



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας

Ενότητα 3, 4: Φωτοβολταϊκά Πλαίσια

Ελευθέριος Αμανατίδης
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Χημικών Μηχανικών

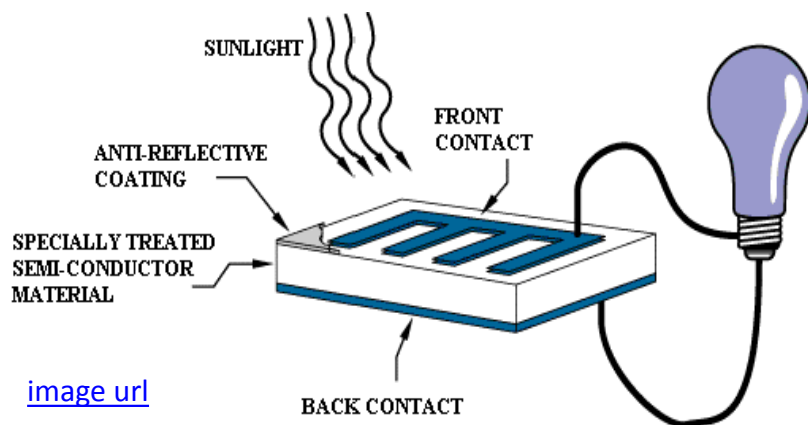
Περιεχόμενα ενότητας

- **Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο**
 - Ημιαγωγοί και απορρόφηση φωτονίων
 - Η επαφή p-n
 - Διαχωρισμός φορτίου και παραγωγή ρεύματος
- **Φωτοβολταϊκές κυψέλες και πλαίσια**
 - Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά ΦΒ κελιών
 - Ημιαγωγοί και διαφορετικές τεχνολογίες ΦΒ πλαισίων
 - Μέθοδοι παρασκευής φωτοβολταϊκών πλαισίων
- **Παραγωγή Ενέργειας**
 - Βασικές Ιδιότητες ΦΒ πλαισίων
 - Σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών



Περιεχόμενα ενότητας

Το Φωτοβολταϊκό φαινόμενο περιγράφεται ως η πόλωση των ηλεκτρικών φορτίων που συμβαίνει σε συγκεκριμένα υλικά όταν αυτά εκτεθούν σε φωτεινή ακτινοβολία.



Κάτι τέτοιο παρατηρείται στα φυσικά στοιχεία που ανήκουν στην ομάδα των ημιαγωγών καθώς και στις τεχνητές ημιαγωγικές διατάξεις.

Η πόλωση των ηλεκτρικών φορτίων μεταφράζεται ως δημιουργία διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δημιουργούμενων πόλων, δηλαδή έχουμε μια υποτυπώδη ηλεκτρική γεννήτρια

Ανακαλύφθηκε το 1839 από τον Alexander Becquerel

Ημιαγωγοί

Ημιαγωγός είναι κάθε υλικό, όπως το γερμάνιο ή το πυρίτιο, που επιτρέπει τη ροή ηλεκτρικού φορτίου υπό κάποιες προϋποθέσεις, όπως είναι αύξηση της θερμοκρασίας ή η πρόσπτωση φωτός.

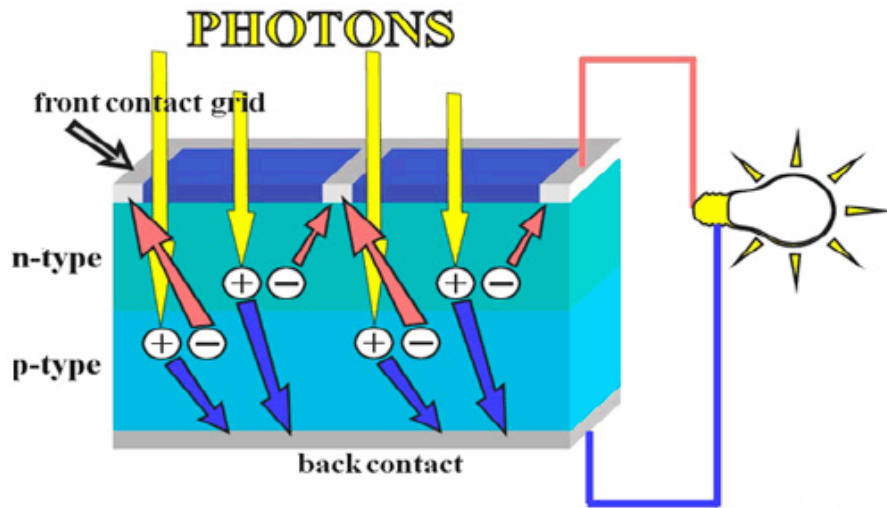


Fig. 1

[image url](#)

Ένας ημιαγωγός, όπως το πυρίτιο, στην καθαρή κρυσταλλική του μορφή, είναι καλός μονωτής. Ωστόσο, όταν έστω και ένα άτομο μέσα σε εκατομμύρια αντικατασταθεί από μία πρόσμιξη που προσθέτει ή αφαιρεί ένα ηλεκτρόνιο τότε η αγωγιμότητά τους αυξάνεται θεαματικά.

Στην πρώτη περίπτωση, προκύπτει **ημιαγωγός τύπου n** (negative) καθώς έχουμε παραπάνω ηλεκτρόνια και στη δεύτερη **τύπου p** (positive) καθώς έχουμε επιπλέον οπές που δηλώνουν απουσία ηλεκτρονίων. Αυτός ο τρόπος πρόσμιξης ονομάζεται **doping**.

Κατηγορίες Ημιαγωγών

Στοιχειακοί: Si, Ge

Διαδικές ενώσεις: GaAs, InP, AlAs (III-V)

Τριαδικά κράματα (ternary alloys): $Al_xGa_{1-x}As$, $Ga_xIn_{1-x}P$ (III-V)

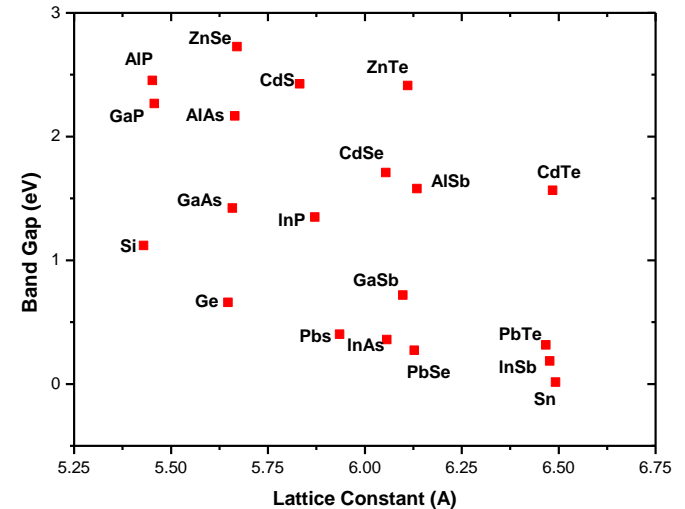
Τετραδικά κράματα : $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ (III-V)

$CuIn_xGa_{1-x}Se_2$ (I-III-VI)

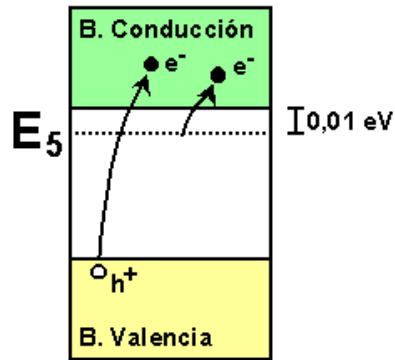
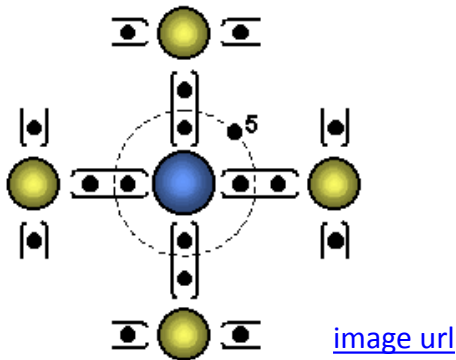
Ημιαγωγοί ευρέως χάσματος : ZnSe, CdTe (II-VI), GaN, InN, AlN (III-V) κλπ

Ενδεικτικές τιμές E_g και n_i στους 300 K

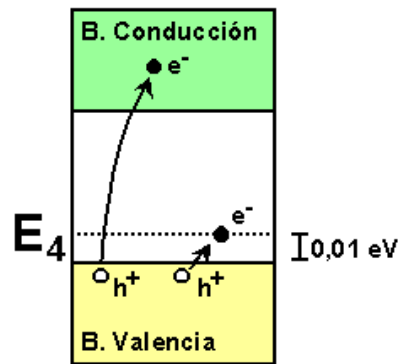
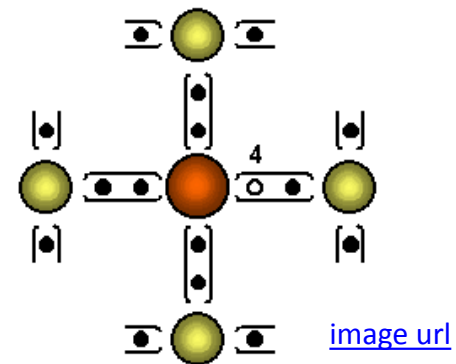
Ημιαγωγός	E_g (eV)	n_i (cm ⁻³)	T (K)
Ge	0.67	2.4×10^{13}	300
Si	1.1	1.5×10^{10}	300
GaAs	1.43	5×10^7	300



Ημιαγωγοί n- και p- τύπου



Στο Ge ή Si προσθήκη στοιχείου V ομάδας π.χ αρσενικό (As) ή φώσφορος (P), τα 4 ηλεκτρόνια σθένους του As θα δημιουργήσουν με τα αντίστοιχα 4 των γειτονικών ατόμων του Ge ομοιοπολικούς δεσμούς και θα μείνει αδέσμευτο το 5^ο ηλεκτρόνιο του ατόμου του As.



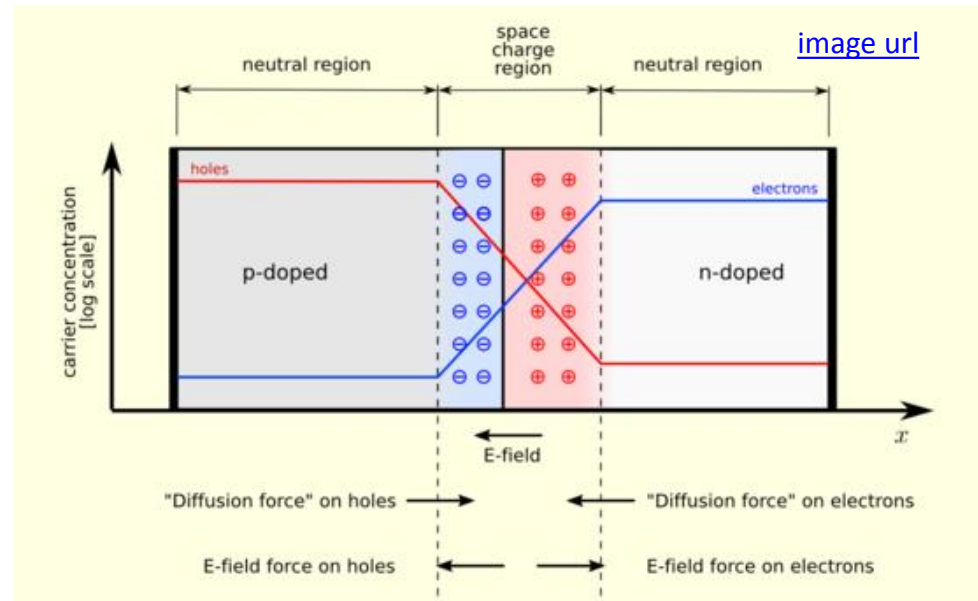
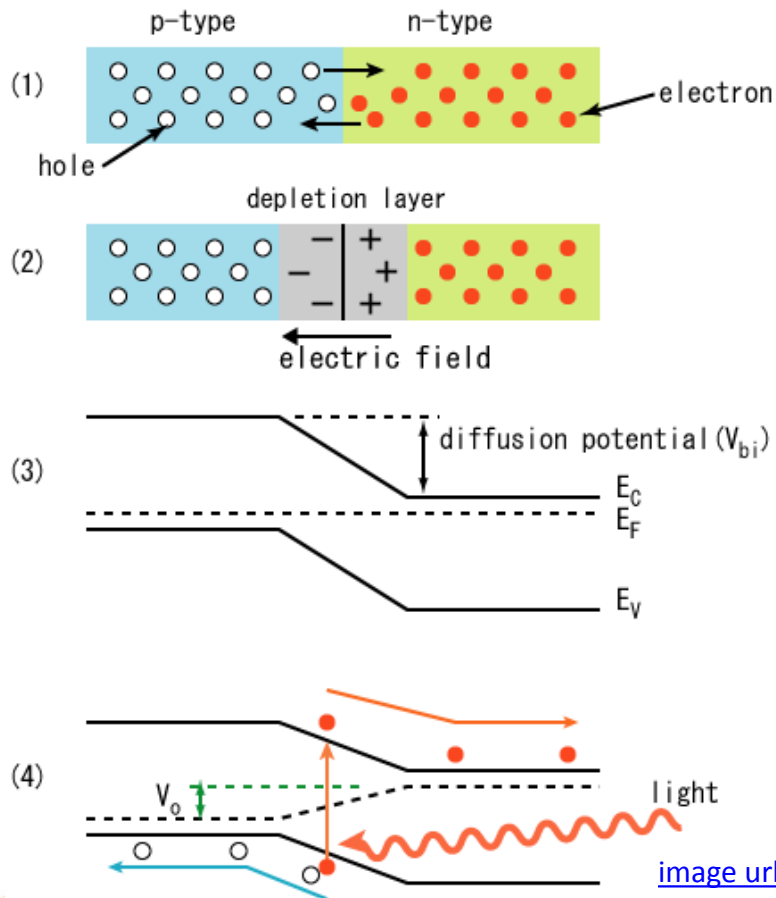
Το As ή ο P λέγονται **δότες** και ο ημιαγωγός **n-τύπου**

