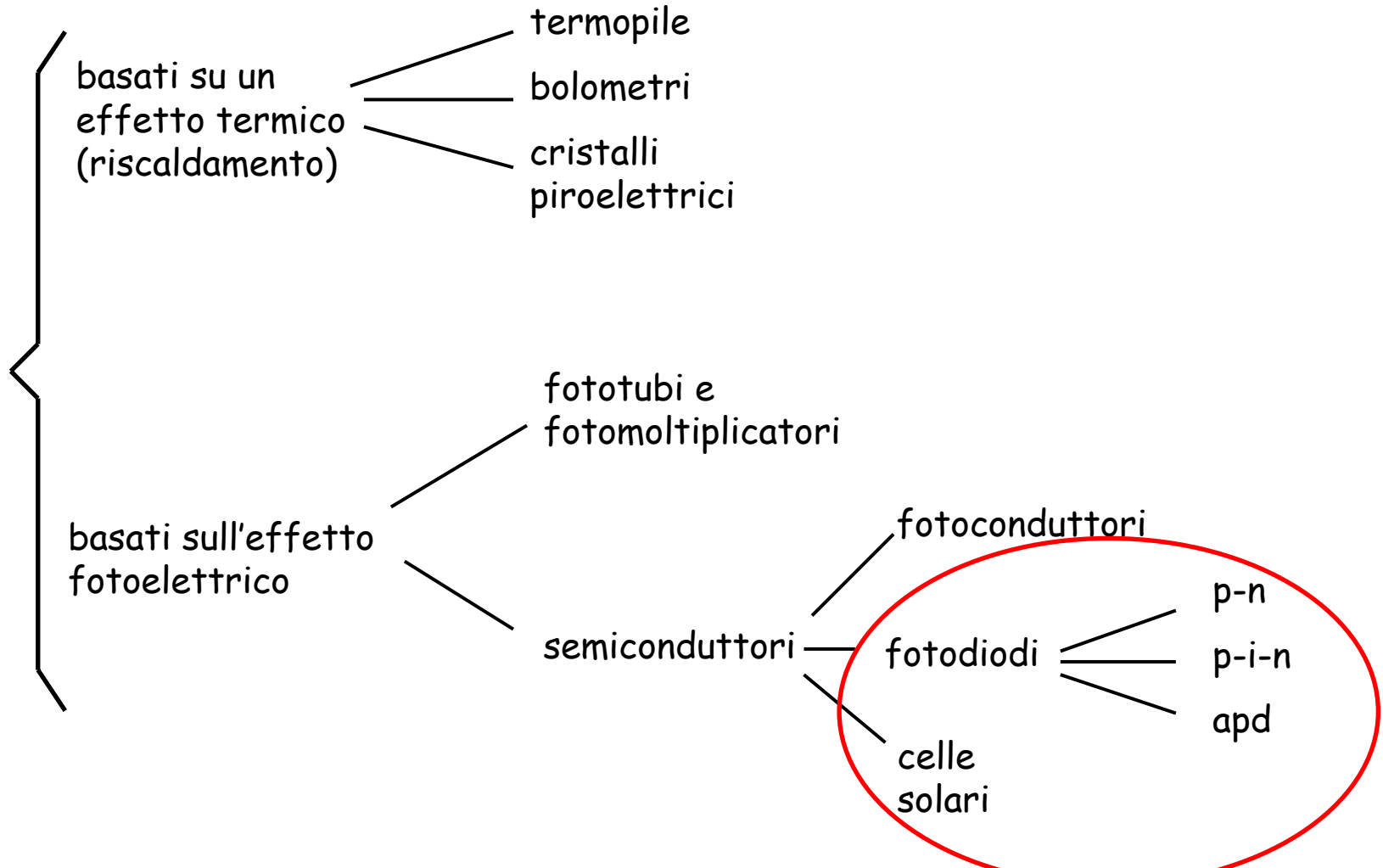


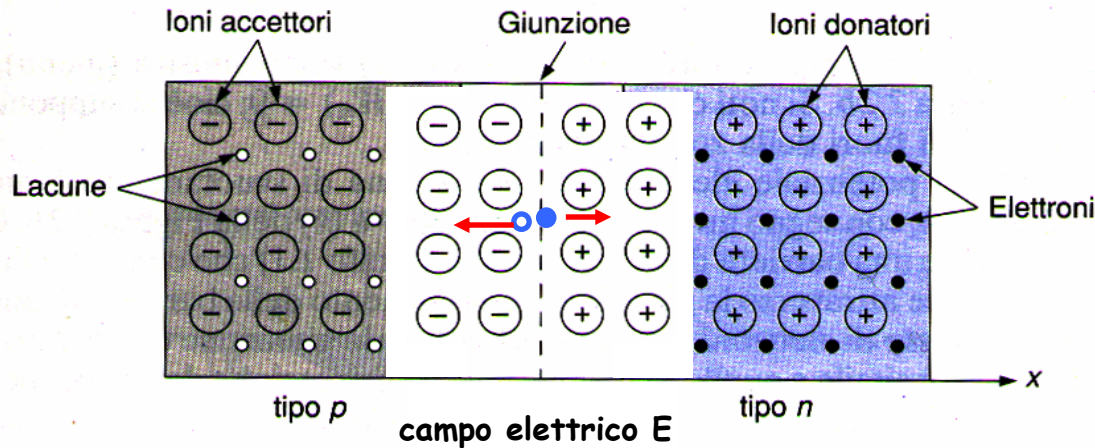
Fotorivelatori

Dispositivi che convertono un segnale ottico in segnale elettrico



Fotorivelatori a semiconduttore
(fotodiodi e celle solari)

Fotodiodo con giunzione p-n



campo elettrico E

Zona di svuotamento

**I fotoni incidenti
possono creare coppie
elettrone-lacuna.**

**Tali coppie vengono
separate dal campo
elettrico E .**

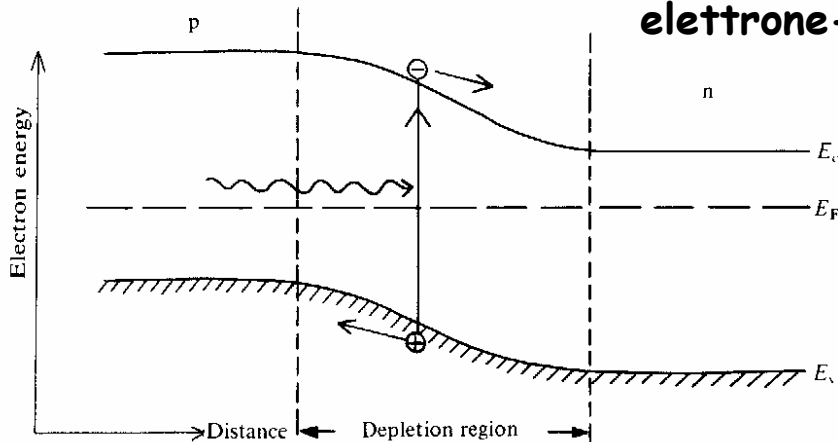


FIG. 7.25 Electron energy level diagram illustrating the generation and subsequent separation of an electron-hole pair by photon absorption within the depletion region of a p-n junction.

