



Σεμινάριο Φυσικής

“Βελτίωση απόδοσης φωτοβολταϊκών
στοιχείων με τη δημιουργία πολλαπλών
εξιτονίων”

Κοψαλής Γιάννης 8^ο Εξάμηνο

Επιβλέπων Καθηγητής: Ράπτης Γιάννης



Διάρθρωση της Παρουσίασης

- Κατηγορίες φωτοβολταϊκών στοιχείων
- Φωτοβολταϊκό στοιχείο p-n
- Ρεύμα, τάση και απόδοση φωτοβολταϊκών στοιχείων
- Ορισμός και χαρακτηριστικές ιδιότητες εξιτονίων
- Δημιουργία εξιτονίων στα οργανικά φωτοβολταϊκά
- Κβαντική Παγίδευση
- Κβαντικός Συντελεστής Απόδοσης
- Χαρακτηριστικά Ρεύματος
- Σύγκριση απόδοσης συμβατικών και εξιτονικών φωτοβολταϊκών στοιχείων.



-Μέχρι τα μέσα του αιώνα θα χρειασθούν **10-40 TW-yr carbon-free** ενέργειας παγκοσμίως.

-Σήμερα η παγκόσμια κατανάλωση είναι **12-13 Tw-yr** ετησίως.

-Η επιφάνεια της γης λαμβάνει από την ισχύ του ήλιου περίπου **$1,2 * 10^{17} \text{ W}$** .

-Τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν μηδενικό κόστος παραγωγής ενέργειας, ελάχιστη συντήρηση και είναι φιλικά προς το περιβάλλον.

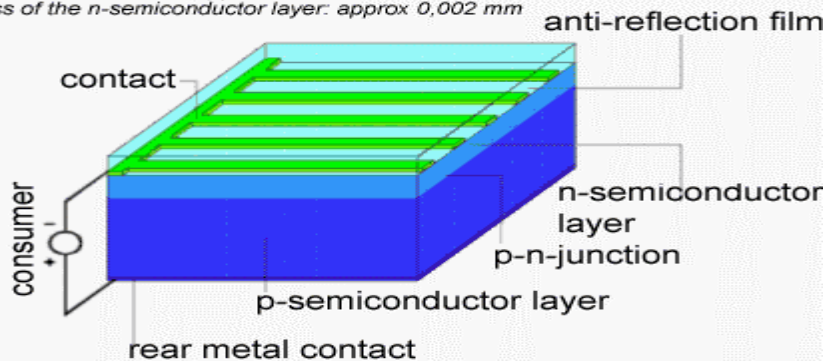
-Το πρώτο ηλιακό στοιχείο από πυρίτιο με **6%** απόδοση (**Chapin-1954**).

Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών Στοιχείων

α) Ημιαγώγιμα φωτοβολταϊκά στοιχεία, λειτουργία με βάση τις διατάξεις επαφής p-n. (**1^η και 2^η Γενιάς**)

thickness of the solar cell: approx 0,3 mm

thickness of the n-semiconductor layer: approx 0,002 mm



β) Φωτοηλεκτρικά φωτοβολταϊκά στοιχεία, η λειτουργία τους στηρίζεται σε οξειδοαναγωγικές χημικές αντιδράσεις και φαινόμενα διάχυσης. (**3^η Γενιάς**)

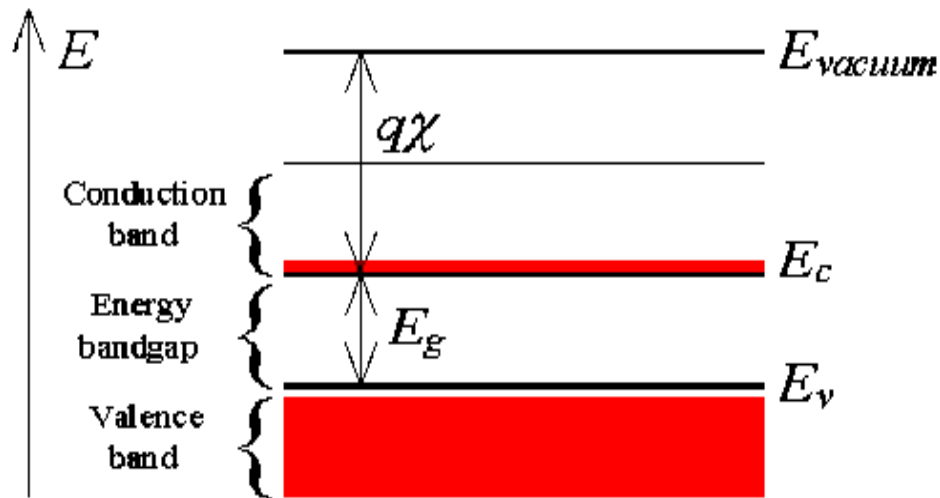
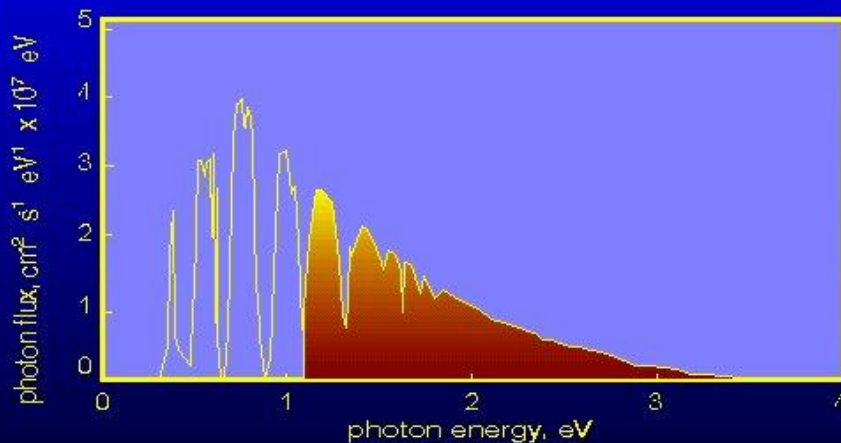
-Οργανικά φωτοβολταϊκά

-**DSSCs** (φωτοευαισθητοποιημένες ηλιακές κυψελίδες χρωστικής, Dye Sensitized Solar Cells)

-**QDSSCs** (ηλιακές κυψελίδες κβαντικών τελειών)



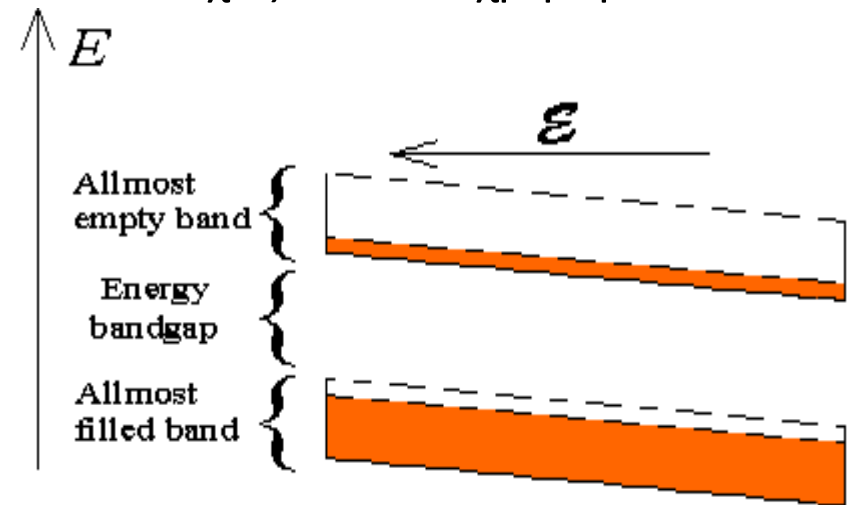
Photon flux utilised by a silicon solar cell



-Μια ηλιόλουστη ημέρα, περίπου 4.4×10^{17} φωτόνια χτυπούν 1 cm^2 της γήινης επιφάνειας κάθε δευτερόλεπτο.

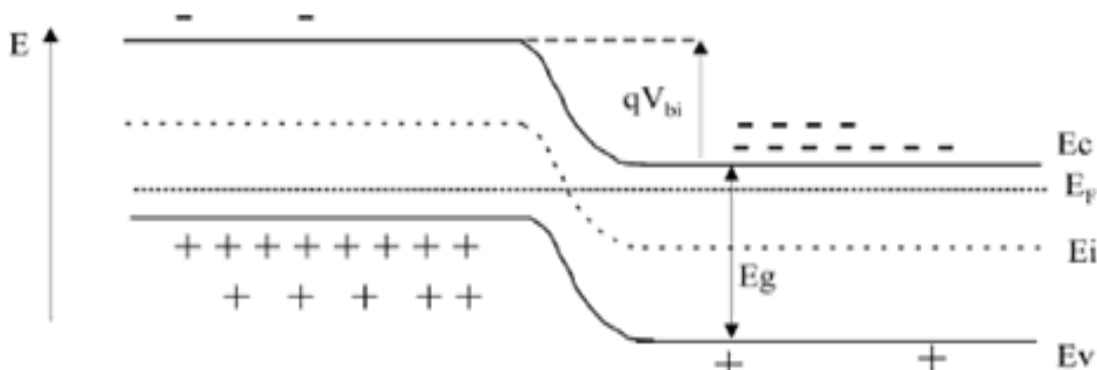
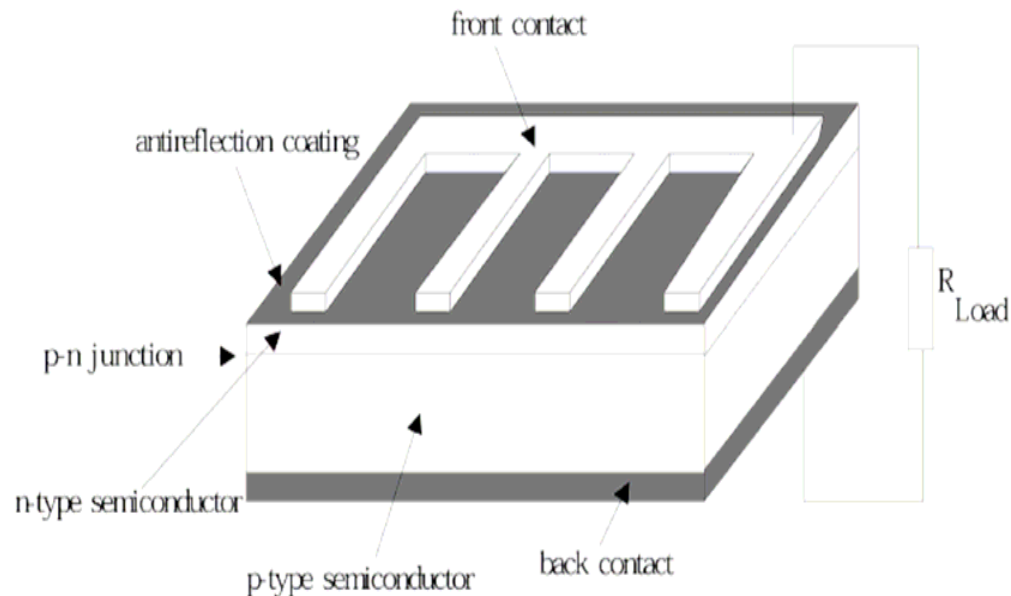
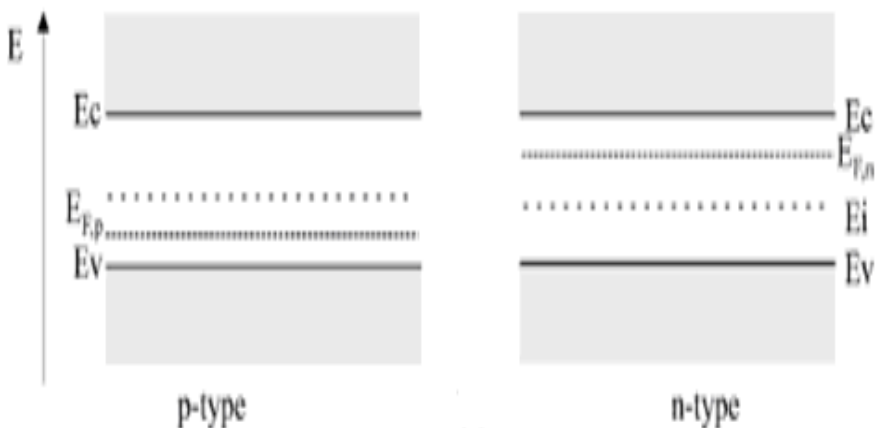
-Περίπου το $1/3$ για το Si συντελούν στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, εκείνα με $E \geq E_g$ (Για το Si, $E_g = 1,14 \text{ eV}$).