Αντίθετα αν ένα τρισθενές στοιχείο, όπως π.χ το γάλλιο ή βόριο, εισαχθεί στον ημιαγωγό Si τότε τα τρία ηλεκτρόνια σθένους θα σχηματίσουν ομοιοπολικούς δεσμούς με Si και η θέση ηλεκτρονίου που λείπει οδηγεί στο σχηματισμό μιας οπής

Το Ga ή B λέγονται **δέκτες** και ο ημιαγωγός **τύπου p**

Επαφή pn

Αν φέρουμε σε επαφή έναν ημιαγωγό p-τύπου με έναν ημιαγωγό n-τύπου

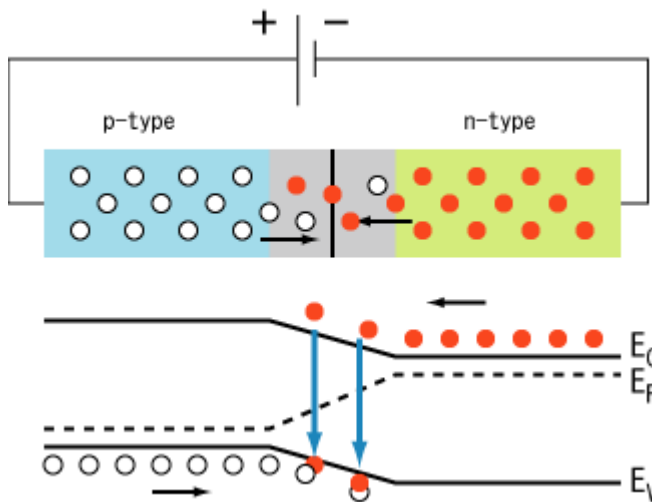


Έχουμε τη δημιουργία **τριών περιοχών**:
 2 ψευδοουδέτερων και μιας περιοχής με
 διαχωρισμό φορτίων και καθαρό φορτίο
 χώρου

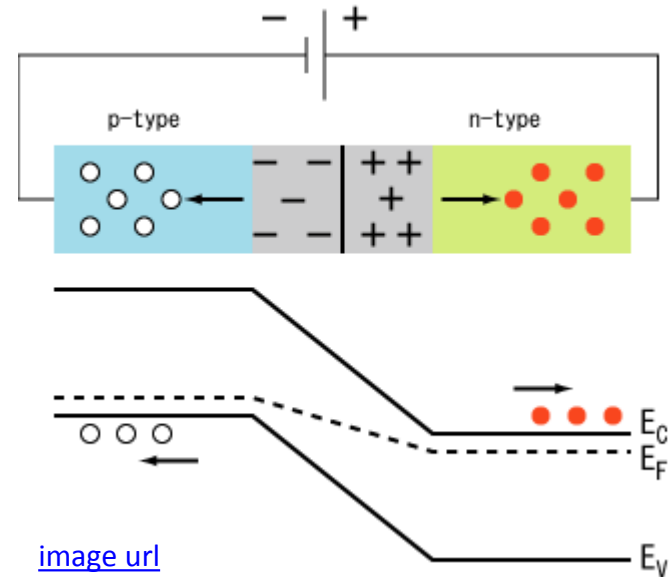
Επαφή pn – Χαρακτηριστικές Καμπύλες VI

Ορθή πόλωση διόδου \rightarrow αντίσταση 10Ω

Ανάστροφη πόλωση διόδου \rightarrow αντίσταση $10\text{ M}\Omega$



[image url](#)



[image url](#)

Ορθή πόλωση, + γεννήτριας σε p-type

Ανάστροφη πόλωση, + γεννήτριας σε n-type

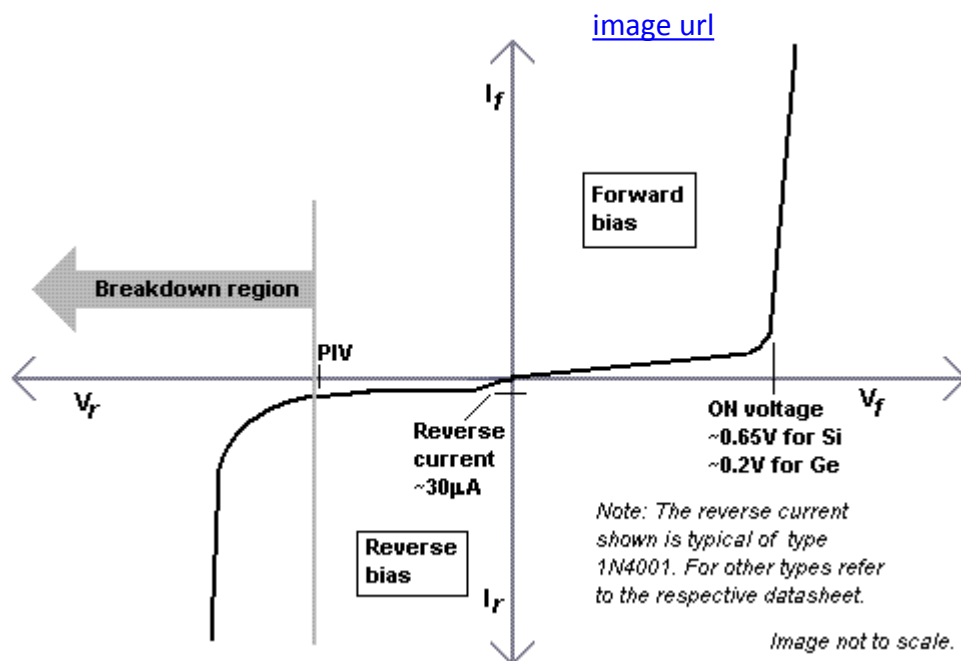


Επαφή pn – Χαρακτηριστικές Καμπύλες VI

Ανάστροφο ρεύμα κόρου

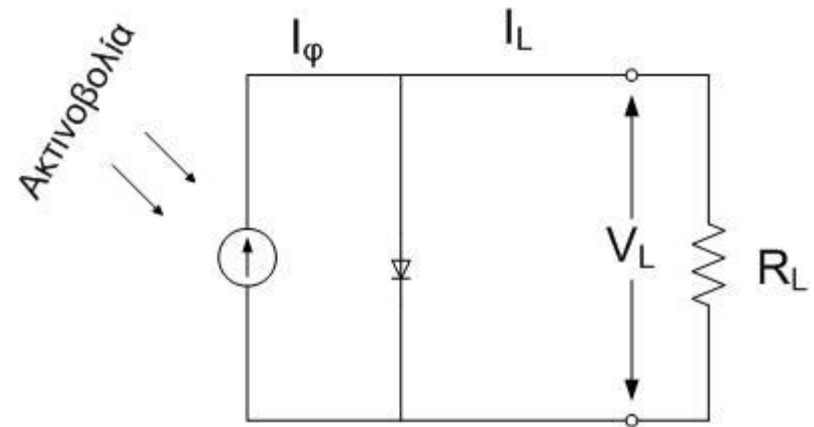
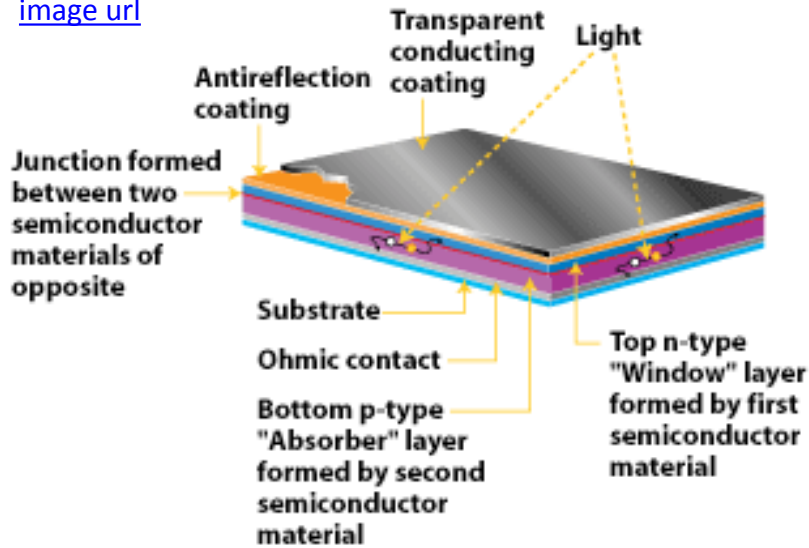
$$I = I_o \left[\exp\left(\frac{eV}{\gamma kT}\right) - 1 \right]$$

Όπου V η τάση στα άκρα της διόδου,
 γ συντελεστής κατασκευής της
διόδου (1-2), k σταθερά Boltzmann
και T η θερμοκρασία



Φωτοβολταϊκά ως ρη επαφές

[image url](#)



Απλοποιημένο κύκλωμα ΦΒ διάταξης

Απλοποιημένο σχήμα ΦΒ διάταξεις

$$I_{\varphi} = I_o \left[\exp\left(\frac{eV}{\gamma kT}\right) - 1 \right]$$

$$V_{oc} = \frac{\gamma kT}{e} \ln \frac{I_{\varphi}}{I_o}$$

Μέγιστο Ρεύμα Φωτοβολταϊκού $R_L \rightarrow 0$

Μέγιστη Τάση - Τάση ανοικτού κυκλώματος $R_L \rightarrow \infty$

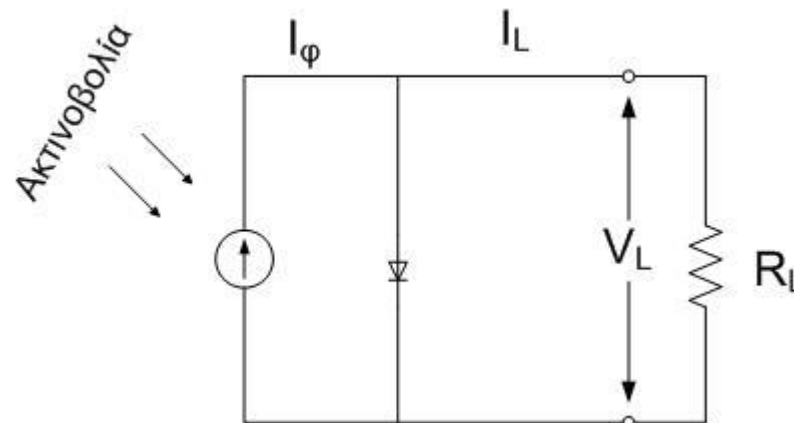
Φωτοβολταϊκά- Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά

- Σε συνθήκες βραχυκύκλωσης το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι:

$$I_{sc} = I_{\varphi}$$

- Σε οποιαδήποτε άλλη κατάσταση το ρεύμα είναι:

$$I_L = I_{\varphi} - I_o \left[\exp \left(\frac{eI_L R_L}{\gamma k T} \right) - 1 \right]$$

