



ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ Ι

Ενότητα 1: Ημιαγωγική δίοδος

Χατζόπουλος Αλκιβιάδης

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχ. Υπολογιστών



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.



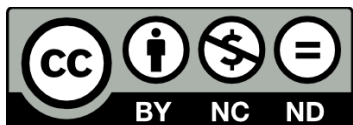
Σχεδιασμός ενοτήτων:

- 1. Ημιαγωγική δίοδος
- 2. Ένωση pn
- 3. Τρανζίστορ FET
- 4. Πόλωση των FET - Ισοδύναμα κυκλώματα
- 5. Ενισχυτές με FET
- 6. Διπολικό τρανζίστορ (BJT)
- 7. Πόλωση των BJT - Ισοδύναμα κυκλώματα
- 8. Ενισχυτές με διπολικά τρανζίστορ
- 9. Ενισχυτές με ενεργό φορτίο
- 10. Κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων





ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΗ ΔΙΟΔΟΣ



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Περιεχόμενα ενότητας

1. Εισαγωγή – χαρακτηριστικές λειτουργίας-μοντέλα (διαφ. 7- 14)
2. Πόλωση διόδου (διαφ. 15- 22)
3. Παράδειγμα κυκλωμάτων με διόδους (διαφ. 23- 27)



Δίοδος - Κυκλώματα διόδων

Κατηγορίες υλικών:

Αγωγοί ($\rho=10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$).

Μονωτήρες/μονωτές ($\rho=10^6 \Omega \cdot \text{cm}$).

Ημιαγωγοί
(Πυρίτιο, γερμάνιο).



Η δίοδος

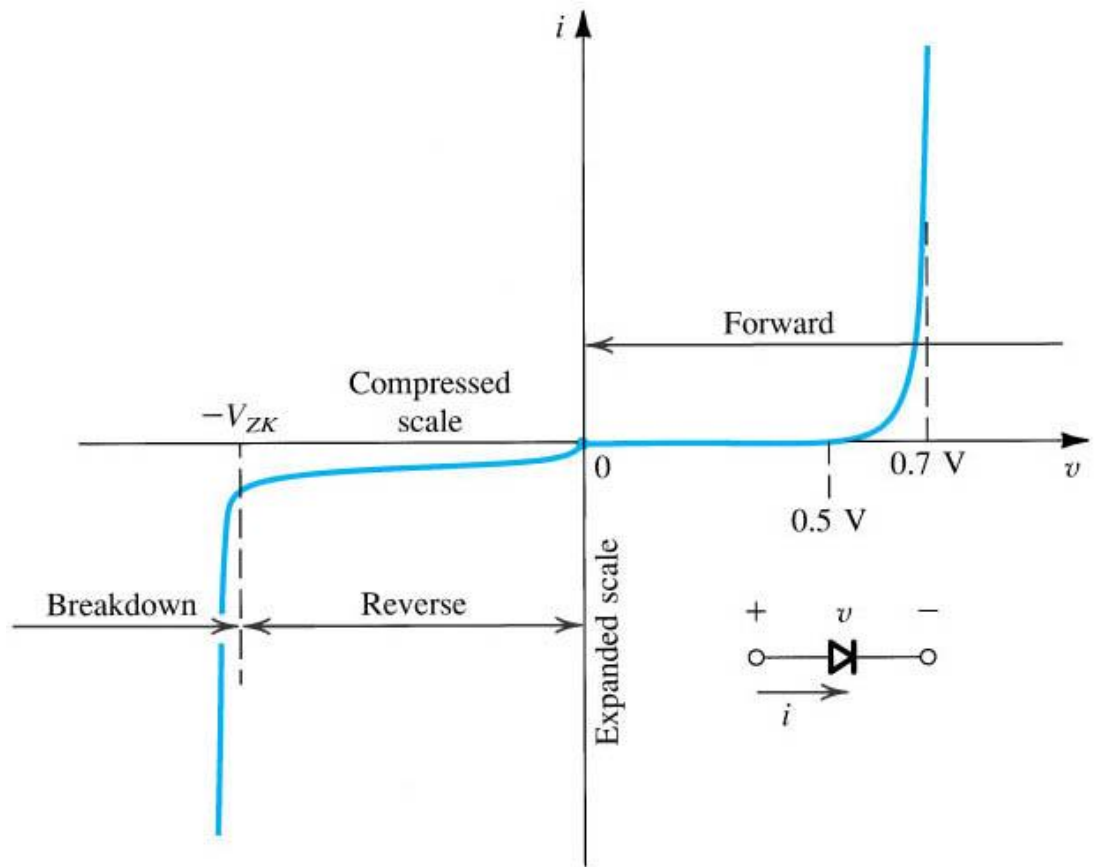
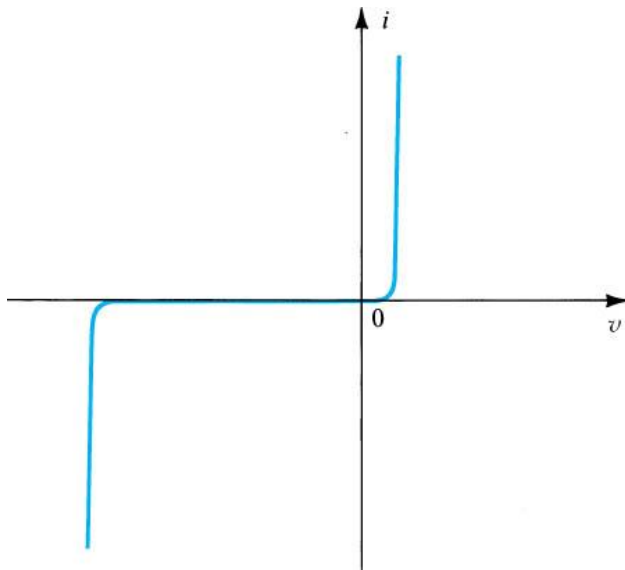
- Η δίοδος είναι εξάρτημα που επιτρέπει την αγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος προς μία μόνο κατεύθυνση και όχι προς την άλλη.