-Για E πολύ μεγαλύτερο του E_g , η περίσσεια ενέργειας χάνεται ως θερμότητα (ταλαντώσεις πλέγματος) και στόχος είναι να χρησιμεύσει.

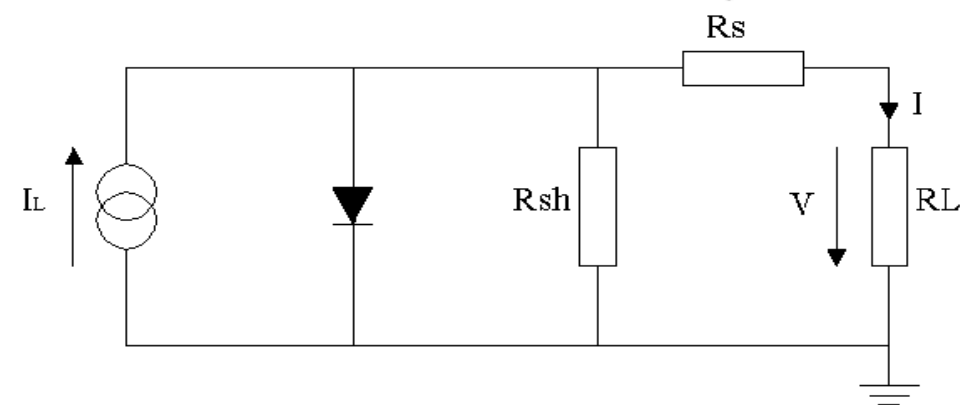




Φωτοβολταϊκό στοιχείο p-n.



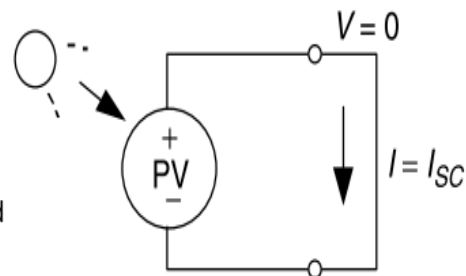
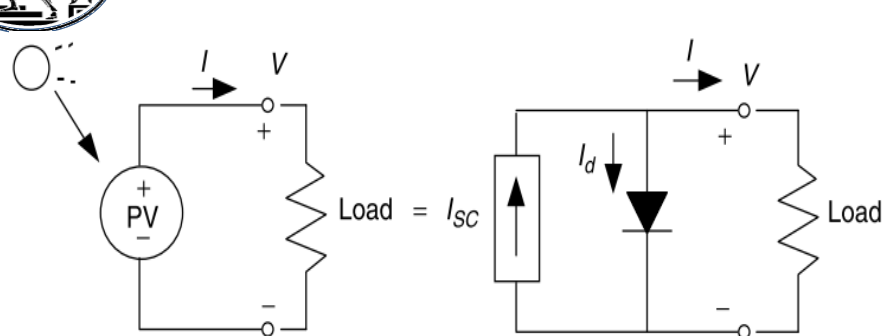
-Στη θερμική ισορροπία καμία εξωτερική τάση δεν εφαρμόζεται στην επαφή, υπάρχει όμως η εσωτερική τάση V_{bi} . Το qV_{bi} προκαλείται από τη συνάρτηση μεταφοράς των ημιαγωγών.



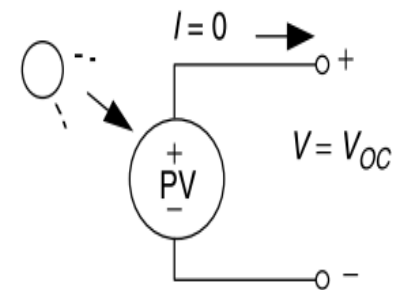
$$I = I_S \left\{ e^{\left[\frac{q(V - IR_S)}{nk_B T} \right]} - 1 \right\} + \left[\frac{(V - IR_S)}{R_{SH}} \right] - I_L$$



Ρεύμα, Τάση και Απόδοση φωτοβολταϊκών στοιχείων



(a) Short-circuit current



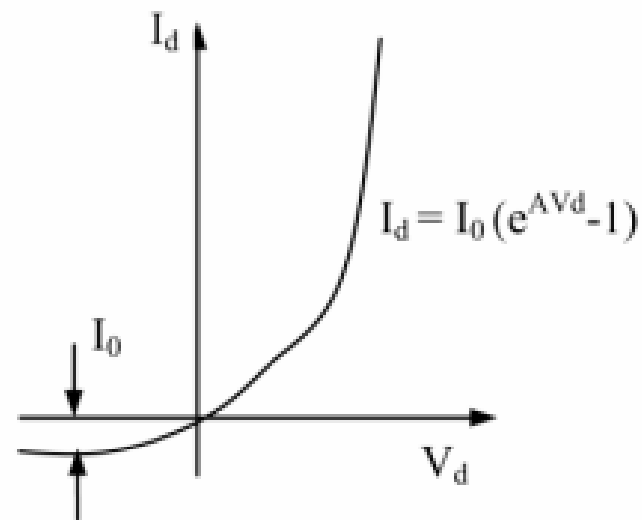
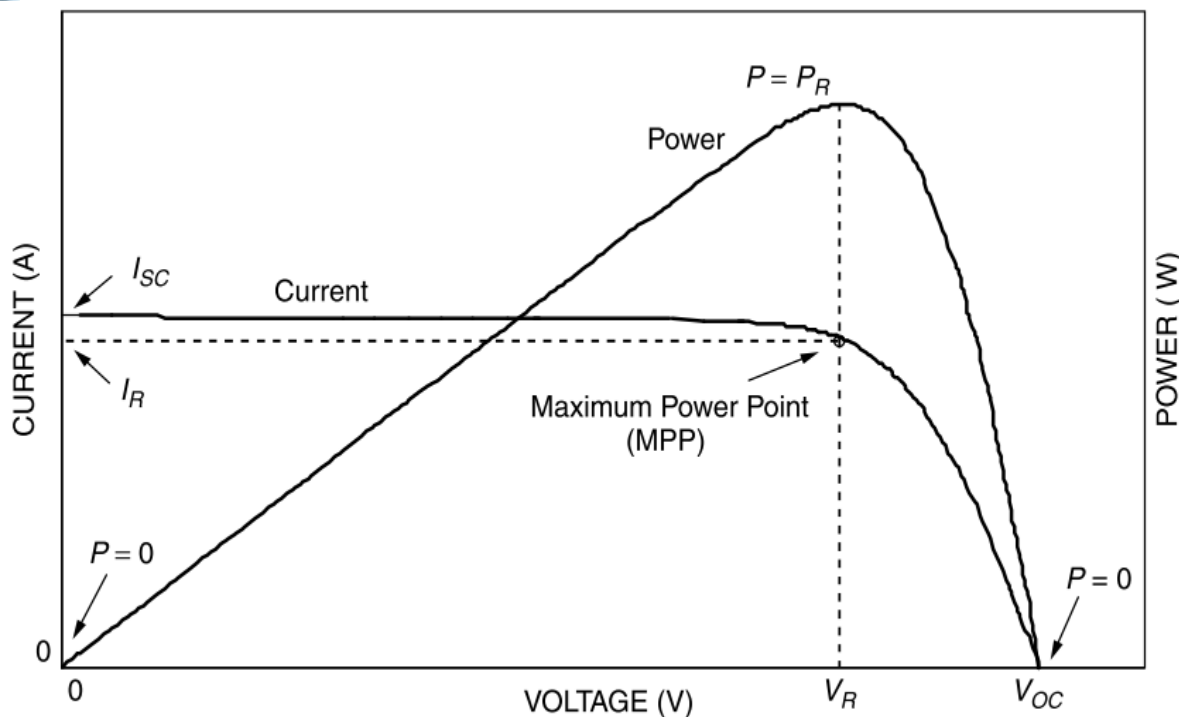
(b) Open-circuit voltage

$$I_d = I_0(e^{qV_d/AkT} - 1) \quad I = I_{SC} - I_d$$

$A \cong 1$ (κυρίως για φαινόμενα διάχυσης), παράγοντας ιδανικότητας

$$I = I_{SC} - I_0(e^{qV/kT} - 1)$$

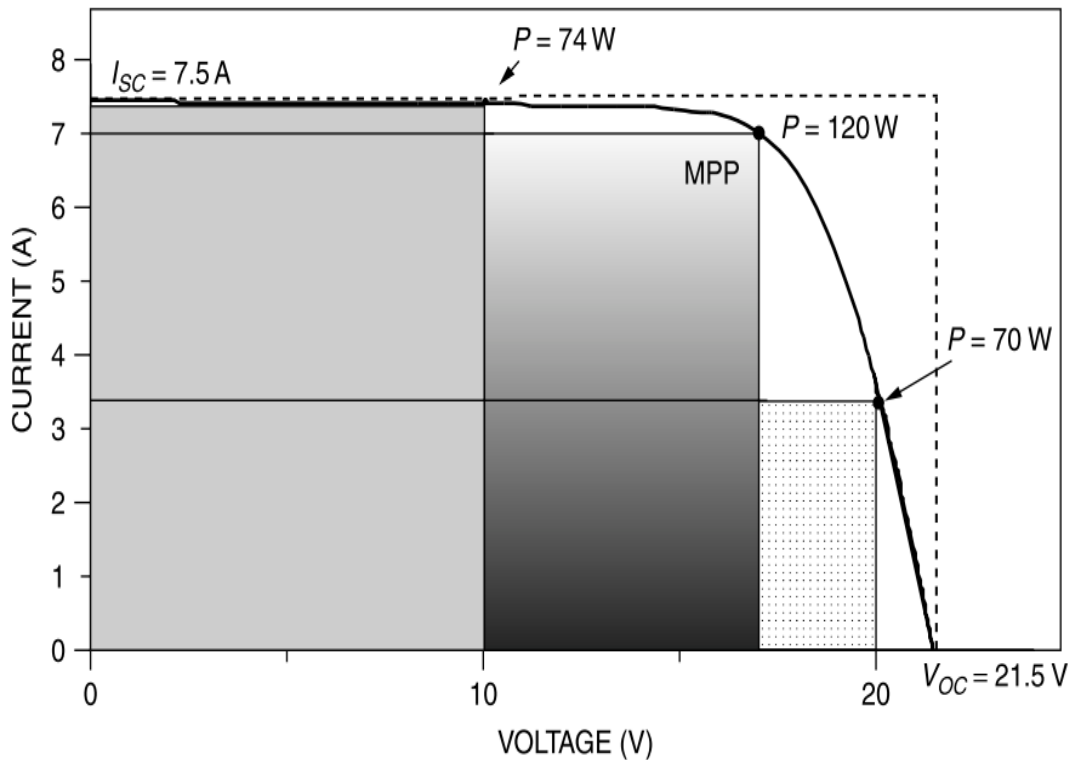
$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_0} + 1\right)$$





Ρεύμα, Τάση και Απόδοση φωτοβολταϊκών στοιχείων

$$\text{Fill factor (FF)} = \frac{\text{Power at the maximum power point}}{V_{OC} I_{SC}} = \frac{V_R I_R}{V_{OC} I_{SC}}$$



$$\underline{n = P_m / P_{in}}$$

Η απόδοση επηρεάζεται από το φάσμα, την ένταση ακτινοβολίας και από τη θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού.

