



# Solid State Physics

## Chapter 6: p-n Junctions Diodes

### Lecturers:

- Dr. M. A. Mansouri Birjandi
- Hossein Teymoori

Dept. of Electrical and Computer Engineering  
University of Sistan and Baluchestan (USB)

[h.teymoori@pgs.usb.ac.ir](mailto:h.teymoori@pgs.usb.ac.ir)  
[hn.teymoori@gmail.com](mailto:hn.teymoori@gmail.com)

May, 2018

1397

# فيزيك الکترونيک

مرجع:

فيزيك الکترونيک

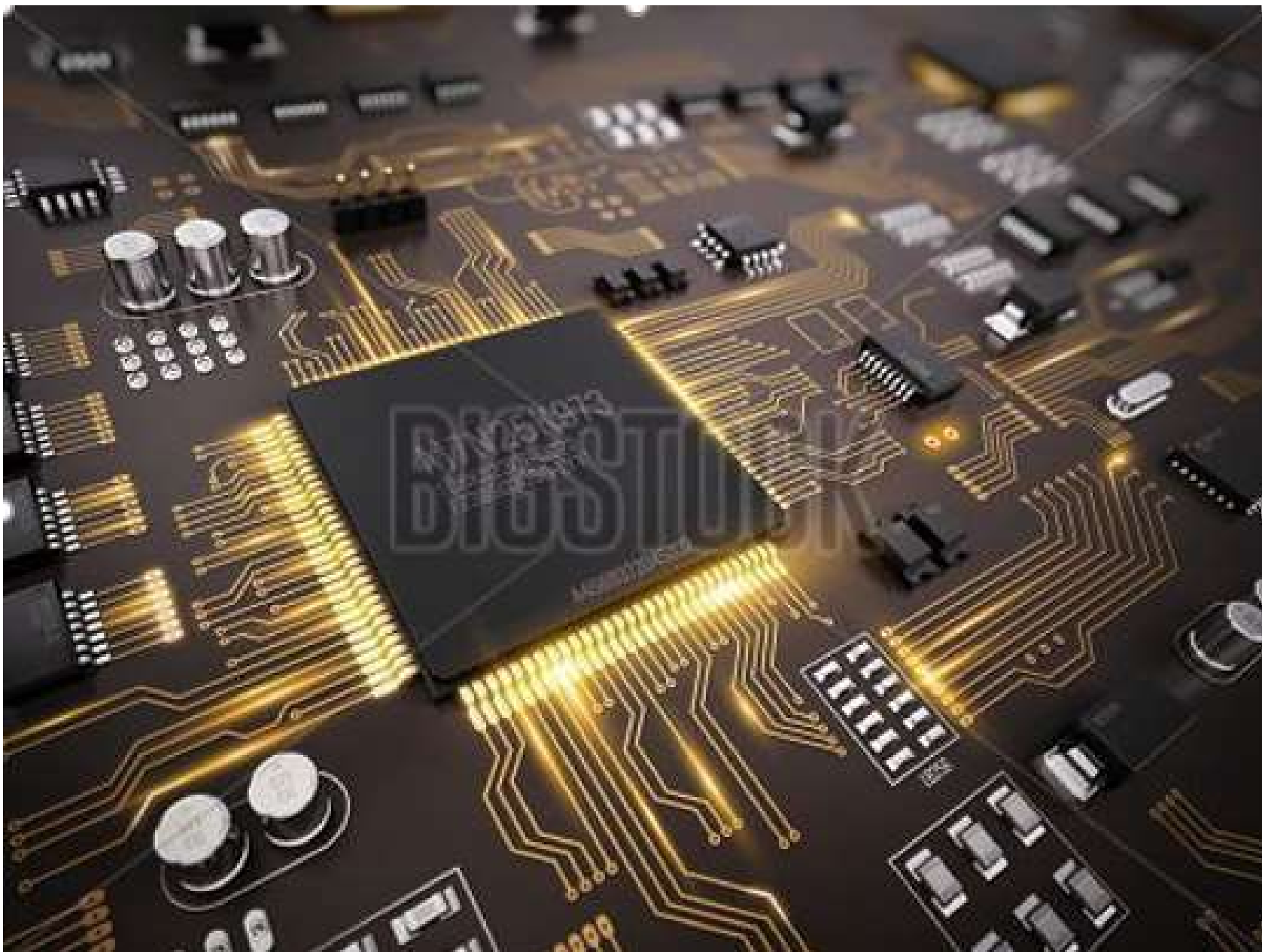
**Ben G. Streetman**

ترجمه: دکتر غلامحسن روئين تن

و مهندس سعيد صمدی

# فصل ۶

## دیودهای پیوندی p-n



# هدف:

- بررسی برخی از قطعات مهم الکترونیکی دارای ساختار تک پیوندی.
- بررسی کاربردهای اساسی ویژگیهای پیوند ، همچون یکسوسازی، ظرفیت متغیر، تونل زنی، نشر و کشف نور.

## رئوس مطالب

### ۶.۱ دیود پیوندی

۶.۱.۱ یکسوسازها

۶.۱.۲ دیودهای سوئیچ کننده

۶.۱.۳ دیود شکستی

۶.۱.۴ دیود با ظرفیت متغیر (ورکتور)

### ۶.۲ دیودهای تونلی

۶.۲.۱ نیمه رساناهای دیژنره (تبهگن)

۶.۲.۲ عملکرد دیود تونلی

۶.۲.۳ کاربردهای مداری

### ۶.۳ دیودهای نوری

۶.۳.۱ جریان و ولتاژ در یک پیوند نورتابیده

۶.۳.۲ باتریهای خورشیدی

## رئوس مطالب

۶.۳.۳ آشکارسازهای نوری

۶.۳.۴ نویز و پهنای باند آشکارسازهای نوری

۶.۴ دیودهای نورافشان و لیزرها

۶.۴.۱ مواد نور افشان

۶.۴.۲ مخابرات تار نوری

۶.۴.۵ پیوندهای ناهمگون چند لایه برای LEDها

## مقدمه:

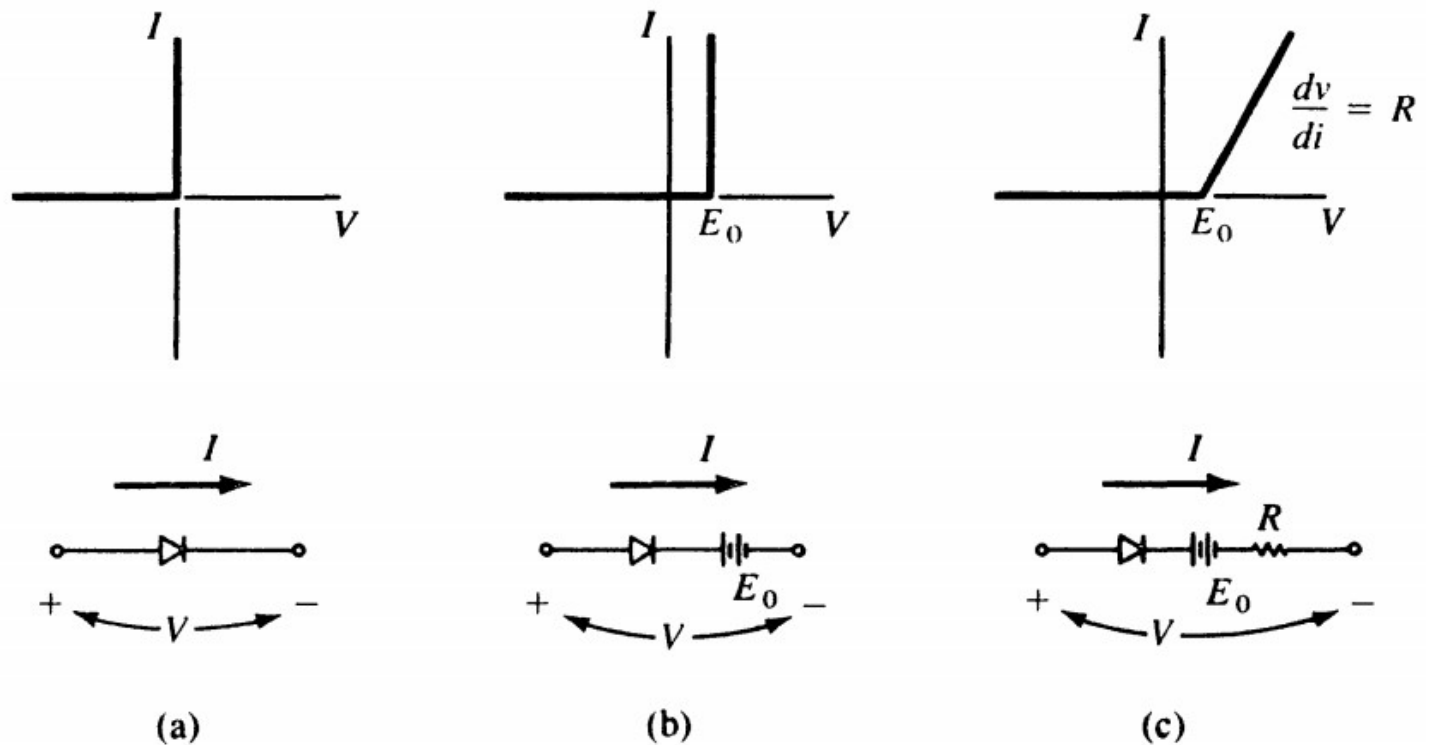
در این فصل علاوه بر کاربردهای متداول دیود همچون یکسوسازی و سوئیچینگ، قطعاتی که به ویژگیهای ثانویه پیوند وابسته اند، مورد بررسی قرار می گیرند.

### ۶.۱.۱ یکسوسازها (Rectifiers)

- طبیعت یکطرفه پیوند p-n (Unilateral)
- دیود ایده آل
- دیود در گرایش مستقیم و معکوس
- معادل های تکه ای - خطی Piecewise – linear equivalents
- ولتاژ سینوسی یکسو شده نیم موج



**Figure 6-1**  
 Piecewise-linear approximations of junction diode characteristics:  
 (a) the ideal diode;  
 (b) ideal diode with an offset voltage;  
 (c) ideal diode with an offset voltage and a resistance to account for slope in the forward characteristic.



## ۶.۱.۱ یکسوسازها (Rectifiers)

در طراحی دیود بعنوان یکسوساز باید مشخصه  $I-V$  تا حد ممکن به دیود ایده آل نزدیک باشد. یعنی:

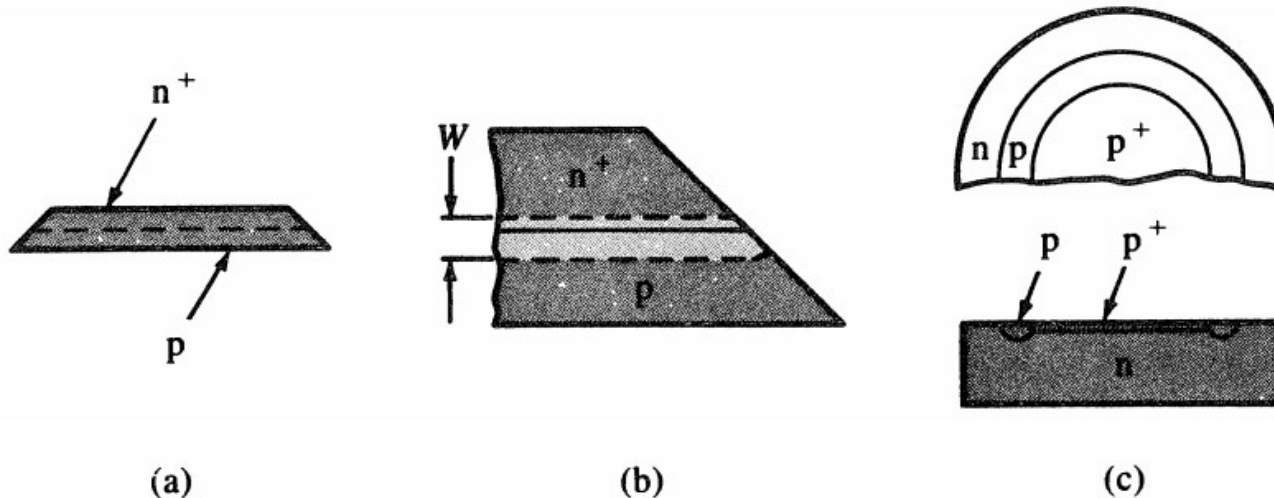
- جریان معکوس ناچیز داشته باشد.
  - جریان مستقیم وابستگی کمی به ولتاژ داشته باشد (مقاومت مستقیم  $R$  کوچک باشد).
  - ولتاژ آفست  $E_0$  اندک باشد.
  - ولتاژ شکست معکوس بزرگ باشد.
- اما همه این شرایط را نمی توان در یک قطعه تامین کرد، بنابراین باید مصالحه ای برقرار شود که بهترین دیود برای کاربرد مورد نظر طراحی شود.

