

# Δίοδοι εκπομπής φωτός Light Emitting Diodes

Δ. Γ. Παπαγεωργίου  
Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών  
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

dparageo@cc.uoi.gr  
<http://pc164.materials.uoi.gr/dparageo>

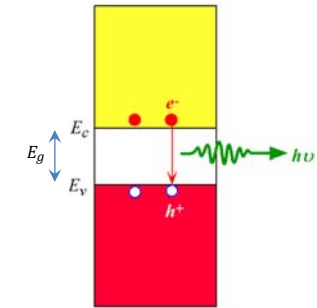
1

## Τι είναι η δίοδος εκπομπής φωτός (LED)

Δίοδος p-n από ημιαγωγό άμεσου ενεργειακού διακένου πχ GaAs, InP, CdS κ.α.

Η επανασύνδεση ΖΗΟ έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή φωτονίων  
Η ενέργεια των φωτονίων είναι ίση με το ενεργειακό διάκενο

$$E_g = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

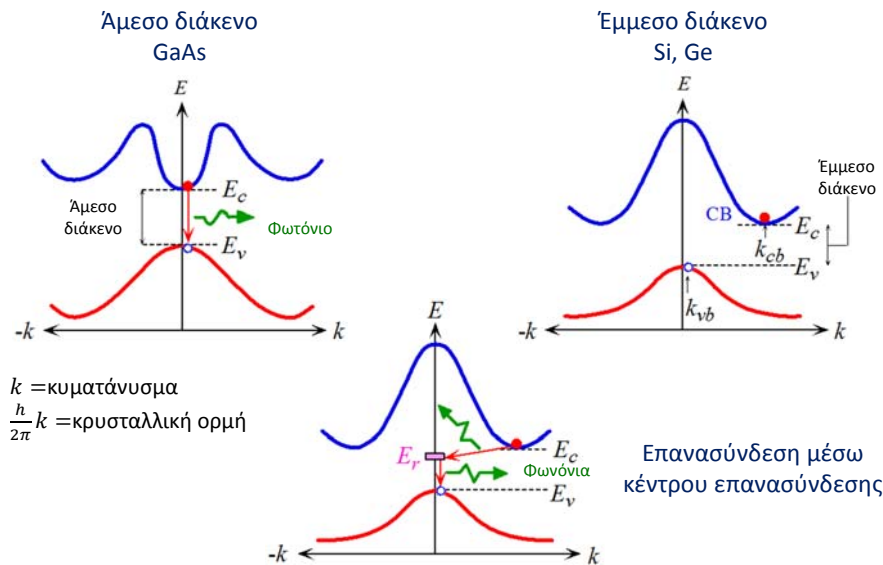


Ημιαγώγιμα και διηλεκτρικά υλικά

2

Δίοδοι εκπομπής φωτός

## Υπενθύμιση: Ημιαγωγοί άμεσου/έμμεσου διακένου

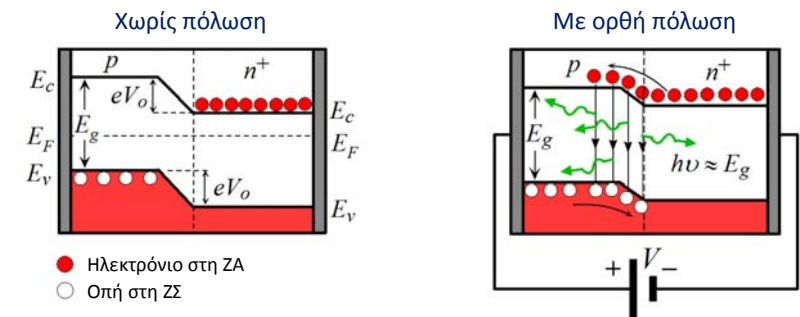


Ημιαγώγιμα και διηλεκτρικά υλικά

3

Δίοδοι εκπομπής φωτός

## Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών επαφής p-n



- Η ενέργεια Fermi είναι ίδια σε όλη τη διάταξη.
- Η περιοχή απογύμνωσης εκτείνεται κυρίως εντός της περιοχής p.

- Τα ηλεκτρόνια που εγχέονται προς την περιοχή p είναι πολύ περισσότερα από τις οπές που εγχέονται προς την περιοχή n.
- Η επανασύνδεση εντός της περιοχής p σε απόσταση  $L_h$  παράγει φωτόνια (ηλεκτροφωταύγεια έγχυσης).

