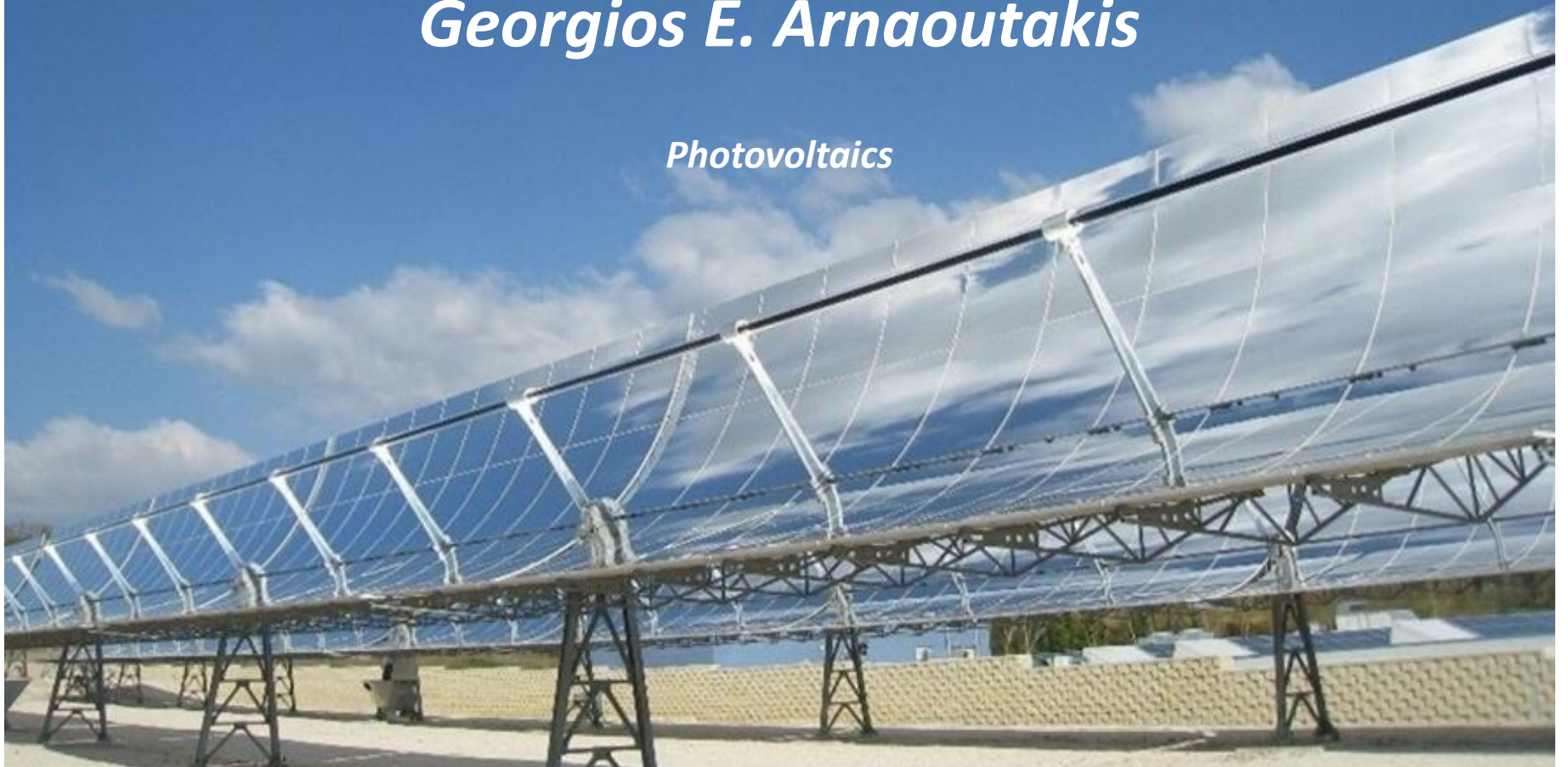


Solar Energy & Applications

Georgios E. Arnaoutakis

Photovoltaics



Ηλιακοί Φωτοβολταϊκοί συλλέκτες

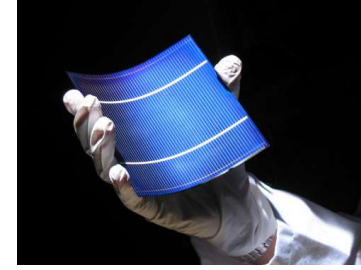
- Στατικοί
- Κατευθυνόμενοι
- Συγκεντρωτικοί



Photovoltaic generations

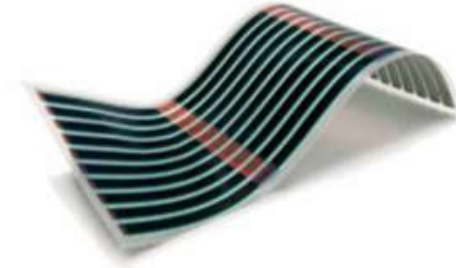
ΦΒ στοιχεία 1ης γενιάς ή ΦΒ στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si), που περιλαμβάνουν:

- ΦΒ μονοκρυσταλλικού πυριτίου (mono-Si)
- ΦΒ πολυκρυσταλλικού πυριτίου (poly-Si)



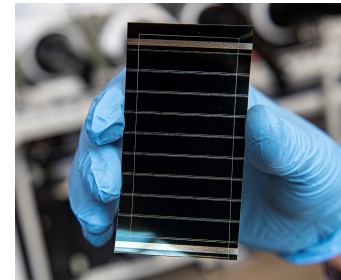
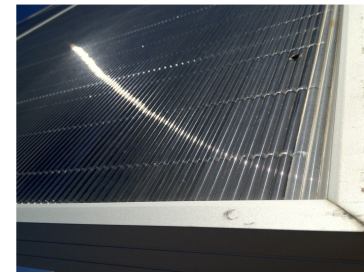
ΦΒ στοιχεία 2ης γενιάς ή ΦΒ στοιχεία λεπτού υμενίου (thin film), που περιλαμβάνουν:

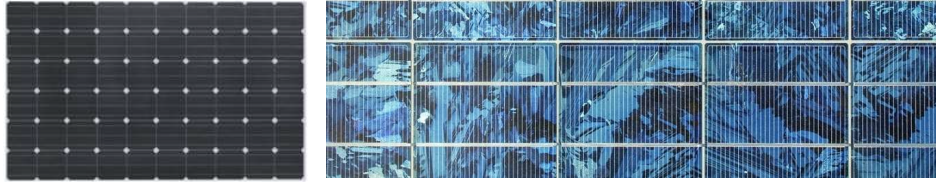
- ΦΒ άμορφου πυριτίου (a-Si)
- ΦΒ τελλουριούχου καδμίου (CdTe)
- ΦΒ δισεληνοϊνδιούχου χαλκού (GIS) ή δισεληνοϊνδιούχου χαλκού - γαλλίου (GIGS)



ΦΒ στοιχεία & τεχνολογίες 3ης γενιάς:

- ΦΒ στοιχεία ετερο-επαφής (multi-junction), που χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο στα
- Συγκεντρωτικά ΦΒ συστήματα (CPV)
- Φωτοευαίσθητοποιημένα με χρωστική ΦΒ
- Οργανικά ΦΒ
- ΦΒ περοβσκιτών





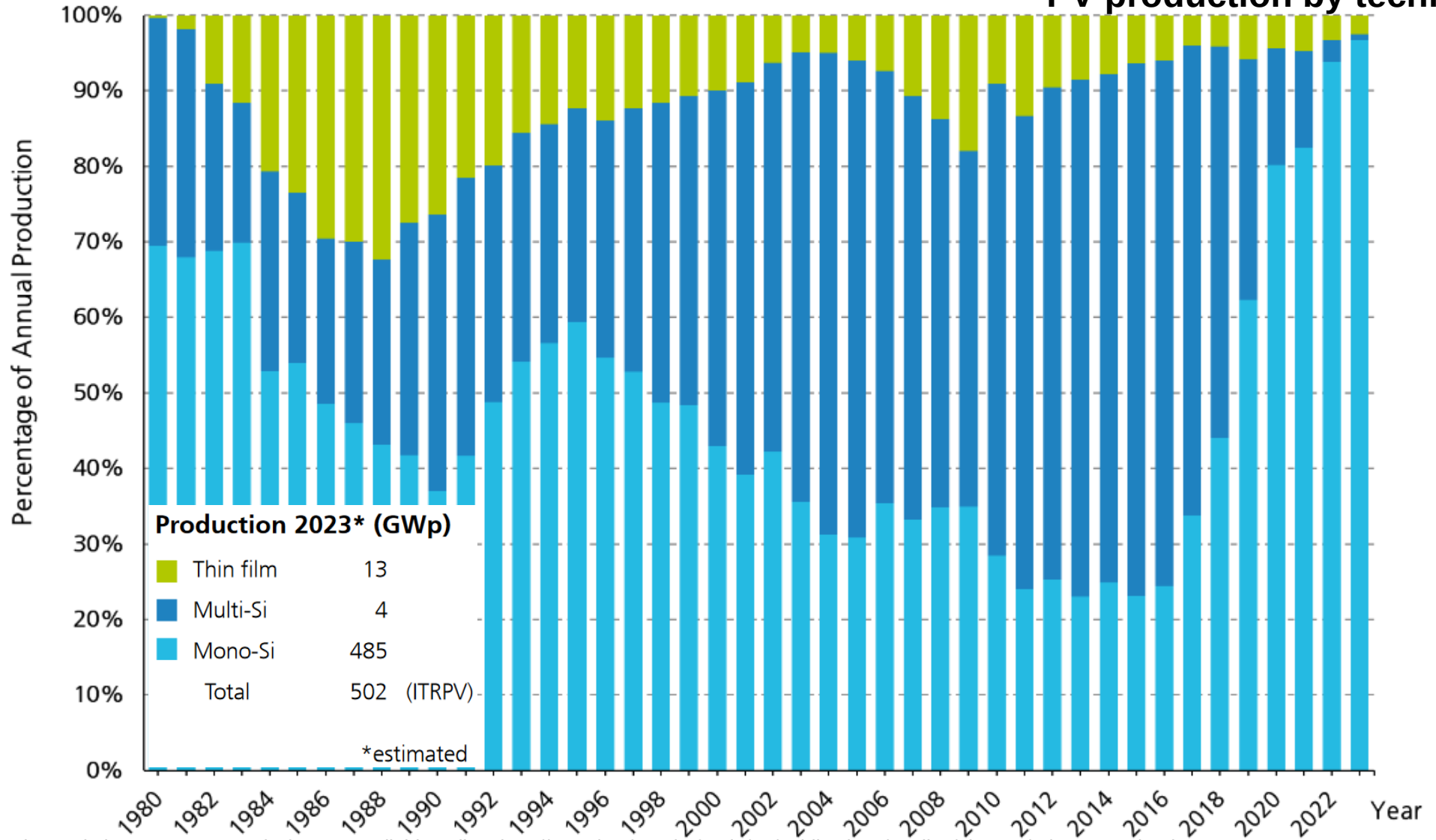
Τα ΦΒ πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου (mono-Si) είναι ένας από τους παλαιότερους και πιο αξιόπιστους τρόπους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ενέργεια

- Κάθε ΦΒ στοιχείο κατασκευάζεται από έναν μόνο κρύσταλλο πυριτίου σε μια πολύ περίπλοκη διαδικασία κατασκευής
- Η απόδοση του ΦΒ πλαισίου κυμαίνεται συνήθως από 15-20% - τα τελευταία χρόνια ορισμένα προϊόντα υψηλής τεχνολογίας ξεπερνούν το 20%
- Ο χρόνος ζωής τους μπορεί να ξεπεράσει τα 25 χρόνια, ενώ το κόστος τους μειώθηκε σημαντικά την τελευταία δεκαετία
- Το τυπικό χρώμα του ΦΒ στοιχείου mono-Si είναι μαύρο ή ιριδίζον μπλε