از نظریه بدست آمده در فصل ۵ شرایط مورد نیاز برای پیوندهای یکسوساز به شرح زیر است:

- مقدار  $n_i$  در مواد با  $E_g$  بزرگ کم است پس جریان اشباع معکوس کم خواهد بود، همچنین ولتاژ شکست بالایی دارند ولی این مواد  $E_0$  بزرگی دارند. بعنوان مثال  $E_g$  در  $Si$  بزرگتر از  $Ge$  است.
- تراکم ناخالصی بر ولتاژ شکست بهمنی، پتانسیل اتصال و مقاومت سری دیود اثر می گذارد. طرف با ناخالصی کمتر تعیین کننده بسیاری از ویژگیهای پیوند است.
- برای بالا بردن ولتاژ شکست، نیاز با ناحیه با مقاومت زیاد است که خود باعث می شود مسائل آثار گرمایی افزایش یابد. برای کاهش مقاومت باید سطح آن بزرگ و طول آن کم باشد. که از لحاظ عملی با محدودیتهای تهیه مواد اولیه یکنواخت و پرداخت پیوند در سطوح بزرگ مواجه است. وجود نقصهای موضعی در یکنواختی پیوند منجر به شکست معکوس زودرس در ناحیه کوچکی از قطعه می شود.
- کوتاه کردن طول ناحیه با ناخالصی کم، اثر رخنه را بوجود می آورد، یعنی در بایاس معکوس ناحیه تهی تمام طول ناحیه با ناخالصی کم را فرا میگیرد و منجر به شکست در مقادیر کمتر از  $V_{br}$  می شود.

# ۶.۱.۱ یکسوسازها (Rectifiers)

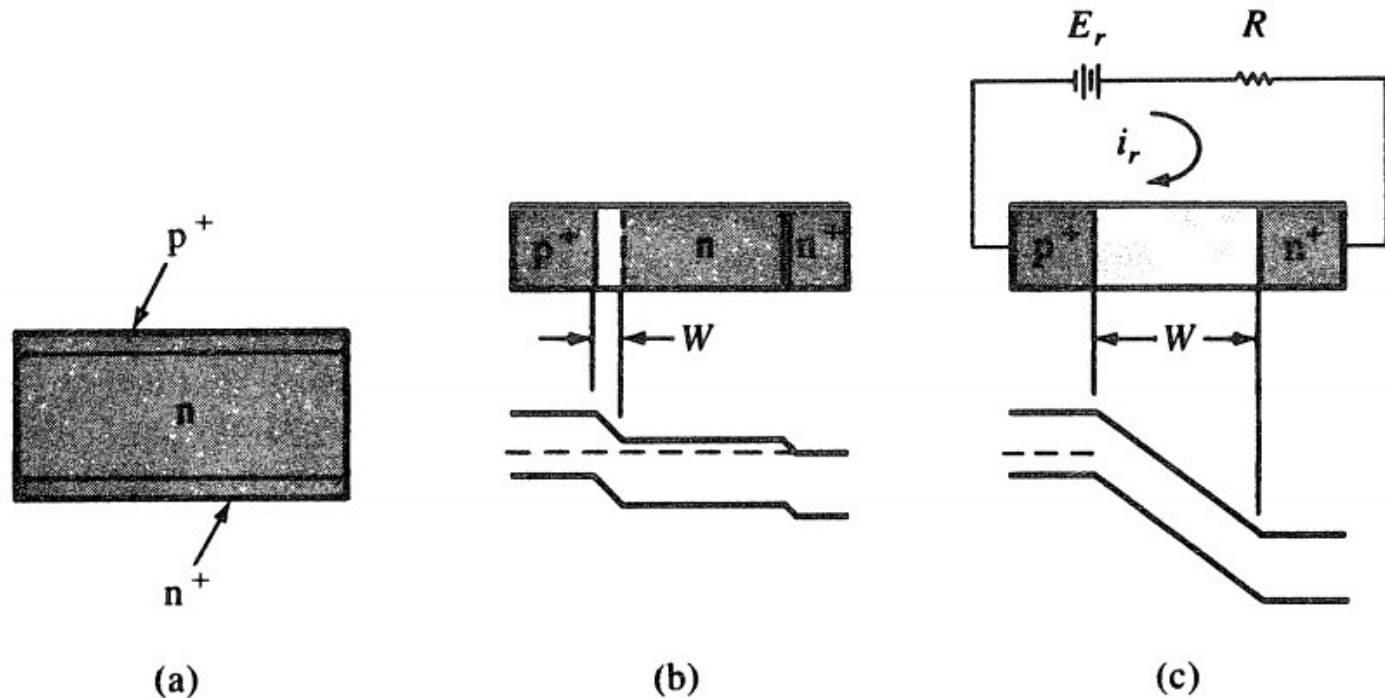
- در طراحی قطعات با ولتاژ شکست بزرگ باید تدابیر خاصی برای جلوگیری از شکست زودرس اندیشید. این اثر را می توان با پخ زدن لبه یا نفوذ یک حلقه محافظ بمنظور جداسازی پیوند لبه های نمونه، کاهش داد.



**Figure 6-2** Beveled edge and guard ring to prevent edge breakdown under reverse bias: (a) diode with beveled edge; (b) closeup view of edge, showing reduction of depletion region near the bevel; (c) guard ring.

پیوند  $n^+ - p$  یا  $p^+ - n$

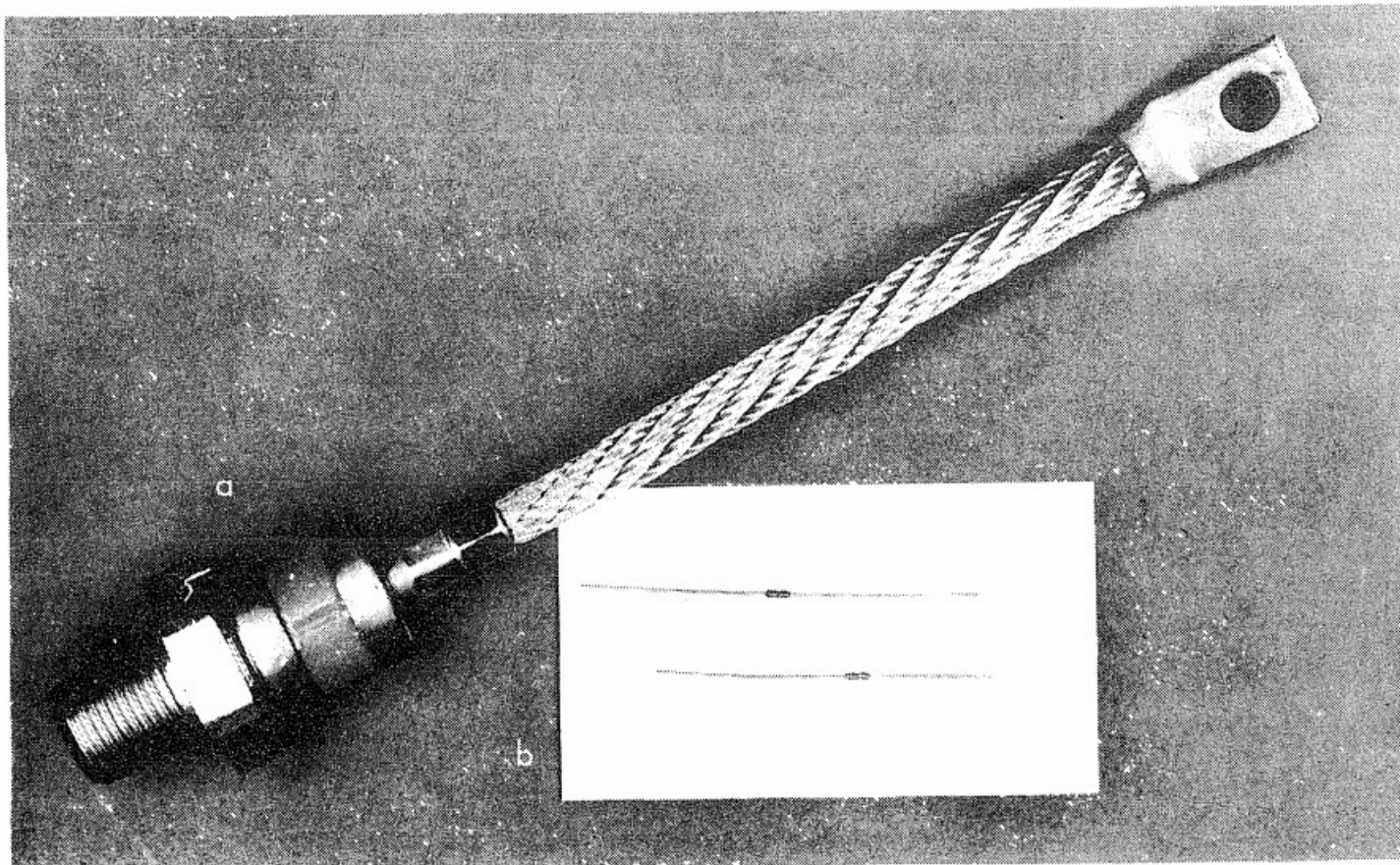
**Figure 6-3**  
A  $p^+ - n - n^+$  junction diode: (a) device configuration; (b) zero-bias condition; (c) reverse-biased to punch-through.





## ۶.۱.۱ یکسوسازها (Rectifiers)

بسته بندی یک پیوند یکسوساز



**Figure 6-4**  
Rectifier  
mountings:  
(a) power rectifier;  
(b) low-current  
diodes. The power  
rectifier is rated at  
250 A, with 2800 V  
maximum reverse  
voltage; the small  
diodes are rated at  
less than 1 A, with  
several hundred  
volts reverse-bias  
breakdown.  
(Photograph  
courtesy of Delco  
Electronics Corp.)

## ۶.۱.۲ دیودهای سوئیچ کننده Switching Diodes

برای سوئیچینگ سریع یک دیود باید به خواص کنترل بار آن توجه خاصی داشت. از مطالب فصل ۵ برای کلید زنی سریع باید یا بار خیلی کم را در نواحی خنثی برای جریانهای پایدار مستقیم ذخیره کرد یا طول عمر باربرهای آن خیلی کم باشد و یا هر دو خاصیت.

روش مرسوم برای بهبود سرعت کلیدزنی، افزودن مراکز مناسب بازترکیب به آن است. برای دیودهای Si ناخالصی Au مناسب است. طول عمر باربرها تقریباً با عکس تراکم مراکز بازترکیب تغییر می کند. بعنوان مثال افزودن  $10^{14}$  اتم طلا در هر سانتی متر مکعب به یک دیود  $p^+ - n$  نوع Si، می تواند  $\tau_p$  را از  $1\mu s$  به  $0.1\mu s$  و زمان بازیابی معکوس را از  $0.1\mu s$  به  $0.01\mu s$  کاهش دهد. و افزودن  $10^{15}$  اتم طلا این مقادیر را به ترتیب به  $0.01\mu s$  و  $1 ns$  کاهش خواهد داد.

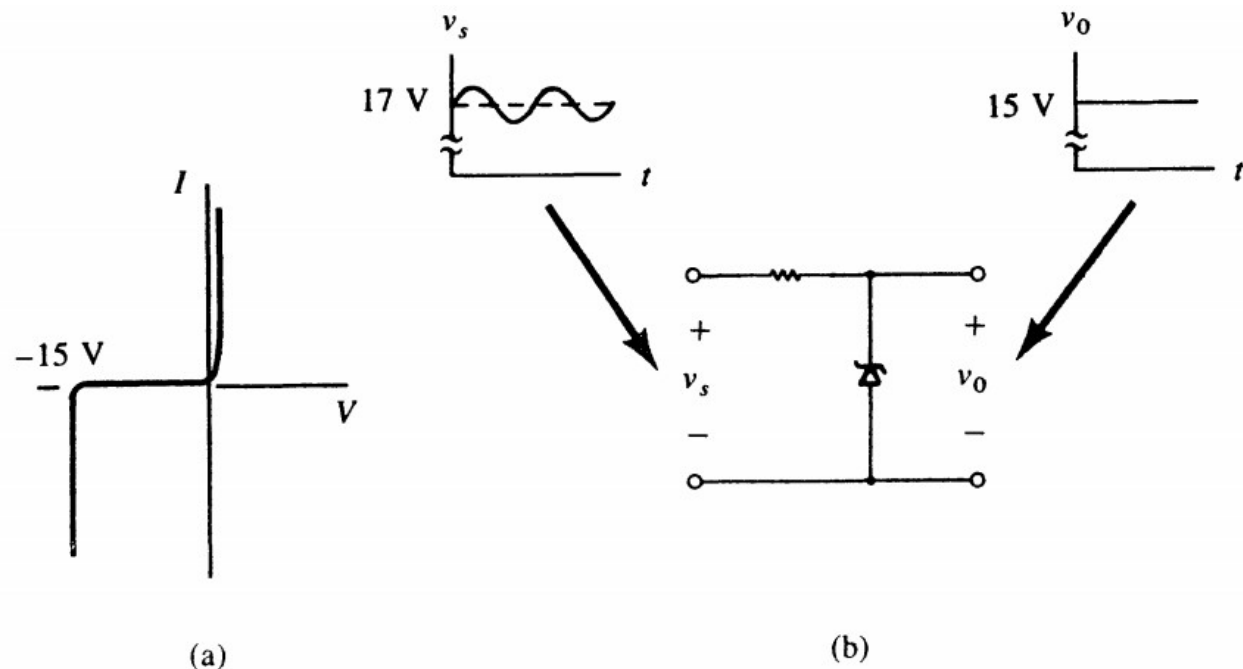
رویکرد دیگر برای بهبود زمان سوئیچینگ اینستکه ناحیه خنثی با ناخالصی سبک از یک طول نفوذ برابر اقلیت کوتاهتر باشد. در این حالت بار ذخیره شده در رسانش مستقیم بسیار کم خواهد بود. (دیود بیس باریک Narrow Base Diode)

## ۶.۱.۳ دیود شکستی Breakdown Diode

طبق بحث‌های قبلی، ولتاژ شکست گرایش معکوس یک پیوند را می‌توان با انتخاب تراکم ناخالصی پیوند تغییر داد.

