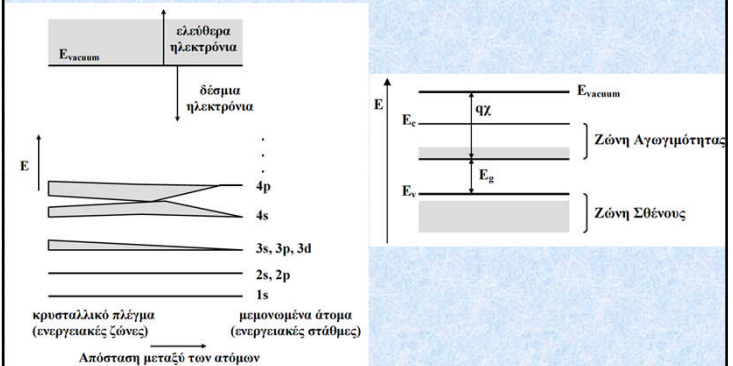


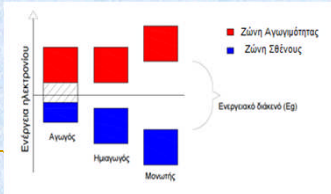
Ημιαγωγοί – ΦΒ φαινόμενο

Διάγραμμα ενεργειακής κατανομής ηλεκτρονίων σε μεμονωμένο άτομο και σε στερεό σώμα



Διάκριση υλικών ανάλογα με την ολική ή μερική πληρότητα της ενεργειακής ζώνης

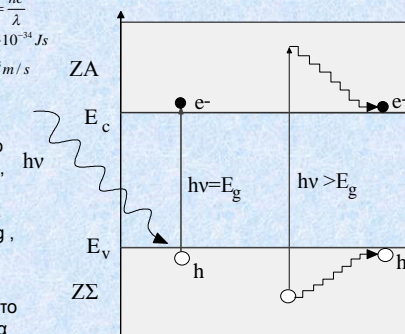
- Αγωγοί (μέταλλα) : Δεν υπάρχει ενεργειακό διάκενο
- Μονωτές : Μεγάλο ενεργειακό χάσμα
- Ημιαγωγοί : το ενεργειακό χάσμα είναι αρκετά μικρό ώστε ένα ηλεκτρόνιο να μπορεί να μεταβεί από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας υπο συνθήκες (υψηλής θερμοκρασίας, εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου, πρόσπτωση ακτινοβολίας σε αυτόν)
- Ενεργειακό Διάκενο : η ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου από τη ζώνη σθένους, στην ζώνη αγωγιμότητας, με ταυτόχρονη δημιουργία μιας οπής



Απορρόφηση φωτονίου από ημιαγωγικό υλικό – Ενεργειακές ζώνες Σθένους και Αγωγιμότητας

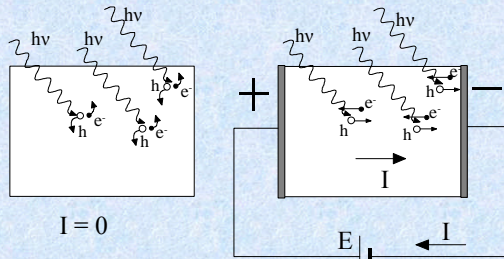
Η ενέργεια ενός φωτονίου $E = h \cdot \nu = \frac{hc}{\lambda}$
 όπου h : η σταθερά του Planck $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
 Και c η ταχύτητα του φωτός : $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

- Αν το ενεργειακό διάκενο είναι σε μονάδες ηλεκτρονιοβόλτ (eV) και το μήκος κύματος σε μικρόμετρα (μm), τότε το μέγιστο χρησιμοποιήσιμο μήκος κύματος ακτινοβολίας σε ένα ημιαγωγό, ενεργειακού διακένου E_g , θα είναι : $\lambda_g = \frac{1,238}{E_g}$
- Η ροή των φωτονίων (Φ), δηλαδή το πλήθος των φωτονίων ανά μονάδα επιφανείας και χρόνου, θα είναι :



$$\Phi = \frac{H}{h \cdot \nu} = \frac{H \cdot \lambda}{h \cdot c}$$

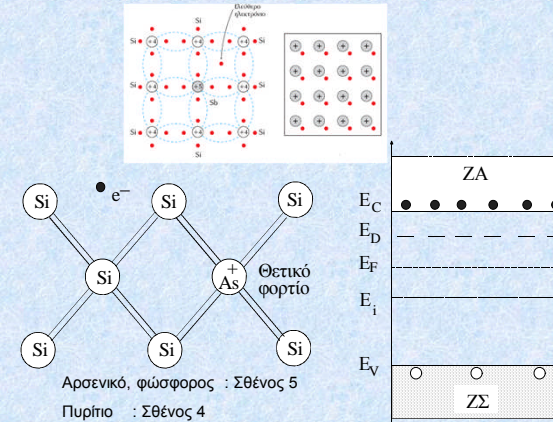
Απορρόφηση φωτονίων από ημιαγωγικό υλικό. Αύξηση των ηλεκτρικών φορέων, αλλά $I = 0$



$I = 0$

Παραγωγή ηλ. ρεύματος με κατανάλωση της ενέργειας του συσσωρευτή

Ημιαγωγός πρόσμειξης τύπου n (Πρόσμειξη δοτών)

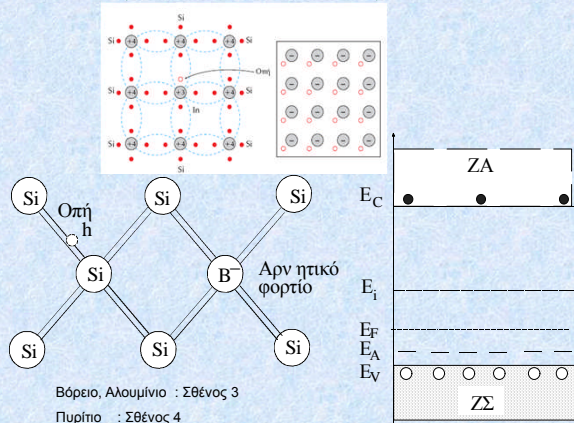


Αρσενικό, φώσφορος : Σθένος 5
Πυρίτιο : Σθένος 4

(α)

(β)

Ημιαγωγός πρόσμειξης τύπου p (Πρόσμειξη αποδεκτών)

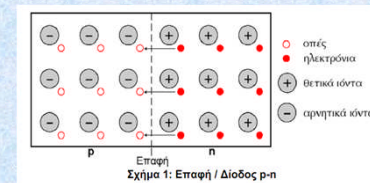


Βόρειο, Αλουμίνιο : Σθένος 3
Πυρίτιο : Σθένος 4

(α)

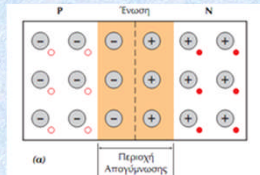
(β)

Επαφή PN



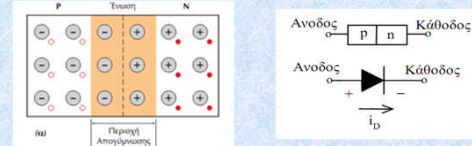
- Δίοδος : Ημιαγωγοί (Si, Ge με 4e⁻ σθένους) με δύο περιοχές
- Περιοχή P : εμπλουτισμένη με άτομα με τρία ηλεκτρόνια σθένους και έχει φορείς πλειονότητας οπές
- Περιοχή N : εμπλουτισμένη με πεντασθενές στοιχείο και έχει φορείς πλειονότητας ηλεκτρόνια.

