

OPTOELECTRONICS (2)

Lecture 2.2

Photodetectors

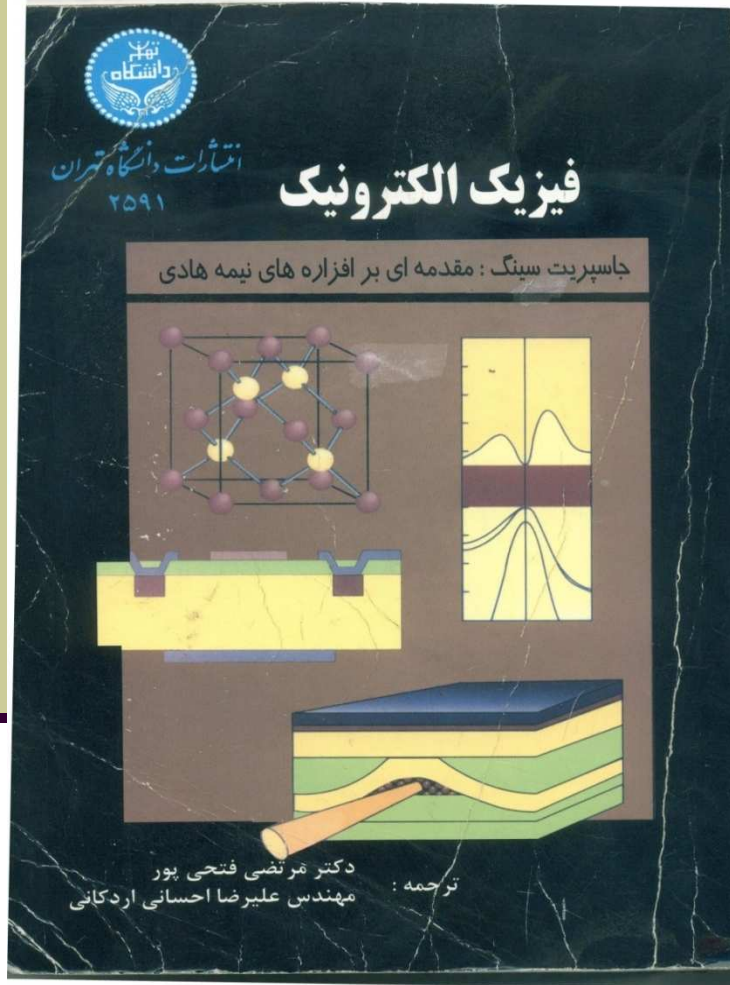
Mohammad Ali Mansouri- Birjandi

Department of Electrical and Computer Engineering
University of Sistan and Baluchestan (USB)

mansouri@ece.usb.ac.ir

mamansouri@yahoo.com

مرجع



فیزیک الکترونیک:
مقدمه ای بر افزاره های نیمه هادی

تالیف: جاسپریت سینگ
ترجمه: دکتر مرتضی فتحی پور، مهندس علیرضا احسانی اردکانی

انتشارات دانشگاه تهران، چاپ اول، ۱۳۸۱

فصل ۱۰ کتاب

افزاره های الکترونیک نوری:

از فوتون تا الکترون

فصل در یک نگاه

- ✓ روابط اساسی جذب نور و تولید زوج الکترون-حفره
- ✓ تأثیر نور بر جریان دیود p-n و طرز کار سلول خورشیدی
- ✓ آشکارساز هدایت نوری
- ✓ آشکارساز p-i-n
- ✓ آشکارساز نوری بهمینی
- ✓ ترانزیستور نوری
- ✓ آشکارساز فلز-نیمه هادی
- ✓ اغتشاش در آشکارسازها

زمینه های استفاده از نور (۱)

- ۱- حافظه (دیسکهای نوری) (CD)
- ۲- مخابرات نوری (فیبرهای نوری)
- ۳- شبکه های محلی (LANها) Local Area Networks
(خطوط ارتباطی نوری بین رایانه های محلی و تلفن ها و غیره)
- ۴- چاپ و نشر به کمک کامپیوتر (چاپگرهای لیزری)
(Printing and Desktop Publishing)
- ۵- هدایت و کنترل (کنترل از راه دور)
- ۶- کلید زنی و خطوط ارتباطی فوتونی (ایجاد خطوط ارتباطی بین تراشه ها)

جذب نور در نیمه هادی ها

۱. شکاف انرژی مستقیم

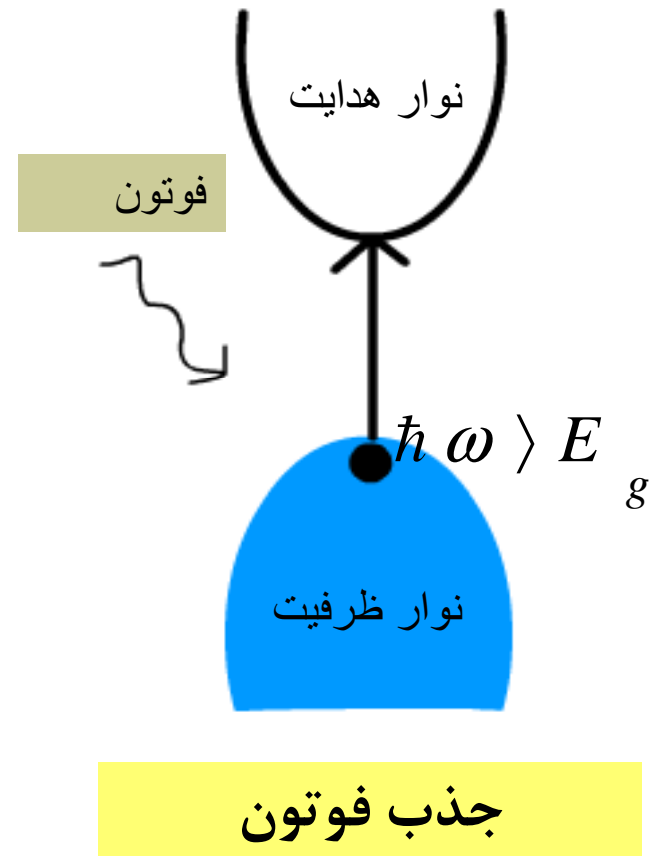
۲. شکاف انرژی غیر مستقیم

شکاف انرژی مستقیم

قویترین فرایند جذب هنگامی رخ میدهد که فوتون، الکترونی را بطور مستقیم از نوار ظرفیت به نوار هدایت ببرد.

چون اندازه حرکت فوتون نسبت به اندازه حرکت الکترون بسیار ناچیز است، گذارهای (Transition) الکترون-حفره در فضای K عمودی است.

چنین انتقالهایی فقط در نزدیکی لبه نوار ممکن است.



ضریب جذب در شکاف انرژی مستقیم

$$\alpha(\hbar\omega) \cong 3 \times 10^6 \left(\frac{m_r^*}{m_o} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{(\hbar\omega - E_g)^{\frac{1}{2}}}{\hbar\omega} \quad \text{cm}^{-1}$$

m_r^* : جرم کاهش یافته الکترون - حفره

$\hbar\omega$: انرژی فوتون

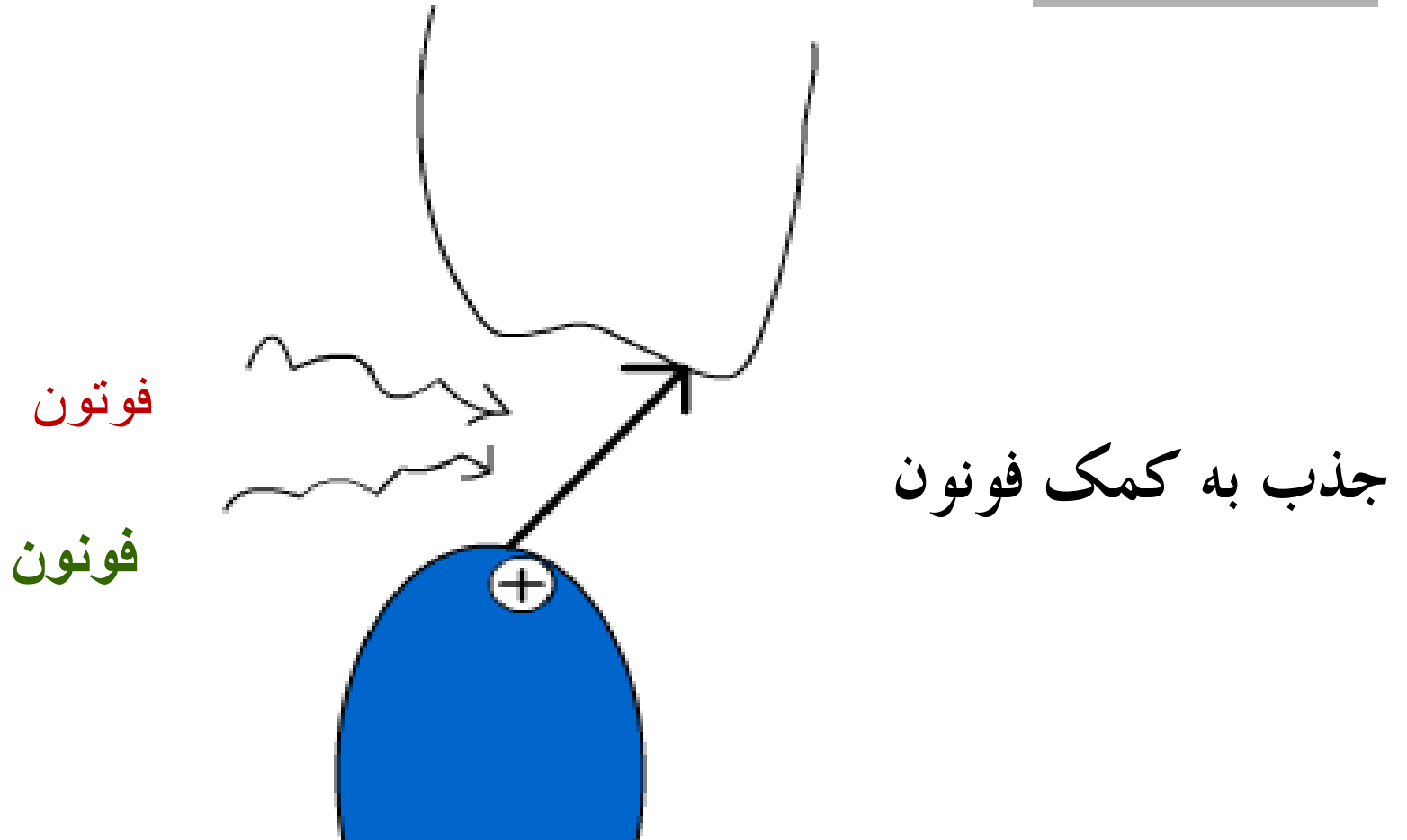
E_g : اندازه شکاف انرژی

شکاف انرژی غیرمستقیم

❖ در این حالت گذارهای عمودی در جهت k ممکن نیستند و الکترون هنگامی میتواند فوتون جذب کند که فوتون در فرایند شرکت کند.

❖ ضریب جذب برای مواد دارای شکاف غیرمستقیم بسته به نوع آنها حدود یکصدم مواد دارای شکاف انرژی مستقیم است.

