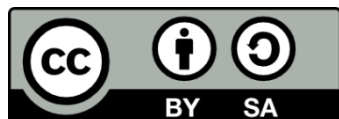




ΗΜΙΑΓΩΓΑ ΥΛΙΚΑ: ΘΕΩΡΙΑ-ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Μέρος 2^ο: Αρχές λειτουργίας των ημιαγωγικών διατάξεων
Ενότητα 14^η: Δίοδος σήραγγας. Δίοδος φωτοεκπομπής (LED).
Φωτοδίοδος. Φωτοβολταϊκά.

Γεώργιος Λιτσαρδάκης
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
& Μηχανικών Υπολογιστών



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



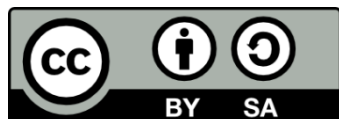
Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη 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.





14. Δίοδος σήραγγας. Δίοδος φωτοεκπομπής (LED). Φωτοδίοδος. Φωτοβολταϊκά.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



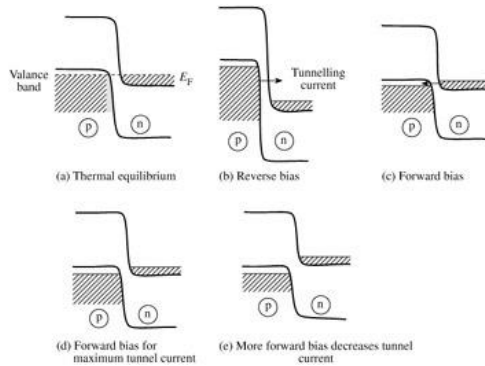
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Περιεχόμενα ενότητας

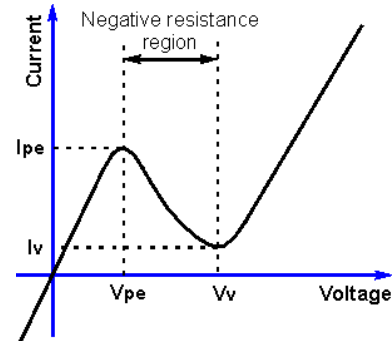
1. Δίοδος σήραγγας.
2. Δίοδος φωτοεκπομπής (LED).
3. Φωτοδίοδος, εφαρμογές φωτοδιόδων, φωτονικά υλικά.
4. Ηλιακά κύτταρα, εφαρμογές φωτοβολταϊκών, φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας, φωτοβολταϊκά υλικά.



Δίοδος σήραγγας



http://images.books24x7.com/bookimages/id_12573/fig192_01.jpg
<http://pixshark.com/tunnel-diode-structure.htm>



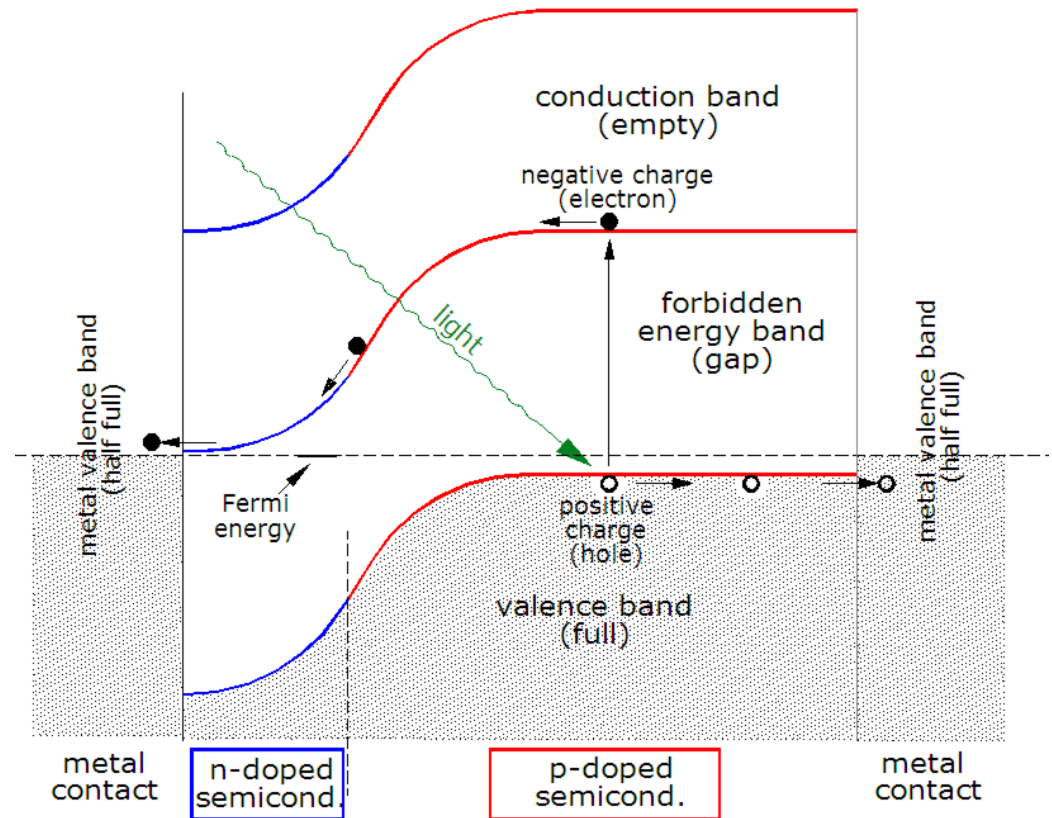
<http://www.radio-electronics.com/info/data/semicond/tunnel-diode/tunnel-diode-characteristic.gif>
<http://www.radio-electronics.com/info/data/semicond/tunnel-diode/theory-operation.php>

- Στους εκφυλισμένους ημιαγωγούς (ισχυρή πρόσμιξη) η στάθμη Fermi E_{Fn} βρίσκεται μέσα στη ζώνη αγωγιμότητας, το πλάτος της επαφής W είναι μικρό, ενώ το ύψος του φράγματος δυναμικού V_o μεγάλο.
- ηλεκτρόνια διαπερνούν το φράγμα με φαινόμενο σήραγγας
Το ρεύμα μεταβάλλεται γραμμικά
- Περιοχή με αρνητική δυναμική αντίσταση της διόδου dV/dI



Δίοδος φωτοεκπομπής (LED)

- Η δίοδος φωτοεκπομπής έχει μια στάθμη πρόσμιξης E_L πολύ κοντά στη ζώνη αγωγιμότητας.
- Τα ηλεκτρόνια της περιοχής n που εγχύονται στην περιοχή p (ρεύμα διάχυσης) πηγαίνουν και στη στάθμη E_L .
- Από την E_L αποδιεγείρονται εκπέμποντας ακτινοβολία
- Χρησιμοποιούνται ημιαγωγοί GaAs, GaP και Ga(As,P) που δίνουν υπέρυθρο και ορατό ($\lambda \approx 430-670$ nm, $E_g \approx 3.0-1.9$ eV).