Επαφή P-N



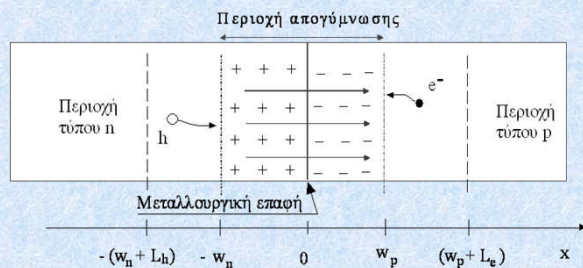
- Μετακίνηση ηλεκτρονίων από τον ημιαγωγό τύπου N προς τον ημιαγωγό τύπου P
- Μετακίνηση οπών από τον ημιαγωγό P προς στον N
- Αλληλεξουδετέρωση των φορέων και η δημιουργία εκατέρωθεν της επαφής περιοχής απογύμνωσης
- Φράγμα δυναμικού : Το ελάχιστο δυναμικό V_0 που πρέπει να εφαρμοστεί εξωτερικά στην δίοδο για να υπερπηδηθεί η ζώνη απογύμνωσης

Πόλωση της Διόδου PN



- Ορθή πόλωση (forward bias) : το δυναμικό στην περιοχή P είναι μεγαλύτερο από αυτό της N δηλαδή, $V_P > V_N$
 - Η εξωτερική εφαρμοζόμενη τάση όσο αυξάνει άρει τον φραγμό δυναμικού, μειώνει και μηδενίζει το εύρος της περιοχής απογύμνωσης (όταν $V = V_0$ τουλάχιστον) και επιτρέπει την ροή φορτίων.
- Ανάστροφη πόλωση (reverse bias) : το δυναμικό στην περιοχή P είναι μικρότερο από αυτό της N, δηλαδή $V_P < V_N$.
 - Η εξωτερική τάση που εφαρμόζεται αθροίζεται με το δυναμικό επαφής και κατά συνέπεια αυξάνεται ο φραγμός δυναμικού όπως επίσης και το εύρος της περιοχής απογύμνωσης

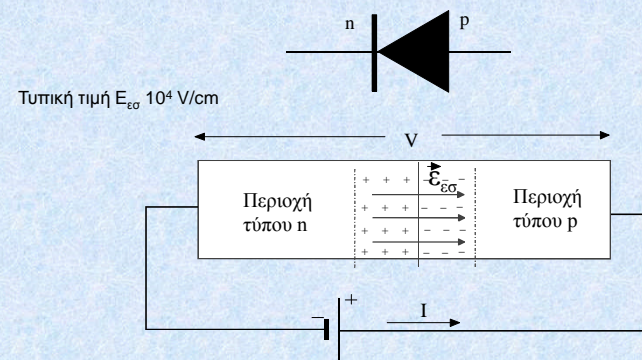
«Συνένωση» ημιαγωγών τύπου n και p - Δίοδος. Δημιουργία εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου



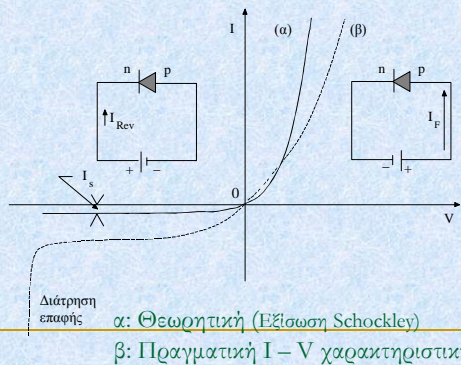
$w = w_n + w_p \sim 0,1 - 10 \mu\text{m}$ για το πυρίτιο
L μήκη Debye. Κίνηση χωρίς επανασύνδεση

ΔΙΟΔΟΣ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ

Ρεύμα περνά κατά τη μία φορά, όχι κατά την αντίθετη

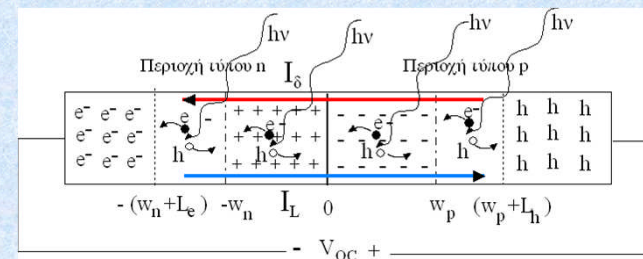


Χαρακτηριστική καμπύλη Ρεύματος (I) – Τάσης (V) διόδου - Εξίσωση Shockley



ΦΩΤΟΡΕΥΜΑ

Τα απορροφούμενα φωτόνια δημιουργούν ευκίνητους φορείς (φωτόνιο → ηλεκτρόνιο+οπή). Το εσωτερικό ηλ. πεδίο τα ωθεί στις περιοχές με ομοιδή φορτία, δημιουργώντας το φωτόρευμα I_L . Τα συσσωρευμένα φορτία στα άκρα δίδουν το ρεύμα διόδου, αντίθετο του I_L .



ΦΩΤΟΡΕΥΜΑ

Η δημιουργία φωτορεύματος

- Όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δέχεται μια κατάλληλη ακτινοβολία, διεγείρεται παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα, το φωτόρευμα I_F , που η τιμή του θα είναι ανάλογη προς τα φωτόνια που απορροφά το στοιχείο
- Για την πυκνότητα του φωτορεύματος, ισχύει ικανοποιητικά η σχέση :

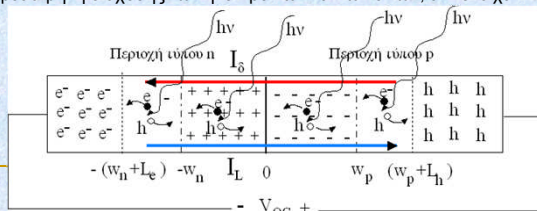
$$I_0 = eg(L_n + L_p)$$

Όπου:

e :το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο,

g :ο ρυθμός δημιουργίας ζευγών φορέων

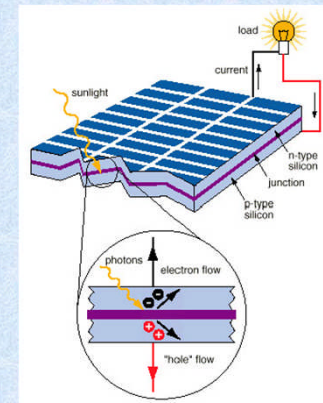
L_n, L_p :τα μέσα μήκη διάχυσης των ηλεκτρονίων και των οπών, αντίστοιχα