**Può nascere, quindi, nel
diodo una corrente
inversa proporzionale al
numero di fotoni incidenti**

Fotodiodo con giunzione p-n

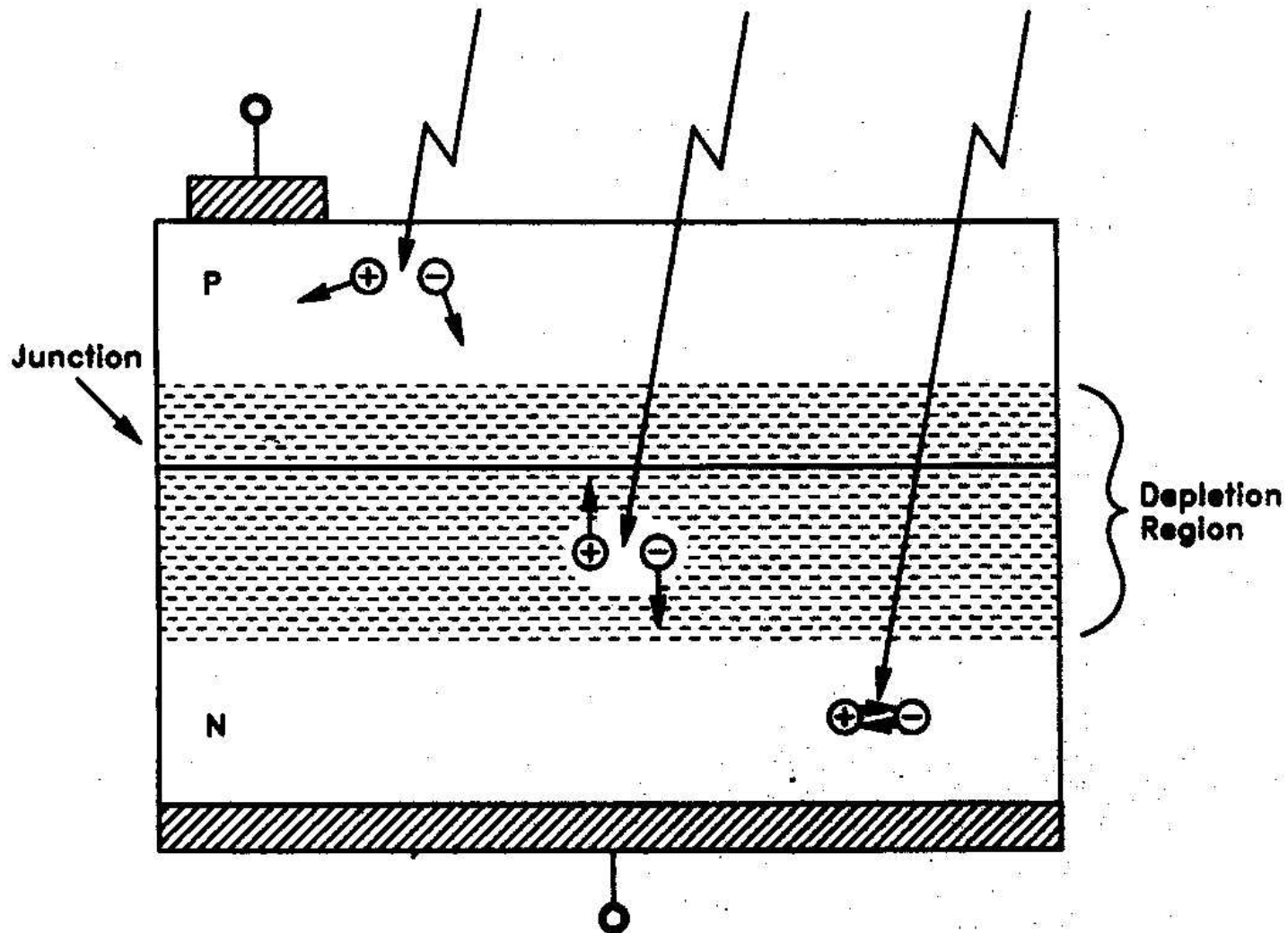


Figure 1.1 In a photodiode, holes and electrons released by photons within the depletion region accelerate toward the diode terminals, but those released outside this region travel by diffusion or simply recombine.

Struttura tipica di un fotodiodo con giunzione p-n

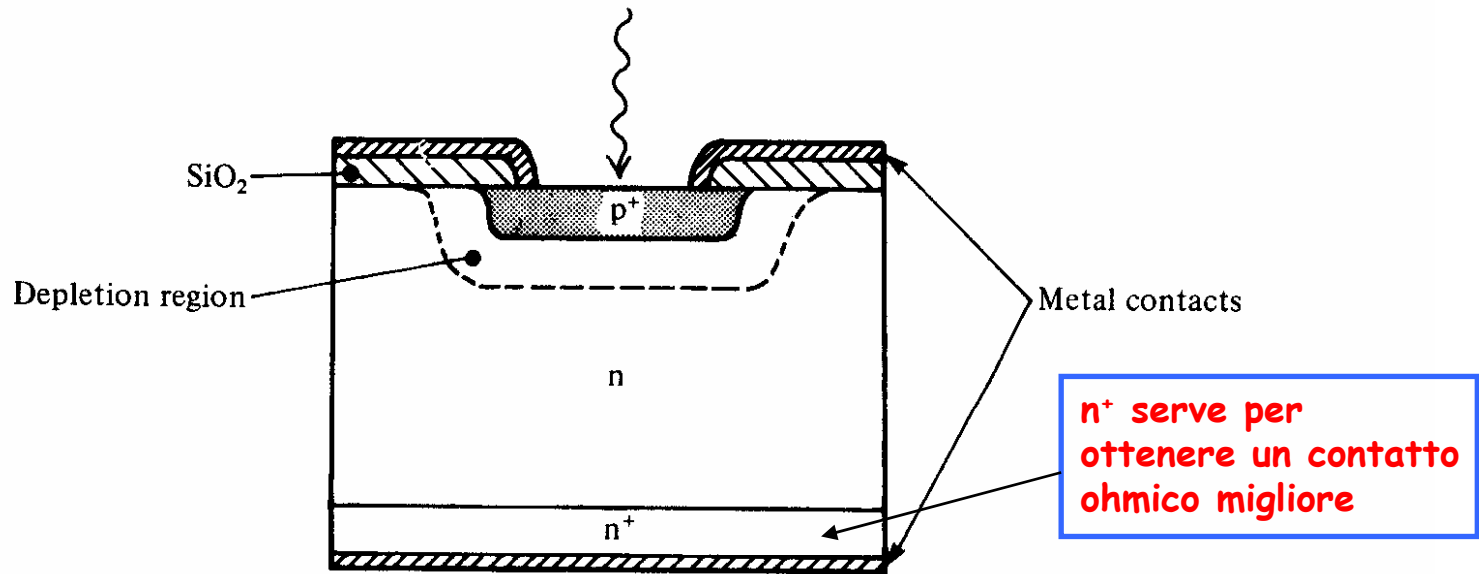


FIG. 7.27 Typical silicon photodiode structure for photoconductive operation. A junction is formed between heavily doped p-type material (p^+) and fairly lightly doped n-type material so that the depletion region extends well into the n material. The p^+ layer is made fairly thin. Metallic contacts can be made directly to the p^+ material but to obtain an ohmic contact to the n material an intermediate n^+ layer must be formed.

Distribuzione del campo elettrico in un tipico fotodiodo con giunzione p-n

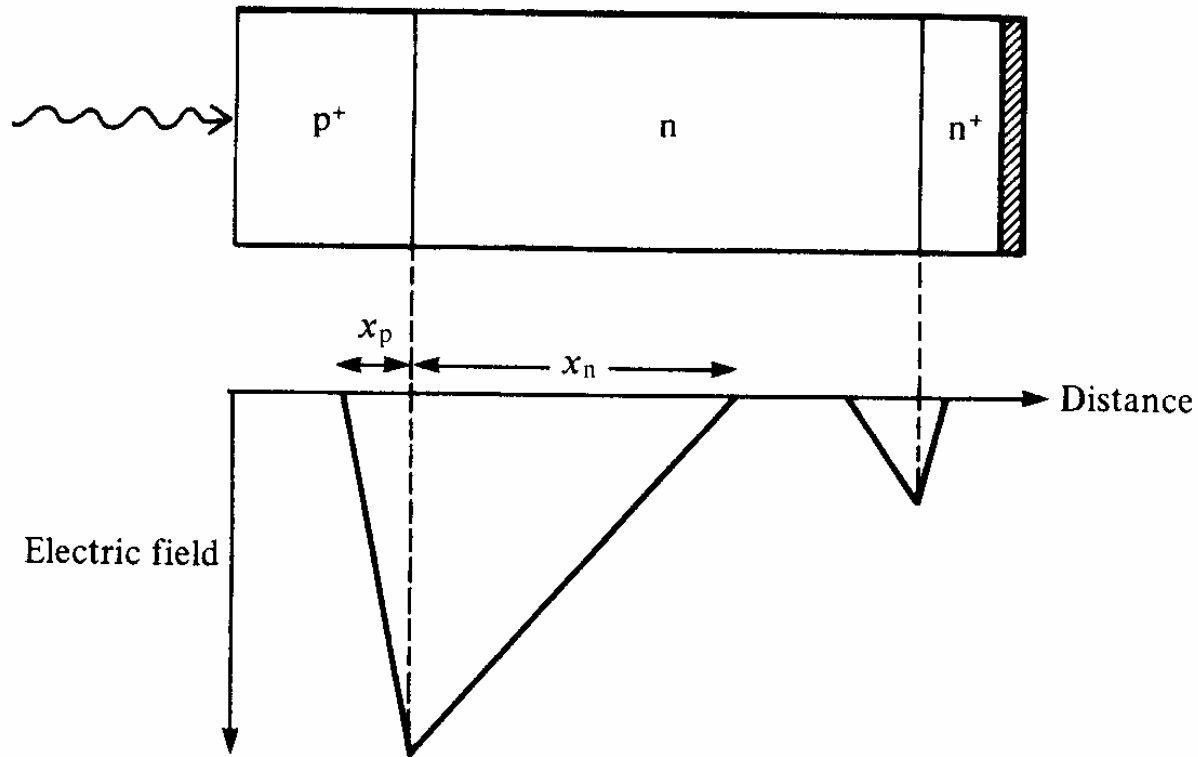


FIG. 7.28 Electric field distribution within the p⁺-n junction diode shown in Fig. 7.27, assuming an abrupt diode structure.