Ημιαγώγιμα και διηλεκτρικά υλικά

4

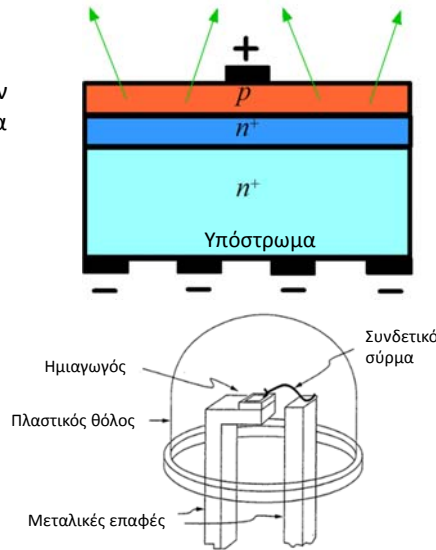
Δίοδοι εκπομπής φωτός

## Δομή ενός LED

Τα εκπεμπόμενα φωτόνια κινούνται σε τυχαίες διευθύνσεις.

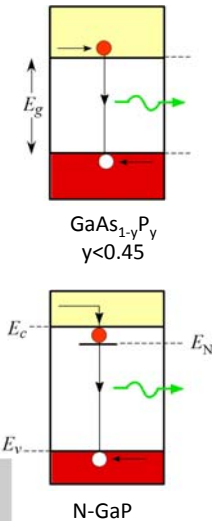
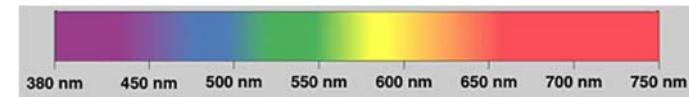
Η δομή του LED πρέπει να επιτρέπει την απομάκρυνση του φωτός χωρίς αυτό να απορροφάται ξανά.

Η περιοχή p πρέπει να είναι ρηχή ή να χρησιμοποιήσουμε διατάξεις **ετεροδομών**.



## Υλικά για την κατασκευή LED

- Υπάρχει πλήθος ημιαγώγιμων υλικών άμεσου διακένου.
- Σημαντική κατηγορία υλικών: **τριαδικά κράματα III-V** που προκύπτουν από κραμάτωση GaAs με GaP και συμβολίζονται  $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$
- Όταν  $y < 0.45$  έχουμε άμεσο διάκενο και μήκος κύματος 630nm ( $y=0.45$ ) μέχρι 870 ( $y=0$ ).
- Όταν  $y > 0.45$  έχουμε έμμεσο διάκενο.
  - Προσθέτουμε ισοηλεκτρονικές προσμίξεις (N) που δημιουργούν ενεργειακές καταστάσεις κοντά στη ζώνη αγωγιμότητας.
  - Η επανασύνδεση απελευθερώνει ενέργεια μικρότερη του  $E_g$  και δίνει μήκη κύματος: πράσινο, κίτρινο, πορτοκαλί.



## Απόδοση LED

Η **εξωτερική απόδοση** ενός LED ορίζεται ως

$$\eta_{εξ} = \frac{P_{εξ}(\text{οπτική})}{IV}$$

Είναι ένα μέτρο της απόδοσης της μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε εκπεμπόμενη φωτεινή ενέργεια.

Semiconductor	Active Layer	Structure	D or I	$\lambda$ (nm)	$\eta_{\text{external}}$ (%)	Comments
GaAs		DH	D	870-900	10	Infrared (IR)
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	$(0 < x < 0.4)$	DH	D	640-870	3-20	Red to IR
$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	$(y \approx 2.20x, 0 < x < 0.47)$	DH	D	1-1.6 $\mu\text{m}$	>10	LEDs in communications
$\text{In}_{0.49}\text{Al}_x\text{Ga}_{0.51-x}\text{P}$		DH	D	590-630	>10	Amber, green, red; high luminous intensity
InGaN/GaN	quantum well	QW	D	450-530	5-20	Blue to green
$\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$	$(y < 0.45)$	HJ	D	630-870	<1	Red to IR
$\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$	$(y > 0.45)$	HJ	I	560-700	<1	Red, orange, yellow (N or Zn, O doping)
SiC		HJ	I	460-470	0.02	Blue, low efficiency
GaP (Zn)		HJ	I	700	2-3	Red
GaP (N)		HJ	I	565	<1	Green

