



Co-funded by
the European Union

Διδακτική ενότητα: Το Φωτοβολταϊκό Ταξίδι: Αιχμαλωτίζοντας τον Ήλιο

DiFC - Πανεπιστήμιο του Παλέρμο



BIOS4YOU
AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY

Project Number: KA220-BW-23-30-126516

"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them."





Περιεχόμενα

1. Το Φωτοβολταϊκό Ταξίδι: Αιχμαλωτίζοντας τον Ήλιο	3
Μετατροπή ενέργειας σε ηλιακά κύτταρα· από φωτόνια σε ηλεκτρόνια· φυσική φωτοβολταϊκών συστημάτων	3
2. Εξερεύνηση Ενότητας	4
Φάση εμπλοκής	4
Δραστηριότητες καταιγισμού ιδεών στην τάξη	5
Βασικό Επίπεδο	6
Φυσική της Μετατροπής Ηλιακής Ενέργειας	6
Από φωτόνια σε ηλεκτρόνια: η σύνδεση P-N	8
Δομή σε στρώσεις και συλλογή φορτίου	9
Από τη διασταύρωση στο κύκλωμα: ρεύμα και τάση	10
Από τη θεωρία στα καθημερινά αντικείμενα	10
Πόροι που βασίζονται στο διαδίκτυο	11
Προχωρημένο επίπεδο	11
Ανεστραμμένη Μάθηση:	13
3. Μονάδα Λειτουργίας	14
Βασικό Επίπεδο	14
Προχωρημένο επίπεδο	15
Δραστηριότητες:	17
4. Αναφορές	18





Γενικό θέμα της μαθησιακής διαδρομής	Το Φωτοβολταϊκό Ταξίδι: Αιχμαλωτίζοντας τον Ήλιο
Συγκεκριμένη ονομασία της μαθησιακής μονάδας	Μετατροπή ενέργειας σε ηλιακά κύτταρα· από φωτόνια σε ηλεκτρόνια· φυσική φωτοβολταϊκών συστημάτων
Ηλικία των χρηστών-στόχων	17–19 ετών
Απαιτήσεις για τον εκπαιδευόμενο	Βασικές γνώσεις φυσικής (ηλεκτρομαγνητικά κύματα, ενέργεια, ηλεκτρικό ρεύμα και τάση), χημείας (ατομική δομή, ηλεκτρόνια, χημικοί δεσμοί) και εισαγωγικές έννοιες ηλεκτρισμού και μετατροπής ενέργειας.
Περιγραφή της μαθησιακής μονάδας	Η ενότητα καθοδηγεί τους μαθητές και τους εκπαιδευτικούς σε μια διεπιστημονική πορεία που ενσωματώνει τη φυσική, τη χημεία και την τεχνολογία, ώστε να κατανοήσουν πώς η ηλιακή ενέργεια συλλαμβάνεται και μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω φωτοβολταϊκών κυψελών. Οι μαθητές θα εξερευνήσουν το ταξίδι των φωτονίων από το ηλιακό φως έως την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, αναλύοντας τη στρωματοποιημένη δομή των ηλιακών κυψελών (επαφή P-N, ημιαγωγοί), το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και τους μηχανισμούς ροής ηλεκτρονίων. Η χρήση ψηφιακών εργαλείων και εργαλείων AR έχει ως στόχο να καταστήσει ορατές τις κατά τα άλλα αόρατες διαδικασίες (απορρόφηση φωτονίων, παραγωγή ζεύγους ηλεκτρονίων-οπών, ηλεκτρικό πεδίο στην επαφή, ροή ρεύματος), συνδέοντας με σαφήνεια και





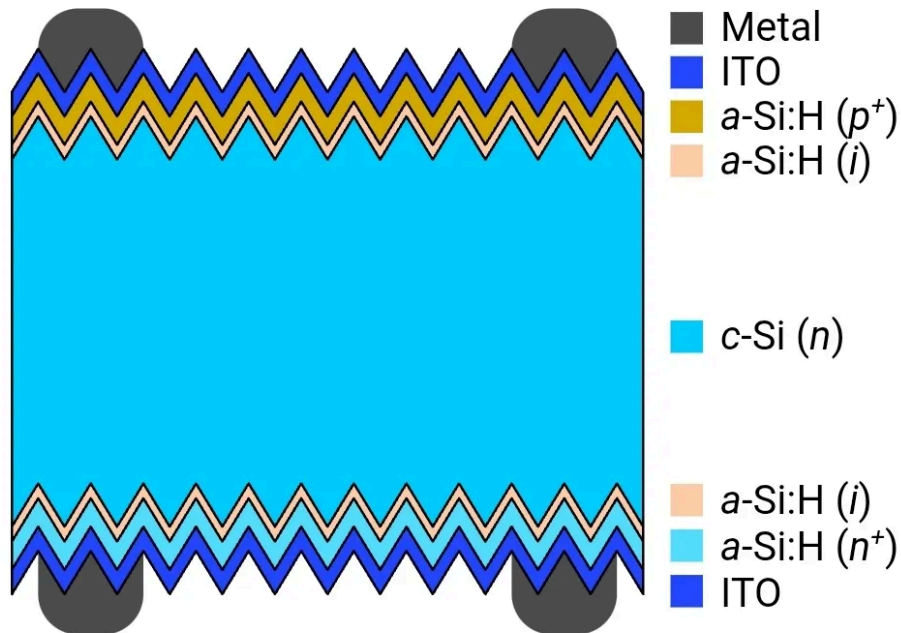
	προοδευτικά τις φυσικές αρχές με τεχνολογικές εφαρμογές για βιώσιμη παραγωγή ενέργειας.
Θέμα: Εμπλεκόμενα μέρη	Φυσική (Οπτική, Ηλεκτρομαγνητισμός), Χημεία (Ημιαγωγικά Υλικά), Τεχνολογία (Φωτοβολταϊκή Μηχανική), Βιωσιμότητα (Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας)
Λέξεις-κλειδιά	Ηλιακή ενέργεια; Φωτοβολταϊκό στοιχείο; Φωτόνια; Ηλεκτρόνια; Επαφή P-N; Ημιαγωγοί; Μετατροπή ενέργειας; Ηλεκτρικό ρεύμα; Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας; Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR); Μάθηση βασισμένη σε σκηνές
Βασικά προσόντα, δεξιότητες και γνώσεις που μπορούν να αποκτηθούν	• Συλλογιστική και επίλυση προβλημάτων σε διεργασίες μετατροπής ενέργειας • Σχεδιαστική σκέψη εφαρμοσμένη στην διαδοχική οπτικοποίηση φυσικών φαινομένων • Πρακτικές γνώσεις: φωτοβολταϊκό φαινόμενο, φυσική ημιαγωγών, δομή ηλιακών κυψελών, ηλεκτρικά κυκλώματα • Δεξιότητες ψηφιακής/επαυξημένης πραγματικότητας (AR): τρισδιάστατη απεικόνιση διεργασιών ατομικής κλίμακας, διαδραστικά διαγράμματα, πλοήγηση σε σκηνές
Χρησιμοποιήθηκαν πόροι και διδακτικά βοηθήματα	Πλατφόρμες επαυξημένης πραγματικότητας (π.χ., Delightex Studio – Spaces, Marker), αξιόπιστοι διαδικτυακοί πόροι και εκπαιδευτικά βίντεο σχετικά με την ηλιακή ενέργεια και τα φωτοβολταϊκά, επιστημονικά άρθρα και βάσεις δεδομένων, διαγράμματα και τρισδιάστατα μοντέλα (στρώματα ηλιακών κυψελών, σύνδεση P-N, ροή ηλεκτρονίων, φωτοβολταϊκά συστήματα) και επικαλύψεις κειμένου για βασικά δεδομένα.
Κριτήρια αξιολόγησης και αξιολόγηση	Αξιολόγηση γνώσεων (αλληλουχία φωτονίων-ηλεκτρονίων-ρευμάτων), δεξιοτήτων (σχέσεις αιτίας-αποτελέσματος μεταξύ απορρόφησης φωτονίων και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας) και ικανοτήτων (συνειδητή χρήση εργαλείων επαυξημένης πραγματικότητας, διεπιστημονική ενσωμάτωση μεταξύ φυσικής και τεχνολογίας βιώσιμης ενέργειας).



1. Το Φωτοβολταϊκό Ταξίδι: Αιχμαλωτίζοντας τον Ήλιο

Μετατροπή ενέργειας σε ηλιακά κύτταρα· από φωτόνια σε ηλεκτρόνια· φυσική φωτοβολταϊκών συστημάτων

Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας προκύπτει από τη διασταύρωση της κβαντικής φυσικής και της μηχανικής υλικών. Το ηλιακό φως, που αποτελείται από φωτόνια που μεταφέρουν διακριτά πακέτα ενέργειας, χτυπά την επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου και αλληλεπιδρά με ημιαγωγικά υλικά.



Σχήμα 1. Δομή διατομής ενός ηλιακού στοιχείου ετεροεπαφής πυριτίου που δείχνει αρχιτεκτονική σε στρώσεις. Το κρυσταλλικό πυρίτιο τύπου n (c-Si) σχηματίζει το κύριο στρώμα απορρόφησης, με λεπτά στρώματα παθητικοποίησης άμορφου πυριτίου (a-Si:H) και διαφανείς επαφές ITO. (Πηγή: Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0)

Εδώ, τα φωτόνια απορροφώνται, δημιουργώντας ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών τα οποία, υπό την επίδραση ενός εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, διαχωρίζονται και ρέουν μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος. Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας δεν σημαίνει παθητική συλλογή θερμότητας, αλλά ενεργητική μετατροπή του φωτός σε χρησιμοποιήσιμο ηλεκτρικό ρεύμα μέσω ακριβώς σχεδιασμένων δομών ατομικής κλίμακας.





