

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε



**ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ  
ΑΣΚΗΣΕΩΝ ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ**



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:  
ΚΩΤΣΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΕΙΣΗΓΗΣΗ-ΕΠΙΒΛΕΨΗ: ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΥ

ΚΡΗΤΗ 2018

TECHNOLOGICAL EDUCATIONAL INSTITUTE OF CRETE  
FACULTY OF TECHNOLOGICAL APPLIANCE  
PART OF ELECTRICAL ENGINEERING



**NOTES OF SELECTED OPTOELECTRONIC  
LABORATORY EXERCISES**



DISSERTION:  
KOTSOS NIKOLAOS

SUPERVISOR: EFSTRATIOS GEORGIU

CRETE 2018

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΟΔΟΥ.....	5
<b>ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑ</b>	
1) ΠΟΛΩΣΗ LED.....	8
2) ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ LED ΜΕ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ-ΔΙΑΚΟΠΤΗ ΕΧΟΝΤΑΣ ΕΛΕΓΧΟ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΒΑΣΗΣ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ.....	15
3) ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ LED ΜΕ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ-ΔΙΑΚΟΠΤΗ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ 2 <sup>ο</sup> LED ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΟΛΩΣΗ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ....	23
4) ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ LED ΜΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΠΗΓΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.....	27
5) ΦΩΤΟ-ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΥ ΜΕ ΤΕΛΕΣΤΙΚΟ ΕΝΙΣΧΥΤΗ.....	32
6) ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΥ ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ.....	38
7) ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ ΟΠΤΙΚΟΥ ΔΙΑΚΟΠΤΗ ΜΕ ΦΩΤΕΙΝΗ ΔΕΣΜΗ ΛΕΙΖΕΡ.....	42
8) ΟΠΤΙΚΟΣ ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ "ΑΡΝΗΤΙΚΗΣ ΛΟΓΙΚΗΣ" (ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΚΟΤΟΥΣ).....	46
9) DATASHEET ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ.....	50
10) ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	54

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι παρακάτω σημειώσεις έχουν γραφτεί για να καλύψουν το εργαστηριακό μέρος του μαθήματος ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ. Σκοπός είναι να εμπεδωθεί από τον φοιτητή η αντίστοιχη θεωρία. Για να γίνει αυτό εφικτό, το εργαστήριο καλύπτει σε ένα μεγάλο ποσοστό την θεωρία του μαθήματος και δρα συμπληρωματικά μέσα από συγκεκριμένες και επιλεγμένες εφαρμογές και ασκήσεις. Για να έχει η παραπάνω προσπάθεια επιθυμητό αποτέλεσμα θα πρέπει οι φοιτητές να ακολουθήσουν τους παρακάτω κανόνες.

- Η διεξαγωγή των εργαστηριακών ασκήσεων πραγματοποιείται σύμφωνα με το ωρολόγιο πρόγραμμα που ανακοινώνεται στην αρχή κάθε εξαμήνου. Κάθε εργαστηριακή άσκηση έχει χρονική διάρκεια δύο ωρών και πρέπει να έχει περατωθεί στο τέλος αυτού του χρονικού διαστήματος. Επομένως κρίνεται απαραίτητο να μην υπάρχουν καθυστερήσεις ώστε να εξασφαλιστεί η ομαλή διεξαγωγή του εργαστηρίου.
- Θα πρέπει να προσέρχονται οι φοιτητές πολύ καλά προετοιμασμένοι στην αντίστοιχη άσκηση. Θα πρέπει δηλαδή να έχουν μελετήσει την περιληπτική θεωρία που συνοδεύει την εργαστηριακή άσκηση και να γνωρίζουν τι θα πρέπει ακριβώς να πράξουν με τον ερχομό τους στο εργαστήριο.
- Οι εργαστηριακές ασκήσεις είναι αλληλένδετες μεταξύ τους. Το παραπάνω σημαίνει ότι αν έχει πραγματοποιηθεί η εργαστηριακή άσκηση 1 θα θεωρείται διδαγμένη και πιθανόν να ζητηθεί στην άσκηση 2 ή στην επόμενη κλπ.
- Σεβασμό στα υλικά, στα όργανα και γενικά σε όλο τον εξοπλισμό του εργαστηρίου. Θα πρέπει να μείνει ακέραιος έτσι ώστε να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί και από άλλους συναδέλφους σας κατά το επόμενο ακαδημαϊκό εξάμηνο.
- Κατά την εκτέλεση μίας άσκησης, πρώτα συνδέετε το κύκλωμα, στην συνέχεια τα όργανα και τέλος το σύστημα τροφοδοσίας.
- Μετά τη συνολογηση του κυκλώματος δεν τροφοδοτείται το κύκλωμα με τάση αλλά καλείται ο υπεύθυνος του εργαστηρίου για να ελέγξει το κύκλωμα.
- Όταν τελειώσουν οι μετρήσεις, διακόπτεται πρώτα η τροφοδοσία και τα όργανα τοποθετούνται στις αρχικές τους θέσεις, με τακτοποιημένους τους ακροδέκτες και τα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν επιστρέφονται στον υπεύθυνο του εργαστηρίου.

## INTRODYCTION

The following notes have been written to cover the laboratory part of the optoelectronics course. The aim is to have the theory put in place by the student. To make this possible, the lab covers a great deal of the theory of the course and acts complementarily through specific and selected applications and exercises. In order for the above effort to be a desirable result, students must follow the following rules. Laboratory exercises are carried out according to the timetable announced at the beginning of each semester. Each laboratory exercise has two-hour duration and must be completed at the end of this time. Therefore, it is necessary to ensure that there are no delays to ensure the smooth running of the workshop. Students should be very well prepared in the exercise. So they have to study the summary theory accompanying the lab exercise and know what they should just do with coming to the lab. Laboratory exercises are interrelated. The above means that if the laboratory exercise has been carried out 1 will be considered taught and may be requested in exercise 2 or the next, Respect for materials, instruments and general laboratory equipment. It should remain intact so it can be used by other colleagues in the next academic semester. When performing an exercise, first connect the circuit, then the instruments and finally the feed system. After the circuit is concluded, the circuit is not supplied with voltage, but the laboratory manager is asked to check the circuit. When the measurements are over, the power supply is switched off first and the instruments are placed in their original positions, with the terminals tied and the parts used returned to the laboratory manager.

ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΔΙΟΔΟΥ Ι ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΤΑΣΗ ΠΟΛΩΣΗΣ V

Το ρεύμα I που διέρχεται μέσα από μία δίοδο ημιαγωγού όταν εφαρμόσουμε τάση V στα άκρα της (η οποία καλείται «τάση πόλωσης») δεν παρουσιάζει απλή γραμμική εξάρτηση όπως συμβαίνει σε μια Ωμική Αντίσταση R, δηλ. στην δίοδο ΔΕΝ ισχύει ο Ν. Ohm (ή, αν θέλουμε να «ισχύει» με κάποια έννοια, πρέπει να θεωρήσουμε ότι η «ισοδύναμη» αντίσταση  $R_d$  της διόδου δεν είναι σταθερή, οπότε χάνει και την έννοιά της). Η σχέση τάσης-ρεύματος σε μία δίοδο είναι εκθετική και έντονα μη-γραμμική και αναλύεται παρακάτω.

Μια δίοδος (περιλαμβανόμενης και της διόδου LED, της φωτοδιόδου, της διόδου βάσης – εκπομπού ενός τρανζίστορ, κλπ κλπ) «μοντελοποιείται» ως προς την χαρακτηριστική της (δηλ. την σχέση τάσης – ρεύματος) από την εξίσωση Shockley:

$$I = I_s [\exp(qV/NkT) - 1] \quad \text{ή,} \quad I = I_s (\exp(qV/NkT) - 1) \quad (1)$$

όπου: I = ρεύμα διόδου, V= τάση διόδου (τάση πόλωσης), q=φορτίο ηλεκτρονίου, k=σταθερά Boltzmann και  $I_s$  = «ανάστροφο ρεύμα κορεσμού», δηλ. το (περίπου σταθερό) ρεύμα που διαρροής της διόδου όταν εφαρμοστεί ανάστροφη τάση πόλωσης. Ο λεγόμενος «συντελεστής εκπομπής» N είναι μία αριθμητική σταθερά εξαρτώμενη από το υλικό του ημιαγωγού που τυπικά κυμαίνεται μεταξύ 1 – 2 .

Η εξίσωση Shockley, συνδέοντας μαθηματικά τα μεγέθη I (ρεύμα) και V (τάση) της διόδου, παίζει ουσιαστικά αντίστοιχο ρόλο με την εξίσωση του Ohm ( $I=V/R$ ) μιας ωμικής αντίστασης. Φυσικά, η παραπάνω εκθετική σχέση {I vs. V} για την δίοδο είναι πολύ πιο περίπλοκη για τους καθημερινούς υπολογισμούς, από την απλή γραμμική σχέση της ωμικής αντίστασης. Αυτός είναι και ο λόγος που η χαρακτηριστική της διόδου {I vs. V} είναι μια εκθετική καμπύλη, ενώ η χαρακτηριστική της ωμικής αντίστασης είναι μια ευθεία γραμμή.

Στην παραπάνω εξίσωση, εκτός από τα I και V, όλα τα άλλα μεγέθη είναι σταθερές παράμετροι. Το  $I_s$  είναι το λεγόμενο «ρεύμα κορεσμού», το οποίο πρακτικά ισούται με το «ανάστροφο ρεύμα» της διόδου! Για τις διόδους πυριτίου ένα τυπικό ρεύμα κορεσμού είναι  $I_s = 10\text{-}12\text{A}$ , ενώ για άλλους τύπους διόδων (π.χ. Γερμανίου, Zener, LED, κλπ) το  $I_s$  μπορεί να είναι πολύ διαφορετικό (π.χ. για την εξίσωση της χαρακτηριστικής ενός LED χρησιμοποιούμε  $I_s = 10\text{-}14$  έως και  $10\text{-}18\text{A}$ ).

Σημαντική επίσης στην εξίσωση της χαρακτηριστικής, ειδικά για διόδους LED, είναι ακόμη η παράμετρος N, ο λεγόμενος «συντελεστής εκπομπής», στον παρονομαστή του εκθέτη στην σχέση (1):

$$I = I_s (\exp(qV/NkT) - 1)$$

Ο συντελεστής N για τις διόδους LED κυμαίνεται στην περιοχή 1.8 – 2.0, ενώ για διόδους πυριτίου θεωρείται περίπου ίσος με 1.

Επιστρέφοντας στην δίοδο πυριτίου με  $N=1$  (απλούστερη περίπτωση) έχουμε:

$$I = I_s (e^{qV/kT} - 1) , \quad \text{με } I_s = 10^{-12} \text{A} = 1 \text{pA} \quad (2)$$

Στον εκθέτη της εξίσωσης διόδου ο όρος  $kT/q$  (παρονομαστής του εκθέτη) ισούται με  $26 \text{mV} = 0.026 \text{V}$  (που ονομάζεται και «θερμική τάση» ή  $V_T$ ) εάν η δίοδος έχει θερμοκρασία δωματίου  $T=300 \text{K}$ .

Πληροφοριακά, εδώ  $k$  είναι η σταθερά του Boltzmann,  $T$  είναι η θερμοκρασία σε Kelvin, και  $q=e$  είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου σε coulombs, αλλά γενικά δεν χρειάζεται να γνωρίζουμε ή να γράφουμε τα μεγέθη αυτά χωριστά, αρκεί όλο το  $kT/q$  στην εξίσωση να τεθεί ίσο με  $0,026 \text{volt}$  για διόδους που λειτουργούν σε κανονικές θερμοκρασίες.

Με την παραδοχή λοιπόν ότι η θερμική τάση είναι :

$$V_T = \frac{kT}{e} \cong 0,026 \text{V} \quad \text{όπου } T = 300 \text{K}$$

σε θερμοκρασία δωματίου επομένως η εξίσωση (2) της διόδου μπορεί να γραφτεί

$$I = 10^{-12} \times (e^{V/0.026} - 1) \text{ Ampere} \quad \implies \quad I = (e^{V/0.026} - 1) \text{ pA} \quad (3)$$

η οποία βέβαια εξακολουθεί να είναι μια εκθετική σχέση, αλλά τουλάχιστο εμφανίζεται αρκετά απλούστερη από την αρχική θεωρητική του Shockley.

Επιπλέον σημαντική απλοποίηση προκύπτει τώρα, παρατηρώντας ότι η “θερμική” τάση  $0.026 \text{volt}$  ( $=V_T$ ) στον παρονομαστή του εκθέτη είναι πολύ μικρή σχετικά με τις τάσεις πόλωσης που εφαρμόζονται στα άκρα της διόδου. Έτσι, ο εκθετικός όρος καταλήγει να είναι πολύ μεγαλύτερος από την μονάδα, όπως εύκολα μπορεί κανείς να επαληθεύσει. Κατά συνέπεια, μπορούμε να αγνοήσουμε την μονάδα που αφαιρείται μέσα στην παρένθεση:

$$I(V) = I_s \left( e^{\frac{V}{0.026}} - 1 \right) \cong I_s \left( e^{\frac{V}{V_T}} \right), \text{ γιατί } e^{\frac{V}{V_T}} \gg 1$$

οπότε με τις παραμέτρους της διόδου πυριτίου η (3) γίνεται:

$$I = e^{V/0.026} \text{ pA} \quad , \quad \text{για διόδους Si} \quad (4)$$

Η αντίστοιχη απλοποιημένη εξίσωση για διόδους LED, λαμβάνοντας υπ’ όψη το αντίστοιχο  $I_s = 10^{-14} \text{A}$  και τον “συντελεστή εκπομπής”  $N=2$ , θα γραφεί:

$$I = I_s \cdot (e^{qV/NkT}) = I_s \cdot (e^{V/0.026N}) , \quad \text{με } I_s = 10^{-14} \text{A} = 0.01 \text{pA} \quad (5)$$

$$\text{ή, τελικά: } I = 10^{-14} \cdot e^{V/0.052} \text{ A} , \quad \text{για διόδους LED} \quad (6)$$

Οι απλοποιημένες εξισώσεις (4) και (6) μπορούν τώρα να χρησιμεύσουν σαν πρακτικά εργαλεία υπολογισμών για τα ρεύματα κοινών διόδων Si και LED.

## ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ:

\* Σε κόκκινο LED με γνωστά χαρακτηριστικά:  $I_s=10-14$  A και  $N=2$ , πόσο ρεύμα θα περάσει αν εφαρμόσουμε τάση  $V=1.8$  volt (δηλ. ίση με την “σωστή” τυπική ορθή τάση για κόκκινο LED) ?

Απ.  $I = I_s (eV/0.026N) = (10-14A) \times (e1.8/2 \times 0.026) = 10.8$  mA (περίπου)

Για σύγκριση:

Ποιά αντίσταση R θα είχε το ίδιο ρεύμα με την ίδια τάση όπως το παραπάνω LED ?

Απ. Εδώ απλά  $I = V/R$ , άρα  $R = V/I = 1.8/(10.8 \times 10^{-3}) = 166$  Ω

Φυσικά, η συγκριτική αντιστοιχία αυτή ισχύει μόνο για τις συγκεκριμένες τάσεις – ρεύματα!

\* Αν τώρα η εφαρμοζόμενη τάση αυξηθεί κατά 10%, δηλ. γίνει περίπου  $V'=2$  volt, πόσο θα αυξηθεί το I στις παραπάνω περιπτώσεις (  $R=166\Omega$  και κόκκινο LED) ?