Η απόδοση n δίνεται από το τύπο $n = (FF \cdot I_{SC} \cdot V_{OC}) / (S \cdot E)$ όπου S το εμβαδό της φωτοβολταϊκής επιφάνειας και E η πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2).



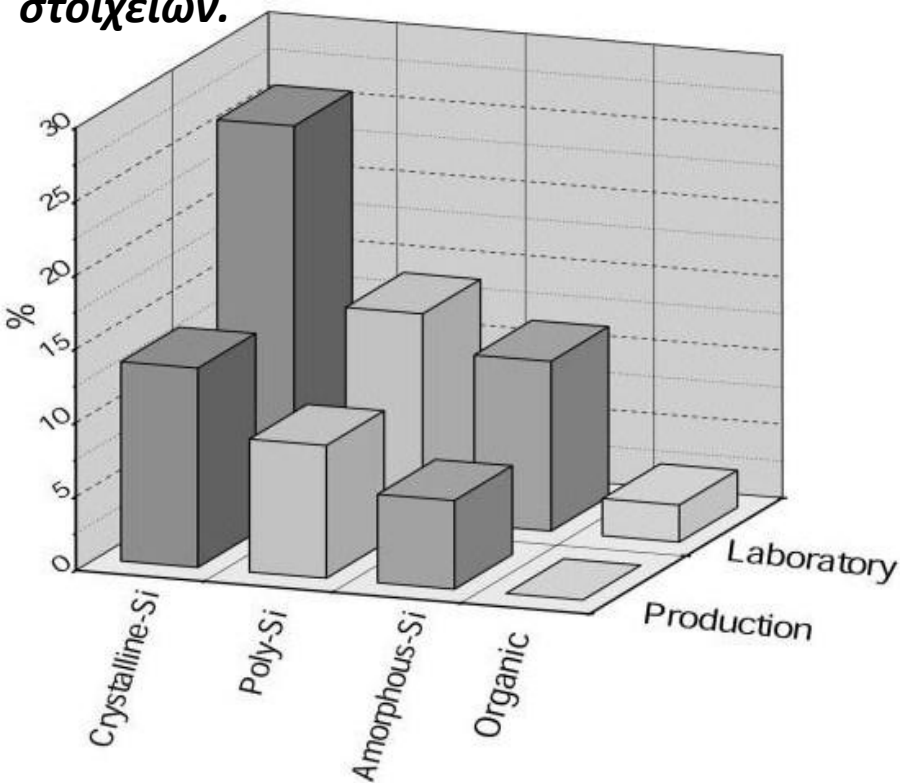
Φωτοβολταϊκά 3^{ης} Γενεάς, Οργανικοί Ημιαγωγοί.

-Μεταφορά φωτοεπαγωγικού φορτίου στη διεπαφή p-n ενός υλικού.

-Παραγωγή ζευγών ηλεκτρονίων και οπών και συλλογή στα αντίθετα ηλεκτρόδια.



Ραβδόγραμμα απόδοσης φωτοβολταϊκών στοιχείων.



-Αύξηση περιοχής επαφής μεταξύ των p- και n- τύπων υλικών, άρα αποδοτικότερη παραγωγή και μεταφορά φορτίων.

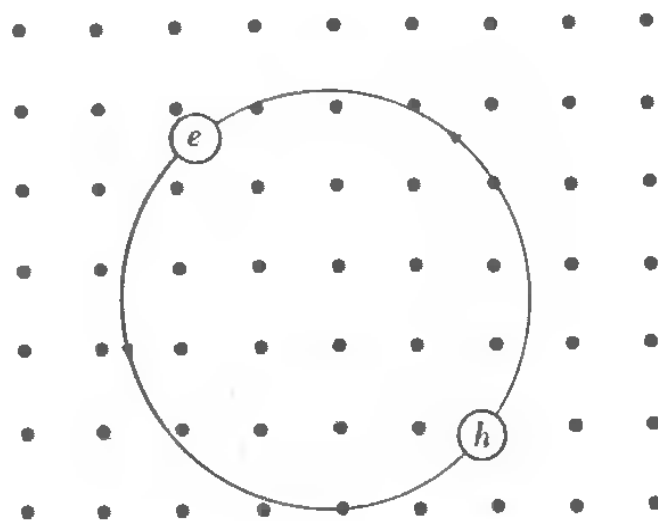
-Χαμηλό κόστος κατασκευής

-Χαμηλή τοξικότητα

-Μεγάλη ευκολία εναπόθεσης σε μεγάλης επιφάνειας εύκαμπτα υποστρώματα.

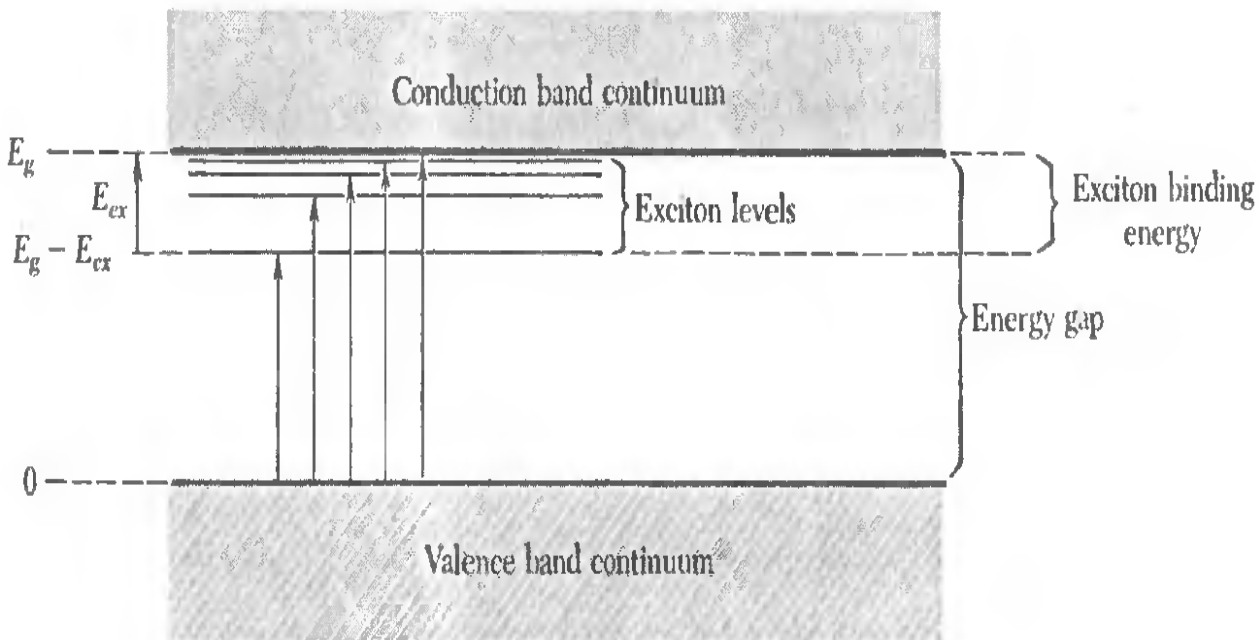
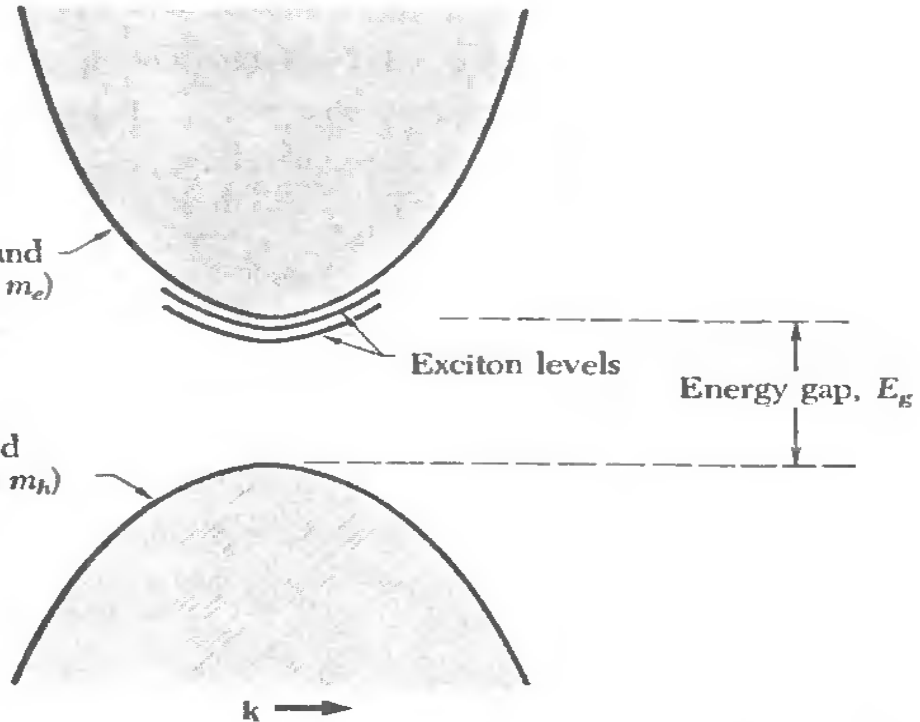


Τι είναι το εξιτόνιο;



Conduction band
(effective mass m_e)

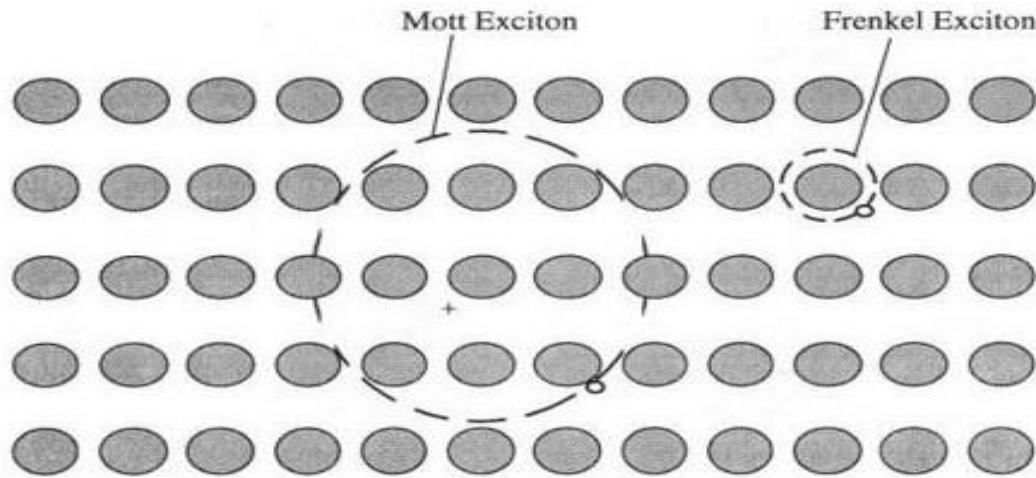
Valence band
(effective mass m_h)



-Σύστημα ηλεκτρονίου-οπής
που κινούνται δέσμια.