Η αποτελεσματικότητα της μετατροπής ενέργειας εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού και την αρχιτεκτονική του ηλιακού στοιχείου. Το πυρίτιο, ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος ημιαγωγός, «προσμιγνύεται» με ακαθαρσίες για να δημιουργήσει δύο διακριτές περιοχές: ένα στρώμα τύπου N (πλούσιο σε ηλεκτρόνια) και ένα στρώμα τύπου P (πλούσιο σε οπές). Στη διεπαφή μεταξύ αυτών των στρωμάτων - την επαφή P-N - σχηματίζεται φυσικά ένα ηλεκτρικό πεδίο. Αυτό το πεδίο είναι απαραίτητο: παρέχει την κινητήρια δύναμη που διαχωρίζει τα φωτοπαραγόμενα ηλεκτρόνια και τις οπές, εμποδίζοντάς τα να ανασυνδυαστούν και διασφαλίζοντας ότι οι φορείς φορτίου ρέουν σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση για να παράγουν ρεύμα.

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ξεκινά όταν ένα φωτόνιο με επαρκή ενέργεια χτυπήσει το ημιαγωγικό υλικό. Εάν η ενέργεια του φωτονίου υπερβεί το ενεργειακό χάσμα - την ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για να απελευθερωθεί ένα ηλεκτρόνιο από τον ατομικό του δεσμό - το ηλεκτρόνιο προωθείται από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας πίσω του μια θετικά φορτισμένη «οπή». Αυτό το ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής αντιπροσωπεύει τη θεμελιώδη μονάδα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας: η φωτεινή ενέργεια μετασχηματίζεται σε διαχωρισμό φορτίου σε ατομικό επίπεδο.

Η σύνδεση P-N λειτουργεί ως μονόδρομη πύλη για τους φορείς φορτίου. Το ενσωματωμένο ηλεκτρικό πεδίο σαρώνει ηλεκτρόνια προς την περιοχή τύπου N και οπές προς την περιοχή τύπου P. Όταν μεταλλικές επαφές είναι προσαρτημένες και στις δύο πλευρές και συνδεδεμένες μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος, ηλεκτρόνια ρέουν από την πλευρά N μέσω του κυκλώματος προς την πλευρά P, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα. Η τάση που παράγεται από ένα μόνο στοιχείο πυριτίου είναι περίπου 0,5-0,6 βολτ. Πολλαπλά στοιχεία συνδέονται σε σειρά για να επιτευχθούν υψηλότερες τάσεις κατάλληλες για πρακτικές εφαρμογές.

Η ενεργειακή απόδοση και η αποδοτικότητα επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες: την ένταση και το φάσμα του εισερχόμενου φωτός, την ποιότητα των ημιαγωγών υλικών, τη θερμοκρασία του κελιού και τον σχεδιασμό των αντανάκλαστικών επιστρώσεων που μεγιστοποιούν την απορρόφηση φωτονίων. Τα σύγχρονα ηλιακά κύτταρα πυριτίου επιτυγχάνουν αποδόσεις 15-22%, που σημαίνει ότι μόνο ένα κλάσμα της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Προηγμένα υλικά όπως οι περοβσκίτες και τα στοιχεία πολλαπλών συνδέσεων αυξάνουν την αποδοτικότητα, αλλά οι συμβιβασμοί στο κόστος, τη σταθερότητα και την πολυπλοκότητα κατασκευής παραμένουν ενεργά πεδία έρευνας.

Από εκπαιδευτική άποψη, είναι κρίσιμο να διευκρινιστεί η διαδοχική αλυσίδα γεγονότων: (1) φωτόνια φτάνουν και διεισδύουν στην κυτταρική επιφάνεια· (2) φωτόνια με επαρκή ενέργεια δημιουργούν ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών στον ημιαγωγό· (3) το ηλεκτρικό πεδίο στη σύνδεση P-N διαχωρίζει αυτούς τους φορείς φορτίου· (4) ηλεκτρόνια ρέουν μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα· (5) ενέργεια διοχετεύεται σε ένα φορτίο (λάμπα, μπαταρία, δίκτυο). Η παρουσίαση αυτών των βημάτων με διατεταγμένο τρόπο βοηθά τους μαθητές να συνδέσουν φαινόμενα κβαντικής κλίμακας με μακροσκοπική παραγωγή ενέργειας.

Η στοχευμένη χρήση ψηφιακών εργαλείων και εργαλείων επαυξημένης πραγματικότητας καθιστά δυνατή την απεικόνιση διαδικασιών που κατά τα άλλα θα ήταν αόρατες, όπως η απορρόφηση φωτονίων σε ατομικό επίπεδο, ο σχηματισμός της περιοχής εξάντλησης στην ένωση P-N και η κατευθυνόμενη ροή ηλεκτρονίων μέσω του κυκλώματος. Η οπτικοποίηση σκηνή προς σκηνή





διευκολύνει την κατανόηση των σχέσεων μεταξύ της μικροσκοπικής φυσικής και των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μεγάλης κλίμακας.

Ας αναλογιστούμε μαζί.

Γιατί δεν μπορούμε να εξάγουμε ηλεκτρική ενέργεια από το ηλιακό φως χωρίς ημιαγωγούς; Πώς η επαφή P-N μετατρέπει την τυχαία απορρόφηση φωτονίων σε κατευθυνόμενη ροή ηλεκτρονίων; Ποιος είναι ο ρόλος της ενέργειας του ενεργειακού χάσματος στον προσδιορισμό των μηκών κύματος του φωτός που μπορούν να μετατραπούν σε ηλεκτρική ενέργεια; Αυτά τα ερωτήματα βοηθούν στη σύνδεση των παρατηρήσιμων φαινομένων της ηλιακής ενέργειας με τους υποκείμενους κβαντικούς και ηλεκτρικούς μηχανισμούς.

2. Εξερεύνηση Ενότητας

Φάση εμπλοκής

Κατευθυντήρια ερώτηση. *Μπορούμε να εξάγουμε ηλεκτρική ενέργεια από το ηλιακό φως χωρίς κινούμενα μέρη;*

Το μάθημα ξεκινά με μια σύντομη επίδειξη: ένα μικρό ηλιακό πάνελ συνδεδεμένο σε μια λυχνία LED ή μια αριθμομηχανή. Όταν εκτίθεται στο φως, η συσκευή λειτουργεί. Όταν καλύπτεται, σταματά. Ο σκοπός δεν είναι απλώς να δείξουμε ότι «τα ηλιακά πάνελ λειτουργούν», αλλά να εισαγάγουμε την ιδέα ότι η φωτεινή ενέργεια μπορεί να μετατραπεί απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της φυσικής στερεάς κατάστασης - χωρίς στροβίλους, χωρίς καύση, χωρίς μηχανική κίνηση.

Αρχικά ερεθίσματα (βίντεο και σύντομοι πόροι)

Πώς λειτουργούν τα ηλιακά πάνελ; TED-Ed: μια σαφής κινούμενη επισκόπηση των φωτοβολταϊκών στοιχείων, της σύνδεσης P-N και της ροής ηλεκτρονίων.

<https://www.youtube.com/watch?v=xKxrkht7CpY>

Βασικά στοιχεία για την ηλιακή ενέργεια – Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ: μια προσβάσιμη εισαγωγή στην φωτοβολταϊκή τεχνολογία και τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

<https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics>

Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο: διαδραστική εξερεύνηση του τρόπου με τον οποίο τα φωτόνια αλληλεπιδρούν με μεταλλικές επιφάνειες για την εκτόξευση ηλεκτρονίων, επιδεικνύοντας κβαντικές ιδιότητες του φωτός.

<https://phet.colorado.edu/en/simulations/photoelectric>

Εναρκτήρια δραστηριότητα (5–10 λεπτά).

Μια γρήγορη επίδειξη ή ένα βίντεο κλιπ που δείχνει ένα ηλιακό στοιχείο να τροφοδοτεί έναν μικρό





κινητήρα ή να φορτίζει μια μπαταρία καλεί τους μαθητές να ρωτήσουν: "*Πώς το φως μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό χωρίς να κινούνται καλώδια ή να αντιδρούν χημικές ουσίες;*"

Στόχος είναι να τονιστεί ότι **Η μετατροπή ενέργειας είναι μια κβαντική διαδικασία** που συμβαίνει σε ατομικό επίπεδο μέσα σε ημιαγωγικά υλικά και όχι σε μακροσκοπικό μηχανικό ή θερμικό μετασχηματισμό.

Προτεινόμενο βίντεο: *Πώς λειτουργούν τα ηλιακά πάνελ*(SciShow)

https://www.youtube.com/watch?v=L_q6LRgKpTw

Δραστηριότητες καταιγισμού ιδεών στην τάξη

Κύριο ερώτημα. Χωρίς φως, δεν υπάρχει φωτοβολταϊκό ρεύμα: τι συμβαίνει στα φωτόνια καθώς εισέρχονται στο ηλιακό κύτταρο και πώς παράγουν ένα ηλεκτρικό σήμα που μπορεί να τροφοδοτήσει συσκευές;

Ερωτήσεις που προκαλούν

Τι καθορίζει εάν ένα φωτόνιο μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια σε ένα ηλιακό κύτταρο;

Η ενέργεια του φωτονίου πρέπει να υπερβαίνει το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού. Το ενεργειακό χάσμα του πυριτίου (~1,1 eV) σημαίνει ότι μόνο φωτόνια με μήκη κύματος μικρότερα από ~1100 nm (ορατό και εγγύς υπέρυθρο φως) μπορούν να απελευθερώσουν ηλεκτρόνια και να παράγουν ρεύμα.

Γιατί δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε όλο το ηλιακό φως που φτάνει σε ένα ηλιακό πάνελ;

Επειδή τα φωτόνια με ενέργεια κάτω από το ενεργειακό χάσμα διέρχονται χωρίς να παράγουν φορείς φορτίου, ενώ τα φωτόνια με πολύ υψηλότερη ενέργεια σπαταλούν την περίσσεια ενέργειας ως θερμότητα. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο τα στοιχεία πυριτίου μονής σύνδεσης έχουν θεωρητική μέγιστη απόδοση ~33% (όριο Shockley-Queisser).

Μήπως το ηλιακό στοιχείο «αποθηκεύει» ηλεκτρική ενέργεια όπως μια μπαταρία;

Όχι. Το ηλιακό στοιχείο παράγει ρεύμα μόνο όταν φωτίζεται. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο παράγει διαχωρισμό φορτίου και ροή σε πραγματικό χρόνο. Για την αποθήκευση ενέργειας, απαιτείται μια εξωτερική μπαταρία ή πυκνωτής.