ΦΒ φαινόμενο

Αποτέλεσμα

- Φωτοδημιουργίας «ελεύθερων» φορέων (φωτοαγωγιμότητα)
- Δημιουργία εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή επαφής δύο ημιαγωγών



Φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια

Φωτοβολταϊκό φαινόμενο: Μετατροπή ΗΜ ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια

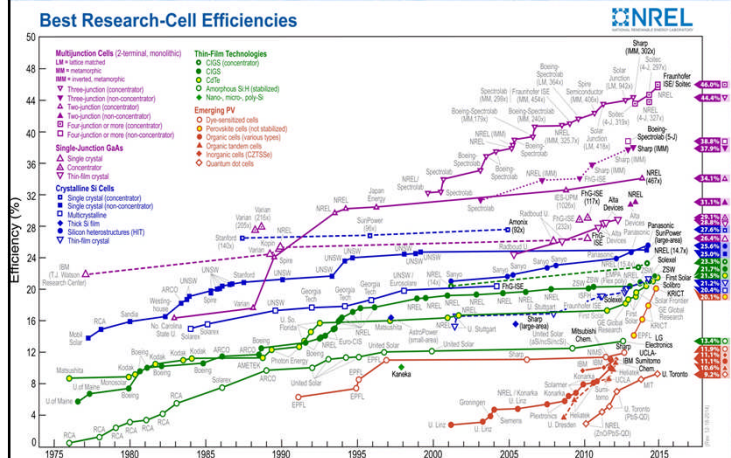
Το φαινόμενο εμφανίζεται

A) Σε ημιαγωγούς: Επαφή ημιαγωγών + φως

B) Σε οργανικά υλικά: οργαν. ή πολυμερικά διαλ. + φως

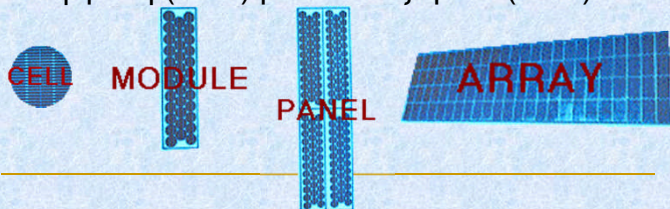
[Φωτοσύνθεση → Ηλεκτρολυτικά διαλύματα (Becquerel, 1836) → Ηλεκτροχημικό στοιχείο (Calvin, 0,01%, 1961 - Graetzel, 10%, 1991) → Πολυμερικά ΦΒ (~4%, 2005)]

Φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια



Φωτοβολταϊκά – Χαρακτηριστικά ημιαγωγών

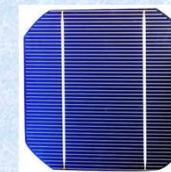
- Τα κυριότερα ημιαγωγίμα υλικά είναι το Γερμάνιο (Ge), το Πυρίτιο (Si) και το Σελήνιο (Se).
- Το πυρίτιο βρίσκεται σε μεγαλύτερη αφθονία στη φύση (25%) μετά το Οξυγόνο (50%).



Υλικά κατασκευής Φ/β διατάξεων

Ηλιακά στοιχεία πυριτίου

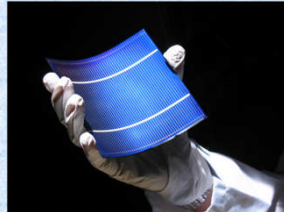
- Το πυρίτιο είναι ένας ημιαγωγός με άμεσο ενεργειακό διάκενο 1,1eV
- Η θεωρητική απόδοση των ηλιακών στοιχείων πυριτίου μπορεί να φθάσει μέχρι 26,00% για συνθήκες AM1
- Πειραματικά η μεγαλύτερη απόδοση ηλιακού στοιχείου πυριτίου σε συνθήκες AM1 μετρήθηκε εργαστηριακά 24%, με απώλειες ανάκλασης 3% και συντελεστή πλήρωσης 0,77
- Στις πρακτικές εφαρμογές τα ηλιακά στοιχεία μονοκρυσταλλικού ή πολυκρυσταλλικού πυριτίου μεγάλης επιφάνειας έχουν απόδοση περίπου 14-16% ή λίγο μεγαλύτερη



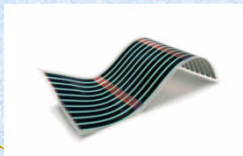
Τύποι ΦΒ στοιχείων



Κρυσταλλικό Πυρίτιο



Λεπτό εύκαμπτο ΦΒ στοιχείο Πολικρυσταλλικού Πυριτίου



ΦΒ στοιχείο λεπτού υμενίου

Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών

ΤΥΠΟΣ	'Λεπτού υμενίου' ή Thin Film	Πολικρυσταλλικά	Μονοκρυσταλλικά
Εμφάνιση			
Απόδοση	a-Si: 4,2-6,6% μ-Si: 8,1-8,5% CIS-CIGS: 6-11% CdTe: 6-11,1%	11-14,8%	11-19,3%
Απαιτούμενη επιφάνεια ανά kWp	9-25 m ²	7-9 m ²	5,5-9 m ²
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (kWh ανά kWp) <small>(μίσση πηγή για Ελλάδα και για ένα τυπικό σύστημα με νότιο προσανατολισμό και κατάλληλη κλίση)</small>	1.300-1.450	1.300	1.300
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (kWh ανά m ²) <small>(μίσση πηγή για Ελλάδα και για ένα τυπικό σύστημα με νότιο προσανατολισμό και κατάλληλη κλίση)</small>	50-160	145-185	145-235

Τύποι ΦΒ στοιχείων

Ισχύς (Watt)	Επιφάνεια (τ.μ.)	Επιφάνεια 1 kW (τ.μ.)	Βάρος (κιλά)	Απόδοση
120 (a-Si)	1.90	19.0	27.0	6.3%
180 (c-Si)	1.32	7.3	14.5	13.6%

