

# DAI BJT AI FET

*Dopo i transistor a giunzione bipolare, introduciamo quelli 'a effetto campo', tanto diffusi nei sistemi moderni.*

**N**el fascicolo 14 abbiamo introdotto in modo molto semplice i transistor a giunzione bipolare (BJT). Ora dedichiamoci a una seconda tipologia di transistor, che ai nostri giorni caratterizza la maggior parte dei moderni sistemi digitali: i **transistor a effetto campo** (più brevemente **FET**, *Field Effect Transistor*). Benché esista una grande quantità di sottofamiglie di FET (che mantengono principi di funzionamento più o meno simili, ma differiscono nelle caratteristiche fisiche e nelle prestazioni), noi ci concentreremo principalmente sui cosiddetti dispositivi **MOSFET** (*Metal Oxide Semiconductor FET*, ossia 'FET a Metallo Ossido Semiconduttore') poiché costituiscono una delle categorie di FET più diffuse e impiegate, sia nell'ambito dell'elettronica hobbistica, che in quello dell'elettronica industriale. Per citare un esempio concreto, la sigla

➤ *La struttura interna di un transistor MOSFET a canale n, in cui sono evidenziate le due zone drogate p ed n.*

**CMOS**, che è tanto in voga nell'era delle tecnologie digitali, deriva proprio dalla contrazione dei termini 'Complementary' e 'MOS' e contraddistingue una particolare metodologia di progettazione di circuiti basati sui transistor a effetto campo. Anche parlando dei FET, ci limiteremo a vedere solo alcune

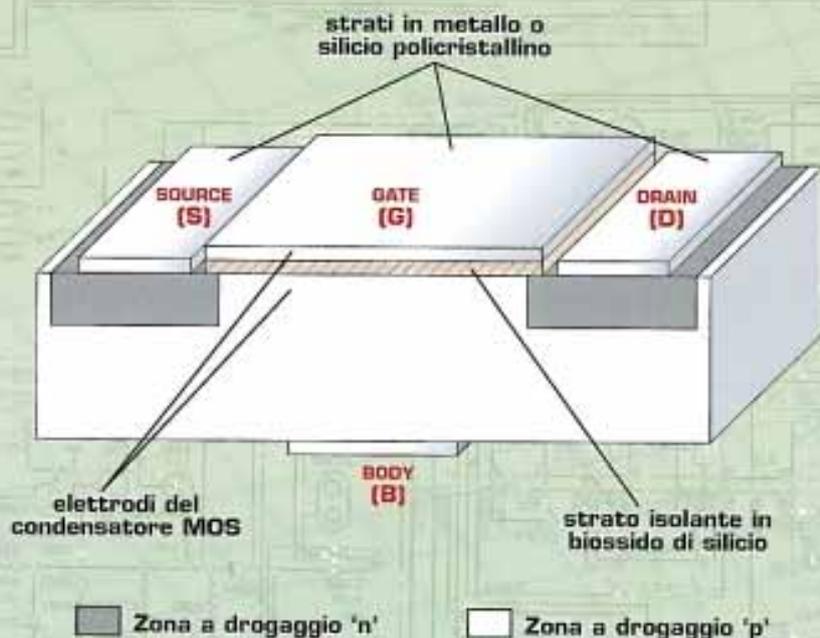
*Sopra, un MOSFET di potenza SFP9540. Esistono FET praticamente per ogni tipo di applicazione.*

delle caratteristiche pratiche di questi dispositivi, senza addentrarci troppo negli aspetti fisici e matematici.