Απάντηση:

- Στην “γραμμική” ωμική αντίσταση R το ρεύμα θα αυξηθεί απλά κατά 10%, δηλ. θα γίνει τώρα 11.9mA

- Στο LED υπολογίζουμε εκ νέου:  $I' = I_s (eV'/0.026N) = (10-14A) \times (e2.0/2 \times 0.026) = 505$  mA (!) (δηλαδή το I αυξάνεται κατά 4500% !) πράγμα που φυσικά συνεπάγεται άμεση καταστροφή του LED, δεδομένου ότι και η ισχύς του αυξήθηκε κατά 500 φορές περίπου, μέχρι να καεί.

Συμπέρασμα: δεν μπορούμε να “ποντάρουμε” σε “σταθερή τάση” για να τροφοδοτήσουμε αξιόπιστα ένα LED, γιατί η παραμικρή “διαταραχή” της τάσης θα επιφέρει τεραστία μεταβολή ρεύματος και ισχύος, που θα καταστρέψει το LED.

Συμπερασματικά, σαν λύσεις προτείνονται:

Η “επιστημονική” λύση: Τροφοδοσία με πηγή “σταθερού ρεύματος I” που μπορεί να κατασκευασθεί απλά με ένα τρανζίστορ και μερικές αντιστάσεις. Αυτή η λύση θα εφαρμοστεί σε επόμενη εργαστηριακή άσκηση.

Η απλή πρακτική λύση: Τροφοδοσία μέσω “αντίστασης προστασίας” σε σειρά με το LED. Αυτή η απλούστατη μέθοδος, που χρησιμοποιεί τον N.Ohm στην R για να “κοντrollάρει” το ρεύμα, ονομάζεται και “πόλωση LED”, αποτελεί δε το αντικείμενο της 1ης εργαστηριακής άσκησης.

Σημ. Η 2η λύση έχει το μειονέκτημα ότι η R πρέπει να υπολογίζεται ανάλογα με το χρώμα του LED, δηλ. ανάλογα με την απαιτούμενη ορθή τάση πόλωσης. Αντίθετα, η 1η λύση, με πηγή ρεύματος, θα δίνει πάντα το ίδιο ρεύμα ανεξάρτητα από τον τύπο του LED που θα τροφοδοτεί.



## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ 1

### ΠΟΛΩΣΗ LED

#### ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

Αυτή η εργαστηριακή άσκηση έχει σκοπό να κατανοηθεί πλήρως τι είναι η πόλωση ενός led, γιατί γίνεται και ποιά είναι τα αποτελέσματα της.

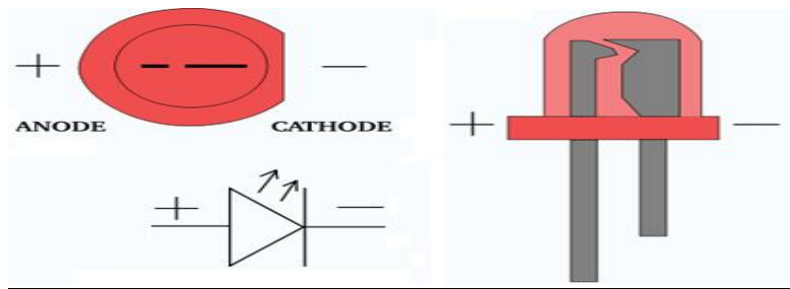
#### ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ, ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ, ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΑ

1. Τροφοδοτικό
2. Αντιστάσεις
3. LED
4. Breadboard
5. Καλώδια σύνδεσης

#### ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

Το LED (από τα αρχικά των λέξεων Light Emitting Diode=Δίοδος Εκπομπής Φωτός) είναι μία (ηλεκτρονική) δίοδος από ημιαγώγιμα υλικά μέσα σε ένα λεπτό περίβλημα. Όταν περνάει ηλεκτρικό ρεύμα από δίοδο τύπου LED, αυτή εκπέμπει φως. Σε μια ηλεκτρική πηγή το LED συνδέεται πάντα σε σειρά με μια αντίσταση, αυτό ονομάζεται πόλωση led. Η αντίσταση περιορίζει το ηλεκτρικό ρεύμα και προστατεύει το LED από το να καεί.

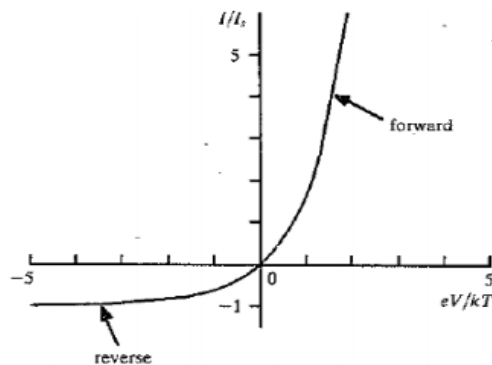
Για να σχηματίσουμε κύκλωμα με LED συνδέουμε τον αρνητικό πόλο (-) της μπαταρίας στην κάθοδο (-) του LED στη συνέχεια την αντίσταση και τέλος κλείνουμε το κύκλωμα συνδέοντας στον θετικό πόλο (+) της μπαταρίας. Τότε το LED πολώνεται ορθά και εκπέμπει φως. Αν συνδέσουμε το LED ανάποδα δηλαδή την άνοδο στον αρνητικό πόλο της μπαταρίας (ανάστροφη πόλωση) το LED δεν ανάβει γιατί δεν μπορεί να περάσει το ρεύμα. Αν μάλιστα η μπαταρία είναι μεγάλης τάσης (μεγαλύτερη από 5V) μπορεί το LED και να καταστραφεί. Επίσης όταν ένα led πολώνεται ανάστροφα, φωτόνιο με ενέργεια μεγαλύτερη από αυτή του ενεργειακού χάσματος απορροφάται με αποτέλεσμα την δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής. Αφού η επαφή είναι ανάστροφα πολωμένη, τα δύο φορτία δεν επανασυνδέονται αλλά κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις με αποτέλεσμα την δημιουργία ρεύματος. Δηλαδή το LED έχει συμπεριφορά φωτοανιχνευτή.



### ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΤΗΣ ΔΙΟΔΟΥ

Ως χαρακτηριστική καμπύλη ενός ηλεκτρονικού δίπολου στοιχείου ορίζεται η γραφική παράσταση (και θεωρητική σχέση) ρεύματος δια του στοιχείου σε συνάρτηση με την τάση στα άκρα του.

- Στην περίπτωση της διόδου η χαρακτηριστική της ( $I$ ' $V$ ) καλύπτει τόσο την ορθή πόλωση όσο και την ανάστροφη.
- Στην ορθή πόλωση έχουμε ομαλή μεταβολή του ρεύματος συναρτήσει της τάσης στα άκρα της διόδου.
- Τυπικά δεν υπάρχει κάποιο κατώφλι έναρξης της αγωγής της διόδου.
- Στην ανάστροφη πόλωση το ρεύμα σταθεροποιείται για πολώσεις της τάξης του)  $3kT/e$  και πάνω.



### Το κάθε led ανάλογα με το χρώμα του έχει διαφορετική τάση κατωφλίου:

Κάθε LED εκπέμπει πάντα φως σε μια συγκεκριμένη συχνότητα (χρώμα). Η συχνότητα στην οποία εκπέμπει καθορίζεται από το "ενεργειακό διάκενο" του ημιαγωγού του, καθώς και από την δομή των μικρο-ηλεκτρονικών επιστρώσεων του και εξαρτάται από τις προσμίξεις του ημιαγωγού. Διαφορετικά LED εκπέμπουν σε διαφορετικά χρώματα (κόκκινο, πράσινο, μπλε, πορτοκαλί, κίτρινο, λευκό).

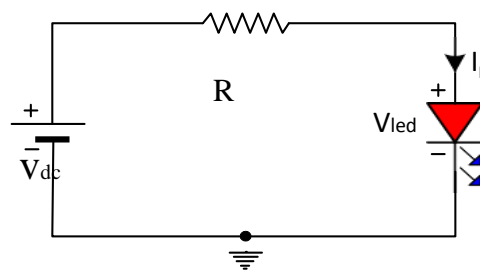
Τα LED χρησιμοποιούνται εδώ και καιρό σε διάφορες ηλεκτρονικές συσκευές: σχηματίζουν τα νούμερα σε ψηφιακά ρολόγια, μεταδίδουν πληροφορίες από τα τηλεχειριστήρια στην συσκευή, δείχνουν αν οι συσκευές είναι ανοιχτές, στους υπολογιστές δείχνουν ποιες λειτουργίες τους είναι ενεργοποιημένες κ.α

χρώμα	Τάση κατοφλίου V	Μήκος κύματος λ μέγιστης φωτεινής έντασης
Κόκκινο	1,88	660
Πράσινο	1,91	570
Κίτρινο	1,82	590
Πορτοκαλί	1,75	630
Μπλε-λευκό	2,9	850

**Το κάθε led ανάλογα με τη διατομή του, διαρρέεται από διαφορετικό ρεύμα:**

Διατομή (mm)	Ρεύμα (mA)
5	20
3	10
10	30

### Συνδεσμολογία LED



κύκλωμα 1

**Τύπος για υπολογισμό της αντίστασης που θα χρειαστεί για να πολωθεί το led:**

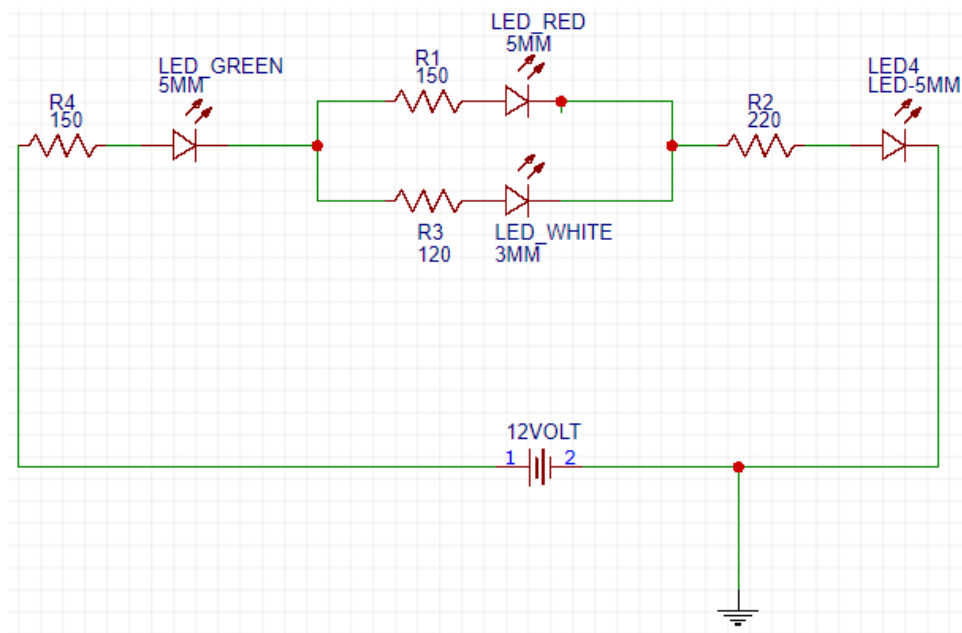
$$R = (V_{dc} - V_{led}) / I_{led}$$

Εφαρμόζοντας ΝΤΚ στον βρόγχο:  $+I \cdot R + V_{led} - V_{dc} = 0$

$$\Rightarrow I \cdot R = V_{dc} - V_{led}$$

$$\Rightarrow R = (V_{dc} - V_{led}) / I$$

## ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ



## ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ

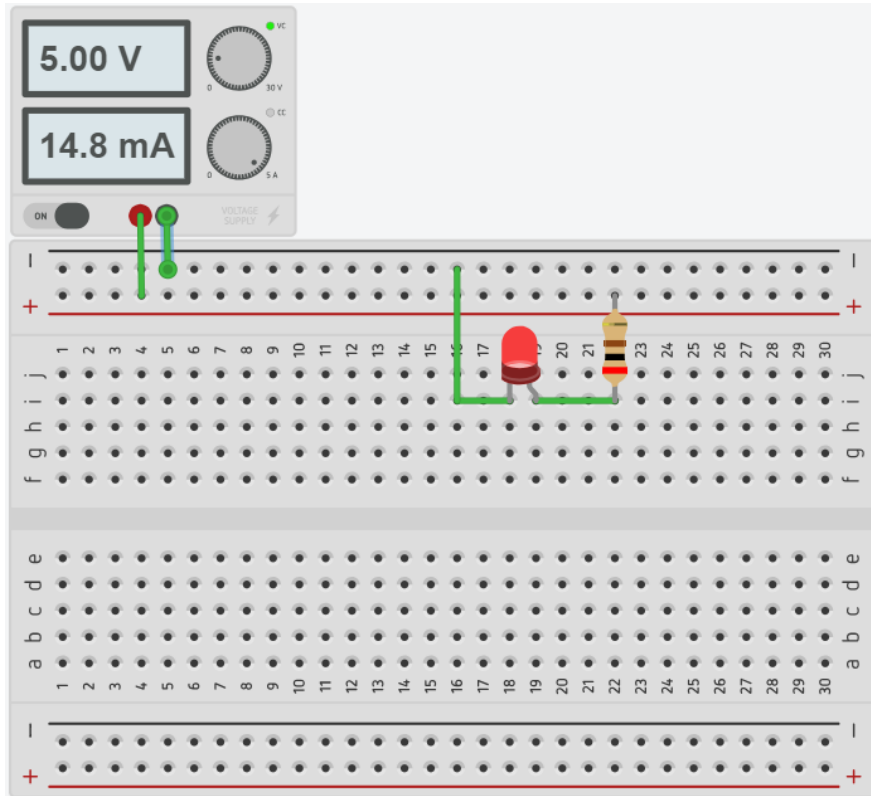
Στο παραπάνω κύκλωμα έχουν συνδεθεί δυο led παράλληλα και άλλα δύο σε σειρά με τα προηγούμενα. Το κάθε led είναι σε σειρά συνδεδεμένο με την αντίσταση που χρειάζεται για να πολωθεί σωστά.

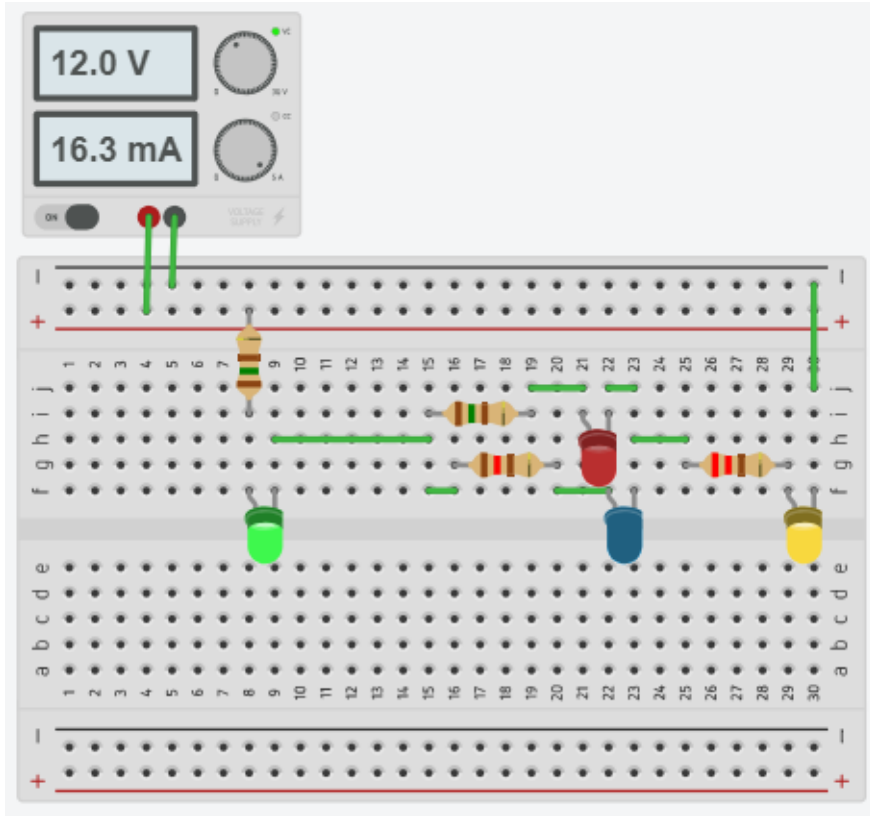
Η τάση των 12volt μοιράζεται αντίστοιχα στο κάθε led(με την αντίσταση του) και το πακέτο των led που είναι παράλληλα έχει την ίδια τάση.