Πηγή:

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/77/BandDiagramSolarCell-en.png>
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BandDiagramSolarCell-en.png>

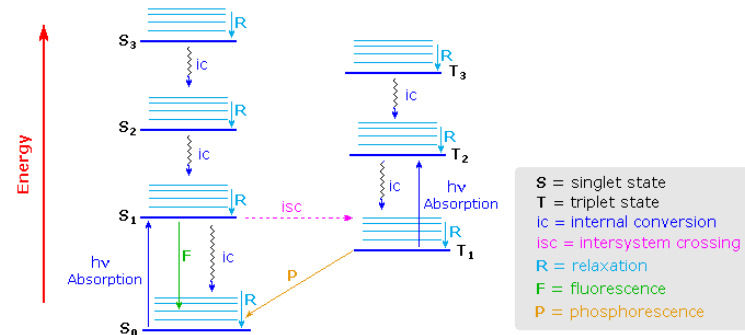


Οργανικά LED

- πλεονεκτήματα
 - Χαμηλή κατανάλωση
 - Μικρότερες διαστάσεις
 - Μεγαλύτερη φωτεινότητα
 - Απλούστερη κατασκευή

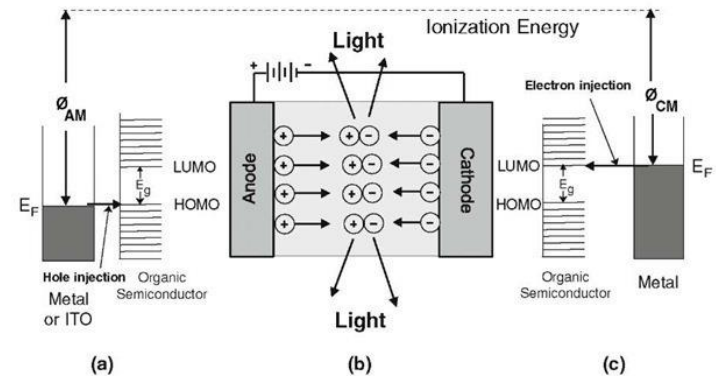
- Ενεργειακές στάθμες μοριακών τροχιακών (MO) LU-HO

A Jablonski Diagram



Πηγή:

<https://www2.chemistry.msu.edu/faculty/reusch/VirtTxtJml/Images2/jablonski.gif>
<https://www2.chemistry.msu.edu/faculty/reusch/VirtTxtJml/photchem.htm>



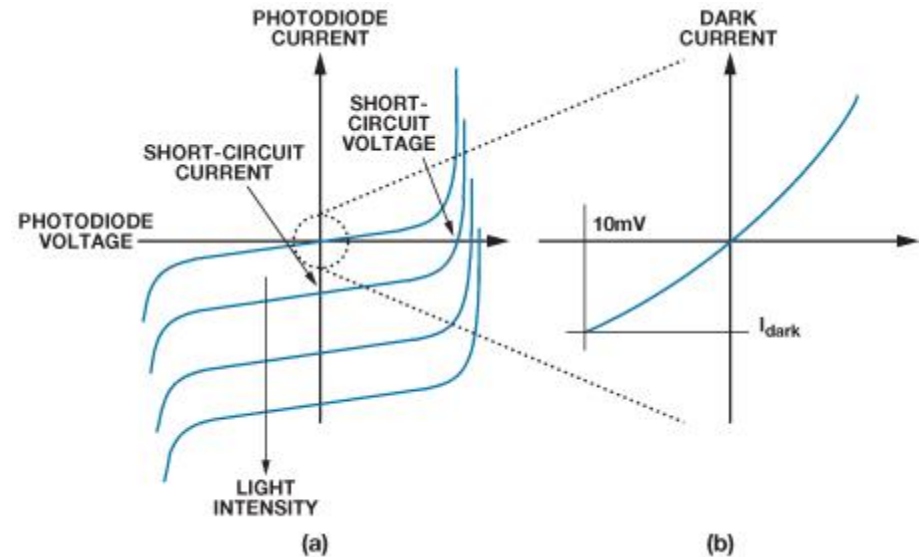
Πηγή:

http://what-when-how.com/wp-content/uploads/2011/07/tmp8294_thumb22222.jpg
<http://what-when-how.com/electronic-properties-of-materials/applications-optical-properties-of-materials-part-6/>



φωτοδίοδος

- το ανάστροφο ρεύμα εξαρτάται από τη γένεση φορέων στη μεταβατική περιοχή
- ⇒ το ανάστροφο ρεύμα αυξάνεται με την οπτική έγχυση



Πηγή:

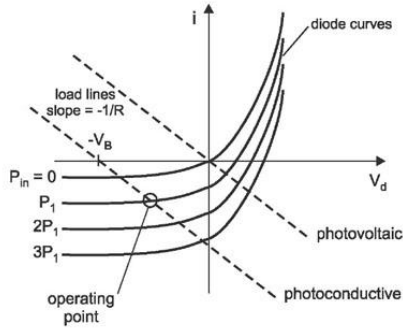
http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/47-05/4705-02_fig02.jpg

<http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/47-05/pgtia.html>

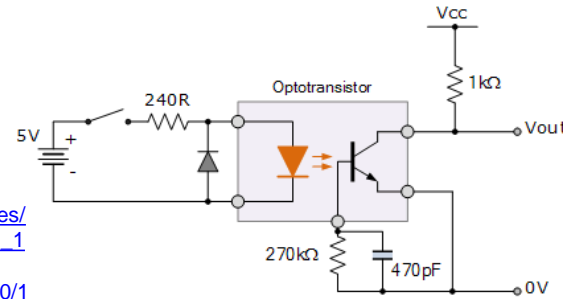
- $I = I_s[\exp(eV/kT)-1]-I_L$



Εφαρμογές φωτοδιόδων



Πηγή:
http://www.globalspec.com/RefArticleImages/9FFA076C5D8F886C319E944239368CA0_14_01_Photonics_and_Lasers-4.jpg
<http://www.globalspec.com/reference/21440/160210/chapter-14-1-biasing-the-photodiode>

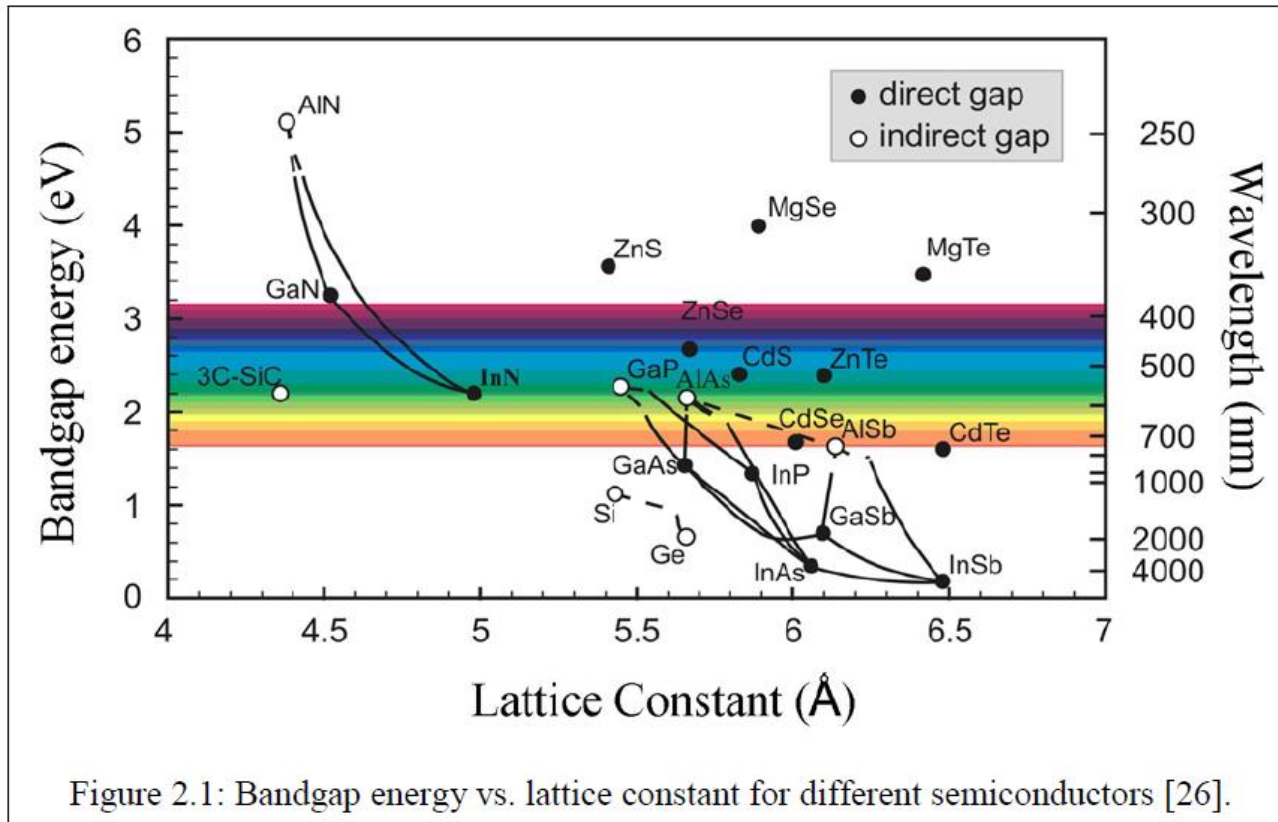


Πηγή:
<http://www.electronics-tutorials.ws/articles/opto5.gif?81223b>
<http://www.electronics-tutorials.ws/blog/optocoupler.html>