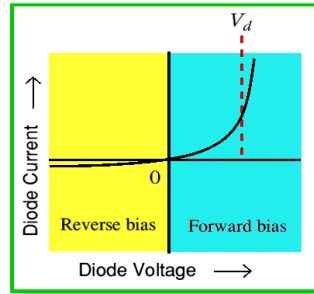
- Κύριες εφαρμογές των διόδων :
 - Ως «διακόπτες» που επιτρέπουν το ρεύμα να ρέει μόνο προς την ορθή φορά μέσα στο κύκλωμα και όχι προς την ανάστροφη.
 - Ως ρυθμιστές- σταθεροποιητές τάσης (δίοδοι Zener).



Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης της διόδου



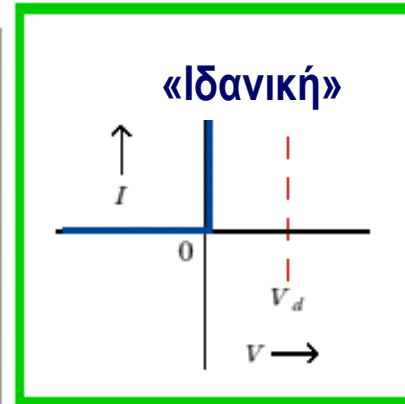
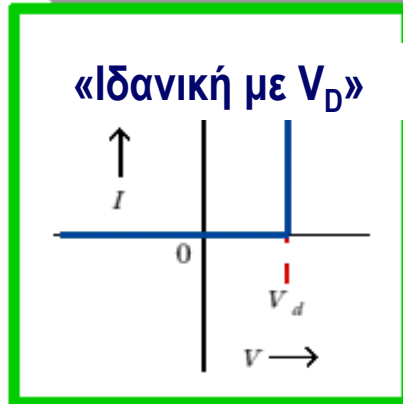
Προσεγγιστικές χαρακτηριστικές της διόδου



$$I > 0 \text{ when } V = V_d$$
$$I = 0 \text{ when } V < V_d$$



$$I = aV^2 \text{ when } V > 0$$
$$I = 0 \text{ when } V < 0$$



$$I > 0 \text{ when } V = 0$$
$$I = 0 \text{ when } V < 0$$



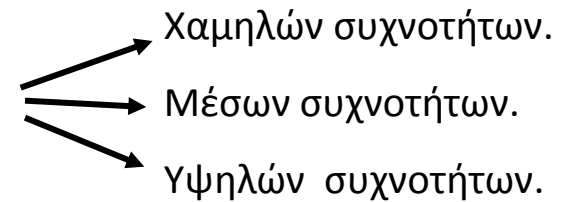
Ισοδύναμα κυκλώματα

Ισοδύναμα κυκλώματα:

Γραμμικά - Μη γραμμικά (μαθηματικά).

Συνεχούς ρεύματος (dc).

Εναλλασσόμενου ρεύματος (ac)



Γενικό ισοδύναμο.



Μοντέλο διόδου στο SPICE

Diode Equations for DC Current

$$I_d = area \cdot (I_{fwd} - I_{rev})$$

$$I_{fwd} = \text{forward current} = I_{nrm} \cdot K_{inj} + I_{rec} \cdot K_{gen}$$

$$I_{nrm} = \text{normal current} = I_S \cdot (e^{V_d/(N \cdot V_t)} - 1)$$

if: $IKF > 0$

$$\text{then: } K_{inj} = \text{high-injection factor} = (IKF / (IKF + I_{nrm}))$$

1/2

$$\text{else: } K_{inj} = 1$$

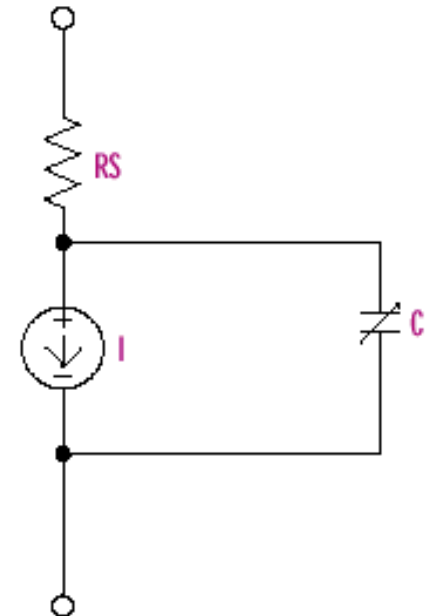
$$I_{rec} = \text{recombination current} = I_{SR} \cdot (e^{V_d/(NR \cdot V_t)} - 1)$$