Struttura semplificata di un fotodiodo p-i-n

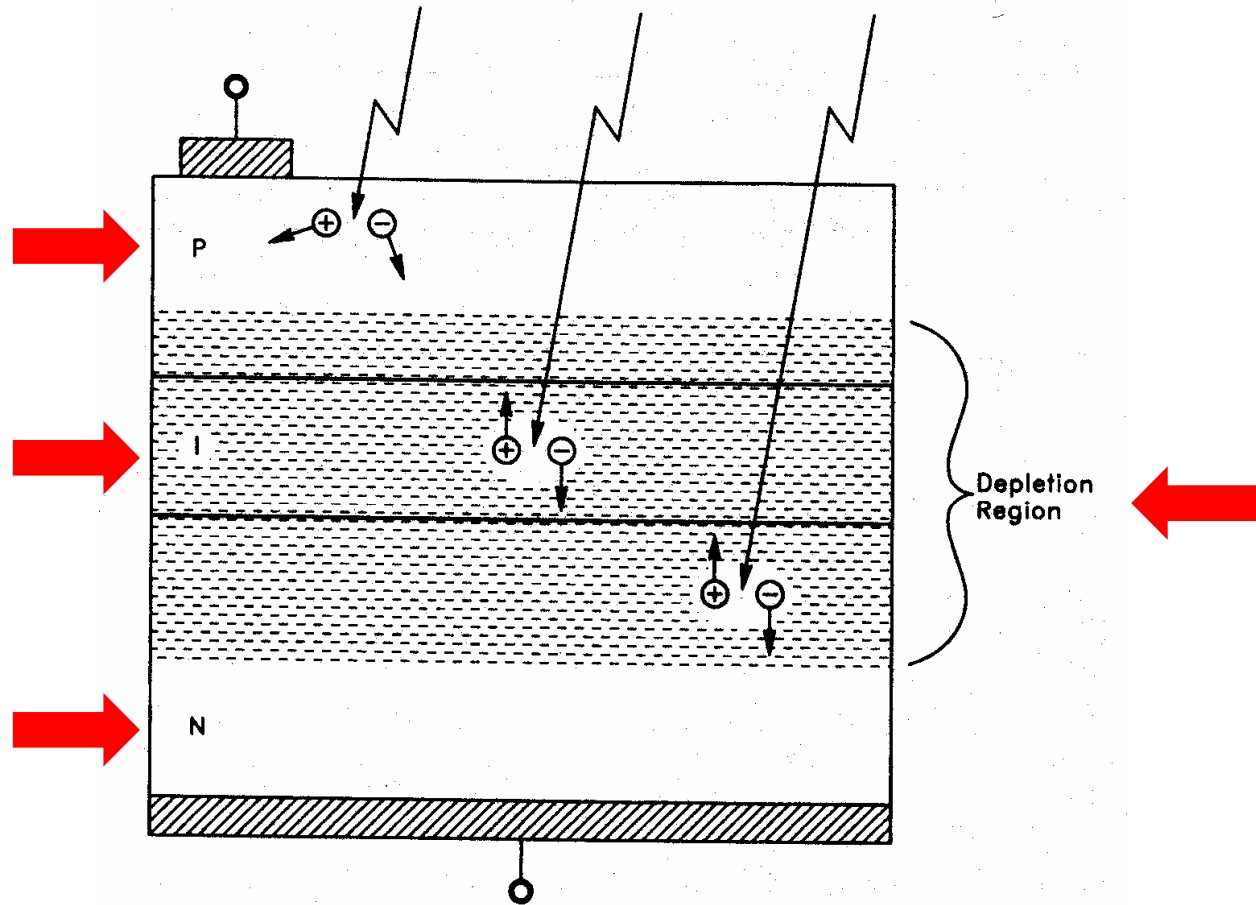
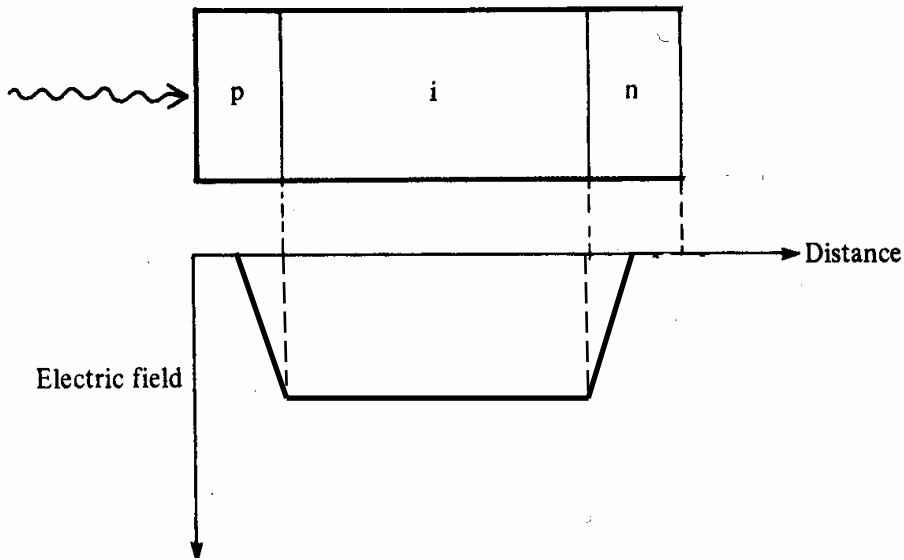
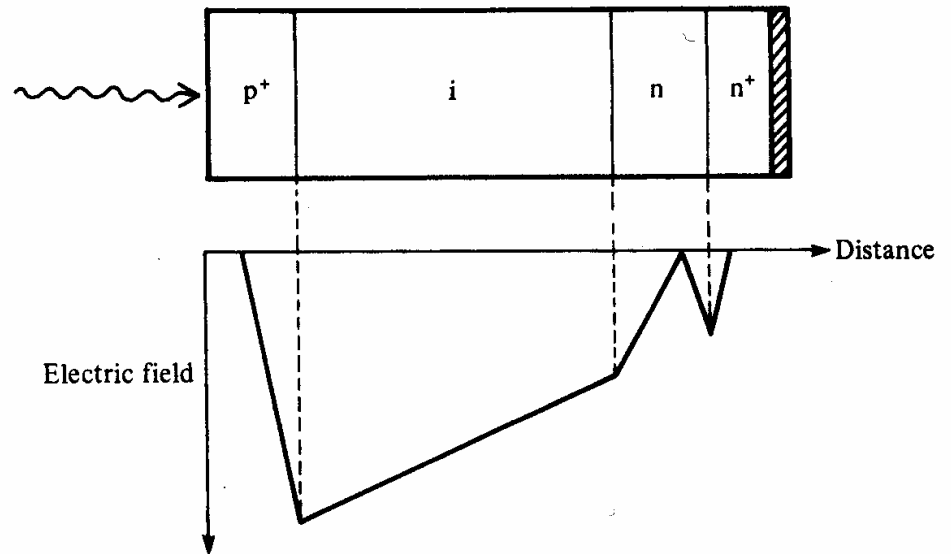


Figure 1.5 PIN photodiodes include an intrinsic interlayer that expands the depletion region to encompass carriers released by a broader range of photon wavelengths.

Distribuzione del campo elettrico in un fotodiodo con giunzione p-i-n



(Il campo elettrico si estende lungo la zona di assorbimento)



Vantaggi del fotodiodo pin

Fotodiodi con giunzione p-n



molte coppie elettrone-lacuna vengono dissociate dai fotoni incidenti al di fuori della zona in cui vi è il campo elettrico (zona di svuotamento meno estesa della zona di assorbimento). Queste cariche normalmente **si ricombinano** perchè non vengono subito separate dal campo elettrico. Esse, quindi, non danno contributo alla corrente del fotodiodo.

L'efficienza quantica del dispositivo è bassa.