شکست در پیوندهای تیز با ناخالصی شدید از نوع اثر زنری (تونل زنی) است. ولی شکست متداولتر به صورت بهمنی صورت می‌گیرد که شکست متداول در پیوندهای با ناخالصی کمتر یا شیبدار است. با تغییر میزان ناخالصی میتوان دیودهایی با ولتاژ شکست از یک ولت تا چند صد ولت ساخت. دیودهای شکستی، دیود زنر نیز نامیده می‌شوند، صرفنظر از اینکه معمولاً شکست بهمنی است. دیودهای شکستی بعنوان تنظیم کننده ولتاژ در مدارهای با ورودی متغیر بکار می‌روند.

**Figure 6-5**  
A breakdown diode: (a)  $I$ - $V$  characteristic; (b) application as a voltage regulator.



## ۶.۱.۴ دیود با ظرفیت متغیر (ورکتور) Variable Reactor

ورکتور یک پیوند p-n است که در گرایش معکوس، ظرفیت خازن محل پیوندش با ولتاژ معکوس تغییر می کند. بعنوان یک کاربرد، مجموعه ای از ورکتورها را می توان در طبقه تنظیم یک گیرنده رادیویی، بجای خازن حجیم واریابل، بکار برد. از کاربردهای دیگر ورکتور می توان به استفاده از آن در تولید هارمونی ها، ضرب فرکانسهای میکروویو و فیلترهای فعال اشاره کرد.

$$C_j \propto V_r^{-1/2}$$

در پیوند تیز:

$$C_j \propto V_r^{-n} \quad \text{for } V_r \gg V_0$$

در یک پیوند شیبدار:

برای شیبدار خطی:  $n=1/3$

برای افزایش حساسیت ظرفیت به ولتاژ معکوس، دیودهای ورکتور غالباً با روش آلیاژی یا رشد رونشستی و یا کاشت یونی ساخته می شوند تا پیوندهای تیزی بوجود آید که دارای  $n$  بزرگتر از  $1/2$  باشند. (پیوندهای فوق تیز (Hyperabrupt junctions)



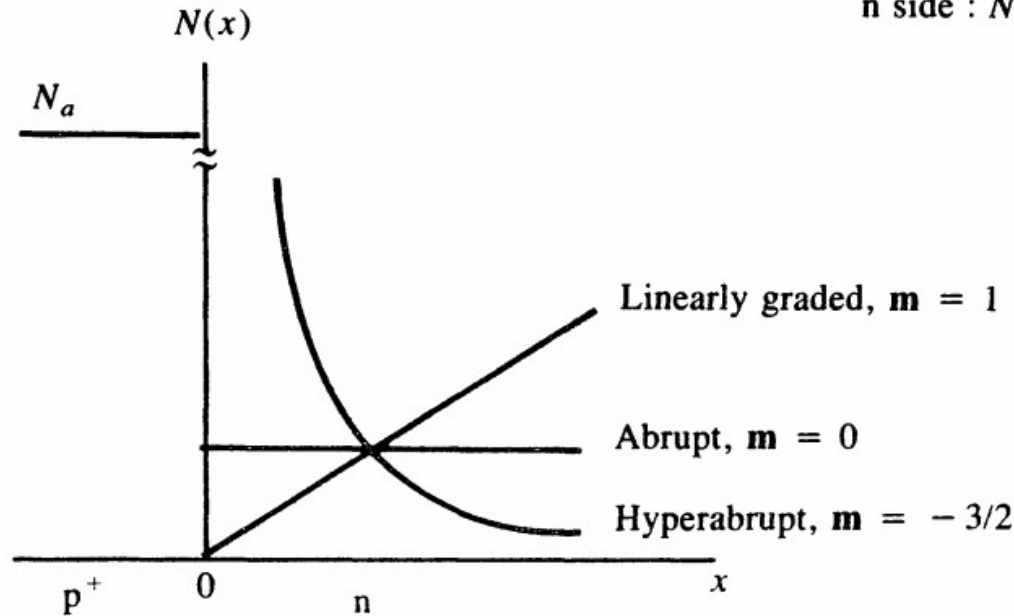
# ۶.۱.۴ دیود با ظرفیت متغیر (ورکتور) Variable Reactor

## Doping profiles

$$\begin{aligned} p^+ \text{ side} : N &= N_a \\ n \text{ side} : N &= G x^m \end{aligned}$$

## Figure 6-6

Graded junction profiles: linearly graded, abrupt, hyperabrupt.



$$n = \frac{1}{m + 2}$$

برای  $m=0, 1, -3/2$  به ترتیب  $2, 1/3, 1/2$  است. بویژه در حالت پیوند فوق تیز،  $m=-3/2$ ،  $n=2$  است و ظرفیت متناسب با  $v_r^{-2}$  است. اگر این خازن با سلف  $L$  موازی شود، فرکانس تشدید با ولتاژ ورودی بصورت خطی تغییر می کند.

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \propto \frac{1}{\sqrt{V_r^{-n}}} \propto V_r \quad \text{for } n = 2$$

## ۶.۲ دیودهای تونلی Tunnel Diodes

در دیود تونلی در نواحی معینی از مشخصه  $I-V$  الکترونها از درون سد پتانسیل پیوند، تونل زنی می کنند. ویژگی مهمی این قطعه، وجود یک ناحیه با مقاومت منفی در منحنی مشخصه  $I-V$  آن است. این قطعه در کاربردهای زیادی از جمله کلیدزنی خیلی سریع و مدارات منطقی بکار می رود.

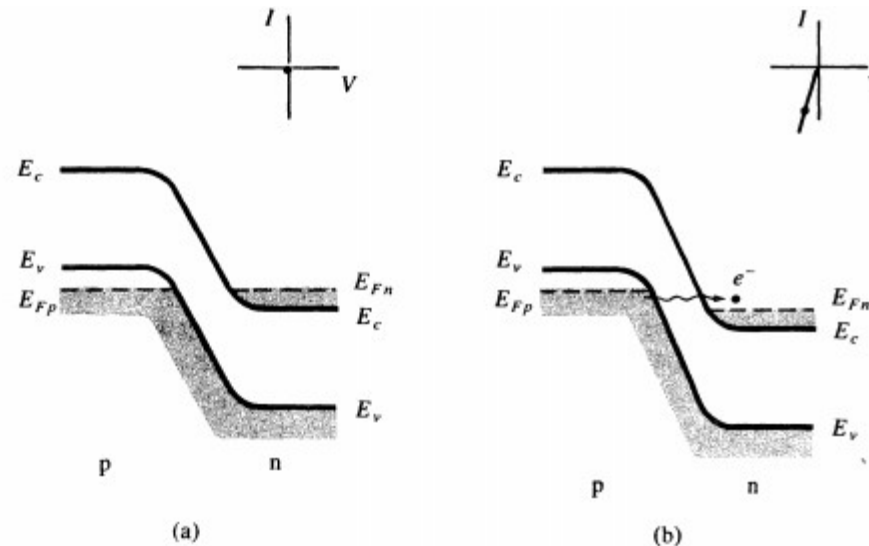
### نیمه رسانای تبهگن (دیژنره) Degenerate :

تا بحال نیمه هادیهایی را بررسی کردیم که تعداد ناخالصی در آنها کسر کوچکی از چگالی اتمی کل بوده و اتمهای ناخالصی بطور گسترده در سراسر نمونه پخش شده اند و بنابراین مطمئن هستیم که هیچگونه انتقال باری در خود ترازهای گیرنده یا دهنده رخ نمی دهد.

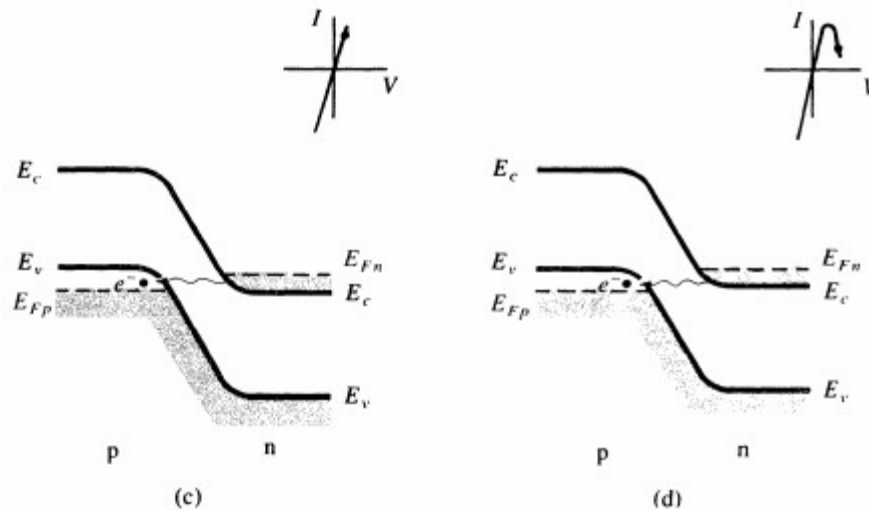
اگر در یک نیمه هادی تعداد ناخالصی افزوده شده آنقدر زیاد باشد که ناخالصی ها بهم نزدیک باشند و نتوان برهم کنش بین آنها را نادیده گرفت، در این صورت در ناخالصی دهنده تراز فرمی درون شکاف نوار نبوده بلکه داخل نوار هدایت است. بطور مشابه در ناخالصی نوع  $p$  تراز فرمی درون نوار ظرفیت قرار می گیرد. این نوع ماده را تبهگن می نامند. بنابراین به ترتیب در نیمه هادی نوع  $n$  ناحیه بین  $E_C$  و  $E_f$  توسط الکترونها پر شده و در نیمه هادی نوع  $p$  ناحیه بین  $E_v$  و  $E_f$  تقریباً توسط حفره ها پر شده است.

# ۶.۲ دیودهای تونلی Tunnel Diodes

عملکرد دیود تونلی:

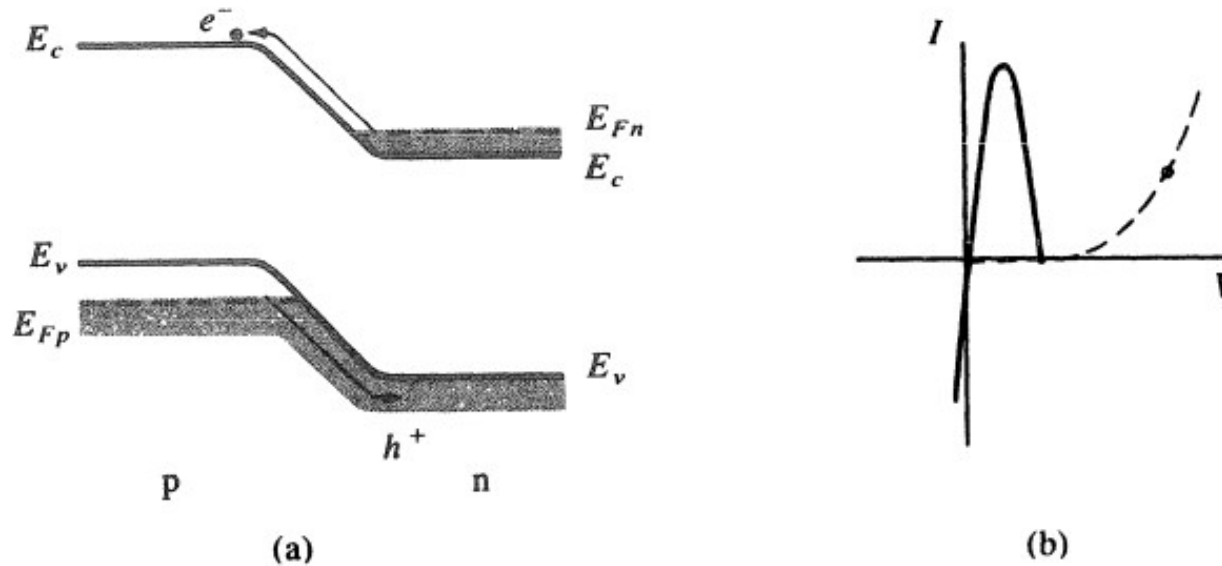


**Figure 6-7**  
Tunnel diode band diagrams and  $I$ - $V$  characteristics for various biasing conditions: (a) equilibrium (zero bias) condition, no net tunneling; (b) small reverse bias, electron tunneling from p to n; (c) small forward bias, electron tunneling from n to p; (d) increased forward bias, electron tunneling from n to p decreases as bands pass by each other.