شکاف انرژی غیرمستقیم



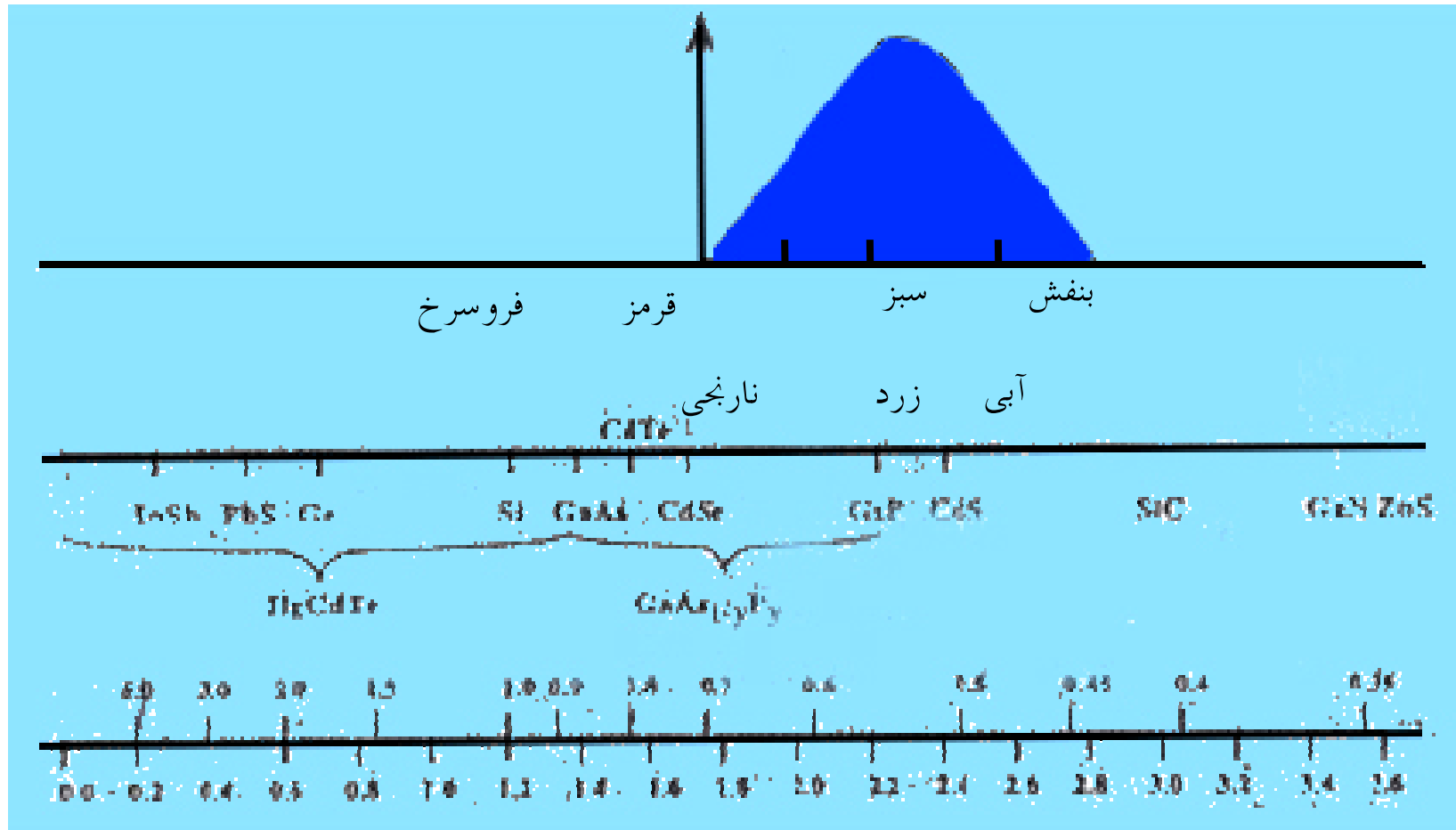
شکاف انرژی غیرمستقیم

ضریب جذب در بالای طول موج قطع λ برابر صفر است و در آن:

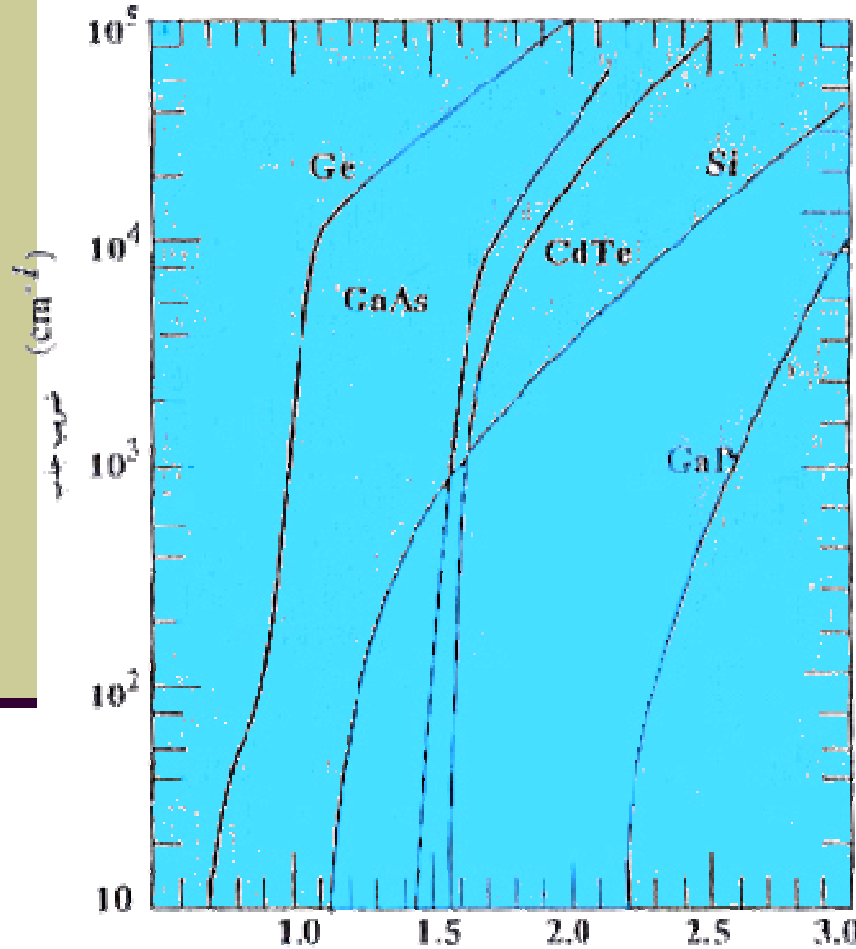
$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g (eV)} (\mu m)$$

E_g : عرض شکاف انرژی نیمه هادی

شکاف انرژی و طول موج قطع



ضریب جذب



در نیمه هادی های دارای شکاف انرژی غیرمستقیم (Ge و Si) جذب نوری بصورت کند افزایش می یابد.

InP و GaAs و InGaAs جذب نوری را در لبه دارند و دارای شکاف انرژی مستقیم هستند.

شکاف انرژی غیر مستقیم

اگر طول قطعه مساوی L باشد، کسری از نور تابیده شده که جذب نمونه می شود برابر است با:

$$1 - \exp(-\alpha L)$$

برای جذب شدید باید داشته باشیم:

$$L \gg \frac{1}{\alpha (\hbar \omega)}$$

مثال

❖ اگر Si برای جذب لیزر GaAs به کار رود، ضخامتی حدود $10\text{-}20\mu\text{m}$ احتیاج است. $(E_g(\text{GaAs}) = \hbar\omega \approx 1.45\text{eV})$

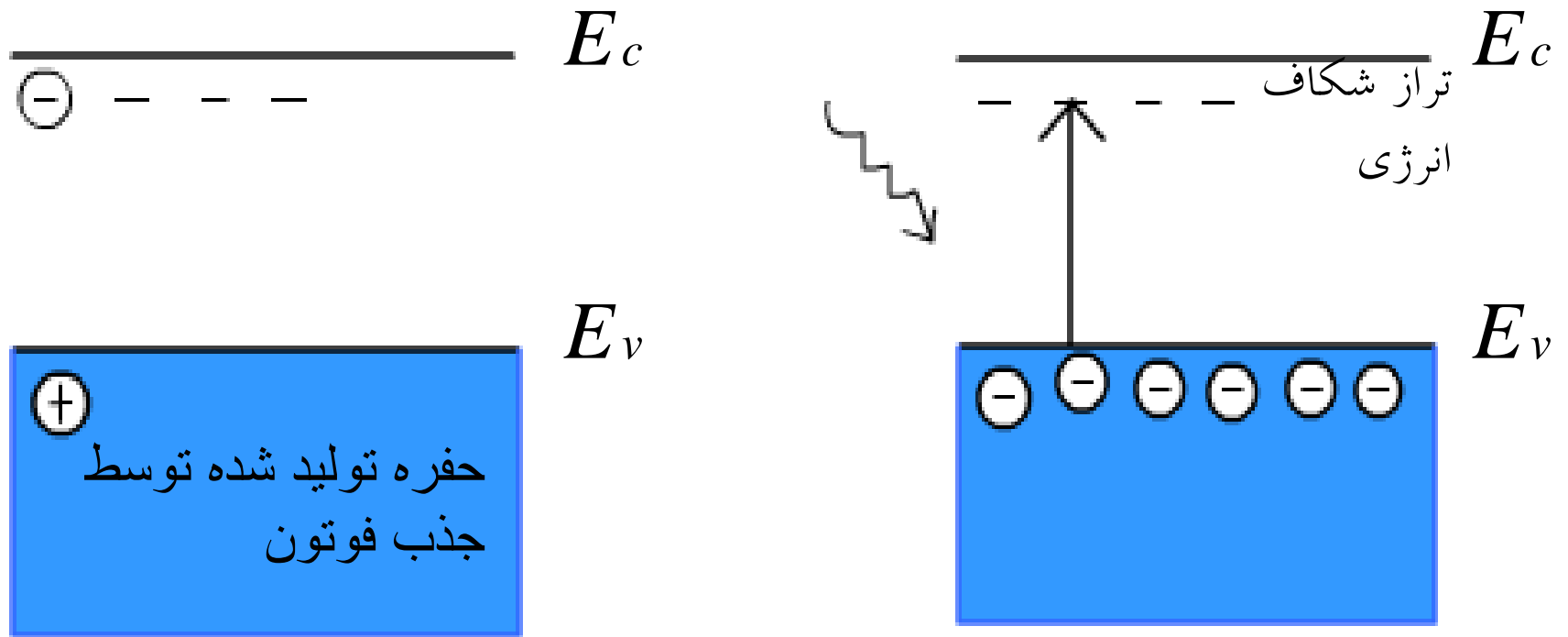
❖ اگر Ge استفاده شود، ضخامت حدود $1\mu\text{m}$ کافی است.

آشکار ساز غیر ذاتی

❖ در آنها ناخالصی خاصی به نیمه هادی اضافه می شود تا ترازهای الکترونی در شکاف انرژی بوجود آیند و فوتون ها میتوانند گذارهایی را به این ترازها داشته باشند.

❖ در این صورت انرژی فوتون می تواند کمتر از انرژی شکاف باشد.

آشکار ساز غیر ذاتی



پس از جذب فوتون یکی از الکترونهاى نوار ظرفیت به تراز ناخالصی می رود

نوار ظرفیت پر از الکترون

آشکار ساز غیر ذاتی

- ❖ برای آشکار سازی تشعشعات طول موج بلند به کار می رود و برای این کار به شکاف انرژی بسیار باریکی نیاز دارند.
- ❖ با استفاده از ناخالصی های خاصی در Si و Ge می توانند در دماهای پایین با طول موجهایی تا حدود $120 \mu\text{m}$ کار کنند.
- ❖ ضریب جذب در آنها خیلی کوچک است (در حدود 10 cm^{-1}).
- ❖ از اینرو به قطعه ضخیمی از این ماده احتیاج است.