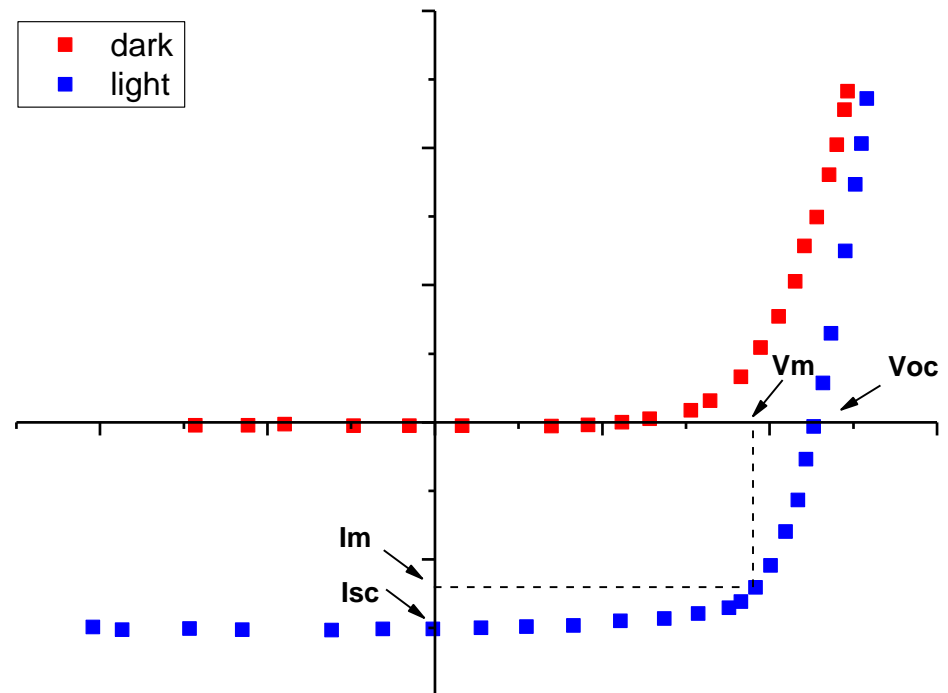


Φωτοβολταϊκά- Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά

Συντελεστής πλήρωσης FF

- Ο συντελεστής πλήρωσης ορίζεται ως:

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}}$$



Φωτοβολταϊκά- Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά

Συντελεστής απόδοσης

- Ο συντελεστής απόδοσης ορίζεται ως:

$$n = \frac{P_m}{H \times A} = \frac{I_m V_m}{H \times A} = \frac{FF \times I_{sc} \times V_{oc}}{H \times A}$$

Όπου **H** είναι η ένταση (πυκνότητα ισχύος) της ακτινοβολίας που δέχεται η επιφάνεια του ΦΒ, εμβαδού **A**. Αύξηση της απόδοσης φωτοβολταϊκού στοιχείου μπορεί να επιτευχθεί **μέσω της αύξησης του FF, I_{sc} ή/και V_{oc}**



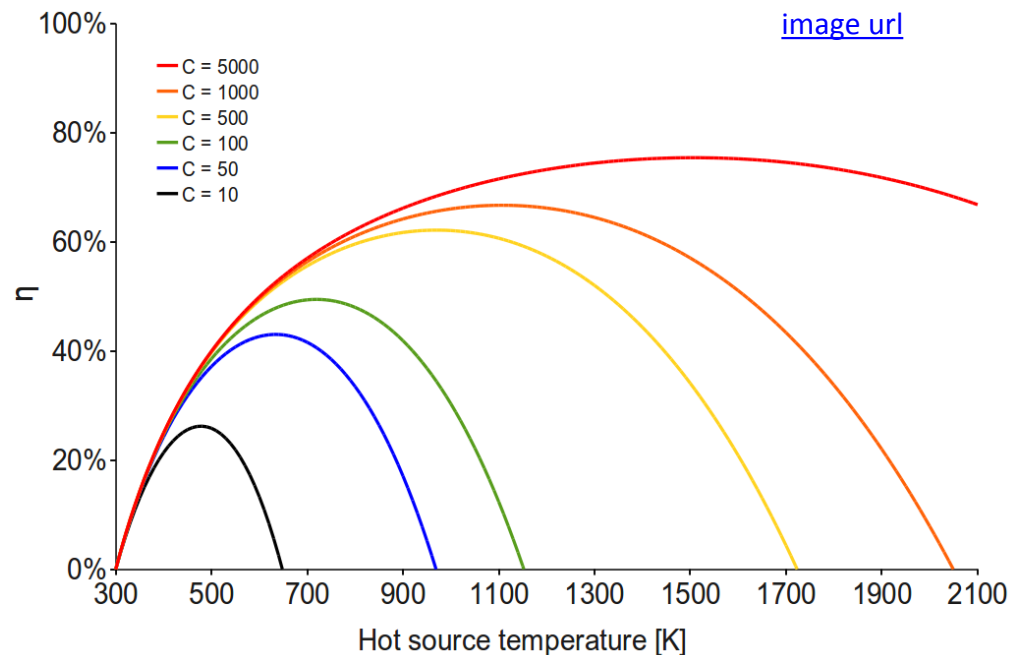
Φωτοβολταϊκά- Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά

Συντελεστής απόδοσης – Επίδραση θερμοκρασίας

- Η μεταβολή του συντελεστή απόδοσης με τη θερμοκρασία:

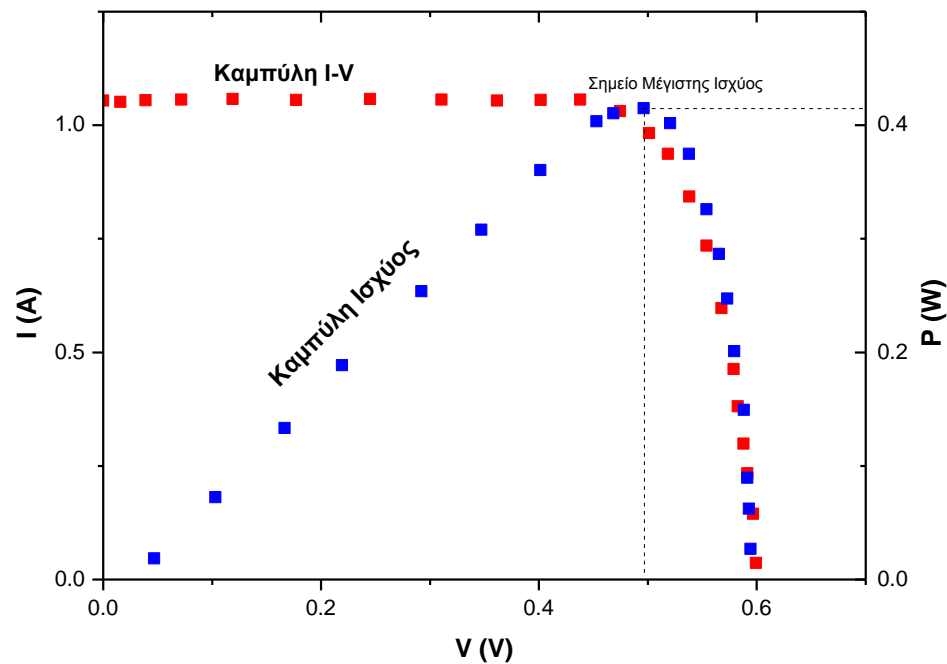
$$\eta_{\theta} = \eta \times \sigma_{\theta}$$

η ορίζεται η απόδοση στους 25 °C
 σ_{θ} ο θερμοκρασιακός συντελεστής ισχύος



Φωτοβολταϊκά- Μέγιστη Ισχύς/Ρεύμα/Τάση

- Η τάση των φ/β μεταβάλλεται μη γραμμικά σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος.

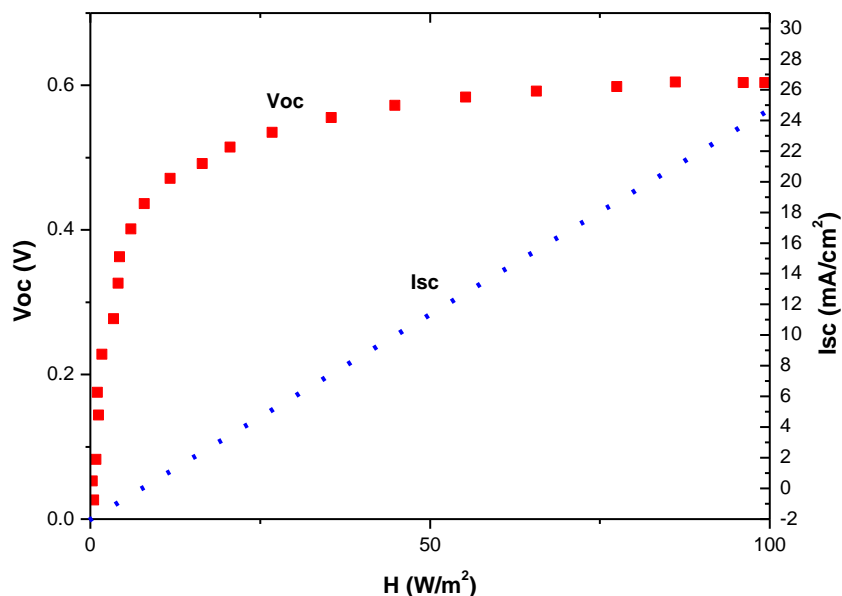


- Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας αλλά μεταβαλλόμενη αντίσταση κυκλώματος η τάση και η ένταση του ρεύματος παίρνουν ενδιάμεσες τιμές μεταξύ $0 - V_{oc}$ και $0 - I_{sc}$ αντίστοιχα.

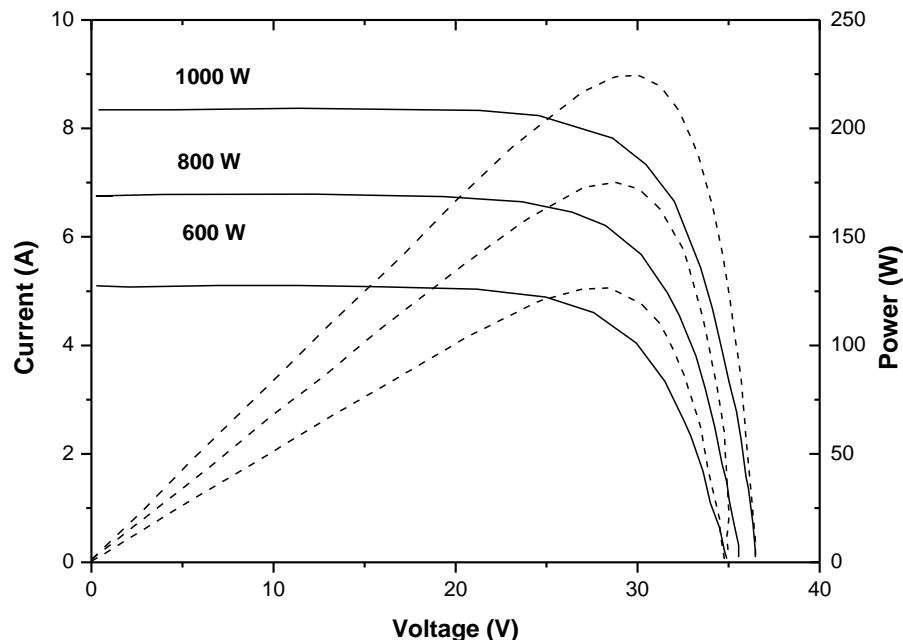


Φωτοβολταϊκά- Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά

Φωτοβολταϊκά- Μεταβαλλόμενες συνθήκες



Η μεταβολή της ανοιχτο-κυκλωμένης τάσης και της βραχυκυκλωμένης έντασης ρεύματος σε συνάρτηση της ισχύος της ακτινοβολίας