# ۶.۲ دیودهای تونلی Tunnel Diodes

اثر افزایش ولتاژ بایاس مستقیم:



Band diagram (a) and  $I$ - $V$  characteristic (b) for the tunnel diode beyond the tunnel current region. In (b) the tunneling component of current is shown by the solid curve and the diffusion current component is dashed.

Figure 6-8

## ۶.۲ دیودهای تونلی Tunnel Diodes

منحنی مشخصه کامل:

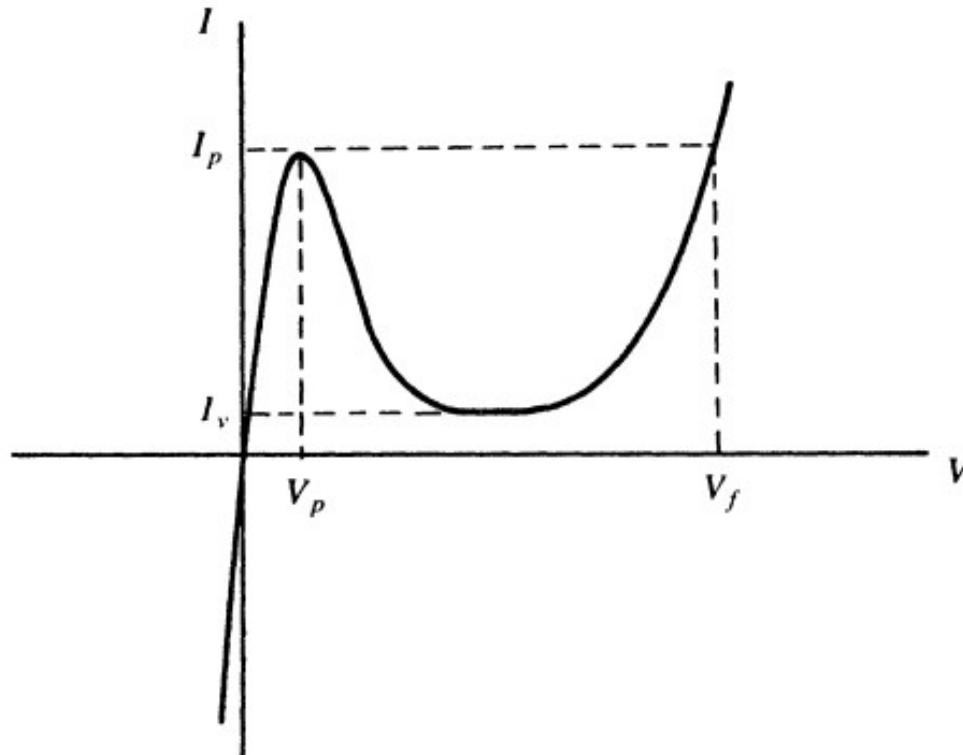


Figure 6-9  
Total tunnel diode  
characteristic.

از آنجا که فرآیند تونل زنی تاخیر زمانی رانش و نفوذ را ندارد، دیود تونلی برای کلید زنی سریع مناسب است. همچنین بخاطر وجود ناحیه با مقاومت منفی در منحنی مشخصه آن، در مدارات نوسانساز و تقویت کننده و... کاربرد دارد.

دیودهای نوری قطعات دو پایانه ای هستند که برای پاسخ به جذب فوتون طراحی می شوند. سرعت پاسخ و حساسیت دو پارامتر مهم در این دیودها محسوب می شوند.

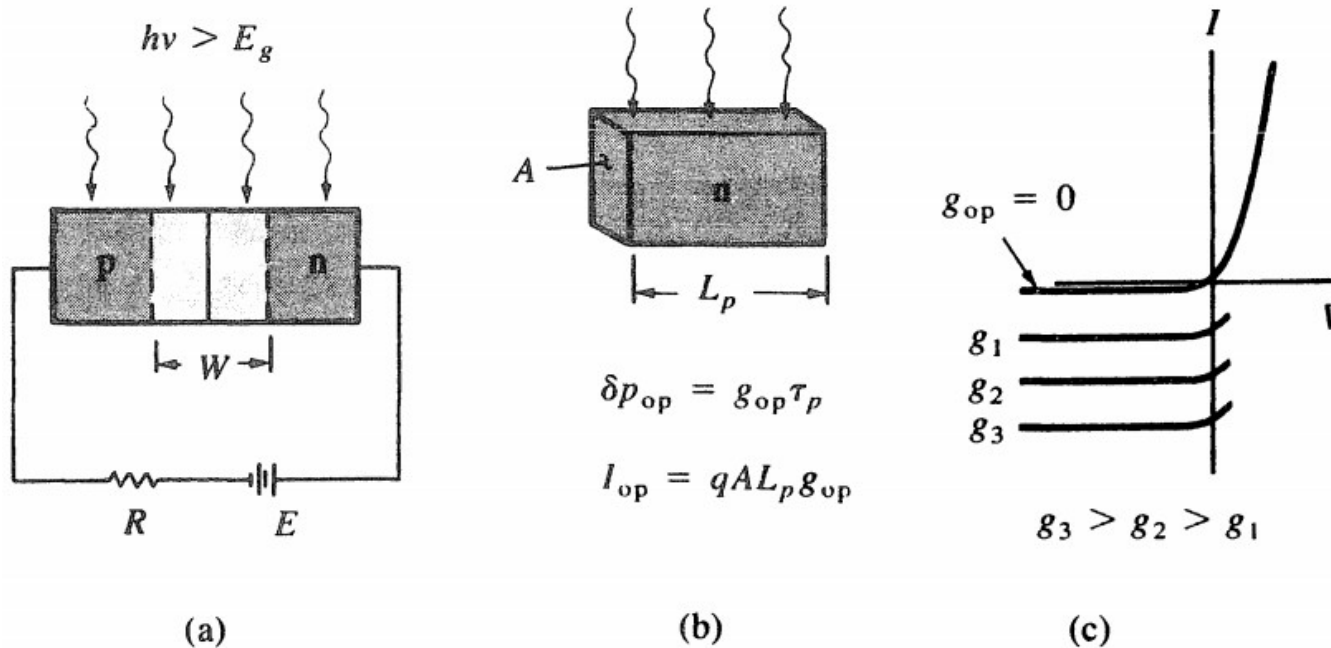
### ۶.۳.۱ ولتاژ و جریان در یک پیوند نورتابیده:

اگر پیوند بطور یکنواخت توسط فوتونهای با  $h\nu > E_g$  تحت تابش قرار گیرد، یک نرخ تولید اضافی  $g_{op}$  در جریان مشارکت می کند. در این حالت تعداد حفره های تولید شده در هر ثانیه در یک طول نفوذ از ناحیه گذر در طرف  $n$  برابر  $AL_p g_{op}$  است. همچنین تعداد الکترونهای ایجاد شده در هر ثانیه در فاصله  $L_n$  از  $X_{p0}$  برابر  $AL_n g_{op}$  و در ناحیه تهی تعداد باربرهای تولید شده  $AW g_{op}$  خواهد بود.

جریان حاصل از جمع آوری این باربرها که با نور توسط پیوند تولید شده اند:

$$I_{op} = qAg_{op}(L_p + L_n + W)$$

البته در این معادله  $g_{op}$  در سراسر قطعه یکنواخت در نظر گرفته شده که در عمل اینچنین نیست.



**Figure 6-10**  
Optical generation of carriers in a p-n junction:  
(a) absorption of light by the device;  
(b) current  $I_{op}$  resulting from EHP generation within a diffusion length of the junction on the n side;  
(c)  $I$ - $V$  characteristics of an illuminated junction.

چون جریان در معادله قبل از  $n$  به  $p$  است، از جریان کلی  $p$  به  $n$  کم شده و معادله کلی این دیود با صرف نظر از باز ترکیب و تولید در ناحیه تهی بصورت زیر خواهد بود

$$I = I_{th} (e^{qV/kT} - 1) - I_{op}$$

$$I = qA \left( \frac{L_p}{\tau_p} p_n + \frac{L_n}{\tau_n} n_p \right) (e^{qV/kT} - 1) - qA g_{op} (L_p + L_n + W) \quad (6-4)$$

## ۶.۳ دیودهای نوری Photodiodes

بنابراین مشخصه I-V دیود متناسب با نرخ تولید پایین آورده می شود. اگر دیود اتصال کوتاه شود ( $V=0$ ) جمله اول در معادله فوق حذف میشود و بنابراین منحنی مشخصه محور I را در مقادیر منفی متناسب با  $g_{op}$  قطع می کند.

همچنین در حالت مدار باز ( $I=0$ ) ولتاژ  $V = V_{OC}$  است:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln [I_{op}/I_{th} + 1]$$

$$= \frac{kT}{q} \ln \left[ \frac{L_p + L_n + W}{(L_p/\tau_p)p_n + (L_n/\tau_n)n_p} \cdot g_{op} + 1 \right]$$

در حالت خاص پیوند متقارن،  $p_p = n_p$  و  $\tau_p = \tau_n$  و از آنجا که نرخ تولید گرمایی  $g_{th} = \frac{p_n}{\tau_n}$  داریم:

$$V_{oc} \approx \frac{kT}{q} \ln \frac{g_{op}}{g_{th}} \quad \text{for } g_{op} \gg g_{th}$$

البته این ولتاژ نمیتواند بصورت نامحدود با ازدیاد نرخ تولید افزایش یابد، زیرا با افزایش نرخ تولید طول عمر باربرها کاهش می یابد، بنابراین نرخ تولید گرمایی هم افزایش می یابد. حداکثر  $V_{OC}$  برابر ولتاژ حالت تعادل  $V_0$  است.

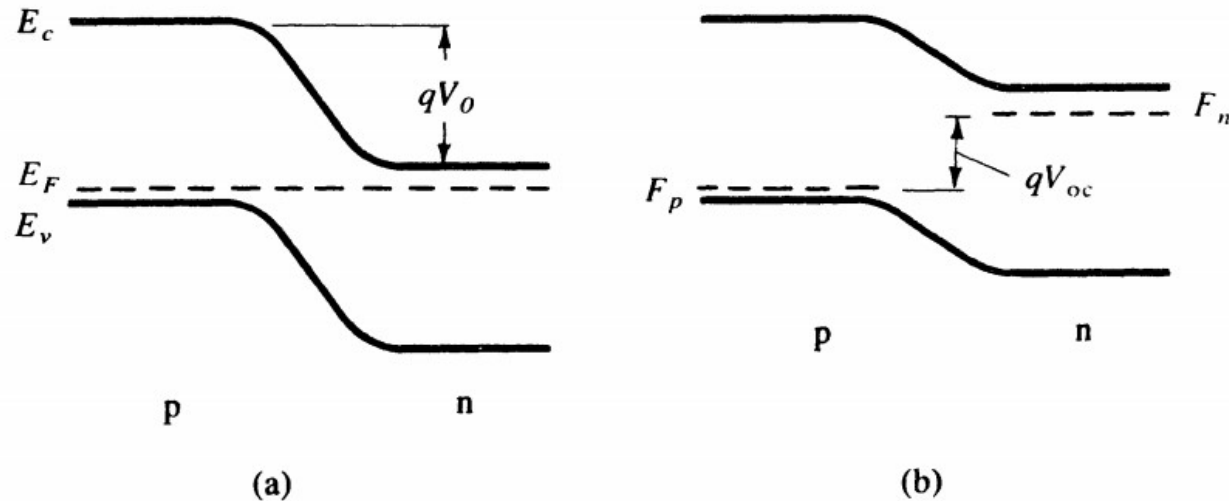


## ۶.۳ دیودهای نوری Photodiodes

ظهور این ولتاژ مستقیم که بر اثر تابش نور بوجود آمد، اثر فوتوولتائیک نامیده می شود. در ربع سوم و اول منحنی مشخصه، توان از مدار بیرونی به قطعه داده می شود و در ربع سوم این دیود یک آشکارساز نور محسوب می شود. همچنین در ربع چهارم این المان توان تولید می کند و یک سلول خورشیدی خواهد بود.