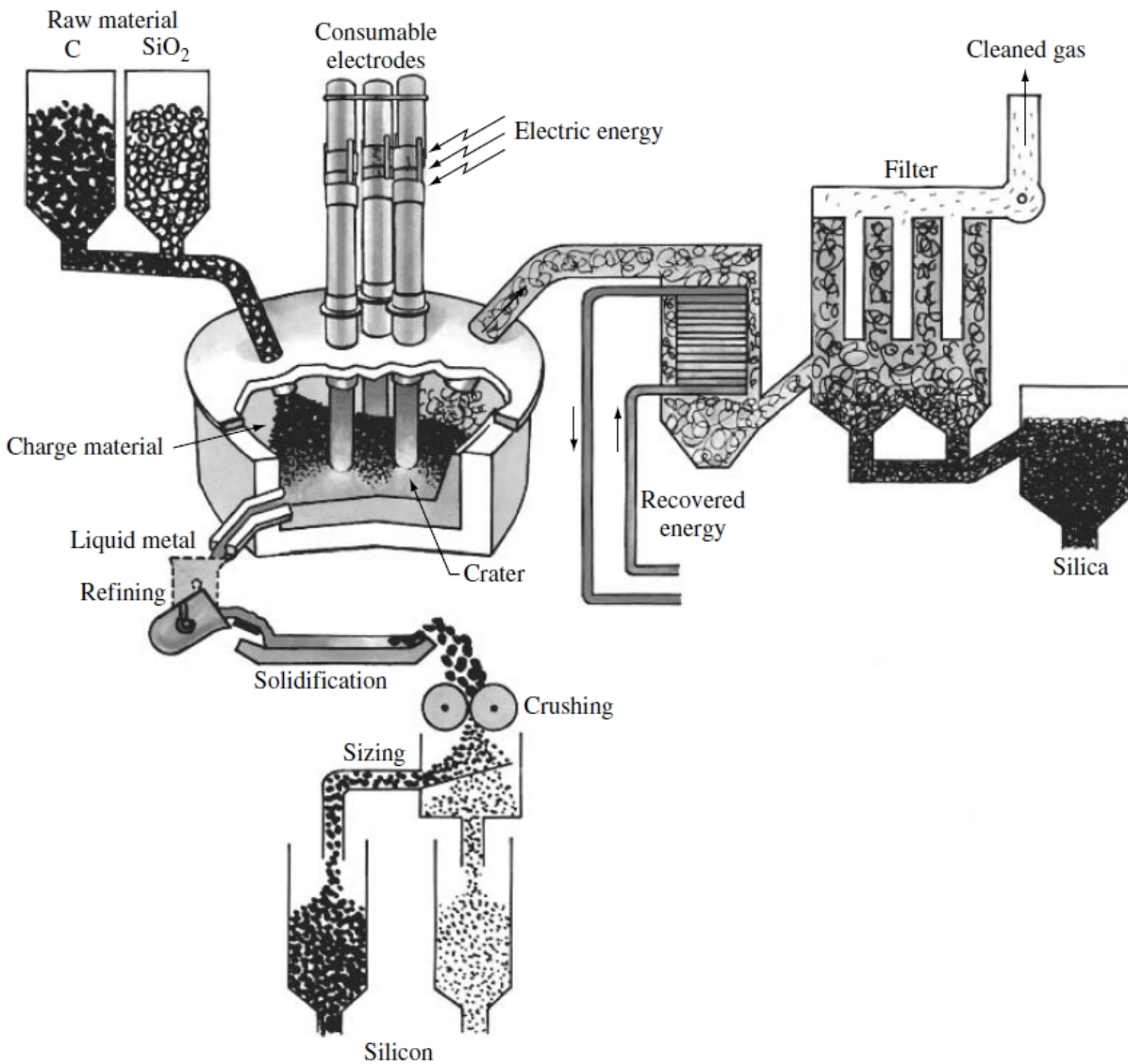
Τα ΦΒ πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου (poly-Si) αντιπροσωπεύουν την τεχνολογία ΦΒ με το υψηλότερο παγκόσμιο μερίδιο αγοράς (πάνω από το 60% το 2017)

- Η παραγωγική διαδικασία είναι απλή, οικονομικά αποδοτική και μειώνει τα απόβλητα πυριτίου σε σύγκριση με τα ΦΒ πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου (mono-Si)
- Ως αποτέλεσμα, το κόστος τους είναι χαμηλότερο σε σύγκριση με τα πλαίσια mono-Si, χωρίς απώλεια σε αξιοπιστία
- Η απόδοση των ΦΒ πλαισίων poly-Si κυμαίνεται από 13-16% λόγω της χαμηλότερης καθαρότητας του πυριτίου, επομένως χρειάζονται ελαφρώς περισσότερη επιφάνεια για ίδια ποσότητα εγκατεστημένης ισχύος σε σύγκριση με τα ΦΒ πλαίσια mono-Si
- Το χρώμα τους είναι διάστικτο μπλε λόγω της ύπαρξης πολλαπλών κρυστάλλων σε ένα ΦΒ στοιχείο

PV production by technology



Mono- & Poly-crystalline Si PV



Semiconductors & junctions

What makes a semiconductor?

Crystalline structure & properties of atoms forming crystal

What do these depend on? Energy of bandgap E_g

METALS

$E_g = 0$

SEMICONDUCTORS

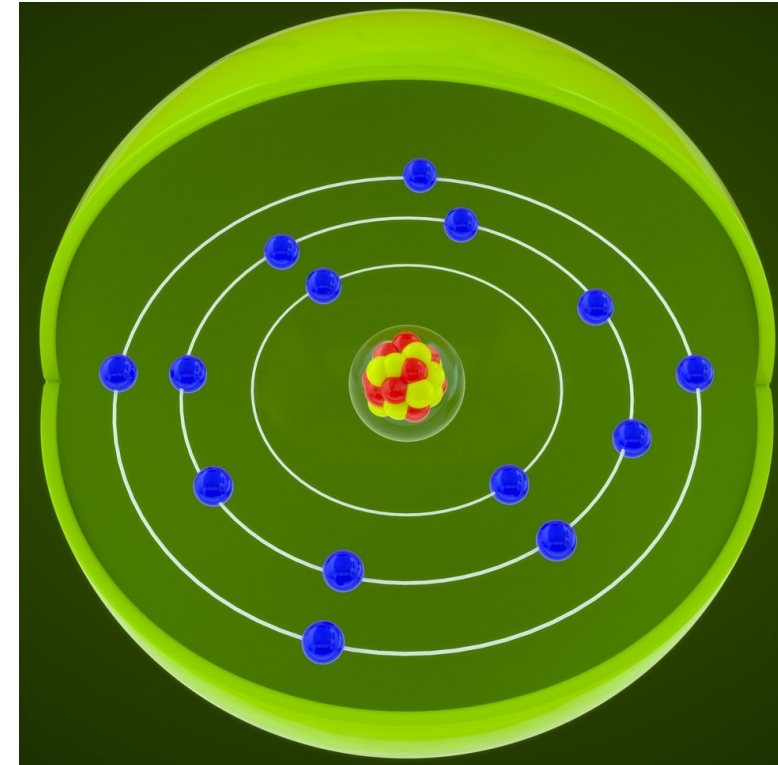
$0 < E_g \leq 3 \text{ eV}$

INSULATORS

$E_g > 3 \text{ eV}$

Semiconductor material	value of E_g
InSb	0.17 eV
Ge	0.72 eV
Si	1.1 eV
GaAs	1.4 eV
AlAs	2.17 eV
SiC	3eV
$\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ (solid solution)	$1.4 \text{ eV} < E_g < 2.17 \text{ eV}$

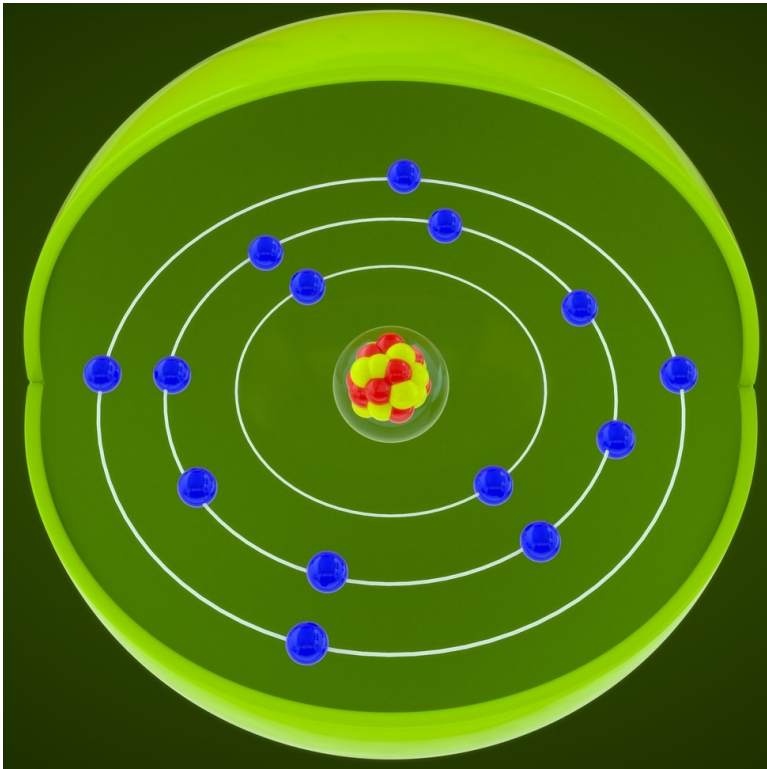
Silicon



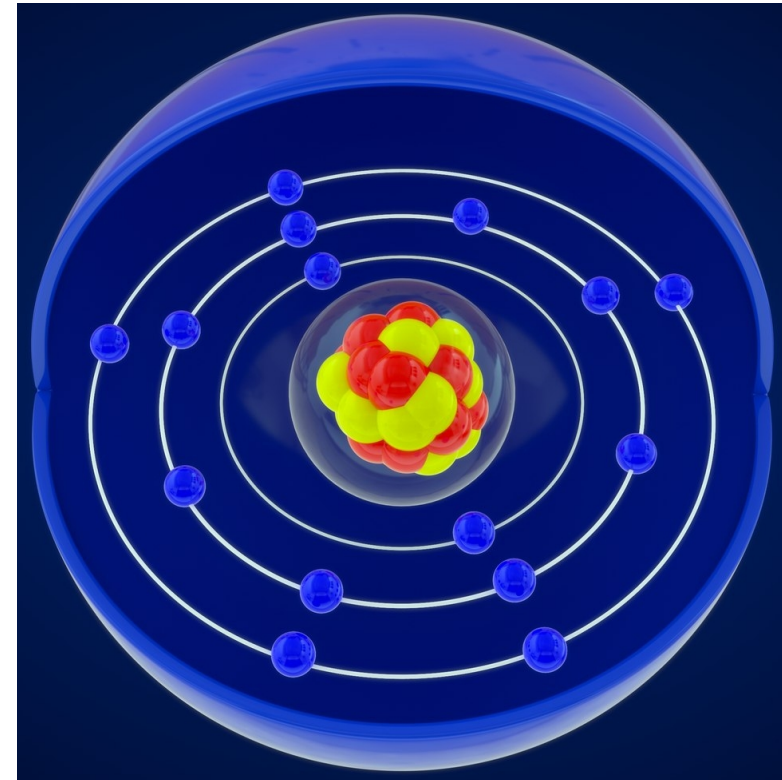
Semiconductor of n-type

Substitutional doping of Si by an element from group V of the periodic table
(donor)

Silicon



Phosphorus

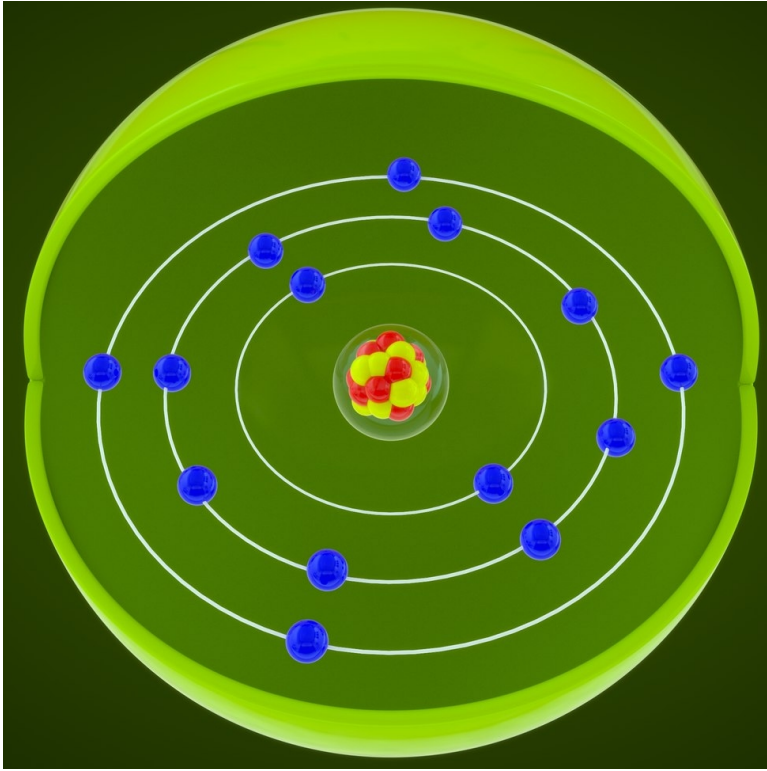


Extra electron

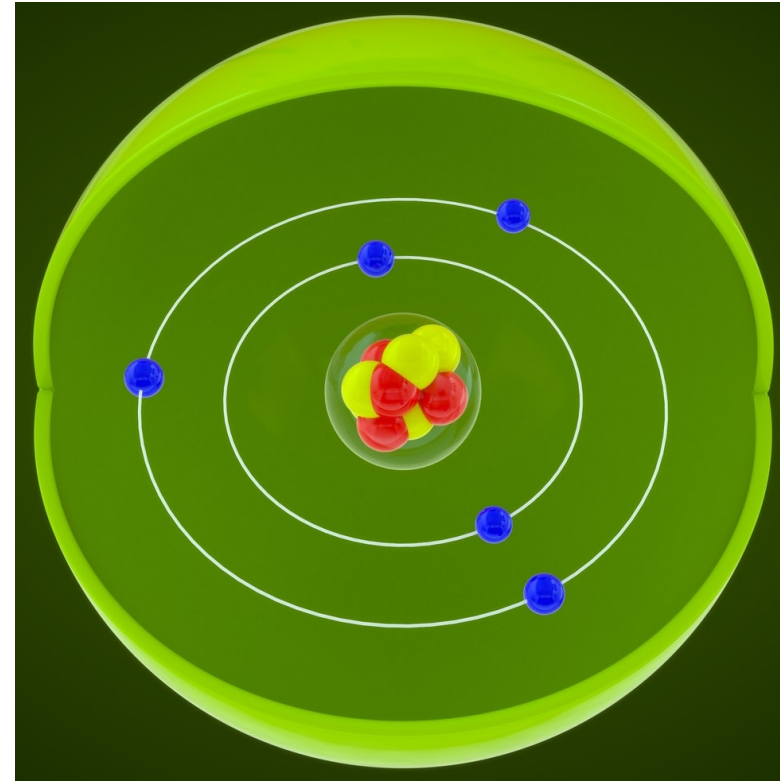
Semiconductor of p-type

Substitutional doping of Si by an element from group III of the periodic table
(acceptor)