Γιατί ορισμένα ηλιακά πάνελ λειτουργούν καλύτερα σε άμεσο ηλιακό φως παρά σε σκιά;

Επειδή η ένταση του φωτός (ροή φωτονίων) επηρεάζει άμεσα τον αριθμό των ζευγών ηλεκτρονίων-οπών που παράγονται. Χαμηλότερη ένταση σημαίνει λιγότερα φωτόνια, λιγότερους φορείς φορτίου και μειωμένη έξοδο ρεύματος. Η τάση παραμένει σχετικά σταθερή, αλλά το ρεύμα μειώνεται σημαντικά.



Μικρο-εργασία.

Επιστημονικά τα στρώματα ενός ηλιακού στοιχείου (αντιανακλαστική επίστρωση, πυρίτιο τύπου N, επαφή P-N, πυρίτιο τύπου P, οπίσθια επαφή) χρησιμοποιώντας ένα φύλλο εργασίας ή ένα διαδραστικό διάγραμμα.

Προτεινόμενος πόρος: Διάγραμμα Δομής Ηλιακών Κυψελών- Εγκυκλοπαίδεια Μπριτάνικα

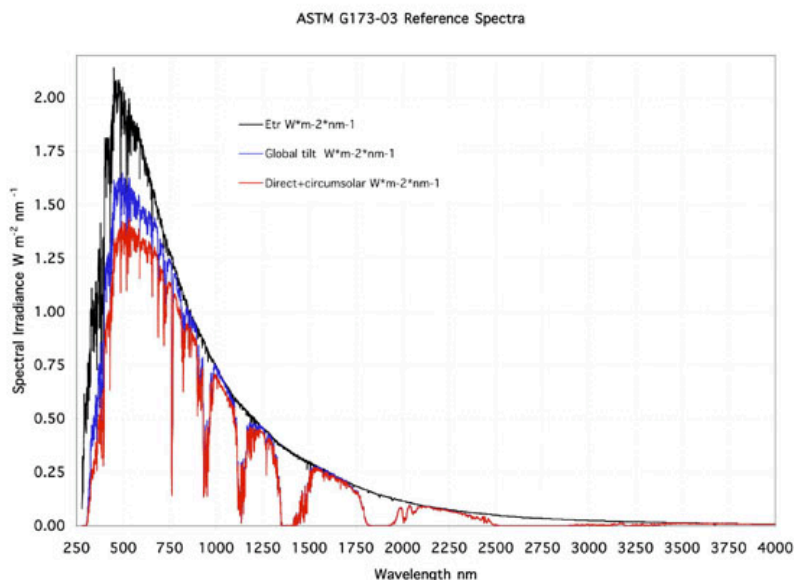
<https://www.britannica.com/technology/solar-cell>

Βασικό Επίπεδο

Φυσική της Μετατροπής Ηλιακής Ενέργειας

Φως, απορρόφηση και ενέργεια φωτονίων

Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας ξεκινά όταν φωτόνια από το ηλιακό φως προσπίπτουν στην επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου. Το ηλιακό φως είναι ένα μείγμα ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που εκτείνονται σε υπεριώδη, ορατά και υπέρυθρα μήκη κύματος. Κάθε φωτόνιο μεταφέρει ένα διακριτό πακέτο ενέργειας που καθορίζεται από το μήκος κύματός του: τα μικρότερα μήκη κύματος (μπλε φως) μεταφέρουν περισσότερη ενέργεια από τα μεγαλύτερα μήκη κύματος (κόκκινο φως).



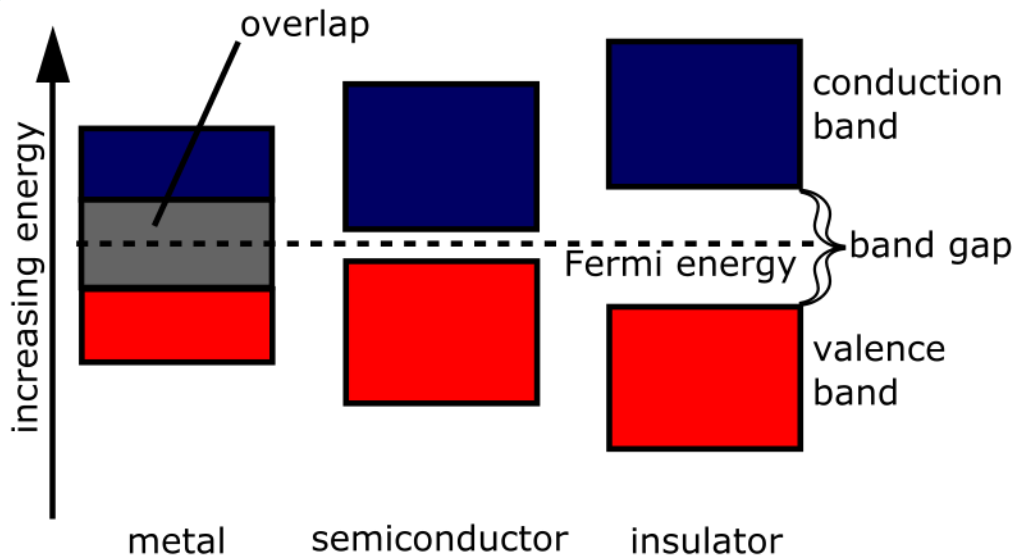
Σχήμα 2 Ηλιακή φασματική ακτινοβολία (φασματικά φάσματα αναφοράς ASTM G173-03) που δείχνει την κατανομή της ενέργειας των φωτονίων σε όλα τα μήκη κύματος. Τα ηλιακά κύτταρα πυριτίου με ενεργειακό χάσμα ~1,1 eV (που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος ~1100 nm) μπορούν να μετατρέψουν μόνο ορατά και εγγύς υπέρυθρα φωτόνια. (Πηγή: NREL)

Όταν ένα φωτόνιο εισέρχεται σε ένα ημιαγωγό υλικό όπως το πυρίτιο, μπορεί να απορροφηθεί, να ανακλαστεί ή να μεταδοθεί.

Η απορρόφηση είναι το κλειδί: εάν η ενέργεια του φωτονίου είναι ίση ή υπερβαίνει την ενέργεια



ενεργειακού χάσματος του υλικού (την ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για να απελευθερωθεί ένα ηλεκτρόνιο από τον ατομικό του δεσμό), το ηλεκτρόνιο προωθείται από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας.



Σχήμα 3 Σύγκριση δομών ενεργειακών ζωνών σε μέταλλα, ημιαγωγούς και μονωτές. Σε ημιαγωγούς όπως το πυρίτιο, το ενεργειακό χάσμα ($E_g \approx 1,1 \text{ eV}$) είναι αρκετά μικρό ώστε τα φωτόνια να μπορούν να διεγείρουν ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους (κόκκινη) στη ζώνη αγωγιμότητας (μπλε), επιτρέποντας τη μετατροπή φωτοβολταϊκής ενέργειας. (Πηγή: Wikimedia Commons, Δημόσιος Τομέας)

Αυτό δημιουργεί ένα **ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής**—ένα κινητό αρνητικό φορτίο (ηλεκτρόνιο) και μια αντίστοιχη θετική κενή θέση (οπή).

Τι καθορίζει αν ένα φωτόνιο απορροφάται ή διέρχεται;

Η σχέση μεταξύ της ενέργειας των φωτονίων και του ενεργειακού χάσματος του ημιαγωγού. Το ενεργειακό χάσμα του πυριτίου είναι $\sim 1,1 \text{ eV}$, που αντιστοιχεί στο υπέρυθρο φως στα $\sim 1100 \text{ nm}$. Φωτόνια με λιγότερη ενέργεια διέρχονται από αυτήν, ενώ φωτόνια με πολύ περισσότερη ενέργεια παράγουν θερμότητα αφού απελευθερώσουν ηλεκτρόνια.

Από φωτόνια σε ηλεκτρόνια: η σύνδεση P-N

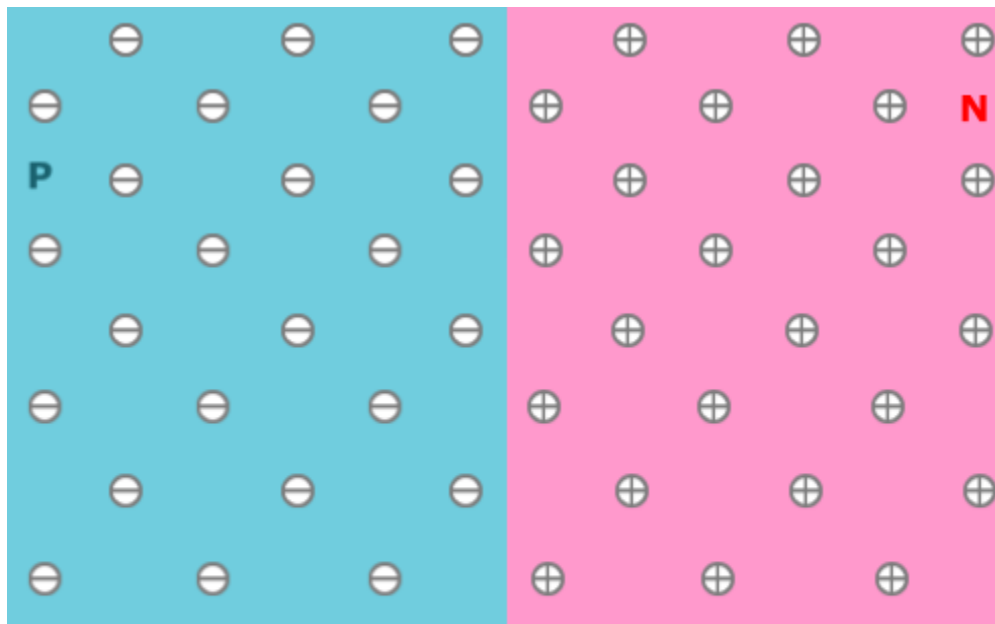
Το απορροφημένο φωτόνιο δημιουργεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής, αλλά χωρίς εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, αυτά τα φορτία θα ανασυνδυάζονταν γρήγορα, απελευθερώνοντας ενέργεια ως θερμότητα αντί για ηλεκτρική ενέργεια. Εδώ είναι που το **Διασταύρωση P-N** καθίσταται απαραίτητο.