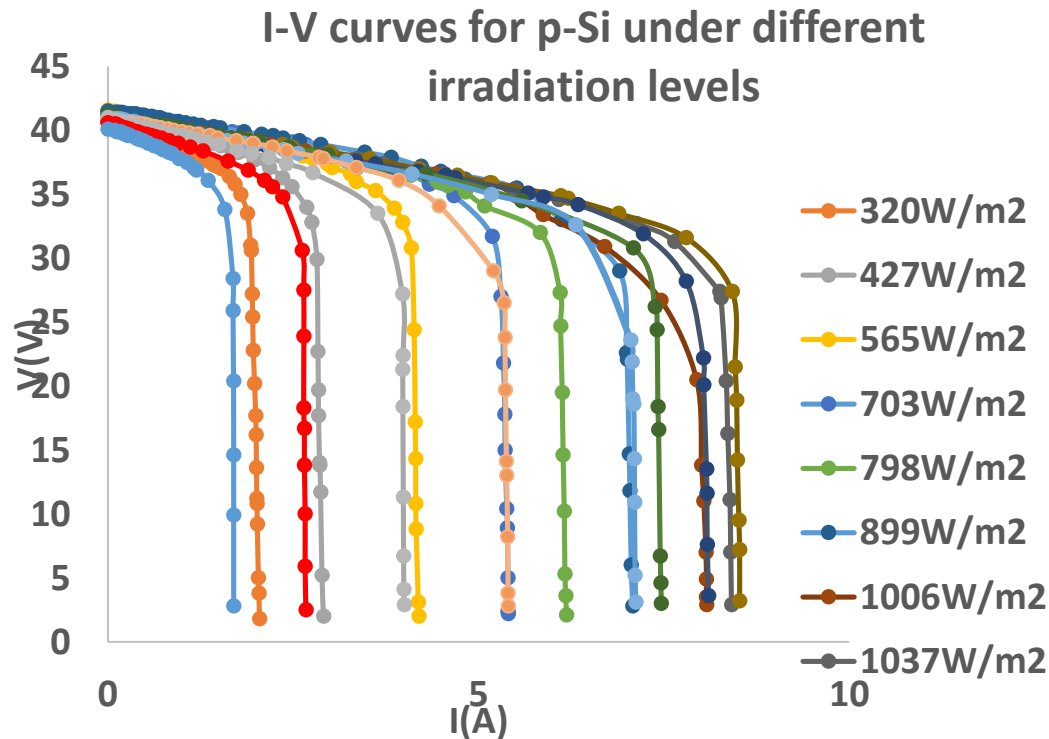


Μετατόπιση σημείων λειτουργίας ΦΒ στοιχείου και απομάκρυνση του σε σχέση με τα σημεία μέγιστης ισχύος της καμπύλης τάσης – ρεύματος για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας

Φωτοβολταϊκά- Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά

Εγκατάσταση ταράτσας κτιρίου Χημικών Μηχανικών

From specifications $V_{oc}=43$ V, $I_{sc}=8.8$ A

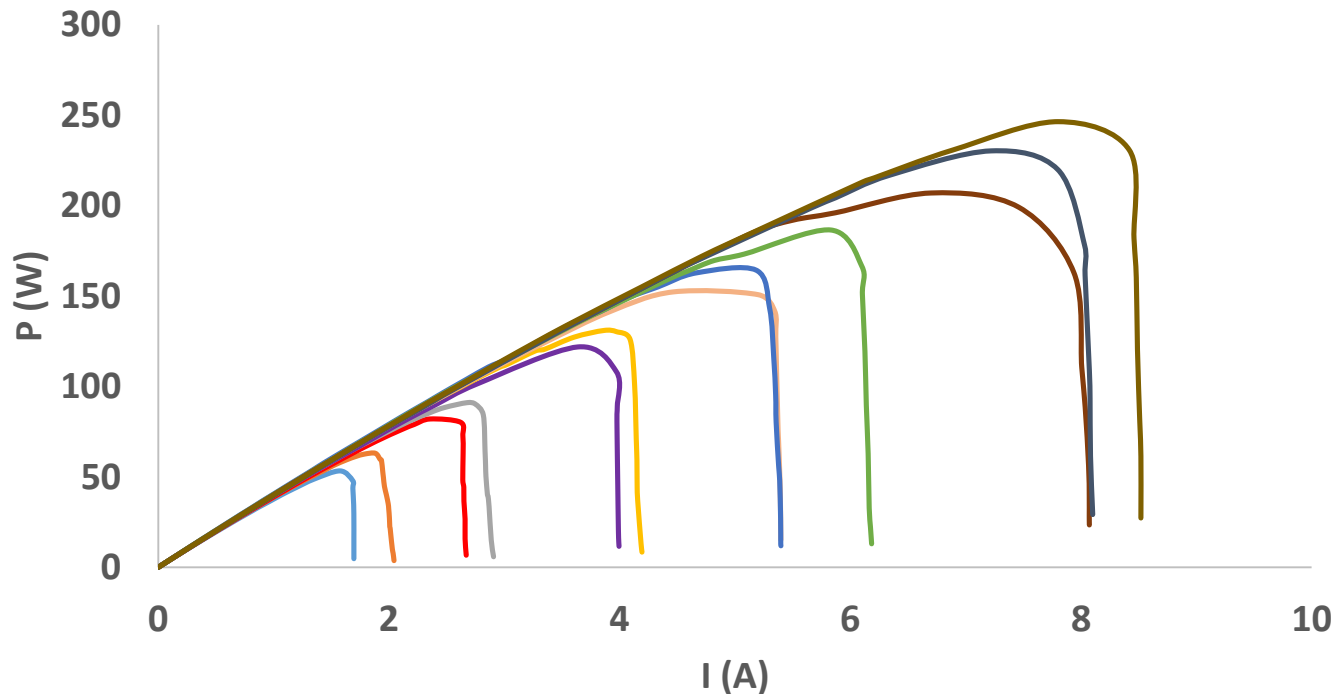


Φωτοβολταϊκά- Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά

Εγκατάσταση τάρτσας κτιρίου Χημικών Μηχανικών

From specifications $P_{nom}=260$ Watt

P-I curves for p-Si modules under different irradiation levels



Φωτοβολταϊκά – Προδιαγραφές

Electrical data (at STC)

	VBHH250AE01	VBHH254AE01
Maximum Power (Pmax) [W]	250	245
Max Power Voltage (Vmp) [V]	34.9	34.4
Max Power Current (Imp) [A]	7.18	7.14
Open Circuit Voltage (Voc) [V]	43.1	42.7
Short Circuit Current (Isc) [A]	7.74	7.73
Maximum over current rating [A]	15	
Output power tolerance [%]	+10/-5	
Maximum system voltage [V]	1000	

Temperature characteristics

	VBHH250AE01	VBHH254AE01
Temperature (NOCT) [°C]	46.0	46.0
Temp. coefficient of Pmax [%/°C]	-0.3	-0.3
Temp. coefficient of Voc [V/°C]	-0.108	-0.107
Temp. coefficient of Isc [mA/°C]	2.32	2.32

At NOCT

	VBHH250AE01	VBHH254AE01
Maximum Power (Pmax) [W]	188.9	185.4
Max Power Voltage (Vmp) [V]	32.8	32.4
Max Power Current (Imp) [A]	5.76	5.73
Open Circuit Voltage (Voc) [V]	40.5	40.1
Short Circuit Current (Isc) [A]	6.23	6.23

At low irradiance

	VBHH250AE01	VBHH254AE01
Maximum Power (Pmax) [W]	48.8	47.7
Max Power Voltage (Vmp) [V]	34.1	33.6
Max Power Current (Imp) [A]	1.43	1.43
Open Circuit Voltage (Voc) [V]	40.1	39.7
Short Circuit Current (Isc) [A]	1.55	1.55

3 μέθοδοι χαρακτηρισμού

STC (Standard Test Conditions), H=1000 W/m², T=25 °C

NOCT (Nominal Operating Cell Temperature), H=800 W/m², T = 46 °C

Low irradiance, H=200 W/m², T=25 °C

Οι θερμοκρασιακοί συντελεστές δίνονται σε NOCT συνθήκες

Τεχνολογίες ΦΒ

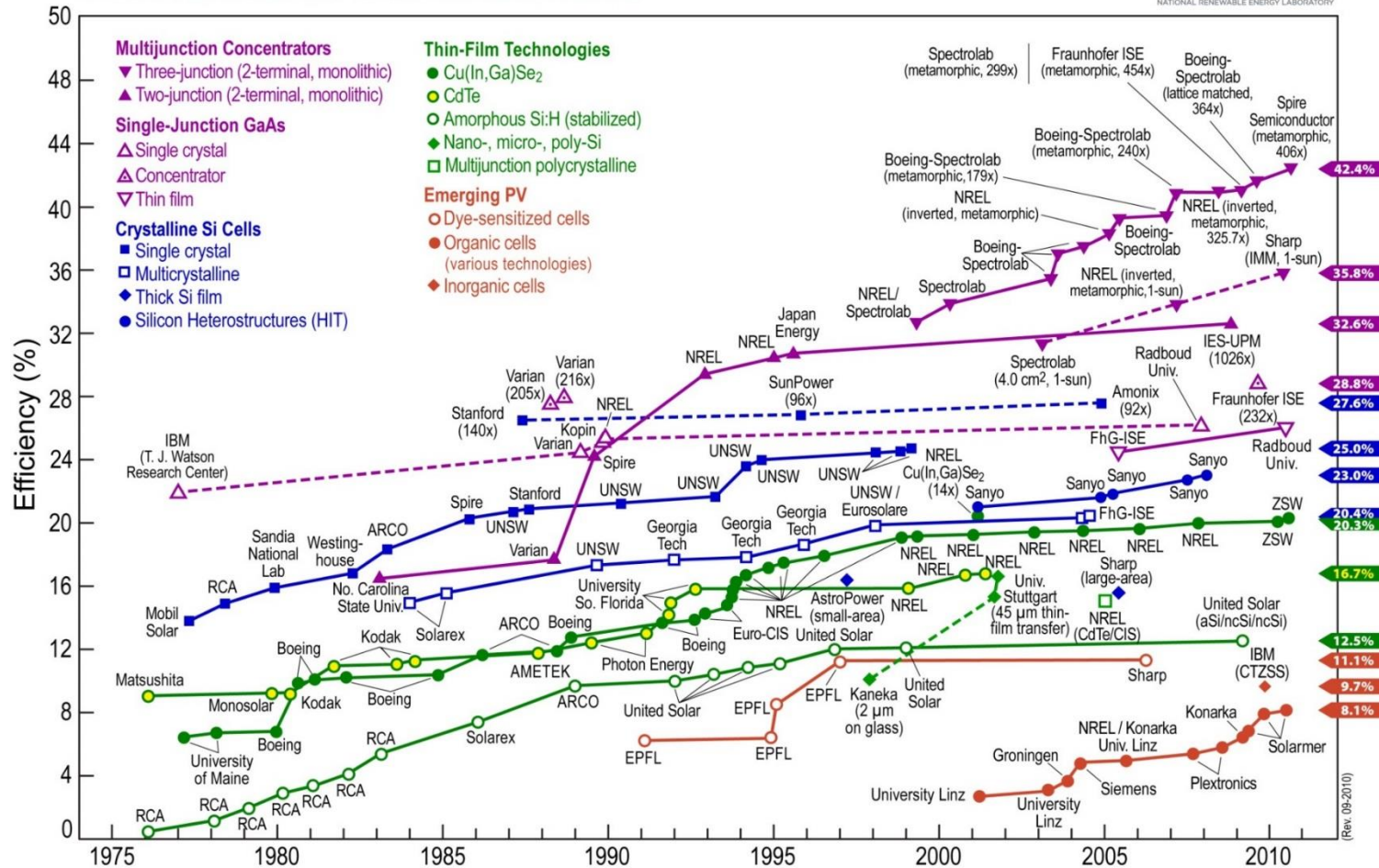
- Πλαίσια ΦΒ **μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου**
- Πλαίσια ΦΒ **λεπτών υμενίων**
 - ΦΒ **αμόρφου πυριτίου**
 - ΦΒ **πολλαπλών επαφών πυριτίου a-Si:H/a-Si:H, μc-Si:H/a-Si:H**
 - ΦΒ **λεπτών υμενίων CdTe**
 - ΦΒ **λεπτών υμενίων CIGS**
- **Οργανικά** φωτοβολταϊκά κελιά



Αποδόσεις διαφορετικών τεχνολογιών Φωτοβολταϊκών

Best Research-Cell Efficiencies

[image url](#)



(Rev. 09-2010)

Τεχνολογίες ΦΒ

c-Si



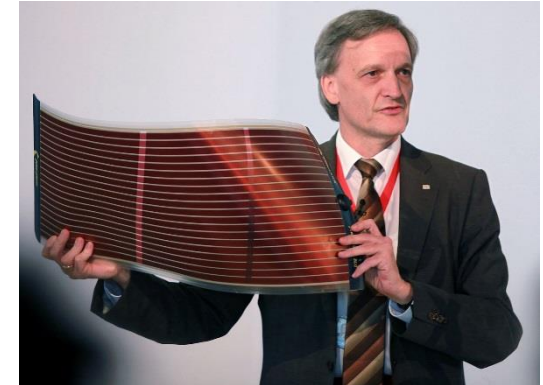
Αποδόσεις 12 to 14 %
Τιμές 0.7 to 1.4 €/Wp
Πλαίσια 100 Wp to 300 Wp

Thin films



Αποδόσεις 7 to 11 %
Τιμές 0,5 to 1.2 €/Wp
Πλαίσια 40 Wp to 125 Wp

Organic cells



Αποδόσεις 3 to 5 %
Τιμές ~ 1.5 €/Wp
Πλαίσια 5 Wp to 20 Wp

Παρασκευή ΦΒ Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου

Αναλυτικά Βήματα

- Η πρώτη ύλη ψεκάζεται με μείγμα από νιτρίδιο του πυριτίου και θερμαίνεται ώστε το μείγμα να σταθεροποιηθεί στην εσωτερική του επιφάνεια (καλούπι).
- Χώνευση πυριτίου και doping με βόριο (δημιουργία ημιαγωγού τύπου p – πυρίτιο 4e στην εξωτερική στοιβάδα, βόριο 3e στην εξωτερική).
- Τοποθέτηση σε φούρνους => πλίνθωμα πολυκρυσταλλικού πυριτίου (ingot).
- Αφαίρεση crucible και καθαρισμός.



