

DAL SILICIO AL DIODO

In questo Workshop verrà presentato un nuovo componente elettronico: il diodo. Lo StepbyStep completerà l'argomento con un esempio semplice e 'illuminante'.

Quando abbiamo iniziato a parlare di elettricità abbiamo anche introdotto due diverse classi di materiali, i **conduttori** e gli **isolanti**, le cui differenze sono legate alla capacità di consentire o meno un flusso di cariche elettriche. Esiste, però, una terza famiglia di materiali, aventi proprietà intermedie tra quelle delle due classi appena citate: i **semiconduttori**.

IL DROGAGGIO DEL SILICIO

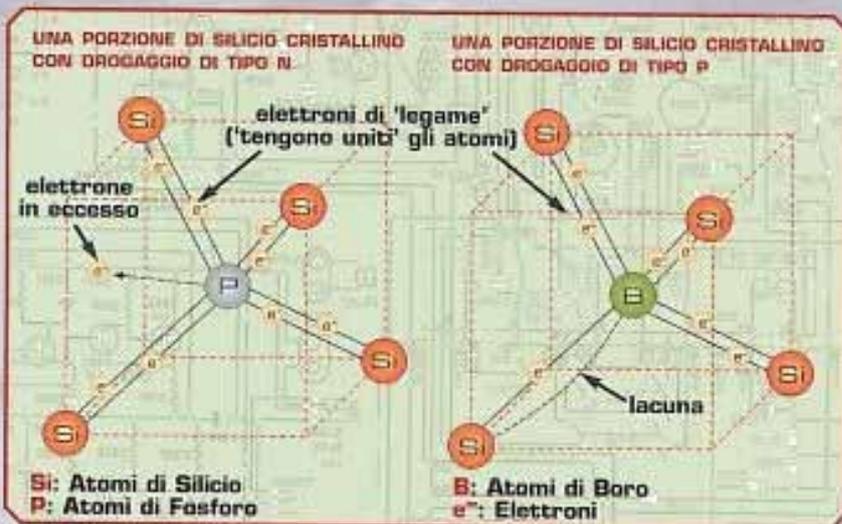
I semiconduttori, in particolare il **silicio**, rivestono un ruolo fondamentale nell'elettronica moderna grazie alle proprietà che assumono una volta sottoposti al **'drogaggio'**. Il drogaggio di un semiconduttore consiste, in termini molto semplici, nell'introduzione mirata di una serie di impurità chimiche che alterano le caratteristiche del materiale. In particolare classifichiamo gli elementi droganti in due famiglie, sulla base delle proprietà elettriche apportate: gli elementi di **'tipo n'** (come il **fosforo**) e quelli di **'tipo p'** (come il **boro**). Vediamo in cosa differiscono. Immaginiamo di drogare una certa quantità di silicio in forma cristallina

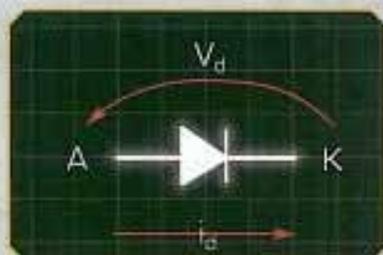
(ossia con una disposizione geometrica regolare dei suoi atomi) con atomi di fosforo. Il **fosforo** è un elemento che **possiede un elettrone in più rispetto al silicio nell'orbita più esterna del proprio atomo**. Quando questo elemento chimico viene 'impresso' nel semiconduttore tende a 'inserirsi' nella geometria cristallina che lo circonda, uniformandosi alla struttura del silicio e **allontanando l'elettrone in eccesso dal nucleo dell'atomo** (la lettera 'n' deriva proprio dalla carica negativa degli elettroni, che

'allontanati' acquisiscono 'mobilità'). Al contrario, gli atomi di **boro** hanno un'orbita esterna con **un elettrone in meno rispetto al silicio**. Ne consegue che la loro aggiunta produce una struttura cristallina con punti **'in difetto'** di elettroni ['holes' o 'lacune'].