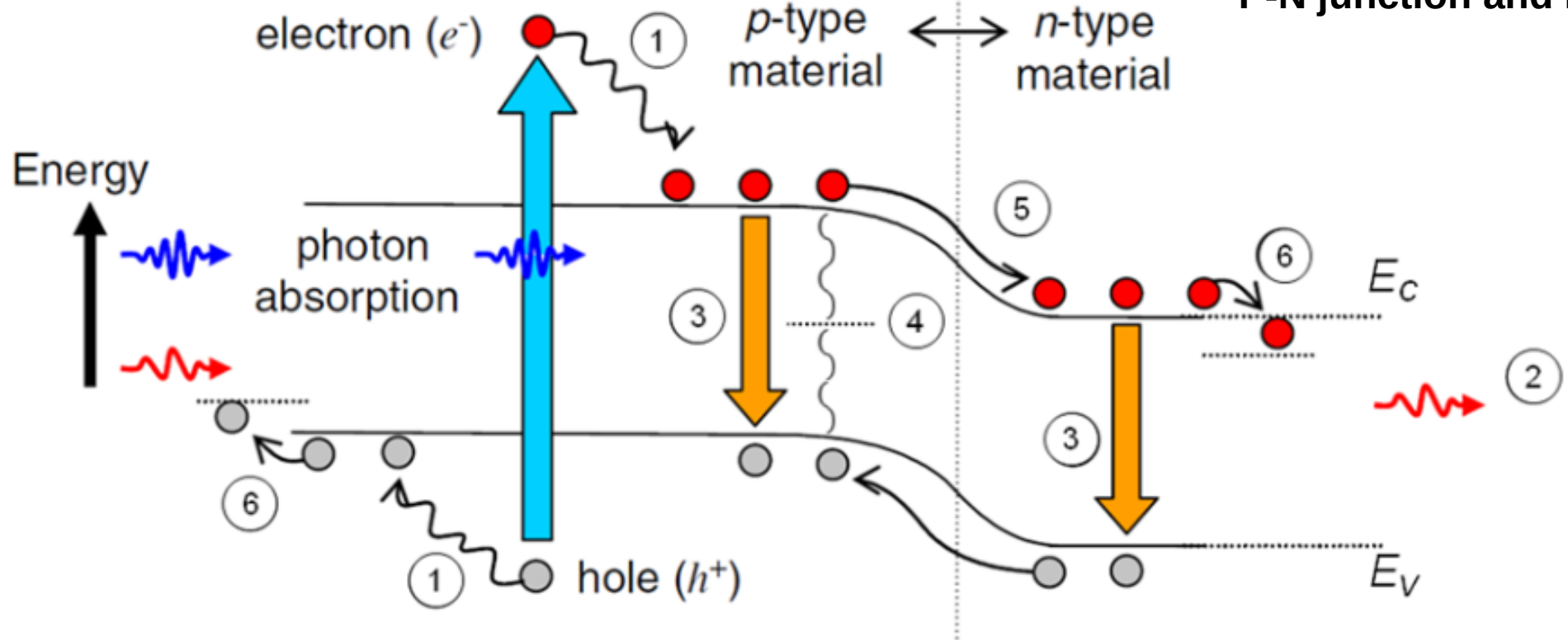
Silicon



Boron



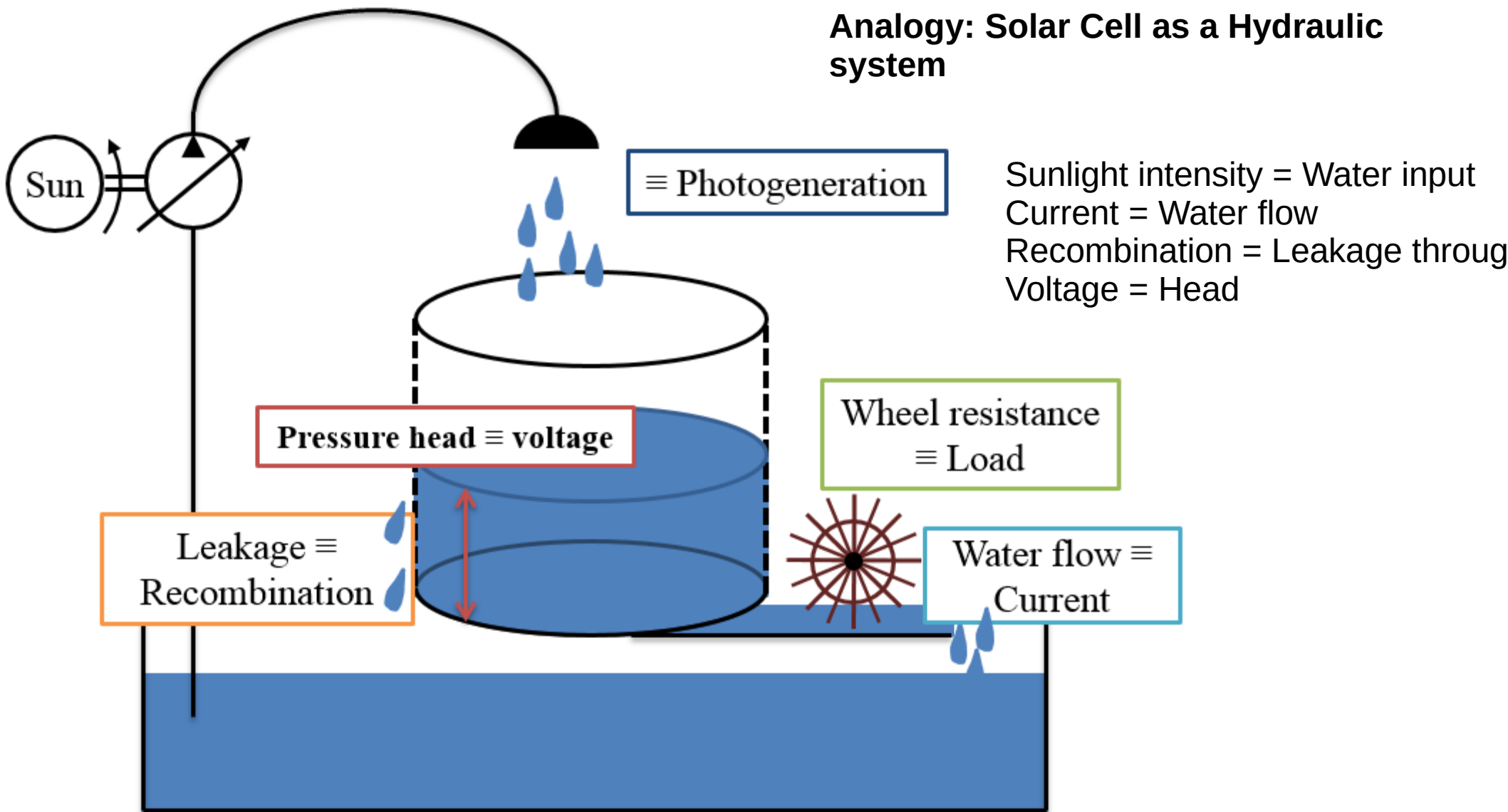
Extra hole



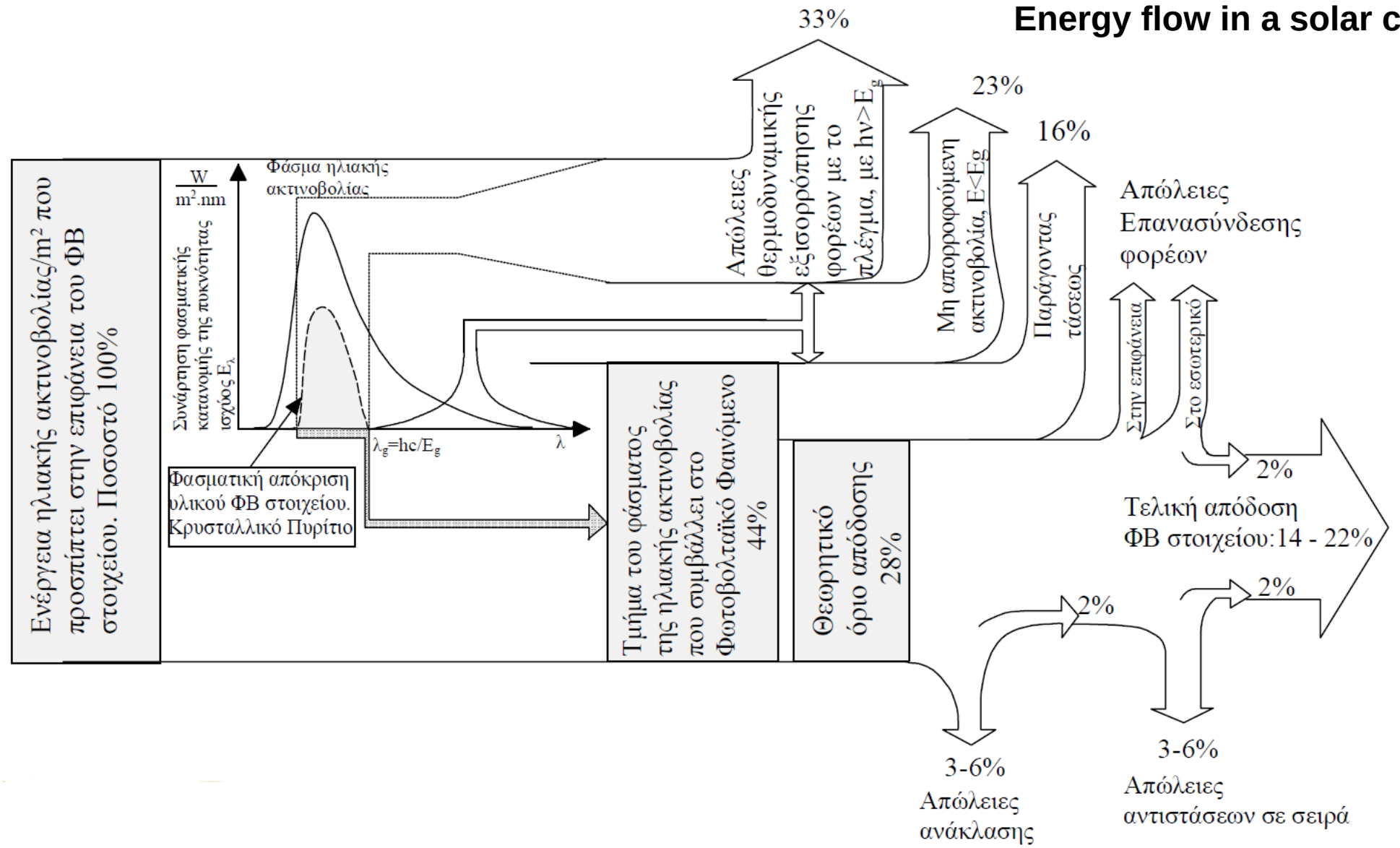
Model of a *p-n* junction solar cell and main mechanisms upon absorption of photons.

① Above band-gap/thermalisation, ② below band-gap/transmission, ③ radiative recombination, ④ non-radiative recombination, ⑤ diffusion across the junction, ⑥ voltage drop at the contacts. (Adapted from [48]).