Το πυρίτιο «προσμιγνύεται» με ακαθαρσίες για να δημιουργήσει δύο ξεχωριστές περιοχές:



- **Πυρίτιο τύπου N:** ντοπαρισμένο με φώσφορο (επιπλέον ηλεκτρόνια → φορείς αρνητικού φορτίου)
- **Πυρίτιο τύπου P:** ντοπαρισμένο με βόριο (έλλειμμα ηλεκτρονίων → θετικές "οπές")

Στα όρια μεταξύ των περιοχών τύπου N και τύπου P, **μια ζώνη εξάντλησης σχηματίζεται φυσικά**. Τα ηλεκτρόνια από την πλευρά N διαχέονται προς τα εμπρός για να γεμίσουν οπές στην πλευρά P, αφήνοντας πίσω θετικά φορτισμένα άτομα στην πλευρά N και αρνητικά φορτισμένα άτομα στην πλευρά P. Αυτός ο διαχωρισμός φορτίου δημιουργεί ένα **ενσωματωμένο ηλεκτρικό πεδίο** δείχνει από B προς Π.



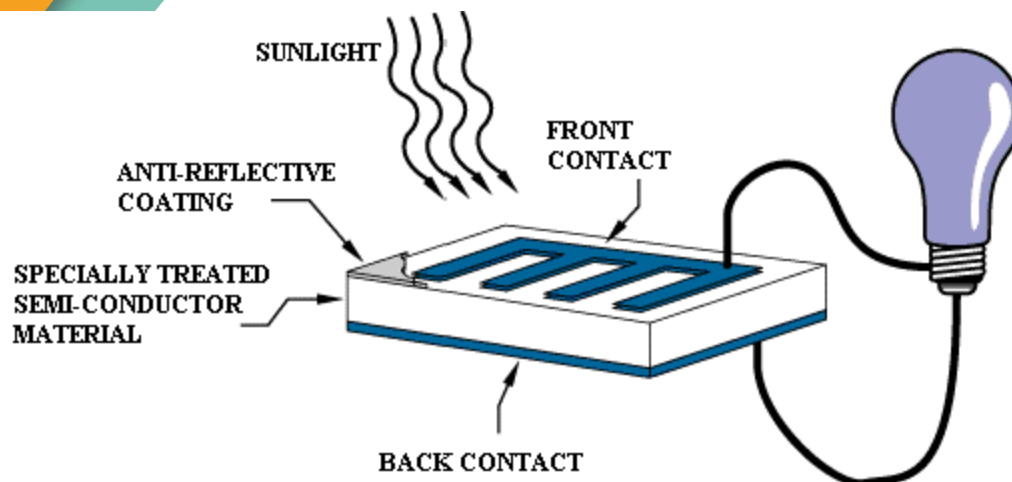
Σχήμα 4. Σχηματική αναπαράσταση μιας επαφής P-N πριν από την ισορροπία. Η περιοχή τύπου P (αριστερά, κυανό) περιέχει περίσσεια οπών (φορείς θετικού φορτίου), ενώ η περιοχή τύπου N (δεξιά, ροζ) περιέχει περίσσεια ηλεκτρονίων (φορείς αρνητικού φορτίου). Όταν οι δύο περιοχές έρθουν σε επαφή, οι φορείς φορτίου διαχέονται κατά μήκος της επαφής. (Πηγή: PVEducation.org, εκπαιδευτική χρήση)

Όταν ένα φωτόνιο παράγει ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής κοντά στην επαφή, το ηλεκτρικό πεδίο σαρώνει το ηλεκτρόνιο προς την πλευρά N και την οπή προς την πλευρά P. **Αυτός ο διαχωρισμός αποτρέπει τον ανασυνδυασμό** και οδηγεί φορείς φορτίου σε αντίθετες κατευθύνσεις, δημιουργώντας μια διαφορά τάσης μεταξύ των δύο πλευρών του κελιού.

Γιατί τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών διαχωρίζονται αντί να ανασυνδυάζονται αμέσως;

Επειδή το ηλεκτρικό πεδίο στη σύνδεση P-N παρέχει μια κινητήρια δύναμη ισχυρότερη από την τυχαία θερμική κίνηση, κατευθύνοντας τα ηλεκτρόνια και τις οπές μακριά το ένα από το άλλο πριν μπορέσουν να ανασυνδυαστούν.





Σχήμα 5 Πλήρης λειτουργία ηλιακού στοιχείου που δείχνει τη μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρικό ρεύμα. Τα φωτόνια προσπίπτουν στο ημιαγωγικό υλικό μέσω της αντιανακλαστικής επίστρωσης, δημιουργώντας ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών που διαχωρίζονται από το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο. Τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσω του εξωτερικού κυκλώματος (που αντιπροσωπεύεται από τη λάμπα) πριν επιστρέψουν για να ανασυνδυαστούν, δημιουργώντας αξιοποιήσιμη ηλεκτρική ενέργεια. (Πηγή: Wikimedia Commons, Δημόσιος Τομέας)

Δομή σε στρώσεις και συλλογή φορτίου

Ένα τυπικό ηλιακό κύτταρο πυριτίου έχει πολλαπλά στρώματα βελτιστοποιημένα για απορρόφηση φωτός και συλλογή φορτίου:

Αντιανακλαστική επίστρωση (επάνω): μειώνει την αντανάκλαση, μεγιστοποιώντας την είσοδο φωτονίων

Πυρίτιο τύπου N (λεπτό στρώμα): περιοχή πλούσια σε ηλεκτρόνια όπου συλλέγονται ηλεκτρόνια

Σύνδεση P-N (διεπαφή): όπου το ηλεκτρικό πεδίο διαχωρίζει τους φορείς φορτίου

Πυρίτιο τύπου P (παχύτερη βάση): όπου συλλέγονται οι οπές

Μεταλλικές επαφές (πάνω και κάτω): οδηγούν ηλεκτρόνια σε εξωτερικό κύκλωμα

Η μπροστινή επαφή έχει σχεδιαστεί ως μοτίβο πλέγματος για την ελαχιστοποίηση της σκίασης κατά τη συλλογή ρεύματος. Η πίσω επαφή καλύπτει ολόκληρη την πίσω επιφάνεια για μέγιστη αγωγιμότητα.

Γιατί το στρώμα N είναι λεπτότερο από το στρώμα P;

Επειδή τα περισσότερα φωτόνια απορροφώνται κοντά στην επιφάνεια, ένα λεπτό στρώμα N διασφαλίζει ότι οι φωτοπαραγόμενοι φορείς βρίσκονται κοντά στο ηλεκτρικό πεδίο της επαφής για αποτελεσματικό διαχωρισμό, ενώ το παχύτερο στρώμα P απορροφά φωτόνια μεγαλύτερου μήκους κύματος βαθύτερα στο υλικό.





Από τη διασταύρωση στο κύκλωμα: ρεύμα και τάση

Όταν το ηλιακό φως φωτίζει το κύτταρο, η συνεχής απορρόφηση φωτονίων δημιουργεί μια σταθερή παροχή ζευγών ηλεκτρονίων-οπών. Το ηλεκτρικό πεδίο της επαφής διαχωρίζει συνεχώς αυτά τα φορτία, οδηγώντας ηλεκτρόνια προς την πλευρά N και οπές προς την πλευρά P.

Όταν οι μεταλλικές επαφές είναι προσαρτημένες και συνδεδεμένες μέσω εξωτερικού κυκλώματος, **Τα ηλεκτρόνια ρέουν από την πλευρά N, μέσω του κυκλώματος (τροφοδοτώντας ένα φορτίο) και επιστρέφουν στην πλευρά P** να ανασυνδυαστεί με τρύπες. Αυτή η ροή αποτελεί **φωτοβολταϊκό ρεύμα**.

Η τάση που παράγεται από ένα μόνο στοιχείο πυριτίου είναι περίπου **0,5–0,6 βολτ**, που καθορίζεται από την ενέργεια του ενεργειακού χάσματος και τα χαρακτηριστικά της επαφής. Το ρεύμα εξαρτάται από την ένταση του φωτός και την επιφάνεια του κυττάρου: περισσότερα φωτόνια → περισσότερα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών → υψηλότερο ρεύμα.

Αν ένα μόνο στοιχείο παράγει μόνο ~0,5V, πώς παράγουν οι ηλιακοί συλλέκτες χρήσιμες τάσεις;

Πολλαπλά κελιά συνδέονται σε **σειρά** (θετικός ακροδέκτης του ενός στον αρνητικό ακροδέκτη του επόμενου) για την προσθήκη τάσεων. Ένας τυπικός πίνακας περιέχει 60–72 στοιχεία σε σειρά, παράγοντας 30–40 βολτ υπό κανονικές συνθήκες.

Από τη θεωρία στα καθημερινά αντικείμενα

Οι ίδιες αρχές που λειτουργούν στα ηλιακά κύτταρα βρίσκονται σε:

- **Ηλιακοί υπολογιστές:** μικρά στοιχεία που παρέχουν ισχύ χιλιοστών του βάτους για συσκευές χαμηλής ενέργειας
- **Ηλιακοί συλλέκτες στέγης:** συστοιχίες σειριακά συνδεδεμένων κυψελών που παράγουν κιλοβάτ για κατοικίες
- **Ηλιακά πάρκα:** εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας που παράγουν μεγαβάτ για το ηλεκτρικό δίκτυο
- **Διαστημικοί δορυφόροι:** κυψέλες πολλαπλών συνδέσεων υψηλής απόδοσης που τροφοδοτούν διαστημόπλοια όπου η αξιοπιστία είναι κρίσιμη

Η ανάδειξη της κβαντικής φυσικής από την αφηρημένη προσέγγιση βοηθά τους μαθητές να κατανοήσουν όχι μόνο πως τα φωτοβολταϊκά λειτουργούν, αλλά **Γιατί** Οι επιλογές σχεδιασμού (επιλογή ενεργειακού χάσματος, αντιανακλαστικές επιστρώσεις, πάχος κυψέλης) επηρεάζουν άμεσα την ενεργειακή απόδοση σε πραγματικό κόσμο.

Ας αναλογιστούμε μαζί.