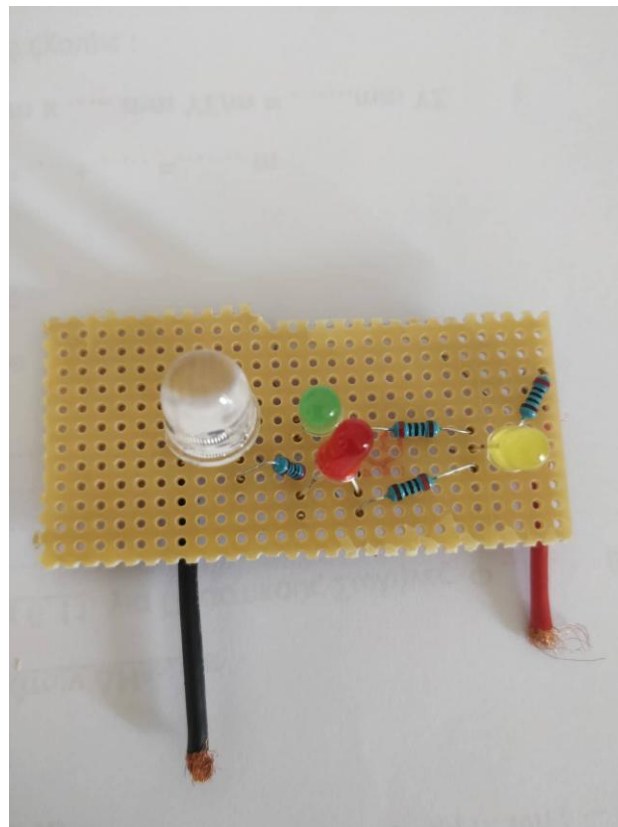
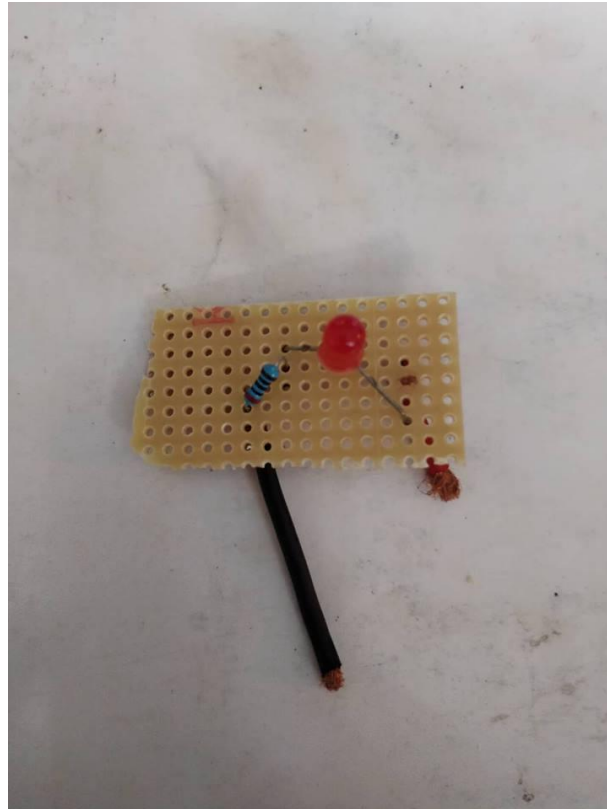
## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

- Πραγματοποιήστε και δοκιμάστε την λειτουργία του παραπάνω κυκλώματος.
- Μετρήστε με βολτόμετρο τις τάσεις στα άκρα κάθε Led και καταγράψτε τις στο σχήμα.
- Μετρήστε με βολτόμετρο τις τάσεις στα άκρα κάθε αντίστασης χωριστά, και εφαρμόστε τον Ν.ohm για να υπολογίσετε το ρεύμα σε κάθε αντίσταση. Καταγράψτε το ρεύμα στο σχήμα.
- Επιβεβαιώστε ότι η εξίσωση πόλωσης ισχύει σε κάθε περίπτωση.

## ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΣΤΟ BREADBOARD







Σε αυτές τις πλακέτες επιτυγχάνουμε πόλωση ενός led με αντίσταση σε σειρά.





## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ 2

# ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ LED ΜΕ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ-ΔΙΑΚΟΠΤΗ ΕΧΟΝΤΑΣ ΕΛΕΓΧΟ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΒΑΣΗΣ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

### ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

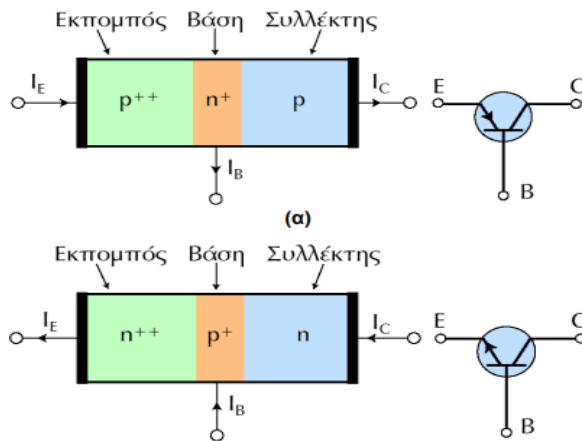
Αυτό το πείραμα έχει σκοπό να εξηγήσει τι είναι το τρανζίστορ, ποιες είναι οι λειτουργίες του και πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να οδηγήσει (τροφοδοτήσει) ένα led.

### ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ, ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ, ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΑ

1. Τροφοδοτικό
2. Αντιστάσεις
3. LED
4. breadboard
5. Καλώδια σύνδεσης
6. Τρανζίστορ

### ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ:

Το τρανζίστορ είναι το ηλεκτρονικό στοιχείο με την μεγαλύτερη παρουσία από όλα τα υπόλοιπα, σε όλες τις ηλεκτρονικές, αναλογικές ή ψηφιακές, συσκευές. Είναι ένας κρύσταλλος με τρεις περιοχές εμπλουτισμένες με προσμείξεις, δηλ. αποτελείται από τρία διαδοχικά εναλλασσόμενα στρώματα ημιαγωγού υλικού (sandwich υλικό), εκ των οποίων το ενδιάμεσο υλικό είναι είτε τύπου -n (τρανζίστορ τύπου-pnp) ή τύπου-p (τρανζίστορ τύπου -npn).



Ένα τρανζίστορ αποτελείται από 3 περιοχές με διακεκριμένη λειτουργία η κάθε μία:

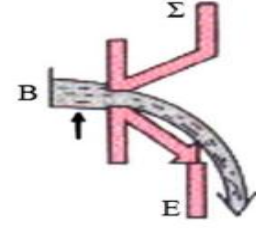
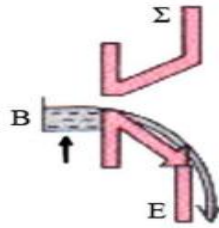
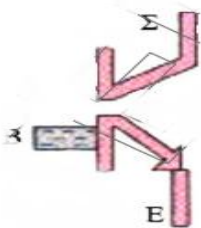
- Εκπομπός (Είναι μια έντονα εμπλουτισμένη περιοχή και "εκπέμπει" φορτία προς τη βάση)
- Βάση (Είναι μια πολύ λεπτή περιοχή λιγότερο εμπλουτισμένη που επιτρέπει στα περισσότερα φορτία που εκπέμπονται από τον εκπομπό να φθάνουν στο συλλέκτη)
- Συλλέκτης (Συλλέγει τα φορτία που καταφθάνουν από τον εκπομπό)

Σημείωση: Το βέλος στον εκπομπό δείχνει τη συμβατική φορά ροής του ρεύματος εσωτερικά στο τρανζίστορ.

### Αρχή λειτουργίας:

Η λειτουργία ενός διπολικού τρανζίστορ (bipolar ή BJT), βασίζεται στην εκπομπή φορέων από το εκπομπό και τη συλλογή τους από τον συλλέκτη. Σε κανονική λειτουργία ενισχυτή, η επαφή εκπομπού είναι πάντα ορθά πολωμένη και η επαφή συλλέκτη ανάστροφα πολωμένη (σε κάποιες περιπτώσεις η επαφή του συλλέκτη είναι επίσης ορθά πολωμένη). Ανάλογα με την τιμή της τάσης βάσης-εκπομπού ( $V_{BE}$ ), είναι δυνατές οι ακόλουθες περιπτώσεις:

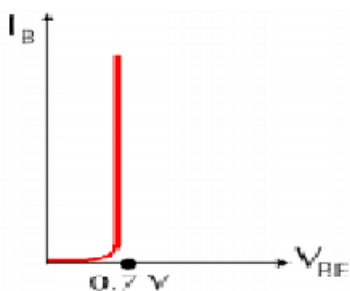
- Όταν είναι  $V_{BE} < 0.7V$  (για τρανζίστορ Si), πρακτικά δεν διέρχεται ρεύμα από τη βάση προς τον εκπομπό, ούτε μεταξύ εκπομπού και συλλέκτη.
- Όταν είναι  $V_{BE} > 0.7$ , υπάρχει αισθητή ροή ελεύθερων ηλεκτρονίων από τον εκπομπό προς τη βάση και ελεύθερων οπών από τη βάση προς τον εκπομπό.



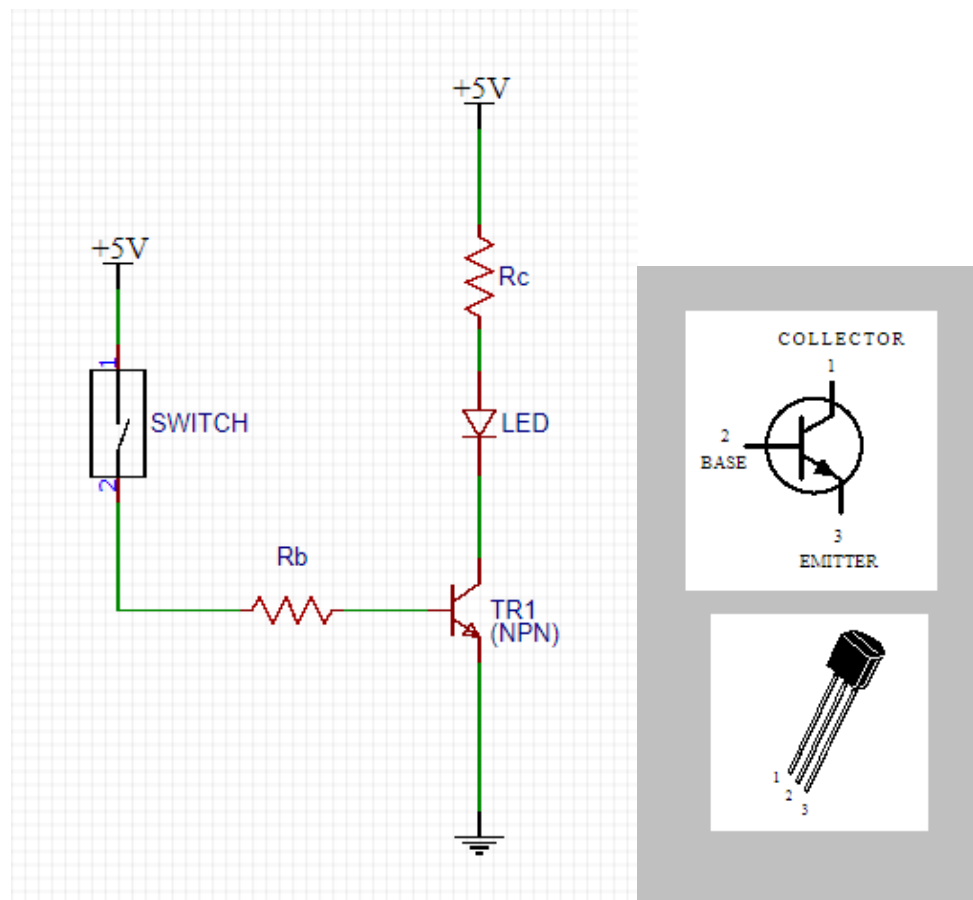
Δυνατότητες λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ

Πόλωση επαφής συλλέκτη

		ορθή	ανάστροφη
Πόλωση επαφής εκπομπού	ορθή	Περιοχή κόρου (κλειστός διακόπτης)	Ενεργός περιοχή ορθής λειτουργίας (καλός ενισχυτής)
	ανάστροφη	Ενεργός περιοχή ανάστροφης λειτουργίας (κακός ενισχυτής)	Περιοχή αποκοπής (ανοιγτός διακόπτης)



Χαρακτηριστική ρεύματος βάσης

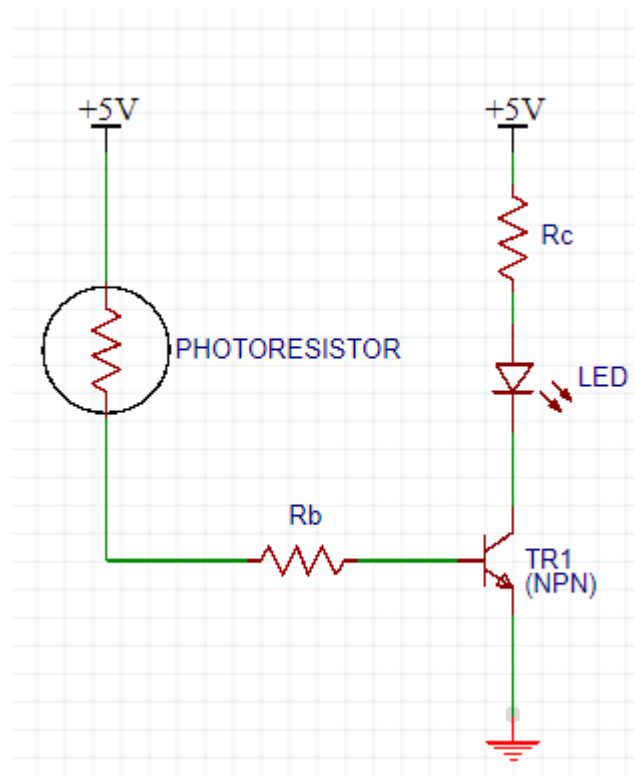
Απλή συνδεσμολογία ενός led με ένα transistor με διακοπτική λειτουργία :

Στο παραπάνω κύκλωμα υλοποιείται διακοπτική λειτουργία με τρανζίστορ. Στο συλλέκτη του τρανζίστορ συνδέεται ένα led σε τάση 5volt και μία αντίσταση σε σειρά για να προστατεύεται. Στην βάση συνδέεται ένας διακόπτης και μια αντίσταση. Εκεί είναι το σημείο που επιτυγχάνεται η διακοπτική λειτουργία. Όταν λοιπόν κλείσει ο διακόπτης, θα δημιουργηθεί ένα ρεύμα  $I_{base}$  το οποίο θα προκαλέσει ένα πολύ μεγαλύτερο ρεύμα συλλέκτη-εκπομπού και η φωτοдиодος θα ανάψει.