نرخ تولید زوج الکترون – حفره (1)

بعد از تعیین ضریب جذب در نیمه هادی ، باید بدانیم که زوج الکترون - حفره با چه
نرخی تولید می شود.

برای محاسبه آهنگ تولید زوج الکترون - حفره دسته ای از پرتوهای نوری را
در نظر بگیرید که با شدت $P_{op}(0)$ بر واحد سطح به نیمه هادی برخورد میکنند.

شدت در نقطه X توسط رابطه زیر تعیین می شود: (صفحه بعد)

نرخ تولید زوج الکترون – حفره (2)

$P_{op}(x)$: شدت در نقطه x (W/cm^2)

$$P_{op}(x) = P_{op}(0) \exp(-\alpha x)$$

اگر انرژی جذب شده، زوج الکترون-حفره با انرژی $\hbar\omega$ تولید کند، آهنگ تولید حاملها، G_L برابر است با (آهنگ بر واحد حجم):

$$G_L = \frac{\alpha P_{op}(x)}{\hbar\omega} = \alpha J_{ph}(x)$$

$$(cm^{-2}s^{-1})x$$

J_{ph} : چگالی شارتابشی فوتون در نقطه

Responsivity

پاسخ دهی

جریان تولیدشده را به ازای توان نوری معین، می دهد.

$$R_{ph} = \frac{I_L / A}{P_{op}} = \frac{J_L}{P_{op}}$$

I_L : جریان نوری تولید شده در افزاره ای به مساحت A

J_L : چگالی جریان نوری

Quantum Efficiency

بازده کوانتومی

نشان می دهد که به ازای هر فوتون تابیده شده بر روی آشکارساز، چه تعداد حامل جمع آوری می شود.

$$\eta_Q = \frac{J_L / e}{P_{op} / \hbar \omega} = R_{ph} \frac{\hbar \omega}{e}$$

آشکارساز هدایت نوری Photoconductive Detector

آشکارساز ساده $n-i-n$ ($p-i-p$) که در آن هدایت باتابش نور تغییر میکند.
اگر زمان باز ترکیب بزرگتر از زمان گذر باشد، آشکارساز میتواند بهره زیادی داشته باشد.

این امر، اجازه میدهد که الکترون پیش از آن که با حفره ترکیب شود، چند بار در مدار بچرخد.

مثال:

اندازه حرکت P_{cv} برای GaAs حدود 23eV است، ضریب جذب GaAs را برای پرتویی با انرژی 1.7 eV بدست آورید؟

$$E_g = 1.43$$

حل:

$$\alpha(\hbar\omega) = 5.6 \times 10^4 \frac{(\hbar\omega - E_g)^{\frac{1}{2}}}{\hbar\omega} \text{ cm}^{-1}$$

$$\alpha(\hbar\omega = 1.7\text{eV}) = 4.21 \times 10^4 \frac{(0.27)^{\frac{1}{2}}}{1.7} = 6.7 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$$

مثال:

یک آشکارساز Ge ازلیزر GaAs با انرژی 1.43eV استفاده میکند. ضخامت برای جذب ۹۰٪ سیگنال نوری ورودی چقدر است؟

$$\hbar\omega = 1.43\text{eV} \rightarrow \alpha \cong 2.5 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$$

حل:

$$L = -\frac{1}{\alpha} \ln(1 - 0.9) = \frac{2.3}{(2.5 \times 10^4 \text{cm}^{-1})} = 0.92 \mu\text{m}$$

مثال:

شدت نور 10 W/cm^2 با طول موج $0.75 \mu\text{m}$ به آشکار ساز GaAs میتابد. آهنگ تولید زوج الکترون-حفره در دمای 300°K چقدر است؟ اگر زمان باز ترکیب 10^{-9} s باشد، چگالی حاملهای اضافه چقدر است؟

حل: $7 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ = ضریب جذب

طول موج $0.75 \mu\text{m}$ متناظر با انرژی 1.65 eV است.

$$G_L = \frac{\alpha P_{op}}{\hbar \omega} = 2.65 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

چگالی حاملهای اضافه: $\delta n = \delta p = G_L \tau = 2.65 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

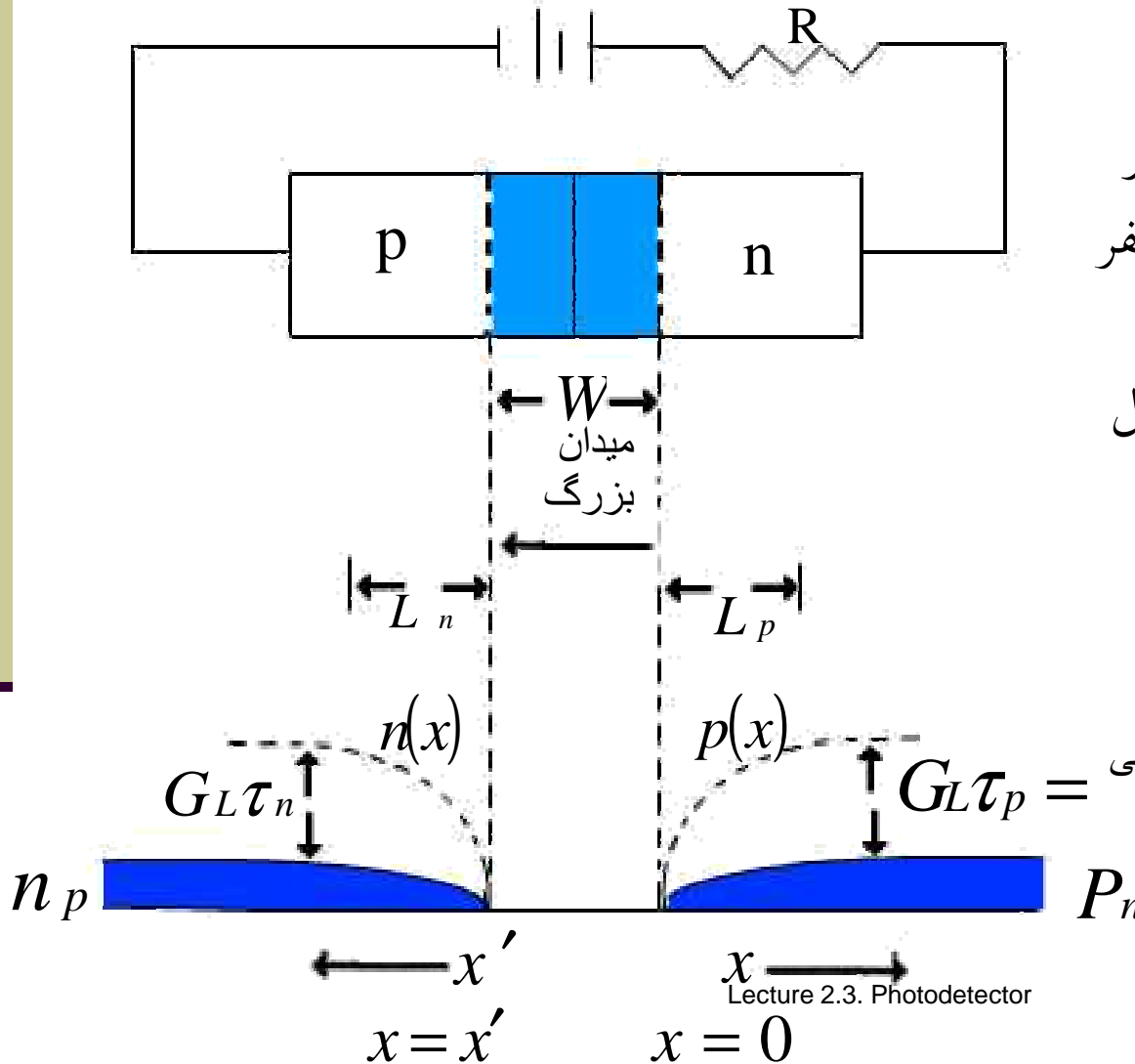
جریان نوری (Photocurrent) در دیود p-n

هنگامی که نور به نیمه هادی می تابد و زوج الکترون-حفره تولید می کند، بعضی از حامل هادر محل اتصال جمع آوری می شود و جریان نوری ناشی از جذب فوتون ها بوجود می آورند.

$$I_{L1} = A \cdot e \int_0^{x'} G_L \cdot dx = A \cdot e G_L W$$

A : مساحت دیود

دیود p-n



در لبه تخلیه به علت میدان
بزرگی که بارها را به دور
می راند، بار اقلیت صفر
است. n_p و P_n
بارهای اقلیت در حال
تعادل، به ترتیب
در طرف n و p هستند.

حاملهای اضافی ناشی
از جذب نور

دیود p-n

علاوه بر حامل های تولید شده در ناحیه تخلیه، در نواحی خنثی n و p نیز زوج الکترون - حفره تولید میشود.

حفره های تولید شده در فاصله L_p (طول نفوذ) از لبه ناحیه تخلیه می توانند وارد ناحیه تخلیه شوند و میدان الکتریکی، آنها را از آنجا به ناحیه p میراند. به همین ترتیب در مورد الکترونها.

پس جریان نوری، از همه حامل های تولید شده در ناحیه تشکیل میشود.

$$(W + L_n + L_p)$$

جریان نوری سریع Prompt Photocurrent

از آنجا که الکترون ها و حفره هایی که در I_{L1} شرکت دارند، تحت میدانهای الکتریکی بزرگی حرکت میکنند، پاسخ بسیار سریع است. این مؤلفه را **جریان نوری سریع** می نامیم.

جریان نوری دیود

جریان کل ناشی از حاملها در ناحیه خنثی در ناحیه تخلیه عبارت است از :

$$I_L = I_{nL} + I_{pL} + I_{L1} = eGL(L_p + L_n + W)A$$

L_p : طول نفوذ (از لبه ناحیه تخلیه)

در حالت کلی اگر ولتاژ دو سر دیود V باشد، جریان کلی عبارت است از:

$$I = I_L + I_0 \left[1 - \exp \left\{ \frac{e(V + R_s I)}{mK_B T} \right\} \right]$$

جریان نوری دیود

مؤلفه جریان نوری مربوط به ناحیه خنثی، پاسخ کندتری دارد، زیرا حامل ها از طریق نفوذ و تقریباً بدون تأثیر هرگونه میدان الکتریکی جمع آوری می شوند. این جریان در جهت جریان معکوس دیود است.

آرایشهای دیود نوری

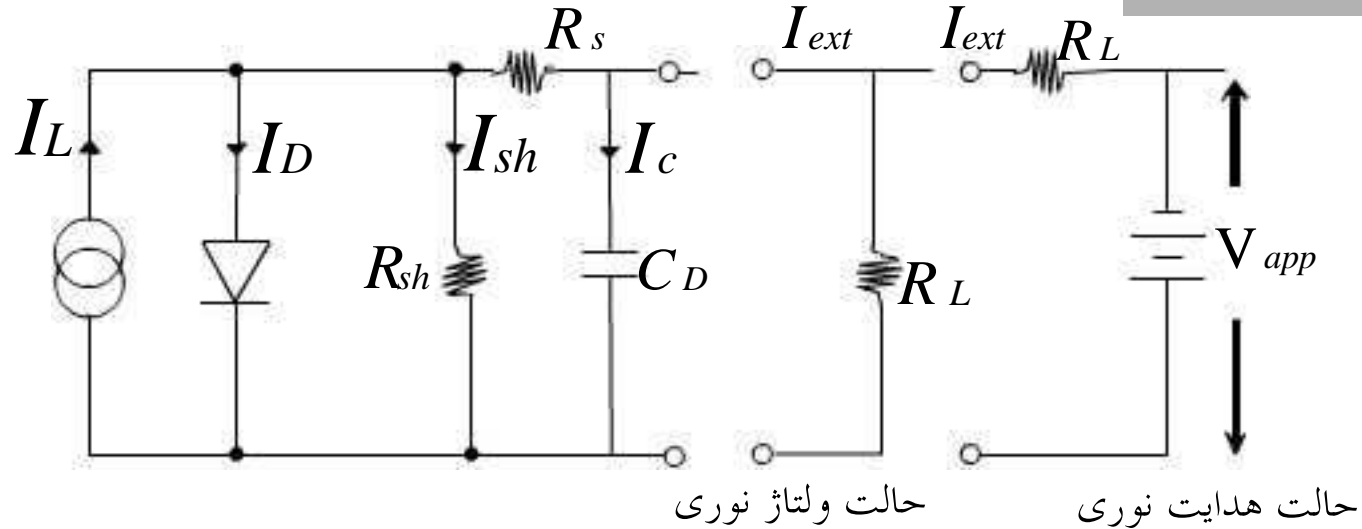
1: حالت ولتاژ نوری Photovoltaic

در سلولهای خورشیدی بکار می رود و در آن هیچ بایاس خارجی اعمال نمی شود. جریانی از بار خارجی می گذرد تا توان تولید کند.