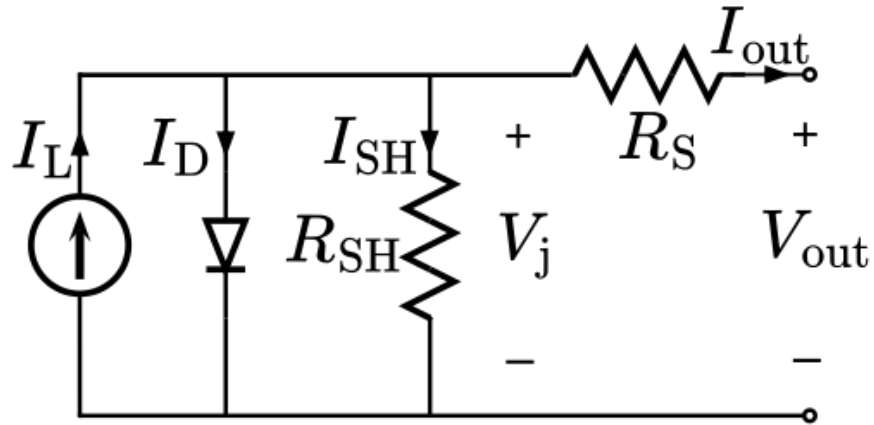
Analogy: Solar Cell as a Hydraulic system



Energy flow in a solar cell



Diode equivalent circuit



$$I_{out} = I_L - I_D - I_{sh}$$

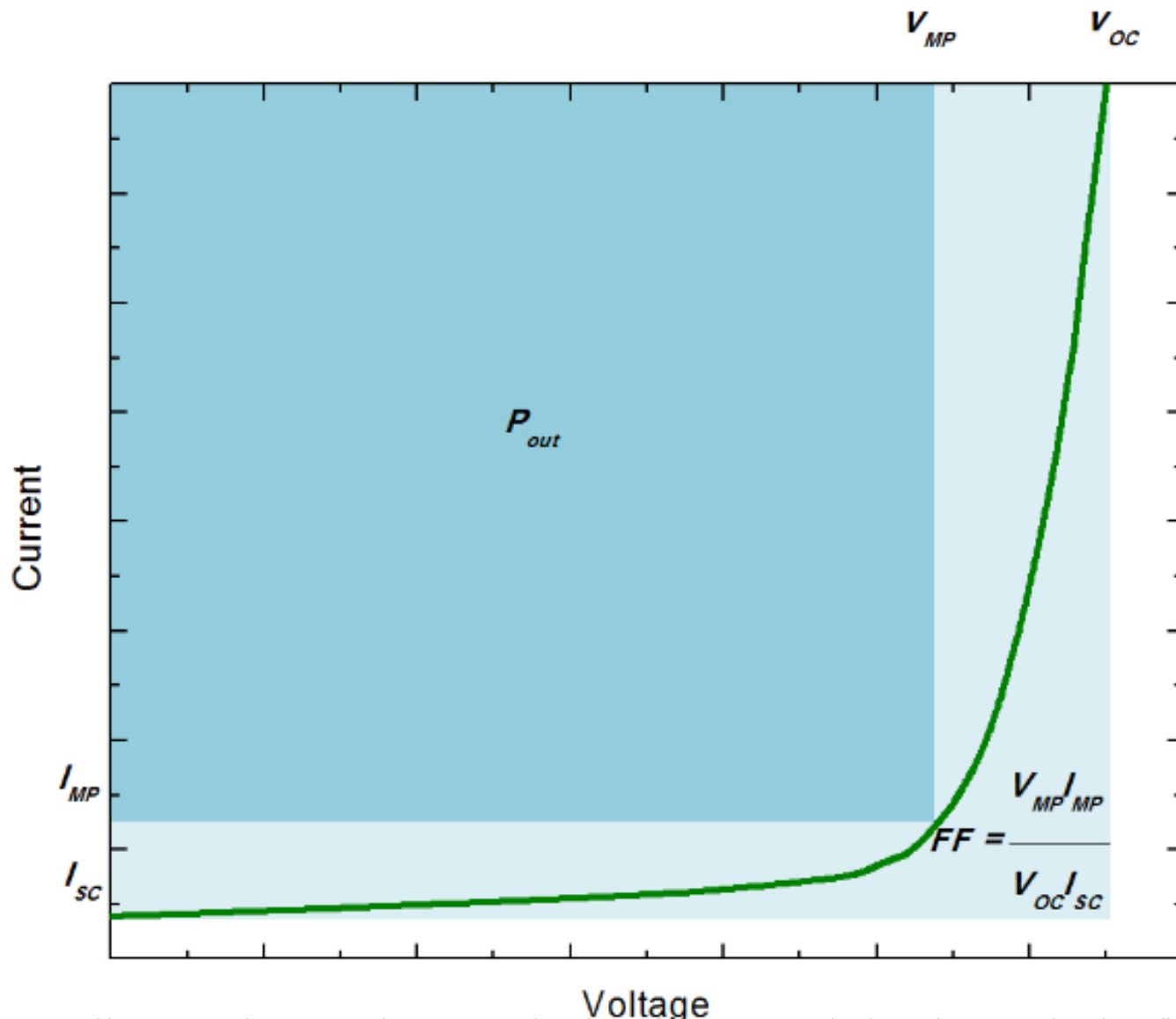
$$V_j = V_{out} + I_{out} \times R_S$$

I_L increases with light intensity

I_D represents recombination losses

R_{sh} & R_s are lumped resistance elements

I-V characteristic curve

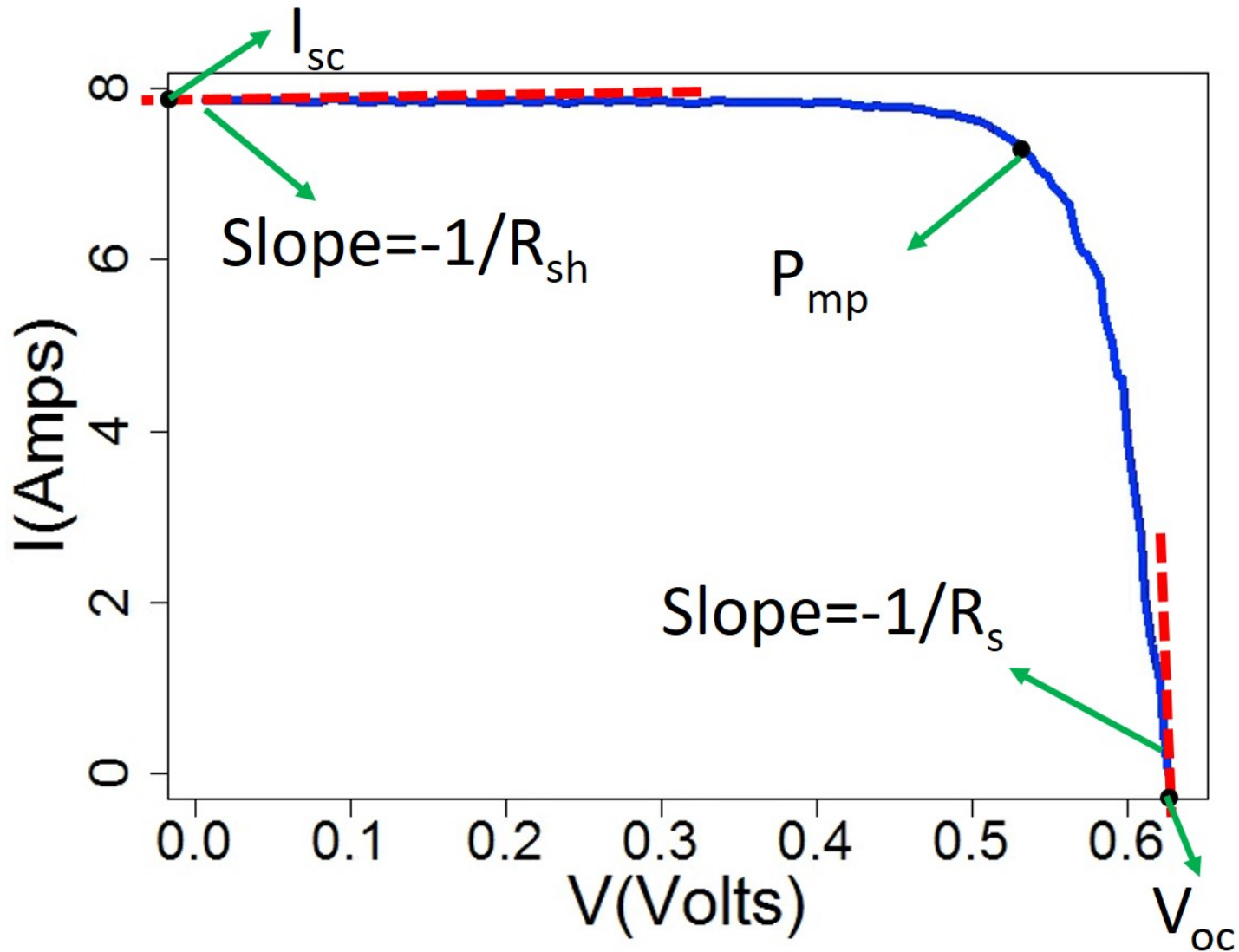


$$\eta = P_{out} / P_{in}$$

$$P_{out} = I_{mp} \times V_{mp}$$

$$\text{Fill Factor} = \frac{I_{mp} \times V_{mp}}{I_{sc} \times V_{oc}}$$

I-V characteristic curve

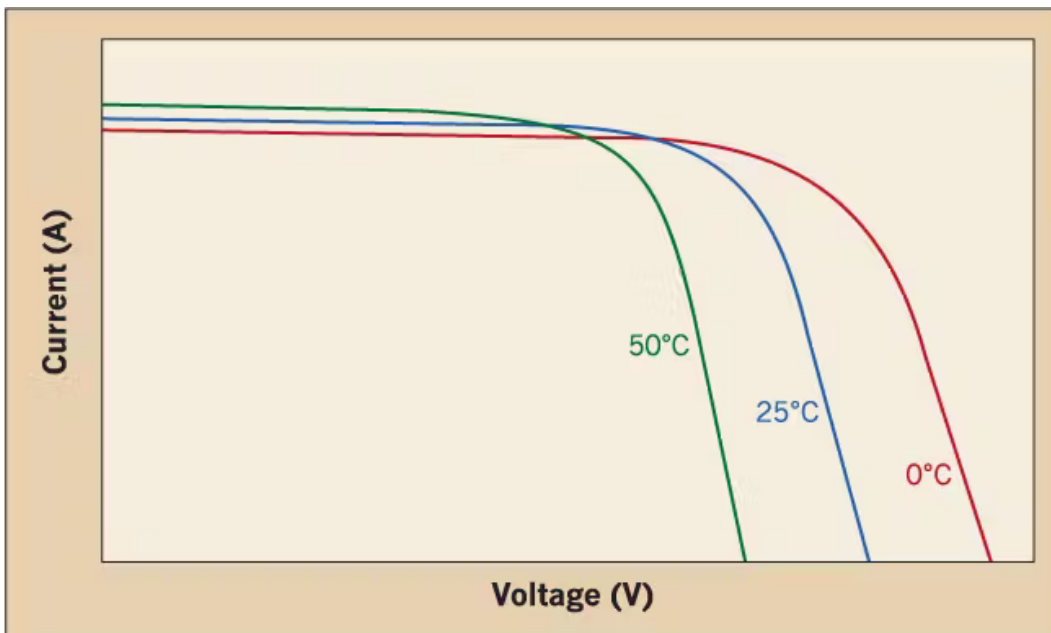
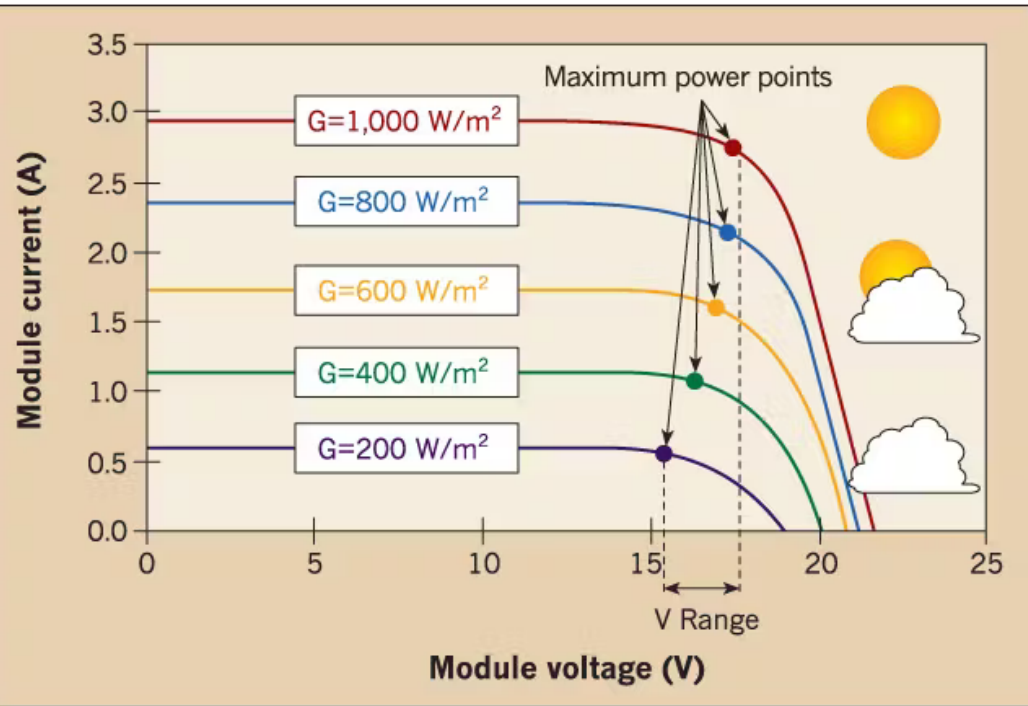