## I MOSFET

Come nel caso dei BJT, anche i transistor MOSFET devono il loro comportamento a tre

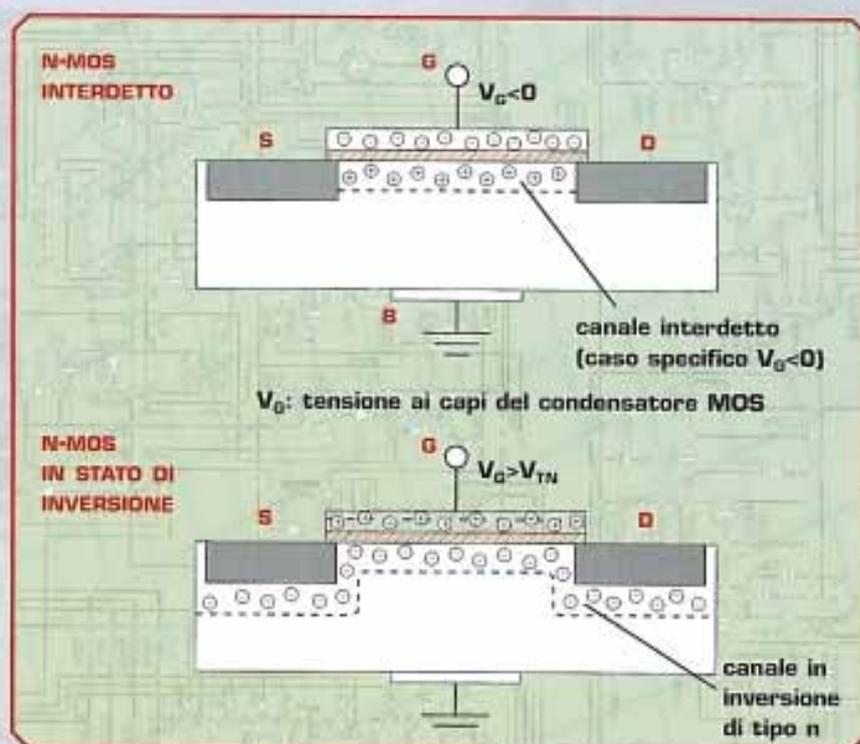
LA STRUTTURA DI UN MOSFET A CANALE N



'porzioni' di silicio drogato (per questa ragione troveremo transistor 'npn', detti **n-MOS** o 'a canale n', e transistor 'pnp', detti **p-MOS** o 'a canale p'). Questa analogia con i BJT, tuttavia, non deve ingannare: le loro strutture interne e i loro principi di funzionamento sono molto differenti (puoi confrontare l'immagine della pagina precedente dove è mostrata la struttura interna di un n-MOS con quella presentata nel fascicolo 14 relativamente ai BJT npn). Al di là della diversità geometrica intrinseca, ciò che caratterizza i transistor MOSFET è la presenza del **condensatore MOS** (incontreremo più avanti i condensatori nello specifico), un sistema fisico composto da **due elettrodi paralleli e separati da un sottilissimo strato di materiale isolante**, di solito **biossido di silicio** (il silicio, quindi, può comportarsi sia come un conduttore, sia come un ottimo isolante, in base a come viene 'manipolato' a livello chimico). Proprio il condensatore MOS costituisce il 'cuore' del funzionamento dei transistor MOSFET. Prima di procedere con una semplice analisi di questi dispositivi,



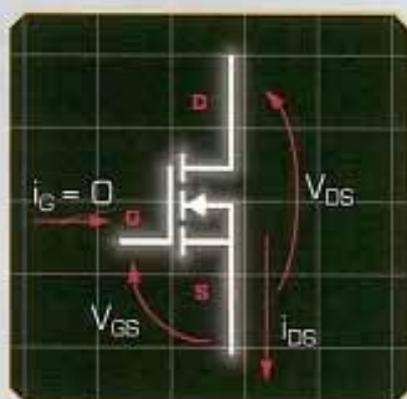
🔗 I simboli elettrici che utilizzeremo per rappresentare i MOSFET, a 'canale n' (a sinistra) e a 'canale p' (a destra).