اثر تابش نور بر ولتاژ مدار باز:

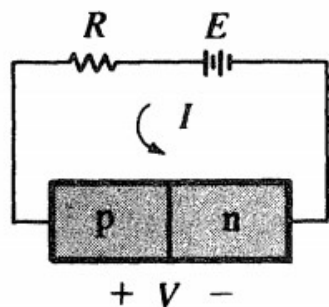
**Figure 6-11**  
Effects of illumination on the open circuit voltage of a junction:  
(a) junction at equilibrium;  
(b) appearance of a voltage  $V_{oc}$  with illumination.



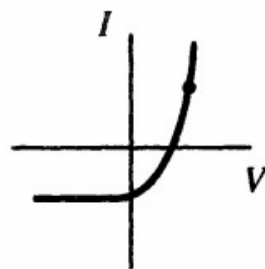
# ۶.۳ دیودهای نوری Photodiodes

عملکرد یک پیوند نور تابیده در نواحی مختلف مشخصه  $I-V$ :

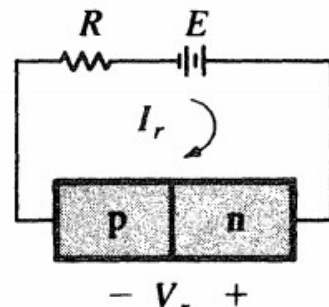
**Figure 6-12**  
Operation of an illuminated junction in the various quadrants of its  $I-V$  characteristic; in (a) and (b) power is delivered to the device by the external circuit; in (c) the device delivers power to the load.



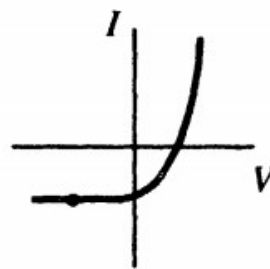
1st quadrant



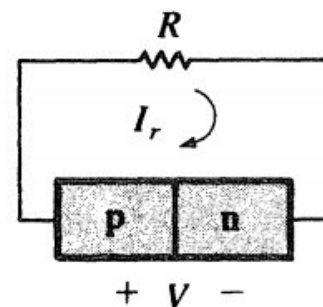
(a)



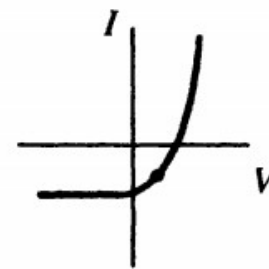
3rd quadrant



(b)

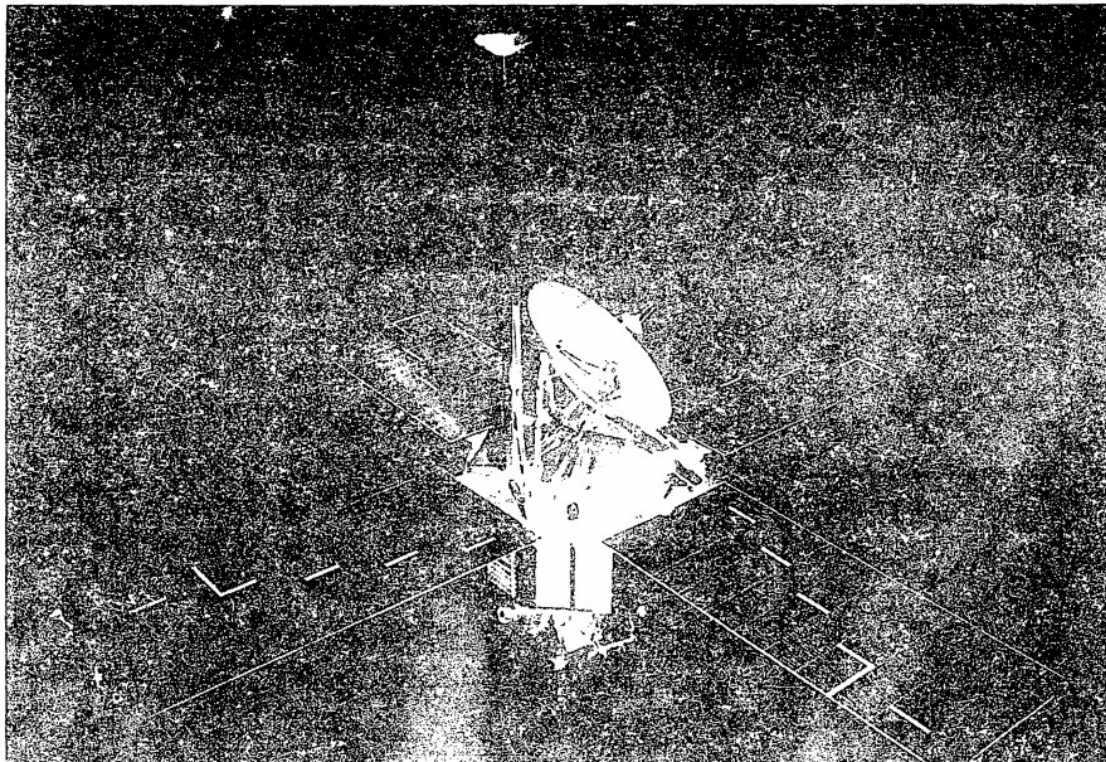


4th quadrant



(c)

همانطور که توضیح داده شده در ربع چهارم منحنی مشخصه، دیود نوری می تواند توان تولید کند و تبدیل به باتری خورشیدی شود. مقدار توان در یک قطعه منفرد کم است. **ولتاژ کمتر از پتانسیل اتصال** است، مثلا برای **Si** مقدار  $V_{OC}$  کمتر از **یک ولت** است. جریان تولیدی  $I_{op}$  هم به سطح ناحیه نور تابیده وابسته است، مقدار نوعی آن با سطح  $1\text{cm}^2$  در محدوده  $10\text{--}100\text{mA}$  قرار دارد. برای گرفتن توانهای بالا تعداد زیادی از این قطعات استفاده میشود. باتریهای خورشیدی در تامین توان الکتریکی ماهواره ها استفاده می شوند، که معمولا بر روی باله های ماهواره نصب میشوند.



**Figure 6-13**  
Solar cell arrays attached to the Mars fly-by satellite *Mariner*. (Provided through the courtesy of the National Aeronautics and Space Administration, California Institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory.)



## ۶.۳.۲ باتریهای خورشیدی

- مصالحه های زیادی در طراحی باتری خورشیدی باید انجام شود، از جمله:
- **سطح مقطع پیوند** بزرگ و **نزدیک سطح** قطعه باشد تا از بیشترین انرژی نوری استفاده شود.
  - عمق پیوند  $d$  کمتر از  $L_p$  در ماده  $n$  باشد تا امکان نفوذ **حفره های تولید شده در نزدیکی سطح** را به داخل پیوند قبل از بازترکیب فراهم سازد.
  - بایستی تطبیق مناسب بین طول نفوذ الکترون  $L_n$ ، ضخامت ناحیه  $p$  و عمق متوسط نفوذ نوری  $\frac{1}{\alpha}$  صورت گیرد.
  - برای داشتن ولتاژ نوری بزرگ، پتانسیل تماس  $V_0$  **باید بزرگ** و بنابراین **ناخالصی** باید **شدید** باشد. که البته ناخالصی شدید **طول عمر باربرها را کاهش** می دهد.
  - **تلفات اهمی** در اثر مقاومت سری باید کم باشد. برای **کاهش مقاومت سری** می توان اتصالات را به شکل **انگشتی** های کوچک روی سطح  $n$  توزیع کرد. این اتصالات باریک مقاومت سری را بدون تداخل قابل توجهی با نور تابنده، کاهش می دهند.

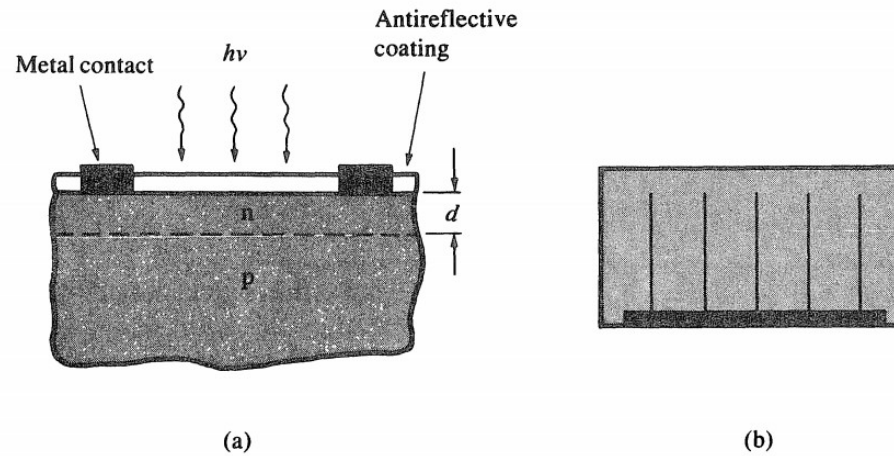
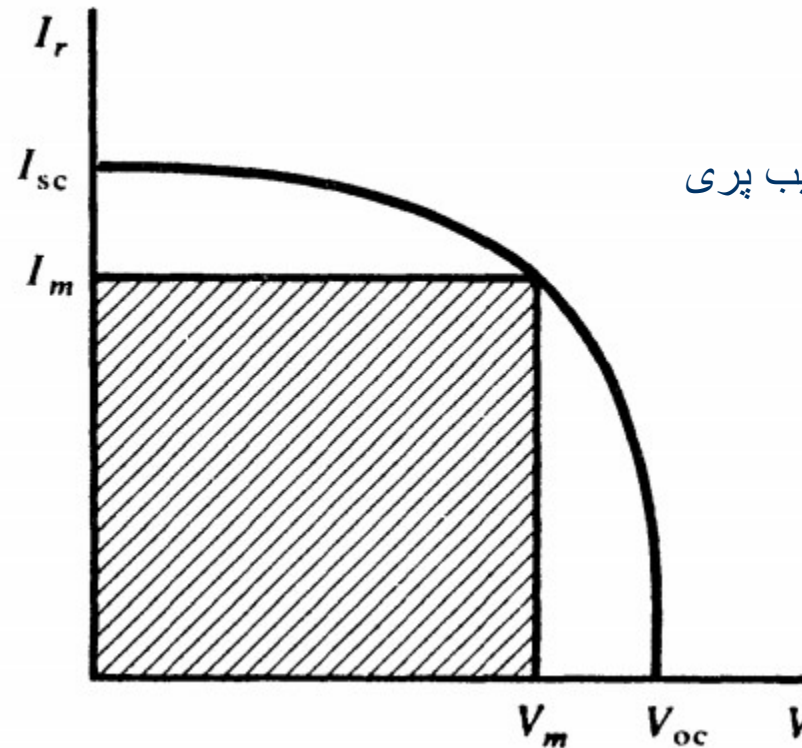


Figure 6-14  
Configuration of a  
solar cell:  
(a) enlarged view of  
the planar junction;  
(b) top view,  
showing metal  
contact "fingers."

**Figure 6-15**  
I–V characteristic of an illuminated solar cell. The maximum power rectangle is shaded.



بیشترین توان تحویلی:

$$\text{ضریب پری (Fill Factor)} = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}}$$

انرژی دریافتی از خورشید در یک منطقه آفتابی خاص به  $1\text{KW}/\text{m}^2$  می رسد. در یک باتری خوش ساخت Si بازده به ده درصد می رسد، زیرا بیشتر شار فوتونی در انرژیهای کمتر از شکاف انرژی باتری خورشیدی قرار دارند، علاوه بر آن EHP های تولیدی ممکن است در سطح بازترکیب شوند. در این باتری توان الکتریکی در حدود  $100\text{W}/\text{m}^2$  خواهد بود. برای افزایش توان نور را با آینه هایی روی سلولها متمرکز می کنند. باتریهای سیلیسیومی در دماهای بالا بازده خود را از دست می دهند ولی GaAs می تواند تا دمای بالاتر از  $100^\circ\text{C}$  کار کند.

اگر دیود نوری در ربع سوم منحنی مشخصه  $I-V$  خود عمل کند، جریان مستقل از ولتاژ بوده ولی متناسب با نرخ تولید نوری است و میتواند بعنوان آشکارساز نور استفاده شود. در آشکارساز نوری سرعت پاسخ بسیار مهم است. مثلا در پاسخ به یک سری پالسهای با فواصل  $1ns$ . پس باید باربرها در زمان کمتر از  $1ns$  به پیوندگاه نفوذ کرده و به طرف دیگر کشیده شوند. نفوذ باربرها امری زمان بر است و باید تا حد امکان حذف شود. مناسب است که پهنای ناحیه تهی  $W$  بزرگ انتخاب شود تا اکثر فوتونها بجای نواحی خنثی  $n$  و  $p$  در درون  $W$  جذب شوند و همچنین ظرفیت و در نتیجه ثابت زمانی  $RC$  مدار آشکارساز را کاهش می دهد. به این نوع دیود نوری، دیود نوری لایه تهی گفته می شود. اما برای داشتن  $W$  بزرگ باید حداقل یک طرف پیوند ناخالصی سبک داشته باشد، از طرفی  $W$  خیلی پهن، زمان لازم برای رانش باربرهای تولید شده بر اثر نور به خارج از ناحیه تهی را افزایش می دهد.