$$\eta = P_{out} / P_{in}$$

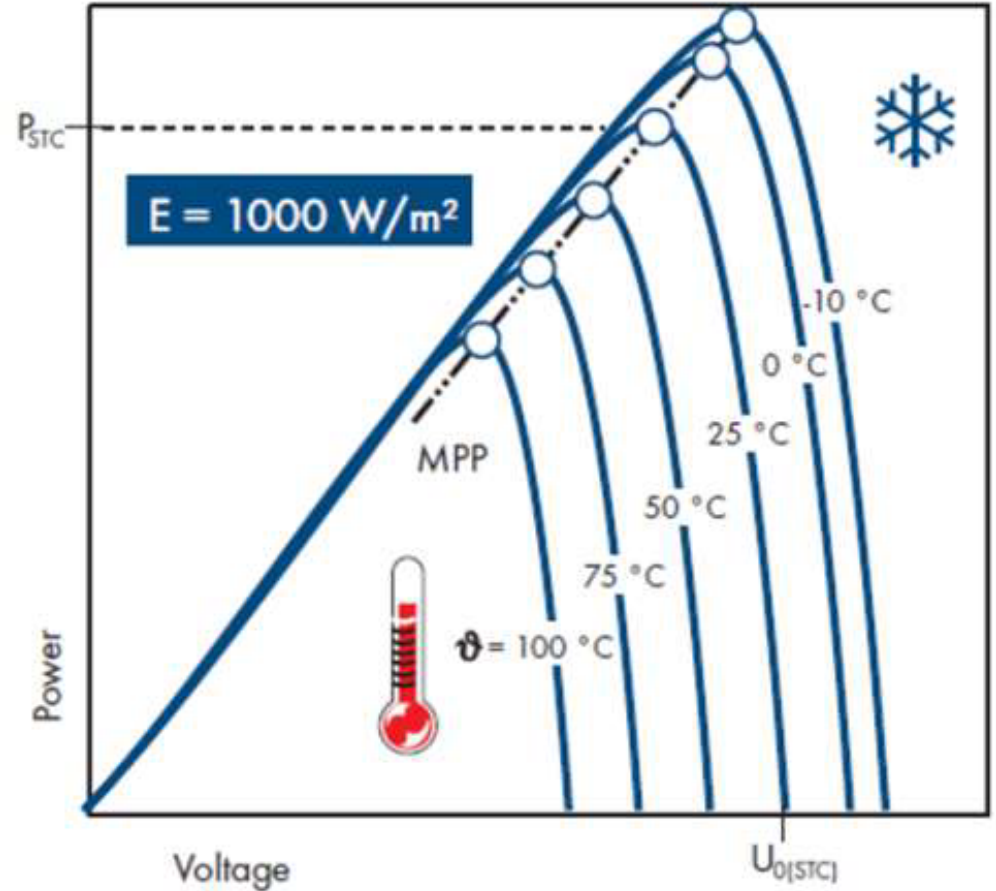
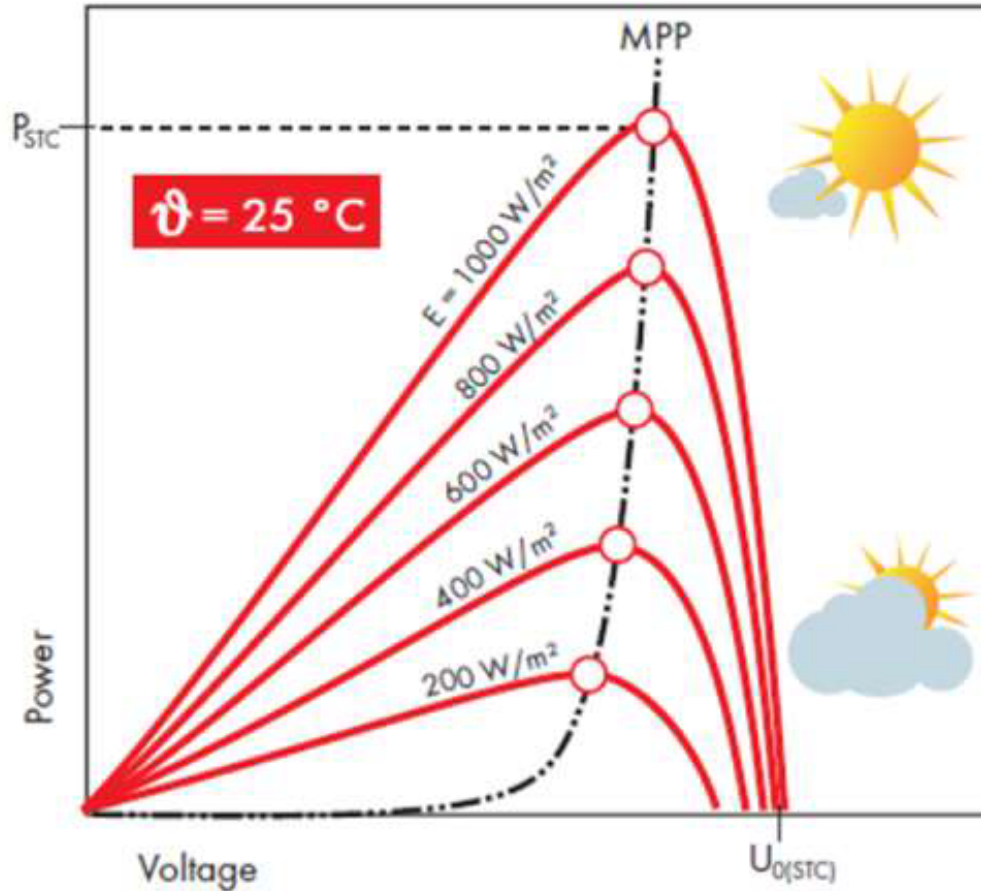
$$P_{out} = I_{mp} \times V_{mp}$$

$$\text{Fill Factor} = \frac{I_{mp} \times V_{mp}}{I_{sc} \times V_{oc}}$$

Irradiance & Temperature I-V curves



Irradiance & Temperature P-V curves



Για κάθετη πρόσπτωση

$$I_{sc} = I_{sc,STC} \cdot \frac{G_t}{G_{STC}} \cdot \{1 + \alpha \cdot (T_{cell} - T_{STC})\}$$

Τυπική τιμή α: 0.05%/°C

$G_{STC}=1000 \text{ W/m}^2$

$T_{STC}=273.15+25 \text{ K}$ ή $\theta_{STC}=25 \text{ }^\circ\text{C}$

$$V_{oc} = V_{oc,STC} \cdot \{1 + \beta \cdot (T_{cell} - T_{STC})\}$$

Τυπική τιμή β: -0.30 %/°C

$G_{STC}=1000 \text{ W/m}^2$

$T_{STC}=273.15+25 \text{ K}$ ή $\theta_{STC}=25 \text{ }^\circ\text{C}$

$$P_{max} = P_{max,STC} \cdot \frac{G_t}{G_{STC}} \cdot \{1 + \gamma \cdot (T_{cell} - T_{STC})\}$$

Τυπική τιμή γ: -0.40 %/°C

$G_{STC}=1000 \text{ W/m}^2$

$T_{STC}=273.15+25 \text{ K}$ ή $\theta_{STC}=25 \text{ }^\circ\text{C}$

Άσκηση: Δίνονται $I_{sc,STC} = 40\text{mA}$,

$V_{oc,STC}=0.6\text{V}$, $P_{max,STC}=0.5\text{W}$

$G_t = 800 \text{ W/m}^2$

$T_{air} = 20^\circ\text{C}$

AM 1.5

Ταχύτητα ανέμου 1 m/s

(Πίσω πλευρά πλαισίου ανεμπόδιστη.

Απαγωγή θερμότητα χωρίς εμπόδια)

Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)

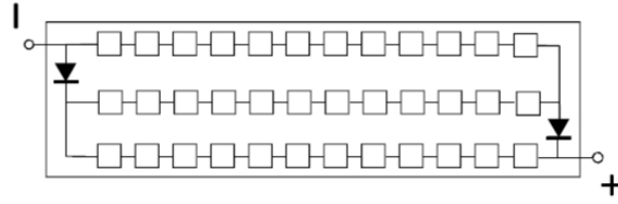
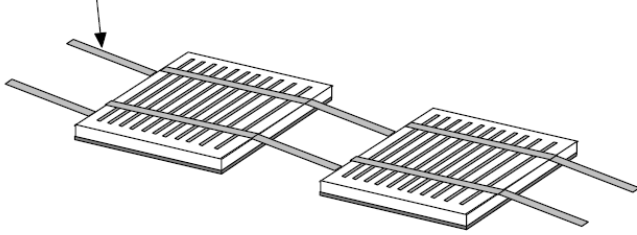
$$T_{cell} = T_{air} + \frac{\text{NOCT} - 20}{800 \text{ W/m}^2} G_t$$

G_t : πυκνότητα ισχύος σε W/m^2
στο επίπεδο του ΦΒ πλαισίου

Βρείτε τα I_{sc} , V_{oc} , P_{max}

Photovoltaic modules (πλαίσια)

Silver, Aluminum
ή Lead Solder Copper



ΦΒ στοιχεία

Πλαστικό υπόστρωμα

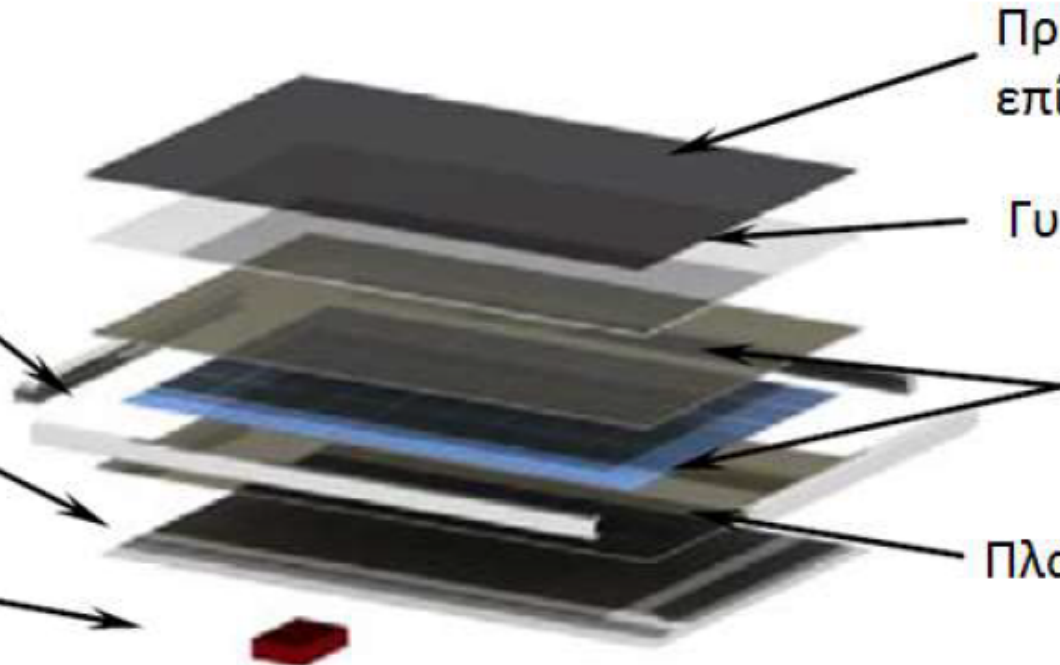
Κουτί επαφής

Προστατευτική
επίστρωση

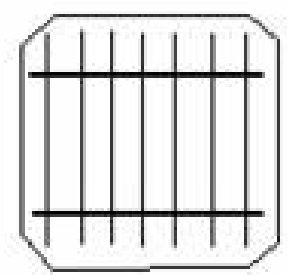
Γυαλί

EVA

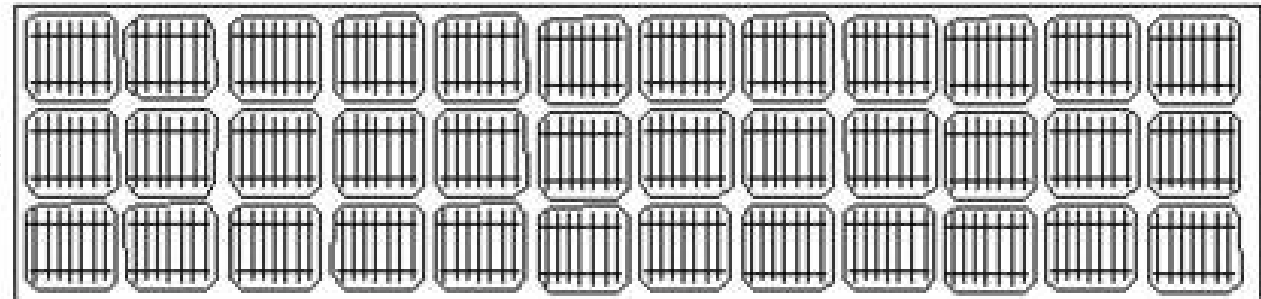
Πλαίσιο (αλουμινίου)



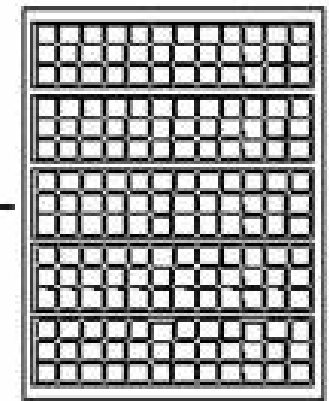
From solar cell to PV field



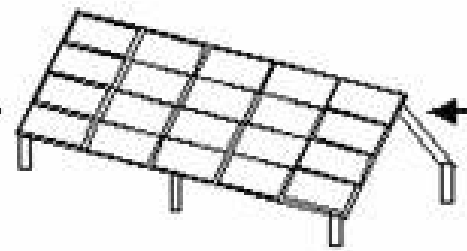
ΦΒ στοιχείο (PV cell)



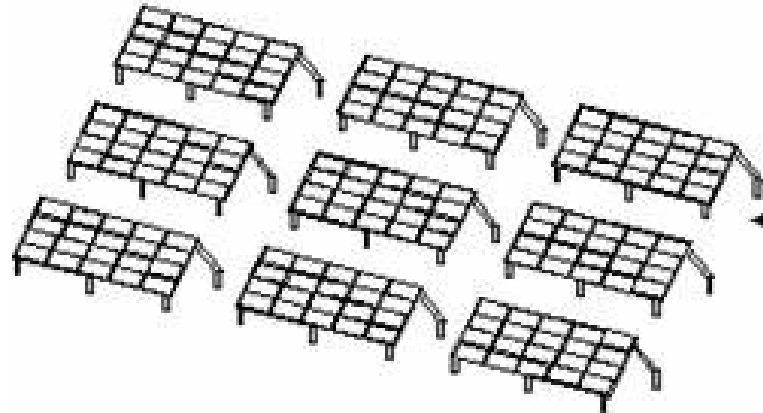
ΦΒ πλαίσιο (PV module)