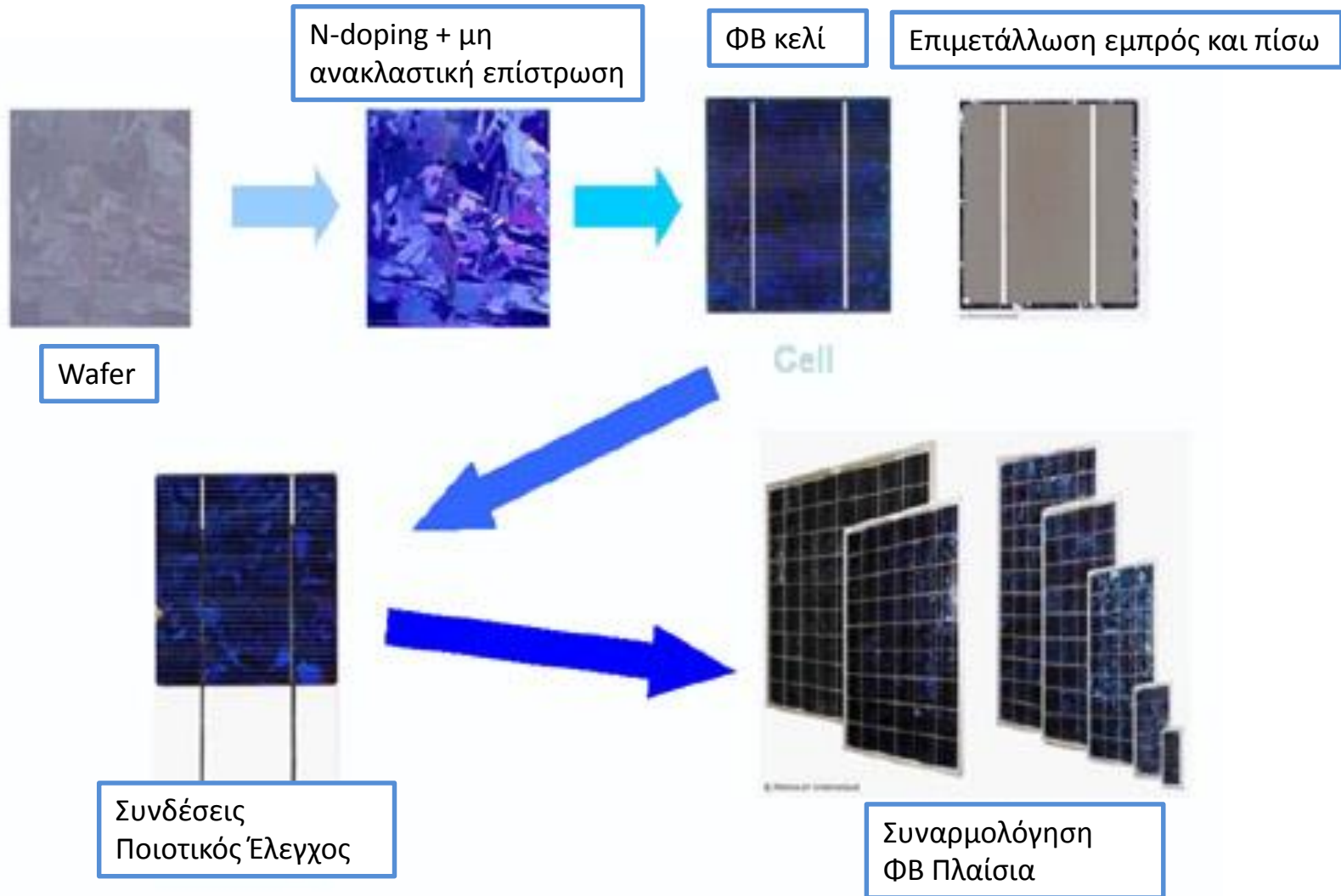
Παρασκευή ΦΒ Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου

Αναλυτικά Βήματα

- Απόρριψη εξωτερικής επιφάνειας ingot και δημιουργία bricks
- Ποιοτικός έλεγχος bricks
 - έλεγχος διάρκειας ζωής
 - ατέλειες
- Κόψιμο bricks και δημιουργία λεπτών ~ 10 μm δισκίων p-doped πυριτίου



Κατασκευή Φωτοβολταϊκού κελιού



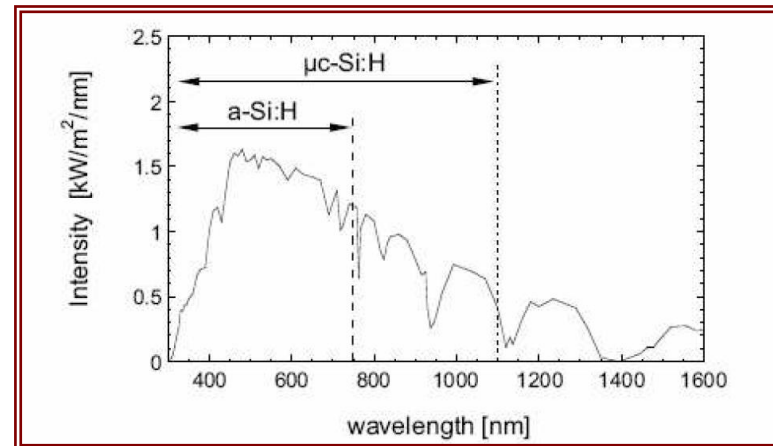
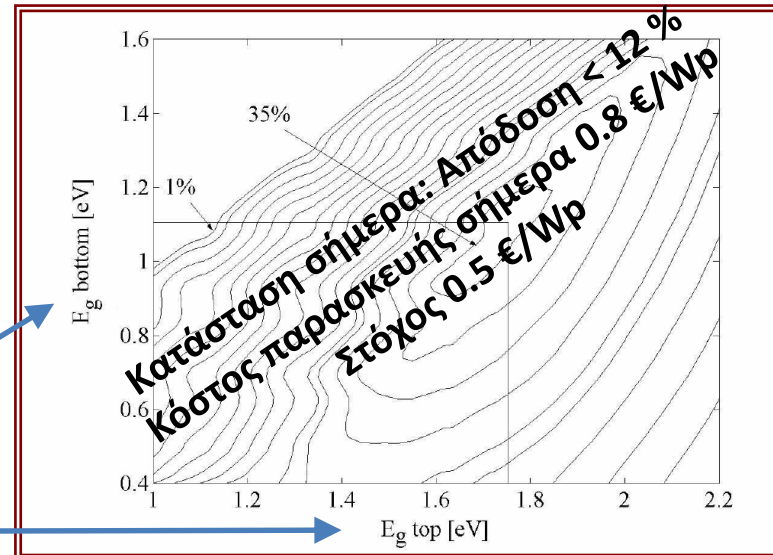
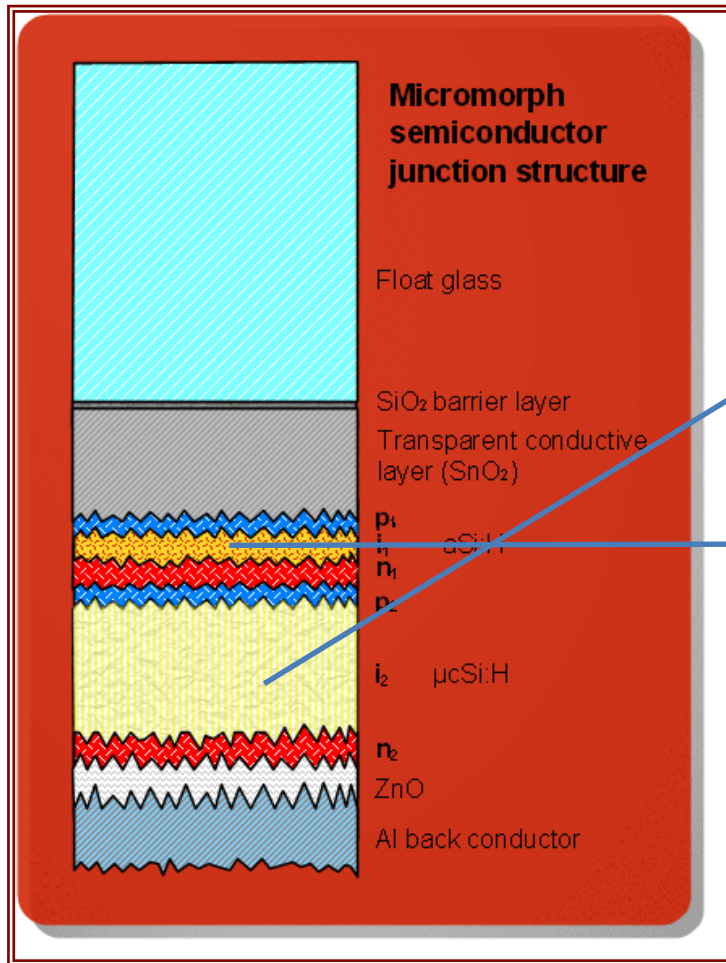
Κατασκευή Φωτοβολταϊκού κελιού

- Doping των wafers με φώσφορο (σε αυτό το σημείο δημιουργείται p-n junction – φώσφορος έχει 5 e στην εξωτερική στοιβάδα)
- Ποιοτικός έλεγχος
- Εναπόθεση μη-ανακλαστικής επίστρωσης
- Επιμετάλλωση (Metallization) : επίστρωση αλουμινίου για δημιουργία επαφής για ηλεκτρικό κύκλωμα
- Solar cell
- Έλεγχος απόδοσης