-Δέσμια ενδοχασματική
κατάσταση.

-Ακέραιο σπιν, άρα
μελετώνται με στατιστικές
Bose-Einstein.



-Εξιτόνιο, σύζευξη ηλεκτρονίου και οπής μέσω ηλεκτροστατικής αλληλεπίδρασης.

-Εξιτόνια Frenkel

-Εξιτόνια Mott-Wannier

Frenkel Excitons: Μέση ακτίνα εξιτονίου $\approx$ ατομική απόσταση
Wannier-Mott Exc.: Μέση ακτίνα εξ/νίου $>$ ατομικής απόστασης

Σχηματίζουν υδρογονοειδές συγκρότημα, όταν :

$$\nabla_k E_C(\vec{k}) = \nabla_k E_V(\vec{k}) : (\text{Κοινή ταχύτητα ομάδας})$$

$$n = \frac{c}{v} = \frac{ck}{\omega}$$

$$k = \frac{n(\omega)\omega}{c}$$

$$v_g = \left(\frac{dk}{d\omega} \right)^{-1} = \left(\frac{\omega}{c} \frac{dn}{d\omega} + \frac{n}{c} \right)^{-1}$$

-Παρόμοιες καταστάσεις με το άτομο του υδρογόνου με υψηλότερες ενεργειακές στάθμες, γνωστή ως σειρά Rydberg.



$$E_{ex} = E_g - \frac{g}{n^2} + \frac{\hbar^2 k^2}{2(m_e + m_h)}$$

$$g = \left(\frac{\mu}{\epsilon_\infty^2} \right) \left(\frac{e^4}{2\hbar^2} \right) = \left(\frac{\mu}{\mu_H \epsilon_\infty^2} \right) E_H, \quad \mu = \frac{m_e m_h}{m_e + m_h}$$

$$V = - \frac{e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$$

E_H, μ_H : Ενέργεια σύνδεσης και ανηγμένη μάζα υδρογόνου.

$$\left(\frac{1}{m^*(\vec{k}_0)} \right)_{ij} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E_c}{\partial k_i \partial k_j} \Big|_{\vec{k}_0}$$

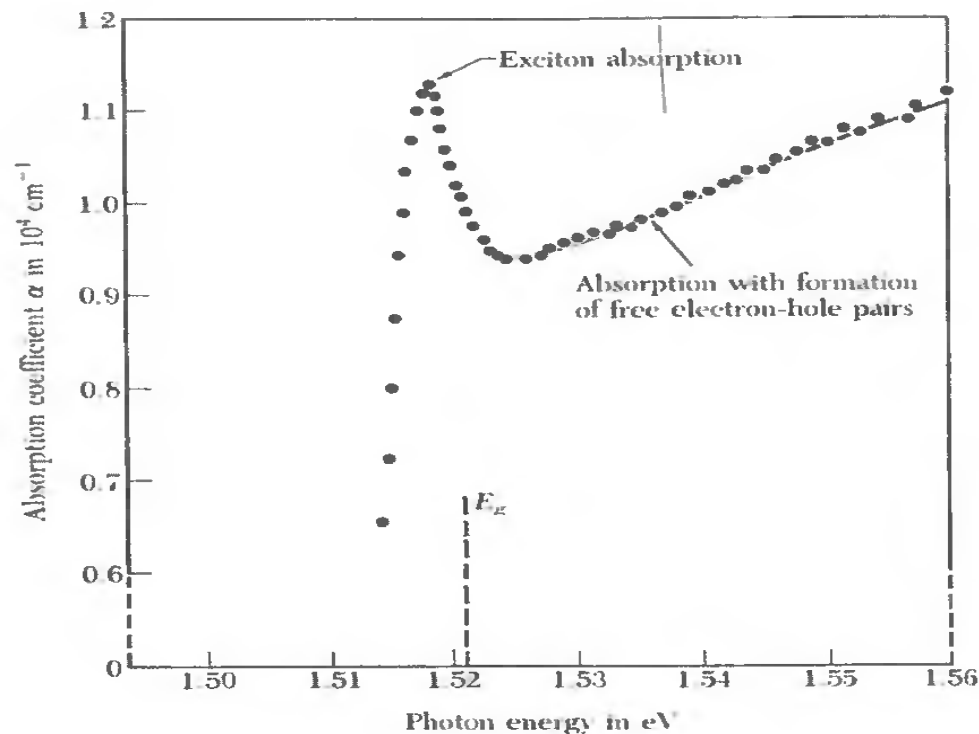
Για το GaAs

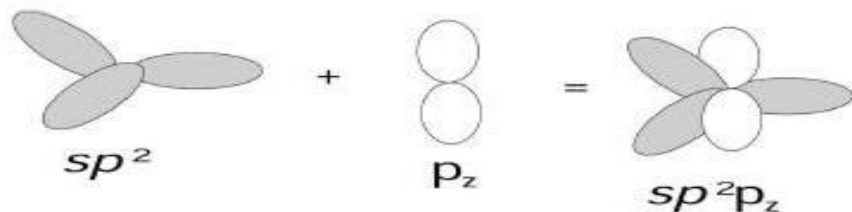
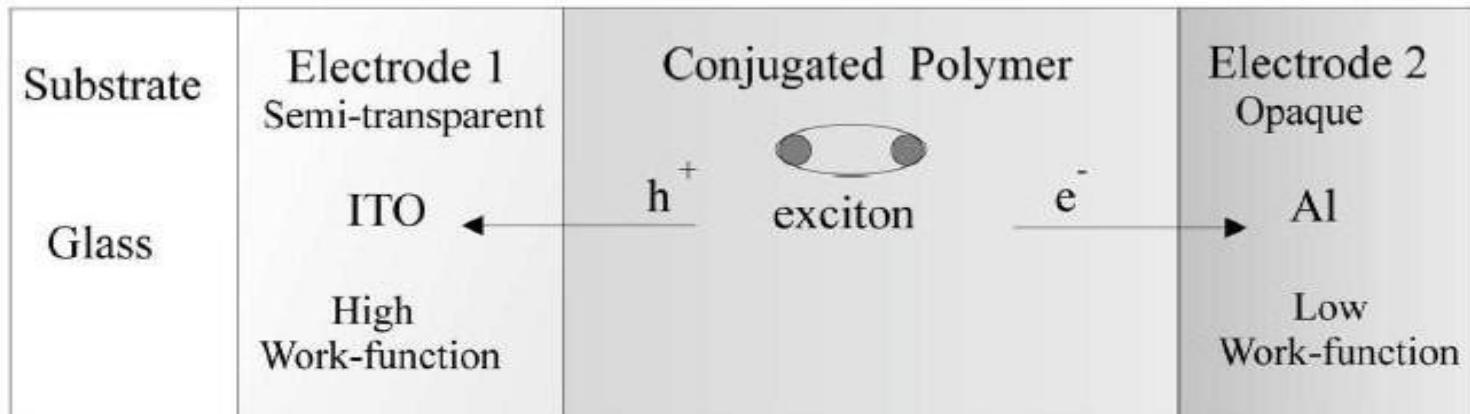
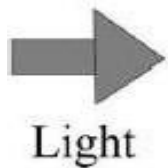
$$m_e/m_h = 0.2 \quad m^* = 0.83m_0$$

$$E_{ex} = \frac{m^*/m_0}{(\epsilon/\epsilon_0)^2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\alpha_0 n^2} = 13.6 \frac{m^*/m_0}{(\epsilon/\epsilon_0)^2} \text{ (eV)}$$

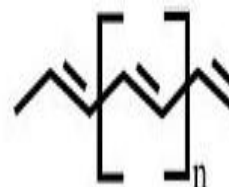
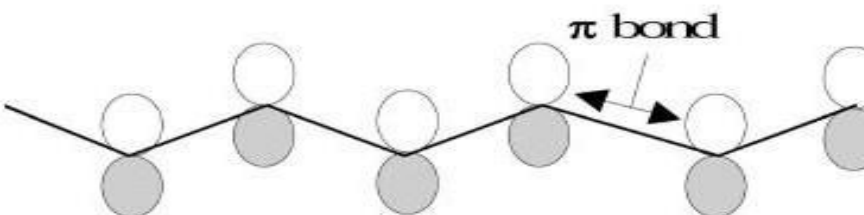
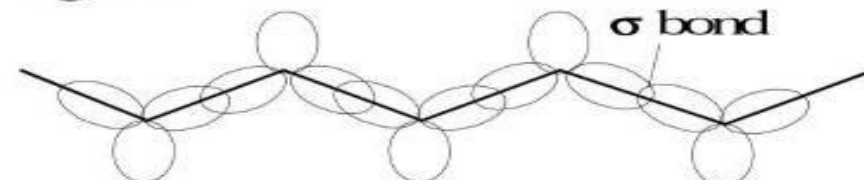
$$E_0 = 4.6 \text{ meV} \quad \text{και} \quad \alpha_{eff} = 11.8 \text{ nm}$$