ΦΒ panel

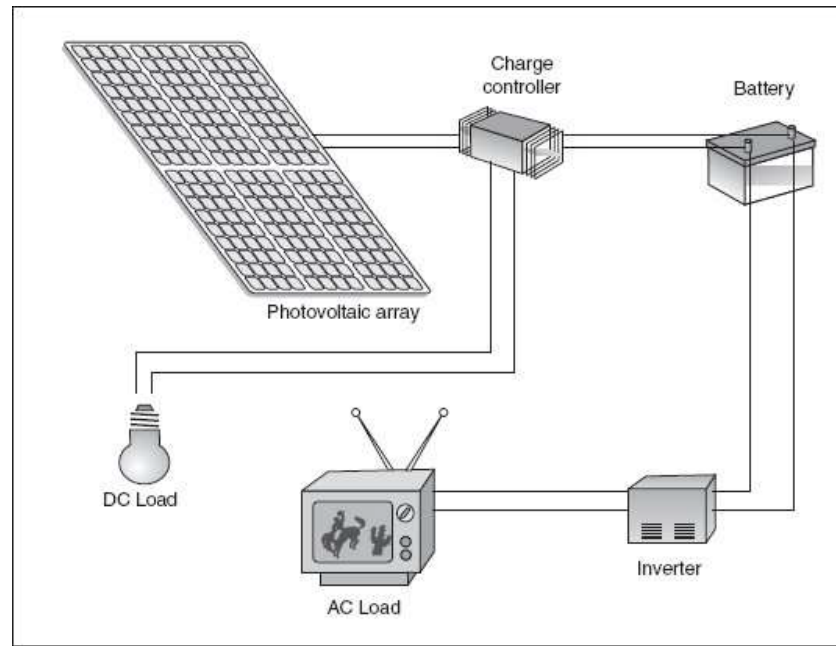
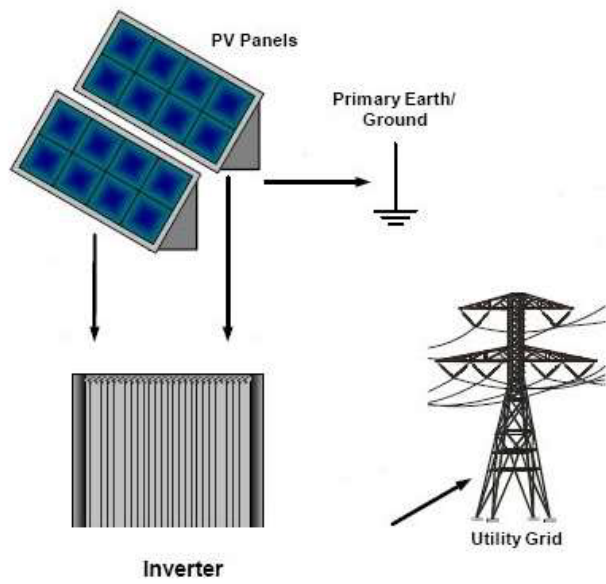


ΦΒ Συστοιχία (PV array)

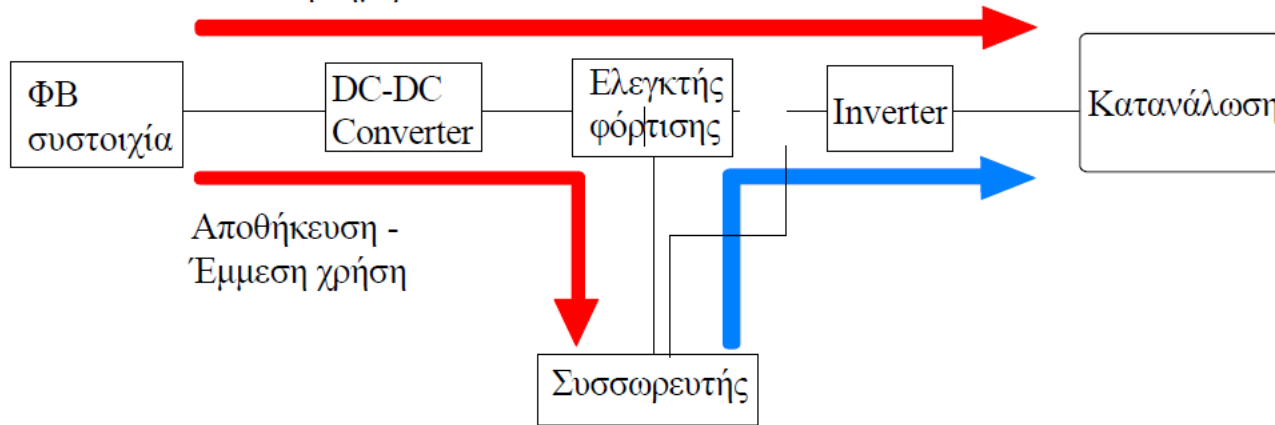


ΦΒ συγκρότημα (PV array field)
ή ΦΒ πάρκο (PV Park)
ενός ΦΒ σταθμού (PV station)

Photovoltaic systems



Άμεση χρήση
κατά την ημέρα



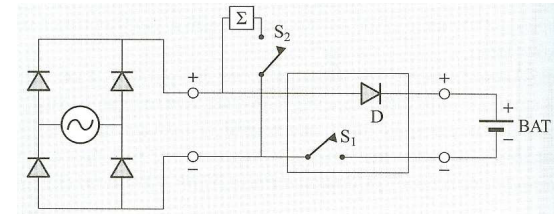
Inverters (αντιστροφείς) & ανορθωτές

- Οι αντιστροφείς μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα (DC) των ΦΒ πλαισίων σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) που συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις του δικτύου και τροφοδοτούν είτε το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο είτε τοπικά φορτία AC
- Ταυτόχρονα, ελέγχουν και παρακολουθούν ολόκληρη την εγκατάσταση, διασφαλίζοντας ότι τα ΦΒ πλαίσια λειτουργούν πάντοτε στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) που εξαρτάται από την ακτινοβολία και τη θερμοκρασία, ενώ παράλληλα παρακολουθούν συνεχώς το ηλεκτρικό δίκτυο (εάν το σύστημα είναι συνδεδεμένο σε αυτό) και είναι υπεύθυνοι για την τήρηση διαφόρων κριτηρίων ασφαλείας
- Η απόδοσή για σύγχρονα μοντέλα τεχνολογίας αιχμής μπορεί να ξεπεράσει το 98%
- Οι βασικές κατηγορίες αντιστροφέων είναι: α) Αντιστροφείς συστοιχίας β) Κεντρικοί αντιστροφείς



- **Χαρακτηριστικά αντιστροφέων μικρής ισχύος**
- Περιοχή τάσης (300 - 700 VDC), Ένταση ηλ. ρεύματος (μέχρι 10 A DC)
- Απόδοση (Μέγιστη 95,5%, Ευρωπαϊκή 94,6%)
- Εγγύηση τουλάχιστον 5-10 έτη, Καταγραφή δεδομένων, Νυχτερινή κατανάλωση

- Οι ανορθωτές μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) σε συνεχές ρεύμα (DC)
- Σε ΦΒ συστήματα, συνήθως συνδέονται με Diesel ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη (H/Z) και χρησιμοποιούνται για την επαναφόρτιση συσσωρευτών, εξασφαλίζοντας συνέχεια της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές

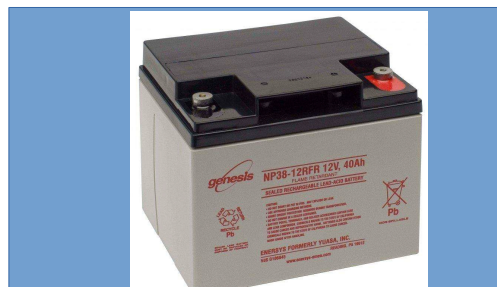


Charge controller (ρυθμιστής φόρτισης)

- Οι ρυθμιστές φόρτισης τοποθετούνται μεταξύ της ΦΒ συστοιχίας και των συσσωρευτών
- Η κύρια λειτουργία τους είναι να ελέγχουν τη φόρτιση που εισέρχεται στους συσσωρευτές από τη ΦΒ συστοιχία
- Οι ρυθμιστές φόρτισης είναι ο «εγκέφαλος» του συστήματος και συντονίζουν τα κύρια στοιχεία οποιουδήποτε συστήματος εκτός δικτύου: ΦΒ συστοιχία, συσσωρευτές και φορτία
- Οι συνήθεις τάσεις στα συστήματα εκτός δικτύου είναι 12 V, 24 V και 48 V, οι οποίες είναι ίσες με την τάση των συσσωρευτών του συστήματος
- Οι δύο κύριοι τύποι ρυθμιστών φόρτισης είναι: PWM (διαμόρφωσης εύρους παλμών) και MPPT (ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος)
- Οι ρυθμιστές φόρτισης PWM μειώνουν την τάση από το ΦΒ πλαίσιο σε αυτήν του συσσωρευτή, με αποτέλεσμα τη μείωση της αποδοτικότητας
- Οι ρυθμιστές φόρτισης MPPT επιτρέπουν στα ΦΒ πλαίσια να λειτουργούν στην (υψηλότερη) βέλτιστη τάση τους υπό διαφορετικές συνθήκες φωτισμού
- Σε σύγκριση με τη λειτουργία PWM, οι ρυθμιστές φόρτισης MPPT μπορούν να βελτιώσουν την αποδοτικότητα έως και 30%, αλλά έχουν υψηλότερο κόστος

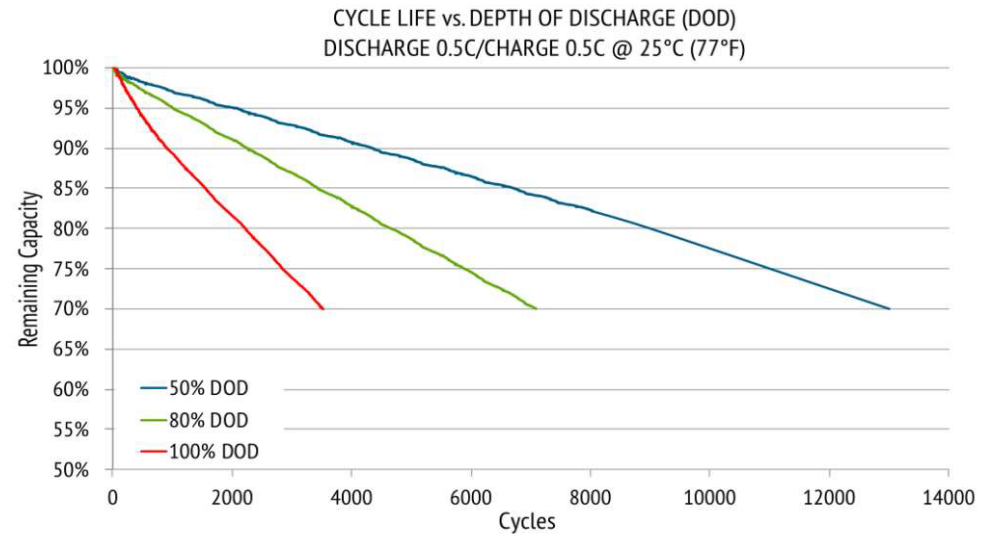
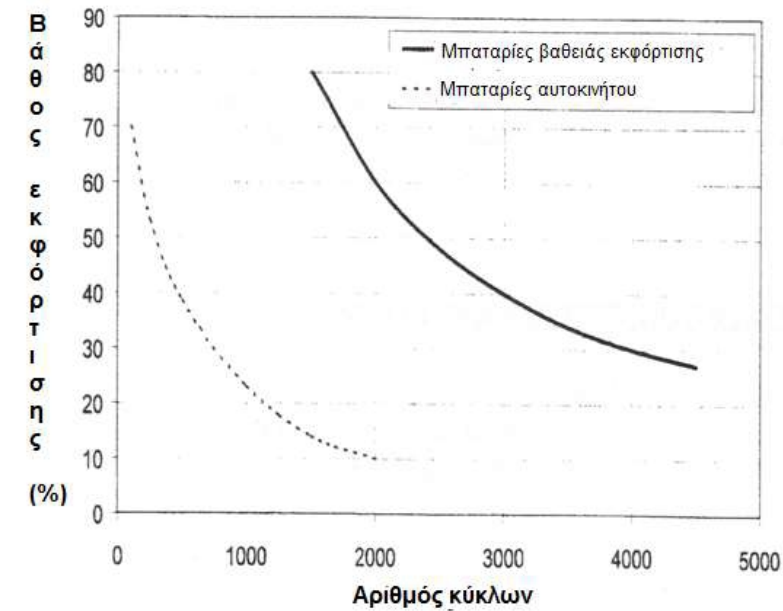
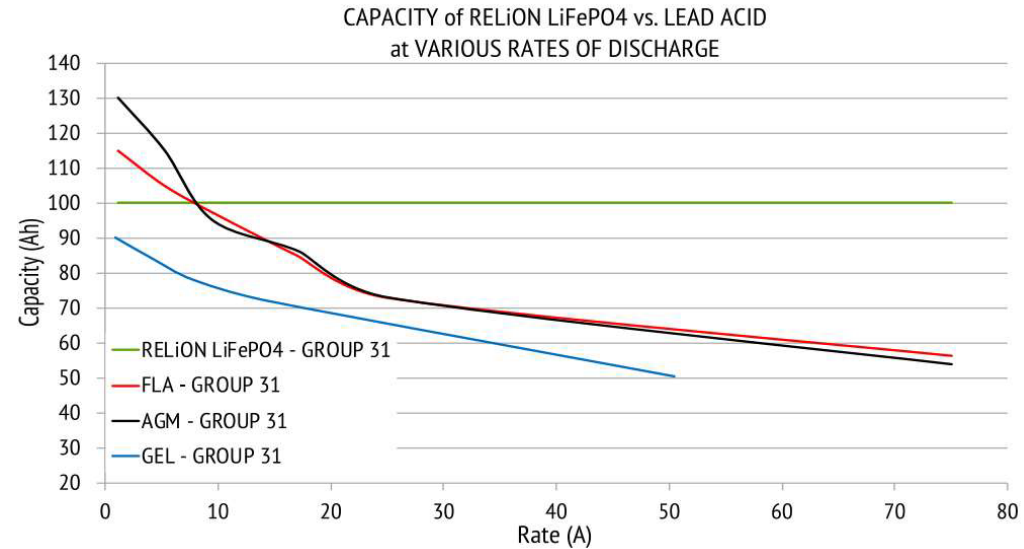
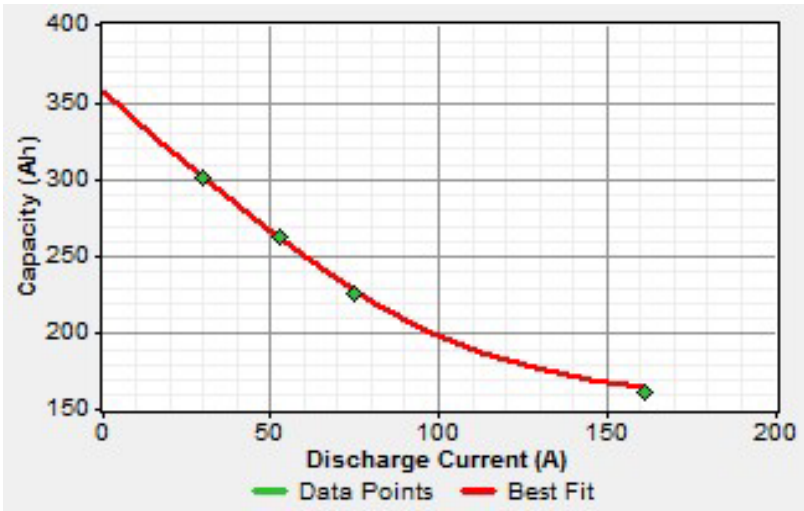
Batteries (συσσωρευτές)