Η αντίσταση  $R_c$  υπολογίζεται όπως στο πρώτο εργαστήριο για να δώσει το επιθυμητό ρεύμα στο Led ενώ η  $R_b$  υπολογίζεται ώστε να δώσει στην βάση ένα ρεύμα  $\beta$  φορές μικρότερο. Σημαντικές παράμετροι εδώ είναι:  $V_{be} \cong 0,7V$  και  $V_{ce} \cong 0V$ .

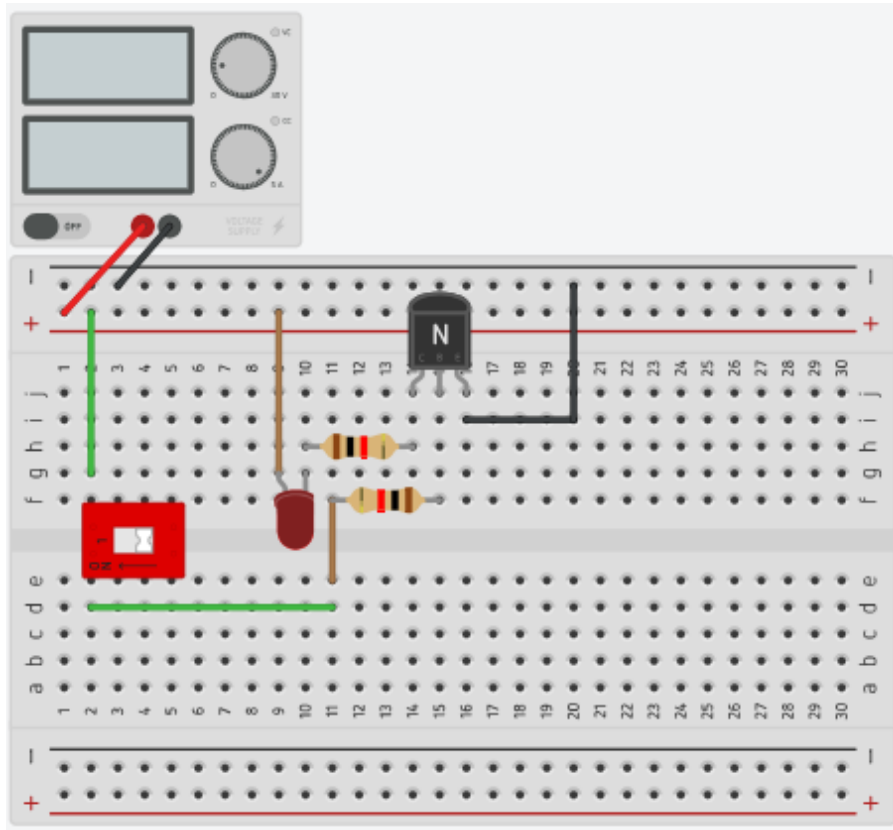
Στη συνέχεια υλοποιείτε το παρακάτω κύκλωμα:

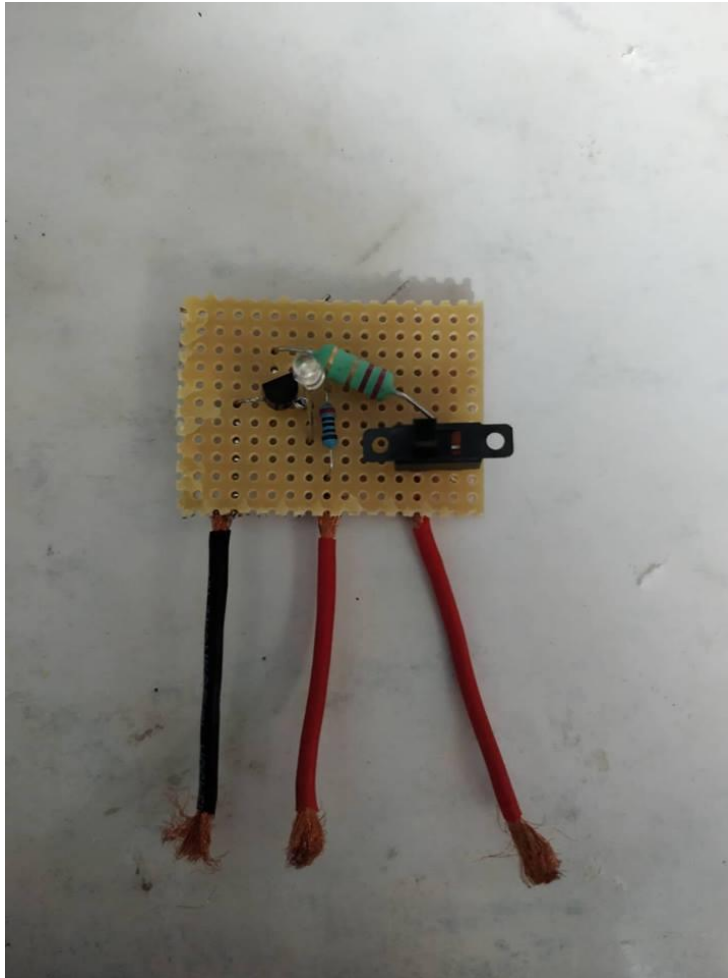
Συνδέστε δηλαδή, μια φωτοαντίσταση αντί τον διακόπτη.



Η φωτοαντίσταση ρυθμίζει το ρεύμα της βάσης δηλαδή, ανάλογα το φως που θα πέσει πάνω της θα διαρρεύσει και το ανάλογο ρεύμα στην βάση του τρανζίστορ. Συνεπώς η φωτεινότητα του led θα προσαρμόζει στις μεταβολές της φωτοαντίστασης. Ουσιαστικά στο παραπάνω κύκλωμα έχουμε δημιουργήσει το λεγόμενο " φωτοτρανζίστορ" το οποίο είναι διαθέσιμο στο εμπόριο και σαν ενιαίο εξάρτημα. Στην βάση συνδέεται ένας διακόπτης και μια φωτοαντίσταση. Όταν λοιπόν πέσει φως στην φωτοαντίσταση, θα δημιουργηθεί ένα ρεύμα  $I_{base}$  που θα προκαλέσει ένα πολύ μεγαλύτερο ρεύμα συλλέκτη-εκπομπού και η φωτοдиодος θα ανάψει.

## ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΣΤΟ BREADBOARD





Σε αυτήν την πλακέτα όταν κλείνουμε τον διακόπτη ένα μικρό ρεύμα περνάει στην βάση του τρανζίστορ μέσω της αντίστασης, πολώνοντας με αυτόν τον τρόπο το τρανζίστορ με αποτέλεσμα να διαρρεύσει ρεύμα από τον συλλέκτη στον εκπομπό και να ανάψει το led.

Το πλεονέκτημα ενός τέτοιου κυκλώματος σε σχέση με το κύκλωμα πόλωσης led του 1<sup>ου</sup> εργαστηρίου θα γίνει προφανές όταν το χρησιμοποιήσουμε για να οδηγήσουμε φορτίο led μεγάλης ισχύος. Τότε το ρεύμα στον διακόπτη ή στην φωτοαντίσταση της βάσης θα είναι μικρό, πολύ χαμηλότερο από το μεγάλο ρεύμα φορτίου(led). Έτσι δεν θα καταπονείται ο διακόπτης ή ο αισθητήρας και θα απομονώνεται το φορτίο(led) από το χειριστήριο ή τον αισθητήρα.



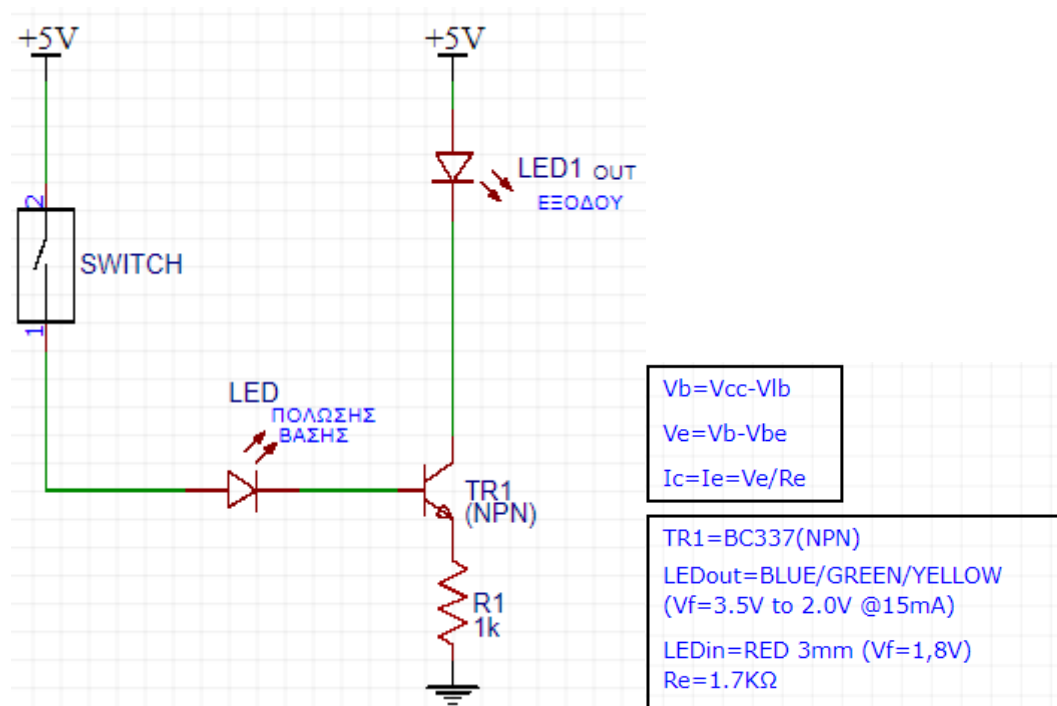


ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ 3ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ LED ΜΕ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ-ΔΙΑΚΟΠΤΗ  
ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ 2<sup>ο</sup> LED ΓΙΑ ΠΟΛΩΣΗ  
ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

Αυτό το πείραμα έχει σκοπό να εξηγήσει τη συμπεριφορά του κυκλώματος αν η βάση ενός τρανζίστορ πολωθεί με ένα led με σκοπό να τροφοδοτηθεί ένα άλλο led.

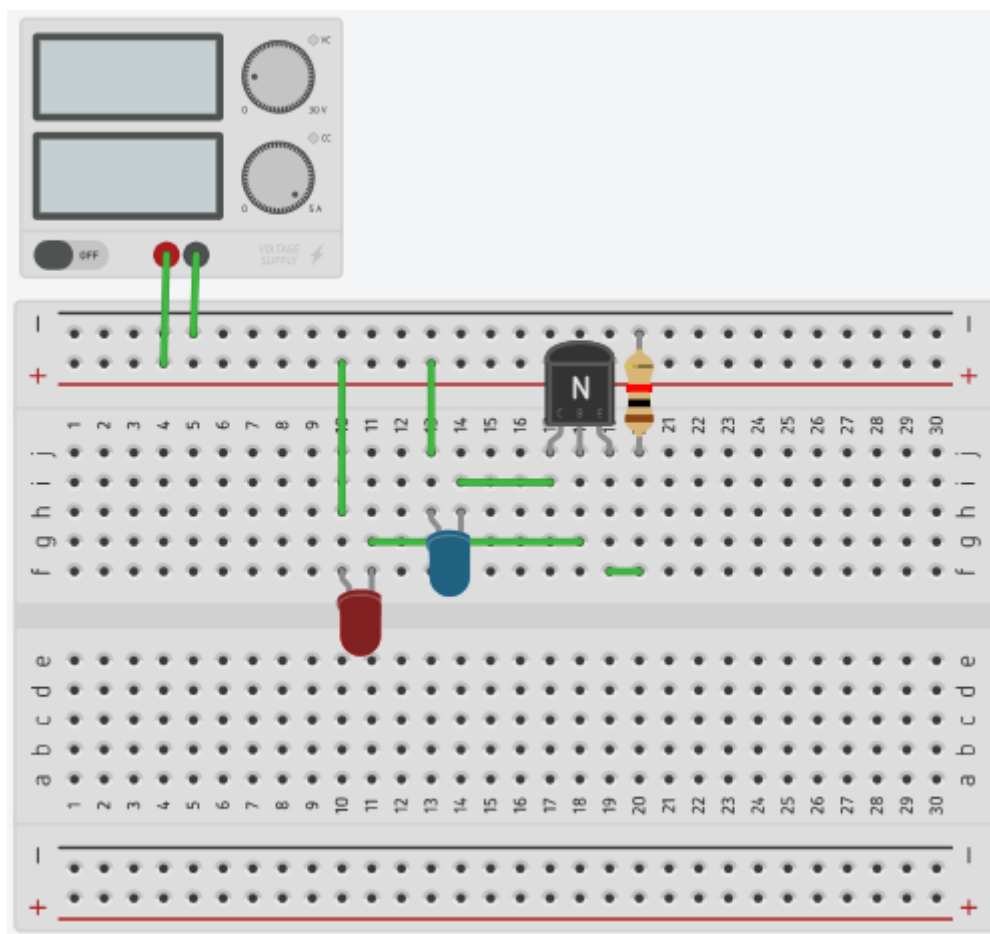
ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ, ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ, ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΑ

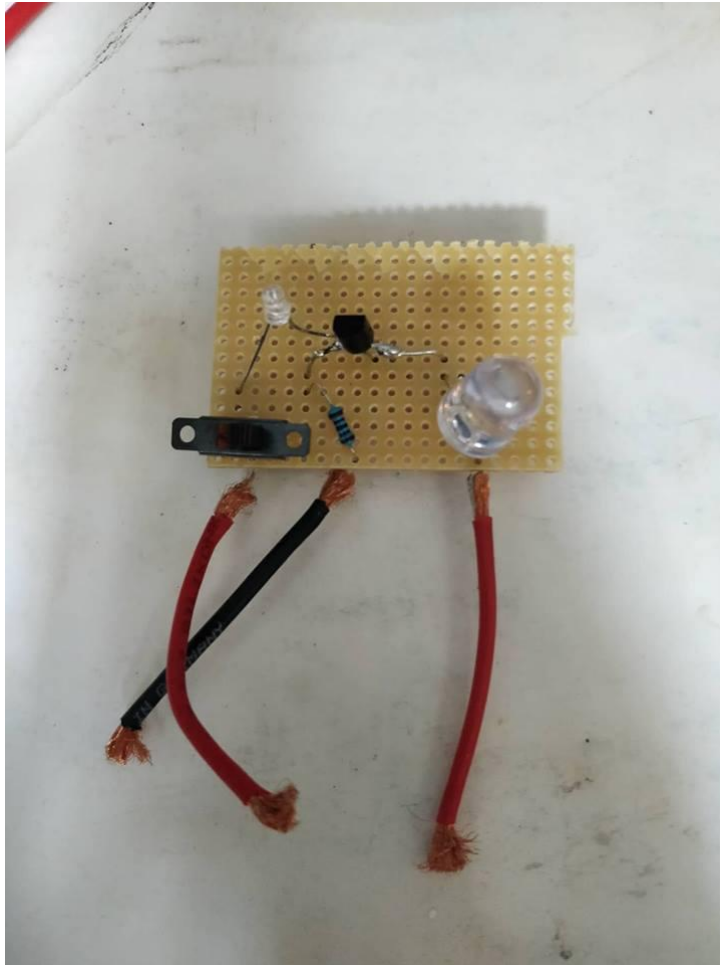
1. Τροφοδοτικό
2. Αντιστάσεις
3. LED
4. Breadboard
5. Καλώδια σύνδεσης
6. Τρανζίστορ



Στο παραπάνω κύκλωμα γίνεται πόλωση του τρανζίστορ με 2<sup>ο</sup> led . Η χρήση της φωτοδιόδου στη προκειμένη περίπτωση κάνει το κύκλωμα απλό και σταθερό. Αυτό συμβαίνει διότι στη βάση του τρανζίστορ υπάρχει σταθερή τάση λόγω του ότι δεν υπάρχει κάποιο μεταβλητό εξάρτημα και η τάση κατωφλίου της διόδου είναι επίσης σταθερή. Συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί led πόλωσης του χρώματος που αντιστοιχεί στην επιθυμητή τάση βάσης και το κύκλωμα της βάσης να μην επηρεάζεται από το led εξόδου (φορτίο), ανεξαρτήτως χρώματος ή ισχύος.

## ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΣΤΟ BREADBOARD





Σε αυτό το κύκλωμα αντί για αντίσταση στην βάση του τρανζίστορ συνδέεται 2<sup>ο</sup> led μικρής ισχύος. Με αυτόν τον τρόπο δεν χρειάζεται να αλλάζουμε αντίσταση στην βάση του τρανζίστορ ανάλογα με τις απαιτήσεις γιατί η τάση στην βάση παραμένει σταθερή. Η τάση αυτή ισούται με την τάση τροφοδοσίας μείον την ορθή τάση πόλωσης του 2<sup>ου</sup> led. ΠΡΟΣΟΧΗ να μην συγχέεται το 2<sup>ο</sup> μικρό led πόλωσης βάσης με το κύριο μεγάλο led εξόδου στον συλλέκτη.



## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ 4

### ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ LED ΜΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΠΗΓΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

(Πόλωση led με διαιρέτη τάσης στη βάση του transistor)

#### ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

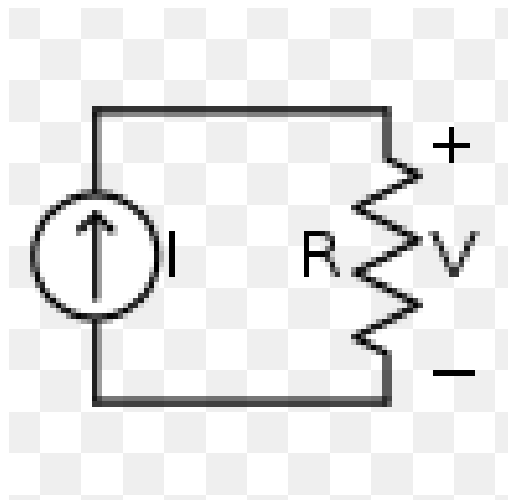
Αυτό το πείραμα έχει σκοπό να εξηγήσει πως φτιάχνεται μια απλή ρυθμιζόμενη πηγή ρεύματος για τροφοδοσία LED και τη συμπεριφορά του κυκλώματος της.

#### ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ, ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ, ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΑ

1. Τροφοδοτικό
2. Αντιστάσεις
3. LED
4. Breadboard
5. Καλώδια σύνδεσης
6. Τρανζίστορ

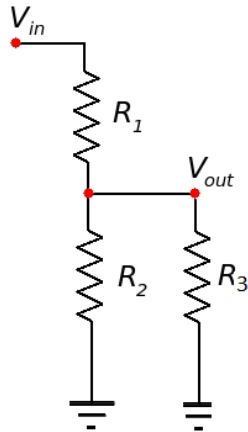
#### ΠΗΓΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ:

Πηγή ρεύματος ορίζουμε τη πηγή η οποία παράγει ή απορροφά ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο είναι ανεξάρτητο από τις μεταβολές της τάσης φορτίου.



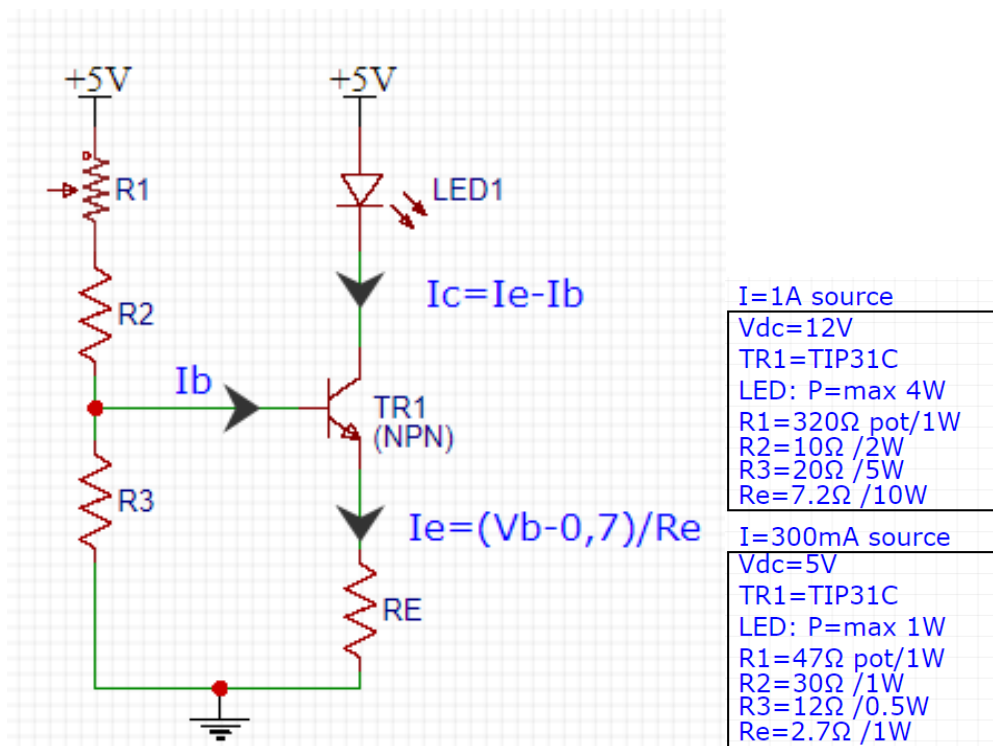
ΔΙΑΙΡΕΤΗΣ ΤΑΣΗΣ:

Διαίρετης τάσης ή διαιρέτης δυναμικού είναι μία απλή κυκλωματική διάταξη η οποία αποτελείται από δύο ή περισσότερες αντιστάσεις συνδεδεμένες σε σειρά, στα άκρα των οποίων εφαρμόζεται η τάση εισόδου. Ως τάση εξόδου λαμβάνεται η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες της μίας εκ των άλλων αντιστάσεων. Οι τιμές που μπορεί να πάρει η τάση εξόδου κυμαίνονται από το 0 έως την τάση εισόδου.



Τύπος διαιρέτη τάσης χωρίς φορτίο (ή με φορτίο πολύ μεγάλης R)

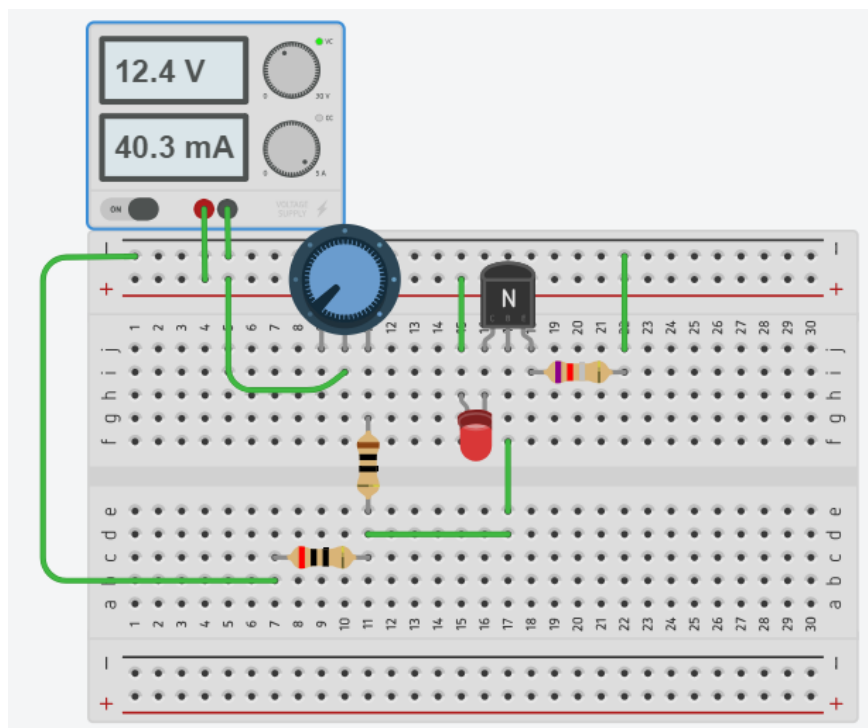
$$V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

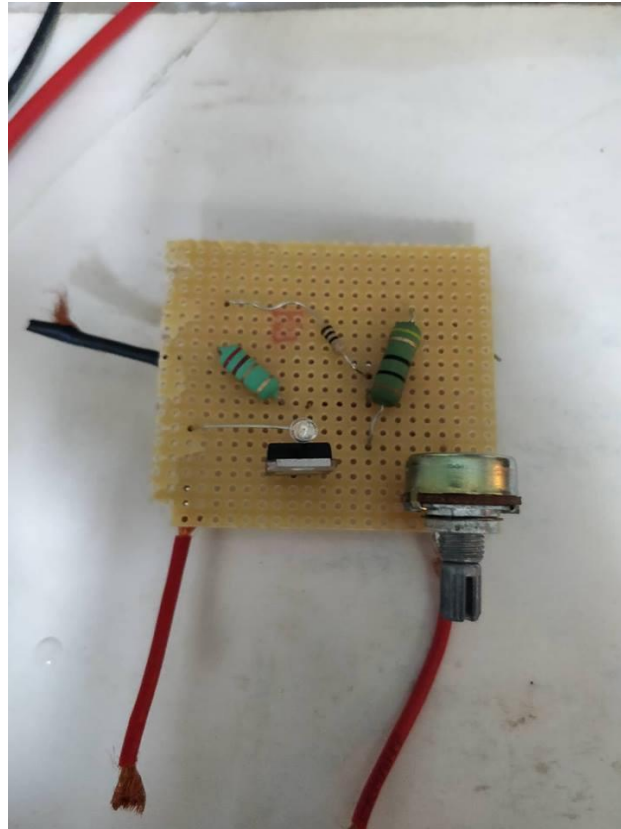
ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΤΕ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΑΤΩ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ:

Στο παραπάνω κύκλωμα δημιουργείται μια μεταβλητή πηγή ρεύματος με σκοπό να ρυθμίζει τη φωτεινότητα του led. Στο συλλέκτη του τρανζίστορ συνδέεται η άνοδος του LED σε τάση 5volt. Στην βάση συνδέεται ένας διαιρέτης τάσης ο οποίος ρυθμίζει τη  $V_{base}$  ανάλογα με τη διαφορά δυναμικού που δημιουργείται ανάμεσα στις αντιστάσεις και τη γείωση. Η τάση του εκπομπού θα είναι κατά 0,7volt μικρότερη από τη  $V_{base}$  με γνωστή την  $V_E$ . Ο Ν.Οhm στην  $R_E$  δίνει απευθείας την τιμή του ρεύματος εκπομπού:  $I_E = V_E / R_E$ . Αυτόματα λοιπόν γίνεται γνωστό το ρεύμα του εκπομπού εφόσον η αντίσταση εκπομπού είναι γνωστή. Πρακτικά όμως το ρεύμα του συλλέκτη είναι σχεδόν ίσο με το ρεύμα του εκπομπού. Έτσι λοιπόν μπορούμε να ρυθμίσουμε το επιθυμητό ρεύμα για το led, και μάλιστα ανεξάρτητα από τις "λεπτομέρειες" του LED!

Η βάση του τρανζίστορ "τραβάει" ένα σχετικά μικρό ρεύμα άρα ο διαιρέτης κατασκευάζεται με σχετικά μικρές αντιστάσεις έτσι ώστε το ρεύμα του να είναι αρκετά μεγάλο και να μην επηρεάζεται από αυτό που θα τραβήξει η βάση. Πρέπει δηλαδή να είναι τουλάχιστον 10φορές μεγαλύτερο από το ρεύμα βάσης. Έτσι, όταν η βάση απορροφήσει το ρεύμα που "επιθυμεί" ώστε να πολωθεί ορθά, ο διαιρέτης τάσης δεν θα επηρεαστεί και θα εξακολουθήσει να παρέχει την τάση που υπολογίσαμε στην βάση.

## ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΣΤΟ BREADBOARD





Στο κύκλωμα αυτό η φωτεινότητα του led εξαρτάται ανάλογα την ρύθμιση του ποτενσιόμετρου.





## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ 5

### ΦΩΤΟ-ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΥ ΜΕ ΤΕΛΕΣΤΙΚΟ ΕΝΙΣΧΥΤΗ

#### ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

Σκοπός μας είναι να γίνει ενίσχυση του ρεύματος το οποίο λαμβάνεται από την φωτοδίοδο σε "φωτοβολταϊκή λειτουργία" με "τελεστικό ενισχυτή" (opamp). Η ενίσχυση θα δώσει τάση ανάλογη με το φως που ανιχνεύει ο αισθητήρας.

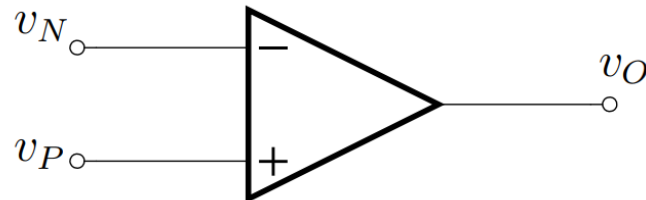
#### ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ, ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ, ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΑ

1. Φωτοδίοδος
2. Τελεστικός Ενισχυτής
3. breadboard
4. Καλώδια σύνδεσης

#### ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

##### ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΣ:

Είναι διάταξη ημιαγωγών που μετατρέπει το φως σε ρεύμα. Το ρεύμα παράγεται όταν τα φωτόνια απορροφούνται στην φωτοδίοδο. Μια μικρή ποσότητα του ρεύματος παράγεται επίσης όταν δεν υπάρχει φως. Οι φωτοδιόδοι μπορεί να περιέχουν οπτικά φίλτρα, ενσωματωμένους φακούς και μπορεί να έχουν μικρές ή μεγάλες επιφάνειες. Έχουν συνήθως πιο αργό χρόνο απόκρισης όσο αυξάνεται η επιφάνεια τους. Το ρεύμα που παράγεται είναι της τάξης των nA-  $\mu$ A-mA ανάλογα με την έκταση της φωτοευαίσθητης επιφάνειας. Ένα βασικό πρόβλημα της φωτοδίοδου είναι ότι, ενώ το ρεύμα εξόδου είναι ανάλογο του προσπίπτοντος φωτός, αντίθετα η τάση εξόδου δεν είναι ανάλογη. Συνεπώς η χρήση ενός τελεστικού ενισχυτή είναι αναγκαία για να μπορέσει αυτή η έξοδος να χρησιμοποιηθεί με κάποιο χρήσιμο τρόπο σαν αναλογικό σήμα τάσης.