- **φωτοανιχνευτής:** το ρεύμα είναι ανεξάρτητο της τάσης και καθορίζεται από την ένταση της ακτινοβολίας
- **ηλεκτρική απομόνωση :** Ο συνδυασμός LED και φωτοανιχνευτή επιτρέπει σύζευξη μεταξύ δύο τμημάτων ενός κυκλώματος με ηλεκτρική απομόνωση (*optocoupler* ή *optoisolator*)



Φωτονικά υλικά

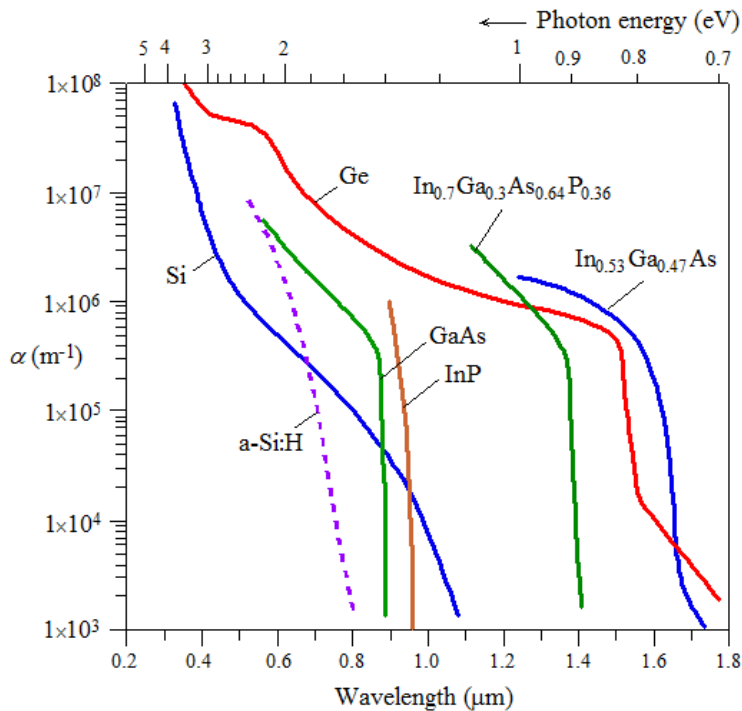


Πηγή: [PDF] [Shalini Gupta Thesis, smartech.gatech.edu](#)

https://www.google.gr/search?q=organic+led+excitation&rlz=1C1SFYN_enGR532GR532&espv=2&biw=1164&bih=848&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0CAYQ_AUoAWoVChMltv6_nuPdyAIVwxlsCh1Atwpl#tbm=isch&q=photronics+graph+band+gap+energy+vs+lattice+constant&imgrc=55EO4U2aE6a2TM%3A



Απορρόφηση ακτινοβολίας



Πηγή:

http://www.hamamatsu.com/sp/hc/osh/osh_0103_001_figure03.gif
http://www.hamamatsu.com/us/en/community/optical_sensors/tutorial_s/physics_of_mppc/index.html?utm_source=googleplus&utm_medium=social&utm_campaign=hc-social

- $I_L = I_{\text{inc}} \exp(-\alpha x)$
- Η ικανότητα απορρόφησης καθορίζεται από τον συντελεστή α

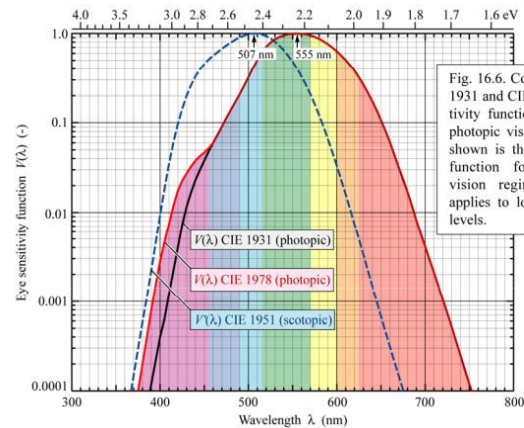
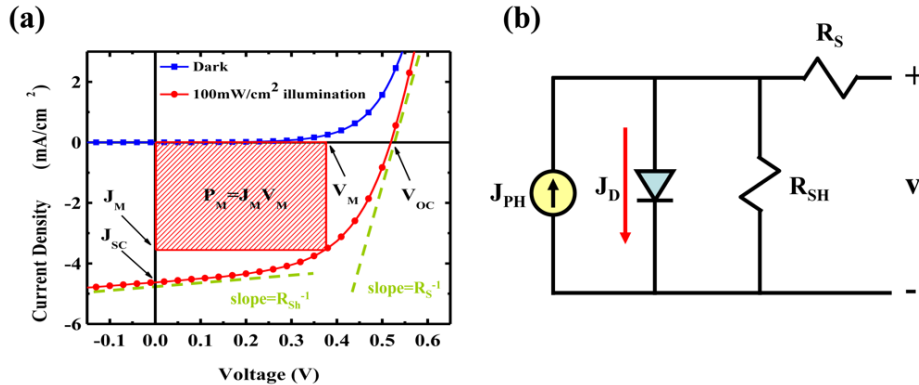


Fig. 16.6. Comparison of CIE 1931 and CIE 1978 eye sensitivity functions $V(\lambda)$ for the photopic vision regime. Also shown is the eye sensitivity function for the scotopic vision regime, $V'(\lambda)$, that applies to low ambient light levels.

Πηγή: <http://i.stack.imgur.com/RjLCm.png>
<http://photo.stackexchange.com/questions/11209/why-are-sensors-less-sensitive-to-blue-light>

Ηλιακά κύτταρα



Τεταρτημόρια λειτουργίας φωτοβολταϊκής κυψέλης.

(a) Typical J - V characteristic of a PV device in dark condition and under illumination;

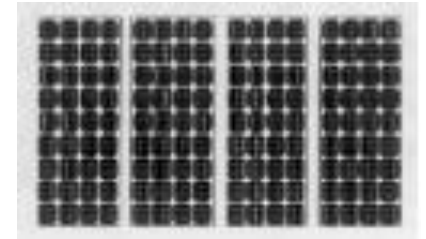
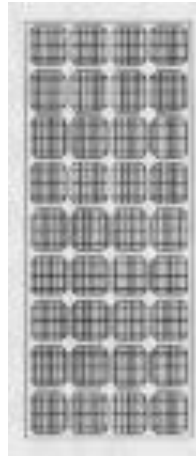
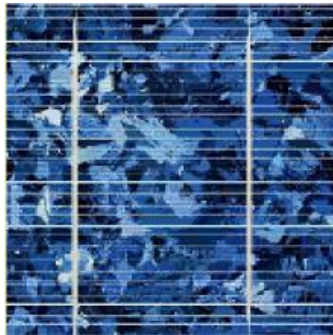
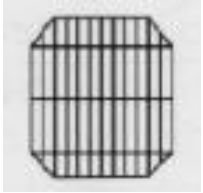
(b) Equivalent circuit model of the PV device, which consists of a photocurrent source, a Shockley or p-n junction diode which present the J_D , R_S , and R_{SH} .