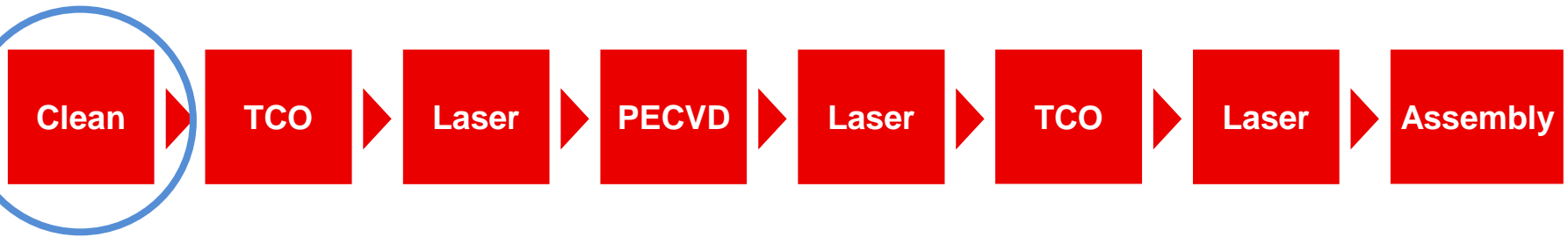
ΦΒ λεπτών υμενίων πυριτίου

Efficiency theoretical limit



Παρασκευή ΦΒ λεπτών υμενίων πυριτίου – Βήμα 1

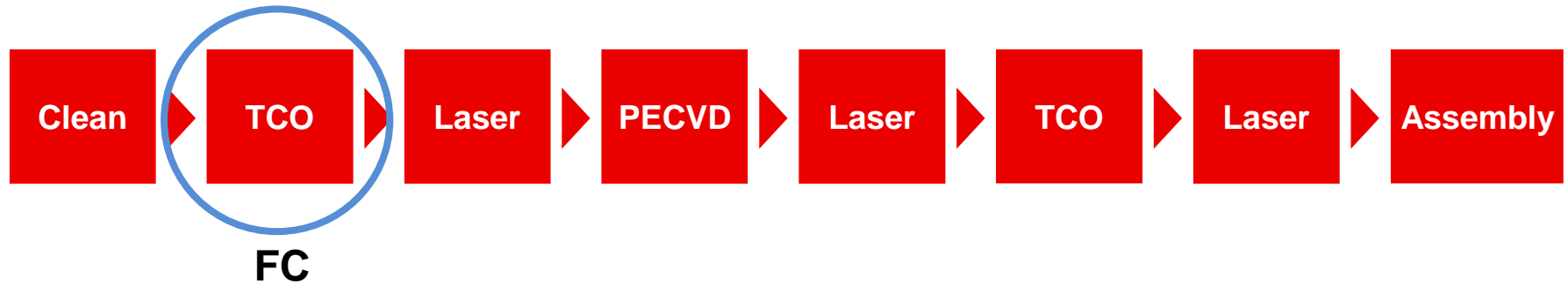
Καθαρισμός Γυαλιού



Παρασκευή ΦΒ λεπτών υμενίων πυριτίου – Βήμα 2

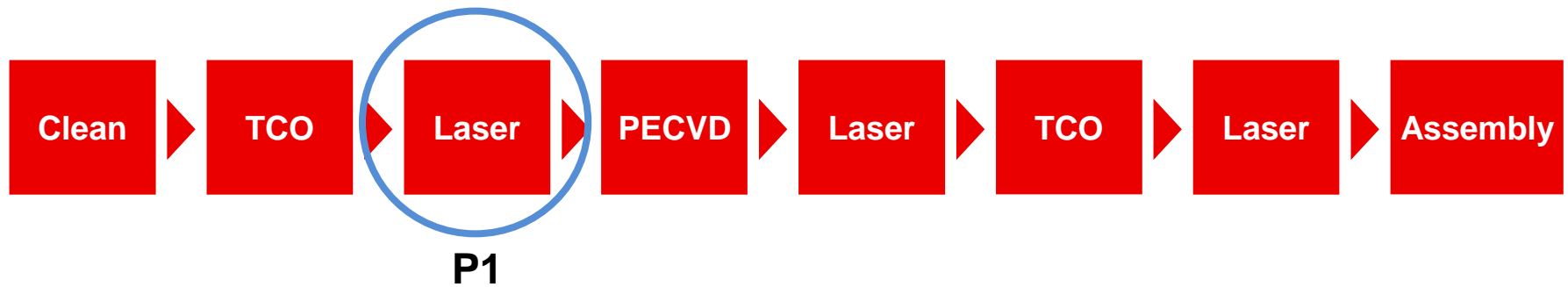
Εμπρός Επαφή

Εναπόθεση αγώγιμου οξειδίου (ZnO) μέσω χημικής εναπόθεσης χαμηλής πίεσης



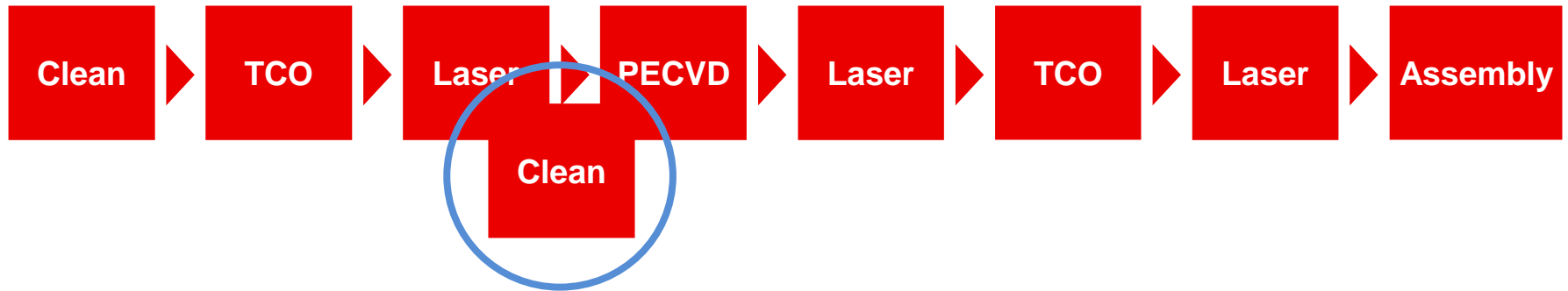
Παρασκευή ΦΒ λεπτών υμενίων πυριτίου – Βήμα 3

Εγχάραξη με Laser



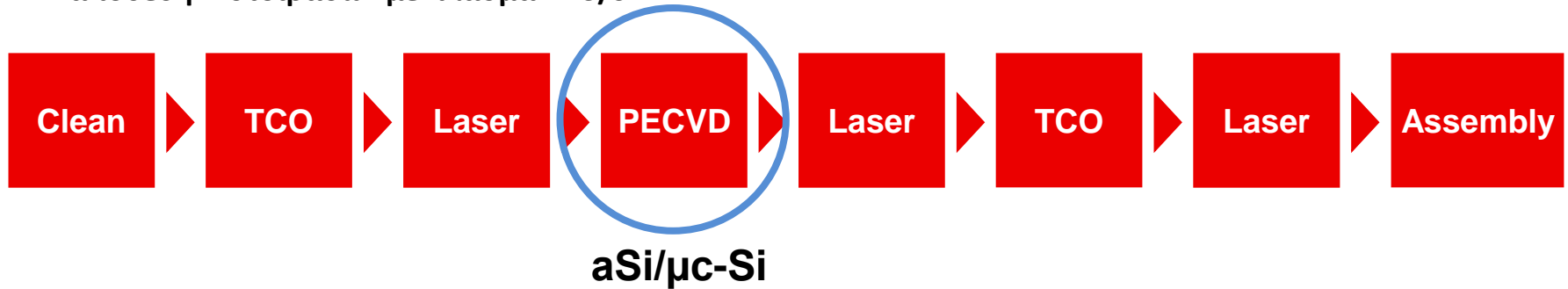
Παρασκευή ΦΒ λεπτών υμενίων πυριτίου – Βήμα 3

Καθαρισμός



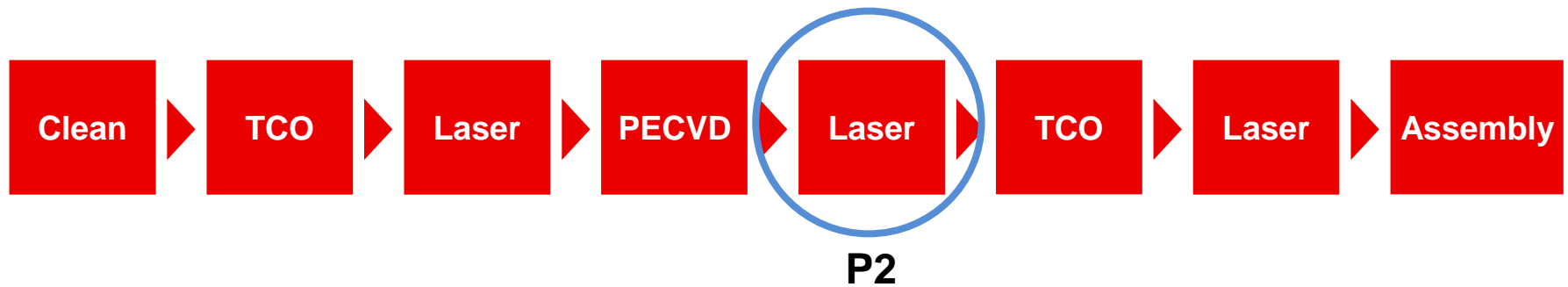
Παρασκευή ΦΒ λεπτών υμενίων πυριτίου – Βήμα 4

- Εναπόθεση ενεργών στοιβάδων πυριτίου με πλάσμα
- Εναπόθεση p-στοιβάδων με πλάσμα B₂H₆/SiH₄
- Εναπόθεση ενδογενούς στοιβάδας με πλάσμα SiH₄/H₂
- Εναπόθεση n-στοιβάδων με πλάσμα PH₃/SiH₄



Παρασκευή ΦΒ λεπτών υμενίων πυριτίου – Βήμα 5

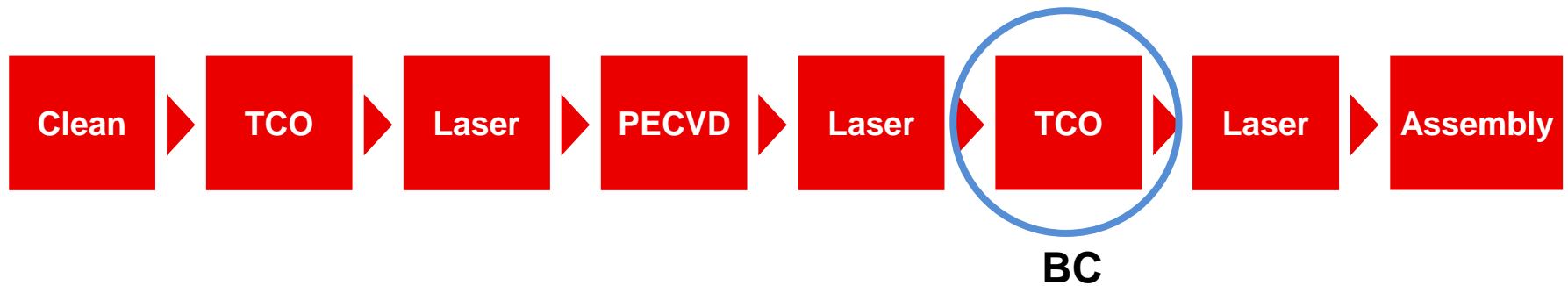
2η Εγχάραξη με Laser



Παρασκευή ΦΒ λεπτών υμενίων πυριτίου – Βήμα 6

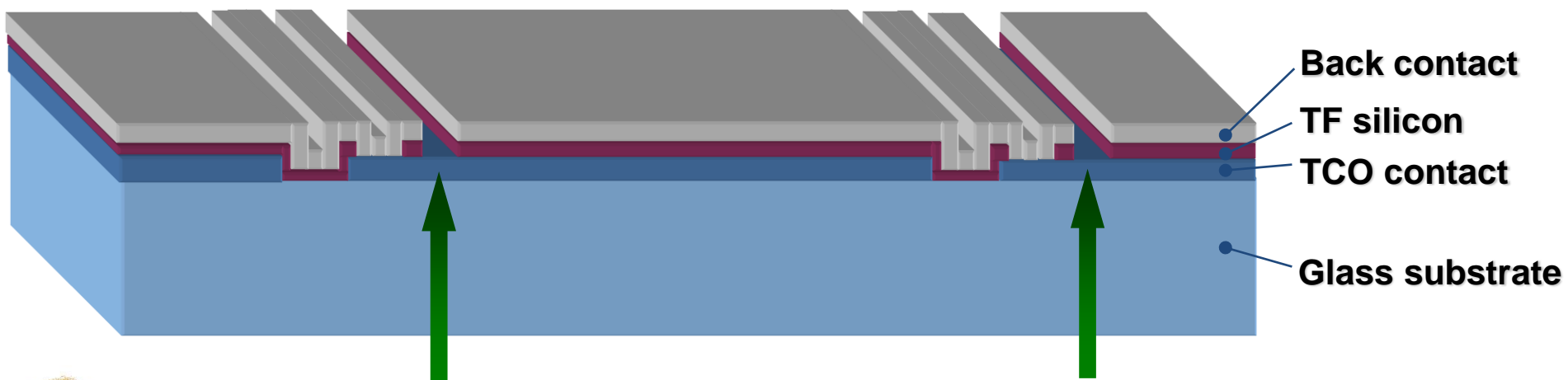
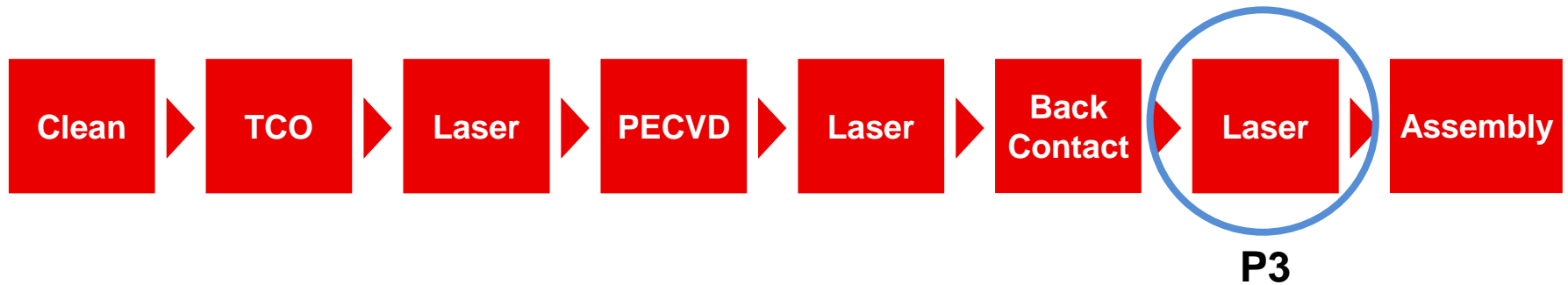
Πίσω Επαφή