Fotodiodi con giunzione p-i-n



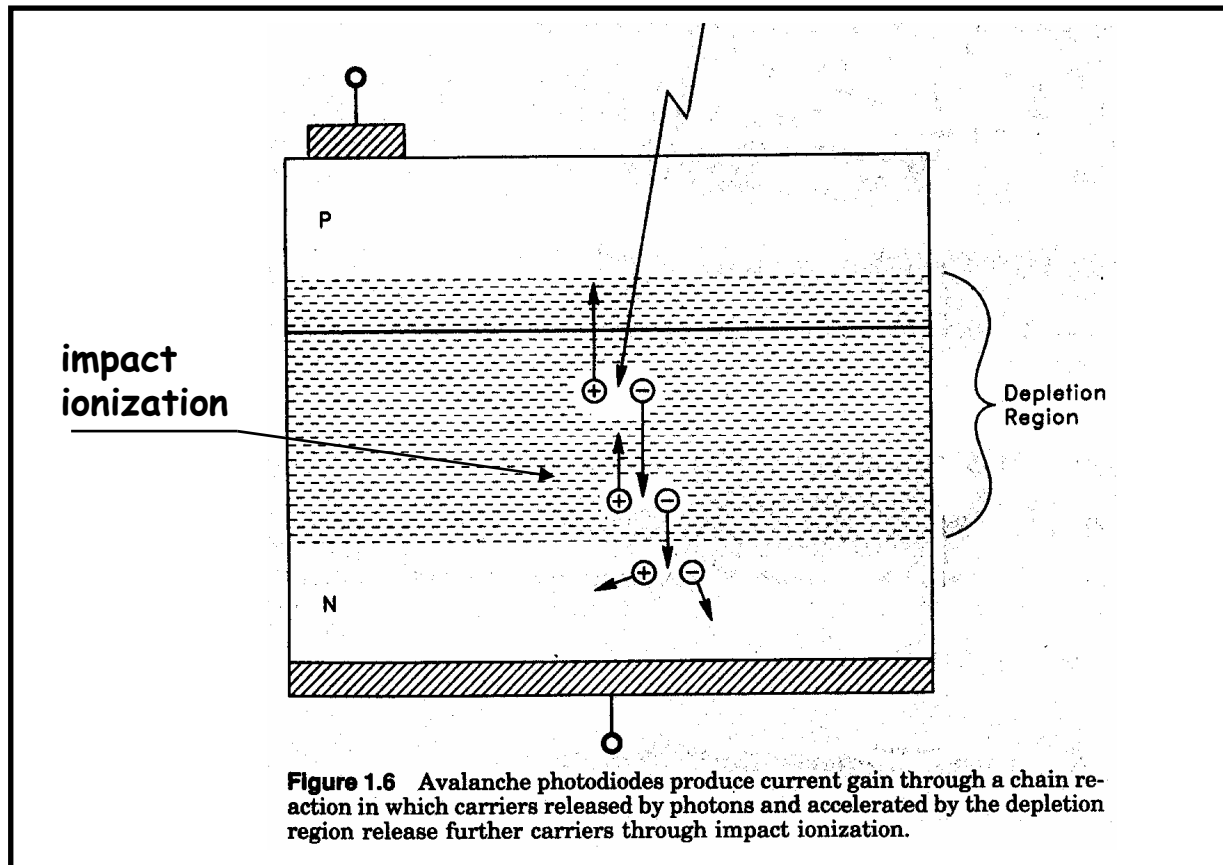
la zona di svuotamento (in cui vi è un campo elettrico alto) è più estesa della zona di assorbimento. Quindi le coppie generate (per assorbimento dei fotoni) **non si ricombinano** perchè vengono subito separate dal campo elettrico.

Il dispositivo ha un'efficienza quantica maggiore.

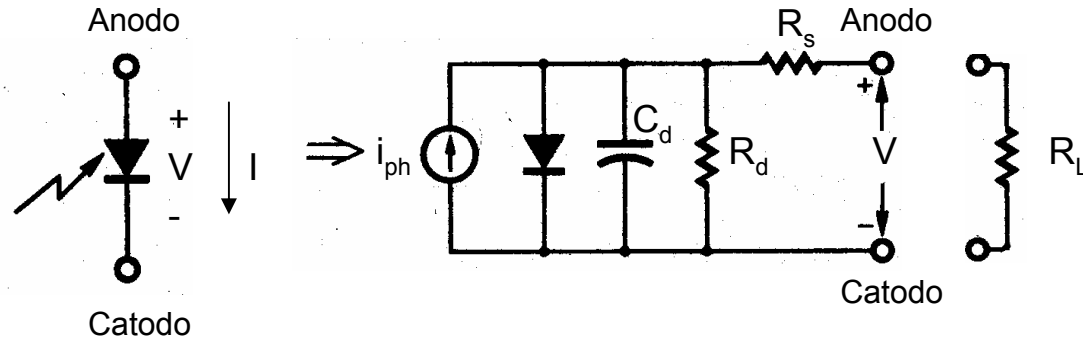
Fotodiodi a valanga (APD-Avalanche PhotoDiodes)

Operano con tensione di polarizzazione inversa elevata (vicino alla tensione di breakdown). Il campo elettrico è molto elevato, quindi le cariche che attraversano la regione di svuotamento, hanno energia sufficiente per dissociare altre coppie elettrone-lacuna (effetto valanga).

si ha: amplificazione della fotocorrente internamente al dispositivo (alta sensibilità, basso rumore)



Circuito equivalente di un fotodiodo




il modello del fotodiodo comprende:

- diodo ideale
- C_d capacità di giunzione
- R_d resistenza di buio del fotodiodo (resistenza della giunzione)
- generatore di corrente fotogenerata ($i_{ph} = \sigma P$)
- R_s resistenza del materiale semiconduttore e dei contatti (R_s trascurabile)

Caratteristiche elettriche di un fotodiodo

La corrente I che attraversa il fotodiodo ad una data tensione V è la somma di due contributi:

- 1) corrente del diodo: espressa dalla legge di Shockley per la giunzione p-n
- 2) corrente i_{ph} fotogenerata nella regione di svuotamento [è una corrente inversa e dipende dall'illuminazione ($i_{ph} = \sigma P$)]

$$I = i_o (e^{V/\eta V_T} - 1) - i_{ph}$$


dove:

V_T equivalente in volt della temperatura

$$V_T = KT/e = T/11600$$

a temperatura ambiente ($T=293^\circ\text{K}$), $V_T=25\text{ mV}$

i_o = corrente inversa di saturazione (corrente di buio)

η = fattore di idealità della giunzione (dipende dal materiale; es. $\eta=1$ per Ge, $\eta\approx 2$ per Si)