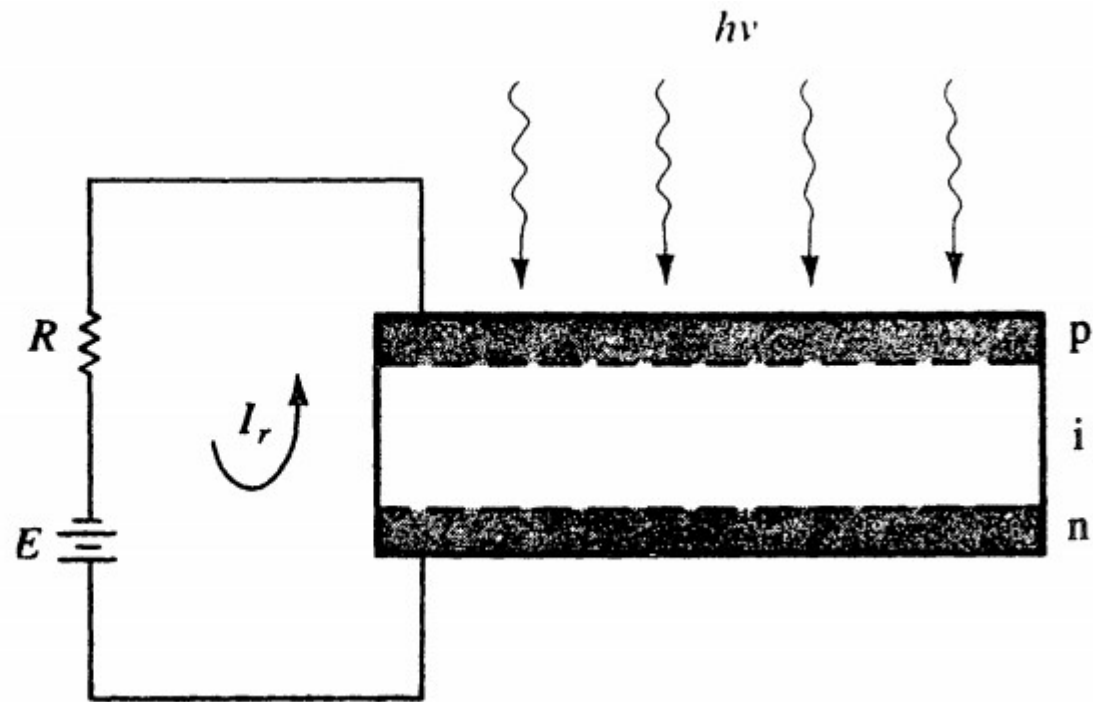
دیود PIN:

روش مناسب برای کنترل ناحیه تهی استفاده از یک ناحیه ذاتی بین نواحی  $n$  و  $p$  است. در این حالت هم سرعت مناسب است و هم حساسیت خوب است.

دیود PIN:

روش مناسب برای کنترل ناحیه تهی استفاده از یک ناحیه ذاتی بین نواحی p و n است. در این حالت هم سرعت مناسب است و هم حساسیت خوب است.

**Figure 6-16**  
Schematic  
representation of a  
p-i-n photodiode.



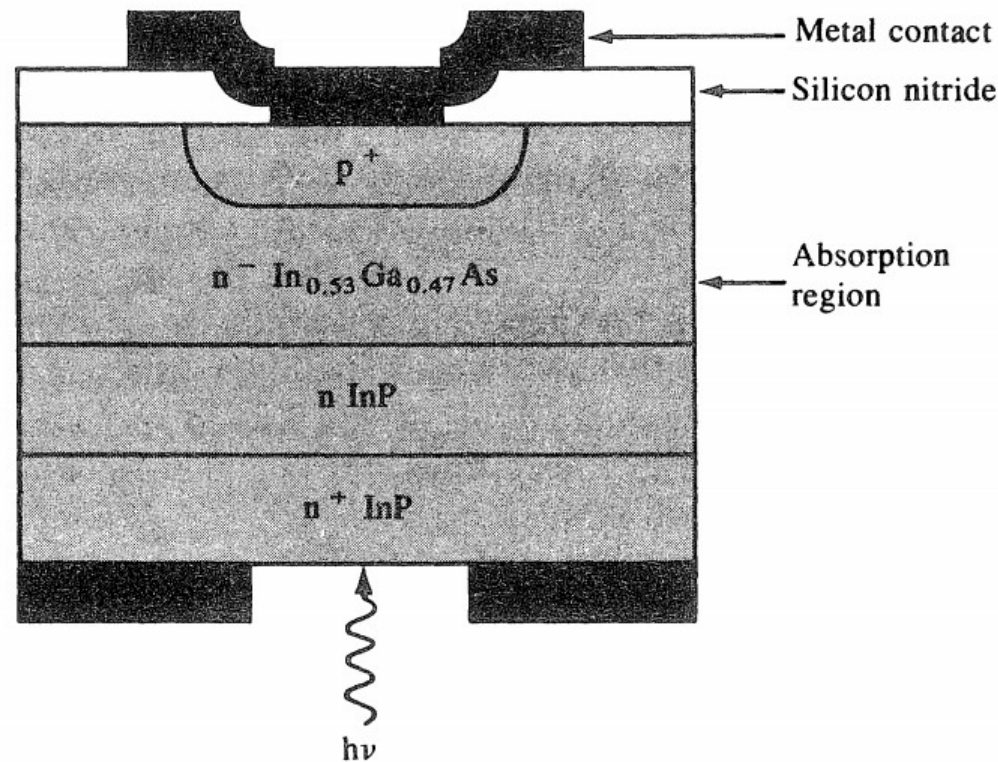
دیود نوری بهمنی:  
برای آشکارسازهای نوری سیگنالهای ضعیف، مناسب است که دیود نوری در ناحیه شکست بهمنی  
مشخصه اش عمل کند. در این حالت با تکثیر بهمنی هر بار تولید شده با نور، تغییر قابل ملاحظه ای در  
جریان وجود دارد.



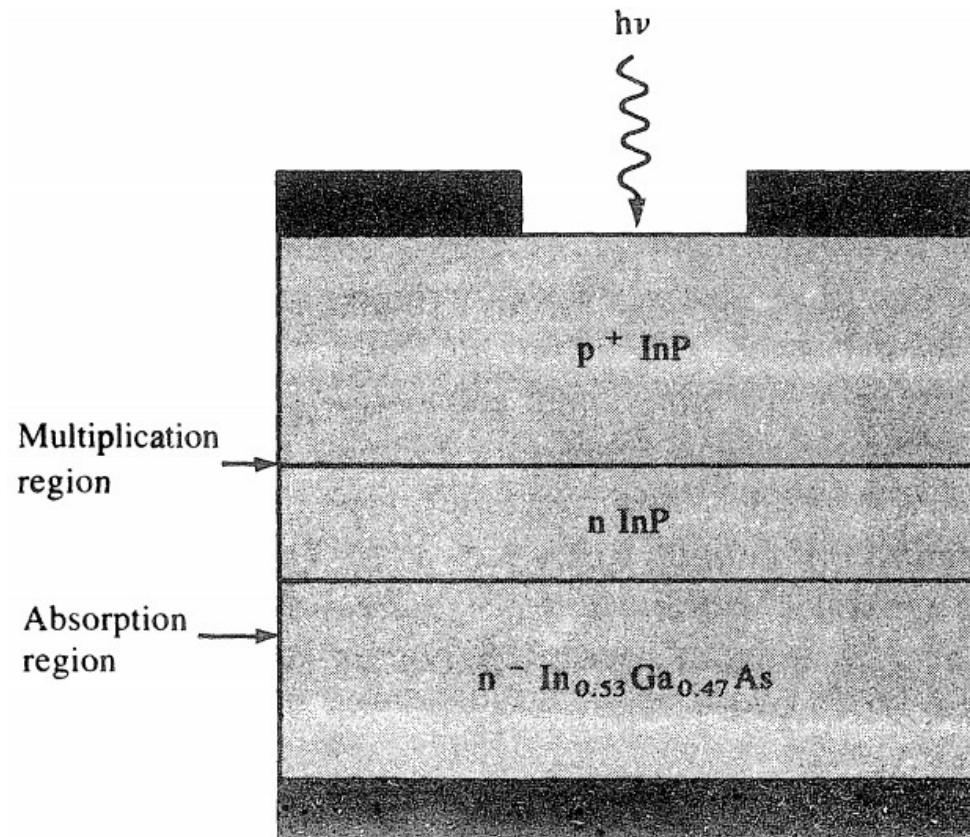
## ۶.۳.۳ آشکارسازهای نوری

دیوهای نوری به فوتونهایی با انرژی نزدیک به انرژی شکاف نوار حساس هستند. با استفاده از نیمه رساناهای مرکب، مانند  $\text{InP}$  و  $\text{InGaAs}$  می توان شکاف نوری ناحیه جذب کننده را مطابق با طول موج نور مورد نظر برای آشکارسازی در آورد. در نتیجه ماده با شکاف نوار پهن تر را میتوان به عنوان پنجره ای که از آن نور به ناحیه جذب فرستاده میشود، بکار برد، تا از باز ترکیب سطحی کاسته شود.

$\text{InP}$  با شکاف نوار پهن تر  $1.35 \text{ eV}$  میتواند بعنوان پنجره برای رساندن نور به  $\text{InGaAs}$  با شکاف نوار  $0.75 \text{ eV}$  استفاده شود، که به طول موج مفید برای سیستمهای فیبر نوری  $1.55 \mu\text{m}$  حساس است.



در دیودهای نوری بهمینی که نیاز به ماده با شکاف نوار باریک است، ابتدا نور در نیمه رسانای با شکاف باریک (مثلاً InGaAs) جذب شده و باربرهای حاصل به پیوندی که در ماده با شکاف نوار پهن تر ساخته شده و در آن تکثیر بهمینی رخ می دهد ارسال شوند. این جداسازی، از جریانهای ناشی زیاد که در پیوندهای گرایش معکوس با مواد شکاف باریک متداول است جلوگیری می کند.



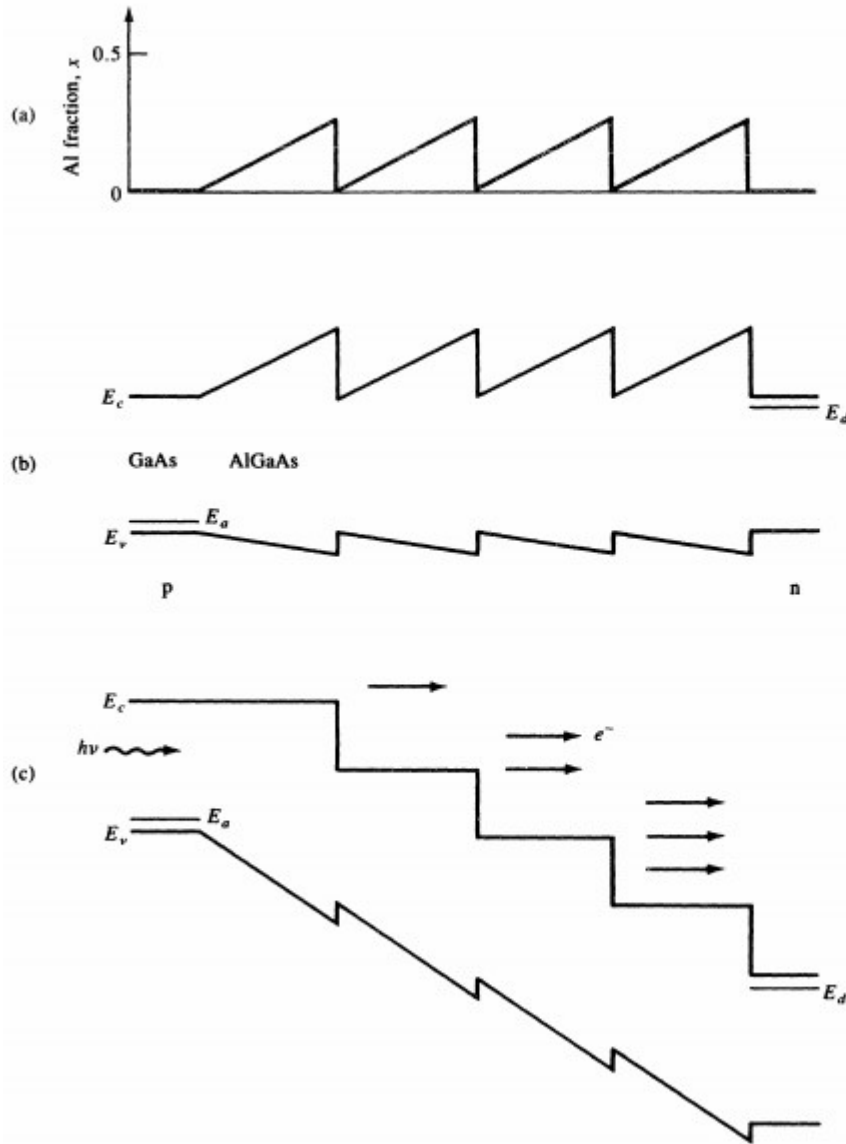
## ۶.۳.۴ نويز و پهنای باند آشکارسازهای نوری

در آشکار سازهای نوری بهره به نسبت طول عمر باربرها به زمان گذر وایسته است. از طرفی پاسخ فرکانسی (و بنابراین پهنای باند) نسبت عکس با طول عمر باربرها دارد. معمولاً حاصلضرب بهره در پهنای باند بعنوان ضریب شایستگی آشکارسازها شناخته میشود.