Εναπόθεση αγώγιμου οξειδίου (ZnO) μέσω χημικής εναπόθεσης ψαμηγής πίεσης



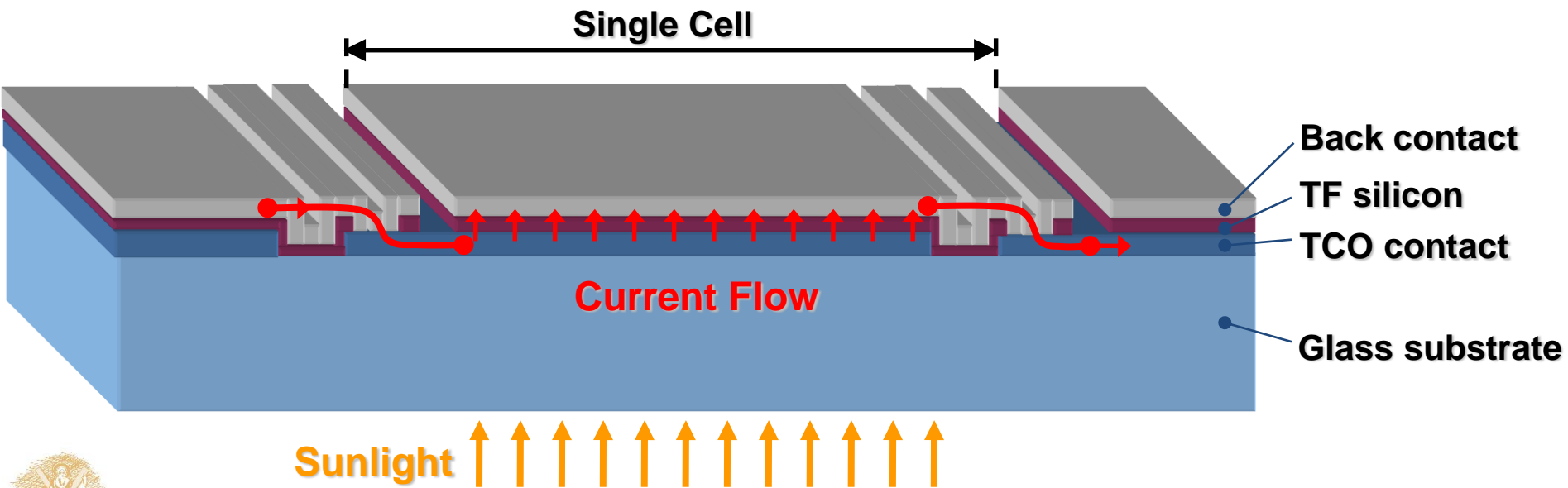
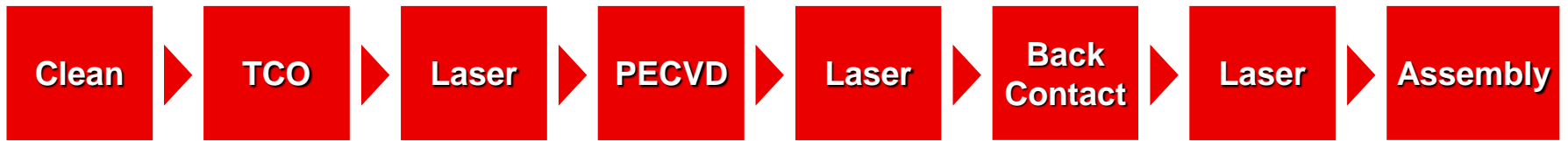
Παρασκευή ΦΒ λεπτών υμενίων πυριτίου – Βήμα 7

3η Εγχάραξη με Laser



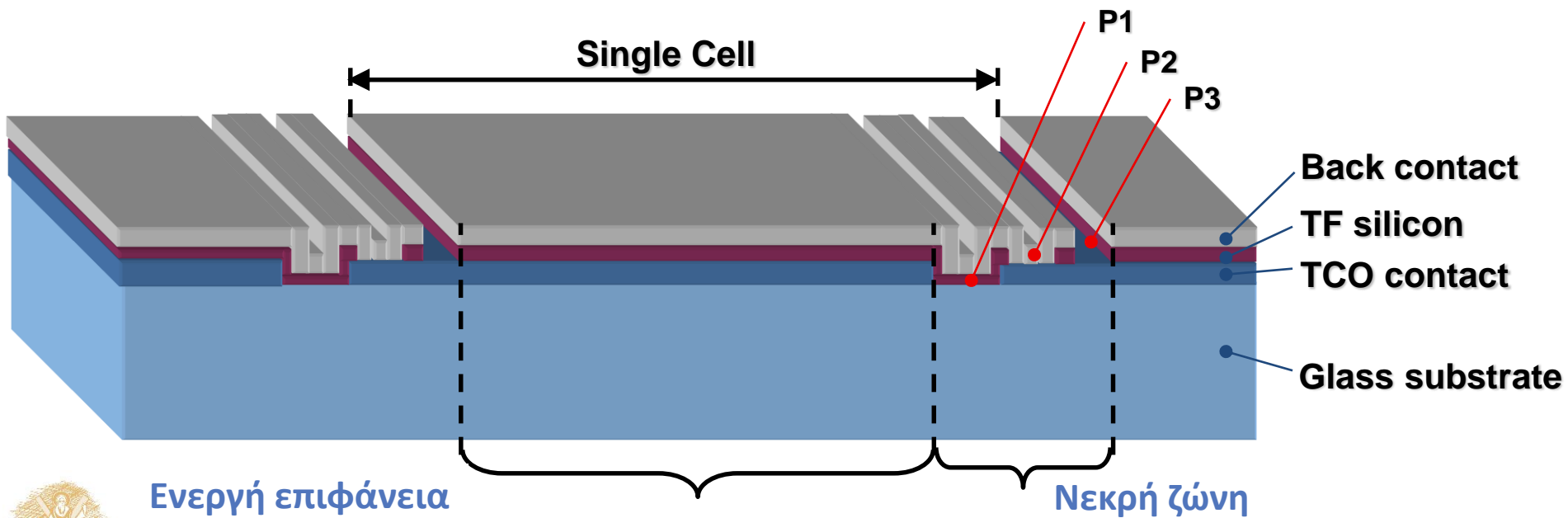
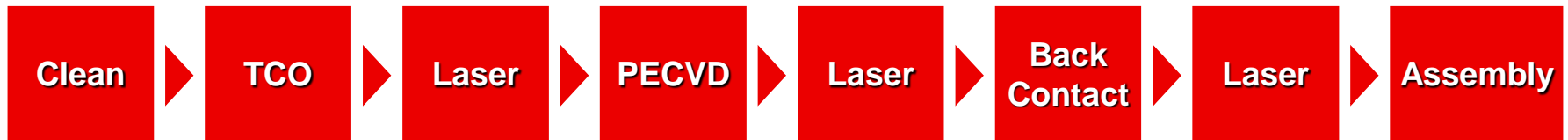
Παρασκευή ΦΒ λεπτών υμενίων πυριτίου – Βήμα 8

Απλό ΦΒ κελί

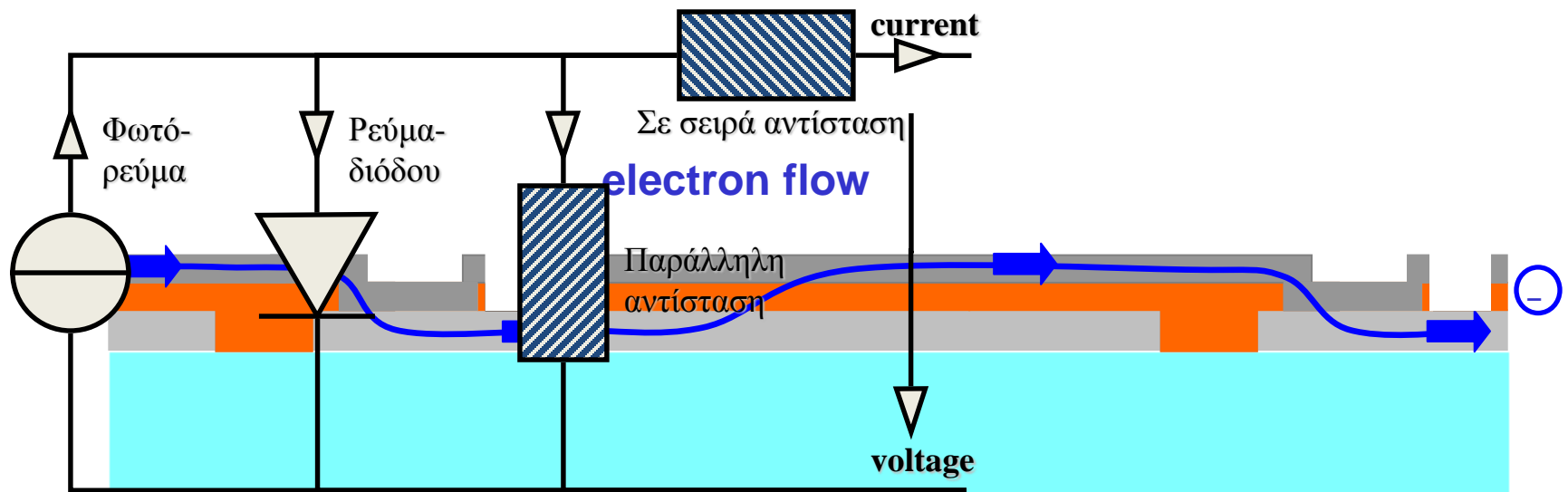
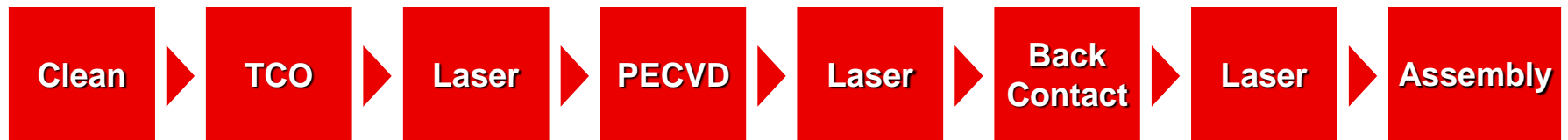


Παρασκευή ΦΒ λεπτών υμενίων

Η διεργασία εγχάραξης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη όλη διεργασία παρασκευής πρέπει να είναι σύντομη, προσαρμοσμένη στη κάθε στοιβάδα και ακριβής