2: حالت هدایت نوری

در آشکارسازها بکار می رود و دیود در بایاس معکوس است.

مدار معادل دیود نوری



این افزاره رامي توان با يك منبع جريان نوري نمايش I_L داد كه ديودي را تغذيه ميکند. مشخصات داخلي افزاره بصورت مقاومت موازي و خازن R_{sh} ل سازی شده است. مقاومت سری R_s دیود. در حالت ولتاژ نوری، دیود به مقاومت بزرگ وصل است. در حالت هدایت نوری، به بار و منبع تغذیه وصل مي شود.

پارامترهای سلول خورشیدی

1) دیود در حالت مدار باز $I=0$

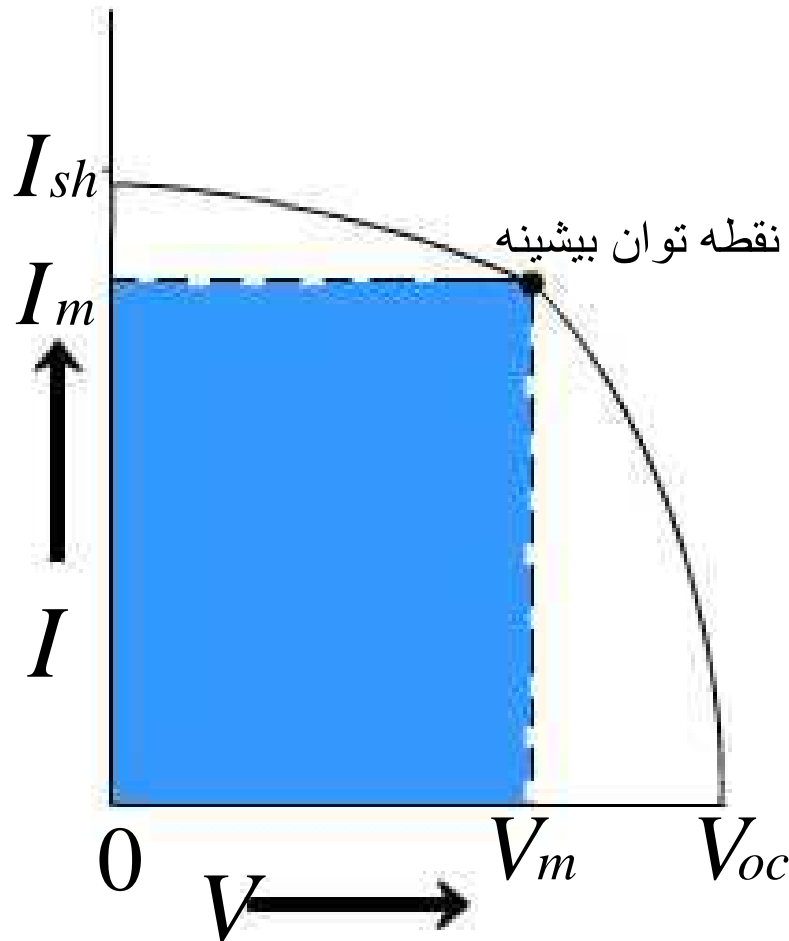
ولتاژ دوسر دیود:

$$V_{oc} = \frac{mk_B T}{e} \ln \left(1 + \frac{I_L}{I_0} \right)$$

2) خروجی اتصال کوتاه $R=0, V=0$

$$I = I_{sh} = I_L$$

منحنی جریان دیود در سلول خورشیدی بر حسب ولتاژ



توان الکتریکی داده شده به بار:

$$P = I_L V - I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right] V$$

بازده تبدیل (Conversion Efficiency) سلول خورشیدی

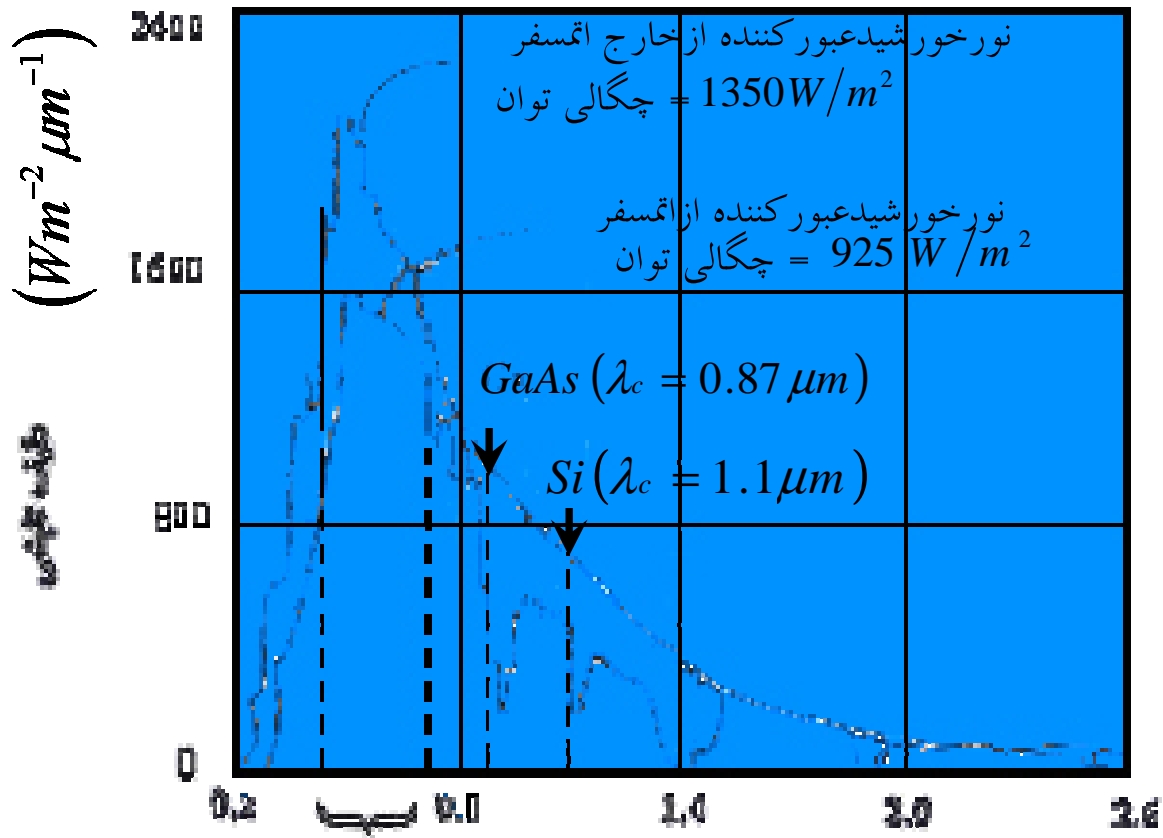
$$\eta_{conv} = \frac{P_m}{P_{in}} \times 100 = \frac{I_m V_m}{P_{in}} \times 100$$

بازده بستگی شدیدی به تطبیق انرژی شکاف نیمه هادی با طیف انرژی خورشیدی دارد.

ضریب پر کردن :Fill Factor

$$F_f = \frac{I_m V_m}{I_{sh} V_{oc}}$$

طیف تابش انرژی خورشیدی



سلول خورشیدی

GaAs

تطبیق

بهتری

باطیف انرژی

خورشیدی دارند

و بازده

بیشتری

رانتیجه میدهند.

گفتار
مربی

طرح درس

مثال:

جریان نوری یک پیوند p-n که تحت بایاس معکوس 2V قرار دارد را حساب کنید؟
 $G_L = 10^{22} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$

مساحت دیود $A = 10^4 \mu\text{m}^2$

آلایش طرف p $N_a = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

آلایش طرف n $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

ضریب نفوذ الکترون $D_n = 20 \text{ cm}^2/\text{s}$

ضریب نفوذ حفره $D_p = 12 \text{ cm}^2/\text{s}$

طول عمر حامل اقلیت الکترون $\tau_n = 10^{-8} \text{ s}$

طول عمر حامل اقلیت حفره $\tau_p = 10^{-8} \text{ s}$

حل (1):

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = 4.5 \mu m$$

طول نفوذ:

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = 3.46 \mu m$$

ولتاژ درون ساخت:

$$V_{bi} = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{N_a N_d}{N_i^2} \right) = 0.715 V$$

$$\frac{k_B T}{e} = 0.026$$

پهنای ناحیه تخلیه:

$$W = \left\{ \frac{2 \epsilon_s}{e} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) (V_{bi} + V_R) \right\}^{\frac{1}{2}} = 0.73 \mu m$$

حل (2):

چون L_p و L_n بزرگتر از W است، جریان نوری سریع جزء کوچکی از جریان نوری کل است.

$$I_L = eAG_L (W + L_n + L_p) = 0.137 \text{ mA}$$

جریان نوری حیلی بزرگتر از جریان اشباع معکوس I_0 و جهت آن مشابه جهت جریان معکوس است.

مثال:

ولتاژ مدار باز سلول خورشیدی با مشخصات زیر را حساب کنید.

$$\tau_n = 3 \times 10^{-7} \text{ s} \quad \text{زمان باز ترکیب الکترون}$$

$$\tau_p = 10^{-7} \text{ s} \quad \text{زمان باز ترکیب حفره}$$

$$I_L = 25 \text{ mA}$$

$$A = 1.0 \text{ cm}^2$$

$$D_n = 20 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$N_a = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$D_p = 10 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

حل:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = 24.5 \mu m$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = 10.0 \mu m$$

جریان اشباع معکوس

$$I_o = A \left[\frac{eD_n n_p}{L_n} + \frac{eD_p p_n}{L_p} \right] = A e n_i^2 \left[\frac{D_n}{L_n N_a} + \frac{D_p}{L_p N_d} \right] = 3.66 \times 10^{-11} A$$

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{e} \ln \left(1 + \frac{I_L}{I_o} \right) = 0.53 V$$

مثال:

الف) ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه سلول خورشیدی؟
ب) اگر فاکتور پرکردن برابر ۰.۸ باشد، توان گرفته شده؟
ج) اگر احتیاج به توان 10W در سطح ولتاژ 10V داشته باشیم تعداد سلولهای سری و ردیف موازی مورد نیاز؟
ویژگیهای این دیود مثل مثال قبل است.

$$A = 1 \text{ cm}^2$$

$$I_L = 25 \text{ mA}$$

$$I_o = 3.66 \times 10^{-11} \text{ A}$$

حل (1):

$$V_{oc} = 0.53V$$

$$I_{sh} = 25 \text{ mA}$$

از مثال قبل:

توان هر سلول:

$$P = 0.8 I_{sh} V_{oc} = 1.06 \text{ mW}$$

$$V_M \approx 0.9 V_{oc}$$

$$10V$$

سلول سری مورد نیاز برای ولتاژ خروجی

$$I_m \approx 0.9 I_{sh}$$

$$N_{(سری)} = \frac{10}{0.9 \times 0.53} \cong 24$$

کل سلول مورد نیاز

ردیف موازی مورد نیاز برای توان 10 W

$$45 \times 24 = 1080$$

$$N_{(موازی)} = \frac{10W}{10V (25 \times 10^{-3} \times 0.9A)} = 45$$

آشکارساز هدایت نوری

➤ ازقطعه ای نیمه هادی که بایاسی در دوسر آن است، تشکیل شده.
➤ وقتی نوری با طول موج مناسب به نیمه هادی می تابد زوج الکترون حفره هایی بوجود میآید که توسط میدان الکتریکی جمع آوری می شوند.