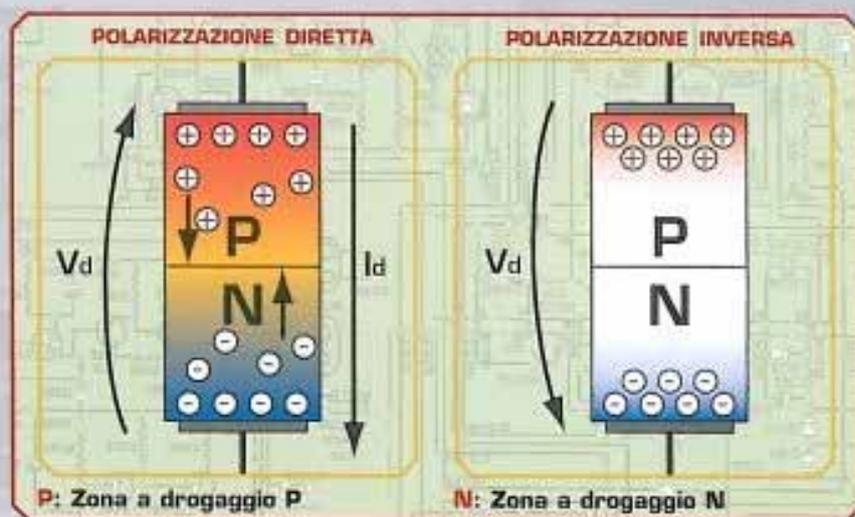
DAL SILICIO AL DIODO

Il drogaggio consente, quindi, di ottenere un semiconduttore portato a cedere (tipo n) o accettare (tipo p) elettroni. Immaginiamo ora di 'unire' due cristalli sottoposti a drogaggi opposti. Otteniamo la cosiddetta





Sopra, il simbolo elettrico del diodo su cui sono indicati l'anodo (A) e il catodo (K). A destra, una rappresentazione del diodo nei suoi due stati di polarizzazione. In evidenza, il 'movimento' di elettroni (-) e lacune (+).



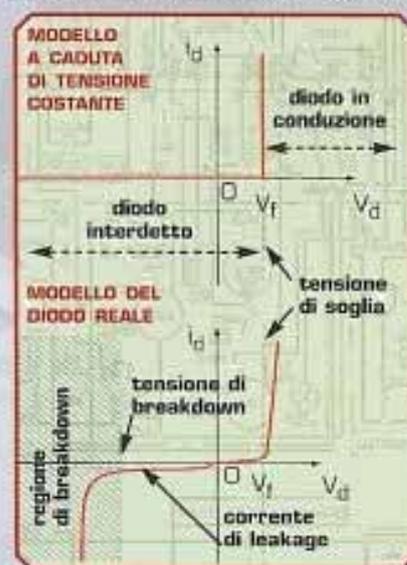
'giunzione pn', una struttura le cui proprietà danno origine a un particolare componente elettronico: il **diodo**. Vediamo come opera a partire dalle sue caratteristiche fisiche. In primo luogo è un dispositivo a **due pin**: il primo, associato alla 'zona p', viene chiamato **anodo**, mentre il secondo, collegato alla 'zona n', è detto **catodo**. Immaginiamo ora di sottoporre i suoi capi a una differenza di potenziale (figura in alto) in modo da avere l'anodo a potenziale superiore rispetto al catodo. Sotto l'effetto del campo elettrico imposto da tale differenza di potenziale, lacune ed elettroni saranno 'spinti' a muoversi verso la zona con drogaggio opposto. Nel caso in cui la tensione sia sufficientemente elevata (maggiore di una **tensione di soglia**), lo spostamento di elettroni e lacune sarà tale da generare un processo di 'ricombinazione', che consente il passaggio di corrente tra l'anodo e il catodo del diodo (stato di **polarizzazione diretta**). Al contrario, se sottoporremo la giunzione pn a una tensione

opposta rispetto a quanto fatto in precedenza, le lacune e gli elettroni si allontaneranno dalla zona di giunzione con un conseguente 'svuotamento' del confine [**polarizzazione inversa**]. Questa condizione impedisce il passaggio di corrente. Il **diodo**, quindi, **si comporta come una sorta di 'valvola', che vincola il flusso di corrente elettrica in una direzione ben precisa**, ossia dall'anodo al catodo. Ecco il perché del suo simbolo elettrico 'a freccia' (in alto a sinistra) che indica, appunto, la direzione di conduzione.