## Διάταξη διπλής ετεροδομής

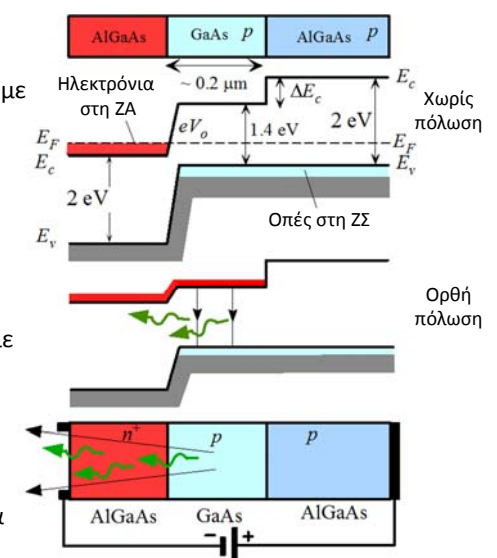
**Ομοεπαφή:** Επαφή p-n από το ίδιο υλικό με διαφορετικές νοθεύσεις.

**Ετεροεπαφή:** Επαφή p-n από υλικά με διαφορετικό  $E_g$

**Διάταξη ετεροδομής:** Διάταξη που αποτελείται από ημιαγωγούς με διαφορετικό  $E_g$

Διάταξη **διπλής ετεροδομής** για αυξημένη ένταση φωτός.

- Δύο επαφές μεταξύ ημιαγωγών με διαφορετικό  $E_g$   
 $E_g(\text{AlGaAs}) = 2\text{eV}$   
 $E_g(\text{GaAs}) = 1.4\text{eV}$
- Ισχυρά νοθευμένη περιοχή n+
- Λεπτό στρώμα p-GaAs με ελαφρά νόθευση.



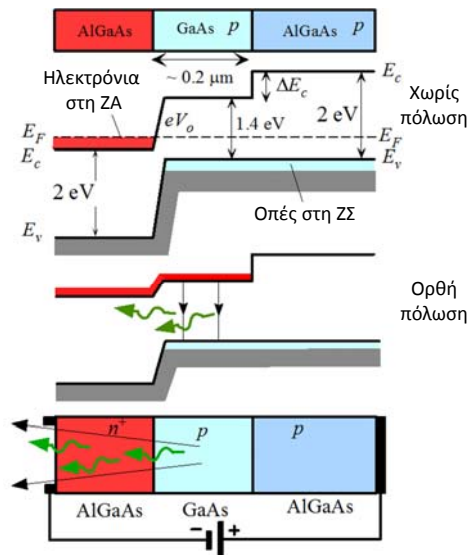
## Διάταξη διπλής ετεροδομής

Χωρίς πόλωση:

- Επίπεδο Fermί ενιαίο σε όλη τη διάταξη.
- Φράγμα δυναμικού  $eV_0$  και  $\Delta E_c$  για τα ηλεκτρόνια.

Με ορθή πόλωση:

- Το φράγμα δυναμικού  $eV_0$  μειώνεται.
- Έγχυση ηλεκτρονίων από  $n^+$ -AlGaAs σε p-GaAs.
- Τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να περάσουν στο p-AlGaAs λόγω του φράγματος  $\Delta E_c$ .
- Επειδή το AlGaAs έχει μεγαλύτερο  $E_g$  από το GaAs τα φωτόνια δεν επαναπορροφώνται.