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x).$$

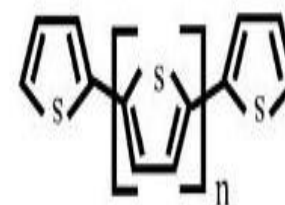




Conjugated segment



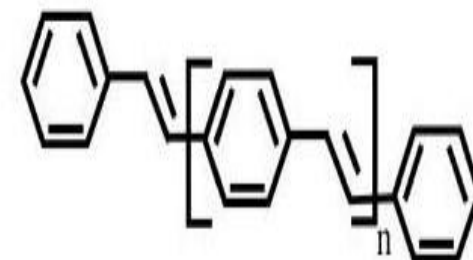
Polyacetylene



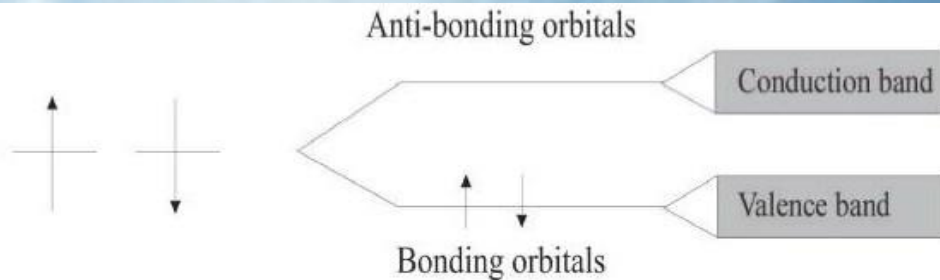
Polythiophene



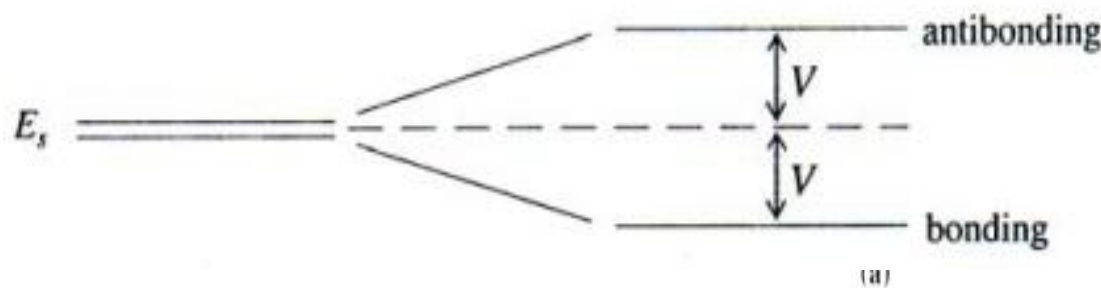
Polyphenylene



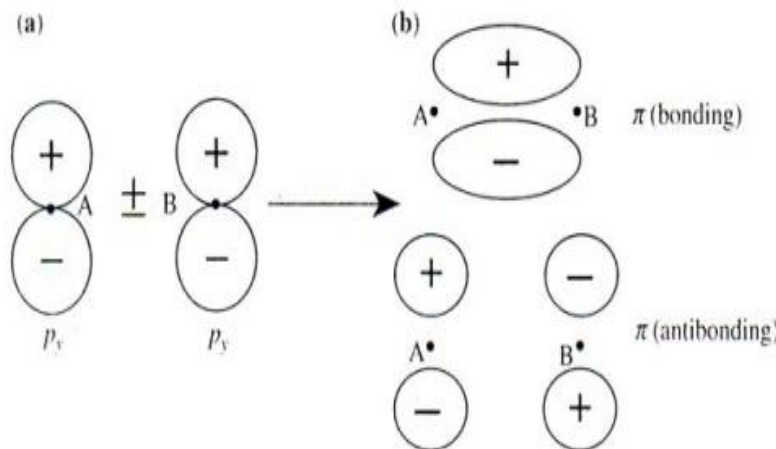
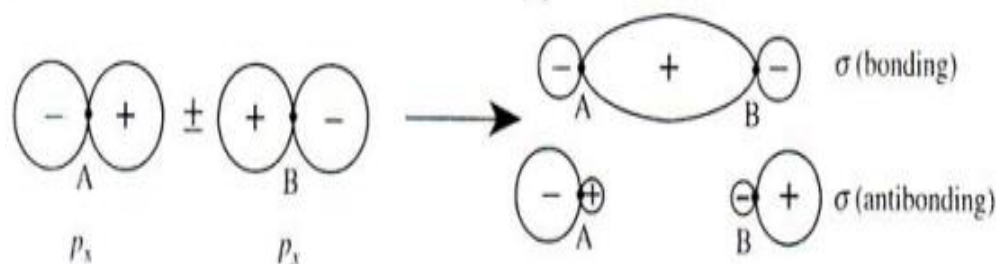
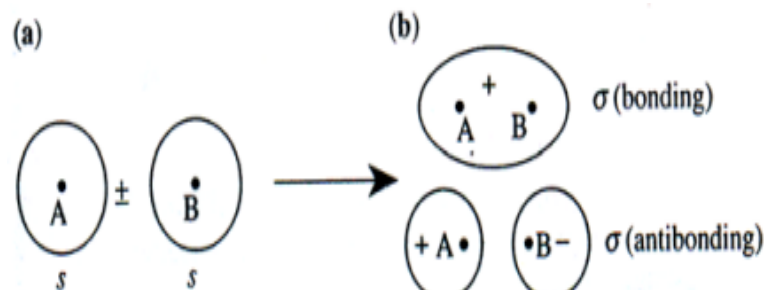
Poly(phenylene vinylene)



LUMO Singlet
HOMO κατάσταση



-Τα χάσματα ζωνών HOMO(Highest Occupied Molecular Orbital) και LUMO(Lowest Unoccupied Molecular Orbital) κυμαίνονται από 1.5 σε 3.5 eV για τα περισσότερα πολυμερή(ορατή περιοχή).



-Για ημιαγωγούς με τετραεδρική δομή, τα δεσμικά τροχιακά ορίζουν τη ζώνη σθένους ενώ τα αντιδεσμικά ορίζουν τη ζώνη αγωγιμότητας.

-Μακριά από το χάσμα, η θεωρία αντιμετωπίζει προβλήματα λόγω απεντοπισμού των ηλεκτρονίων.



Δημιουργία εξιτονικού φορέα

octakis(octyloxyethyl)porphyrin, ZnOOEP

ITO (indium-tin oxide) electrodes

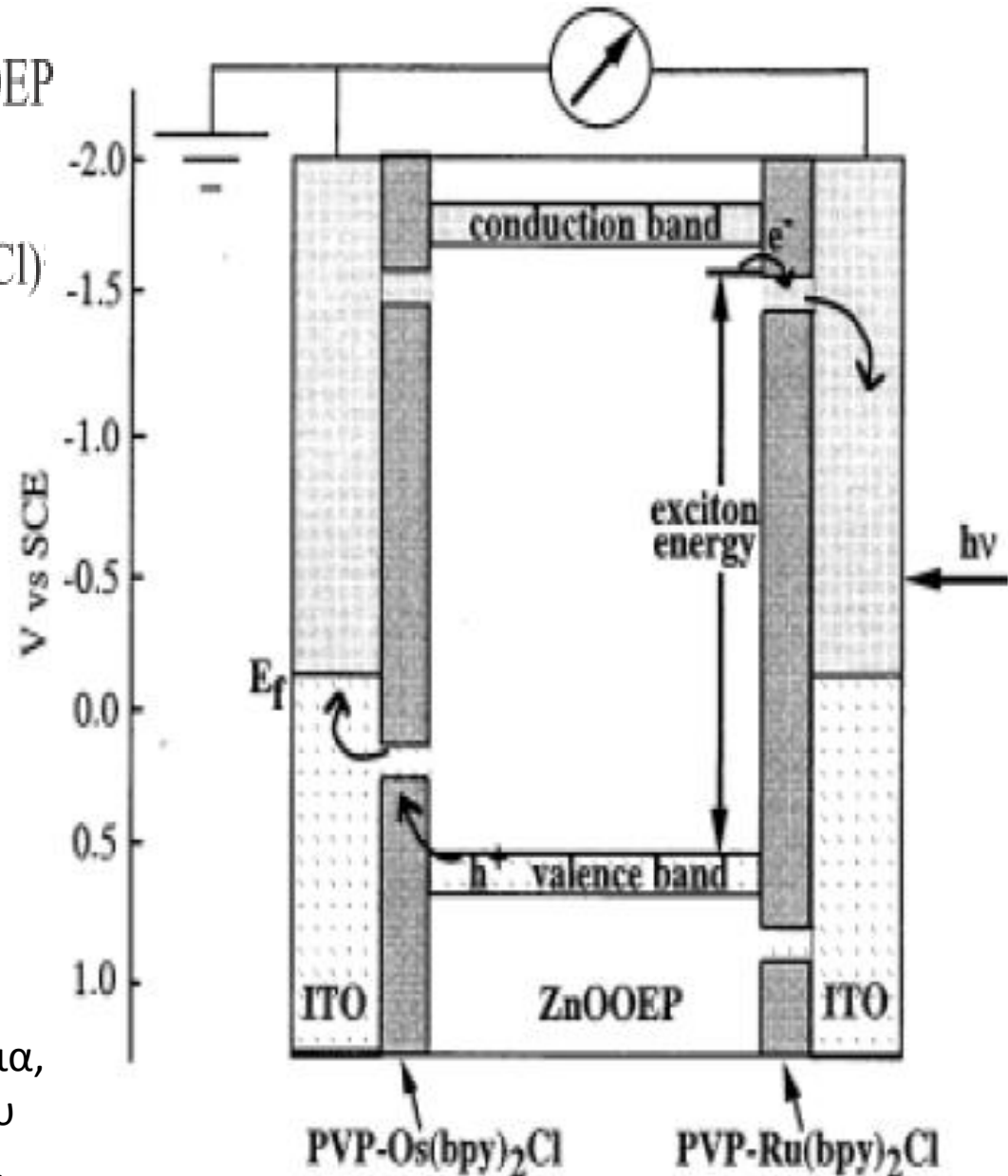
Ru(II)-bis(bipyridine)-Cl (PVP-Ru(bpy)₂Cl)

-Ενίσχυση της συλλογής φορέων

-Δημιουργία εξιτονίου μέσω εισαγωγής ηλεκτρονίου στο ηλεκτρόδιο ύστερα από διέγερση.

-Τα εξιτόνια δεν είναι ισχυρά δεσμευμένα, οπότε δεν επηρεάζονται από εσωτερικά ηλεκτρικά πεδία.

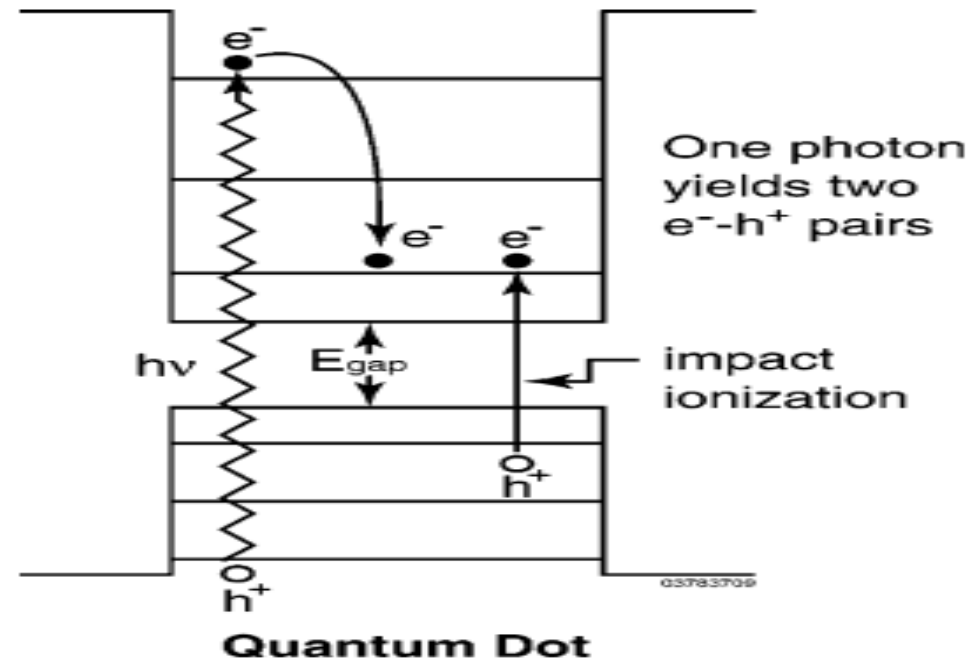
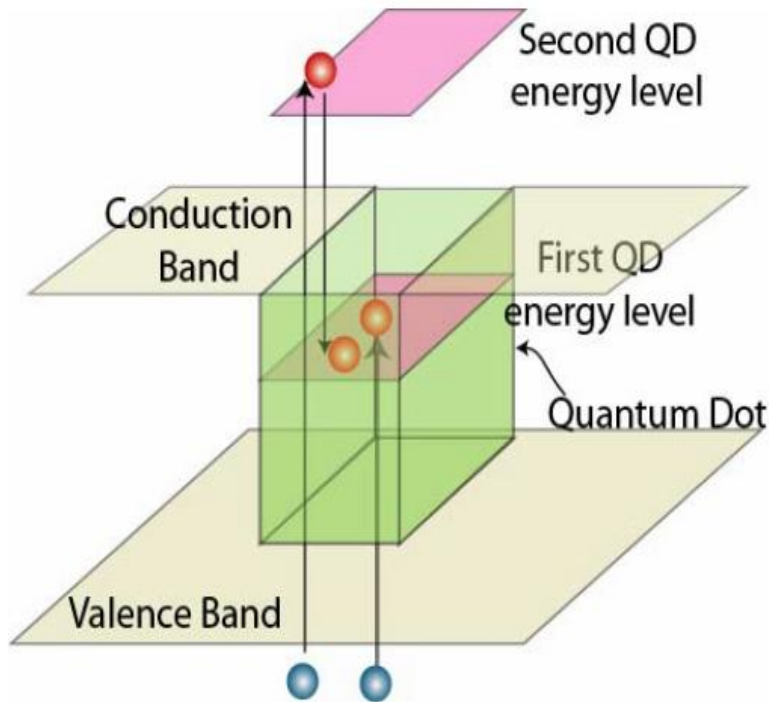
-Ασύμμετρο κινητικό μοντέλο, δημιουργίας εξιτονίου στη διεπιφάνεια, σε αντίθεση με το ηλεκτρικό πεδίο που αντιτίθεται σε περαιτέρω διαχωρισμό.