- Οι συσσωρευτές αποθηκεύουν ενέργεια με πρακτικό και οικονομικό τρόπο και χρησιμοποιούνται κυρίως σε ΦΒ συστήματα εκτός δικτύου όταν η ΦΒ συστοιχία δεν μπορεί να προσφέρει όλη την απαιτούμενη ισχύ για τα φορτία σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή (συννεφιασμένος καιρός, νύχτα, ή σε μεγάλο αριθμό φορτίων)
- Λειτουργούν σε συνεχές ρεύμα (DC) που είναι η ίδια μορφή ρεύματος που παρέχεται από τις ΦΒ συστοιχίες, άρα μπορούν να φορτίζονται απευθείας από μια ΦΒ πηγή με ελάχιστες απώλειες
- Οι δύο κύριες παράμετροι των συσσωρευτών είναι η χωρητικότητά τους σε [Ah] και η τάση σε [V]
- Συνήθως, μεμονωμένοι συσσωρευτές δεν έχουν τις απαιτούμενες τιμές τάσης και χωρητικότητας που είναι απαραίτητες για ένα ολόκληρο ΦΒ σύστημα, οπότε πρέπει να συνδεθούν σε συστοιχία
- Τυπικές τάσεις για τις συστοιχίες συσσωρευτών είναι 12V, 24V ή 48V
- Η ονομαστική χωρητικότητα ενός συσσωρευτή εκφράζεται σε αμπερώρια (Ah) και είναι γενικά μεγαλύτερη από την πραγματική χωρητικότητα του συσσωρευτή
- Διάφοροι τύποι συσσωρευτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ΦΒ συστήματα εκτός δικτύου, με διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά και κόστος, όπως:



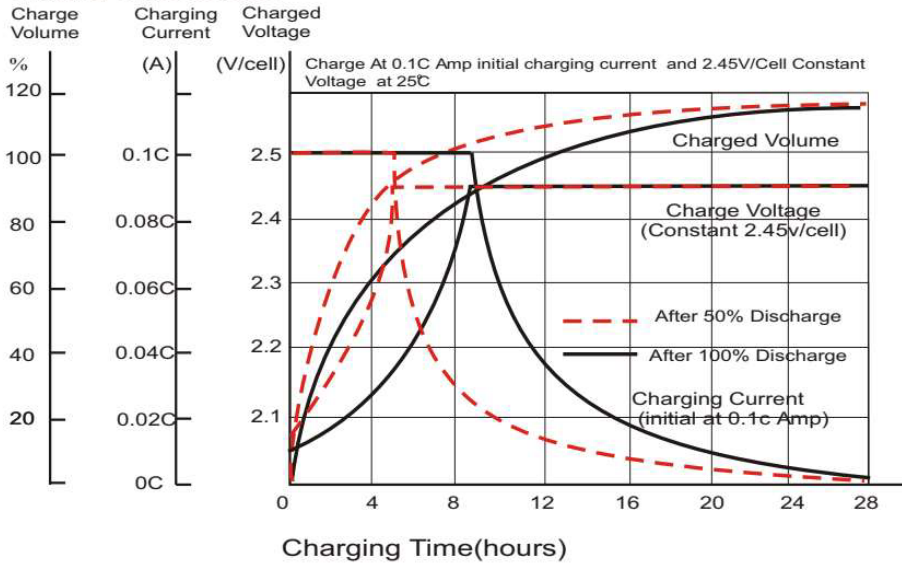
α) μολύβδου-οξέος (υγρού ηλεκτρολύτη ή ρυθμιζόμενοι με βαλβίδα) β) λιθίου

Pb acid VS LiFePO4 Batteries

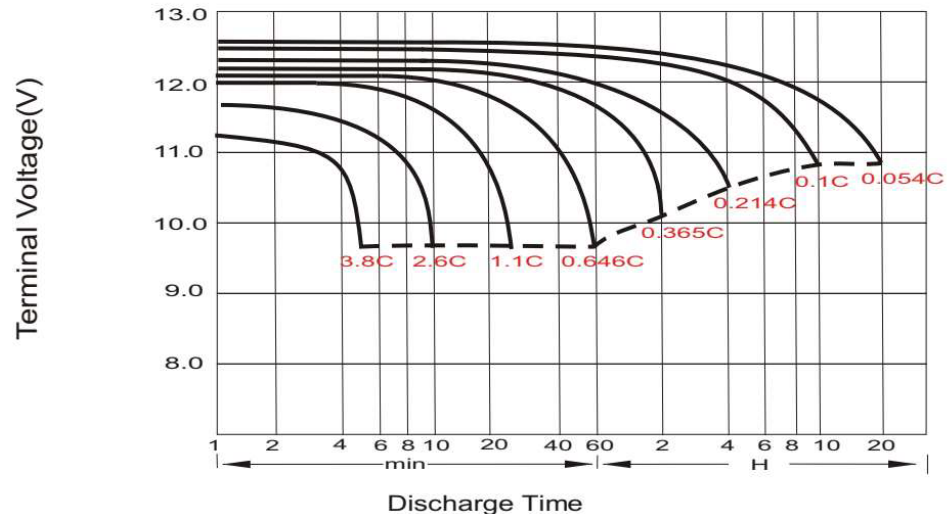


Pb acid VS LiFePo4 Batteries

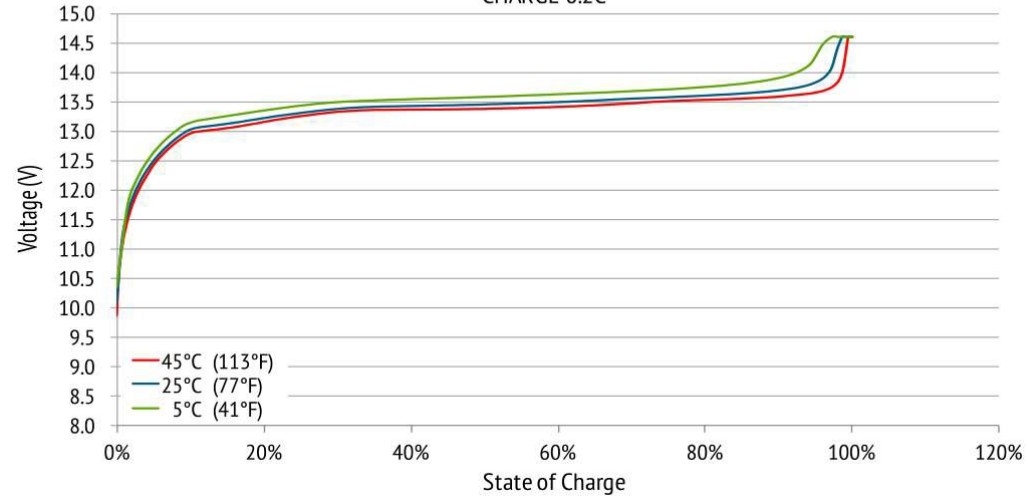
Charging Characteristics



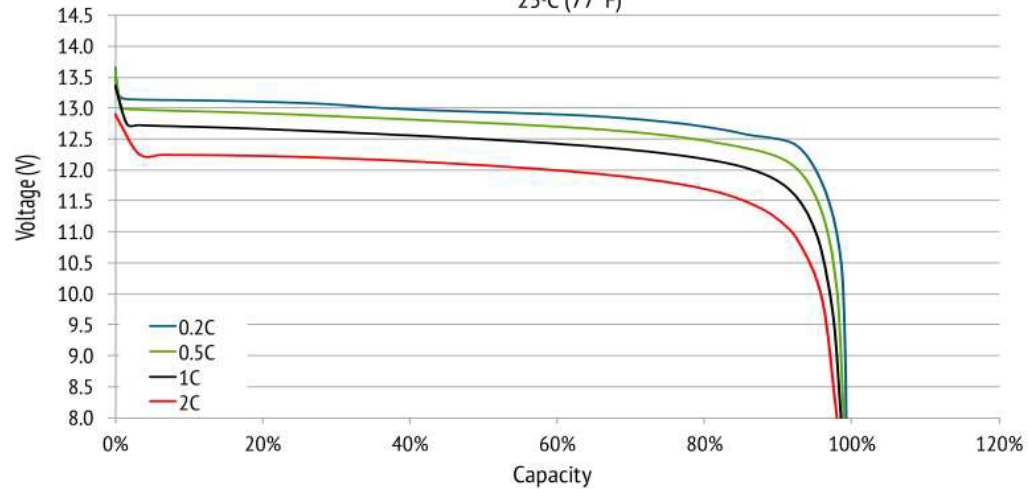
Temperature 25°C



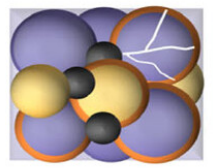
CHARGE VOLTAGE CHARACTERISTICS at VARIOUS TEMPERATURES CHARGE 0.2C



DISCHARGE VOLTAGE CHARACTERISTICS at VARIOUS RATES 25-C (77°F)

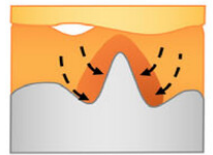


Thermal Stability of Solid-State Batteries



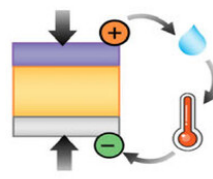
Cathode

- CAM degradation, gas evolution
- Cathode-SE interface
- Cathode architecture



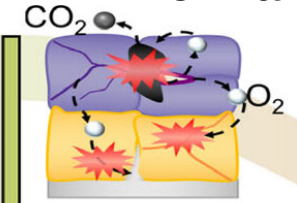
Anode

- Crosstalk
- Filament growth
- Anode-SE interface
- Surface roughness

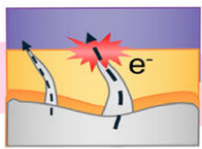


Operating condition

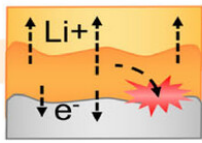
- Moisture effect
- Current density
- Pressure/temperature