Η μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια απαιτεί ακριβή έλεγχο σε ατομικό επίπεδο. Εάν η σύνδεση P-N είναι απαραίτητη για τον διαχωρισμό φορτίου, γιατί δεν μπορούμε να





χρησιμοποιήσουμε κανέναν ημιαγωγό; Ποιος είναι ο ρόλος της πρόσμιξης στη δημιουργία του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου; Πώς επηρεάζουν η θερμοκρασία, η σκίαση και η ποιότητα του υλικού την απόδοση της μετατροπής ενέργειας;

Πόροι που βασίζονται στο διαδίκτυο

Πώς λειτουργούν τα ηλιακά πάνελ; – TED-Ed

<https://www.youtube.com/watch?v=xKxrkht7CpY>

Κινούμενη εξήγηση των φωτοβολταϊκών στοιχείων και της ροής ηλεκτρονίων.

Βασικές Αρχές Ηλιακής Φωτοβολταϊκής Τεχνολογίας – Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ

<https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics>

Επισκόπηση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας και της μετατροπής ηλιακής ενέργειας.

PhET – Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

<https://phet.colorado.edu/en/simulations/photoelectric>

Διαδραστική εξερεύνηση της ενέργειας των φωτονίων και της εκτόξευσης ηλεκτρονίων.

Προχωρημένο επίπεδο

Κβαντομηχανική της φωτοβολταϊκής μετατροπής

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι ουσιαστικά ένα κβαντικό φαινόμενο. Όταν ένα φωτόνιο απορροφάται από ένα άτομο πυριτίου, η ενέργειά του πρέπει να υπερνικήσει την **ενέργεια ενεργειακού χάσματος** (Π.χ. $\approx 1,1$ eV για κρυσταλλικό πυρίτιο) για την προώθηση ενός ηλεκτρονίου από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Αυτή η διαδικασία δημιουργεί ένα ζεύγος **ηλεκτρονίου-οπής** με πιθανότητα που καθορίζεται από τον συντελεστή απορρόφησης του υλικού και την ενέργεια φωτονίων.

Απώλειες ενέργειας εμφανίζονται σε πολλαπλά στάδια:

- **Φωτόνια με $E < E_g$** διέρχονται χωρίς να δημιουργούν φορείς φορτίου (απώλειες μετάδοσης)
- **Φωτόνια με $E \gg E_g$** δημιουργούν «θερμούς» φορείς που χάνουν γρήγορα την περίσσεια ενέργειας ως θερμότητα μέσω **θερμοποίησης**
- **Επιφανειακή αντανάκλαση** (χωρίς αντανάκλαστική επίστρωση, χάνεται $\sim 30\%$ του προσπίπτοντος φωτός)
- **Ανασυνδυασμός** (τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών ανασυνδυάζονται πριν φτάσουν σε επαφές, απελευθερώνοντας ενέργεια ως θερμότητα ή φως)

Το **Όριο Shockley-Queisser** καθορίζει τη θεωρητική μέγιστη απόδοση για ένα ηλιακό κύτταρο μίας σύνδεσης στο $\sim 33\%$ υπό το τυπικό ηλιακό φάσμα (AM1.5G). Τα πραγματικά κύτταρα πυριτίου επιτυγχάνουν $15\text{--}22\%$ λόγω πρόσθετων απωλειών από αντίσταση, ατελή υλικά και μη ιδανικές ιδιότητες σύνδεσης.





Αποδοτικότητα, φασματική απόκριση και βελτιστοποίηση υλικών

Η απόδοση των ηλιακών κυψελών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πόσο καλά ταιριάζει το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού με το ηλιακό φάσμα. Το ενεργειακό χάσμα των 1,1 eV του πυριτίου αποτελεί συμβιβασμό: συλλαμβάνει αποτελεσματικά το ορατό και το εγγύς υπέρυθρο φως, αλλά δεν μπορεί να αξιοποιήσει υπέρυθρα φωτόνια χαμηλότερης ενέργειας ή να εκμεταλλευτεί πλήρως τα υπεριώδη φωτόνια υψηλής ενέργειας.

Προηγμένες στρατηγικές για την υπέρβαση του ορίου Shockley-Queisser:

- **Κύτταρα πολλαπλών συνδέσεων (tandem):** Συνδυάστε ημιαγωγούς με διαφορετικά ενεργειακά κενά (π.χ., GaInP/GaAs/Ge) έτσι ώστε κάθε στρώμα να απορροφά ένα συγκεκριμένο τμήμα του φάσματος. Η απόδοση του εργαστηρίου υπερβαίνει το 47% υπό συγκεντρωμένο ηλιακό φως.
- **Κύτταρα περοβσκίτη** Υβριδικά οργανικά-ανόργανα υλικά με ρυθμιζόμενα ενεργειακά κενά, ταχεία μεταφορά φορτίου και κατασκευή που μπορεί να υποστεί επεξεργασία σε διάλυμα. Οι τρέχουσες αποδόσεις πλησιάζουν το 26%, αλλά η σταθερότητα και η επεκτασιμότητα παραμένουν προκλήσεις.
- **Θερμά στοιχεία μεταφοράς**(πειραματικό): Συλλογή ενέργειας από θερμούς φορείς πριν από τη θερμοποίηση, με απόδοση που ενδεχομένως υπερβαίνει το 66%. Απαιτούνται μηχανισμοί εξαιρετικά γρήγορης εξαγωγής φορτίου, οι οποίοι δεν είναι ακόμη εμπορικά βιώσιμοι.

Γιατί τα φωτόνια υψηλής ενέργειας μειώνουν τη συνολική απόδοση;

Επειδή η περίσσεια ενέργειας πάνω από το ενεργειακό χάσμα χάνεται γρήγορα ως θερμότητα μέσω εκπομπής φωνονίων (θερμοποίηση) μέσα σε πικο δευτερόλεπτα. Ένα φωτόνιο 3 eV (UV) παράγει το ίδιο ζεύγος ηλεκτρονίων-οπών με ένα φωτόνιο 1,2 eV (κόκκινο), σπαταλώντας 1,9 eV ως θερμότητα.

Γιατί δεν μπορούμε απλώς να χρησιμοποιήσουμε ένα πολύ μικρό ενεργειακό χάσμα για να καταγράψουμε όλα τα φωτόνια;

Επειδή τα μικρότερα ενεργειακά κενά παράγουν χαμηλότερη τάση ($V \propto E_g$), και η θερμική παραγωγή φορέων αυξάνεται, αυξάνοντας το "σκοτεινό ρεύμα" που μειώνει την καθαρή απόδοση. Υπάρχει ένα βέλτιστο ενεργειακό χάσμα (~1,1–1,4 eV) που εξισορροπεί την απορρόφηση φωτονίων και την έξοδο τάσης.

Μεταφορά φορτίου, ανασυνδυασμός και φυσική συσκευών

Μετά την παραγωγή στη σύνδεση, οι φορείς φορτίου πρέπει να ταξιδέψουν στις επαφές χωρίς να ανασυνδυαστούν. **Μηχανισμοί ανασυνδυασμού όριο απόδοσης:**

- **Ακτινοβολικός ανασυνδυασμός:** ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών ανασυνδυάζονται, εκπέμποντας φωτόνια (σημαντικά σε υλικά άμεσου ενεργειακού χάσματος όπως το GaAs, ελάχιστα στο πυρίτιο)





- **Ανασυνδυασμός Auger:** αλληλεπίδραση τριών σωματιδίων όπου η ενέργεια μεταφέρεται σε έναν τρίτο φορέα αντί να εκπέμπεται ως φως (αυξάνεται σε υψηλές πυκνότητες φορέων)
- **Ανασυνδυασμός Shockley-Read-Hall (SRH):** ελαττώματα και ακαθαρσίες στους φορείς παγίδευσης κρυσταλλικού πλέγματος, διευκολύνοντας τον ανασυνδυασμό (κυριαρχεί σε πυρίτιο χαμηλότερης ποιότητας)

Υψηλής ποιότητας κρυσταλλικό **πυρίτιο ελαχιστοποιεί** τον ανασυνδυασμό SRH μέσω ελεγχόμενης παραγωγής. **Στρώσεις παθητικοποίησης** (π.χ., νιτρίδιο του πυριτίου, οξείδιο του αργιλίου) σε επιφάνειες μειώνουν τον ανασυνδυασμό της διεπιφάνειας. **Προφίλ ντόπινγκ είναι** βελτιστοποιημένα έτσι ώστε το ηλεκτρικό πεδίο να εκτείνεται σε όλη την ενεργό περιοχή, εξασφαλίζοντας γρήγορο διαχωρισμό των φορέων.

Γιατί η θερμοκρασία μειώνει την απόδοση των ηλιακών κυψελών;

Επειδή η υψηλότερη θερμοκρασία αυξάνει τις δονήσεις του πλέγματος (φωνόνια), οι οποίες διασκορπίζουν τους φορείς φορτίου, μειώνουν την κινητικότητα και αυξάνουν τους ρυθμούς ανασυνδυασμού. Επιπλέον, το ενεργειακό χάσμα μειώνεται ελαφρώς με τη θερμοκρασία ($\sim -0,3$ meV/K για πυρίτιο), μειώνοντας την τάση εξόδου. Τυπική απώλεια απόδοσης: $\sim 0,4\%$ ανά $^{\circ}\text{C}$ πάνω από 25°C .