Η κβαντική Παγίδευση

Multiple exciton solar cell.

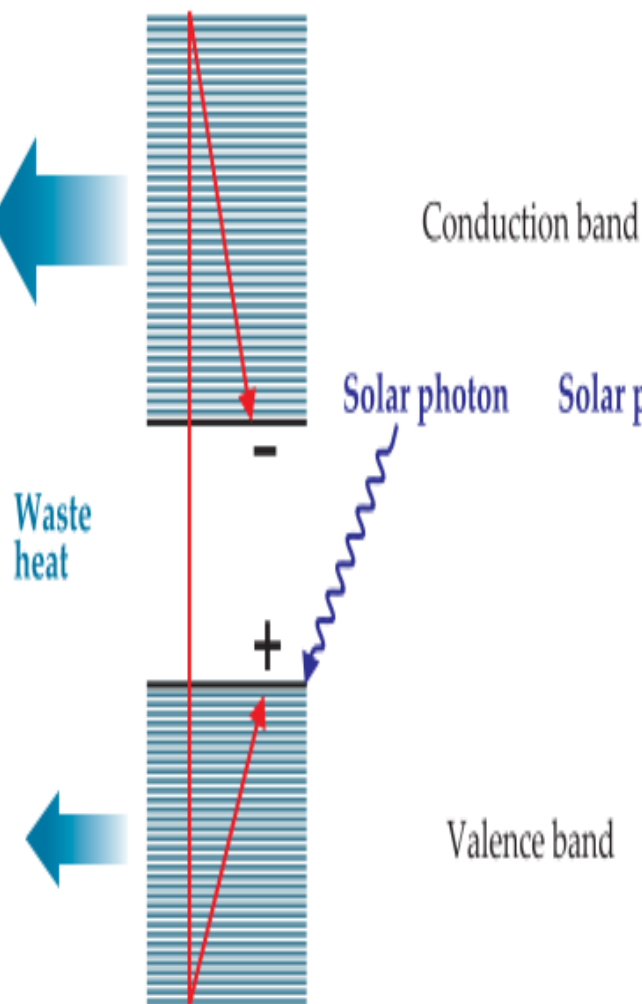


- Διακριτοποίηση του ενεργειακού χάσματος.
- Ισχυρός κβαντικός περιορισμός.
- Οι διαστάσεις καθορίζουν τη πυκνότητα καταστάσεων.

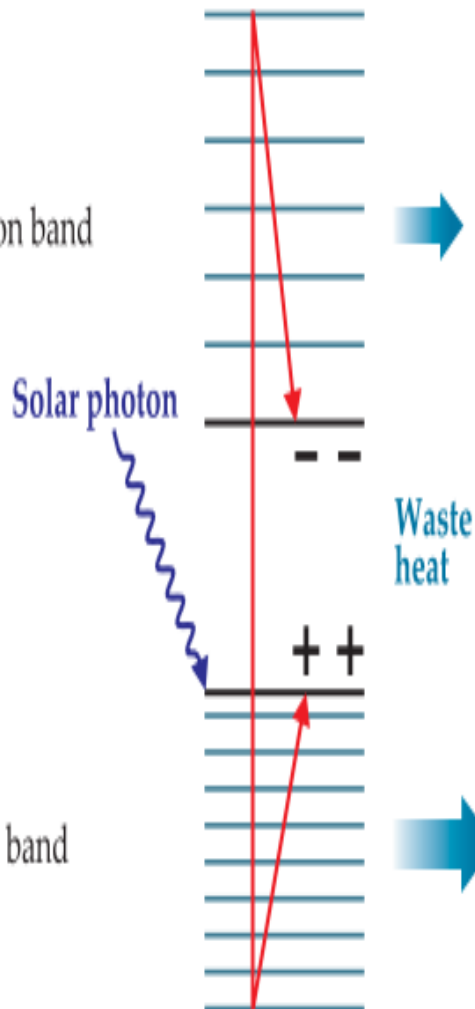


Πλεονεκτήματα λόγω Κβαντικής Παγίδευσης

Bulk semiconductor



Nanocrystal quantum dot



-Στους συμβατικούς ημιαγωγούς ένα φωτόνιο με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο, δημιουργεί ένα ζεύγος σπής-ηλεκτρονίου(διεγερμένο) το οποίο χάνει την ενέργειά του μέχρι την επανένωση μέσω θερμότητας.

-Αντίθετα στη κβαντική κελίδα λόγω διακριτών ενεργειακών καταστάσεων, έχει υπολογιστεί σύμφωνα με τη θεωρία πεδίου, αυξημένη πιθανότητα το πλεόνασμα ενέργειας να διεγείρει ένα ακόμη ηλεκτρόνιο.

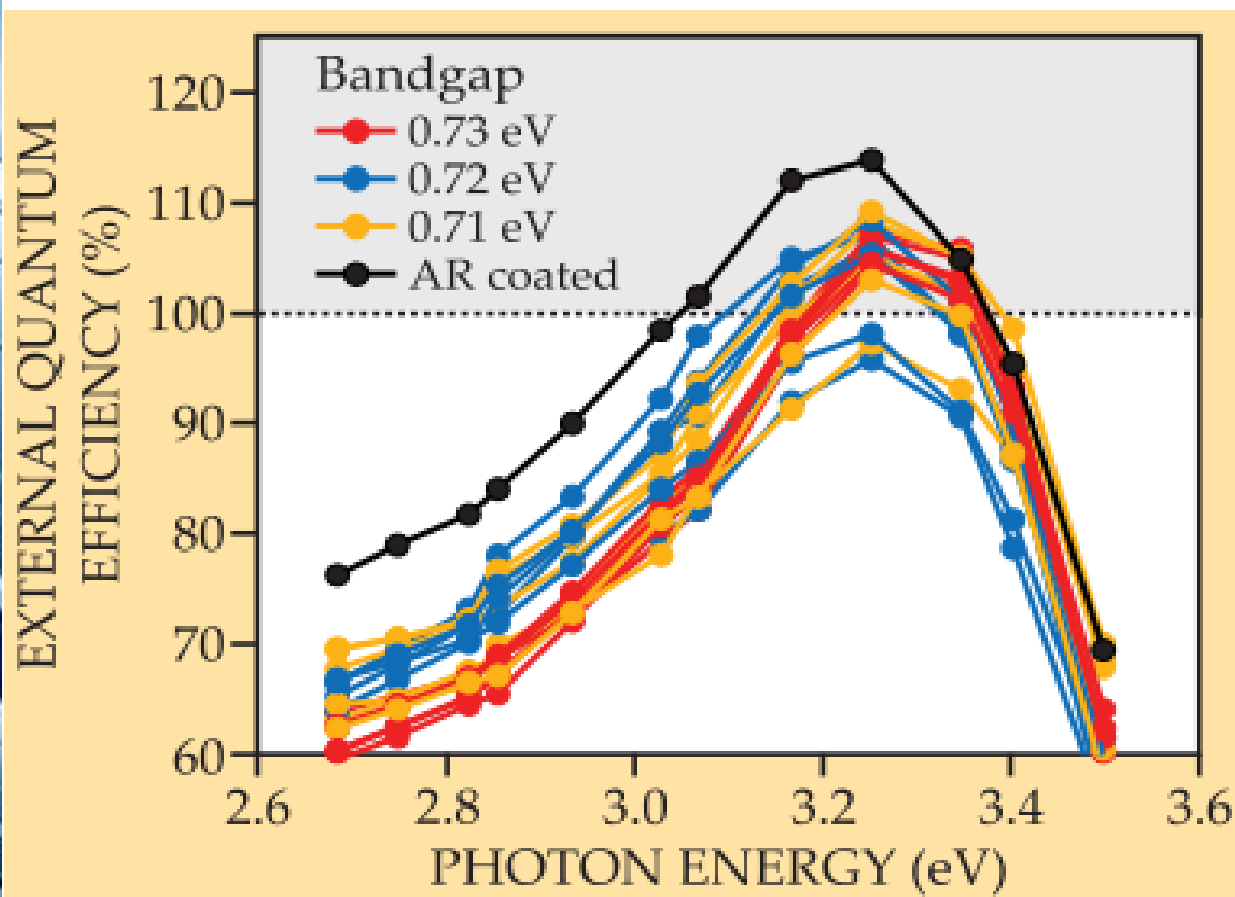


Μέτρηση της ηλεκτρικής ευαισθησίας της νανοδομής στο φως

$$EQE = (\text{ηλεκτρόνια/sec}) / (\text{φωτόνια/sec})$$

ή

$$EQE = (\text{ρεύμα/φορτίου ενός ηλεκτρονίου}) / (\text{συνολική ενέργεια φωτονίων/ενέργεια ενός φωτονίου})$$

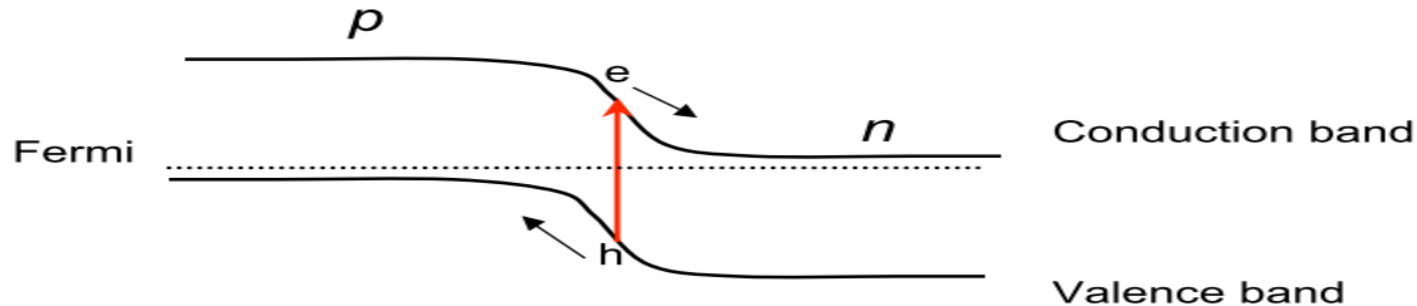


-Υψηλός συντελεστής EQE δεν συνεπάγεται και υψηλό συντελεστή απόδοσης καθώς η απόδοση εξαρτάται από το ρεύμα εξόδου και τη τάση εξόδου.