$$K_{gen} = \text{generation factor} = ((1 - V_d/V_J)^2 + 0.005) M / 2$$

$$I_{rev} = \text{reverse current} = I_{revhigh} + I_{revlow}$$

$$I_{revhigh} = IBV \cdot e^{-(V_d + BV)/(NBV \cdot V_t)}$$

$$I_{revlow} = IBVL \cdot e^{-(V_d + BV)/(NBVL \cdot V_t)}$$



Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης της διόδου

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right)$$

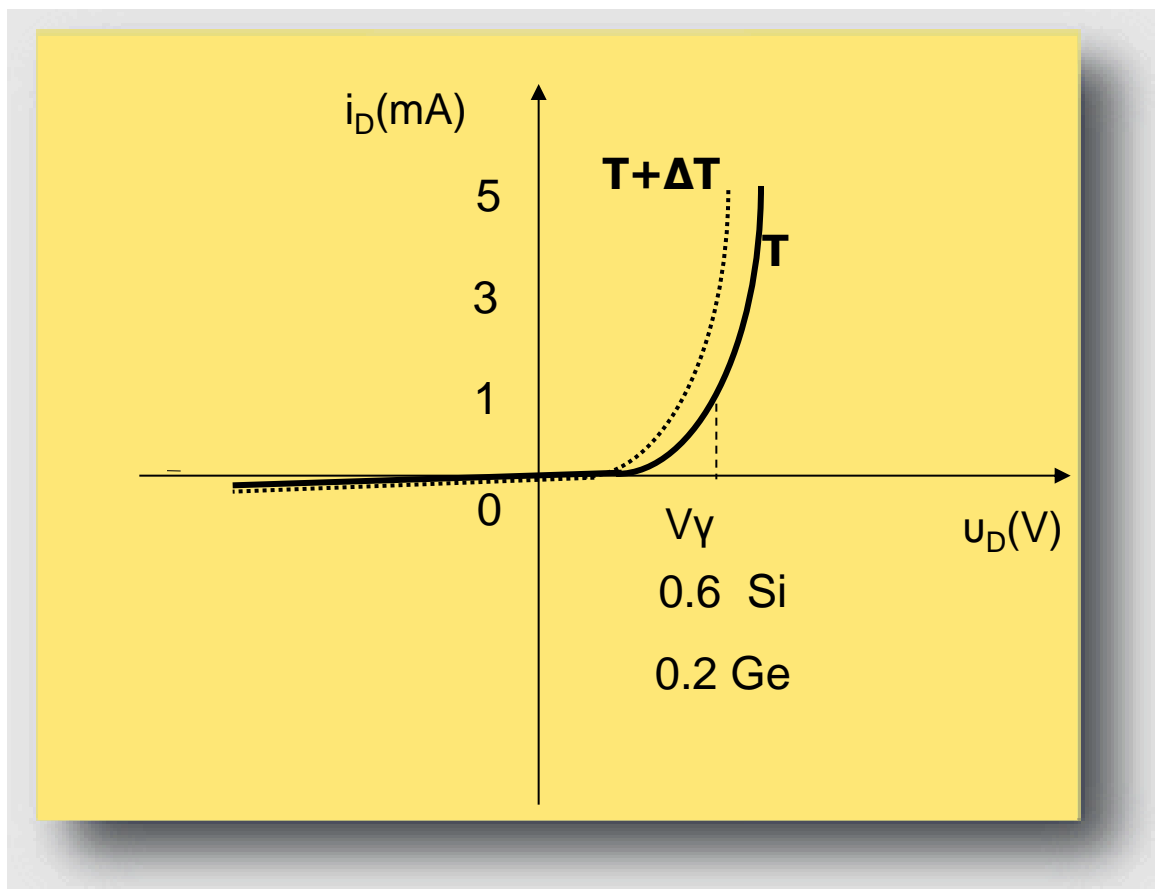
I_S ανάστροφο ρεύμα κόρου
(εξαρτάται από τη θερμοκρασία, διπλασιάζεται κάθε 10 °C)

$V_T = kT/q = 26 \text{ mV}$ (για $T = 300 \text{ }^\circ\text{K}$) [Θερμική τάση]

$n = 1$ για το γερμάνιο
 2 για το πυρίτιο (για διακριτά εξαρτήματα)



Εξάρτηση της χαρακτηριστικής I-V της διόδου από τη θερμοκρασία

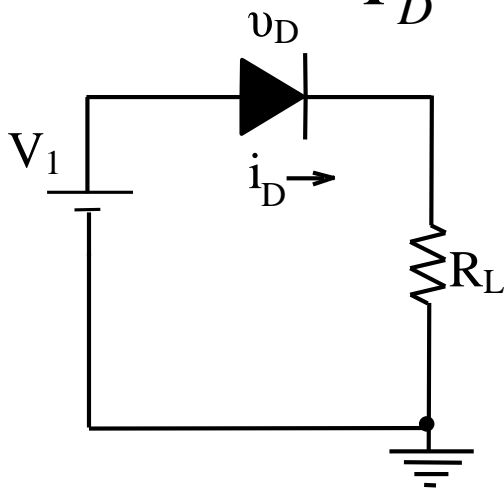


Αύξηση ρεύματος κόρου

(2πλασιασμός κάθε 10 °K (Ge) ή 6 °K (Si))

Πόλωση διόδου

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right)$$



$$V_1 = u_D + i_D R_L \Rightarrow$$

$$i_D = - (1/R_L) u_D + V_1/R_L$$

Ευθεία φορτίου
(Load line)

Θεώρημα Thevenin για
πιο σύνθετα κυκλώματα,
ώστε:

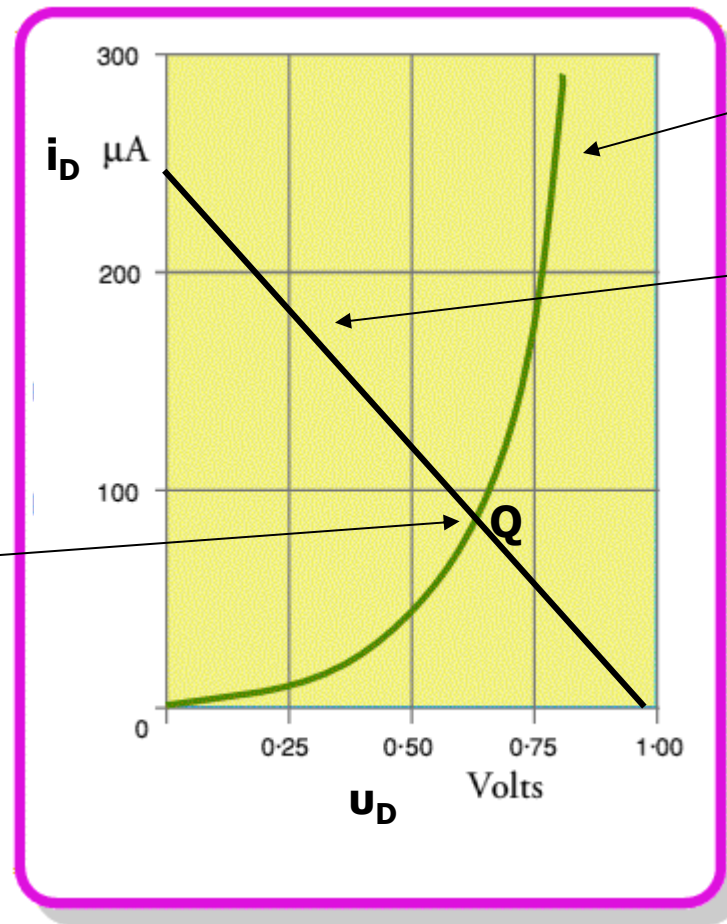
$$V_1 \rightarrow E_{th}$$

$$R_L \rightarrow R_{th}$$



Σημείο λειτουργίας

Σημείο ηρεμίας ή λειτουργίας



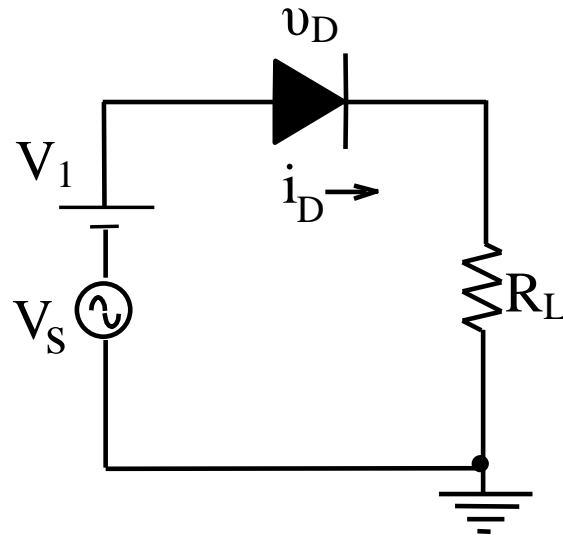
$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right)$$

Euθεία φορτίου
(Load line)

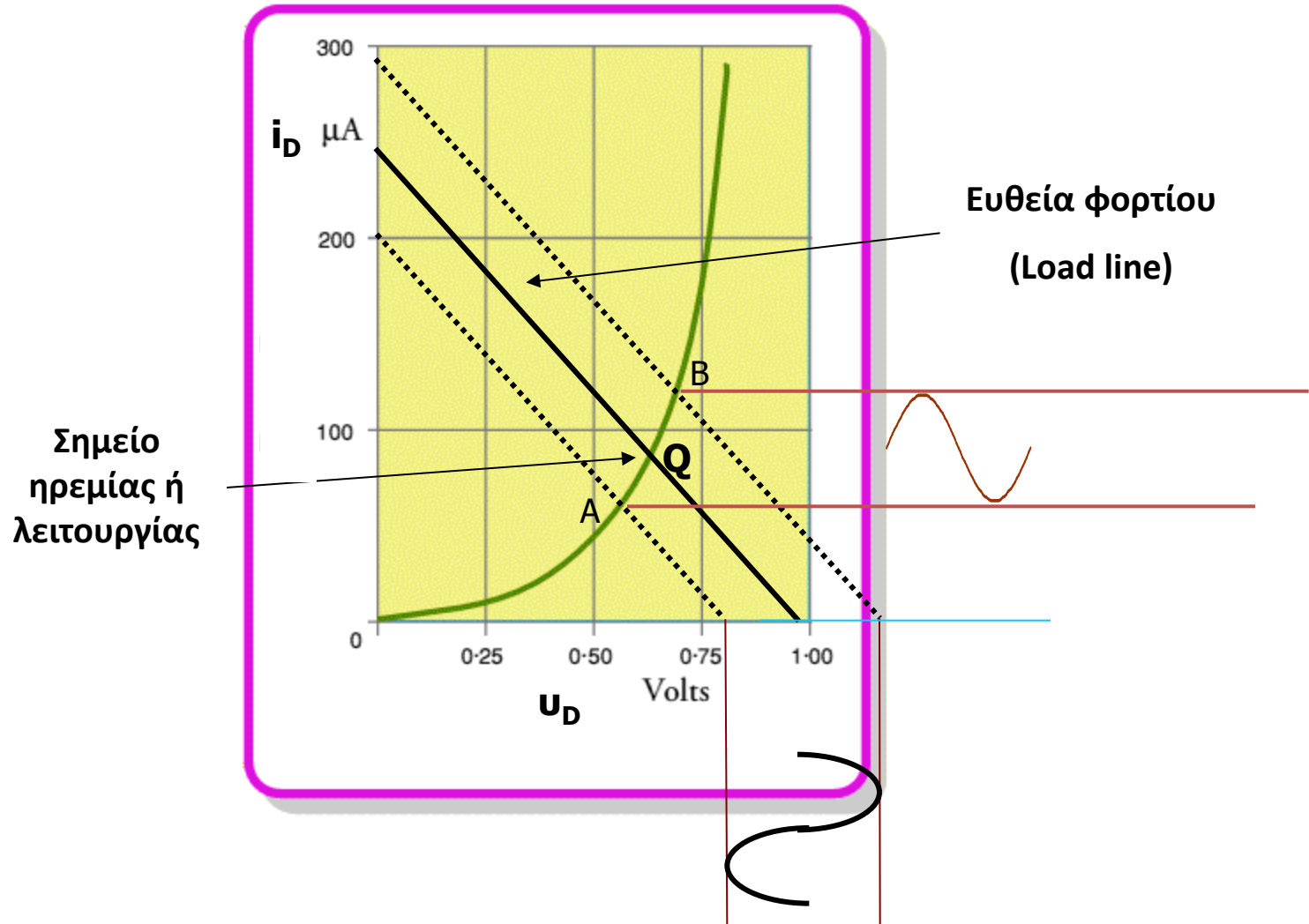
$$i_D = - (1/R_L) u_D + V_1/R_L$$



Ανάλυση μικρού σήματος



Σημείο ηρεμίας ή λειτουργίας



Δυναμική αντίσταση της διόδου

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right)$$

$$g_d = \frac{dI_D}{dV} = \frac{1}{nV_T} I_S e^{\frac{V_D}{nV_T}} \approx \frac{1}{nV_T} I_D$$