DIODO SEMPLIFICATO E DIODO REALE

Anche nel caso dei diodi, come spesso accade, si ricorre a **modelli semplificati**. Uno dei più comuni è mostrato nella figura a lato (in alto). Attraverso di esso si vede molto chiaramente il funzionamento 'a interruttore': per una qualsiasi tensione di polarizzazione inferiore a V_f (la **tensione di soglia** del diodo) non vi è passaggio di corrente (**diodo interdetto**); al contrario, per voltaggi superiori la corrente può fluire liberamente e senza

vincoli (**diodo in conduzione**). La **tensione di soglia** del diodo può variare da modello a modello, ma solitamente **per i dispositivi al silicio si aggira attorno agli 0,6 V**. Il funzionamento del **diodo reale a giunzione pn**, tuttavia, è ben diverso ed è descritto dal secondo grafico presentato, di cui non vedremo definizioni matematiche, ma solo una rappresentazione grafica (figura sotto, in basso). Da questo grafico, come prima cosa, si nota che il passaggio di



Due dei modelli utilizzati per descrivere il funzionamento dei diodi.

corrente in polarizzazione diretta non è così netto come appare nel modello semplificato, ma vi è una lieve pendenza. Ma se questa approssimazione può essere considerata minima e trascurabile, non possiamo dire lo stesso per ciò che riguarda la diversità di comportamento in stato di polarizzazione inversa (semipiano sinistro dei due grafici). Nel caso reale, infatti, non è vero che c'è una completa inibizione della corrente, al contrario si verifica un lievissimo flusso di cariche noto con il nome di **corrente di leakage**. Inoltre, come mostrato nel modello del diodo reale, una volta superata una determinata tensione negativa, detta **tensione di breakdown** (varia da alcuni volt a diverse decine di volt), si verifica un effetto di **conduzione 'a valanga'**, che consiste in un flusso incontrollato di corrente

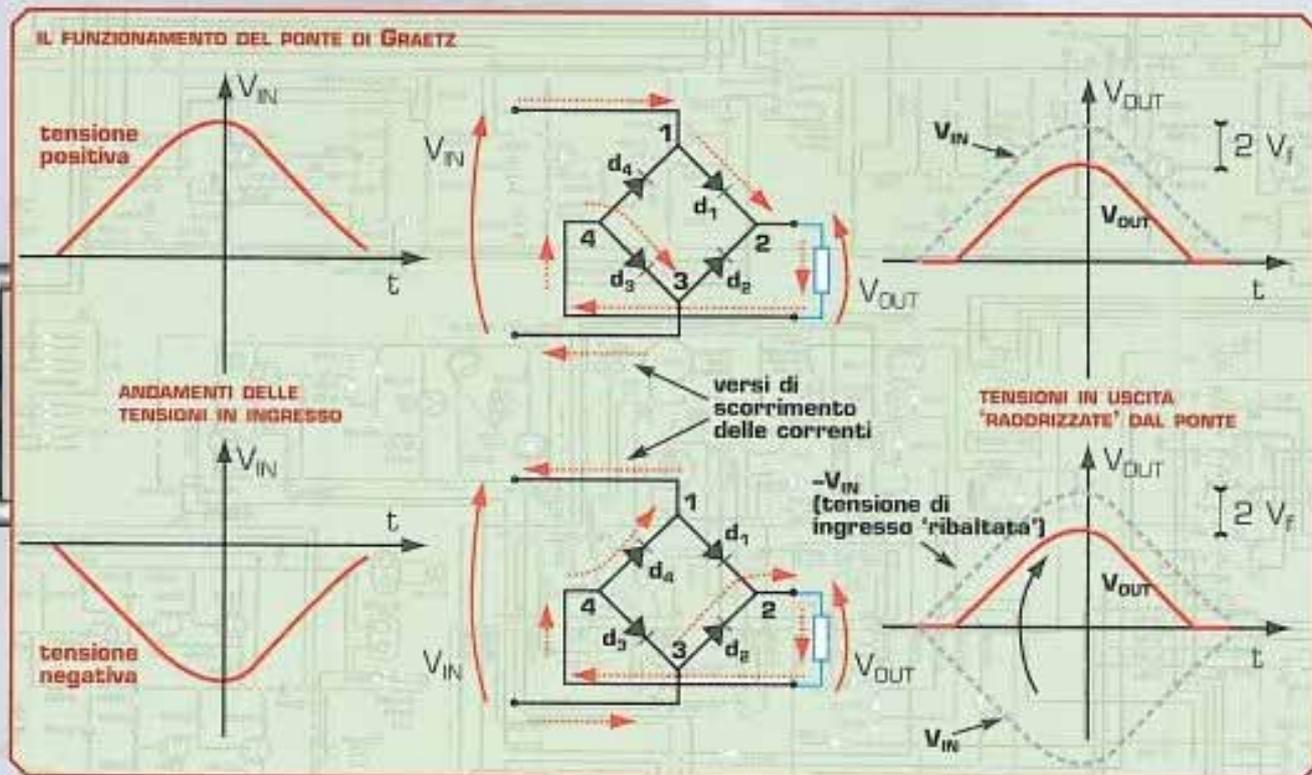
anche in stato di polarizzazione inversa: un comportamento non previsto dai modelli ideali. Negli StepbyStep vedremo alcune delle principali tipologie di diodi.