Αξιολόγηση των ημιαγωγών για ηλιακές Φ/Β εφαρμογές

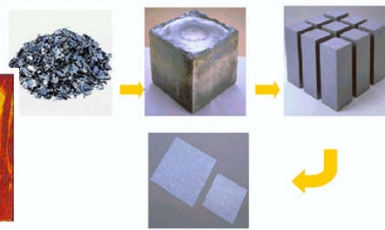
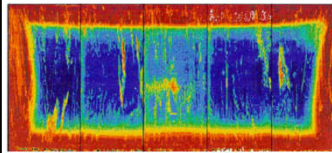
ΥΛΙΚΟ	ΤΥΠΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	Μέγιστη απόδ. σε ακτινοβ. AM1
n-Ga _{0,3} Al _{0,7} As/p-GaAs	Ομοιόσταση - ετεροδομή	24%
GaAs	Ομοιόσταση	22%
n-AlAs/p-GaAs	Ετεροόσταση	18,5
Si (μονοκρυσταλλικό)	Ομοιόσταση	18%
Si (πολυκρυσταλλικό)	Ομοιόσταση	16%
Au/Si ₃ N ₄ /p-Si	Στάκτο	10%
p-Cu ₂ S/n-CdS	Ετεροόσταση	10%

Παραγωγή ΦΒ στοιχείων

- 1. Κατασκευή των δισκίων πυριτίου (wafers)
- Καλούπτι (crucible)
 - Coating : ψεκάζεται με μείγμα από νιτρίδιο του πυριτίου και θερμαίνεται ώστε το μείγμα να σταθεροποιηθεί στην εσωτερική του επιφάνεια
- Τοποθέτηση του πυριτίου στο καλούπτι
- Doping με βόριο (δημιουργία ημιαγωγού τύπου p - πυρίτιο 4e στην εξωτερική στοιβάδα, βόριο 3e στην εξωτερική)
- Τοποθέτηση σε φούρνους => πλίνθωμα πολικρυσταλλικού πυριτίου (ingot)

Παραγωγή ΦΒ στοιχείων

- Αφαίρεση crucible και καθαρισμός
- Δημιουργία bricks
- Ποιοτικός έλεγχος bricks

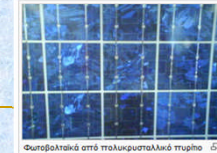


Bricks κόβονται σε πολύ λεπτά δισκία πυριτίου (wafers)

Παραγωγή ΦΒ στοιχείων

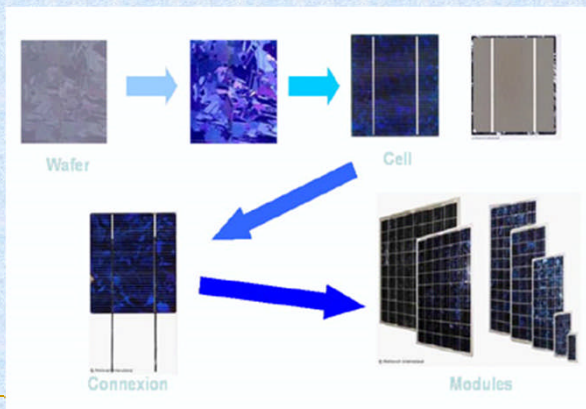
2. Κατασκευή solar cells

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

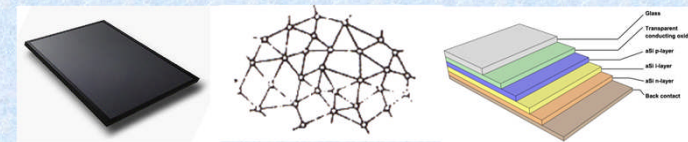


Φωτοβολταϊκά από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο

Παραγωγή ΦΒ στοιχείων



Φωτοβολταϊκά στοιχείο Άμορφου Πυριτίου



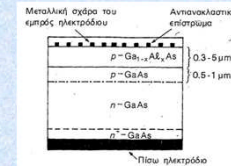
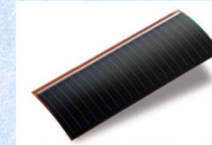
- Δεν έχει κρυσταλλική μορφή
- Πολύ οικονομικότερο
- Δυσκολότερη μελέτη λόγω της έλλειψης κρυσταλλικής δομής (τα άτομα είναι τοποθετημένα σε διαφορετικές αποστάσεις, διάφορες τιμές γωνίας Si-Si)

Φωτοβολταϊκά στοιχεία Θειούχου Καδμίου

- Το Θειούχο κάδμιο (CdS) είναι ένας ημιαγωγός με άμεσο και σχετικά μεγάλο διάκενο ($E_g = 2,45 \text{ eV}$), που έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε πολλές οπτοηλεκτρονικές εφαρμογές, όπως για την κατασκευή φωτοκυττάρων, ενισχυτών φωτός, φωσφοριτών ανιχνευτών ακτινοβολίας κ.λ.π
- Το CdS συμπεριφέρεται συνήθως σαν ημιαγωγός τύπου n. Δηλαδή οι φορείς πλειονότητας είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, χωρίς να απαιτείται η προσθήκη ξένων ατόμων-δοτών
- Η πυκνότητα του παραγόμενου φωτορεύματος στα ηλιακά στοιχεία CdS, είναι μικρή, η μισή περίπου σε σύγκριση με τα ηλιακά στοιχεία πυριτίου
- Τα ηλιακά στοιχεία CdS έχουν αρκετά ικανοποιητική απόδοση, περίπου 10%
- Δεν εξασφαλίζουν πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής (πάνω από 20 χρόνια) που αναμένεται για τα ηλιακά στοιχεία πυριτίου



Ηλιακά Στοιχεία Αρσενικού Γαλλίου



- Το αρσενικού γαλλίου (GaAs) είναι ένας ημιαγωγός με ενεργειακό διάκενο 1,43 eV και με θεωρητική απόδοση περίπου 25%
- Το σχετικά μεγάλο ενεργειακό διάκενο του GaAs έχει σαν αποτέλεσμα την καλή του συμπεριφορά στις κάπως υψηλές θερμοκρασίες
- Τις μεγαλύτερες αποδόσεις, από τα ηλιακά στοιχεία GaAs, έχουν δώσει τα στοιχεία ετεροενώσεων με τα ημιαγωγά κράματα του συστήματος Ga_{1-x}Al_xAs' όπου το x παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1
- Σε πειραματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία της μορφής αυτής μετρήθηκαν αποδόσεις περίπου 24% που είναι πολύ κοντά στο θεωρητικό τους μέγιστο (26-27%)

Ισχυρή σύζευξη μεταξύ των διεγέρσεων των ηλεκτρονίων και την τοπική μορφή της αλυσίδας του πολυμερούς (πολαρόνια, διπολαρόνια, εξιτόνια)