$$r_d = \frac{dV}{dI_D} = \frac{nV_T}{I_D}$$

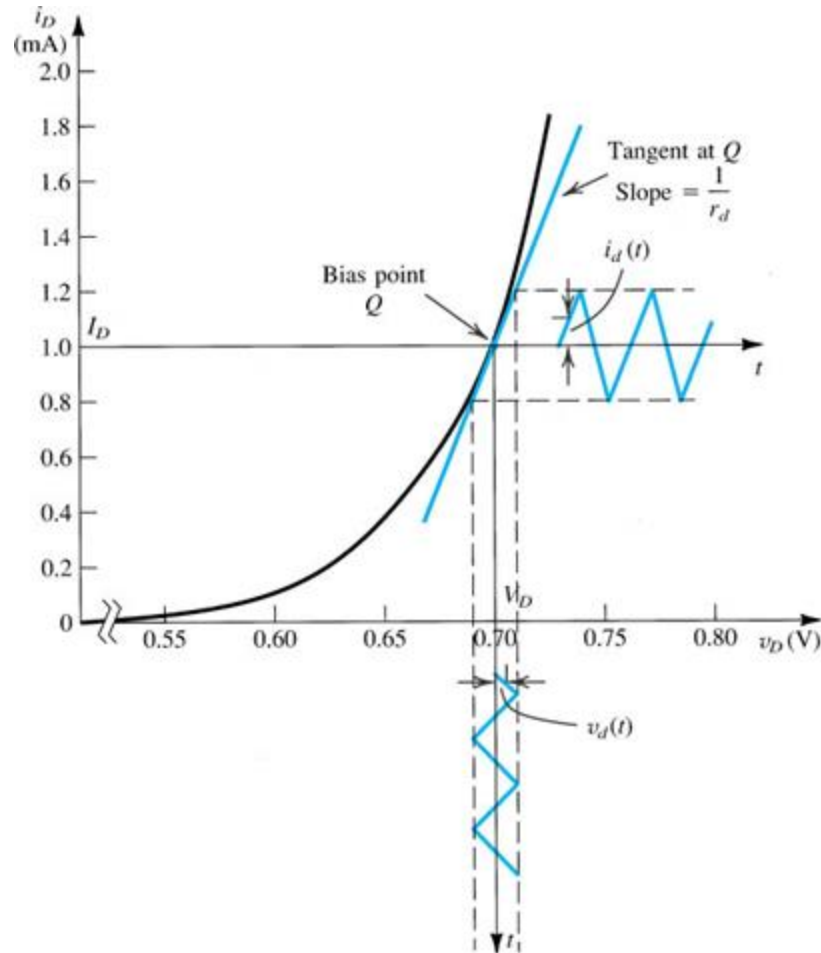
$$V_T = kT/q = 26 \text{ mV (για } T = 300 \text{ } ^\circ\text{K)}$$

n = 1 για το γερμάνιο

2 για το πυρίτιο (για διακριτά εξαρτήματα)



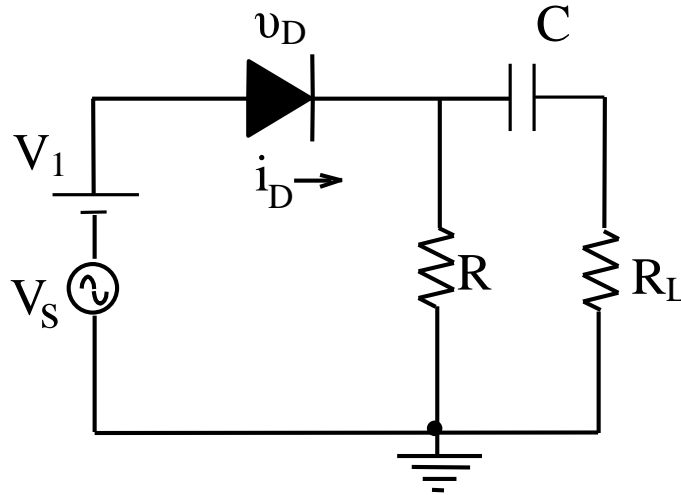
Ανάλυση μικρού σήματος



Ανάλυση
μικρού
σήματος



Ευθεία φορτίου στο εναλλασσόμενο (AC)