Πηγή: Int. J. Mol. Sci. 2011, 12(1), 476-505;
doi:10.3390/ijms12010476 Review High Photoelectric Conversion Efficiency of Metal Phthalocyanine/Fullerene Heterojunction Photovoltaic Device, Chi-Feng Lin 1, Mi Zhang 2, Shun-Wei Liu 3,* , Tien-Lung Chiu 2,* and Jiun-Haw Lee 1
http://www.mdpi.com/ijms/ijms-12-00476/article_deploy/html/images/ijms-12-00476f2-1024.png,
<http://www.mdpi.com/1422-0067/12/1/476/html>

- Όταν η φωτοδίοδος λειτουργεί στο τεταρτημόριο εκείνο του διαγράμματος I - V , όπου η τάση είναι θετική και το ρεύμα αρνητικό, τότε παρέχει ισχύ στο κύκλωμα (η ροή του ρεύματος στο κύκλωμα είναι από τη θετική πλευρά της διόδου προς την αρνητική, όπως στις μπαταρίες).
- μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια (ηλιακά κύτταρα)



Ηλιακά κύτταρα



Cell – module – panel – array
στοιχείο – πλαίσιο – ομάδα - συστοιχία

- μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια (ηλιακά κύτταρα)



Τομείς εφαρμογής φωτοβολταϊκών

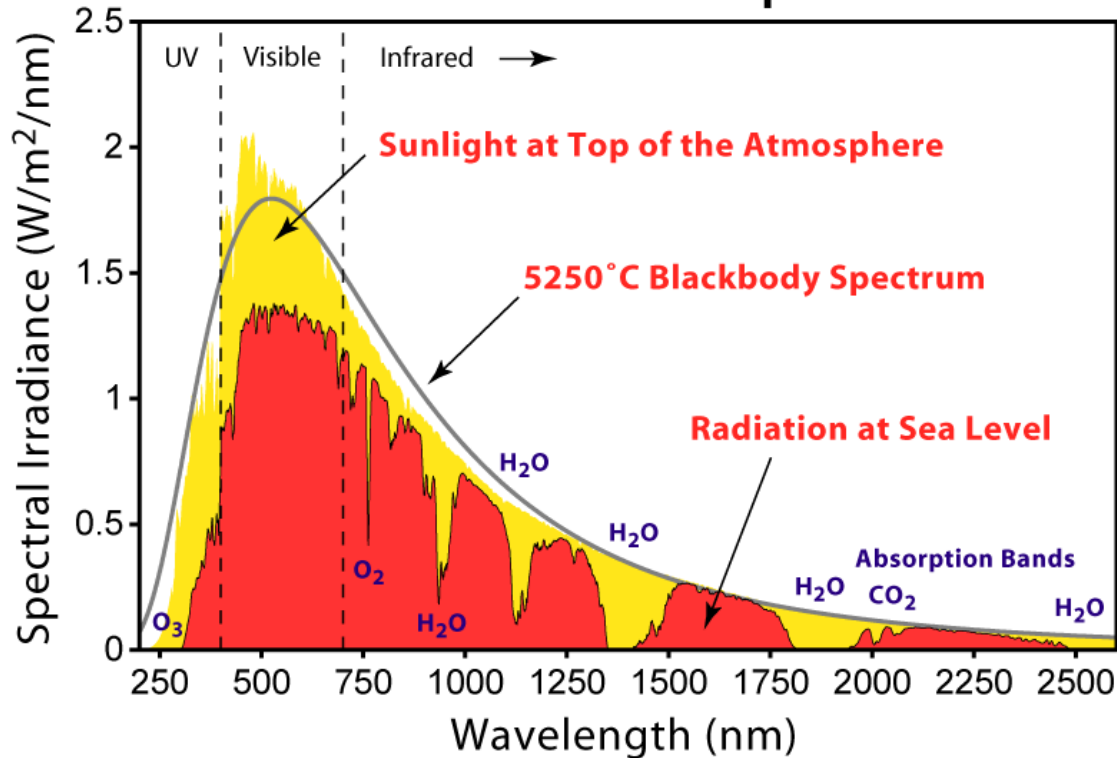
For PV the following major market segments can be distinguished

- Consumer
- Off-grid
 - Remote industrial
 - Rural electrification (Developing countries)
- On-grid
 - Building Integrated PV
 - PV Power plants (peak power)
 - Very Large Scale PV (VLSPV)



Φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας

Solar Radiation Spectrum



Κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας.

Πηγή: globalwarmingart.com - prepared by [Robert A. Rohde](http://www.globalwarmingart.com/images/4/4c/Solar_Spectrum.png)



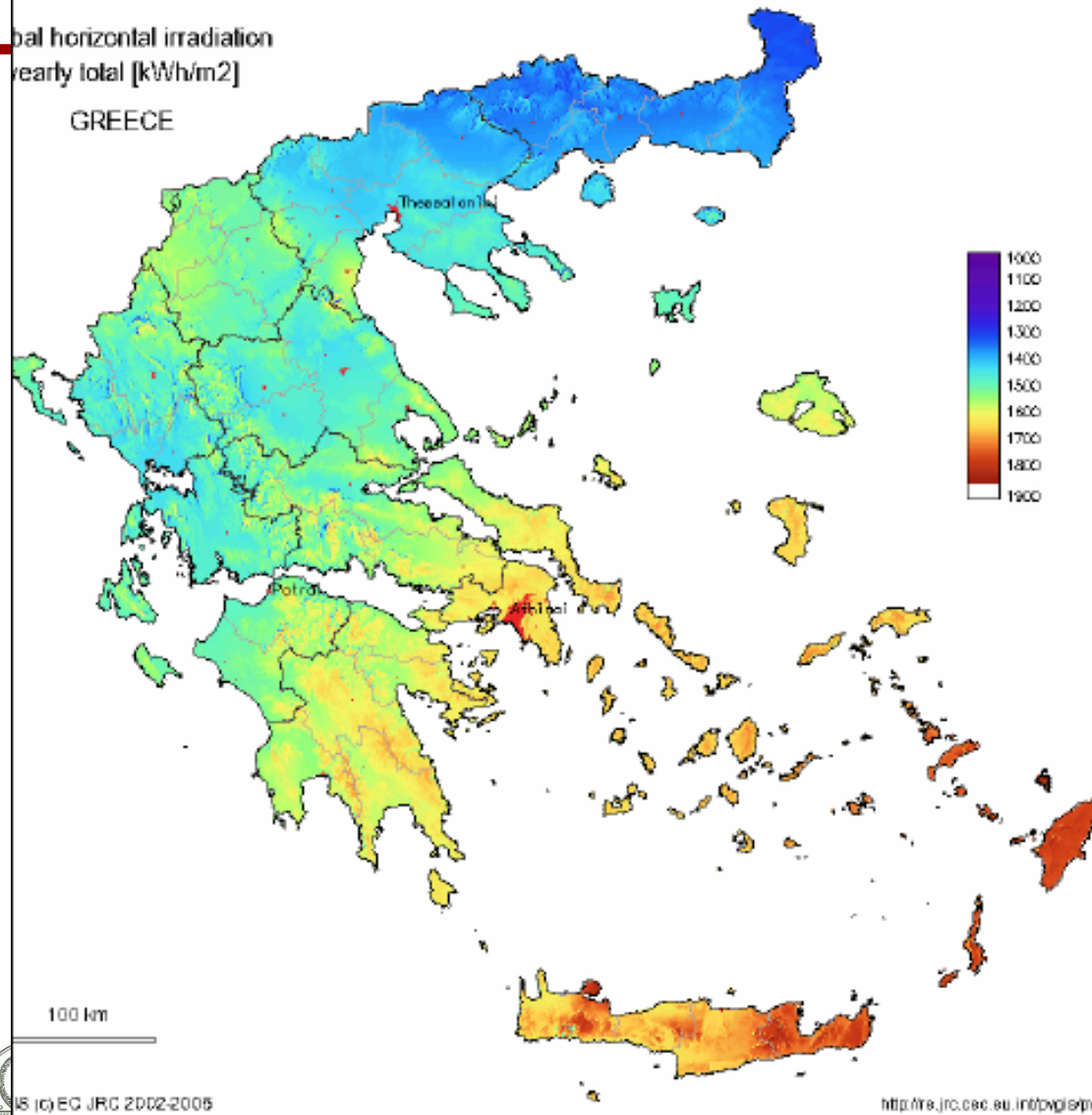
ΚΑΠΕ – Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Διεύθυνση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Τμήμα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Global horizontal irradiation
yearly total [kWh/m²]

GREECE



Μέση ετήσια ολική
ηλιακή ακτινοβολία
στο οριζόντιο επίπεδο
σε kWh/m²

Η μέση ετήσια προσπίπτουσα
ηλιακή ακτινοβολία στο
οριζόντιο επίπεδο στην
Ελλάδα κυμαίνεται
από 1.300 έως 1800 kWh/m²

Ενα Φ/Β σύστημα
ονομαστικής ισχύος 3 kWp
έχει την δυνατότητα
παραγωγής 4.500 kWh/έτος.