Caratteristica I/V di un fotodiodo

$$I = i_o (e^{V/\eta V_T} - 1) - i_{ph}$$

se $i_{ph} = 0$ ($P=0$)
la caratteristica è
quella di un diodo

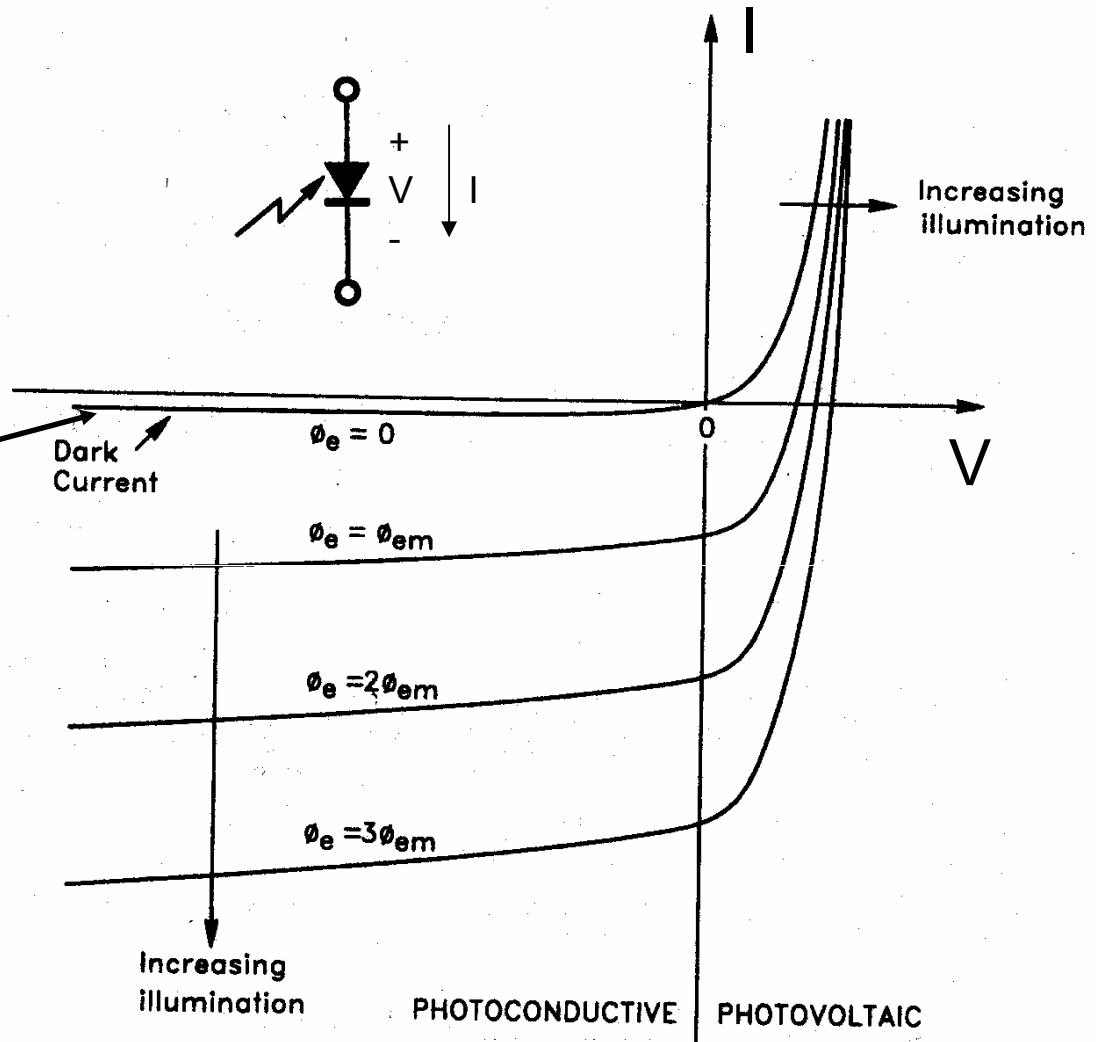


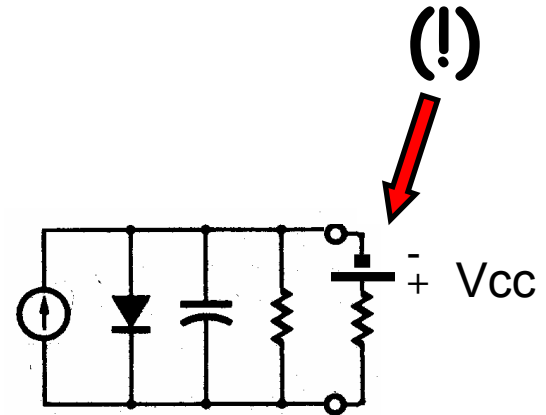
Figure 1.4 Sweeping the voltage and measuring the current with a photodiode reproduces the basic diode curve with offsets produced by the photodiode current.

Modi di operare di un fotodiodo

1) Fotoconduttivo

(fotodiodo polarizzato con $-V_{cc}$)

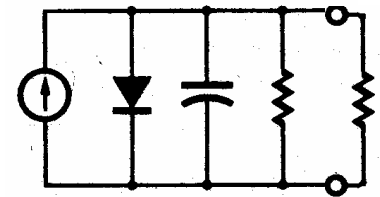
si lavora nel 3° quadrante della caratteristica I/V



2) Fotovoltaico

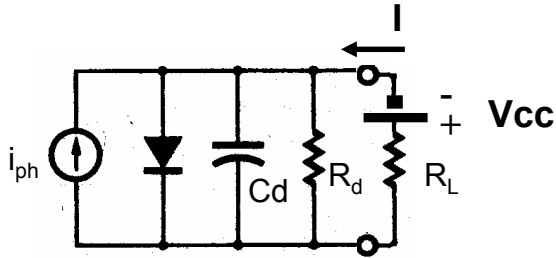
(il fotodiodo non è polarizzato; $V_{cc}=0$)

si lavora nel 4° quadrante della caratteristica I/V



Funzionamento tipico delle celle solari

Funzionamento fotoconduttivo



$$I = i_o (e^{V \cdot e / \eta k T} - 1) - i_{ph}$$

la tensione ai capi del fotodiodo è **negativa** (-V)

se: $V \gg kT/e$ (bastano poche centinaia di mV perchè si verifichi)

si ha:

$$I = -i_o - i_{ph}$$

$$(i_{ph} = \sigma P)$$

{ segno negativo !
significa che il fotodiodo **eroga corrente**

il fotodiodo eroga una corrente proporzionale alla potenza ottica P , con sovrapposta la corrente di buio i_o

Funzionamento fotoconduttivo (preamplificatore a transimpedenza)

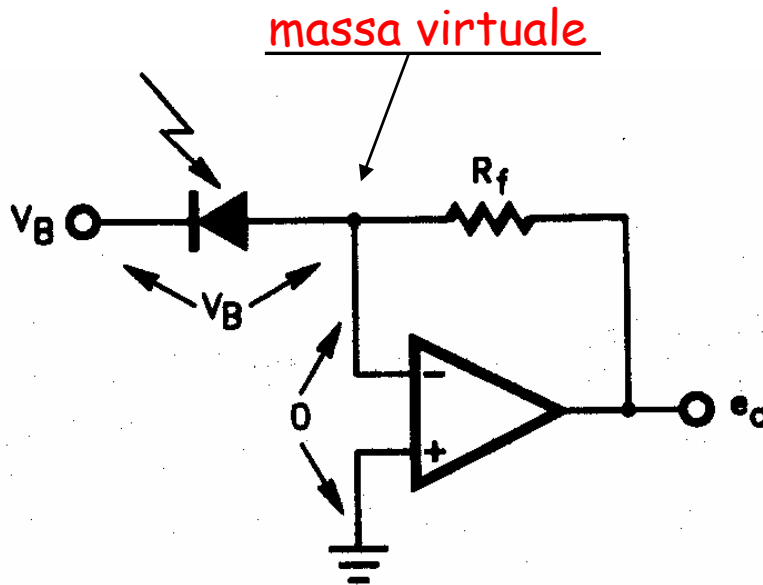
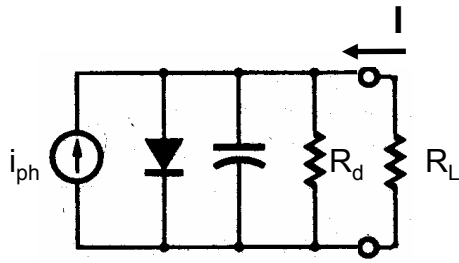


Figure 4.1 The current-to-voltage converter's virtual-ground input permits simple control of photodiode bias for diode capacitance reduction.

è un convertitore corrente-tensione

Funzionamento fotovoltaico



2 casi :

a) $R_L \gg R_d$ il segnale del fotodiodo è una tensione

b) $R_L \ll R_d$ il segnale del fotodio è una corrente

a) $R_L \gg R_d \longrightarrow I \approx 0$

$$I = i_o (e^{V \cdot e / \eta k T} - 1) - i_{ph}$$

$$0 = i_o (e^{V \cdot e / \eta k T} - 1) - i_{ph}$$

$$V = \eta (kT/e) \log [(i_{ph}/i_o) + 1]$$

per: $i_{ph} \gg i_o$

$$V = \eta (kT/e) \log (i_{ph}/i_o)$$

la tensione ai capi del fotodiodo varia in modo logaritmico con l'illuminazione (i_{ph})

Esempio di funzionamento fotovoltaico con uscita del fotodiodo su alta impedenza ($R_L \gg R_d$)

Il fotodiodo è posto in serie con l'ingresso di un amplificatore operazionale che, idealmente, non assorbe alcuna corrente ($R_L \approx \infty$)

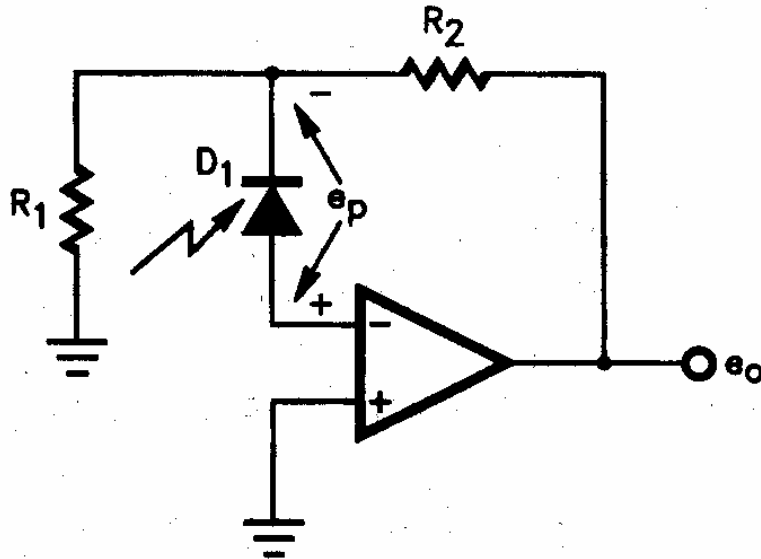


Figure 2.1 A straightforward application of a photodiode places the diode in series with an op amp input to avoid impedance loading but results in a non-linear response and a large dc offset.