Παρασκευή ΦΒ λεπτών υμενίων



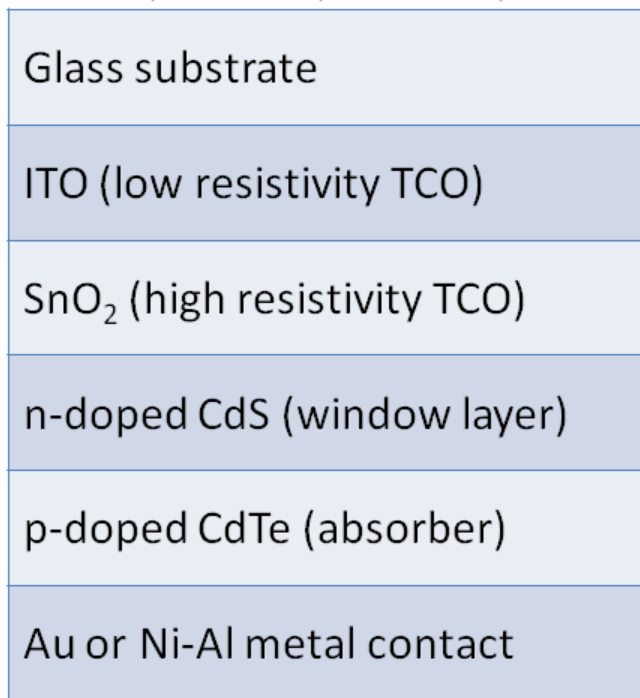
Τελική Μορφή



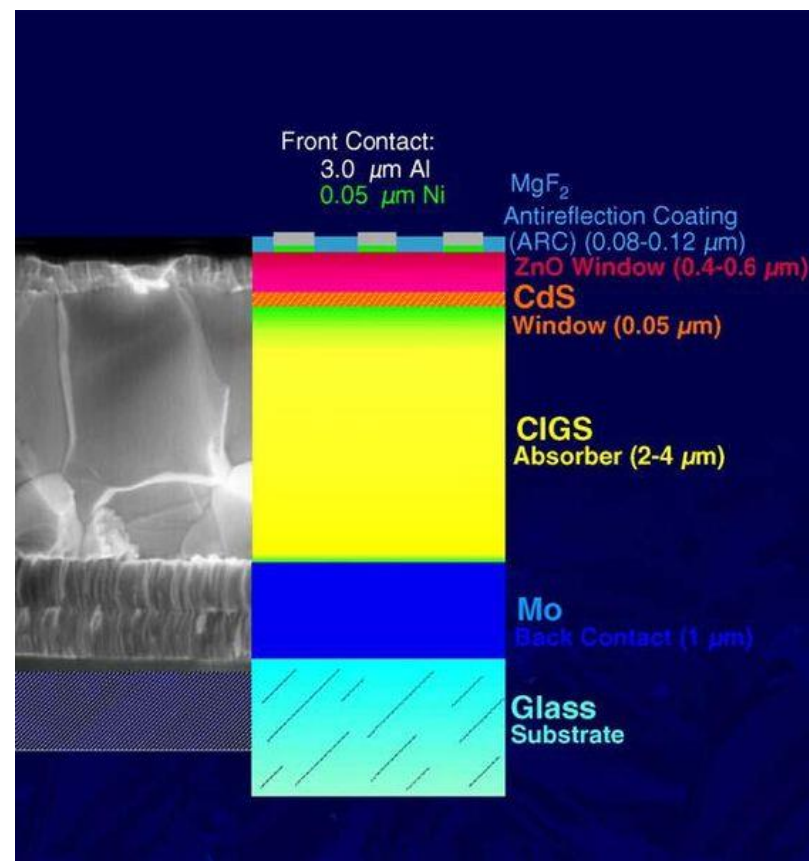
Δομή λεπτών υμενίων CdTe και CIGS

CdTe

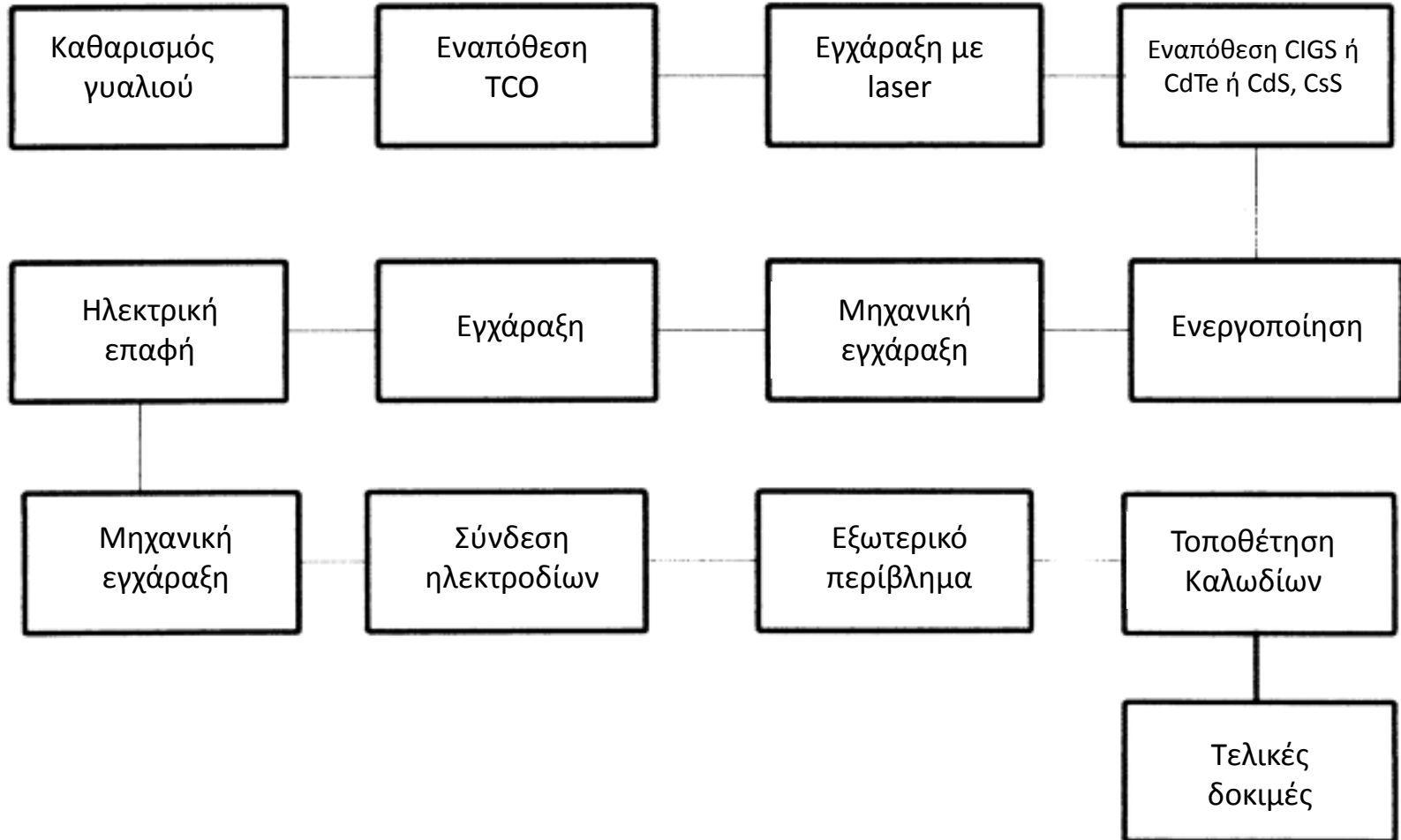
Light



CIGS

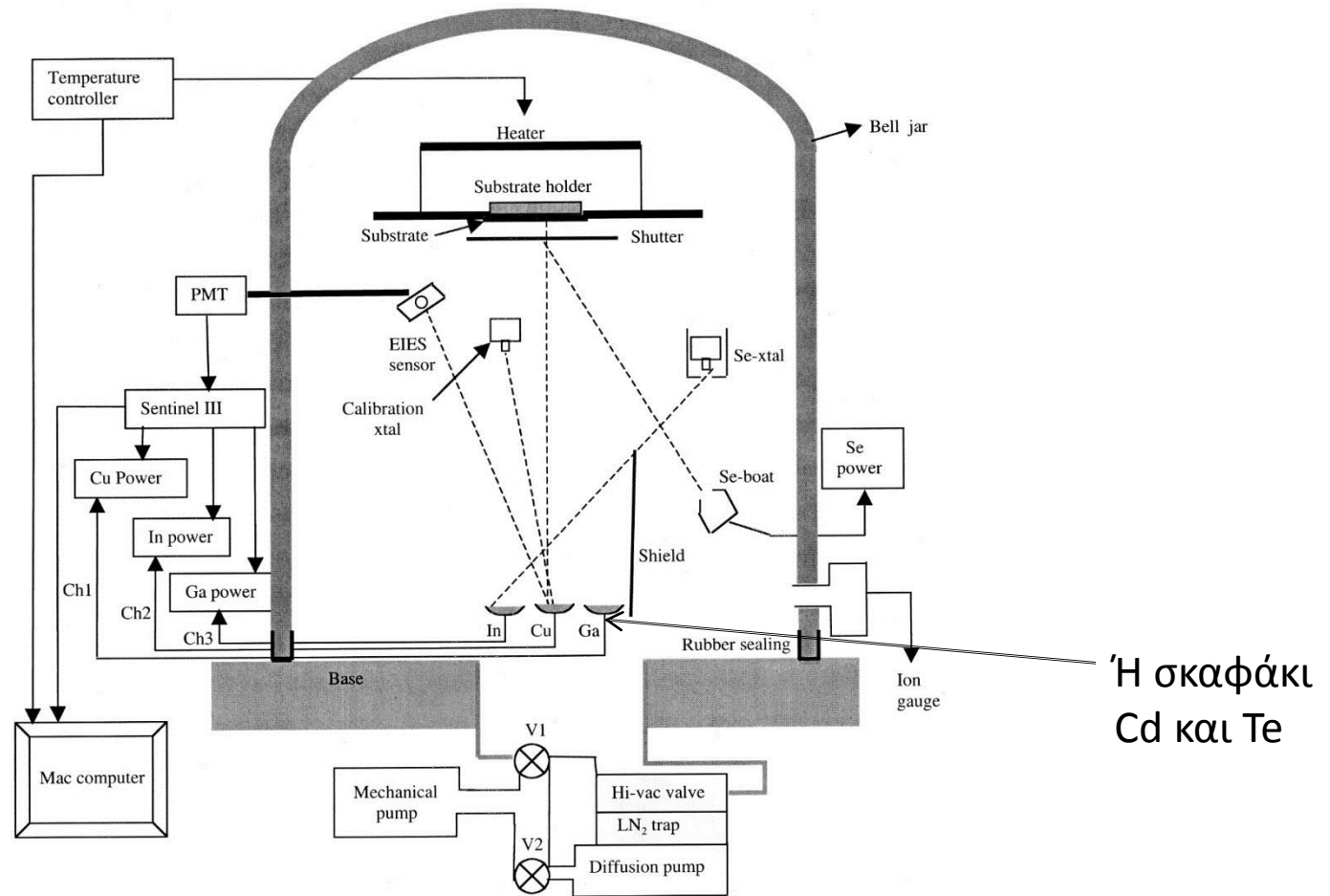


Βήματα παρασκευής ΦΒ λεπτών υμενίων CdTe και CIGS



Σύστημα εναπόθεσης CdTe και CIGS

Εξάχνωση



Αποδόσεις ΦΒ υμενίων CdTe και CIGS

	Area (cm ²)	VoC (V)	JSC (mA/cm ²)	FF (%)	Efficiency (%)	Comments
CIGSe	0.410	0.697	35.1	79.52	19.5	CIGSe/CdS/Cell NREL, 3-stage process
CIGSe	0.402	0.67	35.1	78.78	18.5	CIGSe/ZnS (O,OH) NREL, Nakada et al
CIGS	0.409	0.83	20.9	69.13	12.0	Cu(In,Ga)S ₂ /CdS Dhere, FSEC
CIAS	-	0.621	36.0	75.50	16.9	Cu(In,Al)Se ₂ /CdS IEC, E _g = 1.15eV
CdTe	1.03	0.845	25.9	75.51	16.5	CTO/ZTO/CdS/CdTe NREL, CSS
CdTe	-	0.840	24.4	65.00	13.3	SnO ₂ /Ga ₂ O ₃ /CdS/CdTe IEC, VTD
CdTe	0.16	0.814	23.56	73.25	14.0	ZnO/CdS/CdTe/Metal U. of Toledo, sputtered

Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Τεχνολογιών

Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο

Πλεονεκτήματα

- Υψηλές αποδόσεις
- Όριμη Τεχνολογία – Ευκολία Παρασκευής

Μειονεκτήματα

- Υψηλό Κόστος παρασκευής – Υψηλή Κατανάλωση Ενέργειας
- Υψηλή κατανάλωση πρώτων υλών

Λεπτών υμενίων Πυριτίου

Πλεονεκτήματα

- Χαμηλό Κόστος
- Μικρή κατανάλωση πρώτων υλών - ενέργειας

Μειονεκτήματα

- Χαμηλές αποδόσεις – ΦΒ πλαίσια μικρής ισχύος
- Πτώση απόδοσης κατά τον κύκλο ζωής του
- Υψηλό κόστος απόκτησης εξοπλισμού

Λεπτών υμενίων CdTe και CIGS

Πλεονεκτήματα

- Μικρή κατανάλωση πρώτων υλών
- Υψηλές αποδόσεις - σταθερότητα

Μειονεκτήματα

- Χρήση τοξικών υλικών
- Υψηλή κατανάλωση ενέργειας



Τέλος Ενότητας

Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, Όνομα μέλους ή μελών ΔΕΠ 2014:
Ελευθέριος Αμανατίδης. «Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας». Έκδοση: 1.0.
Πάτρα 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:
<https://eclass.upatras.gr/courses/CMNG2123/>.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.