stabiliamo una nomenclatura che ci sarà utile per identificare i vari elementi del transistor. Innanzitutto partiamo dai **due elettrodi del condensatore MOS**: quello superiore prende il nome di **gate** (G, 'cancello'), mentre quello inferiore, di solito ricavato direttamente sul semiconduttore col quale viene realizzato il transistor, è detto **body** (B, 'corpo'). Le due **zone esterne** con drogaggio complementare al body, invece, sono dette **drain** (D, 'pozzo') e **source** (S, 'sorgente'). Come nel caso dei BJT, anche parlando di MOSFET faremo riferimento a un esemplare n-MOS (in particolare un n-MOS 'ad arricchimento', una sottofamiglia di MOSFET, ma non ci addentreremo nel dettaglio), in modo da poter confrontare i comportamenti delle due diverse tecnologie di transistor (i simboli elettrici dei MOSFET sono mostrati nell'immagine

🔗 *Lo stato del canale nel caso di un n-MOS in interdizione (in alto) e in inversione (in basso). Il canale regola la corrente del transistor.*

a sinistra). In precedenza abbiamo definito il condensatore MOS come il 'cuore' del transistor; vediamo per quale ragione. Immaginiamo di collegare il body (drogato p) a potenziale nullo (massa) e di applicare una differenza di potenziale sul terminale gate ( $V_G$  dell'immagine in alto). Se la **d.d.p. è negativa** si formerà un **accumulo di lacune** nella zona di confine tra il body e l'isolante, che tenderà a **'separare'**, a livello elettrico, **le zone di source e di drain** (primo schema dell'immagine in alto). A **tensione positiva**, al contrario, si avrà un comportamento completamente opposto: con l'aumentare della d.d.p., per l'effetto del



Una schema dell'n-MOS che utilizziamo come esempio con le relative tensioni e correnti.

campo elettrico (da qui il nome 'effetto campo') le lacune verranno progressivamente respinte dalla superficie di separazione tra body e isolante, tanto che, a una determinata tensione (**tensione di soglia**), la concentrazione di lacune inizierà a diventare inferiore a quella degli elettroni. In queste condizioni, la porzione di body prossima allo strato di biossido di silicio inizierà a comportarsi come se fosse stata sottoposta a un drogaggio di tipo n (anche se drogata p). Si crea così uno strato (detto 'di inversione') che permetta alla corrente di scorrere

tra drain e source. Questo tipo di 'controllo' del flusso di corrente è una delle principali differenze

Un BS-170, un esemplare di n-MOS per applicazioni con correnti limitate.

tra le tecnologie BJT e MOSFET: mentre la corrente emessa dai BJT è regolata dalla corrente entrante nella base, **il controllo dei MOSFET avviene per mezzo di una tensione**. Inoltre, contrariamente a quanto accade nel terminale di base dei BJT, **la corrente entrante nel pin di gate è talmente bassa da poter essere considerata nulla**.

### LE REGIONI DI FUNZIONAMENTO

Anche i MOSFET, come i BJT, operano secondo alcune 'regioni di funzionamento', che sono identificate sulla base dei valori di tensione presenti tra i terminali gate, source e drain. Da qui, indicheremo con  $V_{GS}$  la **tensione tra gate e source**, con  $V_{DS}$  quella **tra drain e source** e con  $V_{TN}$  la **tensione di soglia** oltre la quale si genera lo strato di inversione. Partiamo dal caso più semplice, che, in un certo senso, abbiamo già incontrato in precedenza parlando di BJT. Ipotizziamo  $V_{GS} \leq V_{TN}$ : con questi voltaggi, come visto nel paragrafo precedente, non sussistono le condizioni che permette alla corrente di scorrere tra drain e source. Il transistor si trova in condizioni di **interdizione**. Esattamente come avveniva per i BJT, in questo stato il transistor è considerabile come 'spento', in quanto non consente il passaggio di corrente tra le zone D e S. Passiamo, ora, ad analizzare gli altri due stati dei MOSFET, nei quali un ruolo fondamentale viene rivestito anche dalla tensione  $V_{DS}$ . Il primo di questi stati