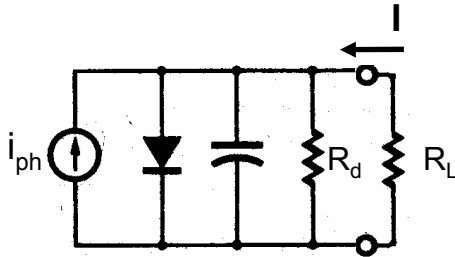
$$e_o = -(1 + R_2/R_1) e_p$$

$$e_p = (kT/e) \log (i_{ph}/i_0)$$

risposta logaritmica

b) $R_L \ll R_d$

(praticamente corto circuito) $V \approx 0$



$$I = i_o (e^{V \cdot e / \eta k T} - 1) - i_{ph}$$

$$I = -i_{ph}$$

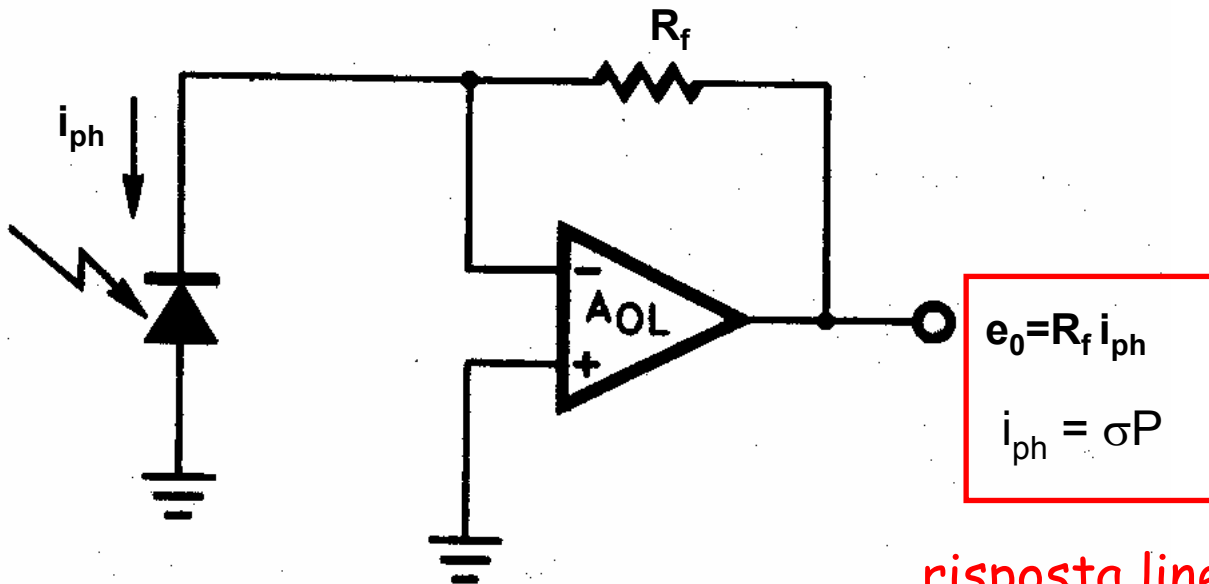
quindi:

$$I \equiv -\sigma P$$

il fotodiodo eroga corrente proporzionale all'illuminazione (potenza ottica)

la corrente di buio i_o non compare: basso rumore (possibilità di rivelare piccoli segnali)

Esempio di funzionamento fotovoltaico con uscita del fotodiiodo su impedenza praticamente nulla (massa virtuale)
($R_L \ll R_d$)



risposta lineare

è un convertitore corrente-tensione

Caratteristiche del funzionamento fotoconduttivo

(fotodiodo polarizzato + amplificatore operazionale)



Linearità della risposta

$$(i_{ph} = \sigma P)$$



Rumore nel segnale di uscita

Infatti:

alla corrente del fotodiodo è sovrapposta una corrente di buio i_0

$$I = - (i_{ph} + i_0)$$



Rapidità di risposta (grande larghezza di banda)

Infatti:

per effetto della polarizzazione (inversa) la velocità del fotorivelatore aumenta per due cause:

- si allarga la zona di svuotamento della giunzione [quindi diminuisce la capacità ($C = \epsilon S/d$) della giunzione e, di conseguenza, diminuisce la costante di tempo RC]
- aumenta il valore del campo elettrico ai capi della giunzione (quindi diminuisce il tempo di transito delle cariche)

Caratteristiche del funzionamento fotovoltaico

(fotodiodo non polarizzato + amplificatore operazionale)



basso rumore

Infatti: è assente la corrente di buio

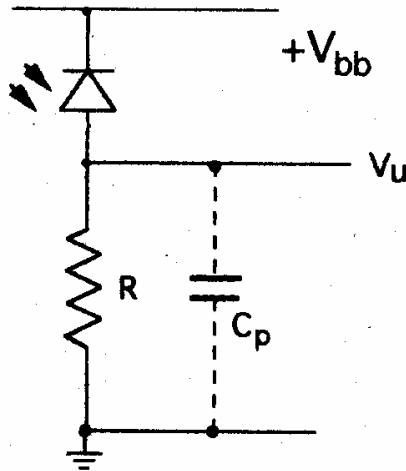


risposta lenta (ovvero larghezza di banda limitata)

Infatti, per l'assenza della polarizzazione:

- la zona di svuotamento è limitata, quindi la capacità della giunzione è alta
- il campo elettrico è limitato, quindi il tempo di transito delle cariche è lungo

In alcune applicazioni è possibile usare un circuito più semplice (senza amplificatore operazionale)



si misura la tensione generata dalla corrente del fotodiodo ai capi di un carico resistivo (con, oppure senza polarizzazione)



Problema: Per ottenere una sufficiente sensibilità occorre che R sia grande.

Poichè la banda passante è data da: $B = 1 / (2\pi R C)$

R grande dà luogo a cost. di tempo grande e, quindi, a B piccola
inoltre R grande significa alto rumore



Utilizzando, invece un amplificatore operazionale è possibile avere alta sensibilità, basso rumore, R piccola [$R_i = R/(1+A) \approx 0$] e B grande

Preamplificatori per fotodiodi

Scelta della configurazione

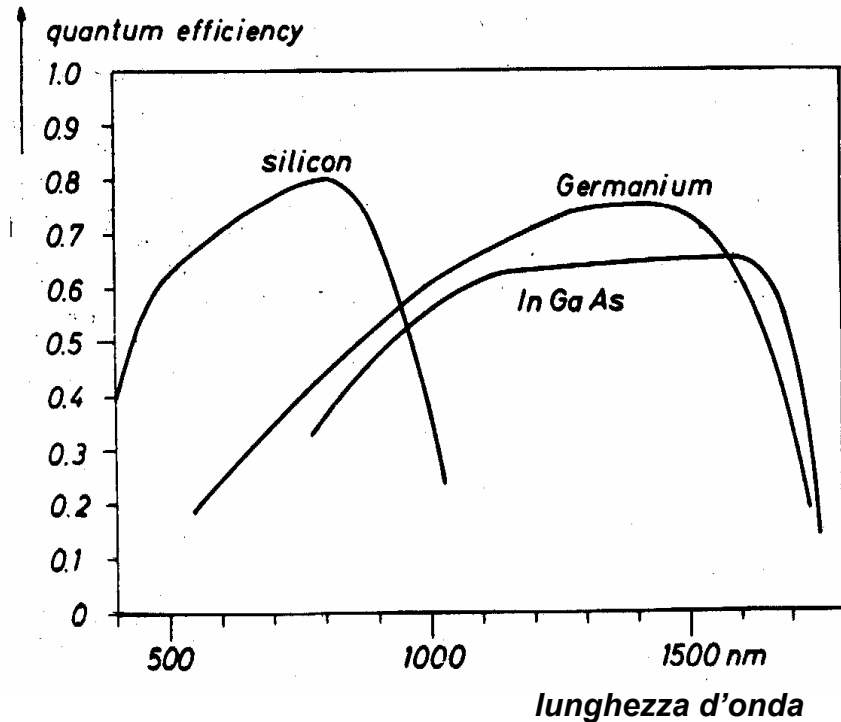
- Si polarizza il fotodiodo quando sono richieste alta velocità di risposta e linearità (funzionamento fotoconduttivo, 3° quadrante della caratteristica)
- Non si polarizza il fotodiodo quando è richiesta un'alta sensibilità, ovvero basso rumore (funzionamento fotovoltaico, 4° quadrante della caratteristica)

Nota:

Le celle solari lavorano in modo fotovoltaico (celle fotovoltaiche)

"Efficienza quantica" (η) di un fotodiodo

Rapporto fra il numero di coppie elettrone-lacuna generate e utili (nel senso che contribuiscono alla corrente del fotodiodo e non si ricombinano) e il numero di fotoni incidenti



"Responsivity" (R) di un fotodiodo

Rapporto fra la corrente elettrica prodotta e la potenza ottica incidente

$$R = \text{Ampere} / \text{Watt}$$

$$R = \text{funz}(\eta)$$

Fotodiodi High Speed

(per segnali veloci)



High Speed InGaAs PIN Photodiodes
diameter of active area=60 μm

DESCRIPTION

Very high speed, low capacitance, low dark current photodiode for very high bit rate receiver applications. The photosensitive area is 60 microns in diameter. Back-illuminated planar-passivated device structure.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T=25°C)

PARAMETER	RATING	UNITS
Storage Temperature	-40 to +100	°C
Operating Temperature	-40 to +85	°C
Forward Current	5	mA
Reverse Current	0.5	mA
Reverse Voltage	30	V

OPTICAL AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T=25°C)