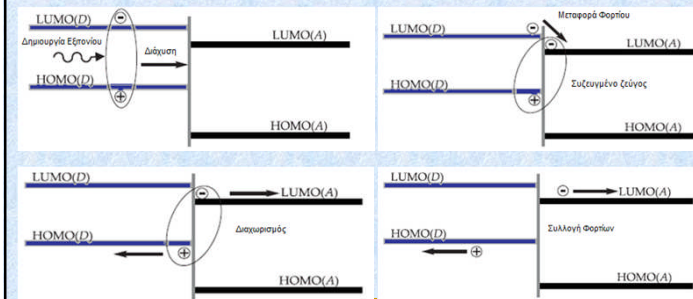


Δομή Οργανικού Φωτοβολταϊκού Κυττάρου



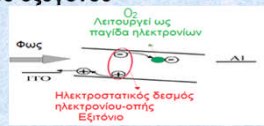
Οργανικά Φωτοβολταϊκά

Δομής διεσπαρμένης ετεροεπαφής των συζυγών πολυμερών

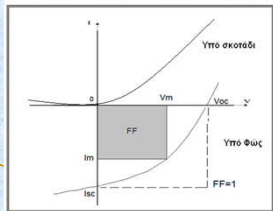


Οργανικά Φωτοβολταικά

- ❖ Ο ρόλος του μορίου του οξυγόνου



- ❖ Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά



$$FF = \frac{(IV)_{\max}}{I_{sc} V_{oc}} = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}}$$

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{I_{\max} \cdot V_{\max}}{E \cdot S} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{E \cdot S}$$

$$J = \frac{I}{Area}$$

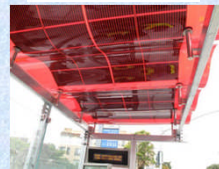
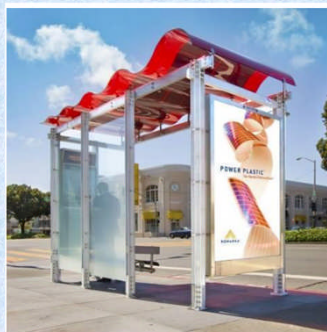
Οργανικά Φωτοβολταικά

→ Είναι ελαφριά



Οργανικά Φωτοβολταικά

→ Είναι εύκαμπτα



Οργανικά Φωτοβολταικά

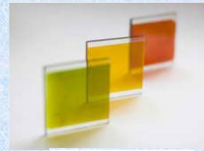
→ Δεν εξαρτώνται σημαντικά από την γωνία έκθεσης στον ήλιο



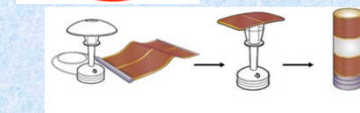
Οργανικά Φωτοβολταικά

→ Διαφανή

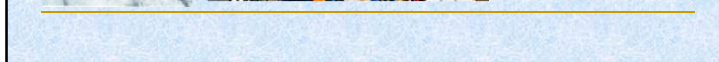
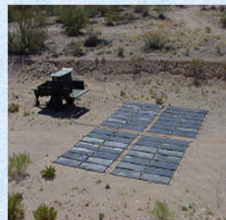
→ Μπορούν να βγουν σε διάφορα χρώματα



More OPVs applications



Περισσότερες Εφαρμογές Οργανικών ΦΒ

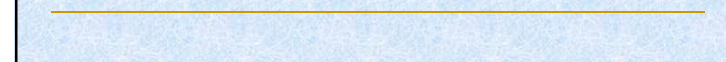


The Art of the Possible

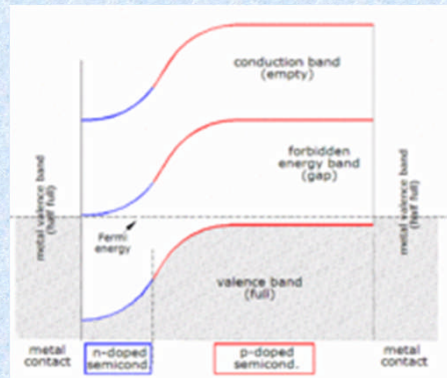
Where *power plastic* is at work today



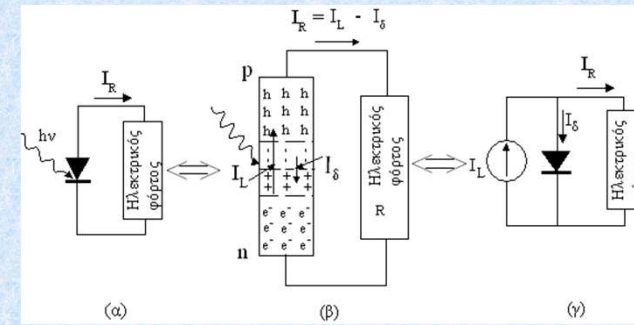
- | | | | |
|---|-------------------|---|-------------------|
| 1 | carports | 5 | windows + doors |
| 2 | curtain walls | 6 | transit shelters |
| 3 | security railings | 7 | umbrellas + tents |
| 4 | shade structures | 8 | canopies |



ΦΒ φαινόμενο

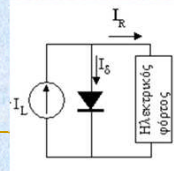


Τυπικό ηλεκτρικό κύκλωμα ΦΒ στοιχείου



Ηλεκτρική χαρακτηριστικά Φ/Β στοιχείων

- Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το Φ/Β αποτελεί μια πηγή ρεύματος που ελέγχεται από μία διόδο
 - Σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος, θα αποκατασταθεί μια ισορροπία
 - Όταν η τάση, που θα αναπτυχθεί ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, θα προκαλεί ένα αντίθετο ρεύμα που θα αντισταθμίζει το φωτόρευμα



Ηλεκτρική χαρακτηριστικά Φ/Β στοιχείων

- Σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος δημιουργείται τάση ανάμεσα στις 2 όψεις του στοιχείου που να δημιουργεί ρεύμα που αντισταθμίζει το φωτόρευμα:

$$I_{\phi} = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{\gamma k T}\right) - 1 \right]$$

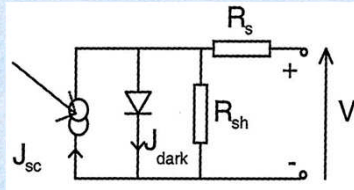
$$V_{oc} = \frac{\gamma k T}{e} \ln\left(\frac{I_{\phi}}{I_0} - 1\right) \quad V_{oc} = \frac{\gamma k T}{e} \ln \frac{I_{\phi}}{I_0}$$

- Σε συνθήκες βραχυκύκλωσης το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι: $I_{sc} = I_{\phi}$
- Σε οποιαδήποτε άλλη κατάσταση το ρεύμα είναι:

$$I_L = I_{\phi} - I_0 \left[\exp\left(\frac{e I_L R_L}{\gamma k T}\right) - 1 \right]$$

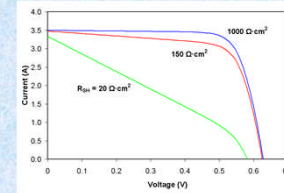
Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά Φ/Β στοιχείων