prende il nome di '**regione lineare**' o '**ohmica**', in virtù del suo comportamento che appare molto simile a quello di una '**resistenza non lineare**'. Il significato di questa definizione è relativamente semplice: se ci troviamo in regione ohmica e ipotizziamo di mantenere costante la tensione  $V_{GS}$ , **il legame tra la corrente  $I_{DS}$  e la tensione  $V_{DS}$  diviene esprimibile in maniera molto simile alla legge di Ohm** secondo un'equazione del tipo:

$$I_{DS} = V_{DS} / R(V_{DS})$$

(possiamo vedere l'equazione completa della regione lineare nella tabella della pagina seguente). **In modo più pratico, l'equazione afferma che la componente resistiva tra drain e source varia al variare della tensione  $V_{DS}$** . La conseguenza più diretta di questo legame 'ohmico' è che, **in regione lineare, all'aumentare (o diminuire) della differenza di potenziale tra drain e source, aumenta (o diminuisce) la corrente  $I_{DS}$  che attraversa il transistor**. Gli n-MOS operano in questa regione nel caso in cui la differenza tra la tensione fra gate e source ( $V_{GS}$ ) e la tensione di soglia ( $V_{TN}$ ) sia positiva e maggiore della tensione presente tra drain e source (matematicamente:  $V_{GS} - V_{TN} \geq V_{DS} \geq 0$ ). Il terzo degli stati di funzionamento è la **regione di saturazione** (valida se  $V_{DS} \geq (V_{GS} - V_{TN}) \geq 0$ ), una condizione operativa entro la quale la corrente  $I_{DS}$  dipende esclusivamente dalla tensione  $V_{GS}$  presente ed è indipendente

Lo schema di funzionamento di un n-MOS. 'K' è un parametro specifico legato al MOSFET.

	Corrente $i_{DS}$	Condizioni operative
Regione di interdizione	$i_{DS} = 0$	$V_{GS} \leq V_{TN}$
Regione lineare	$i_{DS} = K \left( V_{GS} - V_{TN} - \frac{V_{DS}}{2} \right) \cdot V_{DS}$	$V_{GS} - V_{TN} \geq V_{DS} \geq 0$
Regione di saturazione	$i_{DS} = \frac{K}{2} (V_{GS} - V_{TN})^2$	$V_{DS} \geq (V_{GS} - V_{TN}) \geq 0$

dalle variazioni di d.d.p tra drain e source. In particolare, nella regione di saturazione si ha una corrente  $i_{DS}$  che varia in modo proporzionale al quadrato della differenza tra la tensione  $V_{GS}$  e la tensione di accensione del transistor  $V_{TN}$ .

**LE CURVE CARATTERISTICHE**

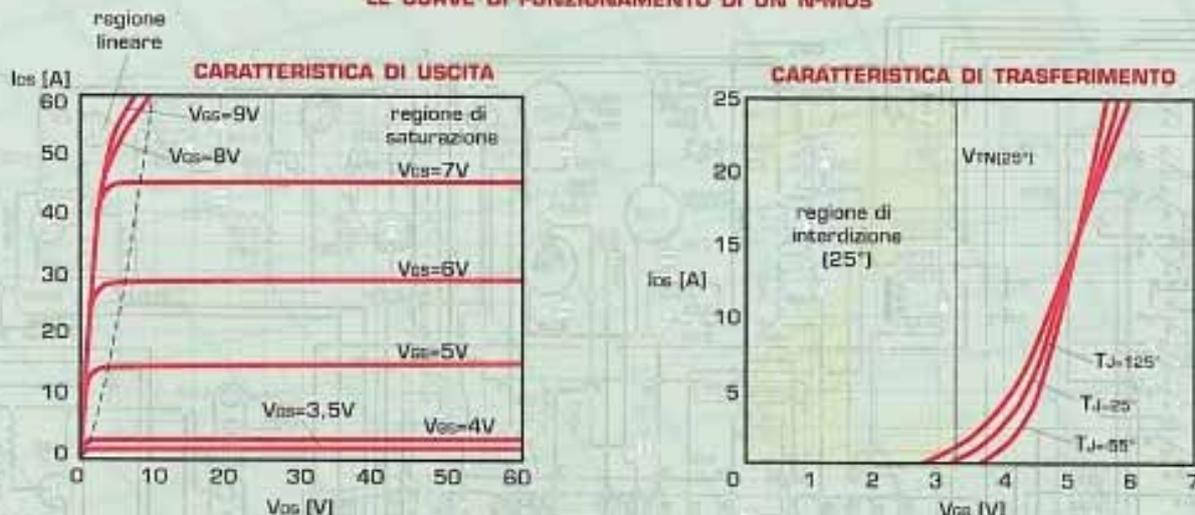
Come i BJT, anche i MOSFET vengono spesso descritti attraverso una serie di curve caratteristiche. Vediamo, come esempio, due tipi di grafici che vengono solitamente inseriti