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ:

Η κύρια λειτουργία του τελεστικού ενισχυτή είναι να ενισχύει τη διαφορά δυναμικού μεταξύ  $V_P$  και  $V_N$  η οποία ορίζεται ως

$$V_D = V_P - V_N$$

και ονομάζεται διαφορική τάση εισόδου. Έτσι η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή είναι ίση με

$$V_O = a \cdot V_D = a \cdot (V_P - V_N)$$

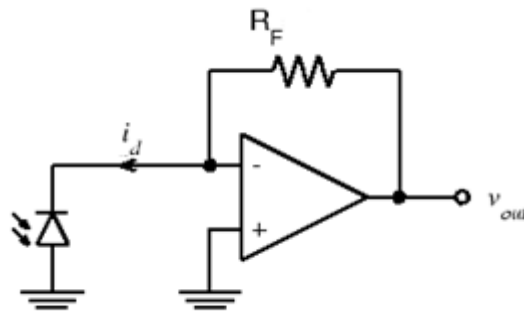
όπου με  $a$  συμβολίζεται το κέρδος του τελεστικού ενισχυτή το οποίο μπορεί να λάβει πολύ μεγάλες τιμές. Για παράδειγμα, αν θέλαμε να βρούμε ποια είναι η διαφορά δυναμικού  $v_D$  που προκαλεί μια δεδομένη τάση εξόδου  $v_{out}$  (με τον ακροδέκτη της εξόδου να είναι ασύνδετος) τότε θα έπρεπε να υπολογίσουμε το λόγο  $v_D = V_O/a$ .

Αν  $a = 2 \cdot 10^5$  και  $v_{out} = 6V$  τότε η διαφορά δυναμικού στους ακροδέκτες της εισόδου που προκάλεσαν αυτή την τάση στην έξοδο του τελεστικού ενισχυτή αρκεί να είναι  $V_D = 6/2 \cdot 10^5 = 30\mu V$ . Με άλλα λόγια μια πολύ μικρή διαφορά δυναμικού στην είσοδο του τελεστικού ενισχυτή αρκεί για δώσει στην έξοδο μια μεγάλη τιμή. Φυσικά η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή δε μπορεί να ξεπεράσει τα όρια  $V_{OH}$  και  $V_{OL}$  που θέτουν οι τάσεις τροφοδοσίας  $+VCC$  και  $-VEE$ . Έτσι παρατηρούμε πως αν για παράδειγμα  $V_{OH} = 15V$ ,  $a = 10^5$  και η διαφορά δυναμικού  $V_D$  ξεπεράσει τα  $150\mu V$  τότε η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή οδηγείται στη μέγιστη δυνατή τιμή της που δεν είναι άλλη από τη  $V_{OH}$ .

Η τεράστια δυνατότητα ενίσχυσης του τελεστικού ενισχυτή οδηγεί σε "κλείδωμα" της εξόδου στην άνω ή στην κάτω μέγιστη τάση ( $V_{OH}$  και  $V_{OL}$ ) ακόμη και για ελάχιστο σήμα εισόδου. Αυτό ουσιαστικά αχρηστεύει την χρήση του opamp σαν ενισχυτή και τον καθιστά σαν έναν "ψηφιακό συγκριτή". Για να λειτουργήσει αποτελεσματικά ο

οραμρ σαν αναλογικός ενισχυτής , με έξοδο ανάλογη της εισόδου, πρέπει απαραίτητα να συνδεσμοποιηθεί σε διάταξη ΑΝΑΔΡΑΣΗΣ.

ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ:



κυκλώμα 1

Η  $R_F$  μπορεί να υπολογιστεί μέσω του τύπου:

$$R_F = V_{out} / i_d$$

Στο παραπάνω κύκλωμα επιτυγχάνεται μετατροπή "σήματος ρεύματος" σε "σήμα τάσης" ενίσχυση τάσης. Όπου  $V_{out}$  είναι η επιθυμητή τάση εξόδου του κυκλώματος και  $i_d$  το ρεύμα που «βγάζει» η φωτοδίοδος σε συγκεκριμένη φωτεινότητα. Συνεπώς η έξοδος είναι ανάλογη της  $R_F$ . Δηλαδή ανάλογα με την αντίσταση που θα χρησιμοποιηθεί θα επιτευχθεί και η ανάλογη ενίσχυση.

## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

### ΑΣΚΗΣΗ 1

Υλοποιήστε το προηγούμενο κύκλωμα και πάρτε μετρήσεις της τάσης εξόδου μεταβάλλοντας τον φωτισμό (Lux) στη φωτοδίοδο. Πάρτε 4 μετρήσεις.

### ΑΣΚΗΣΗ 2

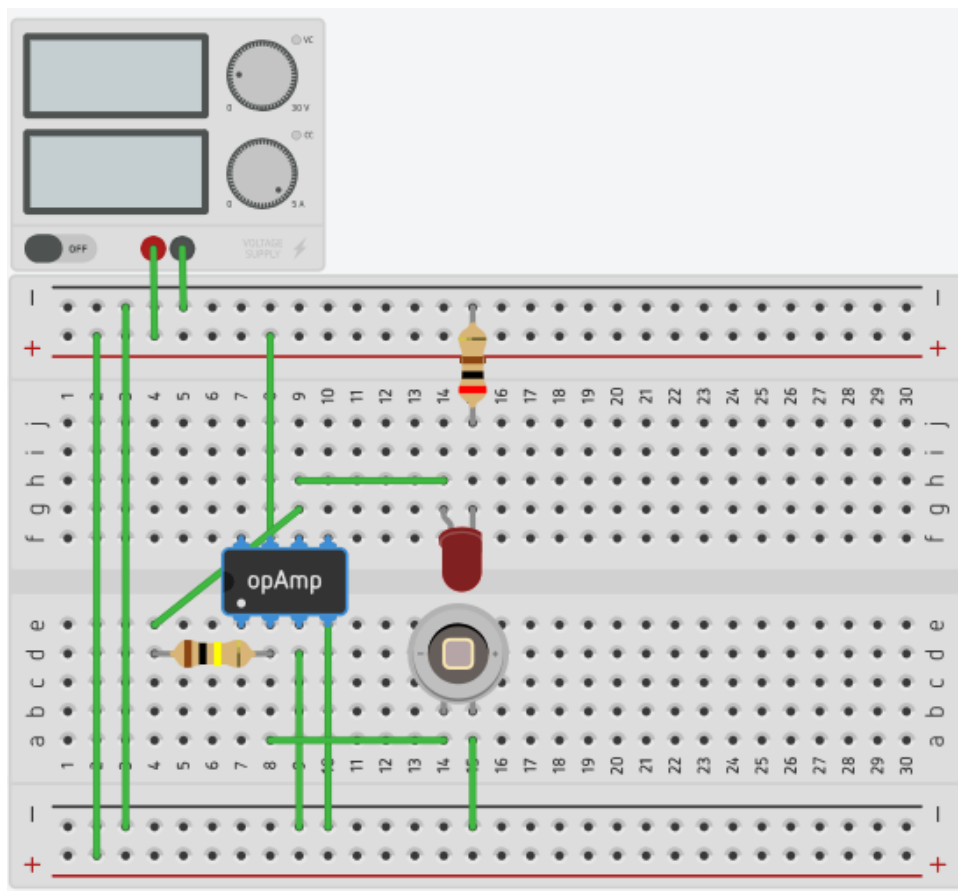
Στην έξοδο του προηγούμενου κυκλώματος συνδέστε ένα led με την κατάλληλη αντίσταση προστασίας και μεταβάλετε ξανά το φωτισμό στη φωτοδίοδο. Τι παρατηρείτε;

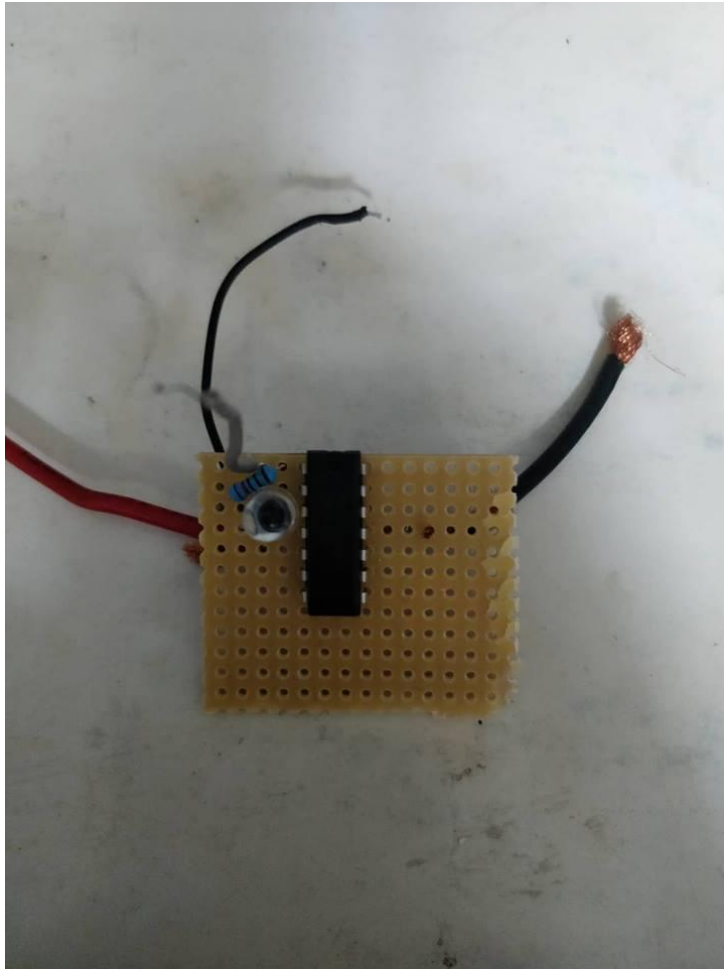
## ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ ΠΡΟΣ ΑΠΑΝΤΗΣΗ

1. Τι είναι η φωτοδίοδος και ποια η διαφορά της με ένα led;
2. Μπορεί ένα led να χρησιμοποιηθεί σαν φωτοδίοδος; Δοκιμάστε το στο εργαστήριο.

3. **Να μεταβληθεί η  $R_f$  στην μέγιστη και ελάχιστη τιμή της. Τι παρατηρείτε στην έξοδο του κυκλώματος 1;**
4. **Να γίνει το ίδιο στο κύκλωμα της άσκησης 2. Τι παρατηρείτε στο LED;**

## ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΣΤΟ BREADBOARD





Στο παραπάνω κύκλωμα πραγματοποιείται ενίσχυση του σήματος το οποίο λαμβάνεται από τη φωτοδίοδο σε μορφή φωτός.



## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ 6

### ΔΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΥ ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ

#### ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

Αυτό το πείραμα έχει σκοπό να εξηγήσει, πώς λειτουργεί μια φωτοδίοδος σε κατάσταση ανάστροφης πόλωσης και πού μπορεί να εφαρμοστεί σαν φωτοανιχνευτής.

#### ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ, ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ, ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΑ

- 1 Τροφοδοτικό
- 2 Αντιστάσεις
- 3 φωτοδίοδος
- 4 Breadboard
- 5 Καλώδια σύνδεσης
- 6 Τρανζίστορ

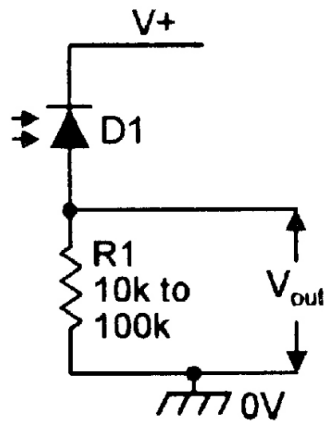
#### Εισαγωγή στο κύκλωμα:

Στο παρακάτω κύκλωμα έχει συνδεθεί μια φωτοδίοδος ανάστροφα με μια πηγή τάσης και με μια αντίσταση σε σειρά. Αν η επιφάνεια της φωτοδίοδου εκτεθεί σε ορατό φως τότε θα περάσει ένα σημαντικό αντίστροφο ρεύμα και έτσι θα δημιουργήσει μια τάση εξόδου κατά μήκος της αντίστασης  $R_1$ .

Η τιμή του αντίστροφου ρεύματος και της τάσης εξόδου είναι άμεσα ανάλογες με την ένταση της πηγής φωτός και έτσι η φωτοδίοδος είναι πραγματικά φωτοευαίσθητη και ένα καλό εργαλείο για αυτοματισμούς κλπ.

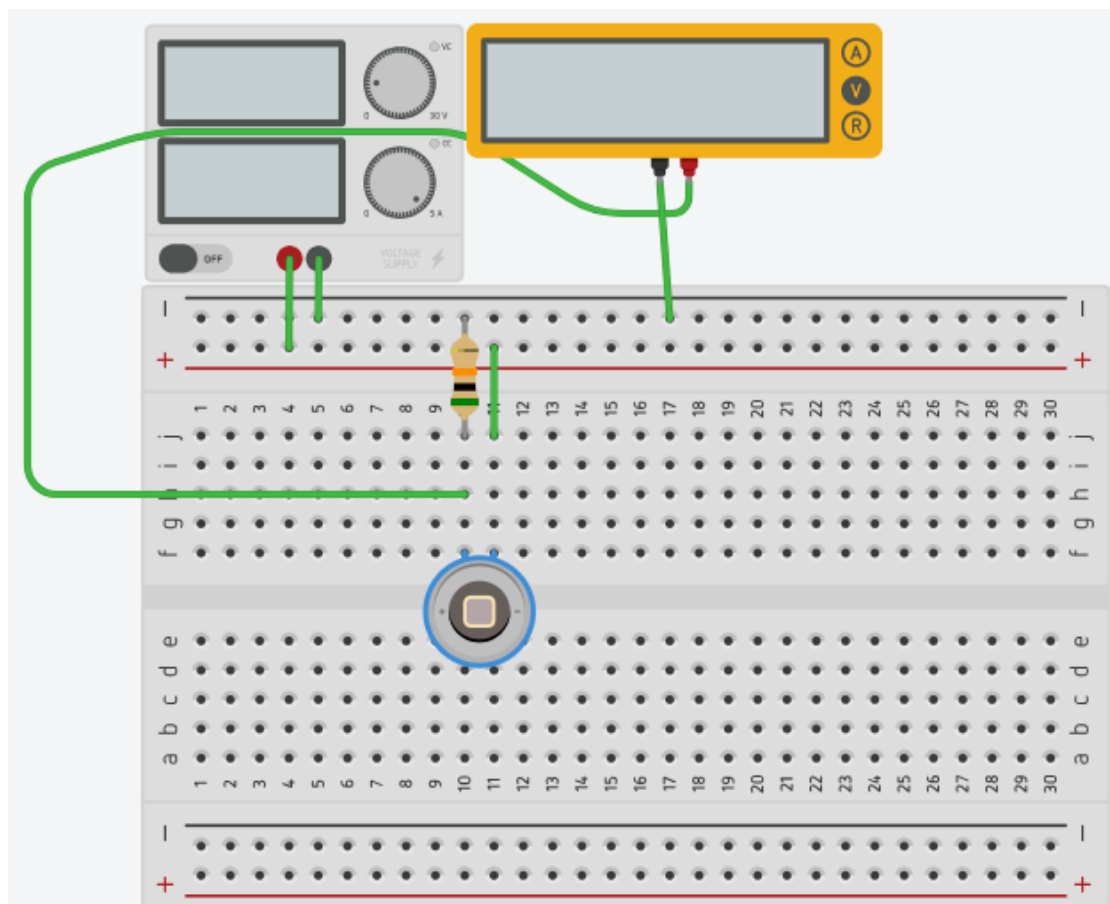
Συνεπώς αυτό το κύκλωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές ανίχνευσης στάθμης φωτός δίνοντας τάση εξόδου ανάλογη της έντασης του προσπίπτοντος φωτός. Η τάση αυτή, μπορεί αν χρειαστεί, να ενισχυθεί με περαιτέρω κύκλωμα ενισχυτή (τελεστικού, με τρανζίστορ, κλπ).