همچنین نسبت سیگنال به نويز اطلاعات مفیدی در مقایسه با نويز زمینه در آشکارساز را نشان می دهد. منبع اصلی نويز در نوررساناها نوسانات اتفاقی در جریان تاریکی است که به نويز جانسون مشهور است. که با افزایش مقاومت تاریک میتواند کاهش یابد. افزایش مقاومت بهره را افزایش و پهنای باند را کاهش میدهد. در دیوده های PIN بهره یک است. در این نوع دیود زمان پاسخ به پهنای ناحیه تهی وابسته بوده و منبع اصلی نويز تولید تصادفی EHPها در اثر گرما درون این ناحیه است که به نويز ضربه ای مشهور است. دیوده های نوری بهمنی دارای بهره به دلیل تکثیر بهمنی هستند. ولی بدلیل نوسانات تصادفی در فرآیند شکست بهمنی دارای نويز بیشتری میباشد. این نويز در صورتی کاهش می یابد که یونیزاسیون برخوردی در ناحیه میدان قوی فقط بر اثر یک نوع باربر باشد، زیرا در صورت مشارکت هر دوی الکترونها و حفره ها، نوسانات بیشتری در فرآیند یونیزاسیون رخ می دهد.

# ۶.۳.۴ نويز و پهناي باند آشكارسازهاي نوري

راه حلی برای مشارکت بیشتر الکترونها در یونیزاسیون برخوردی و مشارکت کمتر حفره ها.



**Figure 6-18**  
A multilayer structure for an avalanche photodiode, which is designed to selectively enhance impact ionization by electrons: (a) variation of the composition in the  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  regions; (b) the resulting band diagram shows ramps in the AlGaAs conduction bands, with much smaller variations in the valence bands; (c) the conduction bands under strong reverse bias resemble successive steps over which electrons are swept at high energy, resulting in successive regions of avalanche multiplication. The multiplication by holes (swept in the opposite direction) is much less in this example.

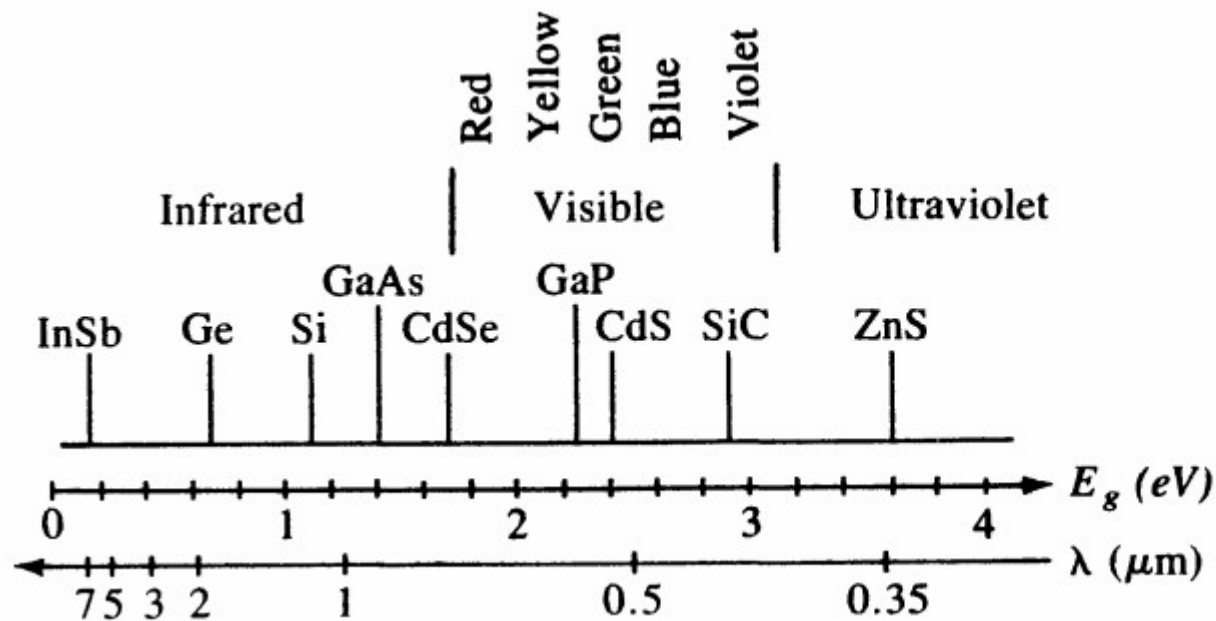
## ۶.۴ دیودهای نورافشان و لیزرها



### نورافشانی تزریقی:

هنگامی که دیود در بایاس مستقیم قرار می گیرد، جریان الکتریکی بدلیل بازترکیب در ناحیه گذر و نواحی خنثی بوجود می آید، اگر نیمه رسانا از مواد با شکاف غیر مستقیم، مانند **Si** و **Ge**، باشد بازترکیب باعث **گسیل گرما** به شبکه می شود، و اگر از مواد با بازترکیب مستقیم، مانند **GaAs**، باشد **نور گسیل** خواهد شد. این اثر نور افشانی تزریقی نام دارد و کاربرد دیودها را بعنوان منابع نور نشان می دهد. نمونه ای از این دیودها **LED** و لیزر می باشند.

لیزرها نور همدوس، با نوارهای طول موجی بسیار باریکتر از **LED**ها و با همسویی بیشتر گسیل می کنند.



**Figure 4-4**  
Band gaps of some common semiconductors relative to the optical spectrum.



با ترکیبهای سه تایی و چهارتایی می توان تعداد انرژیهای موجود را افزایش داد. نمونه ای از این ترکیبات، آلیاژ سه تایی فسفاید-آرسنید-گالیم است.

شکاف نوار  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  تا قبل از ترکیب 0.45 تقریباً به طور خطی با X تغییر می کند و باز ترکیب مستقیم است.

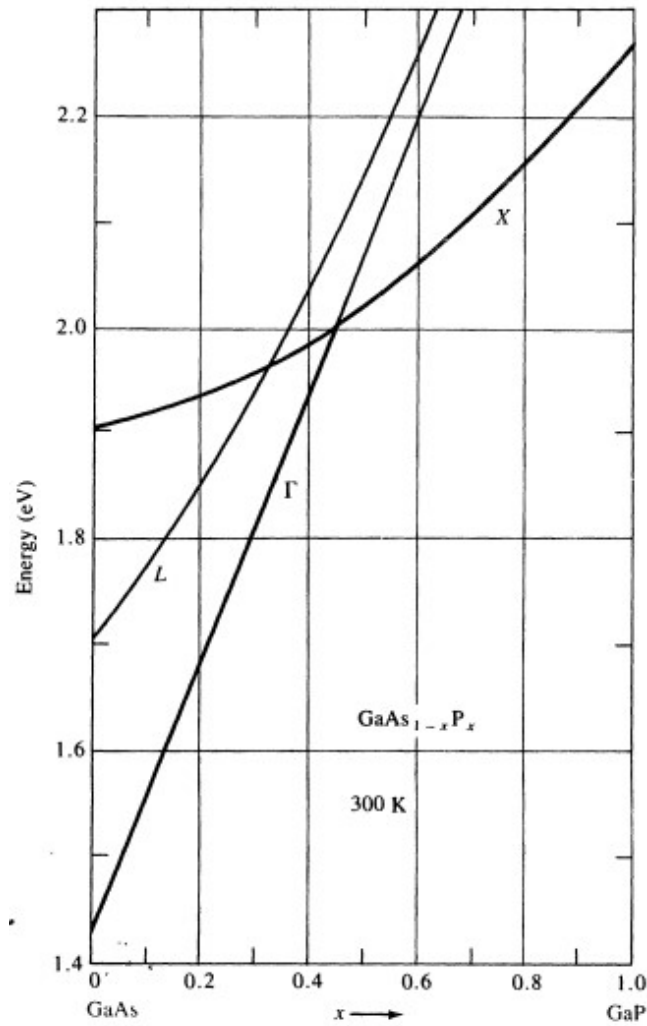
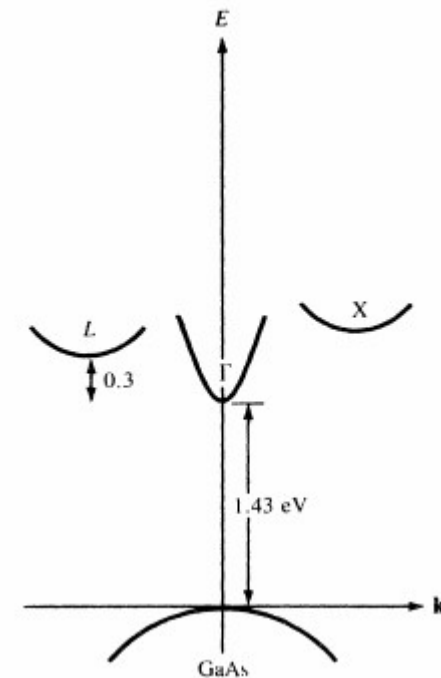
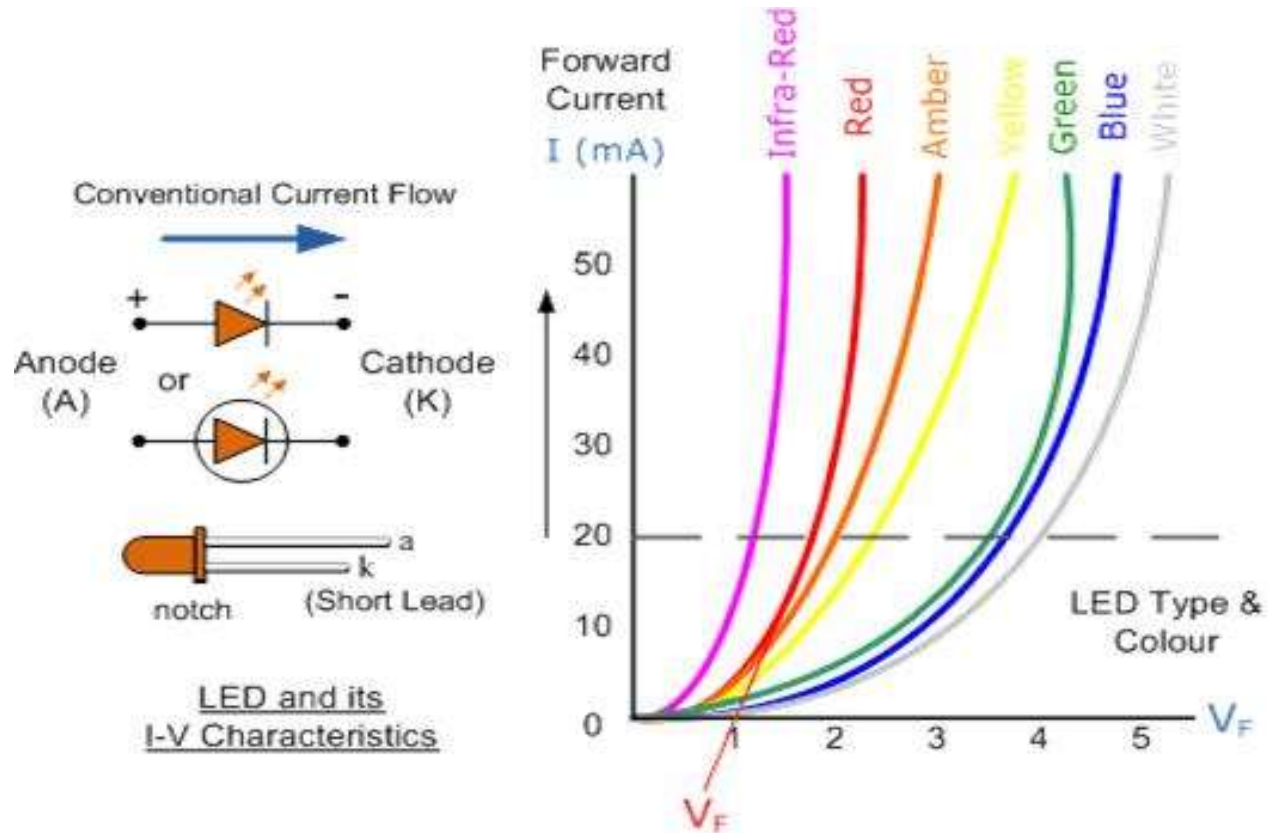