nei datasheet dei transistor a effetto campo. Il primo di questi grafici (in basso a sinistra) è chiamato **'caratteristica di uscita'** e mostra il modo in cui la corrente  $i_{DS}$  del transistor varia in riferimento a  $V_{DS}$ , nel caso in cui  $V_{GS}$  si mantenga costante (ogni curva è associata a un determinato valore della tensione  $V_{GS}$ ). Il secondo grafico, invece, è detto **'caratteristica di trasferimento'** e descrive la corrente  $i_{DS}$  in maniera complementare a quanto fatto in precedenza, ossia fissando

$V_{DS}$  e facendo variare  $V_{GS}$ . Su questi grafici è facile individuare le regioni di funzionamento. Nello StepbyStep sperimenterai un piccolo circuito basato su MOSFET che ti permetterà di affacciarti al mondo della logica booleana, nella quale ci addenteremo nei prossimi fascicoli dell'opera.

Le due grafici caratteristici dei MOSFET riferiti a un dispositivo di potenza a canale n, utili per conoscere le caratteristiche dei modelli in commercio.

**LE CURVE DI FUNZIONAMENTO DI UN N-MOS**



Due grafici che descrivono le caratteristiche di funzionamento di un MOSFET per applicazioni di potenza, ossia con alti amperaggi. La caratteristica di uscita visualizza il modo in cui il transistor risponde alla variazione di  $V_{DS}$  mantenendo  $V_{GS}$  costante (ogni curva è associata a una specifica  $V_{GS}$ ). La caratteristica di trasferimento, invece, descrive come cresce  $i_{DS}$  in funzione di  $V_{GS}$  (può essere impiegata anche per rappresentare i diversi comportamenti del dispositivo in base alla temperatura di funzionamento).

