθως συγκρούονται: υψηλή απόδοση φθορισμού, μεγάλο χρόνο ζωής τριπλέτας, γρήγορη διάχυση τριπλέτας, αυτοχή στο οξυγόνο και λειτουργία κοντά στην ηλιακή ακτινοβολία.

Το ευρύτερο μάθημα είναι χρήσιμο πέρα από αυτό το μόριο. Για TTA-UC στερεάς κατάστασης,

η ερώτηση δεν είναι ξεχωριστά «πώς προστατεύουμε τις διεγερμένες καταστάσεις;» ή «πώς μετακινούμε την ενέργεια τριπλέτας;». Είναι πώς σχεδιάζουμε τη μοριακή απόσταση ώστε να ισχύουν και τα δύο ταυτόχρονα. Το αποτέλεσμα iBu-DHI είναι συγκεκριμένο παράδειγμα αυτής της αρχής σχεδιασμού.

Η δελεαστική υπερερμηνεία είναι επίσης προφανής: ορατό ηλιακό φως μετατράπηκε σε UV, άρα λύθηκε η ηλιακή χημεία. Αυτό δεν δείχνει η εργασία. Δείχνει ένα υλικό με υποσχόμενο φωτοφυσικό μηχανισμό και συγκεκριμένους αριθμούς επίδοσης, σε ελεγχόμενα φιλμ και καθορισμένες οπτικές συνθήκες.

Τι δεν αποδεικνύει

- **Δεν είναι συσκευή ηλιακής ενέργειας.** Δεν υπάρχει ολοκληρωμένη συσκευή, υπαίθρια μονάδα, ενεργειακό ισοζύγιο σε επίπεδο συστήματος ή αποδεδειγμένο χρήσιμο χημικό προϊόν που τροφοδοτείται από το φιλμ.
- **Δεν είναι «δωρεάν UV από τον ήλιο».** Η κβαντική απόδοση upconversion στο στερεό είναι **1.9%**, όχι σχεδόν πλήρης μετατροπή. Είναι σημαντική για αυτή την κατηγορία υλικού, αλλά τα περισσότερα εισερχόμενα φωτόνια δεν γίνονται φωτόνια UV.
- **Δεν δείχνει ευρεία ανθεκτικότητα σε πραγματική χρήση.** Οι συγγραφείς δοκιμάζουν φωτοσταθερότητα και ανοχή στο οξυγόνο υπό ελεγχόμενες συνθήκες, αλλά αυτό δεν είναι το ίδιο με μήνες ή χρόνια λειτουργίας υπό θερμότητα, υγρασία, οξυγόνο, μηχανική καταπόνηση και ευρυζωνικό ηλιακό φως.
- **Εξαρτάται από συγκεκριμένο σύστημα δότη-δέκτη.** Το καλύτερο αποτέλεσμα χρησιμοποιεί iBu-DHI με Ir(ppy)₃. Η εργασία δείχνει επίσης ότι συγγενικά μοριακά παράγωγα μπορούν να έχουν πολύ χειρότερη επίδοση, άρα δεν είναι γενική συνταγή «πρόσθεσε αλκυλικές αλυσίδες και δουλεύει».
- **Δεν εξαλείφει όλες τις πρακτικές ανησυχίες.** Το Ir(ppy)₃ περιέχει ιρίδιο· οι συγγραφείς δείχνουν επίσης ευαισθητοποίηση με δότες TADF χωρίς μέταλλα σε συμπληρωματικά πειράματα, αλλά η καλύτερη περίπτωση στερεάς κατάστασης εξακολουθεί να χρησιμοποιεί δότη ιριδίου.
- **Δεν αποδεικνύει ότι το upconversion ορατού σε UV θα είναι οικονομικά ή τεχνολογικά χρήσιμο για φωτοκατάλυση, ηλιακά καύσιμα, αισθητήρες ή αποστείρωση.** Αυτά είναι πιθανά πεδία εφαρμογής, όχι αποτελέσματα της εργασίας.