## Χαρακτηριστικές LED

- Τα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας είναι καταμεμημένα σε διάφορες ενέργειες:

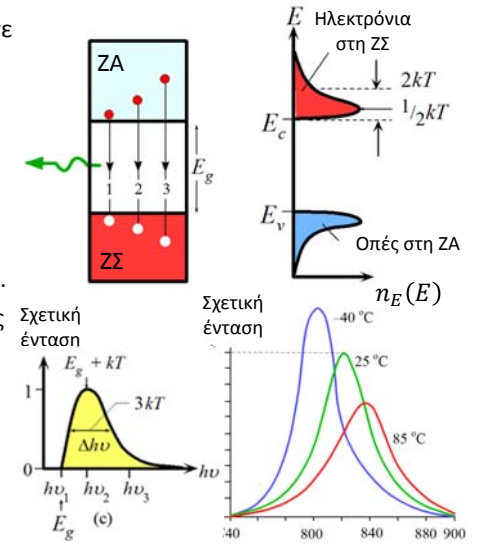
$$n_E(E) = g_{ZA}(E)f(E) = \frac{\pi 8\sqrt{2} m_e^{3/2}}{h^3} \sqrt{E - E_c} e^{-\frac{E - E_F}{kT}}$$

- Η κορυφή της κατανομής είναι στο  $E_c + \frac{kT}{2}$

- Αντίστοιχα κατανέμονται και οι οπές.

- Μεταβάσεις διαφορετικής ενέργειας δίνουν φωτόνια διαφορετικής συχνότητας:  $E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$

- Κάθε ενέργεια έχει διαφορετική πιθανότητα και άρα δίνει διαφορετική ένταση φωτός (πλήθος φωτονίων). **Μέγιστο στο  $E_g + kT$**



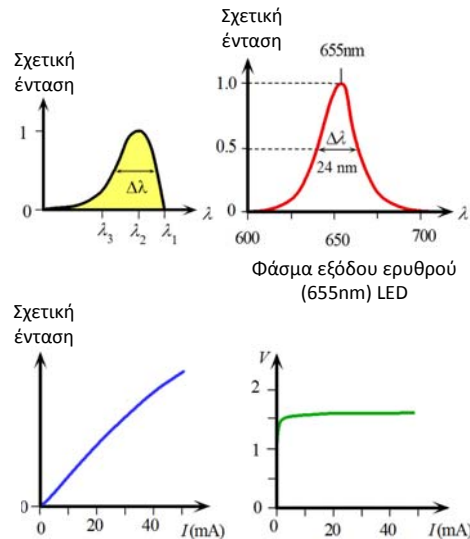
## Χαρακτηριστικές LED

**Φάσμα εξόδου:** Η σχετική ένταση του φωτός σαν συνάρτηση του μήκους κύματος.

**Εύρος γραμμής:** Απόσταση ανάμεσα στα σημεία που αντιστοιχούν στο μισό της μέγιστης έντασης.

Η σχετική ένταση του φωτός σαν συνάρτηση του ρεύματος **δεν είναι γραμμική** διότι η μεγάλη έγχυση φορέων μειονότητας επηρεάζει το χρόνο επανασύνδεσης (που εξαρτάται από τη συγκέντρωση των φορέων).

Στην χαρακτηριστική I-V μπορούμε να δούμε την **τάση έναρξης**.



## Υλικά και χρώματα

Color	Wavelength [nm]	Voltage drop [ΔV]	Semiconductor material
Infrared	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1.63$	Gallium arsenide (GaAs) Aluminium gallium arsenide (AlGaAs)
Red	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta V < 2.03$	Aluminium gallium arsenide (AlGaAs) Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
Orange	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta V < 2.10$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
Yellow	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta V < 2.18$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
Green	$500 < \lambda < 570$	$1.9^{[72]} < \Delta V < 4.0$	<b>Traditional green:</b> Gallium(III) phosphide (GaP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Aluminium gallium phosphide (AlGaP) <b>Pure green:</b> Indium gallium nitride (InGaN) / Gallium(III) nitride (GaN)
Blue	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Zinc selenide (ZnSe) Indium gallium nitride (InGaN) Silicon carbide (SiC) as substrate Silicon (Si) as substrate—under development
Violet	$400 < \lambda < 450$	$2.76 < \Delta V < 4.0$	Indium gallium nitride (InGaN)