$$I_D = - (1/R) V_D + V_1/R$$

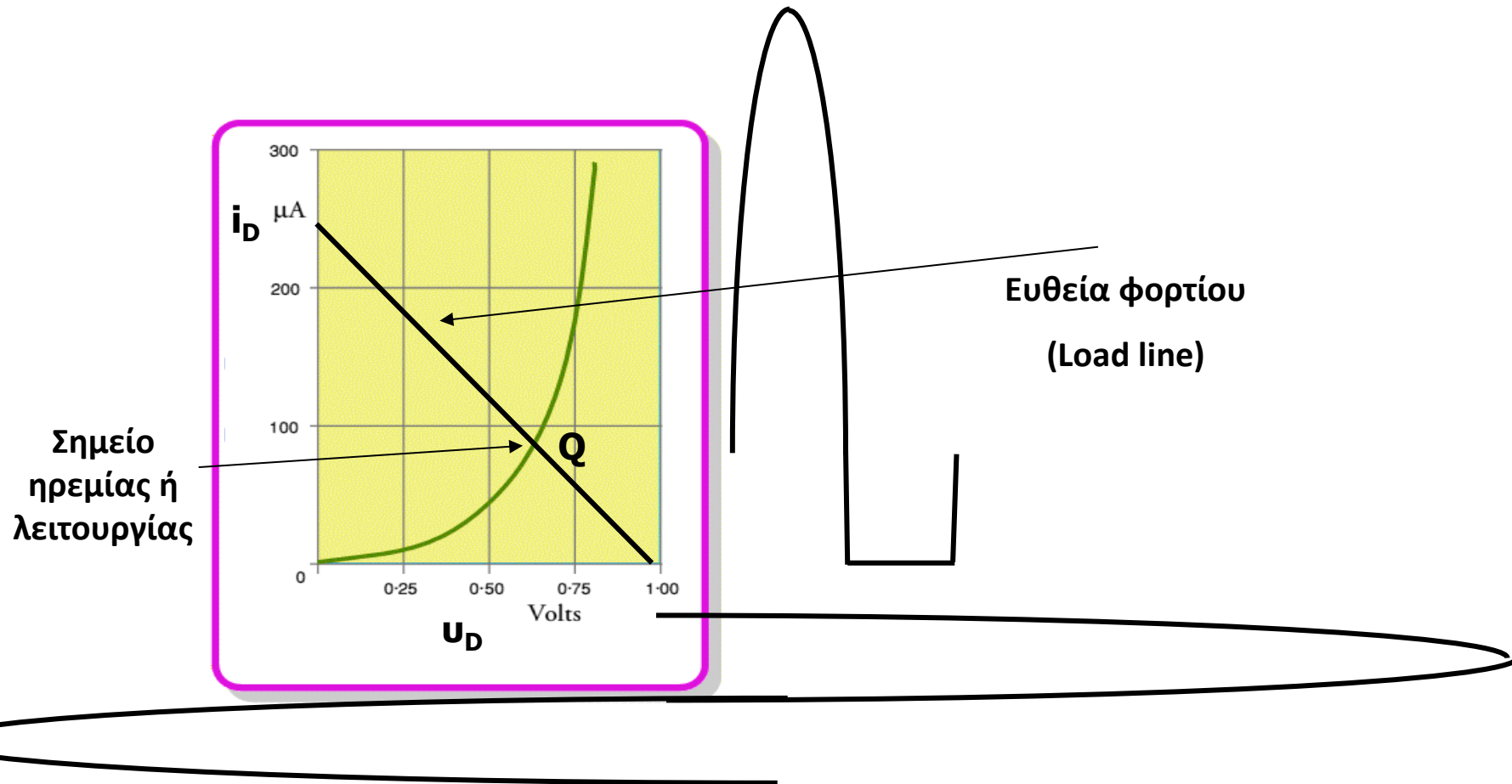
DC

$$i_D = - (1/(R//R_L)) u_D + u_{oλ.}/(R//R_L)$$

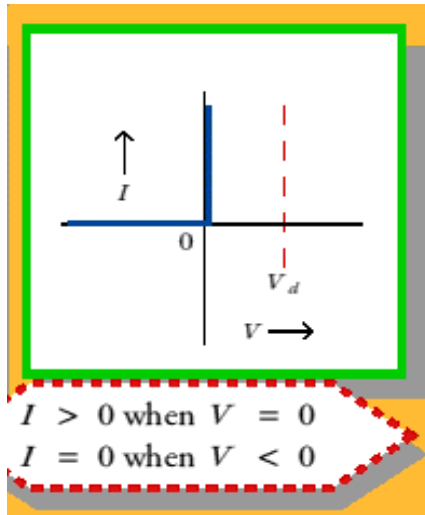
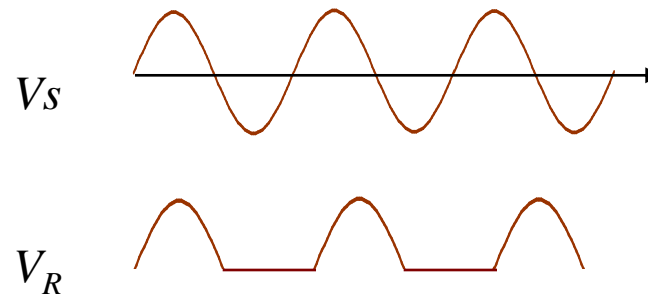
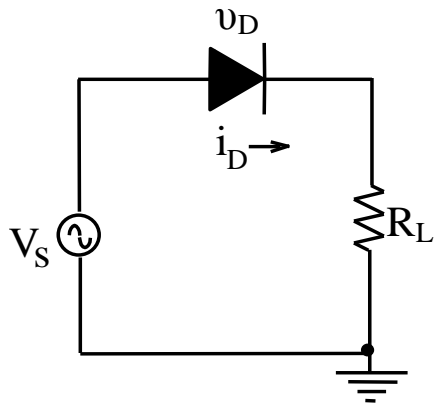
AC



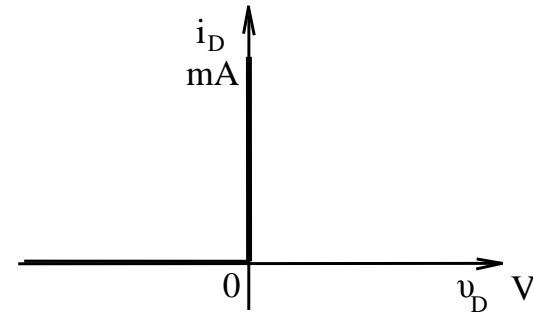
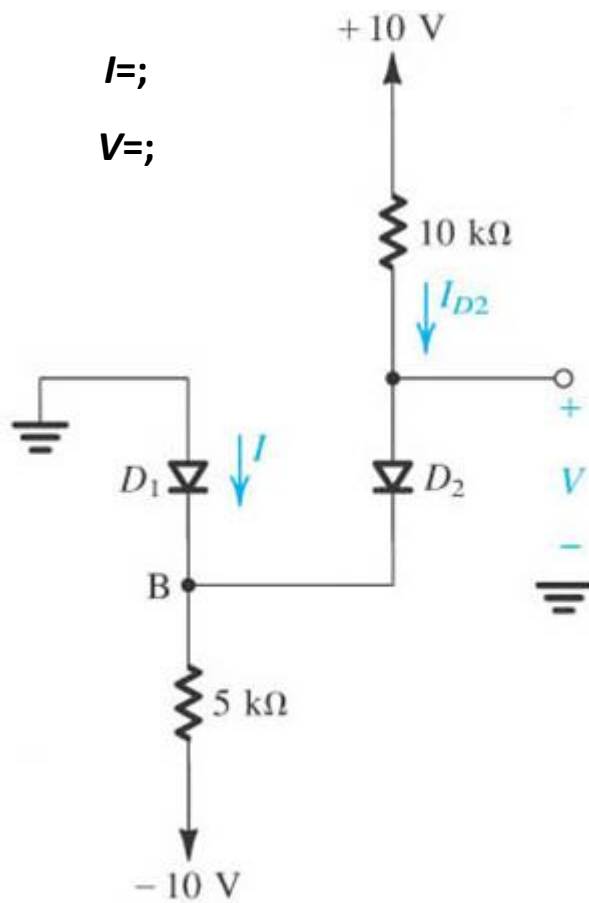
Ανάλυση μεγάλου σήματος