Πόσο ισχυρά είναι τα στοιχεία;

Για τον κεντρικό φωτοφυσικό ισχυρισμό, τα στοιχεία είναι ισχυρά: η εργασία αναφέρει συνεπείς μετρήσεις απορρόφησης/εκπομπής, κβαντικές αποδόσεις φθορισμού, χρόνους ζωής τριπλέτας, κατώφλια έντασης διέγερσης, φάσματα upconversion, απόλυτες μετρήσεις κβαντικής απόδοσης, κρυσταλλικές δομές, ελέγχους κατανομής του δότη, συμπληρωματικά πρωτογενή δεδομένα και θεωρητικούς υπολογισμούς που στηρίζουν τον προτεινόμενο

μηχανισμό συσκευασίας. Το άρθρο στο *Nature Communications* είναι ανοικτής πρόσβασης και είναι διαθέσιμα τόσο το συμπληρωματικό υλικό όσο και το αρχείο πρωτογενών δεδομένων.

Η κύρια προσοχή αφορά το εύρος. Το ισχυρότερο συμπέρασμα αφορά ένα υλικό υπό εργαστηριακό χαρακτηρισμό. Το βήμα από «στερεό φιλμ με 1.9% upconversion ορατού σε UV κοντά σε μπλε ένταση αντίστοιχη του ηλιακού φωτός» σε «χρήσιμη ηλιακή τεχνολογία» είναι μεγάλο. Θα απαιτούσε ολοκλήρωση σε συσκευή, σταθερότητα, χρήσιμη έξοδο, κλιμακώσιμη παραγωγή και λόγο για τον οποίο τα φωτόνια UV από upconversion είναι καλύτερα από άλλους τρόπους τροφοδότησης της επιθυμητής χημείας.

Υπάρχει και ένα λεπτό ζήτημα διατύπωσης. Το «sunlight-level» αναφέρεται στην ένταση κοντά στο μήκος κύματος διέγερσης που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα, όχι αυτομάτως σε αποδοτική λειτουργία υπό ολόκληρο το ηλιακό φάσμα σε πραγματική συσκευή. Η διάκριση έχει σημασία.

Γιατί έχει σημασία

Το photon upconversion εξηγείται εύκολα άσχημα: μπαίνουν δύο ασθενέστερα φωτόνια, βγαίνει ένα ισχυρότερο. Όμως το δύσκολο μέρος δεν είναι το σύνθημα. Είναι να οργανώσεις πραγματικά μόρια ώστε η ενέργεια να αποθηκευτεί αρκετά, να κινηθεί αρκετά μακριά και να συνδυαστεί προτού χαθεί ως θερμότητα.

Η εργασία δίνει σε αυτή τη δυσκολία υλική μορφή. Οι πλευρικές αλυσίδες δεν είναι διακοσμητικές. Είναι μοριακή αρχιτεκτονική: θωρακίζουν το π-σύστημα πάνω και κάτω, καταστέλλουν την απόσβεση και αφήνουν ταυτόχρονα μονοπάτι για να ταξιδεύει η ενέργεια τριπλέτας. Αυτό είναι το κομμάτι που αξίζει να διδαχθεί, επειδή μετατρέπει ένα αόριστο «καλύτερο υλικό» σε έναν φυσικό συμβιβασμό που ο αναγνώστης μπορεί να φανταστεί.

Αν μελλοντικές συσκευές upconversion ορατού σε UV γίνουν χρήσιμες, θα χρειαστούν πολλά βήματα πέρα από αυτή την εργασία. Θα χρειαστούν όμως ακριβώς και αυτό το είδος μοριακού ελέγχου. Το αποτέλεσμα δεν είναι επανάσταση σε επίπεδο συσκευής· είναι ισχυρή επίδειξη του πώς μπορείς να κάνεις ένα στερεό να εκτελεί ένα φωτοφυσικό τέχνασμα που τα στερεά συνήθως χαλούν.

Καθαρή σύνοψη

Οι ερευνητές σχεδίασαν μια οικογένεια οργανικών μορίων βασισμένων στο DHI, των οποίων οι αλκυλικές πλευρικές αλυσίδες θωρακίζουν από πάνω και κάτω το π-ηλεκτρονικό επίπεδο. Στην καλύτερη περίπτωση, iBu-DHI αναμεμειγμένο με τον δότη τριπλέτας Ir(ppy)₃ σχημάτισε κρυσταλλικό στερεό φιλμ που μετέτρεπε ορατό μπλε φως σε υπεριώδη εκπομπή μέσω αλληλοεξουδετέρωσης τριπλέτας-τριπλέτας-τριπλέτας. Το φιλμ έφτασε απόλυτη κβαντική απόδοση upconversion **1.9%** και κατώφλι έντασης διέγερσης **1.2 mW cm⁻²**, κοντά στην