➤ بهره زیاد دارد، چون به ازای برخورد هر فوتون، بیش از یک الکترون (حفره) جمع آوری میشود.

آشکارساز هدایت نوری

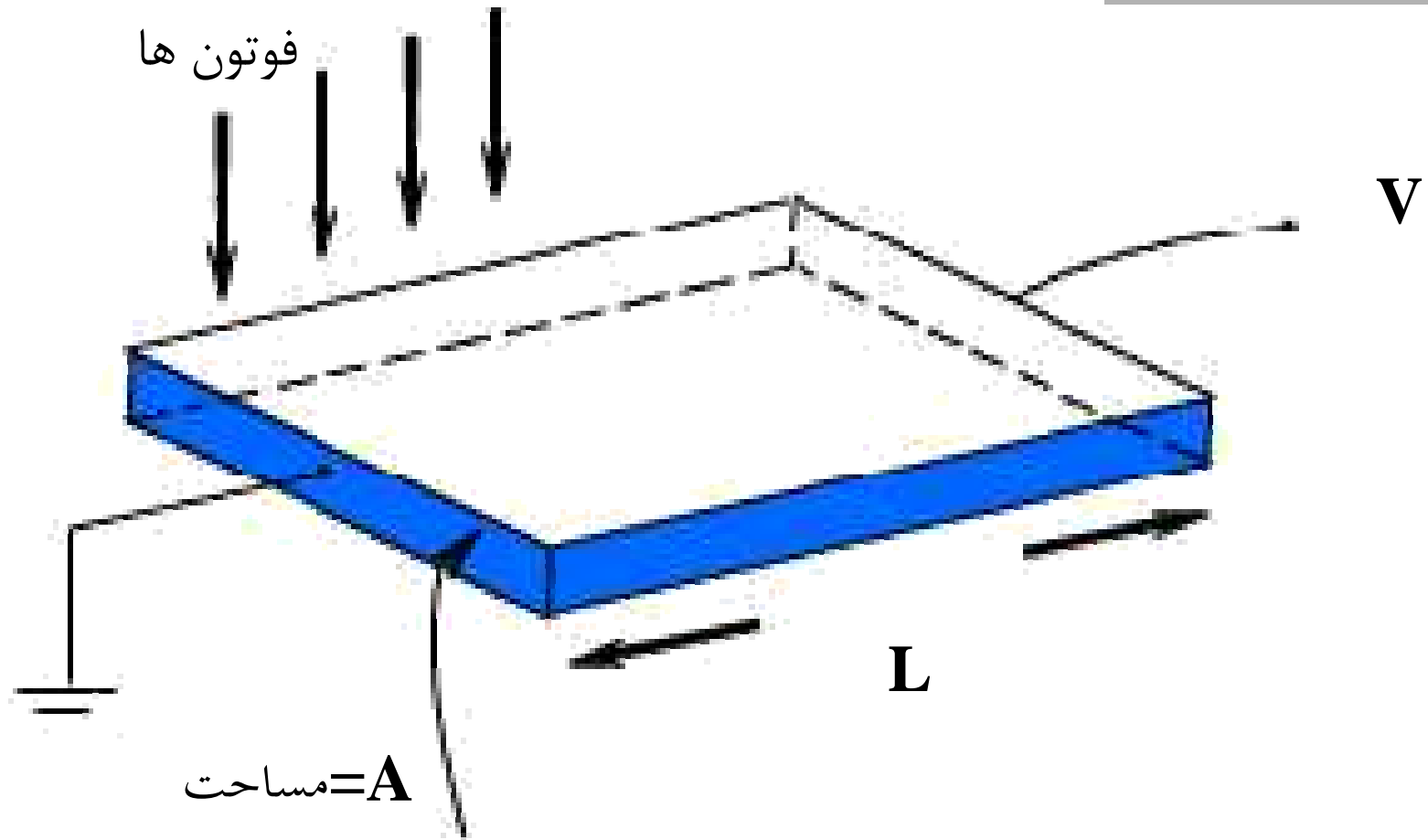
اگر n_o و p_o چگالی الکترون و حفره در تاریکی باشند، درغیاب سیگنال نوری، هدایت برابر است با:

$$\sigma_o = e(\mu_n n_o + \mu_p p_o)$$

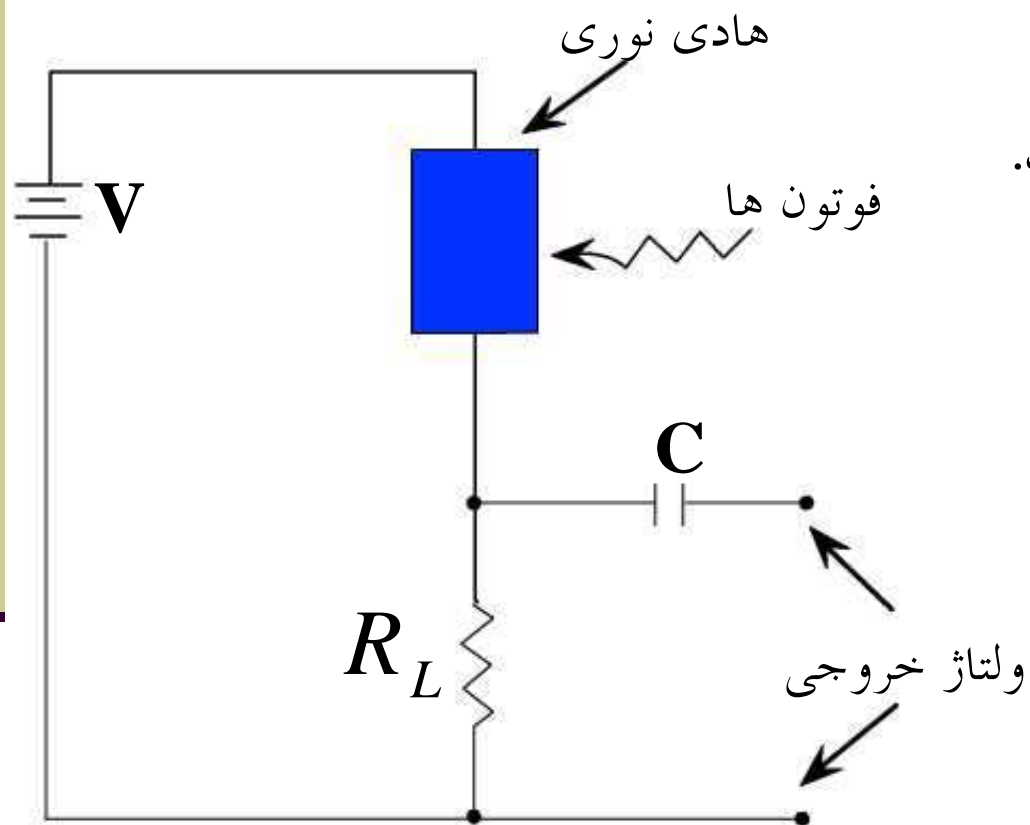
اگر سیگنال نوری، حامل های اضافی با چگالی $\delta_n = \delta_p$ تولید کند، هدایت عبارت است از:

$$\sigma = e[\mu_n (n_o + \delta_n) + \mu_p (p_o + \delta_p)]$$

آشکارساز هدایت نوری



مدار بایاس برای آشکارساز هدایت نوری



نور موجب تغییر مقاومت هادی نوری و تغییر جریان می شود. اگر فقط سیگنال ac مورد نظر باشد از خازن استفاده میشود.

روابط آشکارساز هدایت نوری

$$t_{tr} = \frac{L}{\mu_n F}$$

زمان گذر الکترون ها
 F : میدان الکتریکی

$$I_{Lp} = eG_L AL$$

جریان نوری اولیه

جریان نوری تولید شده در مدار

$$I_L = eG_L \left(\frac{\tau_p}{t_{tr}} \right) \left(1 + \frac{\mu_p}{\mu_n} \right) AL$$

بهره آشکار ساز هدایت نوری

از آنجا ناشی می شود که هر الکترون قبل از اینکه بتواند با حفره تولید شده توسط نور باز ترکیب شود، چند بار مدار را طی می کند.

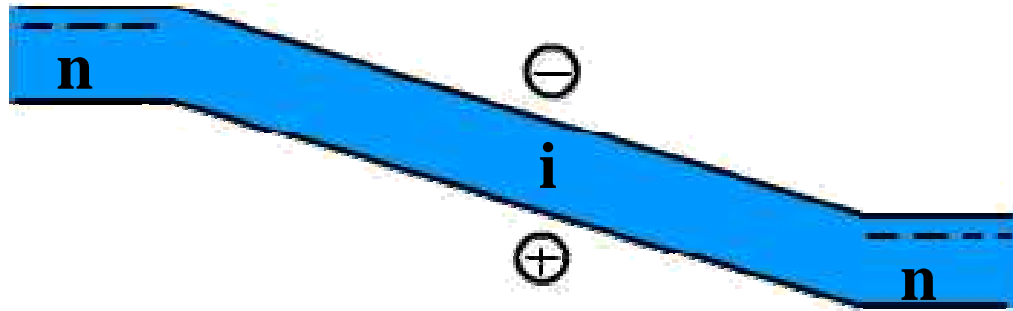
اگر τ_p بزرگ و t_{tr} کوچک باشد بهره زیاد می شود. ولی بهبود بهره باعث کند شدن سیستم می شود، چون سرعت با τ_p کنترل می شود نه با t_{tr} .

$$G_{ph} = \frac{I_L}{I_{Lp}} = \frac{\tau_p}{t_{tr}} \left(1 + \frac{\mu_p}{\mu_n} \right)$$

عیب آشکارساز هدایت نوری

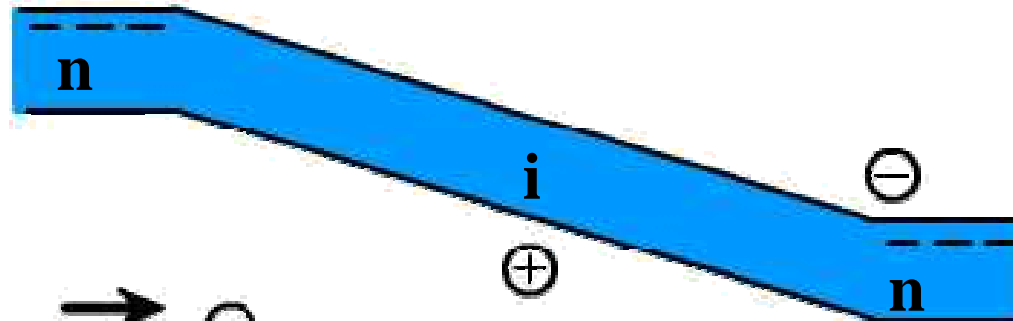
- در تاریکی، افزاره هدایت بالایی دارد و جریان تاریکی بزرگی ایجاد می کند.
- بنابراین اغتشاش جریان تاریکی زیادی دارد.