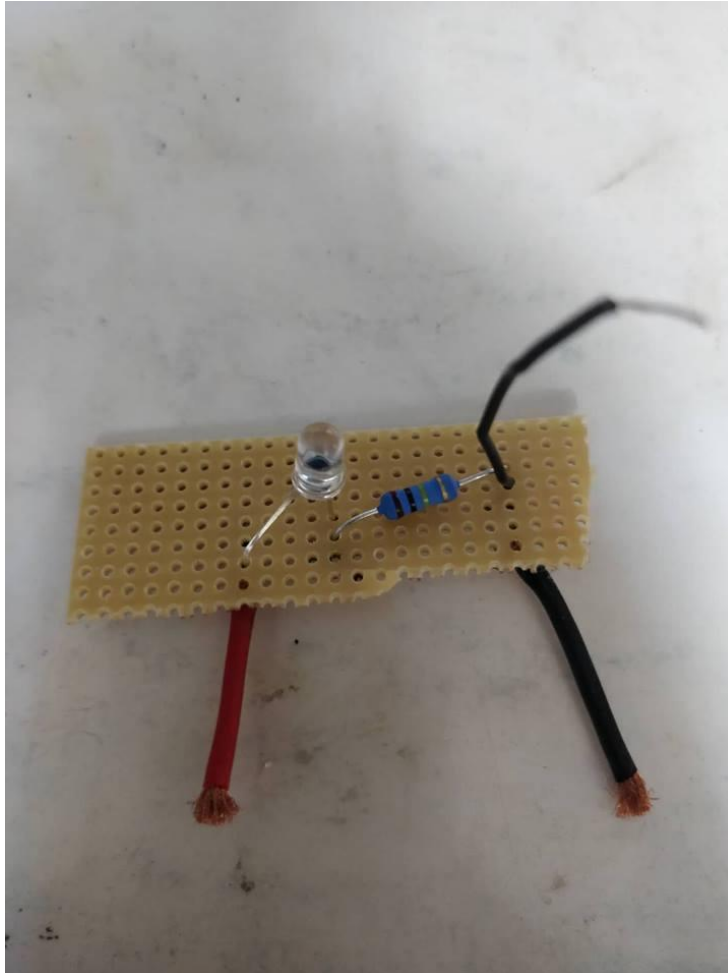




Με λίγα λόγια το κύκλωμα μετατρέπεται σε ένα αναλογικό σύστημα όπου ανάλογα με τη φωτεινότητα που προσπίπτει στη φωτοδίοδο (D1) η τάση εξόδου αυξομειώνεται αναλογικά. Αν παραδείγματος χάρη η φωτεινότητα που προσπίπτει στην D1 είναι πολύ έντονη και η πιο υψηλή που μπορεί να ανιχνευτεί τότε η τάση εξόδου θα είναι 5Volt. Αν πάλι η φωτεινότητα είναι γύρω στη μέση σε σχέση με αυτή που μπορεί να ανιχνευτεί τότε η τάση εξόδου θα είναι γύρω στα 2,5 Volt.

## ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΣΤΟ BREADBOARD





Ανάστροφη πόλωση φωτοδιόδου. Το κύκλωμα αυτό λειτουργεί σαν αναλογικός φωτο-αισθητήρας.



## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ 7

### ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ ΟΠΤΙΚΟΥΔΙΑΚΟΠΤΗ ΜΕ ΦΩΤΕΙΝΗ ΔΕΣΜΗ ΛΕΙΖΕΡ

#### ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

Αυτό το πείραμα έχει σκοπό να εξετάσει πως ένας κινητήρας θα ενεργοποιηθεί και θα αρχίσει να περιστρέφεται όταν υπάρχει επαρκές φως στο περιβάλλον. Μόλις το κύκλωμα εντοπίσει το φως του περιβάλλοντος, ο κινητήρας θα ενεργοποιηθεί αυτόματα και θα παραμείνει σε λειτουργία για όσο διάστημα υπάρχει φως. Το στοιχείο που επιτρέπει την ανίχνευση φωτός σε αυτό το κύκλωμα είναι μια φωτοαντίσταση.

#### ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ, ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ, ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΑ

- 1 Τροφοδοτικό
- 2 φωτοαντίσταση
- 3 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος
- 4 breadboard
- 5 Καλώδια σύνδεσης
- 6 Τρανζίστορ

#### ΦΩΤΟΑΝΤΙΣΤΑΣΗ:

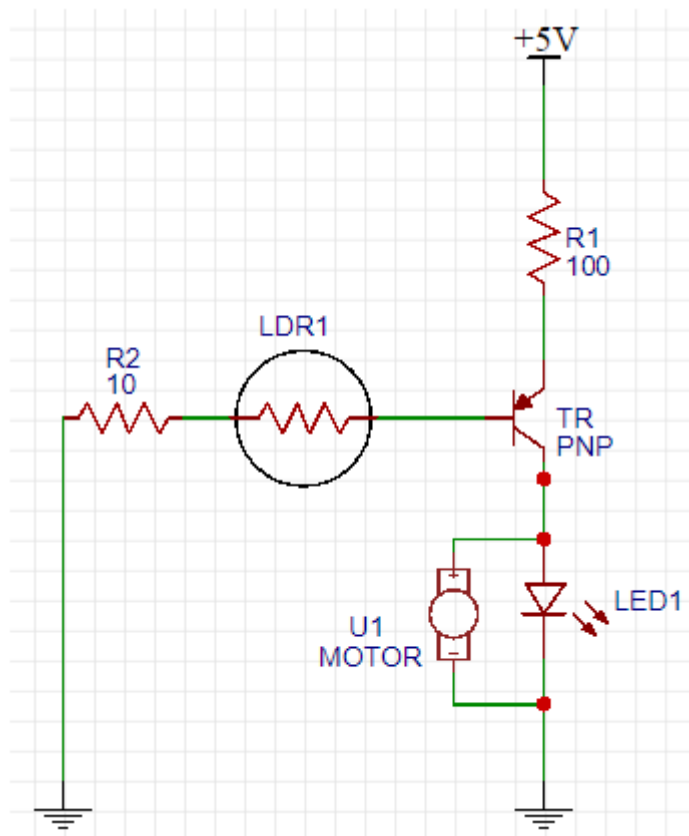
Η φωτοαντίσταση ανιχνεύει τα επίπεδα φωτός και αλλάζει η τιμή της ανάλογα με την ποσότητα φωτός που παίρνει. Όταν είναι εκτεθειμένη στο σκοτάδι, μια φωτοαντίσταση έχει τεράστια αντίσταση. Όταν εκτίθεται σε έντονο φως, η αντίσταση της πέφτει δραματικά. Αυτά τα στοιχεία μπορούν να αξιοποιηθούν.

#### ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ:

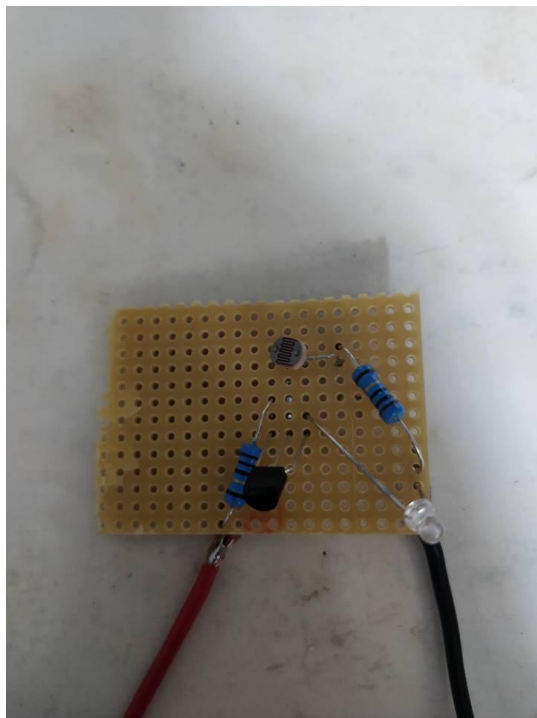
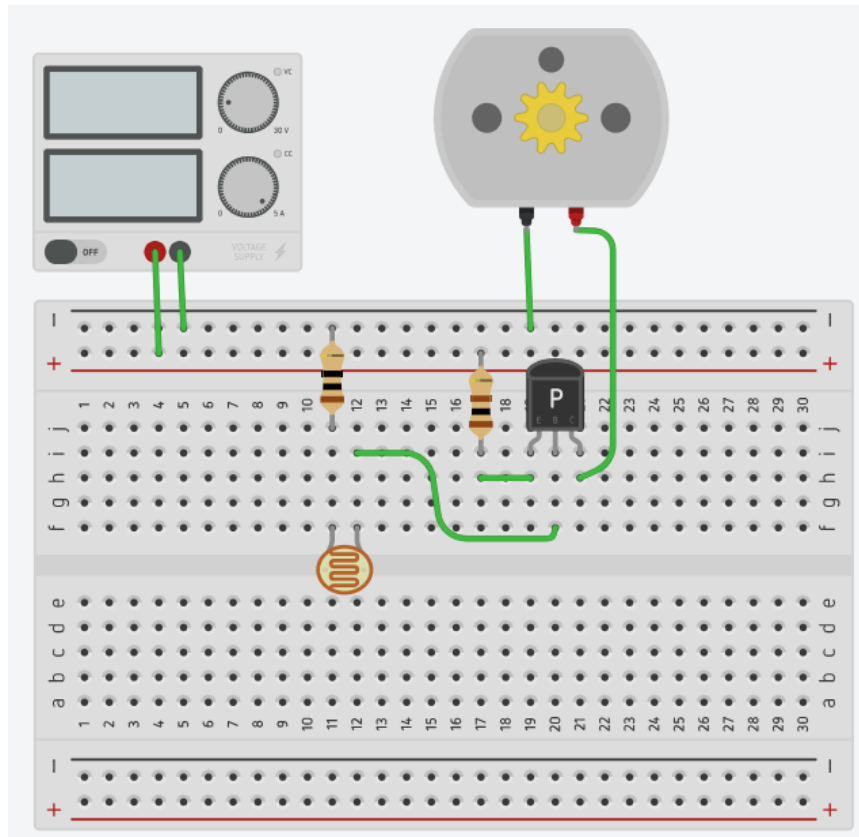
Οι Κινητήρες DC είναι συνεχείς ενεργοποιητές που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια και τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα. Ένας ηλεκτροκινητήρας συνεχούς ρεύματος αποτελείται από δύο μέρη, έναν "στάτορα" που είναι το σταθερό τμήμα και έναν "περιστροφέα" που είναι το περιστρεφόμενο τμήμα.

ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ:

Στο παρακάτω κύκλωμα συνδέθηκε στη βάση του τρανζίστορ μια φωτοαντίσταση. Ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος συνδέθηκε στο συλλέκτη του τρανζίστορ. Στο σκοτάδι, η αντίσταση της φωτοαντίστασης θα είναι τόσο υψηλή, που ελάχιστο ρεύμα θα διαρρέυσει από τη βάση του τρανζίστορ. Έτσι, δεν επιτρέπεται να διαρρέυσει ρεύμα από τον εκπομπό στον συλλέκτη για να τροφοδοτήσει τον κινητήρα DC.



Ωστόσο, σε έντονο φως, η αντίστασή της πέφτει δραματικά και τότε τροφοδοτείται αρκετό ρεύμα διαμέσου της βάσης του τρανζίστορ, ενεργοποιώντας το τρανζίστορ. Σημαντικό ρεύμα ρέει τώρα από τον πομπό στον συλλέκτη, ενεργοποιώντας τον κινητήρα DC. Μέχρι να φτάσει το τρανζίστορ σε πλήρη κορεσμό, η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα θα είναι (προσεγγιστικά) ανάλογη της έντασης του φωτισμού.

**ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΣΤΟ BREADBOARD**

Στο παρακάτω κύκλωμα όσο υπάρχει φωτεινότητα στη φωτοαντίσταση το μοτέρ κινείται.



## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ 8

### ΟΠΤΙΚΟΣ ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ "ΑΡΝΗΤΙΚΗΣ ΛΟΓΙΚΗΣ"

#### (ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΚΟΤΟΥΣ)

##### ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ:

Σε αυτό το έργο, θα εξετάσουμε τον τρόπο κατασκευής ενός διακόπτη που ενεργοποιείται σε σκοτάδι, δηλαδή θα ενεργοποιήσει ένα κύκλωμα ή μια συσκευή όταν σκοτεινιάσει. Έτσι όταν υπάρχει πολύς φωτισμός, ο διακόπτης δεν ενεργοποιείται. Ωστόσο, μόλις γίνει σκοτεινός ο χώρος, ενεργοποιείται και ανάβει οποιαδήποτε συσκευή είναι συνδεδεμένη στο κύκλωμα.

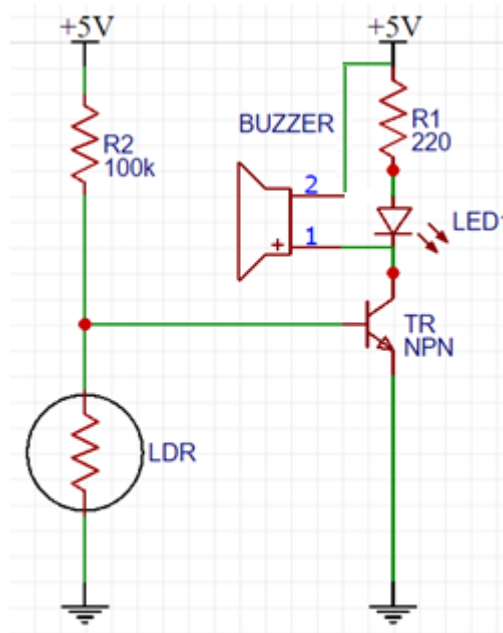
##### ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ, ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ, ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΑ

- 1 Τροφοδοτικό
- 2 φωτοαντίσταση
- 3 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος
- 4 breadboard
- 5 Καλώδια σύνδεσης
- 6 Τρανζίστορ



ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ:

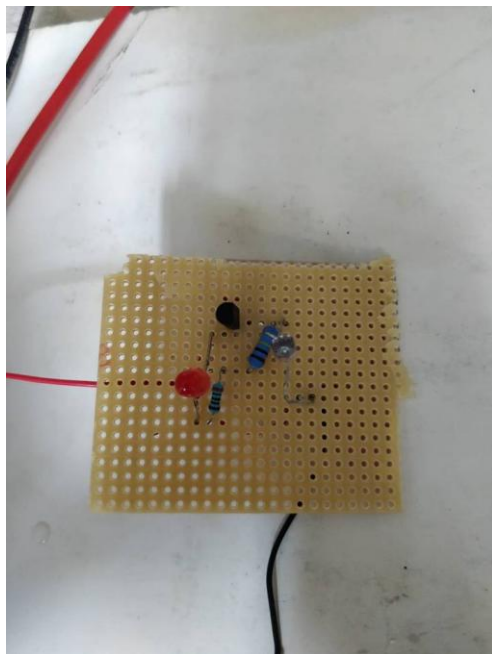
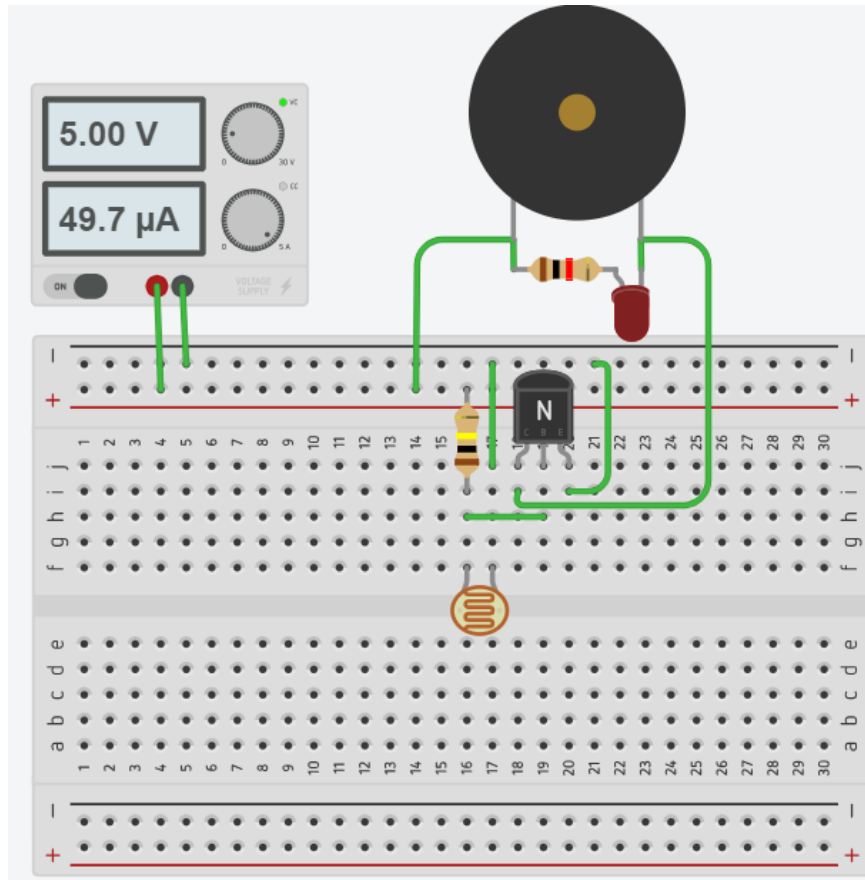
Στο παρακάτω κύκλωμα συνδέεται στη βάση του τρανζίστορ ένας διαιρέτης τάσης με μια φωτοαντίσταση και μια αντίσταση 100KΩ. Ένα Buzzer συνδέεται στο συλλέκτη του τρανζίστορ.