Αντιστοιχεί σε αποφυγή
παραγωγής 4,5 t CO₂ από
λιγνίτη.

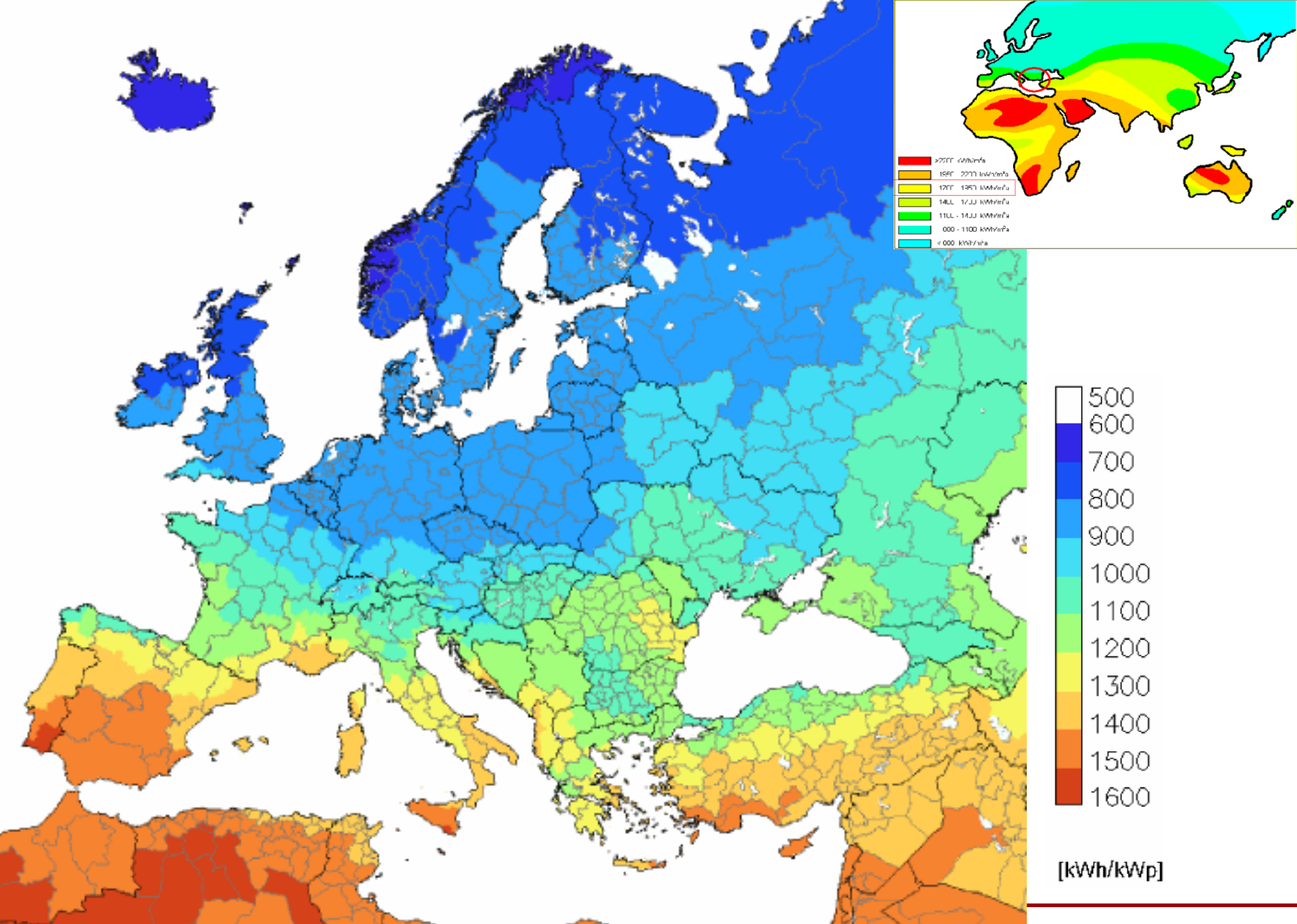
100 km

IS 10) EG JRC 2002-2005

<http://re.jrc.ec.eu.int/energy/>

Ημαγωγά Υλικά: Θεωρία - Διατάξεις




Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών

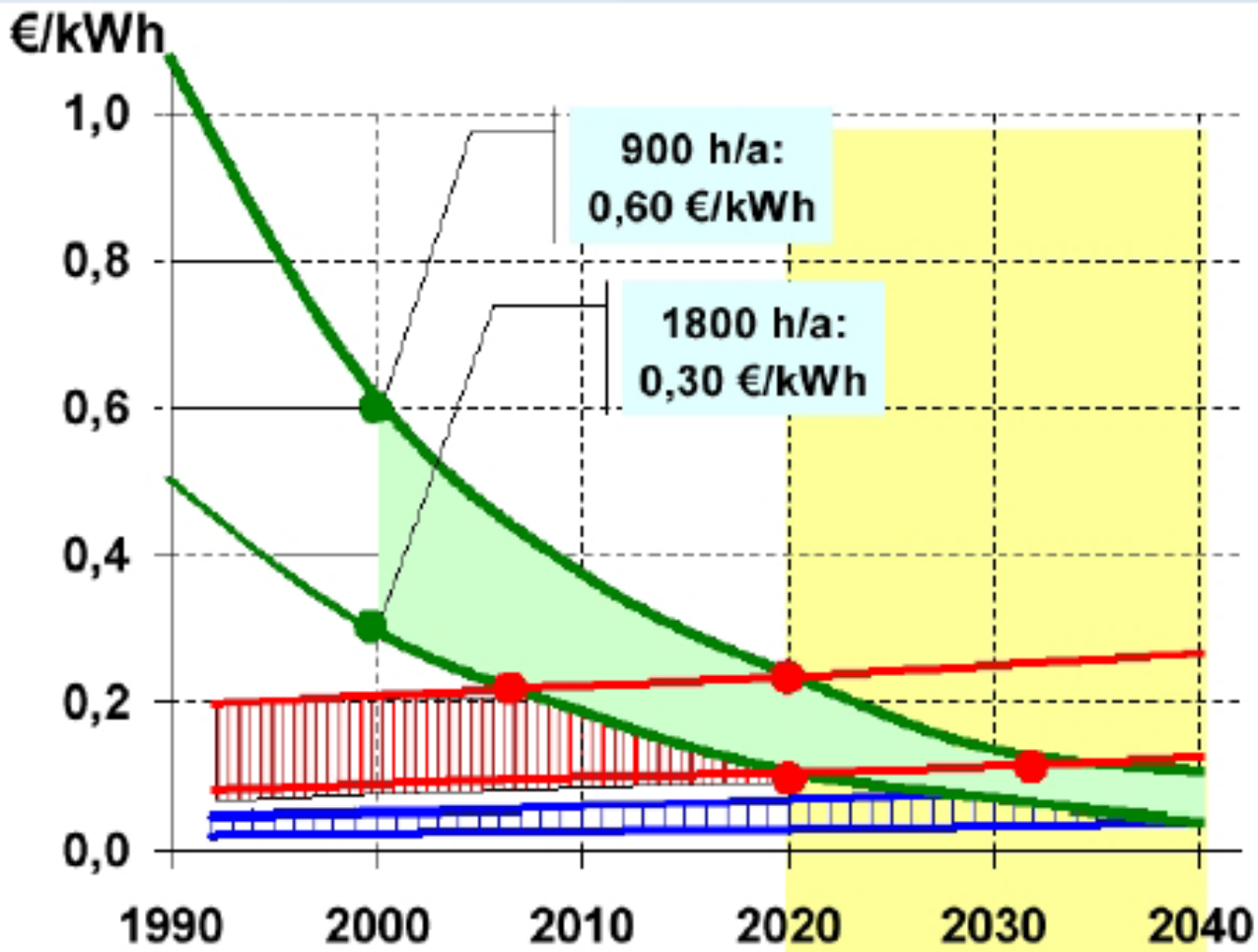


ηλιαγωγή Γλικα. Θεωρία - Διαταξεις

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών

Electricity Generating Cost for PV and utility prices

-  Photovoltaics
-  Utility peak power
-  Bulk power



Source: RWE Energie AG and RSS GmbH