ALCUNE APPLICAZIONI

Tra le **applicazioni più diffuse** per ciò che riguarda i diodi vi è il **'raddrizzamento'** e la **'tosatura'** dei segnali. Il raddrizzamento è una particolare procedura di trattamento dei segnali con la quale si 'ribaltano' le componenti negative in positive. La tosatura, invece, consiste nell'eliminazione di alcune 'parti' di segnale o nella loro 'limitazione'. Vediamo, ora, uno dei più importanti circuiti per il raddrizzamento: il **ponte di Graetz**. Esso è formato essenzialmente da **quattro diodi disposti 'a rombo'** (vedi schema sotto): su due degli angoli (nodi 1 e 3) sono collegati la massa di riferimento e il segnale elettrico di ingresso, mentre

sugli altri due (nodi 2 e 4) i capi di uscita ai quali verrà connesso il circuito che necessita del segnale raddrizzato (al momento lo rappresentiamo con una resistenza generica). Poiché i diodi consentono il passaggio di corrente solo in una direzione, si può vedere che nel caso di **segnali positivi saranno polarizzati direttamente i diodi d_1 e d_3** (immagine in basso, esempio in alto), mentre in presenza di **tensioni negative saranno in stato di conduzione i diodi d_2 e d_4** (esempio in basso). In entrambi i casi, però, la corrente in uscita sul carico mantiene lo stesso verso e con essa rimane invariato anche il segno della tensione V_{OUT} . Vi sarà solo una **lieve perdita**, pari a $2 \cdot V_f$, **dovuta alle tensioni necessarie a polarizzare i diodi**.

Una schema di funzionamento del ponte di Graetz presentato nel testo.

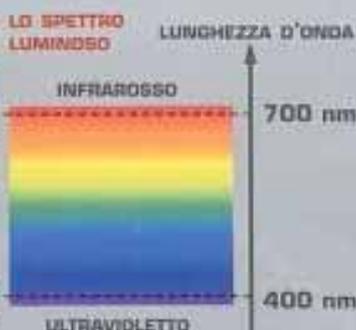


FOCUS ON

I LED

Quella dei **LED** (acronimo dei termini *Light Emitting Diodes*, 'Diodi a Emissione Luminosa') è sicuramente la tipologia di diodo più nota, anche tra chi non si occupa di elettronica. Il loro comportamento è analogo a quello dei diodi normali, con la differenza sostanziale che, quando sono in stato di conduzione, producono un'emissione luminosa colorata, tanto più intensa quanto maggiore è il flusso di cariche che li attraversa (di solito è richiesta una corrente minima di circa 5 mA per garantirne l'accensione). Per via delle dimensioni ridotte e dei bassissimi consumi, i LED trovano applicazione come spie di segnalazione o nella realizzazione di matrici luminose da utilizzare come display (i moderni diodi ad alta luminosità sono impiegati anche per l'illuminazione). Sotto il profilo elettrico, i LED (il loro simbolo è indicato a lato, assieme a un rendering della loro struttura) hanno una caduta di tensione in polarizzazione diretta legata alla lunghezza d'onda emessa e all'intensità della luce prodotta. In particolare, il voltaggio di accensione aumenta con il diminuire della lunghezza d'onda della radiazione luminosa emessa (circa 1,3 V per i LED infrarossi, anche superiore ai 4 V per quelli ultravioletti) e con l'aumentare delle caratteristiche di luminosità. Nella tabella sottostante sono riportati alcuni valori indicativi di tensione relativi ai colori di LED più diffusi. Esistono