طرح واره ای از چگونگی پیدایش بهره در آشکارساز هدایت نوری



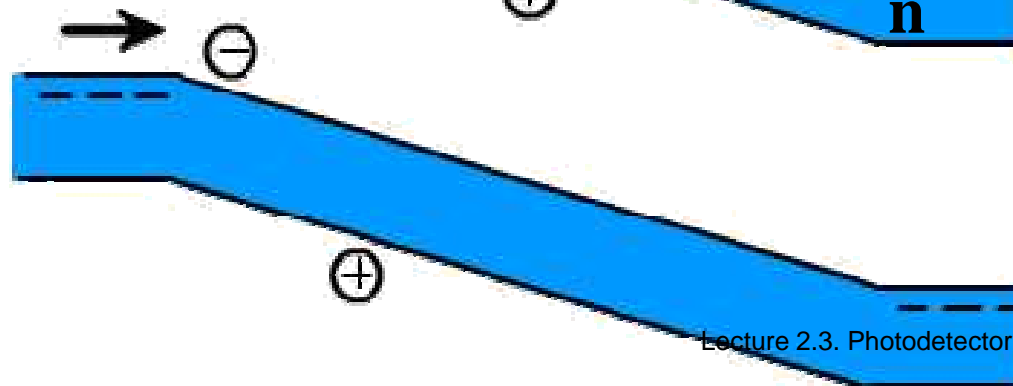
زوج الکترون حفره تولید شده توسط فوتون

$$t = t_0$$



الکترون جمع آوری شده در اتصال قبل از اینکه حفره بتواند جمع آوری شود

$$t = t_0 + t_l$$



الکترون تزریق شده از اتصال دیگر جهت تأمین اصل خنثی بودن

$$t = t_0 + t_l + \delta_t$$

مثال:

آشکار ساز نوری GaAs با طول $25 \mu m$ و مساحت $10^{-6} cm^2$ و طول عمر حامل اقلیت $10^{-7} s$ ، ولتاژ بایاس $5 V$

1) بهره با استفاده از مدل قابلیت حرکت ثابت؟

$$\mu_n = 8000 \text{ cm}^2 / V - s$$

$$\mu_p = 1000 \text{ cm}^2 / V - s$$

2) بهره با استفاده از رابطه سرعت-میدان مناسب؟

حل (1):

$$t_{tr} = \frac{L}{\mu_n F} = \frac{L^2}{\mu_n V} = 1.56 \times 10^{-10} \text{ s} \quad (1)$$

$$G_{ph} = \frac{\tau_p}{t_{tr}} \left(1 + \frac{\mu_p}{\mu_n} \right) = 641.2$$

(2) رابطه مناسب سرعت بر حسب میدان

$$v(e) \cong 1.5 \times 10^7 \text{ cm/s}$$

$$v(h) \cong 2 \times 10^6 \text{ cm/s}$$

حل (2):

در میدان اعمال شده $2kV/cm$ زمان گذر عبارت است از

$$t_{tr} = \frac{L}{v(e)} = 1.67 \times 10^{-10} \text{ s}$$

$$G_{ph} = \frac{\tau_p}{t_{tr}} \left(1 + \frac{v(h)}{v(e)} \right) = 678.6$$

خطای ایجاد شده در میدان های پایین کم است.

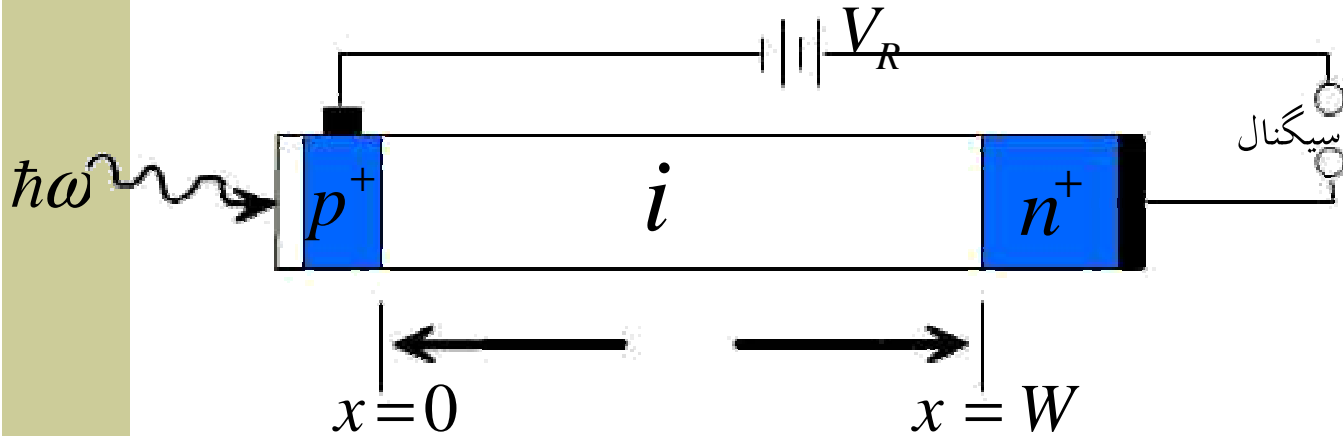
اگر میدان اعمال شده بیشتر باشد، خطای استفاده از مدل قابلیت حرکت ثابت بزرگتر می شود.

آشکار ساز نوری p-i-n

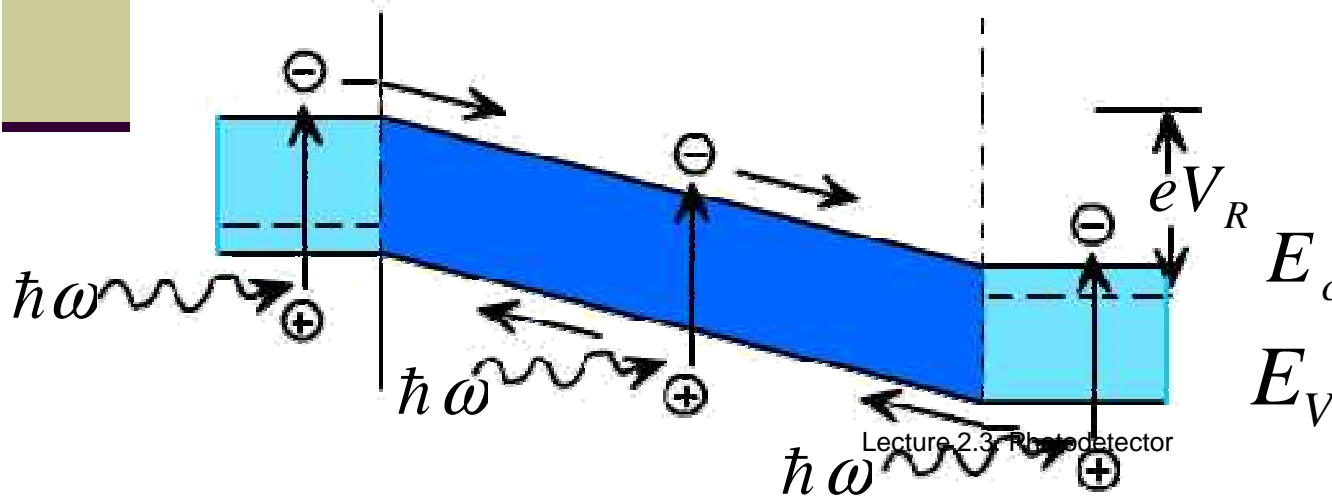
بایاس دیود معکوس است به گونه ای که کل ناحیه i تخلیه می شود و میدان الکتریکی شدیدی در آن بوجود می آید. پاسخ افزاره سریع است زیرا جریان نوری اغلب ناشی از جریان نوری سریع است. جریان تاریکی خیلی کمی دارد در نتیجه نسبت سیگنال به اغتشاش آن بزرگ است.

وقتی فوتون ها در ماده ای نفوذ می کنند، شدت آنها طی جذب کاهش می یابد.

آشکار ساز نوری p-i-n



حاملها از ناحیه تخلیه جمع آوری می شوند.



Lecture 2.3 Photodiode

اگر ناحیه ذاتی
ضخیم باشد،
بیشتر جریان
نوری توسط
حامل
های
جمع آوری
شده از ناحیه
تخلیه تأمین
می شود.

جریان نوری آشکارساز نوری

$$I_L = eA \int_0^W G_L(x) dx$$

$$G_L(x) = \alpha J_{ph}(0) \exp(-\alpha x)$$

$J_{ph}(0)$: شار فوتون در $x = 0$ (تعداد بر cm^2 بر ثانیه)

$$I_L = eA J_{ph}(0) [1 - \exp(-\alpha W)]$$

R : ضریب بازتاب سطح **Reflectivity**

کسری از فوتون ها که عملاً وارد افزاره می شود $1-R$ است.

$$I_L = eA J_{ph}(0) (1 - R) [1 - \exp(-\alpha W)]$$

بازده آشکارسازنوری

$$\eta_{\text{det}} = \frac{I_L}{AJ_{ph}(0)} = (1 - R)[1 - \exp(-\alpha W)]$$

برای بازده بالا، R کوچک (با قرار دادن پوشش های ضد بازتاب Anti - Reflective Coating) و W طویل لازم است.

اگر W طویل باشد، زمان گذر که سرعت را کنترل می کند، خیلی بزرگ می شود و سرعت کاهش می یابد.

انتخاب ماده آشکارساز p-i-n

برای کاربردهای مخابراتی Si مناسب است مگر اینکه سرعت بالا لازم باشد.

در طول موج های بلندتر، از Ge استفاده می شود.

برای کاربردهای سرعت بالا نیاز به آشکارسازهایی با شکاف انرژی مستقیم داریم. بنابراین InGaAs به طور گسترده ای در کاربردهای مخابرات راه دور بکار می رود.

در کاربردهای دیدشب ازموادی که شکاف انرژی خیلی باریکی دارند ، استفاده می شود. مثل InAs و InSb

مسائل مهم در طراحی افزاره پس از انتخاب ماده

1) حداقل کردن بازتاب سطح با استفاده از پوشش های ضد بازتاب

2) حداکثر کردن جذب در ناحیه تخلیه استفاده از آینه های فلزی

3) حداقل کردن بازترکیب حامل ها استفاده از مواد با درجه خلوص زیاد

4) حداقل کردن زمان گذر کوتاه کردن ناحیه تخلیه تا حد امکان

مثال:

چگالی جریان نوری دیود نوری را حساب کنید.

توان نوری $1 W / cm^2$ پهنای ناحیه ذاتی $10 \mu m$

$$\hbar \omega = 1.43 eV$$

حل: شار فوتونی

$$\phi_o = \frac{P_{op}}{\hbar \omega} = 4.37 \times 10^{18} cm^{-2} s^{-1}$$

ضریب جذب برای فوتون هایی با انرژی $1.43 eV$ $\alpha = 700 cm^{-1}$

$$J_L = e \phi_o \{1 - \exp(-\alpha W)\} = 0.352 A/cm^2$$

آشکارساز نوری بهمنی (APD)

از مشخصات این نوع آشکارساز بهره بسیار بالای آن است. ضرایب یونیزه شدن برخوردی الکترون ها و حفره ها را با α_{imp} و β_{imp} نمایش می دهند. از آنجا که فرآیند تکثیر تصادفی است، این افزاره دارای اغتشاش زیادی است که سطح اغتشاش به ضریب تکثیر (Multiplication Factor) حامل ها و نسبت $\alpha_{imp} / \beta_{imp}$ بستگی دارد.