- ❖ Αναπόφευκτες αντιστάσεις παρεμβάλλονται μέσα στον ημιαγωγό και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια (series resistance R_s).
- ❖ Διαρροές ρεύματος λόγω κατασκευαστικών ελαττωμάτων (shunt resistance R_{sh})
- ❖ Αύξηση της θερμοκρασίας → μείωση V_{oc} και FF

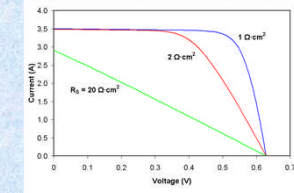


Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά Φ/Β στοιχείων

R_{sh} : (shunt resistance)

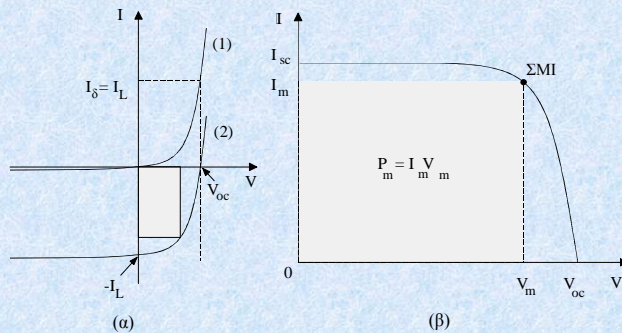


R_s : (series resistance)

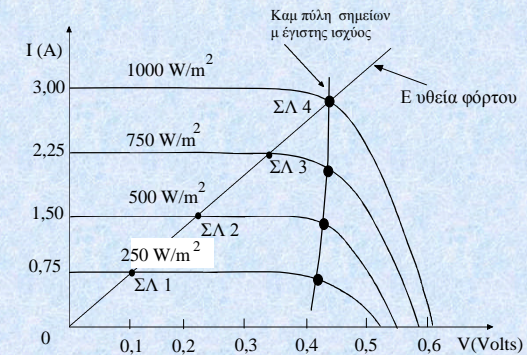


- ❖ R_{sh} : (shunt resistance)
 - ❖ Διαρροή ρεύματος μεταξύ των άκρων της επαφής p-n
 - ❖ Κυμαίνεται μεταξύ 500Ω και 1000Ω
 - ❖ Ελάττωση ρεύματος όταν ελαττωθεί η R_{sh}
- ❖ R_s : (series resistance)
 - ❖ Αντίσταση που παρουσιάζει η επαφή κατά τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος δια μέσω της διόδου
 - ❖ Συνισταμένη αντιστάσεων των σημείων πρόσφυσης των ηλεκτροδίων της επαφής καθώς και κατά μήκος των μεταλλικών κλάδων τους
 - ❖ Κυμαίνεται μεταξύ 0.3Ω και 2Ω
 - ❖ Ελάττωση ρεύματος όταν αυξηθεί η R_s

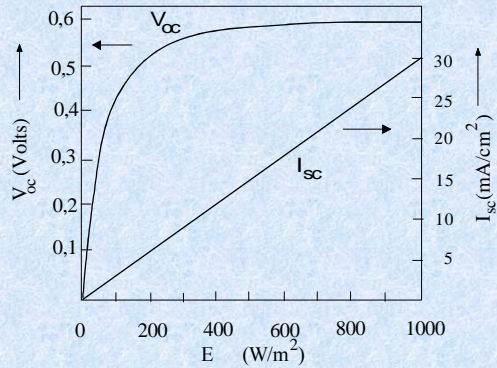
Χαρακτηριστική καμπύλη ΦΒ στοιχείου



Σημεία Μέγιστης ισχύος & Σημεία Λειτουργίας



Εξάρτηση της V_{oc} & του I_{sc} από την πυκνότητα ισχύος της ΗΜ ακτινοβολίας



Απόδοση και Παράγων Πλήρωσης ΦΒ στοιχείου

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{\Phi B}}{E \cdot S} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{E \cdot S}$$

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

Πρότυπες συνθήκες

Κανονικές Συνθήκες

(Standard Test Conditions, STC)

(Nominal Cell Temperature Conditions, NOCT)

$E = 1000 \text{ Wm}^{-2}$

$E = 800 \text{ Wm}^{-2}$

Κάθετη πρόσπτωση

Κάθετη πρόσπτωση

Φάσμα: AM1,5

Φάσμα: AM1,5

Θερμοκρασία κυψελίδας: $\theta_c = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Θερμοκρασία κυψελίδας: $\theta_c = 45 \text{ }^\circ\text{C}$

Παράδειγμα 1

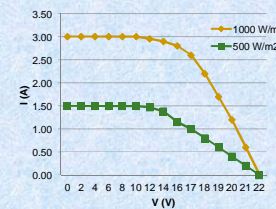
■ ΦΒ πλαίσιο με εμβαδόν $0,45\text{m}^2$

1 kW/m ²			0,5 kW/m ²		
V(V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	V(V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)
0,0	3,00	1,50	16,0	2,80	1,15
2,0	3,00	1,50	17,0	2,60	1,00
4,0	3,00	1,50	18,0	2,20	0,80
6,0	3,00	1,50	19,0	1,70	0,60
8,0	3,00	1,50	20,0	1,20	0,40
10,0	3,00	1,50	21,0	0,60	0,20
12,0	2,95	1,47	22,0	0,00	0,00
14,0	2,90	1,38			

- Να σχεδιάσετε τις καμπύλες I-V, P-V
- Να βρείτε τα I_m , V_m , P_m , I_{sc} , V_{oc} .
- Να υπολογίσετε τον FF, και την απόδοση του πλαισίου

Παράδειγμα 1

1 kW/m ²			0,5 kW/m ²		
V(V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	V(V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)
0,0	3,00	1,50	16,0	2,80	1,15
2,0	3,00	1,50	17,0	2,60	1,00
4,0	3,00	1,50	18,0	2,20	0,80
6,0	3,00	1,50	19,0	1,70	0,60
8,0	3,00	1,50	20,0	1,20	0,40
10,0	3,00	1,50	21,0	0,60	0,20
12,0	2,95	1,47	22,0	0,00	0,00
14,0	2,90	1,38			