Κύκλωμα απλής ανόρθωσης



Παράδειγμα με ιδανικές διόδους (1/3)



Έστω ότι οι διόδοι άγουν.

$$V_B = 0 = V$$

$$I_{D2} = 10/10 = 1 \text{ mA}$$

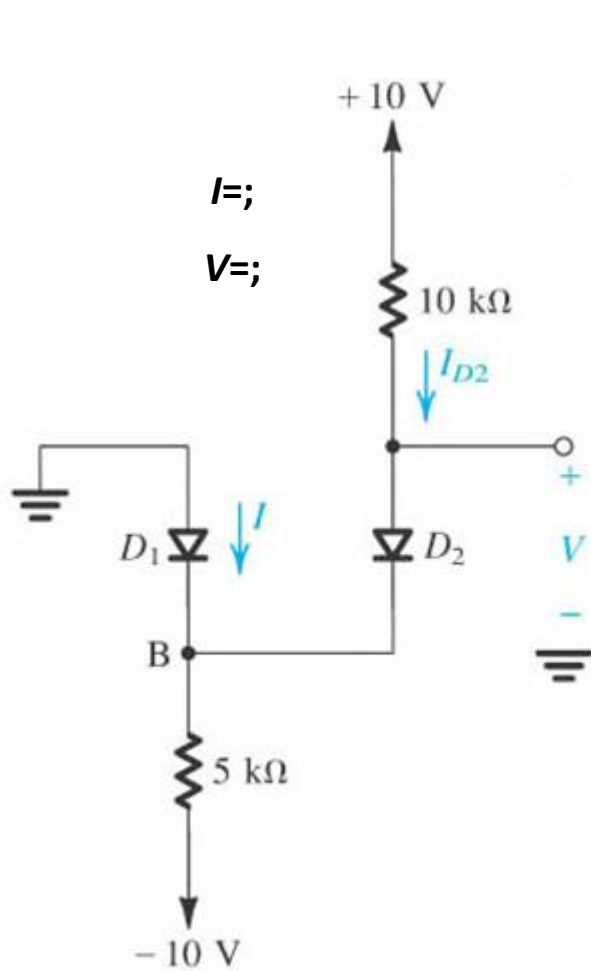
$$I_{R5k\Omega} = 10/5 = 2 \text{ mA}$$

$$\text{Άρα } I+1=2 \text{ mA} \Rightarrow I = 1 \text{ mA}$$

Η αρχική υπόθεση ήταν σωστή.

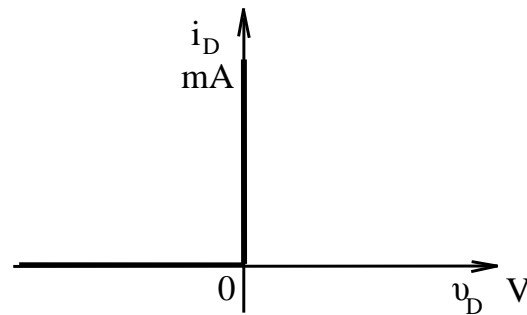


Παράδειγμα με ιδανικές διόδους (2/3)



$I=;$

$V=;$



Έστω ότι οι διόδοι άγουν.

$$V_B = 0 = V$$

$$I_{D2} = 10/5 = 2 \text{ mA}$$

$$I_{R10k\Omega} = 10/10 = 1 \text{ mA}$$

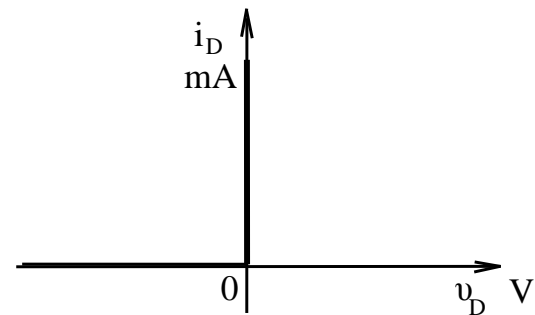
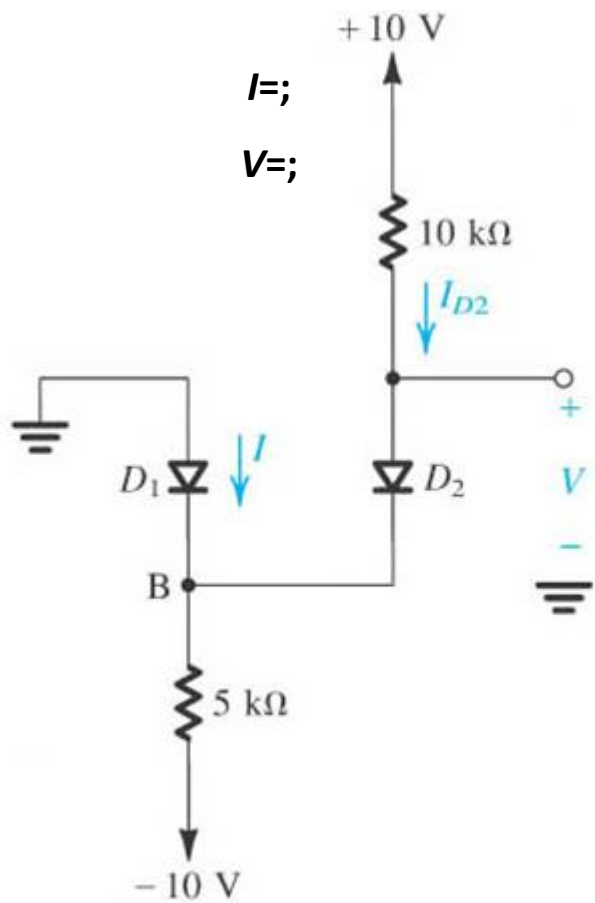
$$\text{Αρα } I + 2 = 1 \text{ mA} \Rightarrow I = -1 \text{ mA}$$