Όταν δεν φωτίζεται η φωτοαντίσταση το μεγαλύτερο μέρος της τάσης πάει σε αυτήν και ένα μικρό μέρος πάει στην αντίσταση 100k. Η αντίσταση της φωτοαντίσταση είναι τώρα πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με την 100K συνεπώς το ρεύμα ακολουθεί την ευκολότερη διαδρομή προς την βάση του τρανζίστορ και αυτό άγει, περνάει το ρεύμα από το συλλέκτη προς τον εκπομπό συνεπώς ανάβει το led και το μικρόφωνο.

Όταν τώρα φωτίζεται η φωτοαντίσταση, η αντίσταση της πέφτει δραματικά και γίνεται πολύ πιο μικρή σε σχέση με την 100K, συνεπώς το ρεύμα τότε θα διαλέξει αυτή τη διαδρομή και δεν θα μπει σε λειτουργία το τρανζίστορ.

Συνολικά, το τρανζίστορ διακόπτης άγει ρεύμα στο φορτίο σε συνθήκες σκότους. Ενώ σε συνθήκες φως το ρεύμα στο φορτίο διακόπτεται. Αυτή η "αρνητική λογική" είναι πολλές φορές χρήσιμη σε αυτοματισμούς.

**ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΣΤΟ BREADBOARD**

Στο κύκλωμα αυτό όσο υπάρχει φωτεινότητα στη φωτοαντίσταση το μεγάφωνο είναι κλειστό. Όταν δεν υπάρχει φωτεινότητα στην φωτοαντίσταση το μεγάφωνο παράγει ήχο και το led ανάβει.



# Data Sheet εξαρτημάτων

## NPN TRANSISTOR BC337

### BC337, BC337-25, BC337-40

#### Amplifier Transistors

#### NPN Silicon

#### Features

- These are Pb-Free Devices

#### MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector - Emitter Voltage	$V_{CE0}$	45	Vdc
Collector - Base Voltage	$V_{CB0}$	50	Vdc
Emitter - Base Voltage	$V_{EB0}$	5.0	Vdc
Collector Current - Continuous	$I_C$	800	mAdc
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	625 5.0	mW mW/°C
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	1.5 12	W mW/°C
Operating and Storage Junction Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-55 to +150	°C

#### THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	200	°C/W
Thermal Resistance, Junction-to-Case	$R_{\theta JC}$	83.3	°C/W

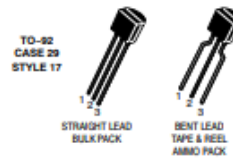
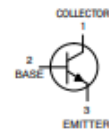
Stresses exceeding those listed in the Maximum Ratings table may damage the device. If any of these limits are exceeded, device functionality should not be assumed, damage may occur and reliability may be affected.

\*For additional information on our Pb-Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERM1D.



ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>



#### MARKING DIAGRAM



BC337-xx = Device Code  
(Refer to page 4)  
A = Assembly Location  
Y = Year  
WW = Work Week  
• = Pb-Free Package  
(Note: Microdot may be in either location)

#### ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 4 of this data sheet.

## OP-AMPLIFIER LM32

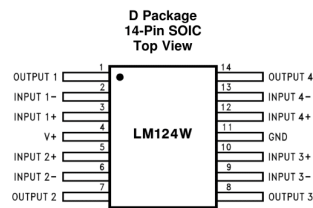
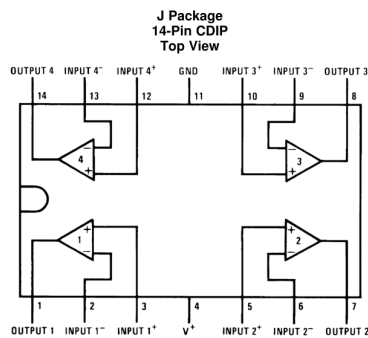


www.ti.com

LM124-N, LM224-N  
LM2902-N, LM324-N

SNOSC16D – MARCH 2000 – REVISED JANUARY 2015

### 5 Pin Configuration and Functions



#### Pin Functions

PIN		TYPE	DESCRIPTION
NAME	NO.		
OUTPUT1	1	O	Output, Channel 1
INPUT1-	2	I	Inverting Input, Channel 1
INPUT1+	3	I	Noninverting Input, Channel 1
V+	4	P	Positive Supply Voltage
INPUT2+	5	I	Noninverting Input, Channel 2
INPUT2-	6	I	Inverting Input, Channel 2
OUTPUT2	7	O	Output, Channel 2
OUTPUT3	8	O	Output, Channel 3
INPUT3-	9	I	Inverting Input, Channel 3
INPUT3+	10	I	Noninverting Input, Channel 3
GND	11	P	Ground or Negative Supply Voltage
INPUT4+	12	I	Noninverting Input, Channel 4
INPUT4-	13	I	Inverting Input, Channel 4
OUTPUT4	14	O	Output, Channel 4

PNP TRANSISTOR 2N3906

**2N3906**

Preferred Device

**General Purpose Transistors**

PNP Silicon

**MAXIMUM RATINGS**

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector-Emitter Voltage	$V_{CEO}$	40	Vdc
Collector-Base Voltage	$V_{CBO}$	40	Vdc
Emitter-Base Voltage	$V_{EBO}$	5.0	Vdc
Collector Current – Continuous	$I_C$	200	mAdc
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	625 5.0	mW mW/ $^\circ\text{C}$
Total Power Dissipation @ $T_A = 60^\circ\text{C}$	$P_D$	250	mW
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	1.5 12	Watts mW/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-55 to +150	$^\circ\text{C}$

**THERMAL CHARACTERISTICS** (Note 1.)

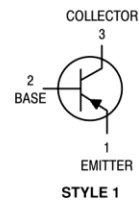
Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	200	$^\circ\text{C}/\text{W}$
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	83.3	$^\circ\text{C}/\text{W}$

1. Indicates Data in addition to JEDEC Requirements.

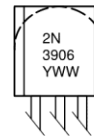


**ON Semiconductor™**

<http://onsemi.com>



**MARKING DIAGRAMS**



**ORDERING INFORMATION**

Device	Package	Shipping
2N3906	TO-92	5000 Units/Box
2N3906RLRA	TO-92	2000/Tape & Reel
2N3906RLRE	TO-92	2000/Tape & Reel
2N3906RLRM	TO-92	2000/Ammo Pack
2N3906RLRP	TO-92	2000/Ammo Pack
2N3906RL1	TO-92	2000/Tape & Reel
2N3906ZL1	TO-92	2000/Ammo Pack

Preferred devices are recommended choices for future use and best overall value.

## NPN TRANSISTOR TIP 122

**TIP120, TIP121, TIP122  
(NPN); TIP125, TIP126,  
TIP127 (PNP)****Plastic Medium-Power  
Complementary Silicon  
Transistors**

Designed for general-purpose amplifier and low-speed switching applications.

**Features**

- High DC Current Gain –  
 $h_{FE} = 2500$  (Typ) @  $I_C = 4.0$  A dc
- Collector–Emitter Sustaining Voltage – @ 100 mA dc  
 $V_{CE(sus)} = 60$  V dc (Min) – TIP120, TIP125  
 $= 80$  V dc (Min) – TIP121, TIP126  
 $= 100$  V dc (Min) – TIP122, TIP127
- Low Collector–Emitter Saturation Voltage –  
 $V_{CE(sat)} = 2.0$  V dc (Max) @  $I_C = 3.0$  A dc  
 $= 4.0$  V dc (Max) @  $I_C = 5.0$  A dc
- Monolithic Construction with Built-In Base–Emitter Shunt Resistors
- Pb-Free Packages are Available\*



**ON Semiconductor®**

[www.onsemi.com](http://www.onsemi.com)

**DARLINGTON  
5 AMPERE  
COMPLEMENTARY SILICON  
POWER TRANSISTORS  
60–80–100 VOLTS, 65 WATTS**



**TO-220AB  
CASE 221A  
STYLE 1**

STYLE 1:  
PIN 1: BASE  
2: COLLECTOR  
3: EMITTER  
4: COLLECTOR

**MARKING  
DIAGRAM**

TIP12x – Device Code  
 x – 0, 1, 2, 5, 6, or 7  
 A – Assembly Location  
 Y – Year  
 WW – Work Week  
 G – Pb-Free Package

**ORDERING INFORMATION**

See detailed ordering and shipping information on page 3 of this data sheet.

\*For additional information on our Pb-Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERM/D.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### ΣΥΓΓΡΑΜΑΤΑ:

Ηλεκτροτεχνία Ι, Κολλιόπουλος Νίκος

Οπτοηλεκτρονική

### LINKS:

Εργαστήριο LEDs

<http://electron6.phys.utk.edu/phys250/Laboratories/Light%20emitting%20diodes.htm>

και

<http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/leds/basicoperation/>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting\\_diode](https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode)

Αντίστοιχο, στα Ελληνικά:

(βασική περιγραφή μόνο):

[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CE%AF%CE%BF%CE%B4%CE%BF%CF%82\\_%CE%B5%CE%BA%CF%80%CE%BF%CE%BC%CF%80%CE%AE%CF%82\\_%CF%86%CF%89%CF%84%CF%8C%CF%82](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CE%AF%CE%BF%CE%B4%CE%BF%CF%82_%CE%B5%CE%BA%CF%80%CE%BF%CE%BC%CF%80%CE%AE%CF%82_%CF%86%CF%89%CF%84%CF%8C%CF%82)

Επιστημονικότερο, για προχωρημένους:

<http://www.chemistry.wustl.edu/~edudev/LabTutorials/PeriodicProperties/MetalBonding/MetalBonding.html>

[https://www.electronics-notes.com/articles/electronic\\_components/diode/light-emitting-diode-how-led-is-made-structure-fabrication.php](https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/diode/light-emitting-diode-how-led-is-made-structure-fabrication.php)

και παρακάτω σελίδες όπως π.χ.:

[https://www.electronics-notes.com/articles/electronic\\_components/diode/light-emitting-diode-led-technology-how-does-led-work.php](https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/diode/light-emitting-diode-led-technology-how-does-led-work.php)

LEDs:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/led.html>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/ledmod.html#c2>

Led Modulation:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/ledmod.html#c2>



## DIODES and P-N JUNCTIONS

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/pnjun.html#c1>

## TRANSISTORS:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/trans.html#c1>

### Transistor operation - details:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/trans2.html#c1>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/trans2.html#c2>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/trans.html#c3>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/npnce.html#c2>

### Characteristic Curves - Load Line:

Operating Point - Χαρακτηριστικές - Γραμμή φορτίου:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/loadline.html#c4>

### Transistor SWITCHing:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/transwitch.html#c1>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/transwitch.html#c2>

### Common Collector Amps:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/npncc.html#c1>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/npncc.html#c5>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/npncc.html#c4>

### Common Emitter Amps and current source:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/npnce.html#c3>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/npnce3.html#c1>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/npncebias.html#c1>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/npncebias.html#c2>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/npncebypass.html#c2>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/npncecoup.html#c1>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/npncecoup.html#c2>

## OPTOELECTRONICS - CENTRAL PAGE

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/optelcon.html#c1>

### Diodes

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/pnjun.html#c1>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/diod.html#c1>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/diod.html#c2>

### Photodiode in PV mode and OPAMP

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/photdet.html#c1>

LED - current source for modulation (V to I converter with OPAMP)  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/ledmod.html#c1>

More detailed circuit with 741-type OPAMP:  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/ledmod.html#c2>

OPAMPS general - principles - links  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/opampcon.html#c1>

OPAMP RULES:  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/opamp.html#c2>

OPAMP variety - configurations:  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/opampvar2.html#c3>

OPAMP amplifiers - Inverting and non-inverting and LINKS to other configurations  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/opampvar.html#c1>  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/opampvar.html#c2>

VOLTAGE - TO - CURRENT and CURRENT - TO - VOLTAGE converters  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/opampvar2.html#c1>

PhotoDiode Detector:  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/photdet.html#c1>

Difference Amplifier:  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/opampvar6.html#c1>

Summing Amplifier:  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/opampvar5.html#c1>

OpAmp for LED supply and current MODULATION:  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/ledmod.html#c2>

Square Wave Generator:  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/square.html#c5>

Comparator:  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/suppos.html#c1>

Schmitt Trigger COMPARATOR:  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/schmitt.html#c1>

Integrator - Differentiator:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/opampvar4.html#c1>

Precision DIODE OpAmp rectifier (zero  $V_f$  !) - try for V (positive) to I modulation in LEDs:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/opampvar3.html#c1>

D/A converter:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/dac.html#c1>

A/D Converter:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/adc.html#c1>

Comparator:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/suppos.html#c1>

Negative Feedback:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/feedn.html#c1>

and

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/opamp2.html#c2>

Oscilloscope Interactive:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Electronic/scope.html#c1>

-----

LASERS - WIKIPEDIA

<https://en.wikipedia.org/wiki/Laser>

simple:

<https://simple.wikipedia.org/wiki/Laser>

LASERS - Βικιπαίδεια

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9B%CE%AD%CE%B9%CE%B6%CE%B5%CF%81>

Laser diodes

[https://en.wikipedia.org/wiki/Laser\\_diode](https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_diode)

Stimulated emission:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/mod5.html#c3>

lasers emission build-up:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/optmod/qualig.html#c4>

Lasers:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/optmod/lascon.html#c1>

Laser Applications:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/optmod/lasapp.html#c0>

Τα σχηματικά σχέδια υλοποιήθηκαν στην online μηχανή EasyEda και η προσομοίωση των κυκλωμάτων στην online μηχανή tinker Cad.