Ενσωμάτωση συστήματος και απόδοση σε πραγματικό κόσμο

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα δεν περιλαμβάνει μόνο ηλιακά στοιχεία, αλλά:

- **Μετατροπείς:** μετατροπή εξόδου DC σε AC για συμβατότητα με το δίκτυο
- **Μέγιστη Παρακολούθηση PowerPoint (MPPT):** προσαρμόζει συνεχώς το φορτίο για να εξάγει τη μέγιστη ισχύ καθώς αλλάζουν οι συνθήκες φωτισμού
- **Αποθήκευση ενέργειας** (προαιρετικά): οι μπαταρίες αποθηκεύουν την πλεονάζουσα παραγωγή για νυχτερινές ή συννεφιασμένες περιόδους
- **Σύνδεση δικτύου:** τροφοδοτούν το πλεονάζον ενεργειακό απόθεμα στο ηλεκτρικό δίκτυο, συχνά με πολιτικές συμψηφισμού μετρήσεων

Συντελεστής χωρητικότητας (πραγματική ενεργειακή απόδοση / θεωρητικό μέγιστο) για ηλιακές εγκαταστάσεις είναι συνήθως 15–25%, περιορισμένη από:

- Κύκλοι ημέρας/νύχτας
- Μεταβλητότητα καιρού
- Εποχιακές αλλαγές στη γωνία του ήλιου
- Απώλειες συστήματος (αντίσταση καλωδίωσης, αναποτελεσματικότητα μετατροπέα, σκίαση)

Γιατί τα ηλιακά πάνελ φθείρονται με την πάροδο του χρόνου;

Η έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία, η διείσδυση υγρασίας, ο θερμικός κύκλος και η υποβάθμιση που προκαλείται από το δυναμικό (PID) μειώνουν σταδιακά την απόδοση. Οι μονάδες υψηλής





ποιοτητας χάνουν ~0,5% απόδοση ανά έτος. Οι εγγυήσεις συνήθως εγγυώνται 80% απόδοση μετά από 25 χρόνια.

Ας συλλογιστούμε μαζί

Γιατί τα σύγχρονα ηλιακά κύτταρα εξακολουθούν να λειτουργούν πολύ κάτω από το όριο Shockley-Queisser;

Επειδή τα υλικά του πραγματικού κόσμου έχουν ελαττώματα, οι επιφάνειες εισάγουν ανασυνδυασμό και η εξαγωγή φορτίου δεν είναι απόλυτα αποτελεσματική. Η γεφύρωση του χάσματος μεταξύ θεωρητικής και πρακτικής απόδοσης οδηγεί στη συνεχή έρευνα στην επιστήμη των υλικών και στη μηχανική συσκευών.

Γιατί δεν μπορούμε να επιτύχουμε 100% απόδοση ακόμη και με τέλεια υλικά;

Επειδή ισχύουν θεμελιώδεις θερμοδυναμικοί και κβαντομηχανικοί περιορισμοί: δεν μπορούν να απορροφηθούν όλα τα φωτόνια (φασματική αναντιστοιχία), η θερμοποίηση σπαταλά φωτόνια υψηλής ενέργειας και η διατήρηση της τάσης εξόδου απαιτεί κάποια διασπορά ενέργειας. Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής τελικά περιορίζει την απόδοση της μετατροπής.

Ανεστραμμένη Μάθηση:

Σκοπός. Προετοιμαστείτε για συζήτηση στην τάξη κατανοώντας την ακολουθία φωτόνιο → απορρόφηση → διαχωρισμός φορτίου → ροή ρεύματος και οι συνδέσεις φυσικής/μηχανικής στα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Εργασίες (προς υποβολή ως έκθεση 1–2 σελίδων ή 6–8 διαφάνειες):

1. **Σύντομη ανάγνωση** σχετικά με τη δομή ενός ηλιακού στοιχείου πυριτίου και την πορεία των φωτονίων. Κύρια σημεία: αντιανακλαστική επίστρωση, στρώμα τύπου N, επαφή P-N, στρώμα τύπου P, μεταλλικές επαφές.
2. **Φύλλο εργασίας "Πυρίτιο τύπου N έναντι πυριτίου τύπου P"**: συμπληρώστε έναν πίνακα με:
 - ο Στοιχείο πρόσμιξης (φώσφορος/βόριο)
 - ο Φορέας φορτίου πλειοψηφίας (ηλεκτρόνια/οπές)
 - ο Ρόλος στον διαχωρισμό φορτίου
 - ο Θέση στη δομή των κυττάρων (πάνω/κάτω)
3. **Προσομοίωση ημιαγωγών PhET**: δημιουργία δύο στιγμιότυπων οθόνης -
α. **Εγγενές (μη ενισχυμένο) πυρίτιο**: παρατηρήστε ενεργειακές ζώνες και έλλειψη ελεύθερων φορέων
β. **τοποθετημένο πυρίτιο (σύνδεση N+P)**: παρατηρήστε την κάμψη της ζώνης, το ενσωματωμένο ηλεκτρικό πεδίο και τον διαχωρισμό φορτίου υπό φωτισμό
4. **Σύντομη σύνθεση (μέγιστο 120 λέξεις)**: εξηγήστε με δικά σας λόγια πώς το ηλιακό στοιχείο δεν «συλλέγει» το ηλιακό φως όπως ένα θερμικό πάνελ αλλά μετατρέπει την





ενέργεια των φωτονίων σε διαχωρισμένα ηλεκτρικά φορτία μέσω της κβαντικής απορρόφησης και της φυσικής των επαφών.

5. **Τρεις ερωτήσεις απολογισμού:**

- ο Ένα για την κβαντική φυσική: Γιατί η ενέργεια των φωτονίων πρέπει να υπερβαίνει το ενεργειακό χάσμα;
- ο Ένα για την επιστήμη των υλικών: Πώς η προσθήκη προσθέτων δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο;
- ο Ένα για τη μηχανική συστημάτων: Γιατί τα ηλιακά πάνελ παράγουν συνεχές ρεύμα, αλλά τα σπίτια χρησιμοποιούν εναλλασσόμενο ρεύμα;

Υποβολή. Ανεβάστε το PDF ή τις διαφάνειες στο κανάλι της τάξης πριν από το μάθημα.

3. Μονάδα Λειτουργίας

Βασικό Επίπεδο

Η κατανόηση της διαδικασίας φωτοβολταϊκής μετατροπής μπορεί να εμβαθύνει μέσα από μια σειρά πρακτικών δραστηριοτήτων που επιτρέπουν στους μαθητές να παρατηρούν τόσο κβαντικά όσο και ηλεκτρικά φαινόμενα που εμπλέκονται στη δέσμευση ηλιακής ενέργειας. Στόχος αυτής της ενότητας είναι να εφαρμόσει, με καθοδηγούμενο τρόπο, τις έννοιες της απορρόφησης φωτονίων, του διαχωρισμού φορτίου και της παραγωγής ρεύματος που μελετήθηκαν στο θεωρητικό μέρος, συνδέοντας τη **φυσική των ημιαγωγών με ενεργειακά συστήματα πραγματικού κόσμου.**

Όταν το φως προσπίπτει σε ένα ημιαγωγικό υλικό, φωτόνια με επαρκή ενέργεια διεγείρουν ηλεκτρόνια από δεσμευμένες καταστάσεις σε κινητούς φορείς φορτίου - ένα κβαντικό φαινόμενο αόρατο στην άμεση παρατήρηση αλλά μετρήσιμο με ηλεκτρικά όργανα. Οι μαθητές μπορούν να παρατηρήσουν αυτή τη συμπεριφορά χρησιμοποιώντας ένα απλό πείραμα: συνδέστε ένα μικρό ηλιακό στοιχείο σε ένα πολύμετρο και εκθέστε το σε διαφορετικές πηγές φωτός (ηλιακό φως, λάμπα LED, φακό). Καθώς η ένταση του φωτός αυξάνεται, το ρεύμα αυξάνεται αναλογικά, ενώ η τάση παραμένει σχετικά σταθερή. Αυτή η άμεση μέτρηση δείχνει πώς η ροή φωτονίων μεταφράζεται σε ηλεκτρική έξοδο.

Μέσω της προσομοίωσης, οι μαθητές μπορούν να παρατηρήσουν διαγράμματα ενεργειακών ζωνών, να εφαρμόσουν πρόσμιξη για να δημιουργήσουν περιοχές τύπου N και τύπου P και να απεικονίσουν πώς η επαφή P-N παράγει ένα ενσωματωμένο ηλεκτρικό πεδίο. Όταν εισάγεται φως, οι μαθητές βλέπουν ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών να παράγονται και να διαχωρίζονται από το πεδίο επαφής, παράγοντας ροή ρεύματος. Αυτή η δραστηριότητα βοηθά τους μαθητές να κατανοήσουν πώς **Η προσθήκη χημικών ουσιών και η φυσική των συνδέσεων επιτρέπουν την κατευθυντική μεταφορά φορτίου**-τα θεμέλια της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών.





Από αυτές τις παρατηρήσεις προκύπτουν ουσιαστικά ερωτήματα: Ποια είναι η σχέση μεταξύ της ενέργειας των φωτονίων και της διέγερσης των ηλεκτρονίων; Γιατί η πρόσμιξη δημιουργεί ένα εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο χωρίς εξωτερική τάση; Η σύγκριση του προσομοιωμένου ημιαγωγού με την πραγματική δομή του ηλιακού στοιχείου διευκρινίζει πώς η μηχανική υλικών σε ατομική κλίμακα καθορίζει τη μακροσκοπική ηλεκτρική απόδοση.

Η εστίαση στη συνέχεια μετατοπίζεται στο πολυεπίπεδο **αρχιτεκτονική ηλιακών κυψελών**. Οι μαθητές αναλύουν τη διάταξη των λειτουργικών στρωμάτων - αντιστατική επίστρωση, εκπομπός τύπου N, επαφή P-N, βάση τύπου P, μεταλλικές επαφές - και τους συμπληρωματικούς τους ρόλους:

- Η **αντιστατική επίστρωση** μεγιστοποιεί την είσοδο φωτονίων μειώνοντας την επιφανειακή ανάκλαση
- Το λεπτό **στρώμα Συλλαμβάνει** ηλεκτρόνια που παράγονται κοντά στην επιφάνεια
- Διασταύρωση **P-N** δημιουργεί το ηλεκτρικό πεδίο που διαχωρίζει τους φορείς φορτίου
- Το **παχύ στρώμα P** απορροφά φωτόνια μεγαλύτερου μήκους κύματος βαθύτερα στο υλικό
- **Μεταλλικές επαφές** συλλέγουν και άγουν ρεύμα σε εξωτερικά κυκλώματα

Η συζήτηση στην τάξη συνεχίζεται αναλύοντας τη συμπεριφορά των κυττάρων υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες φωτισμού. Γιατί το ρεύμα εξόδου αλλάζει δραματικά με τη σκίαση ενώ η τάση παραμένει σχετικά σταθερή; Η απάντηση βρίσκεται στην **άμεση αναλογία μεταξύ ροής φωτονίων και παραγωγής φορέων φορτίου**. Αυτή η συλλογική αναστοχασμός βοηθά τους μαθητές να κατανοήσουν πώς ο σχεδιασμός του ηλιακού συστήματος πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη μερική σκίαση, τον προσανατολισμό και τις διακυμάνσεις ανάλογα με την ώρα της ημέρας.