Εκτιμώμενη εξέλιξη των τιμών κόστους παραγωγής ηλεκτρικής

Ημιαγωγή Υλικά: Θεωρία - Διατάξεις

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών

Κόστος μικρού συστήματος

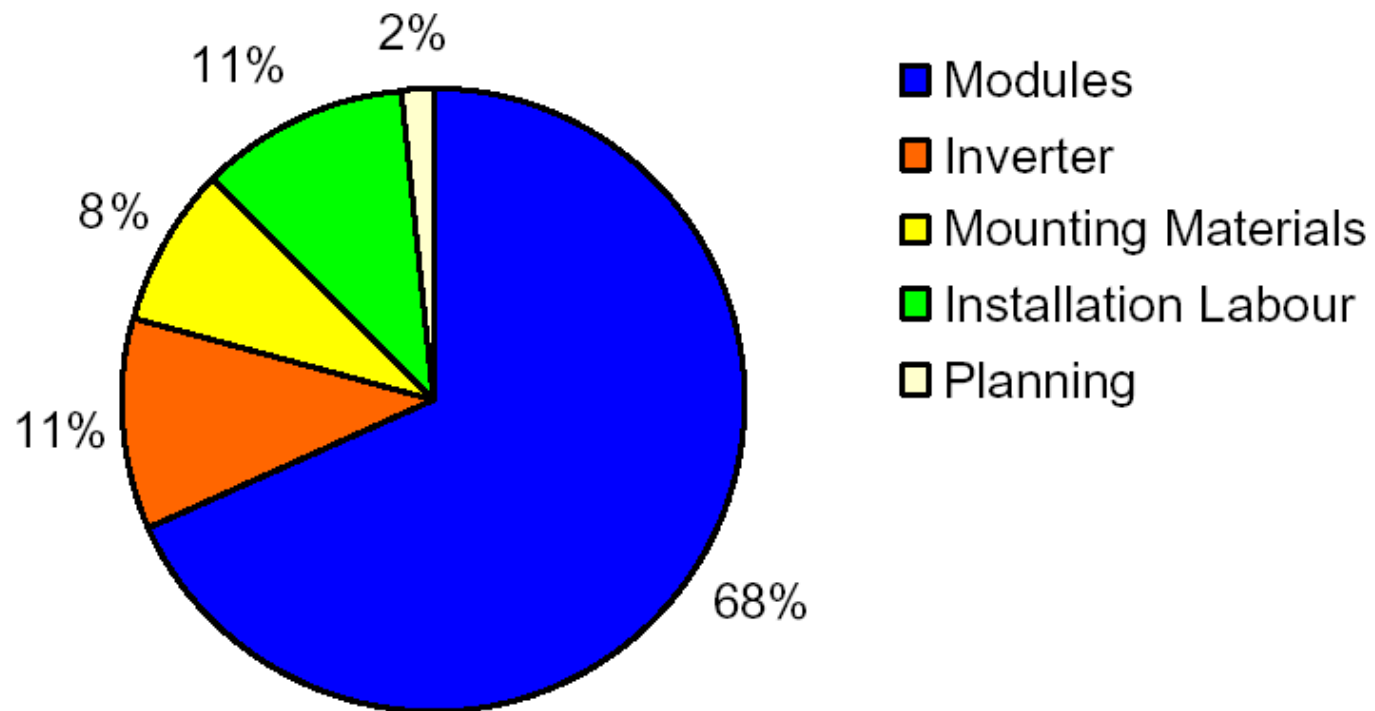


Figure 13: Cost distribution of a typical German rooftop system (2 kWp) (*Laukamp*)²⁷



Τυπικές αποδόσεις κλασικών φ/β συστημάτων

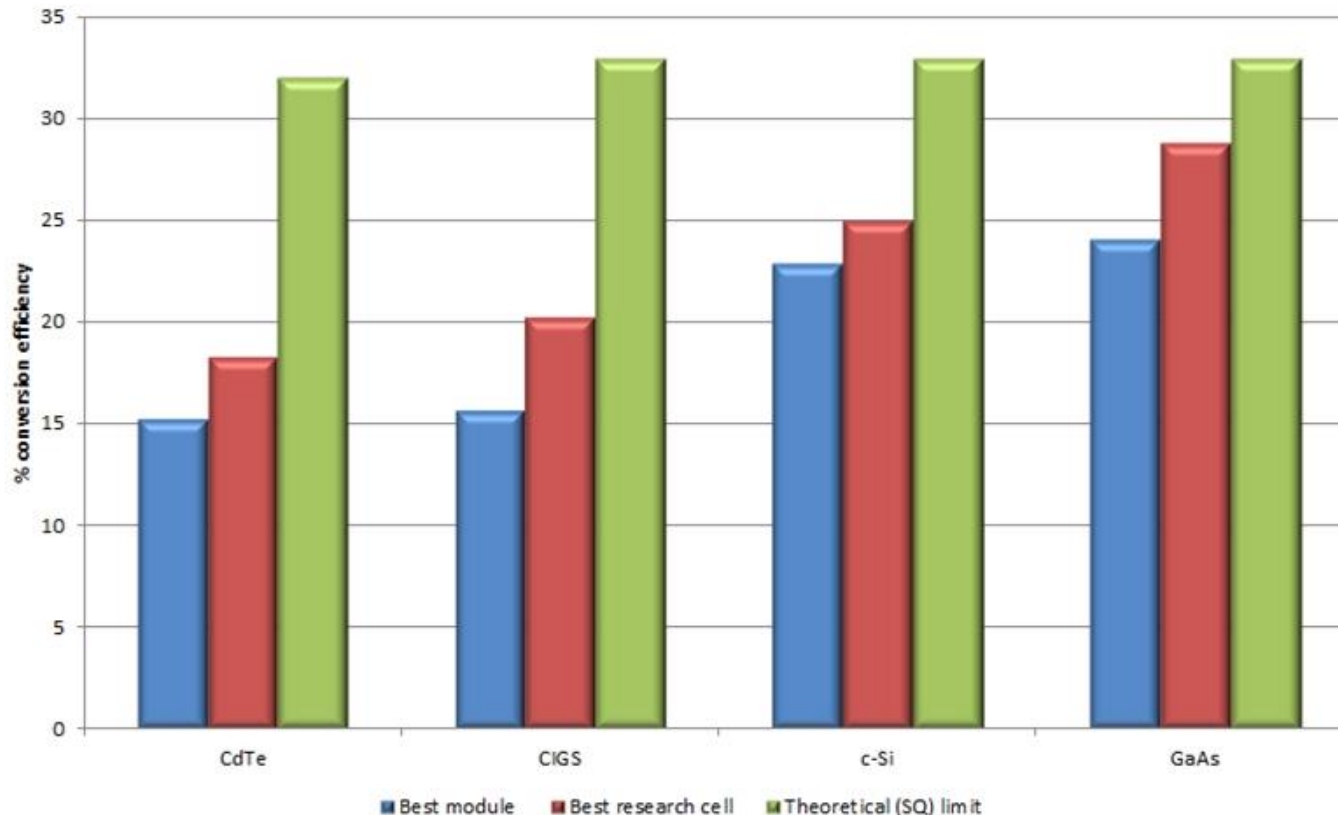
- Κρυσταλλικού Πυριτίου (Μόνο και Πόλυ): Απόδοση 11-18%.
(Ένα πλαίσιο επιφάνειας 1 m^2 παράγει 110 -180 Wp) *
- Αμόρφου Πυριτίου : 4 - 6% ($40\text{-}60 \text{ Wp/ m}^2$) *

* Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμών (ΠΣΔ): Θερμοκρασία = $25 \text{ }^\circ\text{C}$,
Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας = 1.000 W/m^2 , Αέρια μάζα = AM 1.5



Απόδοση ϕ/β υλικών

Theoretical maximum and demonstrated PV efficiencies

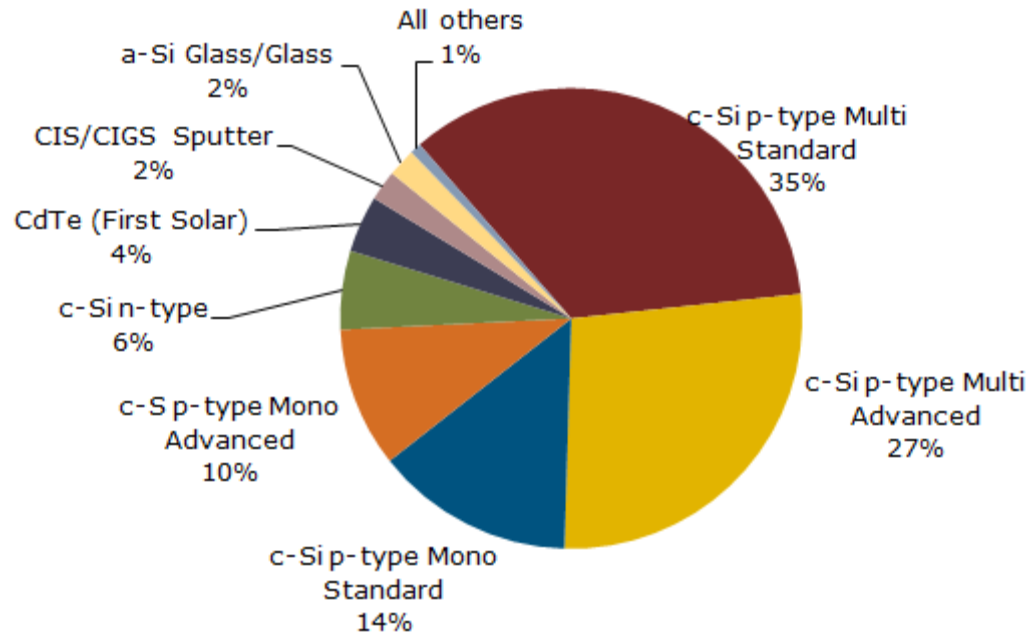


Απόδοση ΦΒ υλικών ανάλογα με τον τύπο τους.

Πηγή: DOE, <http://optics.org/news/4/1/39/PVefficiencies>



Παραγωγή φ/β (2014)

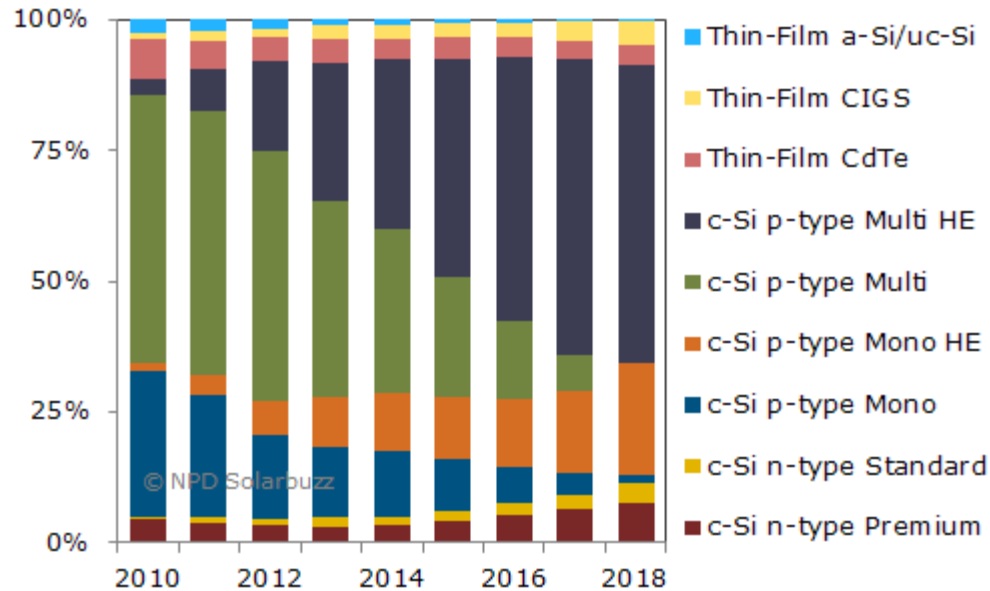


Παραγωγή ενέργειας από ΦΒ για το 2014 σε σχέση με την τεχνολογία τους.

Πηγή: NPD Solarbuzz [PV Equipment Quarterly](http://www.npd.com), <https://technology.ihs.com/ResearchAreas/450476/solar-supply-chain>,
<http://cleantechnica.com/2013/10/29/multicrystalline-silicon-modules-dominate-solar-pv-industry-2014/>



Production forecast for different technologies



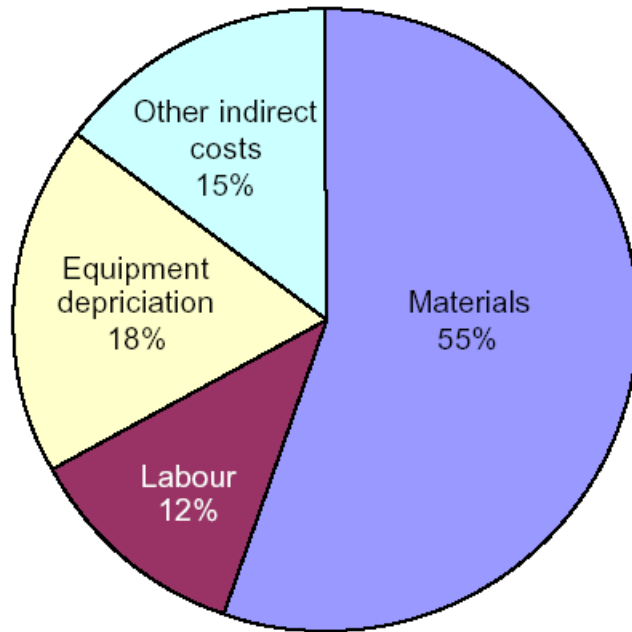
Πρόβλεψη Παραγωγής για διαφορετικούς τύπους τεχνολογιών ΦΒ κελιών.