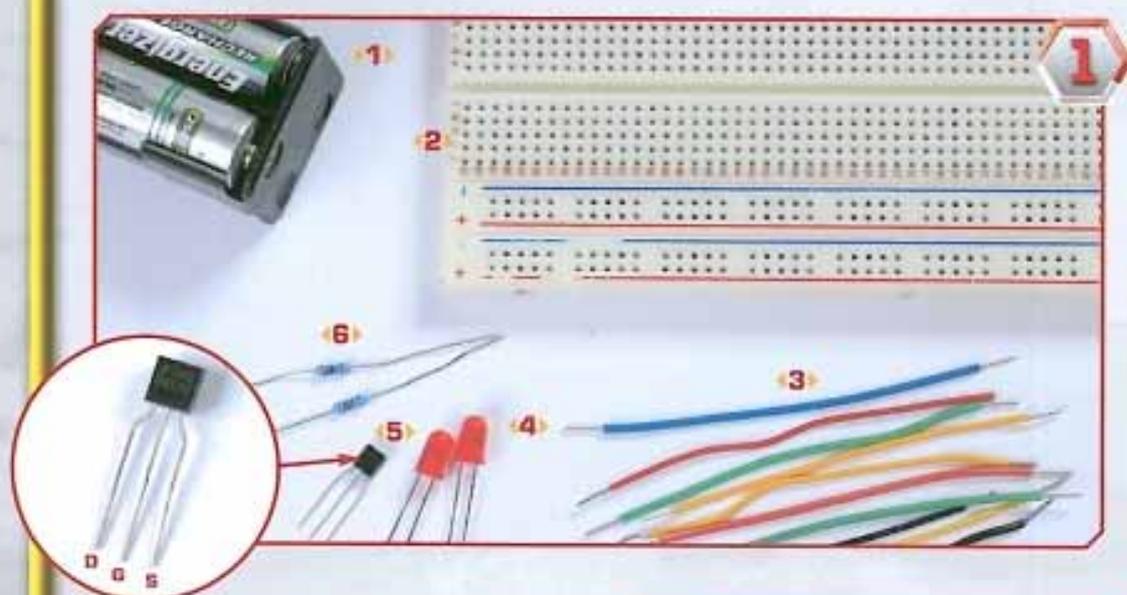
# STEPbySTEP

## UNA PORTA 'NOT' MOSFET

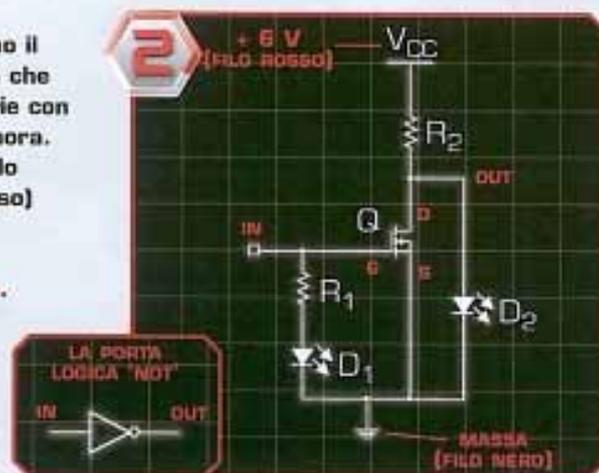
In questo StepbyStep potrai utilizzare un transistor MOSFET BS-170 per realizzare un circuito simile a quello che in elettronica digitale viene chiamato 'porta NOT'. In elettronica, la porta NOT implementa l'equivalente dell'operatore 'negazione' della logica booleana: dando in ingresso un valore alto (1), otterrai un'uscita bassa (0) e, viceversa, imponendo un ingresso basso (0) avrai un'uscita alta (1). Le funzioni logiche, come vedremo nei prossimi Workshop, rivestono un'importanza fondamentale nell'elettronica digitale e possono essere impiegate per realizzare semplici circuiti decisionali per i nostri robot e per svolgere una grande quantità di operazioni. Questo StepbyStep, inoltre, ti mostrerà un esempio di utilizzo dei transistor come 'interruttori' di corrente.

Elementi richiesti:

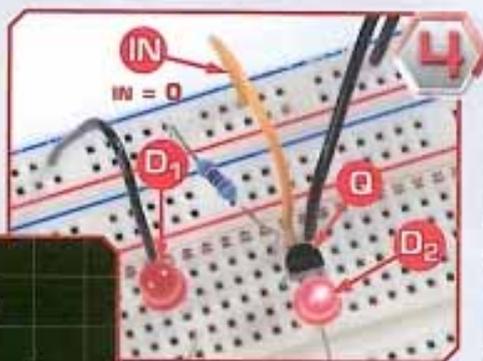
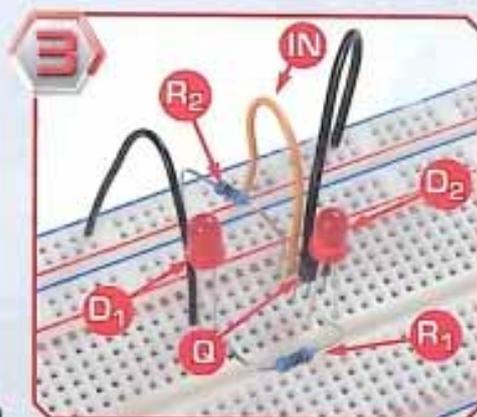
- 1 un portatile da 4 stilo con relative batterie (meglio se ricaricabili) ( $V_{CC}$ )
- 2 una breadboard
- 3 alcuni fili per breadboard
- 4 due LED rossi ( $D_1, D_2$ )
- 5 un transistor BS-170 (Q)
- 6 due resistori da 200 ohm ( $R_1, R_2$ )