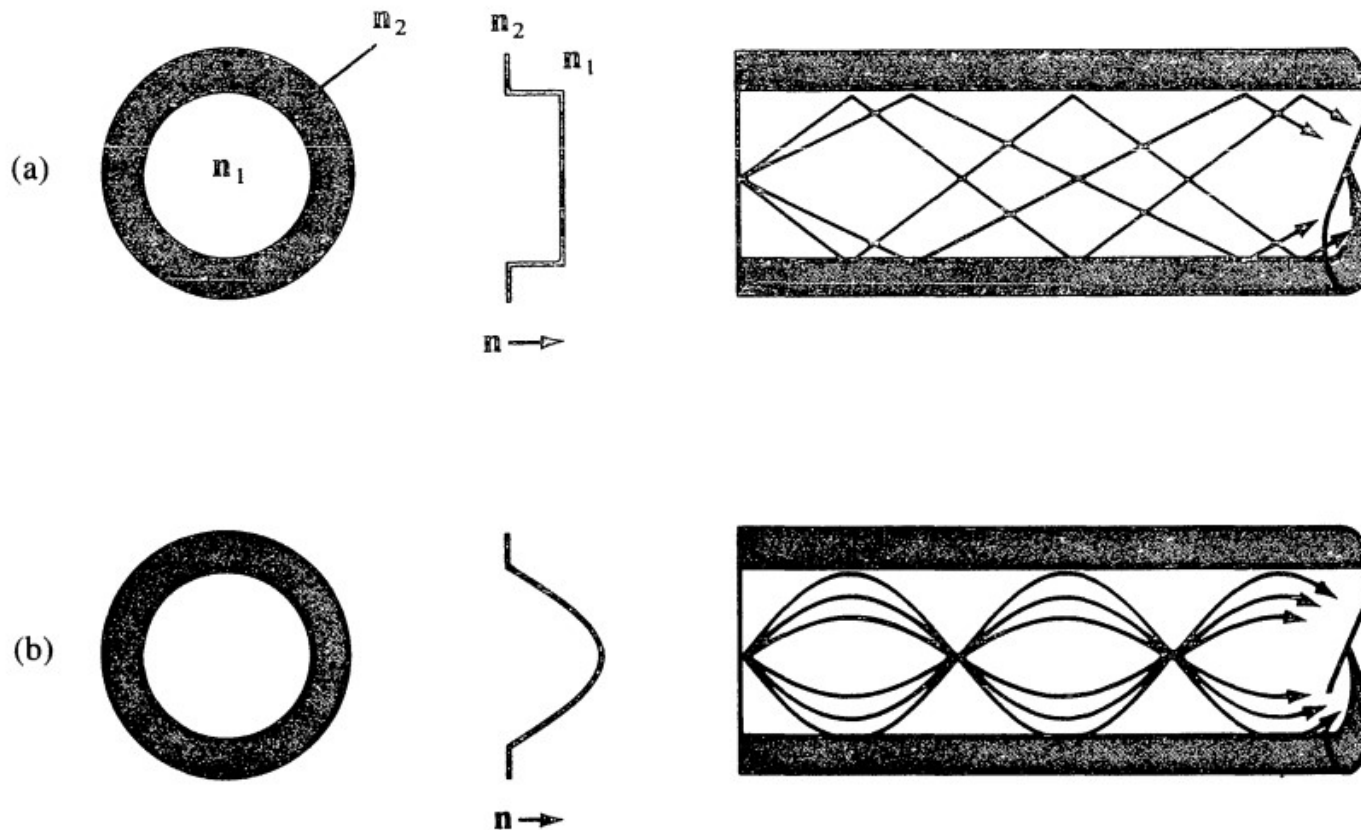
Figure 6-19  
Conduction band  
energies as a  
function of alloy  
composition for  
 $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ .



Typical LED Characteristics			
Semiconductor Material	Wavelength	Colour	$V_F$ @ 20mA
GaAs	850-940nm	Infra-Red	1.2v
GaAsP	630-660nm	Red	1.8v
GaAsP	605-620nm	Amber	2.0v
GaAsP:N	585-595nm	Yellow	2.2v
AlGaP	550-570nm	Green	3.5v
SiC	430-505nm	Blue	3.6v
GaN	450nm	White	4.0v



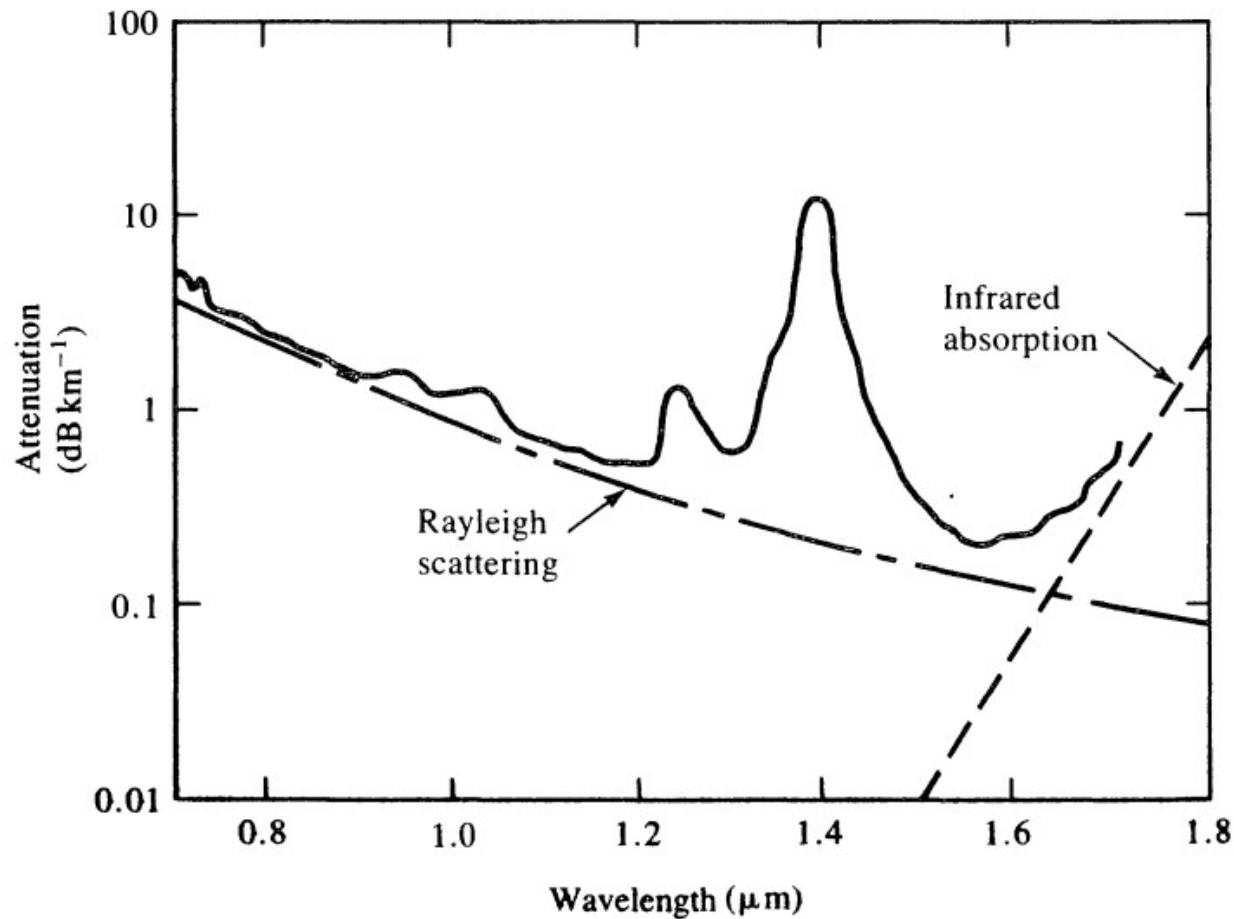




**Figure 6-20**  
 Two examples of multimode fibers: (a) *step-index*, having a core with slightly larger refractive index  $n$ ; (b) *graded-index*, having in this case a parabolic grading of  $n$  in the core. The figure illustrates the cross section (left) of the fiber, its index of refraction profile (center), and typical mode patterns (right).

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x}$$

- ضریب تضعیف
- تضعیف ناشی از پراکندگی رایلی که با توان چهارم طول موج کاهش می یابد.
- تضعیف ناشی از فرآیند جذب زیر قرمز، که بر اثر تحریک ارتعاشی اتمهای شیشه پدید می آید.

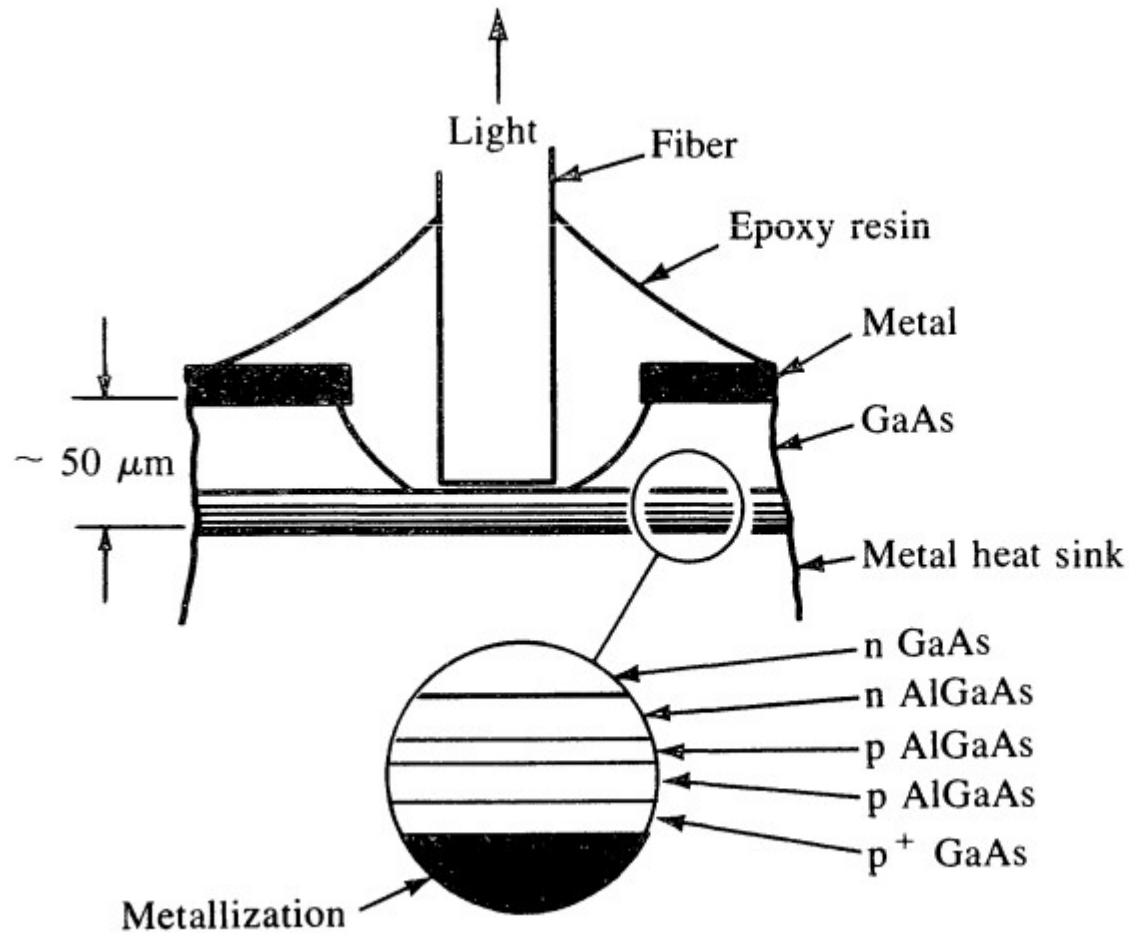


**Figure 6-21**  
Typical plot of attenuation coefficient  $\alpha$  vs. wavelength  $\lambda$  for a fused silica optical fiber. Peaks are due primarily to  $\text{OH}^-$  impurities.

GaAs, AlGaAs : 0.9  $\mu\text{m}$

InGaAs, InGaAsP : 1.3 .  
1.55  $\mu\text{m}$

- پاشیدگی Dispersion
- پاشیدگی رنگی: راه حل، استفاده از پنجره  $1.3\mu m$  است.
- پاشیدگی بین مدی: راه حل، استفاده از فیبرهای با ضریب شکست شیبدار.



**Figure 6-22**  
 Cross section of a GaAs–AlGaAs LED for fiber–optic applications. [After C. A. Burrus and B. I. Miller, *Optics Communications*, vol. 4, p. 307 (1971).]