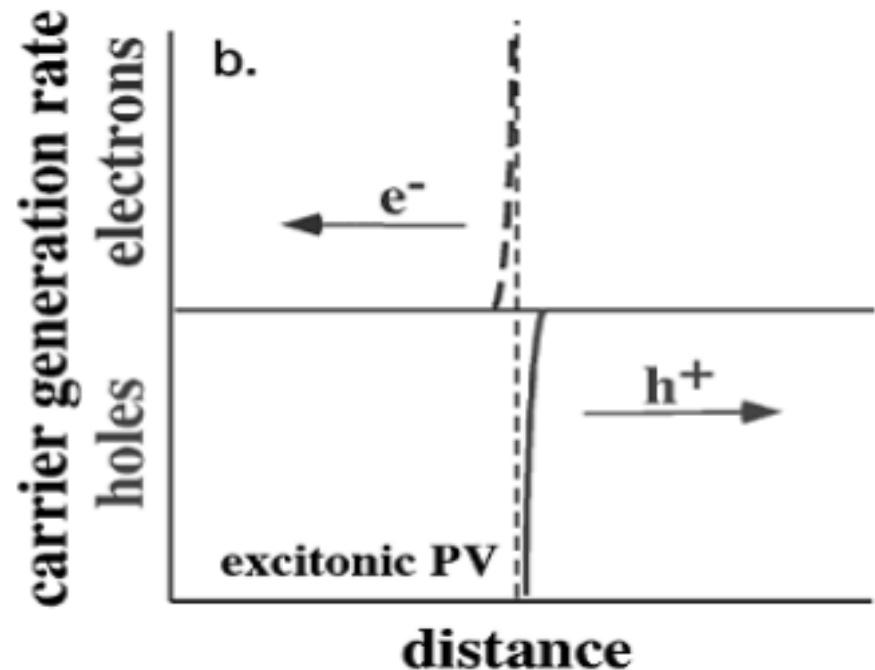
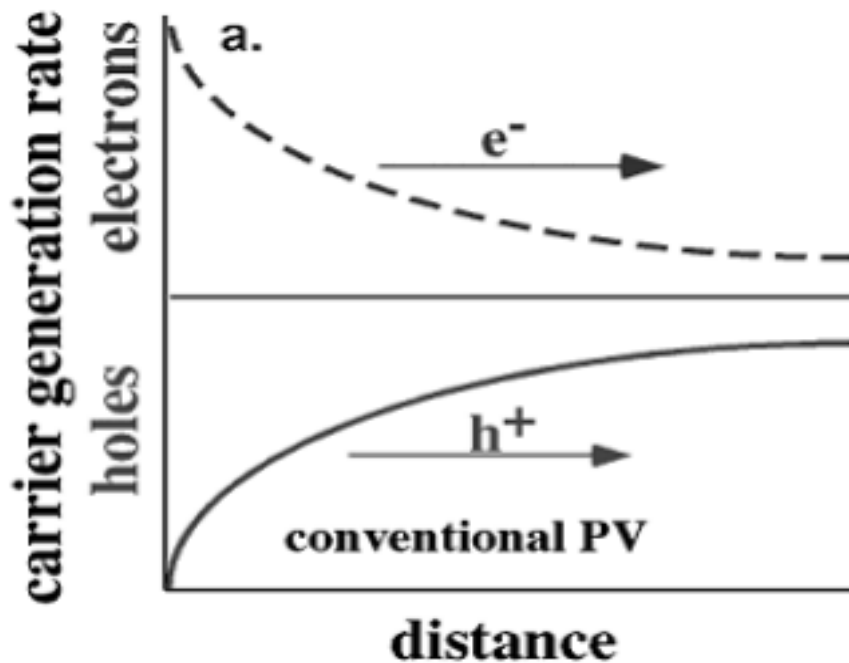


Σύγκριση Συμβατικού και Εξιτονικού Διαχωρισμού φορτίου

-Οι συμβατικές κυψελίδες απαιτούν κάμψη των ζωνών για να έχουμε διαχωρισμό φορτίου



-Στις XSCs η θερμοδυναμική διάσταση στη διεπιφάνεια δημιουργεί φορείς σε διαφορετικές φάσεις -> διαφορετικές κατευθύνσεις. Έχει αποδειχθεί από ταινίες που συλλέγουν τους φορείς στις ανόδους.





Χαρακτηριστικά Ρεύματος

$$J_n(x) = n(x)\mu_n \nabla U(x) + kT\mu_n \nabla n(x)$$

$$J_n(x) = n(x)\mu_n \nabla E_{Fn}(x)$$

$$E_{Fn}(x) = E_{cb}(x) + kT \ln\{n(x)/N_c\}$$

$$E = U + \mu$$



$$J_n(x) = n(x)\mu_n \{ \nabla U(x) + \nabla \mu(x) \}$$

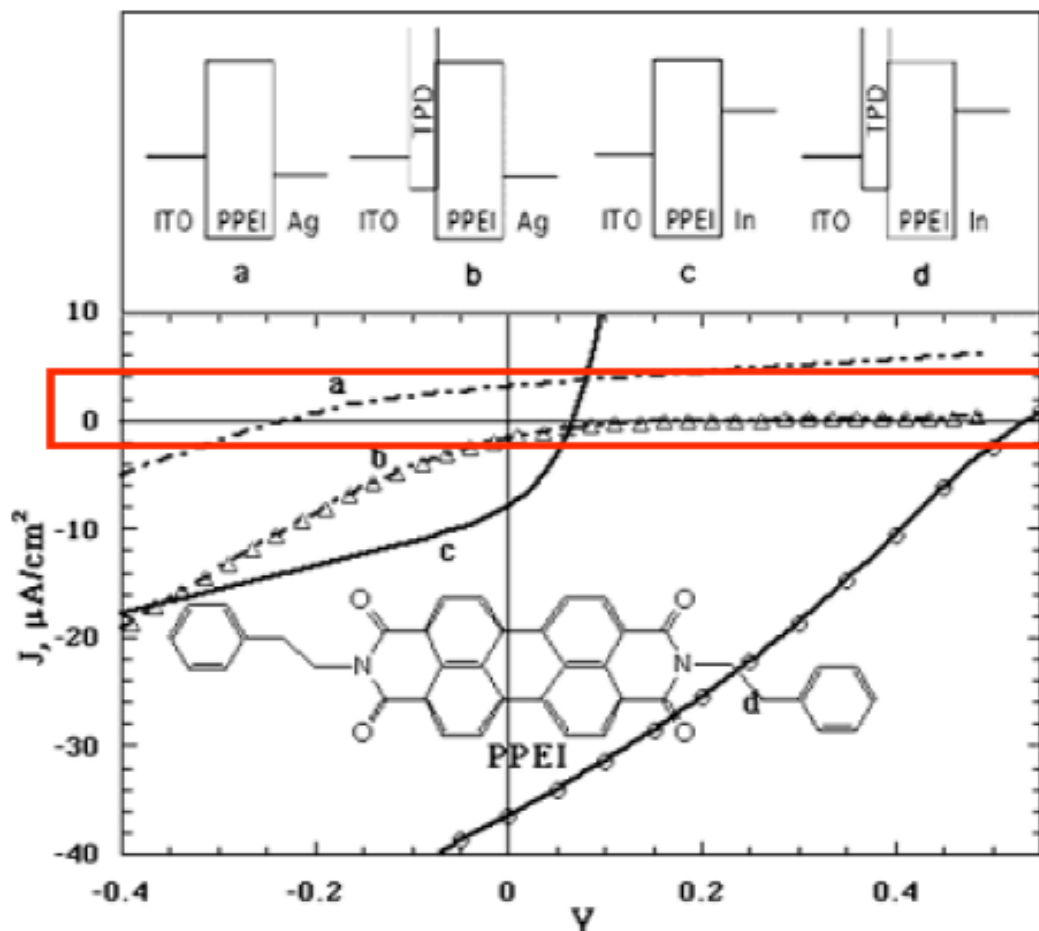
-Η κλίση του χημικού δυναμικού συνεισφέρει σημαντικά στη πυκνότητα ρεύματος, καθώς η πυκνότητα φορέων είναι χαμηλή στους οργανικούς ημιαγωγούς. Ακόμη συνεισφέρει σημαντικά στο διαχωρισμό οπής-ηλεκτρονίου.

-Χημικό Δυναμικό, η ενέργεια που απαιτείται για να φύγει ένα ηλεκτρόνιο ή μια οπή από την επιφάνεια Fermi.





Τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} στα ESCs

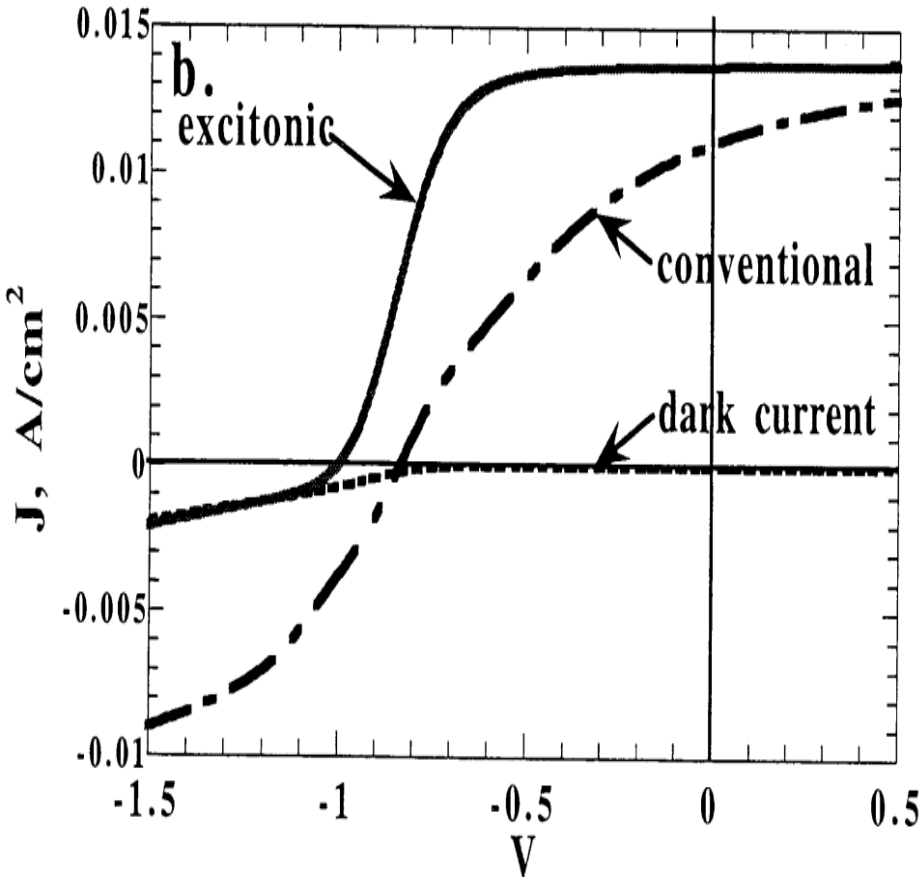


- Η τάση ανοιχτού κυκλώματος **V_{oc}** δεν εξαρτάται από το ηλεκτρικό δυναμικό που είναι υπεύθυνο για τη κάμψη των ενεργειακών ζωνών, αλλά από τη δύναμη που δημιουργείται από το διεπιφανειακό διαχωρισμό φορτίου.

- Ag λίγο πιο θετικό έργο εξόδου από το ITO.
- In αρνητικό έργο εξόδου.



Απόδοση εξιτονικών και φωτοβολταϊκών στοιχείων



-Τα εξιτόνια βελτιώνουν την απόδοση του στοιχείου καθώς η κλίση του χημικού δυναμικού $\nabla\mu_{hv}$

λειτουργεί σύμφωνα με τάση λόγω κάμψης

ζωνών **Vbi**, διαχωρίζοντας τους δυο φορείς σε αντίθετες κατευθύνσεις.