Πηγή: NPD Solarbuzz,

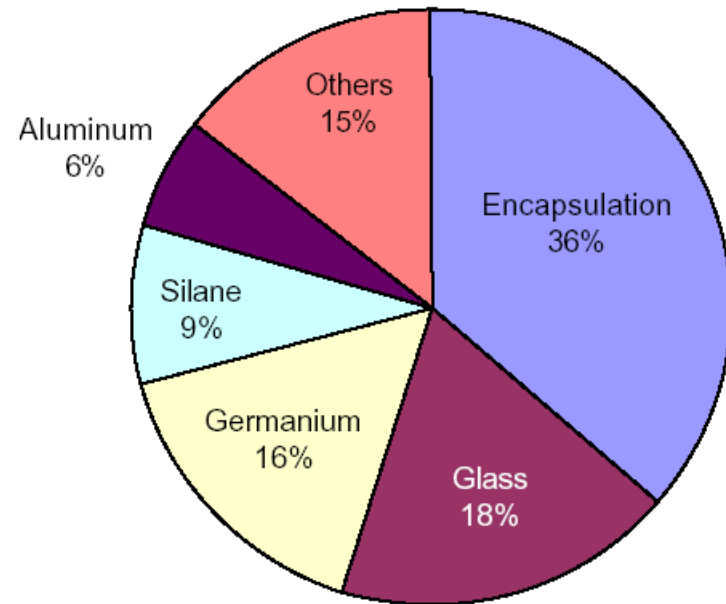
<http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/efficiency-enhancements-to-define-pv-technology-roadmap-100016778/#axzz3sCsh3vhP>



Κόστος υλικών για λεπτά φιλμ



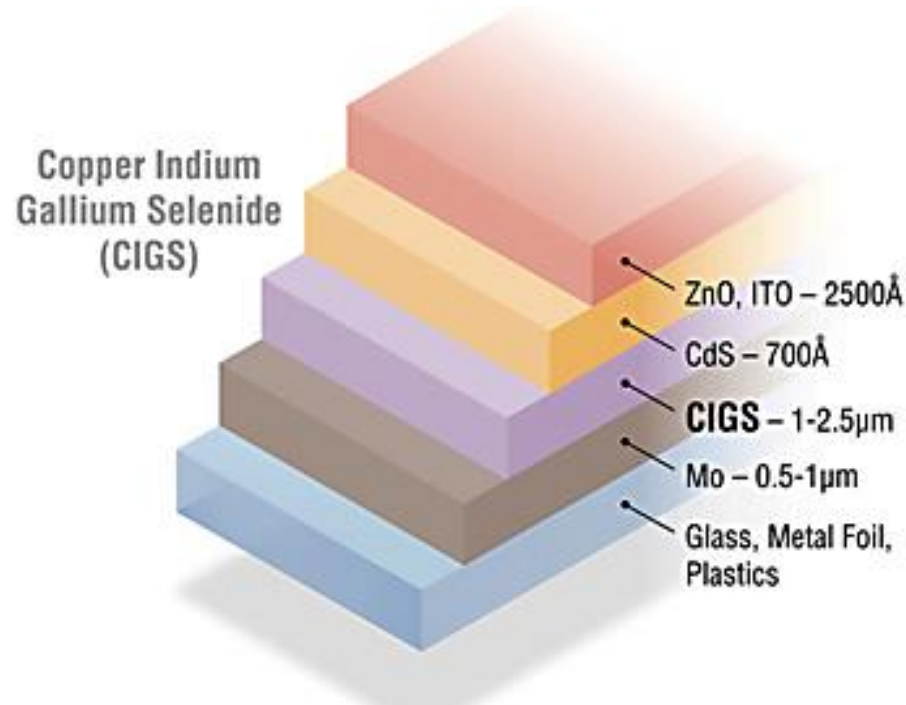
Cost breakdown a-Si/GeSi tandem modules



Material costs with window glass

Figure 9: Cost breakdown of amorphous silicon (Carlson and Wagner [29])²⁵
Estimated cost for 10MW production of a-Si/a-SiGe tandem modules

Tandem cells (dsc/CuInGaSe)



CIGS

(Left). Schematic illustration of a typical CdTe superstrate thin-film PV device. In this design, the layers of the device are deposited onto a glass "superstrate" that allows sunlight to enter. The sunlight passes through the glass and produces electrical current and voltage in the lower layers. The world-record NREL CdTe device is based on this structure and demonstrates a conversion efficiency of 17.0%. (Right). Schematic illustration of a typical CIGS substrate thin-film PV device. In this design, the layers of the device are deposited onto a glass, metal, or polymer substrate. Sunlight enters through the top layer of the device (the transparent conducting oxide) and produces electrical current and voltage in the lower layers. The world-record NREL CIGS device is based on this substrate structure and demonstrates a conversion efficiency of 20.0%.

Πηγή: National Renewable Energy Laboratory- Polycrystalline Thin-Film Materials and Devices R&D

http://www.nrel.gov/pv/images/graphic_cigs_cell.jpg

<http://www.nrel.gov/pv/thinfilm.html>

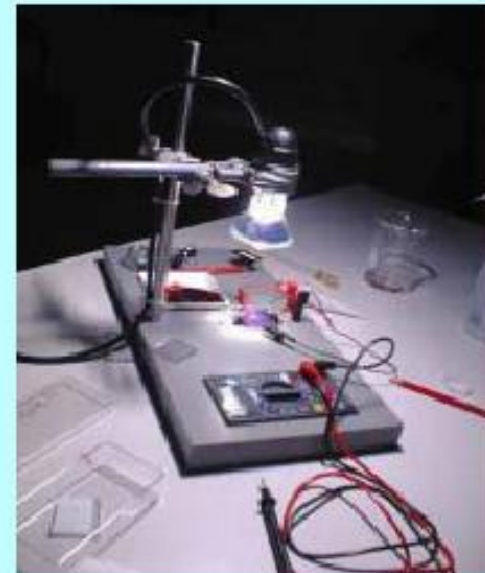


- **Dye-sensitised photochemical Solar Cells (DSC):** Since reported by Grätzel in 1991, these photovoltaic devices have improved considerably in reliability. These kind of cells use low-cost nanocrystalline titanium dioxide with a large effective area and organic dyes immersed in an electrolyte. Dye-cells have achieved 11% (0.25 cm²) and 8% on real devices [34]. The advantage of dye-cells is that they can be produced from potentially inexpensive materials and by simple production technology. The major challenge is to develop cells and modules for power applications, as that poses for this type of cells severe temperature conditions.
- **Conducting polymer cells:** These devices are based on the property of some organic materials to be conductive: “conjugated polymers”. Among the conductive polymers investigated, the most promising ones are the structures containing fullerene (C₆₀) as the acceptor material. Evident advantages of this technology are the expected low-cost manufacturing and the possibility to make solar cells by tailoring the required properties by modifications of the organic molecules. Challenges are to increase small area cell efficiencies (now >5% [35]) and stability under outdoor conditions.
- **Quantum solar cells** These cells use quantum confinement to modify the electronic structure in order to decouple current and voltage and thus increasing efficiency. The effect is demonstrated using III/V solar cells having layers with a thickness in the nanoscale range. The challenge is to find low-cost systems that can use the same principle.
- **Molecular organic solar cells** Based on the utilisation of organic molecules these cells have been studied during the last 30 years. Most recent tests in the lab with evaporated molecules gave efficiencies over 3% and the application of Schottky barriers based on doped pentacene molecules has reached 2% efficiency. Potential and challenges for these cells are similar to those described for conductive polymer solar cells.



Μπορείτε και σεις !

Students make their own cells



Ημιαγωγά Υλικά: Θεωρία - Διατάξεις

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών

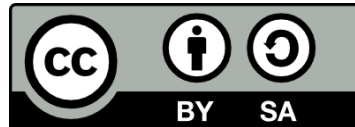
Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Λιτσαρδάκης Γεώργιος.
«Ημιαγωγά Υλικά: Θεωρία – Διατάξεις» Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2015.
Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:
<http://eclass.auth.gr/courses/OCRS463>.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Παρόμοια Διανομή [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».



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

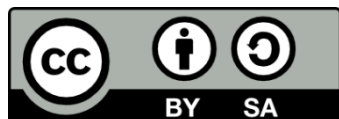
[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>





Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Καρανάσιος Νικόλαος
Θεσσαλονίκη, 2015



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