Στη συνέχεια, οι μαθητές καλούνται να συγκρίνουν τα ηλιακά κύτταρα με τις καθημερινές ενεργειακές συσκευές:

- **Ηλιακοί υπολογιστές**: εφαρμογές χαμηλής ισχύος όπου τα μικρά στοιχεία παρέχουν επαρκή ενέργεια
- **Πάνελ στέγης**: σειριακά συνδεδεμένα κελιά που παράγουν ενέργεια σε οικιακή κλίμακα
- **Φωτοβολταϊκά πάρκα σε κλίμακα δικτύου**: εγκαταστάσεις μεγάλα με μετατροπείς, μετασχηματιστές και συστήματα αποθήκευσης
- **Διαστημικοί δορυφόροι**: κυψέλες πολλαπλών συνδέσεων υψηλής απόδοσης όπου η αξιοπιστία και το βάρος είναι κρίσιμα

Μέσω αυτής της αναλογίας, τα φωτοβολταϊκά επανερμηνεύονται ως αλυσίδα **μετατροπής ενέργειας από κβαντική σε δίκτυο σύνδεση** της ατομικής φυσικής, της μηχανικής υλικών και των ηλεκτρικών συστημάτων.

Ας αναλογιστούμε μαζί. Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας είναι μια σύνθετη διαδικασία που συνδυάζει την κβαντομηχανική, τη φυσική στερεάς κατάστασης και την ηλεκτρολογία. Πώς περιορίζει το ενεργειακό χάσμα ημιαγωγών τα μήκη κύματος που μπορούν να μετατραπούν σε ηλεκτρική ενέργεια; Ποιες μηχανικές στρατηγικές μεγιστοποιούν την απορρόφηση φωτονίων και





ελαχιστοποιούν τον ανασυνδυασμό φορτίου; Πώς οι πραγματικοί περιορισμοί - κόστος, ανθεκτικότητα, επέκτασιμότητα - επηρεάζουν τις επιλογές σχεδιασμού των ηλιακών κυψελών;

Προχωρημένο επίπεδο

Το προχωρημένο επίπεδο εμβαθύνει στη σύνδεση μεταξύ της απορρόφησης φωτονίων και της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος μέσω εξωτερικών κυκλωμάτων. Οι μαθητές παρατηρούν πώς η φωτεινή ενέργεια μετατρέπεται σε διαχωρισμένα φορτία εντός της επαφής P-N και πώς αυτοί οι φορείς φορτίου διαδίδονται μέσω των ημιαγωγών και των μεταλλικών επαφών για να παρέχουν ισχύ.

Για να κατανοήσουμε την ακολουθία των γεγονότων, την έννοια του κάμψη **ζώνης στην** ένωση P-N εισάγεται: όταν οι περιοχές τύπου N και τύπου P έρχονται σε επαφή, τα ηλεκτρόνια διαχέονται από το N στο P και οι οπές διαχέονται από το P στο N μέχρι να επιτευχθεί ισορροπία. Αυτό δημιουργεί μία περιοχή **εξάντλησης εξαντλημένο** από κινητούς φορείς, με σταθερά θετικά φορτία στην πλευρά N και σταθερά αρνητικά φορτία στην πλευρά P. Το προκύπτουν ηλεκτρικό πεδίο ($\sim 10^5$ V/cm) είναι αρκετά ισχυρό ώστε να διαχωρίζει τα φωτοπαραγόμενα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών πριν αυτά ανασυνδυαστούν.

Η διάδοση των φορέων φορτίου και η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος απεικονίζονται μέσω μιας Προσομοίωσης **Επαυξημένης Πραγματικότητας που αναπτύχθηκε με Delightex Studio – Χώροι (Δείκτης):**

<https://edu.delightex.com/Studio/Spaces>

Χρησιμοποιώντας κινητές συσκευές, οι μαθητές εξερευνούν ένα τρισδιάστατο μοντέλο ενός ηλιακού στοιχείου:

1. Παρατηρήστε φωτόνια που χτυπούν την επιφάνεια και διεισδύουν στον ημιαγωγό
2. Οπτικοποιήστε την παραγωγή ζεύγους ηλεκτρονίων-οπών όταν η ενέργεια των φωτονίων υπερβαίνει το ενεργειακό χάσμα
3. Ακολουθήστε τα ηλεκτρόνια που σαρώνονται προς το στρώμα N και τις οπές προς το στρώμα P από το πεδίο σύνδεσης
4. Δείτε ηλεκτρόνια που ρέουν μέσω του εξωτερικού κυκλώματος (σύρμα, φορτίο, διαδρομή επιστροφής)
5. Παρακολουθήστε ολόκληρο τον βρόχο ρεύματος από την παραγωγή έως το φορτίο και πίσω

Κατά τη διάρκεια της δραστηριότητας, προτείνονται καθοδηγητικές ερωτήσεις:

– Σε ποιο σημείο του κυττάρου το φως μετατρέπεται σε διαχωρισμένα ηλεκτρικά φορτία;

Στη σύνδεση P-N, όπου το ενσωματωμένο ηλεκτρικό πεδίο διαχωρίζει τα φωτοπαραγόμενα ηλεκτρόνια και τις οπές πριν ανασυνδυαστούν.





– **Γιατί ρέει ρεύμα μέσω του εξωτερικού κυκλώματος όταν το στοιχείο είναι φωτισμένο;**
Επειδή η επαφή παράγει συνεχώς μια διαφορά τάσης (φωτοτάση) μεταξύ της πλευράς N και της πλευράς P, οδηγώντας ηλεκτρόνια μέσω του κυκλώματος για να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά δυναμικού.

– **Πώς παράγει ενέργεια το ηλιακό στοιχείο χωρίς να καταναλώνει καύσιμο ή κινούμενα μέρη;**

Μετατρέποντας απευθείας την ενέργεια των φωτονίων σε διαχωρισμό φορτίου μέσω κβαντικής απορρόφησης και στη συνέχεια εξάγοντας αυτά τα διαχωρισμένα φορτία ως ρεύμα μέσω μεταλλικών επαφών - μια μετατροπή ενέργειας σε στερεά κατάσταση χωρίς μηχανικούς ή χημικούς μετασχηματισμούς.

Οι απαντήσεις προκύπτουν μέσω ομαδικής συζήτησης και σύγκρισης μεταξύ της παραγωγής φορέων σε κβαντική κλίμακα και των μακροσκοπικών ηλεκτρικών μετρήσεων.

Το μάθημα ολοκληρώνεται με έναν αναστοχασμό πάνω στην **εξέλιξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας**. Οι μαθητές συγκρίνουν τα κρυσταλλικά στοιχεία πυριτίου πρώτης γενιάς με αναδυόμενες τεχνολογίες:

Τεχνολογία	Αποδοτικότητα	Φόντα	Προκλήσεις
Κρυσταλλικό πυρίτιο	15–22%	Ωριμο, σταθερό, επεκτάσιμο	Εντατική χρήση πόρων, άκαμπτη
Λεπτή μεμβράνη (CdTe, CIGS)	10–15%	Ευέλικτο, ελαφρύ	Χαμηλότερη απόδοση, τοξικά υλικά
Περοβσκίτης	20–26% (εργαστήριο)	Υψηλή απόδοση, χαμηλού κόστους επεξεργασία	Σταθερότητα, υποβάθμιση, περιεκτικότητα σε μόλυβδο
Πολλαπλή σύνδεση (GaAs)	30–47%	Εξαιρετικά υψηλή απόδοση	Ακριβό, χρησιμοποιείται σε χώρους/συγκεντρωτές

Ας αναλογιστούμε μαζί. Προσεγγίζουν πράγματι οι σύγχρονες ηλιακές τεχνολογίες τα θεμελιώδη φυσικά όρια ή υπάρχει περιθώριο για σημαντικές ανακαλύψεις στην επιστήμη των υλικών και την αρχιτεκτονική συσκευών; Μπορούμε να κατασκευάσουμε κελιά που μετατρέπουν αποτελεσματικά όλα τα ηλιακά μήκη κύματος ή η φασματική αναντιστοιχία θα περιορίζει πάντα τα συστήματα μονής σύνδεσης; Πώς επηρεάζουν οι οικονομικοί και περιβαλλοντικοί παράγοντες (ενέργεια παραγωγής, σπάνια υλικά, ανακύκλωση) ποιες τεχνολογίες κλιμακώνονται παγκοσμίως;





Δραστηριότητες:

Οι καταληκτικές δραστηριότητες στοχεύουν στην εμπέδωση της μάθησης και στην ενθάρρυνση της συνεργασίας μεταξύ συνομηλίκων.

Δραστηριότητα 1: Χάρτης Εννοιών

Οι μαθητές δημιουργούν ένα εννοιολογικός **χάρτης που** αντιπροσωπεύει την πλήρη ακολουθία της φωτοβολταϊκής μετατροπής, από φωτόνιο σε ηλεκτρική ισχύ, υποδεικνύοντας για κάθε φάση:

- Το Φυσικό **φαινόμενο** (απορρόφηση, διέγερση, διαχωρισμός, ροή)
- Το Υλικό/**δομή που εμπλέκεται** (ημιαγωγός, σύνδεση P-N, επαφές, κύκλωμα)
- Το Είδος **ενέργειας** (φωτόνιο → κινητικό → δυναμικό → ηλεκτρικό)

Δραστηριότητα 2: Εμπειρία Επαυξημένης Πραγματικότητας

Οι μαθητές βιώνουν ένα πλήρες ταξίδι Επαυξημένης Πραγματικότητας μέσω της διαδικασίας μετατροπής φωτοβολταϊκών χρησιμοποιώντας το Delightex Studio – Spaces (Marker). Η άσκηση AR καθοδηγεί τους μαθητές σε 5 διαδοχικές σκηνές που απεικονίζουν κάθε φάση της μετατροπής ηλιακής ενέργειας:

Σκηνή 1 Εισαγωγή με κινούμενο ήλιο και κουμπί START

Σκηνή 2: Αφιξη φωτονίων και ενεργειακές απαιτήσεις (όριο ενεργειακού χάσματος)

Σκηνή 3: Δομή σύνδεσης P-N και διαχωρισμός φορτίου

Σκηνή 4: Ροή ρεύματος μέσω εξωτερικού κυκλώματος και παροχή ενέργειας στο φορτίο

Σκηνή 5 Τελική αξιολόγηση με διαδοχικά εννοιολογικά κουίζ

Κάθε σκηνή περιλαμβάνει οπτικά στοιχεία (διαγράμματα, κινούμενα σωματίδια, χρωματικά κωδικοποιημένες σφαίρες για ηλεκτρόνια/οπές), επικαλύψεις επεξηγηματικού κειμένου και διαδραστικά κουίζ με άμεση ανατροφοδότηση. Οι μαθητές πλοηγούνται διαδοχικά πατώντας κουμπιά, παρατηρώντας οπτικές συνέπειες (αποκορεσμός χρώματος για λάθος απαντήσεις, εφέ πυροτεχνημάτων για επιτυχία) και απαντώντας σε ερωτήσεις σχετικά με τα κατώφλια ενέργειας φωτονίων, τη συνάρτηση σύνδεσης P-N και τη συμπεριφορά κυκλώματος. Το πλήρες ταξίδι διαρκεί περίπου 5-7 λεπτά και μπορεί να βιωθεί ατομικά ή σε μικρές ομάδες για συλλογική συζήτηση.