Nell'immagine a destra ti mostriamo il circuito che dovrai realizzare. Nota che non è stato inserito il pacco batterie con il simbolo che hai visto utilizzato finora. Al suo posto abbiamo indicato il polo positivo del pacco batterie (filo rosso) con il simbolo  $V_{CC}$ , mentre il polo negativo (filo nero) è evidenziato con il simbolo elettrico della massa. Nell'immagine in basso, inoltre, puoi vedere il simbolo circuitale comunemente usato per rappresentare la porta logica NOT, introdotta nel sommario di questo StepbyStep.



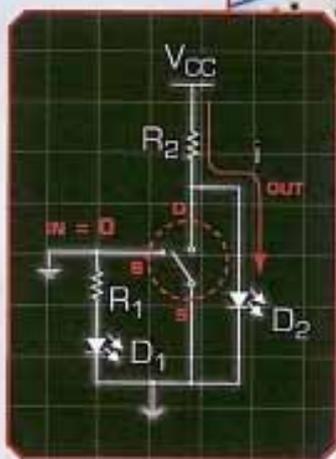
Come prima cosa assembla il circuito che hai visto nello schema elettrico (per la piedinatura del transistor puoi far riferimento alla foto della pagina precedente). Otterrai un circuito simile a quello che vedi mostrato nella foto accanto. Una nota importante va fatta in merito alla presenza del **filo giallo** (indicato con la sigla 'IN'). Questo filo rappresenta il **connettore di ingresso al circuito** (puoi vederlo indicato nello schema elettrico, anche in quel caso con la sigla 'IN'). Nell'esperimento dovrai collegarlo in un primo tempo alla linea '+' e in un secondo tempo alla linea '-' della breadboard per imporre sul **pin di gate** una tensione 'alta' ( $V_{CC}$ ) o 'bassa' (massa) e verificare gli effetti.



Una volta assemblato il circuito collega il filo giallo alla linea '-' della breadboard. In questo modo hai portato il pin di gate del transistor 'a massa'. Da quanto abbiamo detto nell'articolo, nelle attuali condizioni il transistor è 'spento' e si comporta come un

interruttore aperto (come ti

mostriamo nello schema a sinistra). La corrente  $i$ , quindi, scorre nel ramo di circuito costituito dal resistore  $R_2$  e dal diodo  $D_2$ , che vedrai accendersi. Ovviamente, poiché la tensione di ingresso è nulla (abbiamo portato il punto IN a massa), il LED  $D_1$  rimarrà spento. In pratica, abbiamo visto come imponendo un **ingresso 'basso'** ('0 logico') otteniamo l'accensione del ramo di uscita OUT ('1 logico').



Ora scollega l'alimentazione, sposta il filo giallo sulla linea '+' della breadboard e ripristina la connessione con le batterie. In questa maniera hai portato il gate alla tensione  $V_{CC}$ , ossia ca. 6 V. Il transistor si 'accende' e inizia a far fluire corrente tra drain e source (nell'immagine lo vediamo rappresentato da un interruttore chiuso, anche se sarebbe più corretto paragonarlo a un resistore). La corrente, quindi, non scorre più nel diodo  $D_2$ , che rimane spento.  $D_1$ , al contrario, sarà acceso per via della tensione  $V_{CC}$  di ingresso. Hai appena osservato il comportamento della **porta logica NOT** (le porte NOT reali, comunque, sono molto più complesse).