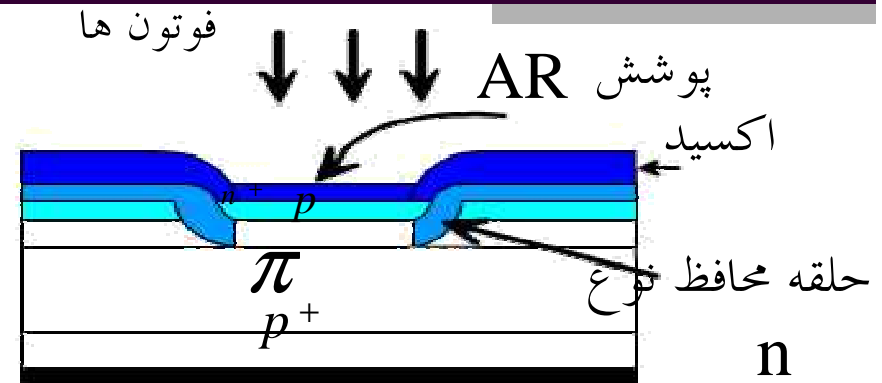
ساختار «به هم رسیدن» (Reach Through) در APD ها

π ناحیه بدون ناخالصی

الکترونها باعث شروع فرایند تکثیر می شوند.

نیمرخ میدان الکتریکی. میدان شدید در پیوند n^+p موجب فرایند بهمینی می شود.

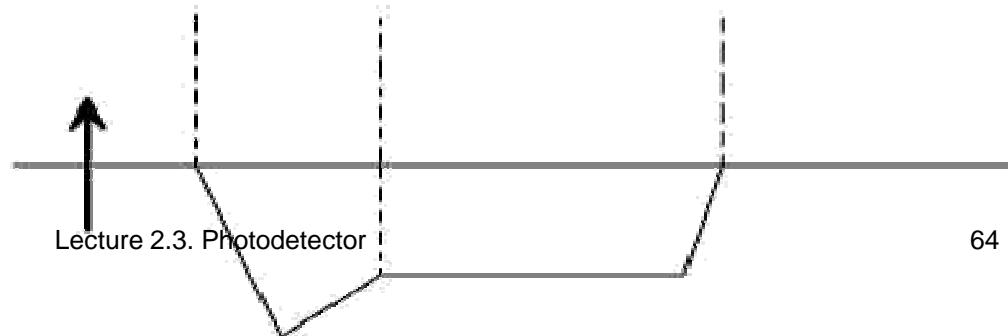
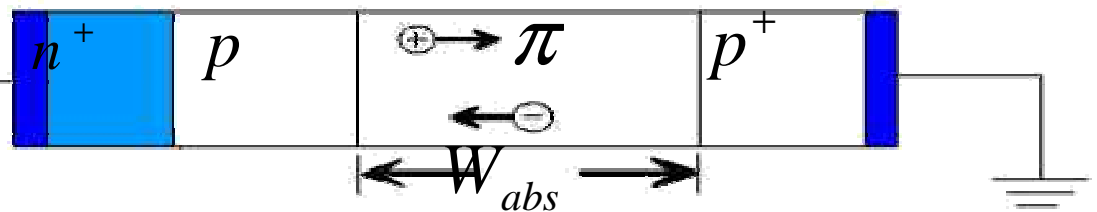
میدان الکتریکی



ناحیه بهمینی

ناحیه جذب

V_R



مسائل طراحی APD

- (۱) ناحیه تخلیه ضخیم
- (۲) ناحیه جذب و بهمنی مجزا
- (۳) انتخاب الکترون یا حفره برای تزریق در ناحیه بهمنی
- (۴) استفاده از گرماخور Heat Sink
بهره جریان به بایاس ونوسانات حرارتی وابسته است.
- (۵) استفاده از حلقه های محافظ Guard Ring
برای حداقل کردن میدان در اطراف لبه های پیوند.
حلقه محافظ ناخالصی n است که یک ناحیه π در قسمت p ایجاد میکند.

ضریب تکثیر در APD

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V - IR}{V_B} \right)^{n'}}$$

n' : وابسته به طراحی افزاره

R : مقاومت مؤثر

V : بایاس اعمالی

V_B : ولتاژ شکست دیود

مزایا و معایب APD

مزیت: بهره بسیار بالا

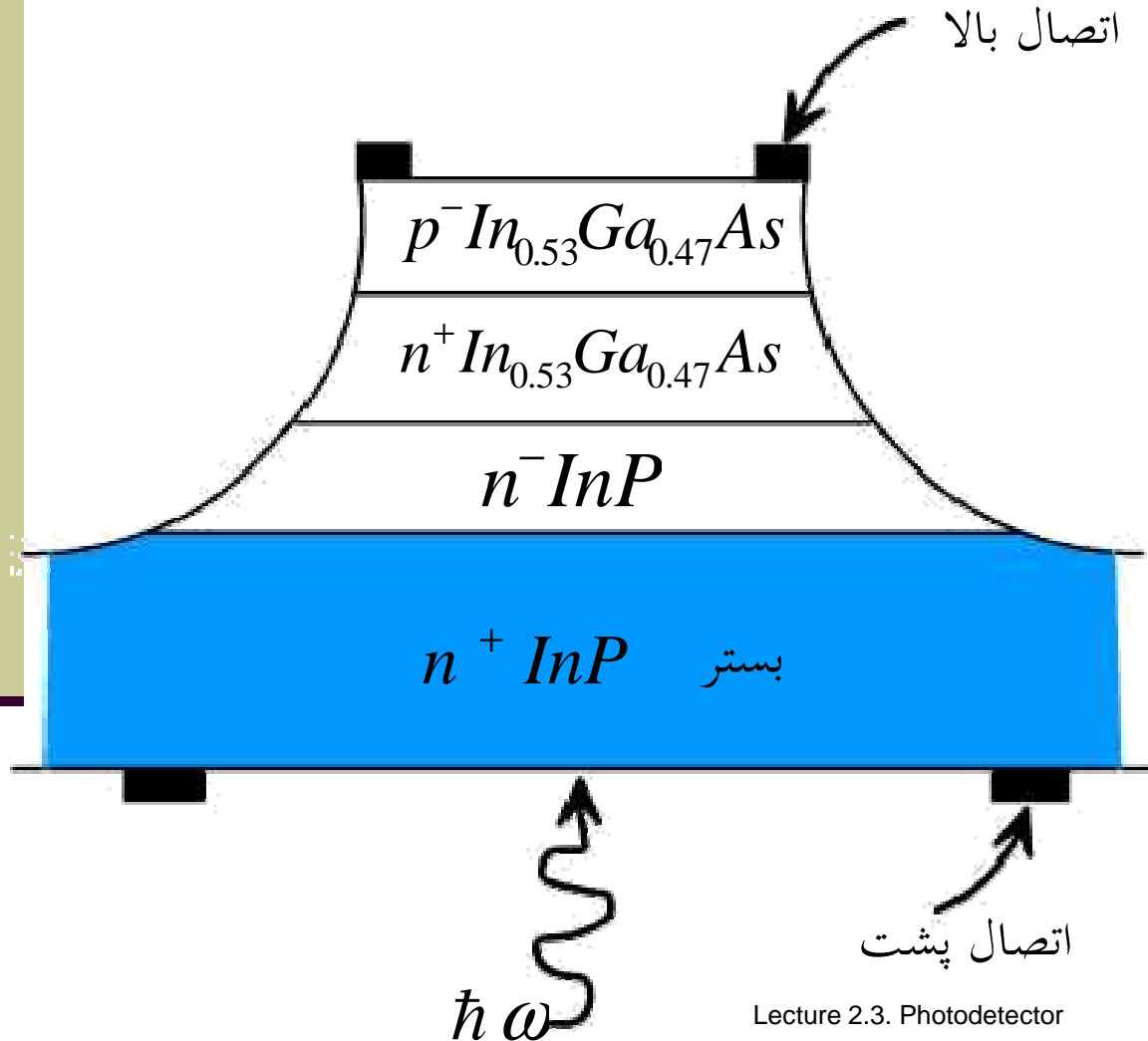
معایب: اغتشاش زیاد

پهنای باند کوچک

نیاز به منبع تغذیه با ولتاژ بسیار بالا

نیاز به مدارات پایدارسازی حرارتی

سطح مقطع دیود نوری بهمنی



در نیمه هادی های دارای شکاف انرژی مستقیم، به علت ناحیه جذب کوتاه می توان از ناحیه مشترکی برای فرایند های جذب و بهمنی استفاده کرد.

مثال:

(۱) ضریب تکثیر (۲) شار فوتون (۳) جریان نوری

بسامد نوری $\nu = 4.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$

پارامتر n' برای تکثیر = 2

$$P_{op} \cdot A = 50 \text{ mW}$$

$$\eta_{det} = 90\%$$

$$V_B = 35 \text{ V}$$

$$V = 34 \text{ V}$$

$$I_o = 10 \text{ nA}$$

حل:

$$M = \left[1 - \left(\frac{V - IR}{V_B} \right)^{n'} \right]^{-1} = 16.67 \quad (1)$$

$$I_{ph} = \frac{P_{op} A}{h\nu} = 1.68 \times 10^{17} \text{ s}^{-1} \quad (2)$$

(3) جریان تکثیر نشده

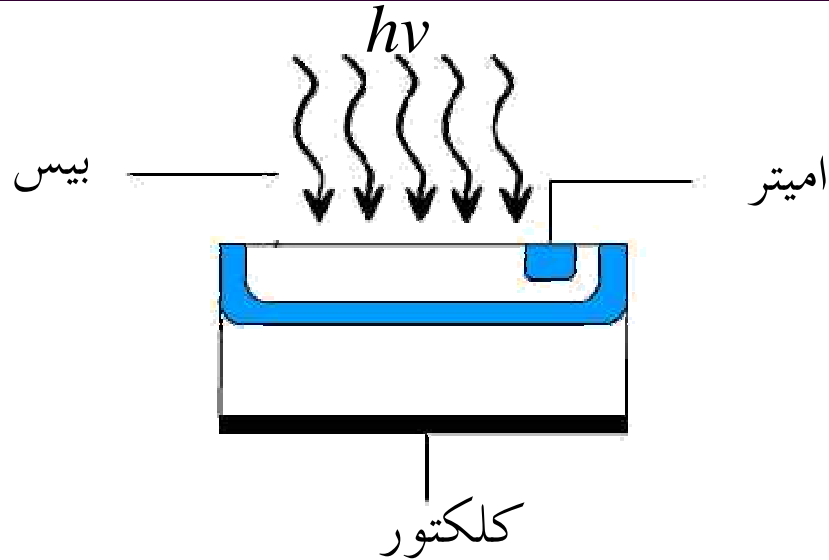
$$I_L = e \eta_{det} I_{ph} = 24.16 \text{ mA}$$

جریان تکثیر شده

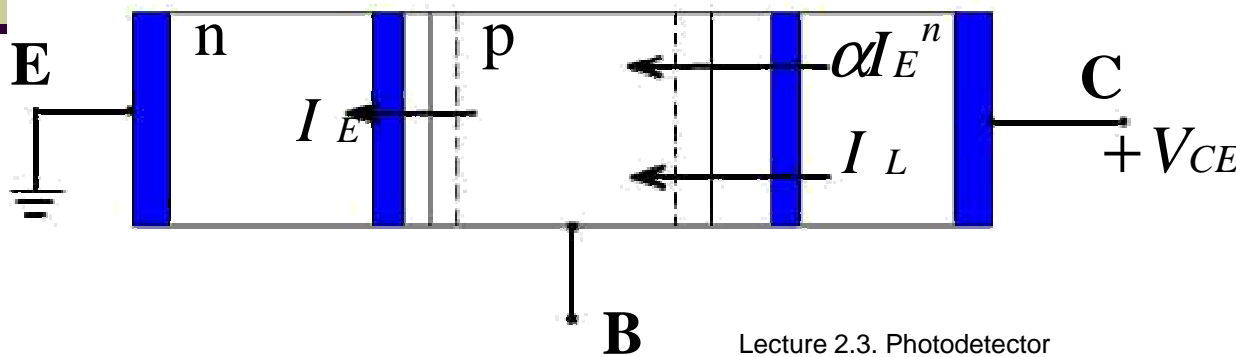
$$M \cdot I_L = 0.4 \text{ A}$$

Phototransistor

ترانزیستور نوری



افزاره ای دوقطبی است (BJT) که به علت خاصیت ترانزیستوری، بهره زیادی دارد و کم اغتشاش است.