-Στους συμβατικούς ημιαγωγούς συμβαίνει το αντίθετο.

-Στις νανοδομές τριών διαστάσεων δεν είναι πλήρως γνωστοί οι παράγοντες που επηρεάζουν την επανασύνδεση των φορέων για να αυξηθεί η συνολική απόδοση του στοιχείου.



Υψηλότερες αποδόσεις φωτοβολταϊκών κυψελίδων

Table I. Confirmed terrestrial cell and submodule efficiencies measured under the global AM1.5 spectrum (1000 Wm^{-2}) at 25°C

Classification ^a	Effic. ^b (%)	Area ^c (cm ²)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF ^d (%)	Test Centre ^e (and Date)	Description
<u>Silicon</u>							
Si (crystalline)	24.7 ± 0.5	4.00 (da)	0.706	42.2	82.8	Sandia (3/99)	UNSW PERL ¹⁴
Si (multicrystalline)	20.3 ± 0.5	1.002 (ap)	0.664	37.7	80.9	NREL (5/04)	FhG-ISE ¹⁵
Si (thin film transfer)	16.6 ± 0.4	4.017 (ap)	0.645	32.8	78.2	FhG-ISE (7/01)	U. Stuttgart (45 μm thick) ¹⁶
Si (thin film submodule)	9.4 ± 0.3	94.9 (ap)	0.493^f	26.0^f	73.1	Sandia (4/06)	CSG Solar (1–2 μm on glass; 20 cells)⁵
<u>III–V Cells</u>							
GaAs (crystalline)	25.1 ± 0.8	3.91 (t)	1.022	28.2	87.1	NREL (3/90)	Kopin, AlGaAs window ¹⁷
GaAs (thin film)	24.5 ± 0.5	1.002 (t)	1.029	28.8	82.5	FhG-ISE (5/05)	Radboud U., NL ¹⁸
GaAs (multicrystalline)	18.2 ± 0.5	4.011 (t)	0.994	23.0	79.7	NREL (11/95)	RTI, Ge substrate ¹⁹
InP (crystalline)	21.9 ± 0.7	4.02 (t)	0.878	29.3	85.4	NREL (4/90)	Spire, epitaxial ²⁰
<u>Thin Film Chalcogenide</u>							
CIGS (cell)	18.4 ± 0.5^g	1.04 (ap)	0.669	35.7	77.0	NREL (2/01)	NREL, CIGS on glass ²¹
CIGS (submodule)	16.6 ± 0.4	16.0 (ap)	0.661 ^f	33.4 ^f	75.1	FhG-ISE (3/00)	U. Uppsala, 4 serial cells ²²
CdTe (cell)	16.5 ± 0.5^g	1.032 (ap)	0.845	25.9	75.5	NREL (9/01)	NREL, mesa on glass ²³
<u>Amorphous/Nanocrystalline Si</u>							
Si (amorphous) ^h	9.5 ± 0.3	1.070 (ap)	0.859	17.5	63.0	NREL (4/03)	U. Neuchatel ²⁴
Si (nanocrystalline)	10.1 ± 0.2	1.199 (ap)	0.539	24.4	76.6	JQA (12/97)	Kaneka (2 μm on glass) ²⁵
<u>Photochemical</u>							
Dye sensitised	10.4 ± 0.3	1.004 (ap)	0.729	21.8	65.2	AIST (8/05)	Sharp ²⁶
Dye sensitised (submodule)	6.3 ± 0.2	26.5 (ap)	6.145	1.70	60.4	AIST (8/05)	Sharp⁶
<u>Organic</u>							
Organic polymerⁱ	3.0 ± 0.1	1.001 (ap)	0.538	9.68	52.4	AIST (3/06)	Sharp, fullerene derivative⁷
<u>Multijunction Devices</u>							
GaInP/GaAs/Ge	32.0 ± 1.5	3.989 (t)	2.622	14.37	85.0	NREL (1/03)	Spectrolab (monolithic)
GaInP/GaAs	30.3	4.0 (t)	2.488	14.22	85.6	JQA (4/96)	Japan Energy (monolithic) ²⁷
GaAs/CIS (thin film)	25.8 ± 1.3	4.00 (t)	—	—	—	NREL (11/89)	Kopin/Boeing (4 terminal) ²⁸
a-Si/ $\mu\text{c-Si}$ (thin submodule) ^j	11.7 ± 0.4	14.23 (ap)	5.462	2.99	71.3	AIST (9/04)	Kaneka (thin film) ²⁹



Βέλτιστη δομή ζώνης των υλικών

1. Απορρόφηση
μεγαλύτερη του 98%
όλων των φωτονίων
πάνω από το
ενεργειακό χάσμα

2. Συγκέντρωση
μεγαλύτερη του 98%
όλων των
παραγόμενων
φορέων

3. Voc μεγαλύτερη
τιμή από το 93% της
μέγιστης θεωρητικής

4. FF μεγαλύτερη τιμή
από το 90% της
μέγιστης θεωρητικής



Πλεονεκτήματα

Συμβατικά φωτοβολταϊκά

- Ενεργειακά χάσματα που ταιριάζουν καλύτερα στο ηλιακό φάσμα
- Υψηλότερες κινητικότητες φορέων

Excitonic ESC

- Φθηνότερα
- Ηλεκτρικό και χημικό δυναμικό μετακινούν τους φορείς σε αντίθετες κατευθύνσεις
- Μπορούμε να πετύχουμε συγκρίσιμη απόδοση
- Η φωτογέννεση γίνεται στη διεπιφάνεια
- Μεταφορά της ενέργειας του εξιτονίου μέσω αλληλεπίδρασης με την ακτινοβολία (Quantum Field Theory)



Βιβλιογραφία

- [1]: **Multiple exciton generation enhances a working solar cell**, Johanna L. Miller, American Institute of Physics. <http://www.physicstoday.org/>
- [2]: **Solar energy conversion**, George W. Crabtree and Nathan S. Lewis
- [3]: **Excitonic Solar Cells**, Brian A. Gregg, *National Renewable Energy Laboratory, 1617 Cole Boule Vard, Golden, Colorado 80401-3393* Received: December 3, 2002; In Final Form: March 3, 2003
- [4]: **Fundamentals of Solar Cells**, Fahrenbruch, A. L.; Bube, R. H. Academic Press: New York, 1983
- [5]: **Exciton Multiplication and Relaxation Dynamics in Quantum Dots: Applications to Ultrahigh-Efficiency Solar Photon Conversion**, A. J. Nozik, *Center for Basic Sciences, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado 80401*
- [6]: **NANOSTRUCTURED SOLAR CELLS FOR HIGH EFFICIENCY PHOTOVOLTAICS**, Christiana B. Honsberg, Allen M. Barnett, Douglas Kirkpatrick, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Delaware, Newark, DE, USA
- [7]: **Οργανικά Φωτοβολταϊκά**, Τμήμα Ηλεκτρολογίας & Κέντρο Τεχνολογίας Υλικών και Λείζερ, ΤΕΙ Κρήτης, Ε. Κουδουμάς
- [8]: **Αλληλεπίδραση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με νανοδομημένους ημιαγωγούς**, Βασίλειος Σ. Καπακλής, Διδακτορική Διατριβή, Πάτρα, Μάιος 2006
- [9]: **Οργανικά υλικά για κατασκευή εύκαμπτων οθονών**, Βασιλοπούλου Μαρία, Θερινό Σχολείο-EΚΕΦΕ «Δημόκριτος», Ιούλιος 2005
- [10]: **Introduction to Solid State Physics**, Charles Kittel



Βιβλιογραφία

[11]: **Κβαντικές Τελείες Ημιαγωγών**, Διπλωματική Εργασία, Βασσάλου Ελένη, Επιβλέπων Καθηγητής: Γ.Ράπτης

[12]: **ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΝΑΝΟΔΟΜΩΝ ΠΥΡΙΤΙΟΥ**, ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΞΥΔΗ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ, Επιβλέπων Καθηγητής: Νικόλαος Στεφάνου

[13]: **ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ**, ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ, ΚΛΑΨΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, Επιβλέπων Καθηγητής: ΚΥΜΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

[14]: **Σημειώσεις Φυσικής Συμπυκνωμένης Ύλης**, ΕΜΠ 2011, Γ.Ράπτης

[15] : **Excitonic Solar Cells: The Challenges of Efficiency and Durability**, National Renewable Energy Laboratory, Garry Rumbles, Chemical and Biosciences Center, NREL, Golden, Colorado



Excitonic Solar Cells

“Η πρόκληση της απόδοσης και της διάρκειας”

Κοψαλής Γιάννης

“Ευχαριστώ πολύ για τη προσοχή σας”

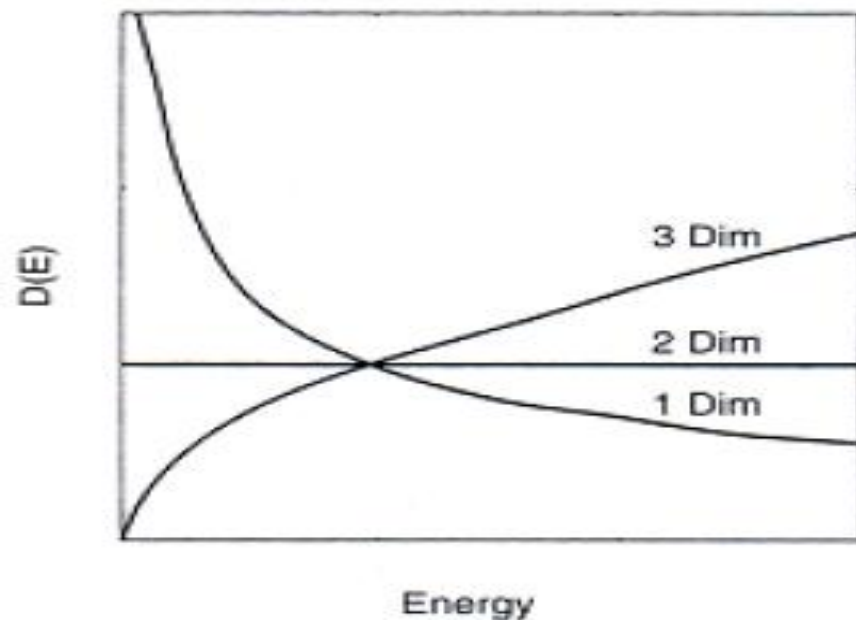


Παράρτημα: Πυκνότητα Καταστάσεων και Ενέργεια

-Η πυκνότητα καταστάσεων δίνεται από τη σχέση

$$D(E)=dN/dE.$$

Διάσταση	Μοναδιαία κυψελίδα στον k-χώρο	Περιοχή Fermi	Πλήθος ηλεκτρονίων N	Πυκνότητα καταστάσεων D(E)
1	$2\pi/L$	$2k_F$	$\frac{2L}{\pi} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{1/2} E^{1/2}$	$\frac{1}{\pi} \left(\frac{m}{\hbar^2} \right)^{1/2} E^{-1/2}$
2	$(2\pi/L)^2$	πk_F^2	$\frac{L^2}{2\pi} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right) E$	$\frac{2m}{\pi \hbar^2}$
3	$(2\pi/L)^3$	$4\pi k_F^3/3$	$\frac{L^3}{3\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} E^{3/2}$	$\frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} E^{1/2}$



-Διαφορές στη πυκνότητα καταστάσεων οδηγούν σε διαφορετικές ηλεκτρονικές, θερμικές και οπτικές ιδιότητες των ημιαγωγών.