## Υλικά και χρώματα

Purple	Multiple types	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Dual blue/red LEDs, blue with red phosphor, or white with purple plastic
Ultraviolet	$\lambda < 400$	$3 < \Delta V < 4.1$	Indium gallium nitride (InGaN) (385-400 nm) Diamond (235 nm) <sup>[73]</sup> Boron nitride (215 nm) <sup>[74][75]</sup> Aluminium nitride (AlN) (210 nm) <sup>[76]</sup> Aluminium gallium nitride (AlGaN) Aluminium gallium indium nitride (AlGaInN)—down to 210 nm <sup>[77]</sup>
Pink	Multiple types	$\Delta V \sim 3.3$ <sup>[78]</sup>	Blue with one or two phosphor layers, yellow with red, orange or pink phosphor added afterwards, white with pink plastic, or white phosphors with pink pigment or dye over top. <sup>[79]</sup>
White	Broad spectrum	$2.8 < \Delta V < 4.2$	Cool / Pure White: Blue/UV diode with yellow phosphor Warm White: Blue diode with orange phosphor

## Παράδειγμα #1 – Εύρος φάσματος LED

Γνωρίζουμε ότι το εύρος φάσματος εξόδου ενός LED σχετίζεται με τη διασπορά ενέργειας των εκπεμπόμενων φωτονίων που είναι  $\Delta E \approx 3kT$  μεταξύ των σημείων που αντιστοιχούν στη μισή της μέγιστης έντασης.

- Δείξτε ότι το εύρος φάσματος είναι  $\Delta \lambda = \lambda^2 \frac{3kT}{hc}$
- Ποιο είναι το εύρος φάσματος στους **300K** για ένα κόκκινο LED που λειτουργεί στα **630 nm** ;

Η ενέργεια του φωτονίου είναι:

$$E = hv = h \frac{c}{\lambda} \Rightarrow$$

$$\lambda = \frac{hc}{E}$$

Παραγωγίζοντας το μήκος κύματος ως προς την ενέργεια

$$\frac{d\lambda}{dE} = -\frac{hc}{E^2} = -\frac{hc}{\left(h \frac{c}{\lambda}\right)^2} = -\frac{\lambda^2}{hc}$$

Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι το μήκος κύματος μειώνεται αν αυξηθεί η ενέργεια.

Προσεγγίζουμε την καμπύλη  $\lambda(E)$  με μια ευθεία:

$$\frac{\Delta \lambda}{\Delta E} \approx \left| \frac{d\lambda}{dE} \right| = \frac{\lambda^2}{hc} \Rightarrow$$

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda^2}{hc} \Delta E = \frac{\lambda^2}{hc} 3kT$$

## Παράδειγμα #1– Εύρος φάσματος LED

Φυσικές σταθερές

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Για  $T=300\text{K}$  έχουμε:

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda^2}{hc} 3kT =$$

$$\frac{(630 \times 10^{-9} \text{ m})^2}{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}) \left(3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)} 3 \left(1.38 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}\right) (300\text{K}) =$$

$$24 \times 10^{-9} \text{ m} = 24 \text{ nm}$$

## Παράδειγμα #2

Σε μια διάταξη LED το ενεργειακό διάκενο είναι **1.95eV**. Σε ποιο μήκος κύματος βρίσκεται η κορυφή του φάσματος εξόδου;

Η κορυφή του φάσματος εξόδου βρίσκεται σε ενέργεια

$$E_g + kT =$$

$$1.95 \text{ eV} + \left(8.62 \times 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}}\right) (300\text{K}) =$$

$$1.98 \text{ eV}$$

$$E_g + kT = h \frac{c}{\lambda} \Rightarrow$$

$$\lambda = \frac{hc}{E_g + kT} =$$

$$\frac{(4.14 \times 10^{-15} \text{ eV s}) \left(3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)}{1.98 \text{ eV}} =$$

$$6.3 \times 10^{-7} \text{ m} = 630 \text{ nm}$$

Φυσικές σταθερές

$$k = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$$

$$h = 4.14 \times 10^{-15} \text{ eV s}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

## Παράδειγμα #3

Το μέγιστο του φάσματος εξόδου ενός LED πρέπει να είναι στα **815nm**. Ποιο είναι το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού που θα χρησιμοποιηθεί;

$$E_g + kT = h \frac{c}{\lambda} \Rightarrow$$

$$E_g = h \frac{c}{\lambda} - kT$$

Φυσικές σταθερές

$$k = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$$

$$h = 4.14 \times 10^{-15} \text{ eV s}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Αντικαθιστούμε:

$$E_g = (4.14 \times 10^{-15} \text{ eVs}) \frac{3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{815 \times 10^{-9} \text{m}} - \left( 8.62 \times 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}} \right) (300\text{K}) =$$

**1.55eV**