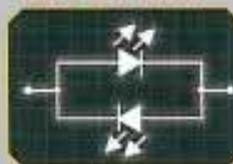
COLORE	V _{accensione}
Infrarosso	1,3 V
Rosso	1,7 V
Giallo	1,9 V
Verde	2,0 V
Blu	> 3 V
Ultravioletto	> 4 V



in commercio anche tipologie di LED particolari, come quelli a **due colori** o quelli **policromatici (RGB)**. I LED a due colori sono equivalenti a **due LED semplici montati in 'controparallelo'** (ossia con anodi e catodi opposti). In base al voltaggio imposto, possono assumere lo stato di 'spenti', o accendersi secondo il colore di uno dei due LED interni. In questo caso, l'illuminazione è mutuamente esclusiva (o si accende il primo o si accende il secondo). I LED RGB, invece, sono realizzati con tre diodi con catodo (o anodo) in comune e anodi (o catodi) separati (hanno quattro terminali). Polarizzando in modo oculato le singole giunzioni interne, si possono attivare le diverse componenti cromatiche (rosso, verde e blu) con varie intensità, riuscendo a ottenere praticamente ogni colore desiderato. I LED infrarossi, infine, si rivelano molto utili nella realizzazione dei sensori di prossimità e nella 'visione notturna'.



LED A DUE COLORI



LED RGB



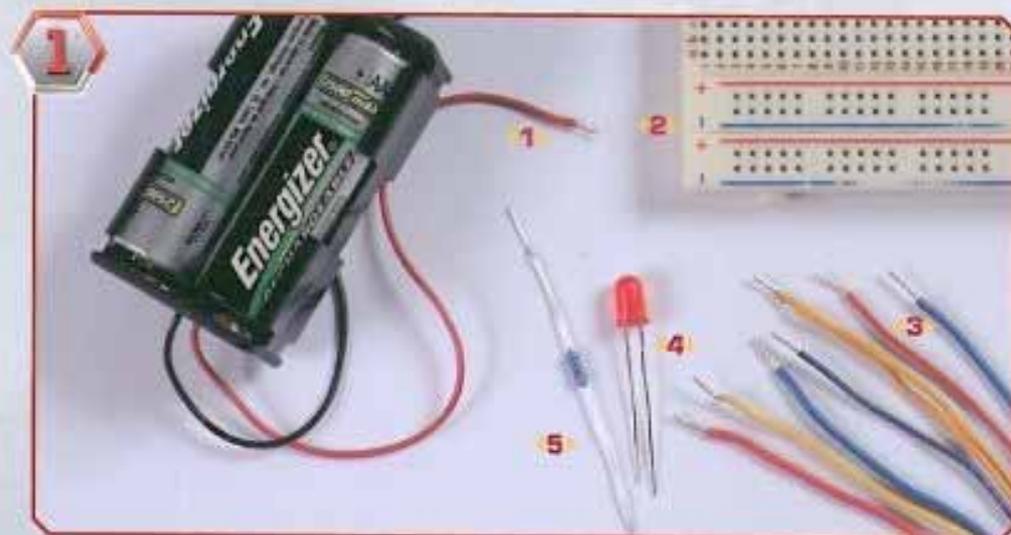
STEPbySTEP

L'ACCENSIONE DI UN LED

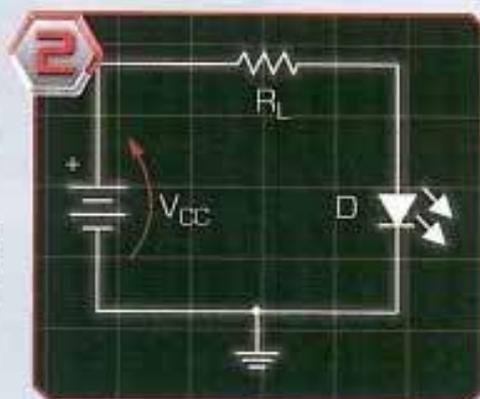
Parlando di LED abbiamo visto che l'emissione di luce è legata all'intensità di corrente che li attraversa. Poiché in condizioni di polarizzazione diretta la resistenza introdotta dai diodi è quasi nulla (il LED oppone una caduta di tensione all'alimentazione pari alla sua tensione di soglia, ma non fornisce un carico resistivo sensibile), quando si inseriscono dei LED all'interno dei circuiti è indispensabile utilizzare anche dei resistori che limitino la corrente circolante, in modo da evitare, di fatto, un cortocircuito. Vediamo come dimensionarli (ricordiamo che per la nomenclatura dei componenti facciamo riferimento alle convenzioni presentate nel fascicolo 4).