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Responsivity	R	$\lambda = 1300 \text{ nm}$	0.80	0.85	-	A/W
		$\lambda = 1550 \text{ nm}$	0.85	0.90	-	
Dark Current	I_d	$V_R = 5V$	-	2	5	nA
Rise/Fall Time	t_R/t_F	$V_R = 5V$	-	100	200	ps
Capacitance	C	$V_R = 5V$	-	0.2	0.3	pF

PACKAGE OPTIONS

PART NUMBER	PACKAGE DESCRIPTION
FD60S4	type S4 alumina ceramic submount
FD60S6	type S6 alumina ceramic submount



High Speed InGaAs PIN Photodiodes
diameter of active area=100 μm

DESCRIPTION

High-speed, low dark current, low capacitance photodiode for high speed communication systems, LANs, and FDDI applications. The photosensitive area is 100 microns in diameter. Planar-passivated device structure.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T=25°C)

PARAMETER	RATING	UNITS
Storage Temperature	-40 to +100	°C
Operating Temperature	-40 to +85	°C
Forward Current	5	mA
Reverse Current	0.5	mA
Reverse Voltage	30	V

OPTICAL AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T=25°C)

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Responsivity	R	$\lambda = 1300 \text{ nm}$	0.80	0.90	-	A/W
		$\lambda = 1550 \text{ nm}$	0.85	0.95	-	
Dark Current	I_d	$V_R = 5V$	-	0.5	3	nA
Rise/Fall Time	t_R/t_F	$V_R = 5V$	-	0.3	0.7	ns
Capacitance	C	$V_R = 5V$	-	1.1	1.5	pF

• $t_R/t_F < 0.4 \text{ ns}$ for diodes mounted on ceramic submounts

• $C < 1.2 \text{ pF}$ for diodes mounted on ceramic submounts

PACKAGE OPTIONS

PART NUMBER	PACKAGE DESCRIPTION
FD100W	TO-18 with AR-coated flat window cap
FD100L	TO-18 with lens cap
FD100S2	type S2 alumina ceramic submount
FD100S3	type S3 alumina ceramic submount
FD100FC	TO-style diode installed in FC-connector receptacle
FD100SC	TO-style diode installed in SC-connector receptacle
FD100ST	TO-style diode installed in ST-connector receptacle
FD100F(core/cladding)	TO-style diode with integral fiber pigtail (specify fiber core/cladding)

Fotodiodi a larga area



Large Area InGaAs PIN Photodiodes
diameter of active area=1 mm

DESCRIPTION

Large area, high sensitivity photodiode for use in infrared instrumentation and sensing applications. High spectral response in the region 800 nm to 1700 nm. The photosensitive area is 1 mm in diameter. Planar-passivated device structure.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T=25°C)

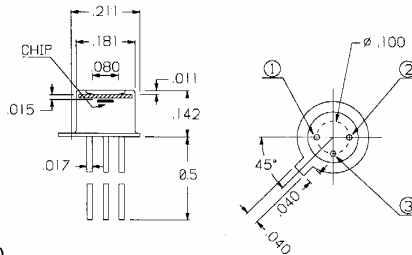
PARAMETER	RATING	UNITS
Storage Temperature	-40 to +100	°C
Operating Temperature	-40 to +85	°C
Forward Current	100	mA
Reverse Current	20	mA
Reverse Voltage	2	V

OPTICAL AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T=25°C)

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Responsivity	R	$\lambda = 850 \text{ nm}$	0.10	0.20	-	A/W
		$\lambda = 1300 \text{ nm}$	0.80	0.90	-	
		$\lambda = 1550 \text{ nm}$	0.85	0.95	-	
Shunt Resistance ^①	R_s	$V_R = 0V$	2	20	-	M Ω
Capacitance	C	$V_R = 0V$	-	80	150	pF

① Very High Shunt Resistance devices are available upon request.

DIMENSIONAL OUTLINE



(dimensions in inches)

1	ANODE
2	CATHODE
3	CASE



Large Area InGaAs PIN Photodiodes
diameter of active area=3 mm

DESCRIPTION

Large area, high sensitivity photodiode for use in infrared instrumentation and sensing applications. High spectral response in the region 800 nm to 1700 nm. The photosensitive area is 3 mm in diameter. Planar-passivated device structure.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T=25°C)

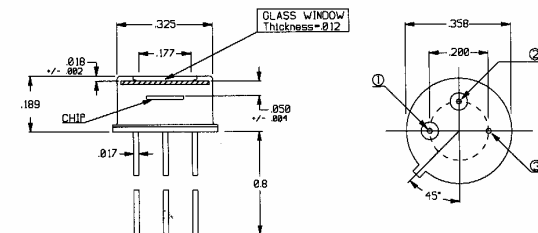
PARAMETER	RATING	UNITS
Storage Temperature	-40 to +100	°C
Operating Temperature	-40 to +85	°C
Forward Current	50	mA
Reverse Current	10	mA
Reverse Voltage	2	V

OPTICAL AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T=25°C)

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Responsivity	R	$\lambda = 1300 \text{ nm}$	0.80	0.90	-	A/W
		$\lambda = 1550 \text{ nm}$	0.90	0.95	-	
Shunt Resistance ^①	R_s	$V_R = 0V$	1000	2000	-	K Ω
Capacitance	C	$V_R = 0V$	-	750	1800	pF

① Very High Shunt Resistance devices are available upon request.

DIMENSIONAL OUTLINE



(dimensions in inches)

1	ANODE
2	CATHODE
3	CASE

Celle solari (celle fotovoltaiche)

Convertono l'energia della radiazione solare incidente in energia elettrica.

Sono sostanzialmente **fotodiodi fatti lavorare nel 4° quadrante** della caratteristica V/I dove si ha $V > 0$ e $I < 0$ (ciò indica che il dispositivo eroga potenza elettrica).

La giunzione p-n è composta da una regione "n" molto sottile (e molto drogata) attraverso la quale la radiazione penetra provocando la creazione di coppie elettrone-lacuna.

Le coppie generate nella regione di svuotamento W , vengono separate dal campo elettrico presente in essa e danno luogo alla corrente I_{ph} .

Le coppie generate in prossimità della regione di svuotamento (dove il campo elettrico è assente) hanno due possibilità: a) ricombinarsi, b) raggiungere per diffusione la zona di svuotamento W e contribuire anch'esse alla corrente.

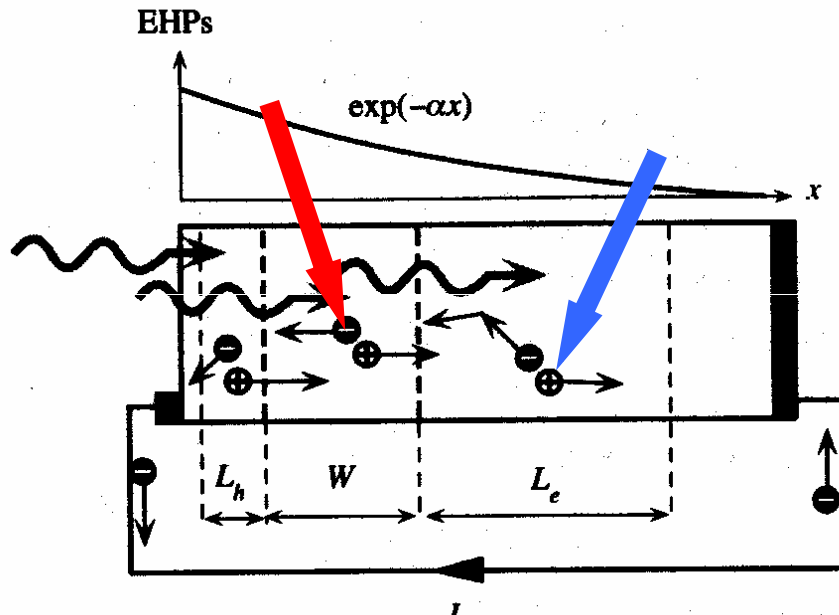


FIGURE 6.5 Photogenerated carriers within the volume $L_h + W + L_e$ give rise to a photocurrent I_{ph} . The variation in the photogenerated EHP concentration with distance is also shown where α is the absorption coefficient at the wavelength of interest.

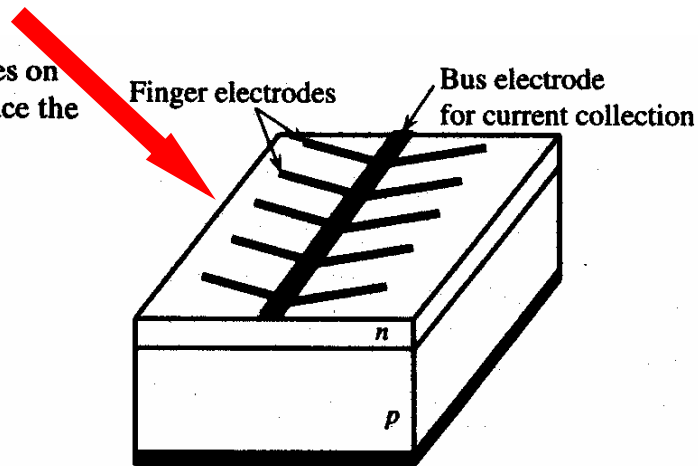
EHP = electron-hole pair

Celle solari (celle fotovoltaiche)

Gli elettrodi depositati sulla zona "n" devono permettere la penetrazione dell'illuminazione e, allo stesso tempo, dare luogo ad una resistenza serie bassa.