ηλιακή ακτινοβολία γύρω από το μήκος κύματος διέγερσης των 445 nm. Η πραγματική πρόοδος είναι η μοριακή συσκευασία: αρκετή απόσταση ώστε να περιορίζεται η απόσβεση διεγερμένων καταστάσεων, αλλά αρκετή επαφή ώστε να γίνεται μεταφορά και διάχυση ενέργειας τριπλέτας. Είναι ισχυρή επίδειξη υλικού για photon upconversion ορατού σε UV στη στερεά κατάσταση — όχι συσκευή ηλιακής ενέργειας, όχι «δωρεάν UV» και όχι απόδειξη αναπτυσσόμενης τεχνολογίας.

Έλεγχος χωρίς υπερβολές

Τι δείχνει η εργασία: Ένα συγκεκριμένο κρυσταλλικό στερεό φιλμ iBu-DHI/Ir(ppy)₃ εκτελεί TTA photon upconversion από ορατό σε UV με απόλυτη κβαντική απόδοση 1.9% και κατώφλι 1.2 mW cm⁻² στα 445 nm, διατηρώντας υψηλή απόδοση φθορισμού, μεγάλο χρόνο ζωής τριπλέτας, γρήγορη διάχυση τριπλέτας και κάποια ανοχή στο οξυγόνο. Ο σχεδιασμός λειτουργεί προστατεύοντας στερεοχημικά το π-σύστημα ενώ διατηρεί χρήσιμες μοριακές επαφές.

Τι είναι εύλογο αλλά δεν έχει αποδειχθεί: Ότι η ίδια αρχή συσκευασίας μπορεί να δημιουργήσει καλύτερα υλικά upconversion στερεάς κατάστασης· ότι σχετικά συστήματα ευαισθητοποιητών χωρίς μέταλλα μπορούν να βελτιστοποιηθούν προς συγκρίσιμη επίδοση· ότι τέτοια φιλμ μπορεί κάποτε να βοηθήσουν εφαρμογές φωτοκατάλυσης ή ηλιακής χημείας.

Τι δεν δείχνει: Λειτουργική συσκευή· χρήσιμη παραγωγή ηλιακού καυσίμου ή φωτοκαταλυτικού προϊόντος· αντοχή σε εξωτερικό περιβάλλον· υψηλή συνολική απόδοση σε ολόκληρο το ηλιακό φάσμα· οικονομική πρακτικότητα· γενική συνταγή που δουλεύει για οποιοδήποτε χρωμοφόρο.

Κύριοι περιορισμοί: Εργαστηριακό φιλμ, συγκεκριμένο σύστημα υλικού, μέτρια απόλυτη κβαντική απόδοση, δότης ιριδίου στην καλύτερη περίπτωση, ελεγχόμενο μήκος κύματος διέγερσης και καμία επίδειξη σε επίπεδο συσκευής. Το «sunlight-level» είναι τοπικό στη ζώνη διέγερσης, όχι πλήρης ισχυρισμός ηλιακής τεχνολογίας.

Πόση εμπιστοσύνη πρέπει να έχει ένας γενικός αναγνώστης; Υψηλή ότι ο σχεδιασμός υλικού βελτιώνει το TTA-UC ορατού σε UV στη στερεά κατάσταση για το σύστημα που δοκιμάστηκε και υψηλή ότι το αποτέλεσμα είναι επιστημονικά ουσιαστικό. Χαμηλή ότι αυτό βρίσκεται κοντά σε αναπτύξιμη ηλιακή τεχνολογία. Η κατάλληλη στάση: μια έξυπνη, πραγματική πρόοδος στα υλικά — με την ιστορία των εφαρμογών να βρίσκεται ακόμη κυρίως μπροστά.

Πηγές

Nature Communications 17, 5134 (2026)

<https://doi.org/10.1038/s41467-026-73898-0>

Supplementary Information

https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1038%2Fs41467-026-73898-0/MediaObjects/41467_2026_73898_MOESM1_ESM.pdf

Source Data

https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1038%2Fs41467-026-73898-0/MediaObjects/41467_2026_73898_MOESM3_ESM.xlsx