Προαιρετική επέκταση Σε μικρές ομάδες, οι μαθητές μπορούν να σχεδιάσουν επακόλουθες σκηνές που εστιάζουν σε προχωρημένα θέματα όπως αντιανακλαστικές επιστρώσεις, κελιά πολλαπλών συνδέσεων ή εγκαταστάσεις ηλιακών πάνελ σε πραγματικό κόσμο, προσθέτοντας τα δικά τους επεξηγηματικά κείμενα και οπτικούς δείκτες.

Δραστηριότητα 3: Διαδραστικό Κουίζ





Για την επαλήθευση της κατανόησης σε κάθε στάδιο, η εμπειρία AR περιλαμβάνει ενσωματωμένα **κουίζ με άμεση οπτική ανατροφοδότηση**. Οι μαθητές απαντούν σε ερωτήσεις πολλαπλής επιλογής που ενσωματώνονται στις διαδοχικές σκηνές:

Κουίζ Σκηνής 2:

- Τι καθορίζει αν ένα φωτόνιο μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια;
(Σωστό: *Ενέργεια φωτονίων έναντι ενεργειακού χάσματος*)

Σκηνή 3 Κουίζ:

- Τι δημιουργεί το ηλεκτρικό πεδίο που διαχωρίζει τους φορείς φορτίου;
(Σωστό: *Προσμίξεις σύνδεσης P-N*)

Κουίζ Σκηνής 4:

- Γιατί σταματάει το ρεύμα όταν καλύπτουμε το ηλιακό πάνελ;
(Σωστό: *Δεν παράγονται φωτόνια = δεν παράγονται ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών*)

Σκηνή 5 Τελική Αξιολόγηση (3 διαδοχικά κουίζ):

1. Πώς αυξάνουμε την τάση εξόδου;
(Σωστό: *Σύνδεση κελιών σε σειρά*)
2. Γιατί τα υπέρυθρα φωτόνια δεν μπορούν να παράγουν ρεύμα στο πυρίτιο;
(Σωστό: *Ενέργεια < ενεργειακό χάσμα στα 1,1 eV*)
3. Τι εμποδίζει τον ανασυνδυασμό ηλεκτρονίων-οπών;
(Σωστό: *Ηλεκτρικό πεδίο σύνδεσης P-N*)

Κάθε κουίζ παρέχει **οπτική ανατροφοδότηση**: οι σωστές απαντήσεις διατηρούν τα έντονα χρώματα και επιτρέπουν την πρόοδο στην επόμενη σκηνή, ενώ οι λανθασμένες απαντήσεις προκαλούν οπτικές συνέπειες (αποκορεσμό, διακοπές κίνησης) και επιτρέπουν απεριόριστες επαναλήψεις, ενθαρρύνοντας τη συλλογιστική χωρίς κυρώσεις

Προαιρετικές ερωτήσεις συζήτησης για προχωρημένη εξερεύνηση:

- Γιατί η σκίαση μειώνει το ρεύμα αλλά όχι την τάση σε κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά;
- Τι περιορίζει τη μέγιστη απόδοση των ηλιακών κυψελών μονής σύνδεσης;
- Πώς ξεπερνούν τα κελιά πολλαπλών συνδέσεων το όριο Shockley-Queisser;

Δραστηριότητα 4: Συζήτηση σε ολομέλεια





Η ενότητα κλείνει με μία **συζήτηση στην ολομέλεια** στην οποία οι μαθητές:

- Αναλύστε κριτικά τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από προσομοιώσεις και εμπειρίες AR
- Συγκρίνετε τη φωτοβολταϊκή μετατροπή με άλλες ενεργειακές τεχνολογίες (ορυκτά καύσιμα, αιολική ενέργεια, υδροηλεκτρική ενέργεια)
- Σκεφτείτε τον ρόλο της ηλιακής ενέργειας στην παγκόσμια απαλλαγή από τον άνθρακα και τη βιωσιμότητα
- Συζητήστε τους συμβιβασμούς μεταξύ αποδοτικότητας, κόστους, περιβαλλοντικών επιπτώσεων και επεκτασιμότητας

Αναμενόμενη απόδοση

Στο τέλος της Ενότητας Λειτουργιών, οι φοιτητές θα πρέπει να είναι σε θέση να:

- Περιγράψτε σε επιστημονική γλώσσα την πλήρη ακολουθία της φωτοβολταϊκής μετατροπής, από την απορρόφηση φωτονίων έως την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος
- Σύνδεση της κβαντικής φυσικής (ενεργειακό χάσμα, ενέργεια φωτονίων, φορείς φορτίου) με μακροσκοπική ηλεκτρική συμπεριφορά (τάση, ρεύμα, ισχύς)
- Χρήση ψηφιακών εργαλείων και εργαλείων AR για την αναπαράσταση σύνθετων φαινομένων ατομικής κλίμακας και την οπτικοποίηση της ροής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων
- Να αναπτύξουν μια κριτική προσέγγιση στις τεχνολογίες ηλιακής ενέργειας, κατανοώντας τα φυσικά τους όρια, τους μηχανικούς συμβιβασμούς και τις κοινωνικές επιπτώσεις για τη μετάβαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

4. Αναφορές

TED-Ed, Πώς λειτουργούν τα ηλιακά πάνελ; (βίντεο κινουμένων σχεδίων) Σαφής εξήγηση των φωτοβολταϊκών στοιχείων, των επαφών P-N και της ροής ηλεκτρονίων. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.youtube.com/watch?v=xKxrkht7CpY>

Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ (DOE), Βασικές Αρχές Ηλιακής Φωτοβολταϊκής Τεχνολογίας Γραφείο Ενεργειακής Απόδοσης και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics>

Πανεπιστήμιο του Κολοράντο, Boulder - Διαδραστικές Προσομοιώσεις PhET, Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο Διαδραστική εξερεύνηση της ενέργειας των φωτονίων, της εκτίναξης ηλεκτρονίων και των κβαντικών ιδιοτήτων του φωτός. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://phet.colorado.edu/en/simulations/photoelectric>

Εγκυκλοπαίδεια Britannica, Ηλιακό Κύτταρο Πλήρης επισκόπηση της δομής, της λειτουργίας και των υλικών των ηλιακών κυψελών. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.britannica.com/technology/solar-cell>





Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (NREL), Φωτοβολταϊκή Έρευνα
Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.nrel.gov/pv/>

Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (NREL), Διάγραμμα Απόδοσης Κυψελών Καλύτερης Έρευνας Ενημερωμένα αρχεία απόδοσης για διάφορες φωτοβολταϊκές τεχνολογίες. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

NASA, Πώς η NASA χρησιμοποιεί και βελτιώνει την ηλιακή ενέργεια Διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://science.nasa.gov/sun/how-nasa-uses-and-improves-solar-power>

Delightex Studio - Χώροι (Marker), Εκπαιδευτική πλατφόρμα επαυξημένης πραγματικότητας (AR) για διαδραστική δημιουργία σκηνών Διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://edu.delightex.com/Studio/Spaces>

Shockley, W., & Queisser, H. J. (1961). Λεπτομερές Όριο Ισορροπίας Απόδοσης Ηλιακών Κυψελών Σύνδεσης p-n. Journal of Applied Physics, 32(3), 510-519. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://doi.org/10.1063/1.1736034>

Green, M. A., κ.ά. (2024) Πίνακες απόδοσης ηλιακών κυψελών (Έκδοση 63). Πρόοδος στα Φωτοβολταϊκά: Έρευνα και Εφαρμογές, 32(1), 3-13. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://doi.org/10.1002/rip.3750>

MIT OpenCourseWare, Βασικές Αρχές Φωτοβολταϊκών Σημειώσεις διαλέξεων και περιεχόμενο βίντεο σχετικά με τη φυσική ημιαγωγών και τον σχεδιασμό ηλιακών κυψελών. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://ocw.mit.edu/courses/2-627-fundamentals-of-photovoltaics-fall-2013/>

Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA), Έκθεση για την Τεχνολογία Ηλιακών Φωτοβολταϊκών Παγκόσμιες τάσεις, προβλέψεις και τεχνολογική ανάλυση. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.iea.org/reports/solar-pv>

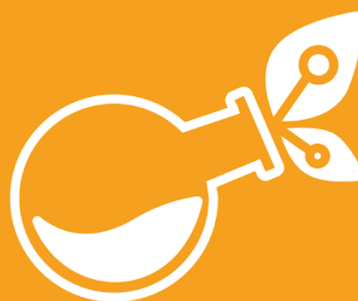
Πίστωση εικόνας: Wikimedia Commons (CC BY-SA / Δημόσιος Τομέας), Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (NREL), Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ, Εγκυκλοπαίδεια Britannica και εκπαιδευτικοί πόροι της NASA - εκπαιδευτική χρήση.







Co-funded by
the European Union



BIOS4YOU AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY



Project Number: KA220-BW-23-30-126516

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.