Per questo sono depositati in modo da formare un array (**finger electrodes**).

FIGURE 6.4 Finger electrodes on the surface of a solar cell reduce the series resistance.



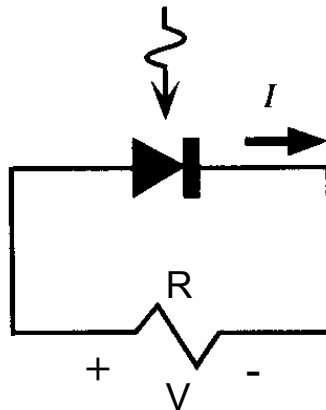
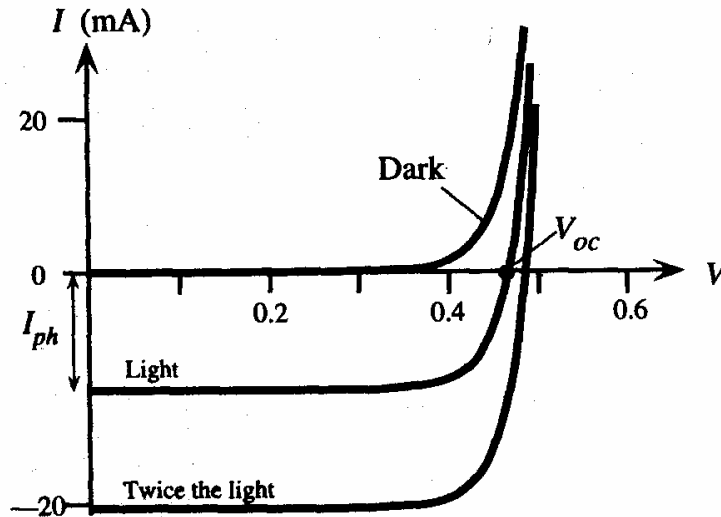
La superficie è provvista di un sottile rivestimento antiriflesso.

Celle solari

Caratteristica V-I di una cella solare

(4° quadrante della curva V-I di un fotodiodo)

FIGURE 6.7 Typical I - V characteristics of a Si solar cell. The short circuit current is I_{ph} and the open circuit voltage is V_{oc} . The I - V curves for positive current requires an external bias voltage. Photovoltaic operation is always in the negative current region.

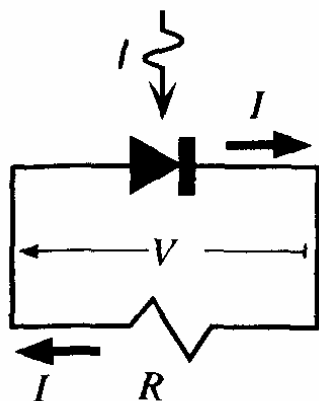


corrente sul carico:

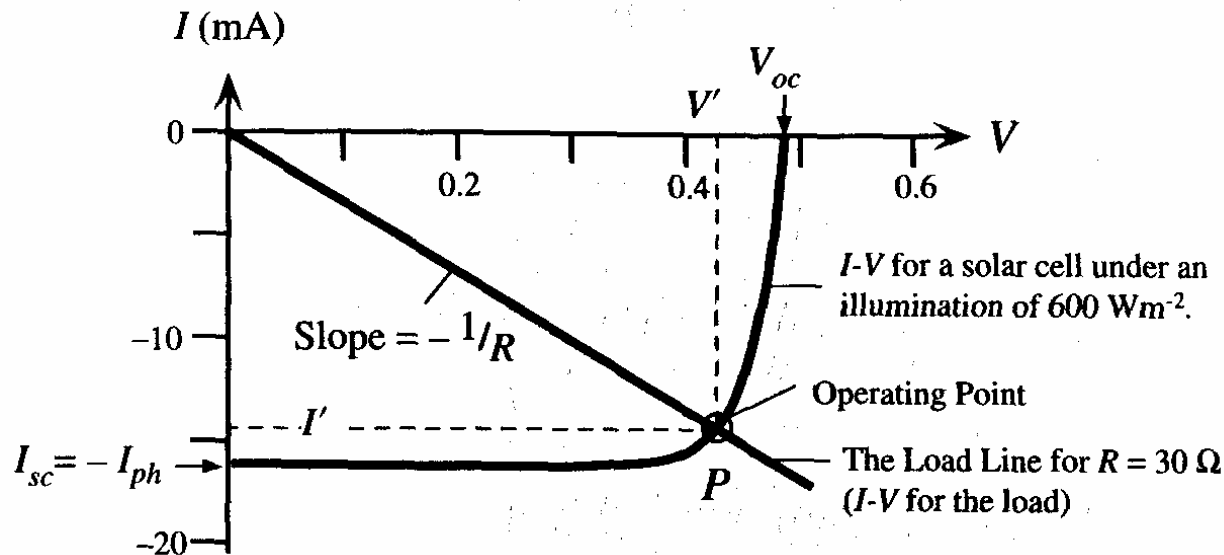
$$I = - (V/R)$$

Celle solari

Collegando la cella solare ad un carico R , si può determinare graficamente il punto di lavoro dall'intersezione fra la curva V - I della cella solare e la curva V - I del carico [che è una retta con pendenza $-(1/R)$; infatti $I = -(V/R)$]



(a)



(b)

FIGURE 6.8 (a) When a solar cell drives a load R , R has the same voltage as the solar cell but the current through it is in the opposite direction to the convention that current flows from high to low potential. (b) The current I' and voltage V' in the circuit of (a) can be found from a load line construction. Point P is the operating point (I', V') . The load line is for $R = 30 \Omega$.

Potenza dissipata sul carico (area del rettangolo $V' I'$)

$$P_{\text{out}} = V' I'$$

sul carico viene dissipata la max. potenza quando l'area del rettangolo è massimizzata

Efficienza di una cella solare

Efficienza della cella solare (nel circuito considerato)

$$\eta = (P_{\text{out}} / P_{\text{in}}) 100$$

P_{out} = Potenza dissipata sul carico

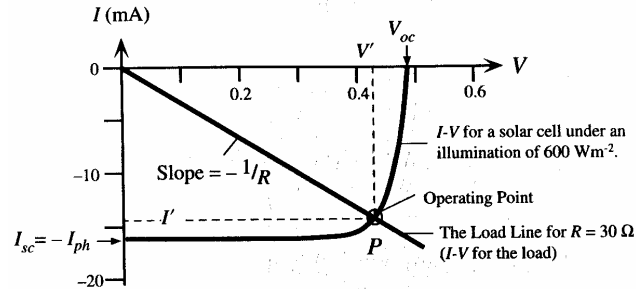
$$P_{\text{out}} = V' I'$$

P_{in} = Potenza incidente sulla cella solare

$$P_{\text{in}} = (\text{intensità luminosa}) \times (\text{superficie della cella})$$

EXAMPLE 6.3.1 A solar cell driving a resistive load

Consider a solar cell driving a $30\ \Omega$ resistive load as in Figure 6.8 (a). Suppose that the cell has an area of $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ and is illuminated with light of intensity 600 W m^{-2} and has the I - V characteristics in Figure 6.8 (b). What are the current and voltage in the circuit? What is the power delivered to the load? What is the efficiency of the solar cell in this circuit?



Solution The I - V characteristic of the load is the load line described by Eq. (3),

$$I = -\frac{V}{30\ \Omega}$$

The line is drawn in Figure 6.8 (b) with a slope $1/(30\ \Omega)$. It cuts the I - V characteristics of the solar cell at $I' = 14.2\text{ mA}$ and $V' = 0.425\text{ V}$ which are the current and voltage in the photovoltaic circuit of Figure 6.8 (a). The power delivered to the load is

$$P_{out} = I'V' = (14.2 \times 10^{-3})(0.425\text{ V}) = 0.006035\text{ W, or } 6.035\text{ mW.}$$

This is *not* necessarily the maximum power available from the solar cell. The input sun-light power is

$$P_{in} = (\text{Light Intensity})(\text{Surface Area}) = (600\text{ W m}^{-2})(0.01\text{ m})^2 = 0.060\text{ W}$$

The efficiency is

$$\eta = 100 \frac{P_{out}}{P_{in}} = 100 \frac{0.006035}{0.060} = 10.06\%$$

This will increase if the load is adjusted to extract the maximum power from the solar cell but the increase will be small as the rectangular area $I'V'$ in Figure 6.8 (b) is already close to the maximum.