Elementi richiesti:

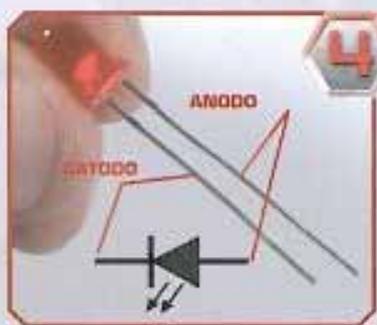
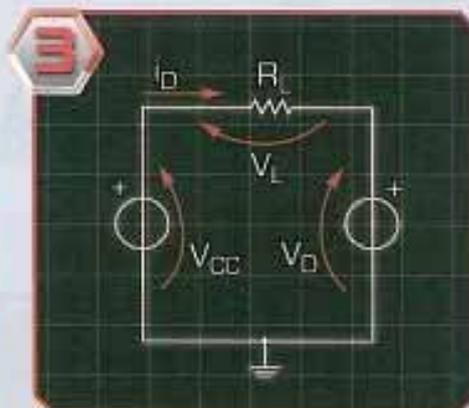
- 1 un portapile da 4 stilo con relative batterie (meglio se ricaricabili)
- 2 una breadboard
- 3 alcuni fili per breadboard
- 4 un LED rosso (ricorda che in base al colore cambia la caduta di tensione!)
- 5 un resistore (il valore sarà calcolato nel corso dello StepbyStep)



Innanzitutto analizziamo il circuito che vogliamo realizzare. Lo schema completo è quello mostrato nell'immagine accanto, con il pacco batterie V_{CC} collegato in serie al resistore R_L e al LED D secondo il verso mostrato in figura (anodo verso il polo positivo del pacco pile e catodo verso quello negativo). Questa condizione è fondamentale per poter polarizzare il LED in modo diretto, mentre l'ordine di assemblaggio (resistore prima o dopo il LED) è ininfluente.



Vediamo, ora, come sfruttare il **modello a caduta di tensione costante** che abbiamo visto a pagina 7 (lo vedremo su un LED, ma il ragionamento vale per tutti i diodi analoghi). Il significato pratico di tale modello semplificato è che in condizioni di polarizzazione diretta il LED è equivalente a un generatore di tensione (V_D) con voltaggio pari alla sua tensione di soglia (o di accensione) V_f e verso opposto rispetto a quello di alimentazione. Il circuito è equivalente, quindi, a quello mostrato nella figura accanto, composto dal g.d.t. V_{CC} (le batterie da ca. 6 V), il resistore R_L e il g.d.t. V_D che equivale alla d.d.p. del diodo in polarizzazione diretta (per il suo valore fai riferimento alla tabella del precedente FOCUS ON). Il nostro scopo è dimensionare R_L affinché nel circuito scorra una corrente i_D ottimale per l'accensione del LED (di solito si calcola una corrente di ca. 20 mA, ma dipende dalle caratteristiche del LED e dalla massima corrente erogabile dall'alimentatore). Innanzitutto calcoliamo la caduta di tensione V_L sul resistore R_L : essa sarà pari alla somma algebrica delle cadute di tensione dei due g.d.t. agenti nel circuito. Poiché i due g.d.t. hanno d.d.p. opposte, il valore di V_L è pari a: $V_L = V_{CC} - V_D = (6 - 1,7) = 4,3 \text{ V}$. La tensione di alimentazione V_{CC} , infatti, si ripartisce su R_L (V_L) e D (V_D , in condizioni di polarizzazione diretta del LED è pari alla tensione di accensione; per i LED rossi $V_D = V_f = 1,7 \text{ V}$). Ricordando la legge di Ohm (fascicolo 3) possiamo calcolare la resistenza $R_L = V_L / i_D = 4,3 \text{ V} / 20 \text{ mA} = 215 \text{ ohm}$. Dovrai procurarti, quindi, un resistore con un valore di resistenza simile a quello appena ricavato. Noi abbiamo utilizzato un resistore da 200 ohm [essendo minore della resistenza calcolata avremo una corrente di poco superiore ai 20 mA].



Ora assembli il circuito, facendo attenzione a come posizionerai il LED: ricordati che il pin con la lunghezza maggiore corrisponde all'anodo del dispositivo (la base della freccia) e che i diodi a emissione luminosa si illuminano esclusivamente quando si trovano in stato di conduzione, ossia quando la tensione tra anodo e catodo è maggiore della tensione di accensione.

Ecco assemblato il circuito. Se avrai montato in modo corretto i componenti vedrai il LED accendersi. Il valore del resistore, in realtà, non è particolarmente 'critico' (una resistenza da 300 ohm sarebbe andata bene comunque in queste condizioni), tuttavia la sua presenza è necessaria per evitare un cortocircuito che potrebbe danneggiare i dispositivi collegati.