Αδύνατον!

Αρα η αρχική υπόθεση ήταν λάθος.



Παράδειγμα με ιδανικές διόδους (3/3)



Έστω ότι μόνο η $D2$ άγει.

$$I_{D2} = 20/15 = 1.33 \text{ mA}$$

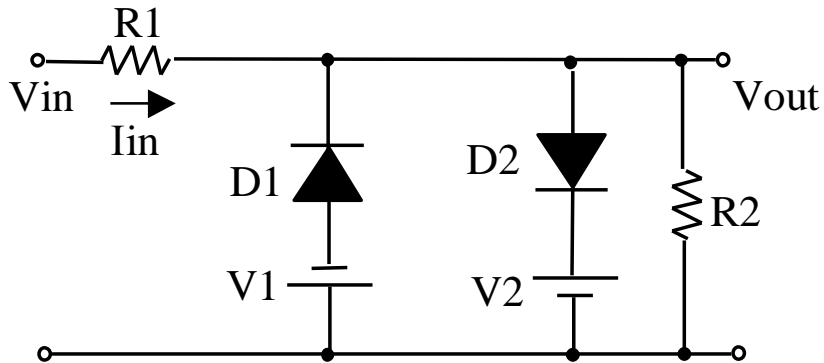
$$V_B = -10 + 13.3 = 3.3 \text{ V}$$

Άρα πράγματι η $D1$ είναι
ανάστροφα πολωμένη.

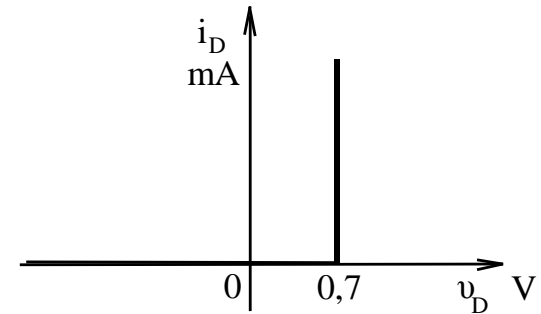
Τελικά $I = 0$ και $V = V_B = 3.3 \text{ V}$



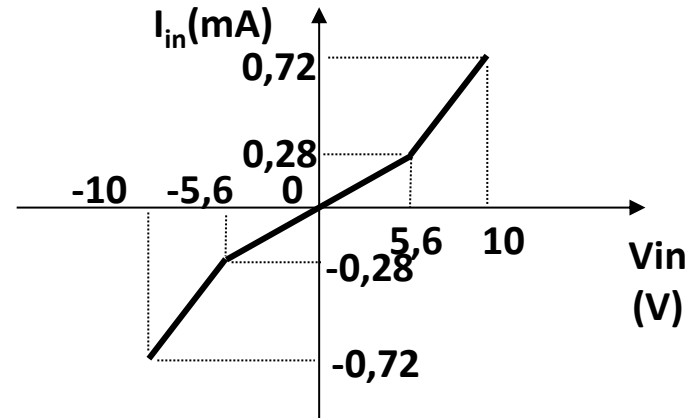
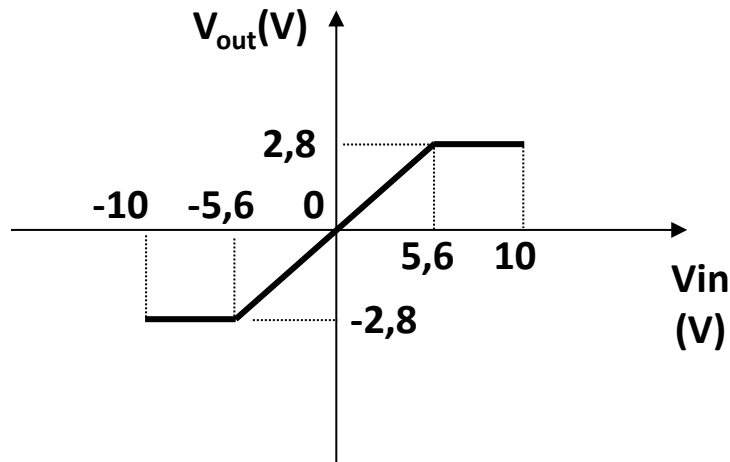
Κύκλωμα «ψαλιδισμού»



$$R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega, \quad V_1 = 2,1\text{V}, \quad V_2 = 2,1\text{V}$$



$$V_{\text{out}} = f(V_{\text{in}}), \quad I_{\text{in}} = f(V_{\text{in}}), \quad \text{για } -10\text{V} \leq V_{\text{in}} \leq 10\text{V}$$



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Χατζόπουλος Αλκιβιάδης. «ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ Ι, Ημιαγωγική δίοδος». Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: http://opencourses.auth.gr/eclass_courses.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Μη Εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγα Έργα 4.0 [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.

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

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





Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Σβάρνα Κωνσταντίνα
Θεσσαλονίκη, χειμερινό εξάμηνο 2014-2015



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Σημειώματα

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