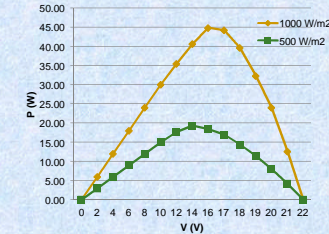


$$I_{1,sc} = 3 \text{ A} \quad I_{2,sc} = 1,5 \text{ A}$$

$$V_{1,oc} = 22 \text{ V} \quad V_{2,oc} = 22 \text{ V}$$

$$FF_1 = 0,68 \quad FF_2 = 0,59$$

$$n_1 = 10,0\% \quad n_2 = 8,6\%$$



$$I_{1,m} = 2,8 \text{ A} \quad I_{2,sc} = 1,38 \text{ A}$$

$$V_{1,m} = 16 \text{ V} \quad V_{2,m} = 14 \text{ V}$$

$$P_{1,m} = 44,8 \text{ W} \quad P_{2,m} = 19,32 \text{ W}$$

Παράδειγμα 2

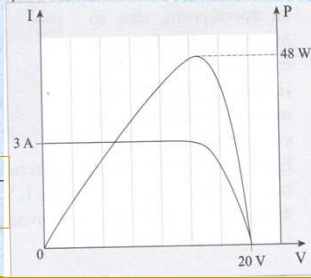
- ΦΒ πλαίσιο με διαστάσεις 50cm x 100 cm
- Πυρανόμετρο με $\epsilon_0 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ V/W} \cdot \text{m}^{-2}$ έδειξε 4mV
- Να υπολογιστούν FF, η

$$FF = \frac{P_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}} = \frac{48 \text{ W}}{3 \text{ A} \cdot 20 \text{ V}} = 0.8$$

$$n = \frac{P_m}{E \cdot S} = \frac{P_m}{\frac{V_{\text{πυρ}}}{\epsilon_0} \cdot S}$$

$$n = \frac{48 \text{ W}}{\frac{4 \cdot 10^{-3} \text{ V}}{5 \cdot 10^{-6} \text{ V/W} \cdot \text{m}^{-2}} \cdot 0.5 \cdot 1 \text{ m}^2}$$

$$n = \frac{48 \text{ W}}{400 \text{ W}} = 0.12 = 12 \%$$

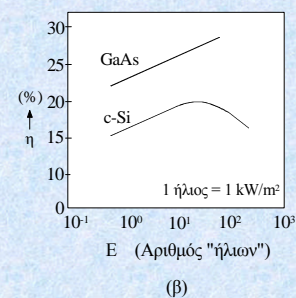
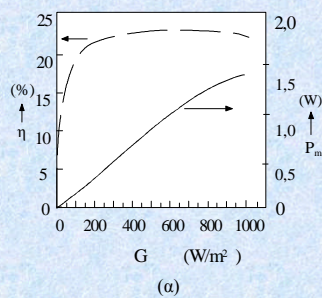


Παράδειγμα 3

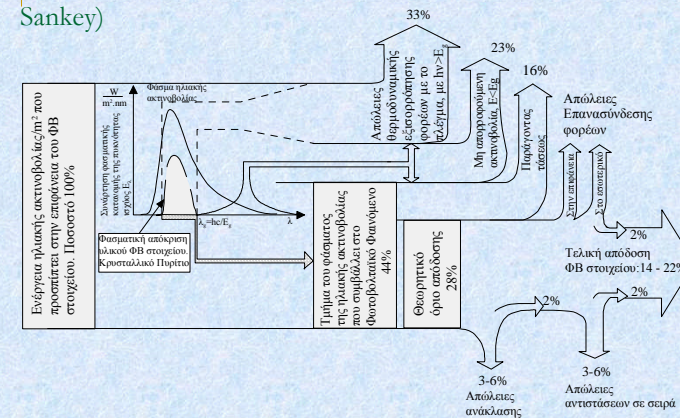
- Πήραμε μετρήσεις για να χαράξουμε τις χαρακτηριστικές καμπύλες I-V ΦΒ πλαισίου, εμβαδού $S=0,1 \text{ m}^2$ για τέσσερις διαφορετικές ακτινοβολίες G.
- Να συμπληρώσετε τα κενά κελιά του Πίνακα εξηγώντας τον τρόπο με τον οποίο κάνατε τους υπολογισμούς σας.

n (%)	G(W/m ²)	FF	P _m (W)	I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	I _m (A)	V _m (V)
12.4	1000	0.679	1.24	3.00	0.61	2.7	0.46
12.6	750	0.724	0.95	2.25	0.58	2.1	0.45
12.0	500	0.717	0.60	1.5	0.56	1.4	0.43
11.5	250	0.709	0.29	0.75	0.54	0.7	0.41

Εξάρτηση της απόδοσης, η & της αποδιδόμενης ισχύος, P_m, από την πυκνότητα ισχύος της ΗΜ ακτινοβολίας

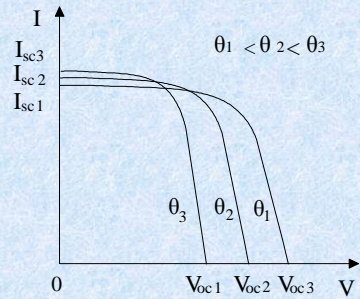


Διάγραμμα ροής ενέργειας σ' ένα ΦΒ στοιχείο (Διάγραμμα Sankey)



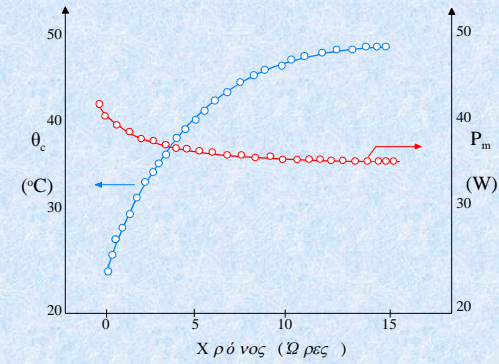
Επίδραση της θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική I - V

$$I_{sc} = \frac{E}{E_{STC}} I_{sc,STC} \cdot (1 + \alpha_{I_{sc}} \cdot (\theta_c - \theta_{STC}))$$

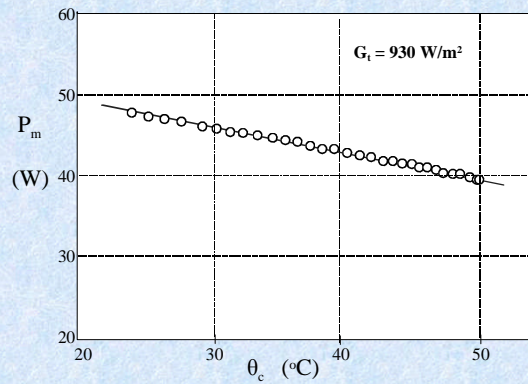


$$V_{oc} = V_{oc,STC} \cdot (1 + \beta_{V_{oc}} \cdot (\theta_c - \theta_{STC})) \cdot (1 + \delta \cdot (\theta_c) \cdot \ln(\frac{E}{E_{STC}}))$$

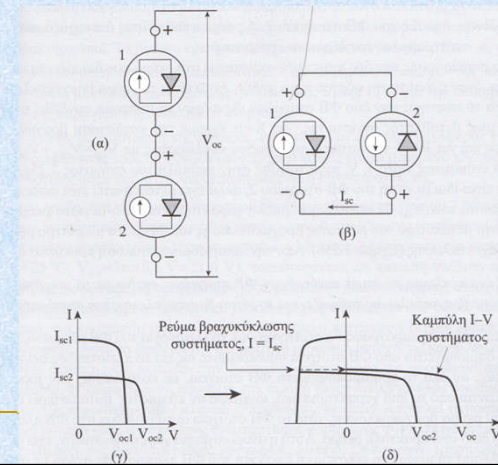
Χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας κυψελίδας και της αποδιδόμενης P_m, σε συνθήκες υπαίθρου