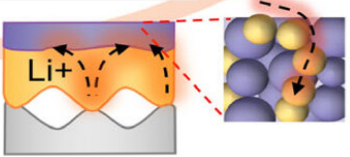
Reaction of released gases



Short circuit



Interphase behavior



Self-heat generation



Thermal instability



- Energy Yield (αποδοτικότητα)

$$Y_{pv} = \frac{E_{pv}}{P_p} \quad [\text{kWh/kWp}]$$

- Reference Yield (αποδοτικότητα αναφοράς): Λόγος ενεργειακής απολαβής στο επίπεδο του συλλέκτη προς πυκνότητα ισχύος αναφοράς (π.χ. GSTC = 1 kW/m²)

$$Y_{ref} = \frac{H_t}{G_o} \quad [\text{h}]$$

- Performance ratio (επίδοση)

$$PR = \frac{Y_{pv}}{Y_{ref}} \quad [\text{h}]$$

- Capacity factor (Συντελεστής χρησιμοποίησης ισχύος): Ο λόγος της καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται, στο υπό εξέταση χρονικό διάστημα, προς την ενέργεια που θα μπορούσε να έχει παραχθεί με συνεχή λειτουργία πλήρους ισχύος κατά τη διάρκεια του ίδιου διαστήματος

$$CF = \frac{Y}{T} = \frac{E_{pv}}{P_p \times T}$$

Single-axis photovoltaic tracking systems



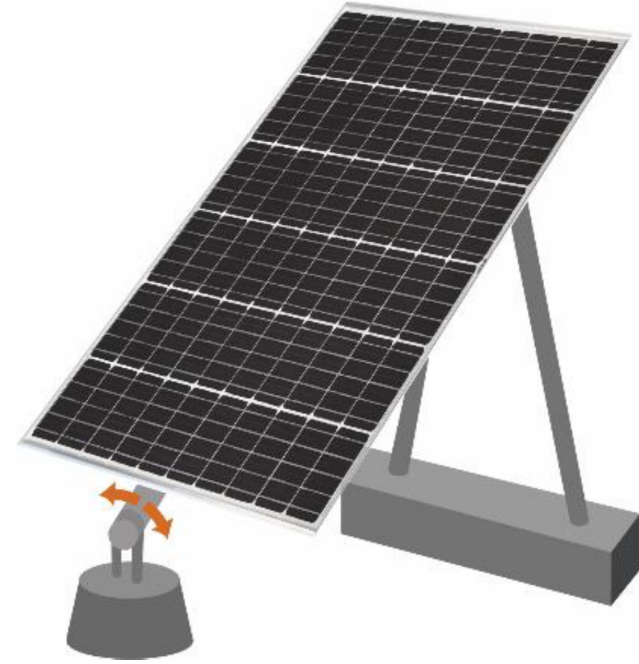
(a)

Horizontal Single-Axis Trackers
(HSAT)



(b)

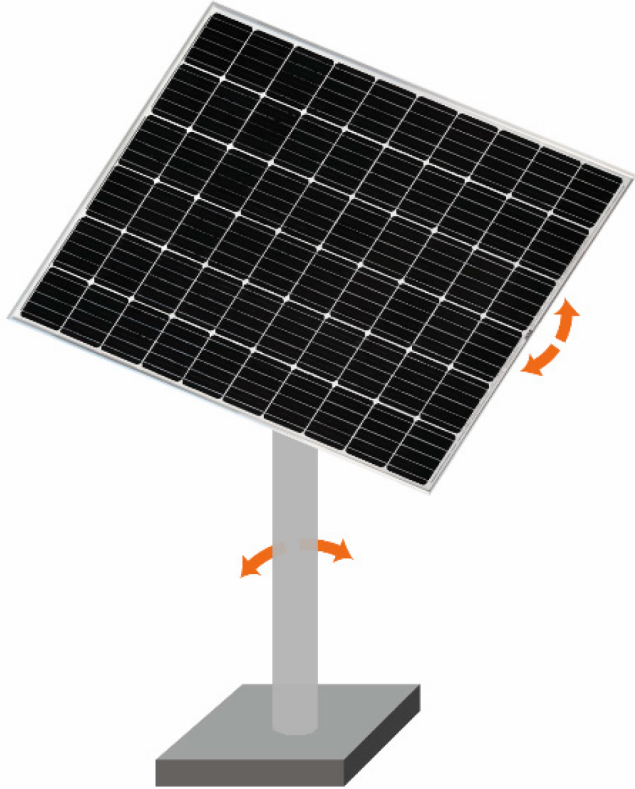
Vertical Single-Axis Trackers
(VSAT)



(c)

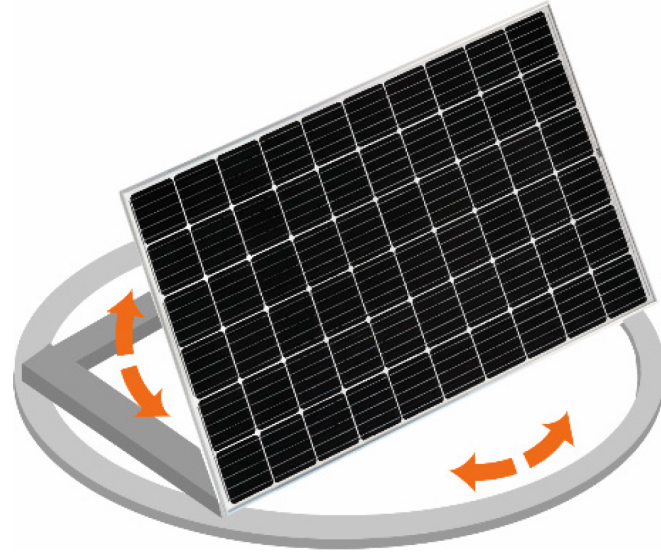
Tilted Single-Axis Trackers
(TSAT)

Dual-axis photovoltaic tracking systems



(a)

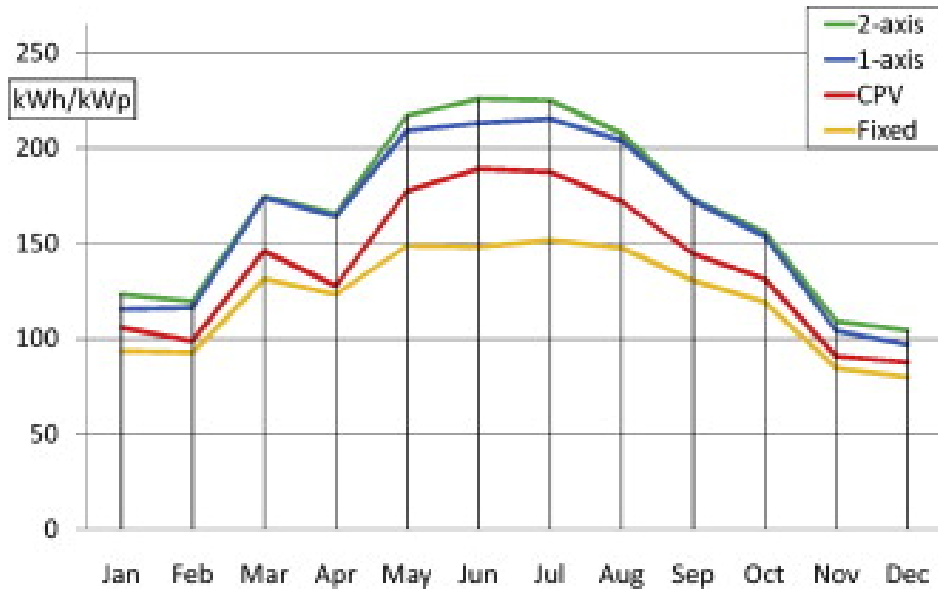
Tip-Tilt Dual-Axis Tracking (TTDAT)



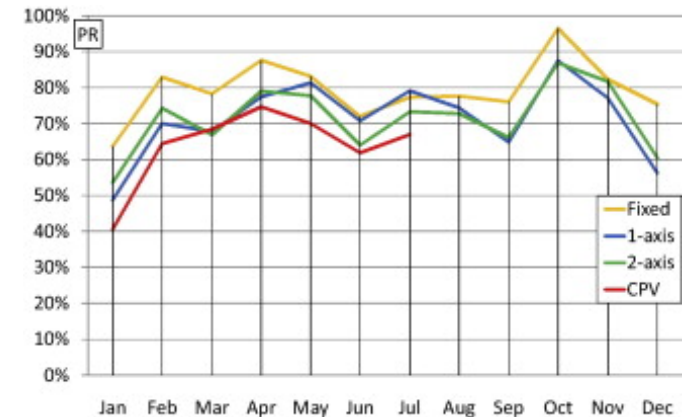
(b)

Azimuth-Altitude Dual-Axis Tracking (AADAT)

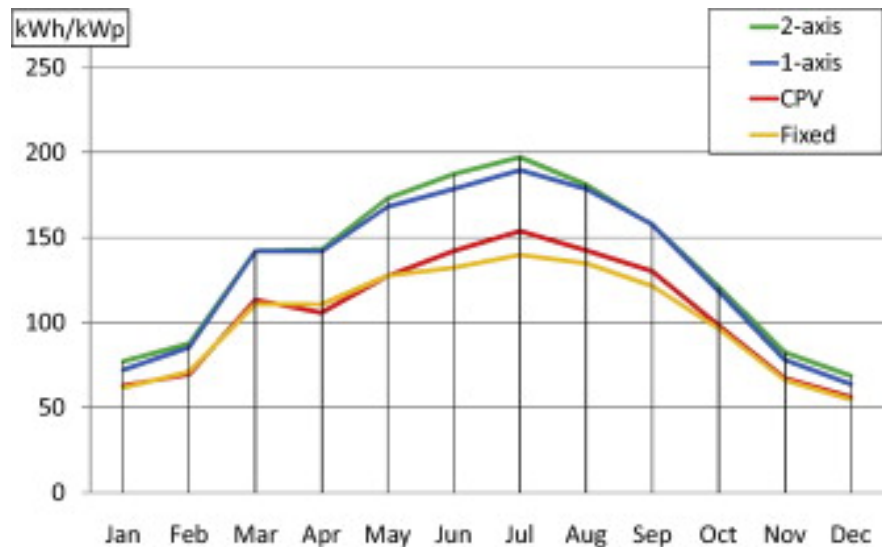
Comparison of tracking systems



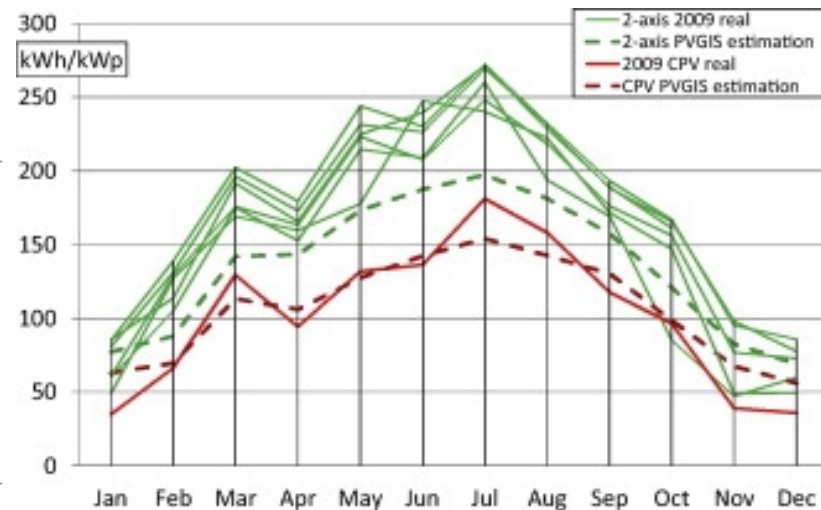
System	Energy production	Ratio	Ratio
Fixed	1452kWh/kWp	100.0%	87.5%
CPV	1659kWh/kWp	114.3%	100.0%
1-Axis	1939kWh/kWp	133.5%	116.8%
2-Axis	2001kWh/kWp	137.9%	120.6%



Comparison of tracking systems



	Energy production	Ratio	Ratio
Fixed	1228 kWh/kWp	100.0%	96.7%
CPV	1269 kWh/kWp	103.4%	100.0%
1-Axis	1574 kWh/kWp	128.2%	124.0%
2-Axis	1618 kWh/kWp	131.8%	127.5%





Μονοχρωματική δέσμη φωτός 1mW μήκους κύματος 638nm προσπίπτει σε ηλιακό κελί πυριτίου. Υπολογίστε:

α) το μήκος κύματος φωτός που μπορεί να σχηματίσει ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής στο κελί

β) τον αριθμό φωτονίων ανά μονάδα χρόνου που προσπίπτουν στο κελί

γ) την μέγιστη απόδοση μετατροπής της δέσμης φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια

Δίνονται: $E=hc/\lambda$, $E_{g_Si}=1.1\text{eV}$, $1\text{eV}=1.6\times 10^{-19}\text{J/eV}$, $c=3\times 10^8$, $h=6.625\times 10^{-34}\text{Js}$

α) $\lambda=hc/E_g$

β) $I=N_{ph} \times E_p$, $E_{ph}=hc/\lambda$

γ) $\eta_{max}=N_{ph} E_g/N_{ph} E_{ph}$

An application requires 300W under 28V voltage.
Calculate and design a PV panel consisting of solar cells with area 6cm^2 each.

Data: Max power point voltage $V_{\text{max}}=0.542\text{V}$, current density $J=190.5\text{A/m}^2$

The owner of a standalone home wants to install a 24V PV system to supply the following loads:

- External lighting: 4Wx23 5h/d
- Internal lighting: 6Wx13 2h/d
- TV: 110W 8h/d

Water pump: 55W ($I_{\max}=3.75A_{\text{DC}}$) 2h/d

- PC: 250W 1.5h/d

Fans: 40W ($I_{\max}=3A_{\text{DC}}$) 1h/d

- Microwave oven: 550W ($P_{\max}=1000W$) 0.5h/d