Επίδραση της θερμοκρασίας στην αποδιδόμενη P_m

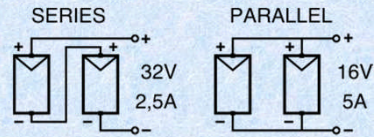


Τρόποι σύνδεσης ΦΒ στοιχείων

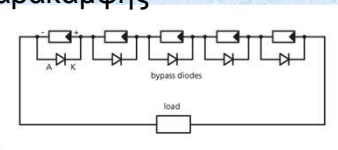


Τρόποι σύνδεσης ΦΒ πλαισίων

- Παράδειγμα ΦΒ πλαίσια 16V/2,5A



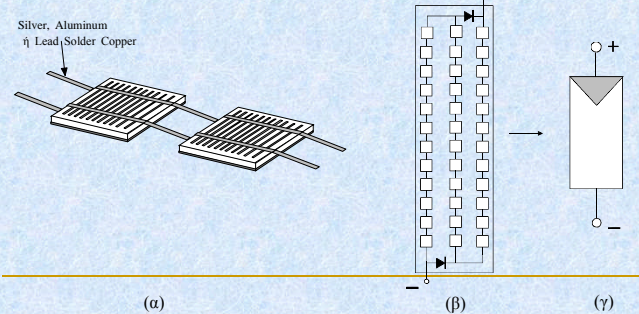
- Δίοδοι Παράκαμψης



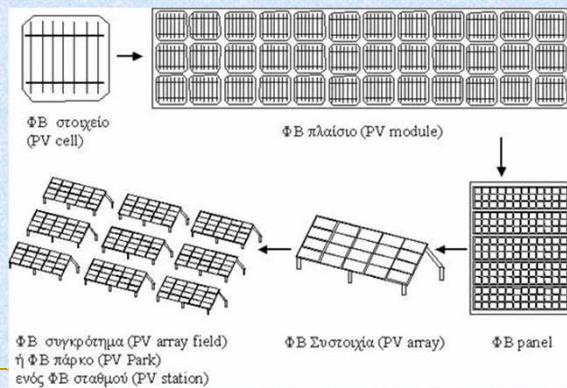
Σύνδεση ΦΒ στοιχείων – ΦΒ πλαίσιο

$V_{oc} = \sim 0,6V$ και $I_{sc} = 30-40 \text{ mA/cm}^2$ με $E=1000 \text{ W/m}^2$

- Αποδ. ηλ. ισχύος (σε 1 kW/m^2): $\sim 150 \text{ W/m}^2$
- Απόδοση: c-Si, cell: 24,4%, Mod:14-22,7%
GaAs, cell: 25,1%, Mod:19-20%



Από το ΦΒ στοιχείο στο ΦΒ συγκρότημα



ΦΒ πλαίσιο (Module) - Βασική βιομηχανική μονάδα



Ηλ. χαρακτ. σε $E=1000 \text{ W/m}^2$

- $V_{oc} : \sim 40V$ και
- $I_{sc} : \sim 1-10 \text{ A}$
- Ονομ. ισχύς : $\sim 5 - 350 \text{ W}_p$
- Απόδοση: 8-24%

Μέγιστες καταγεγραμμένες αποδόσεις (2011)

Σε κυψελίδα : 34,1% & 28,3% & 25,0%

Σε πλαίσιο : 23,5% 22,9% & 21,4%

Τυπικά στοιχεία

Output classes	230	235	240	245
Electrical data at STC¹⁾				
Rated output P_{MPP} (W)	230	235	240	245
Voltage U_{MPP} (V)	31.8	32.0	32.2	32.4
Current I_{MPP} (A)	7.23	7.35	7.45	7.56
Open-circuit voltage V_{OC} (V)	37.2	37.2	37.3	37.4
Short-circuit current I_{SC} (A)	8.21	8.30	8.39	8.48
Reverse current capacity (A)	16.0	16.0	16.0	16.0
1) STC-Standard Test Conditions: Air mass AM 1.5 – Irradiance 1000 W/m ² – Cell temperature 25°C Measuring tolerance $\pm 3\%$				
Electrical data at NOCT²⁾				
Rated output P_{MPP} (W)	167	170	174	178
Voltage U_{MPP} (V)	27.1	27.3	27.7	28.0
Current I_{MPP} (A)	6.16	6.23	6.28	6.36
Open-circuit voltage V_{OC} (V)	34.3	34.3	34.3	34.4
Short-circuit current I_{SC} (A)	6.65	6.72	6.79	6.87
Reverse current capacity 200 W/m ² (%) ³⁾	< 6%	< 6%	< 6%	< 6%
2) The NOCT values are typical values. NOCT: Nominal operating cell temperature (45°C); Measuring tolerance $\pm 3\%$ Typical cell temperature with: Irradiance 800 W/m ² – Ambient temperature 20°C – Wind speed 1m/s				
3) Efficiency reduction for irradiance reduction from 1000 W/m ² to 200 W/m ² , ambient temperature 25°C, EN60904-1 comp.				
Other electrical parameters				
Maximum system voltage (V)	1000			
Temperature coefficient I_{SC} (% / K)	0.06			
Temperature coefficient U_{OC} (% / K)	-0.33			
Temperature coefficient P_{MPP} (% / K)	-0.44			
Application				
Permissible module temperature	-40°C ... +85°C			
Snow load	5,400 Pa corresponds to 550 kg/m ² , i.e. snow load zone 3			
Wind load	130 km/h (800 Pa), factor 3 for wind gusts			
Hail test	Ice balls: \varnothing 25 mm, speed: 23 m/s			
Application class	A			
Installation / operation	Follow the installation and operating manual!			

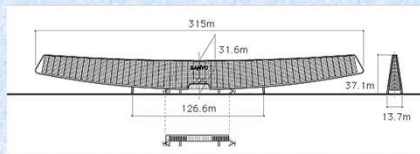
65

Εφαρμογές



66

Εντοπιακές ΦΒ εγκαταστάσεις



Solar Ark, Gifu, Ιαπωνία



Solar Pergola, Ισπανία



67

Εφαρμογές



Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε δημόσιο κτίριο



Εφαρμογή εύκαμπτων φωτοβολταϊκών άμορφου πυριτίου σε βιομηχανική στέγη



Εφαρμογή φωτοβολταϊκών σε χώρο στάθμευσης



Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε γήπεδο ποδοσφαίρου

Αστεροσκοπείο Σκίνακα