ترانزیستور نوری

این افزازه با بیس مدار باز کار می کند.

الکترون، حفره های تولید شده در پیوند بایاس معکوس بیس-کلکتور ، در میدان جاروب میشوند تا جریان نوری I_L را ایجاد کنند.

حفره ها به بیس تزریق می شوند و موجب تزریق الکترون ها از امیتر می شوند.

$$I_C = I_E$$

رابطه جریان ها به صورت زیر است :

$$I_E = \alpha I_E + I_L$$

α : بهره جریان بیس مشترک

$$\frac{I_C}{I_L} = \frac{1}{1 - \alpha}$$

معایب ترانزیستور نوری

به لحاظ خازنهای خیلی بزرگ مربوط به پیوند بیس - کلکتور و بیس - امیتر ، در فرکانس های بالا پاسخ خوبی ندارد .

آشکار سازهای فلز _ نیمه هادی

از سد شاتکی حاصل بین فلز و نیمه هادی با آرایش کم استفاده می شود .

فایده مهم این افزاره این است که یک افزاره حامل اکثریت است و از تأخیر سرعت ناشی از طول عمر حاملهای اقلیت رنج نمی برد .

انواع آشکارسازهای فلز - نیمه هادی

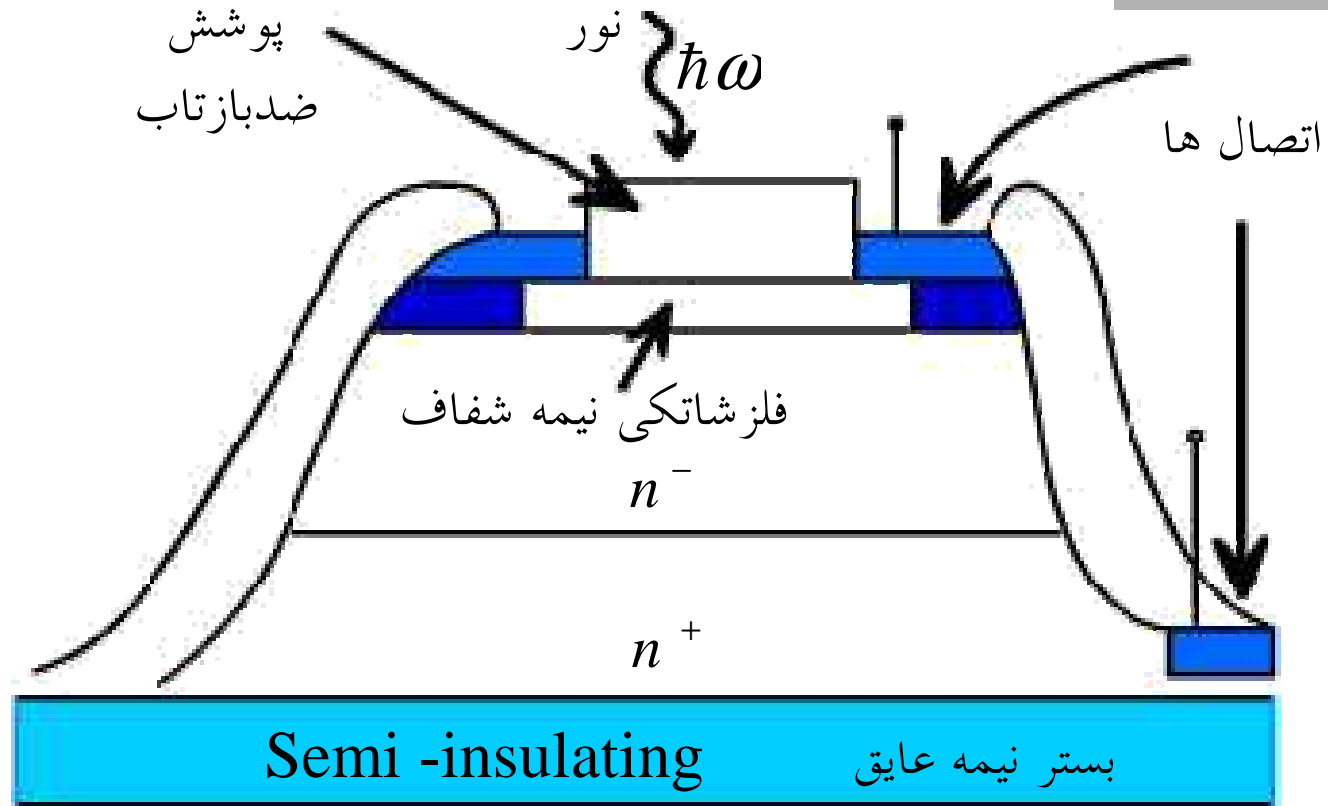
۱. دیود مسا

Mesa Diode

۲. آشکارساز فلز - نیمه هادی - فلز (MSM)

Metal - Semiconductor - Metal

دیود مسا



آشکار ساز سد شاتکی

Lecture 2.3. Photodetector

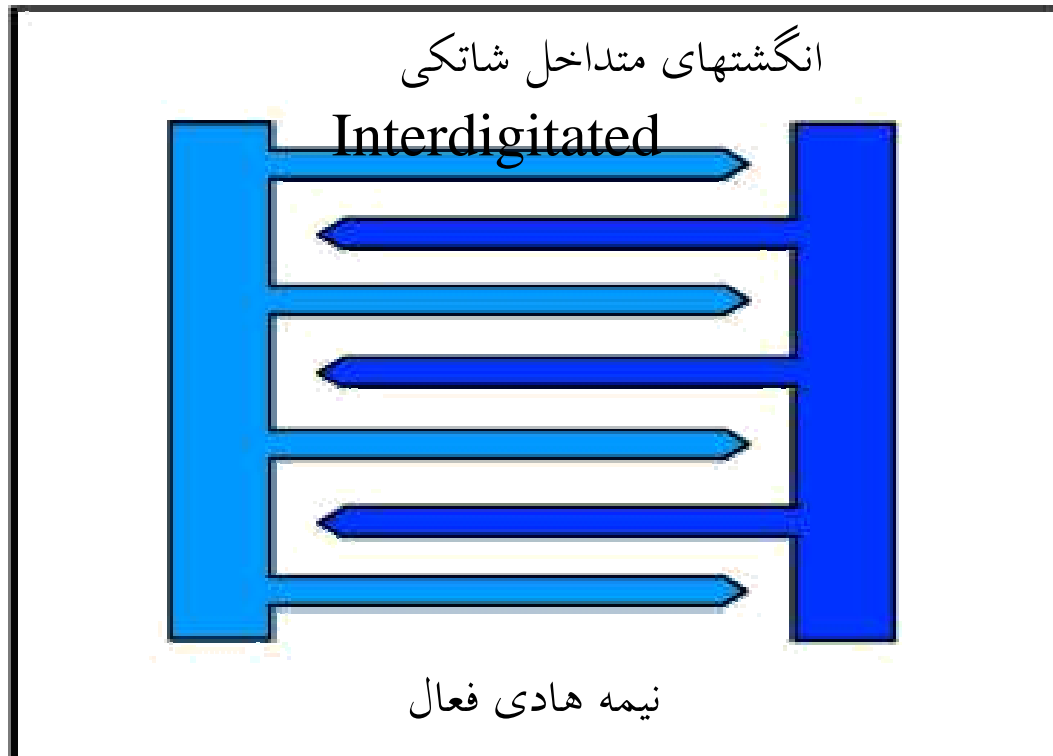
دیود مسا

n^- : ناحیه جذب کننده فعال است که آلایش کمی دارد.

لایه فلز نیمه شفاف به قدر کافی ضخیم است تا سد شاتکی را تشکیل دهد، اما در عین حال به قدر کافی نازک نیز هست تا نور از آن عبور کند.

برای دستیابی به کارایی بالا، لایه فلز با پوششهای عایق ضد بازتاب پوشانده می شود.

آشکار ساز فلز - نیمه هادی - فلز



دیود نوری **MSM** با استفاده از انگشتی های متداخل شاتکی

آشکارساز فلز _ نیمه هادی _ فلز

از دو سد شش‌اتکی نزدیک به هم استفاده شده است.
در این افزاره یک اتصال معکوس و دیگری مستقیم بایاس می‌شوند.
جریان تاریکی از طریق تزریق الکترون در اتصال بایاس معکوس تعیین می‌شود.

از دیودهای **فلز- نیمه هادی- فلز** برای کاربردهای مدارهای مجتمع نوری استفاده میشود.

اغتشاش آشکار سازها (1)

سیگنال نوری باید جریانی بزرگتر از اغتشاش افزاره را تولید کند.
الکترون ها ذرات گسسته ای هستند که جریان افزاره را تولید می کنند .
هنگام عبور جریان در افزاره ، همه الکترونها با سرعت و انرژی یکسانی حرکت نمی کنند.

احتمال بدست آوردن N ذره در بازه Δt :

$$P(N, \Delta t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(a\Delta t)}} \exp\left(-\frac{(N - a\Delta t)^2}{2a\Delta t}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \bar{N}}} \exp\left(-\frac{\Delta N^2}{2\bar{N}}\right)$$

اغتشاش آشکارسازها (2)

\bar{N} , $a \Delta t$: میانگین مقدار ذراتی که در بازه Δt از افزاره عبور می کند.

ΔN : انحراف از مقدار میانگین

این تابع وقتی حداکثر است که :

$$N = \bar{N} = a\Delta t$$

Shot Noise

اغتشاش ضربه ای

اغتشاش ضربه ای:

$$\sqrt{(\Delta N)^2} = \sqrt{(N - \bar{N})^2} = \sqrt{\bar{N}}$$

نسبت سیگنال به اغتشاش برای آشکارساز با اغتشاش ضربه ای :

$$SNR = \frac{\bar{N}}{\sqrt{\bar{N}}} = \sqrt{\bar{N}} = \sqrt{a \Delta t}$$

$$SNR = \sqrt{\frac{a}{2 f}}$$

اگر f پهنای باند افزاره باشد:

$$I_{sh} = \sqrt{2 e I f}$$

جریان اغتشاش ضربه ای :

منابع اغتشاش

Receiver Amplifier تقویت کننده گیرنده ➤

سیگنال تولید شده توسط آشکار ساز را تقویت می شود.

اغتشاش گرمایی مربوط به تابش جسم سیاه ➤

Blackbody Radiation

اغتشاش حرارتی نقش مهمی در اغتشاش مقاومتی تقویت کننده گیرنده دارد.

مشخصات آشکارساز

توان نوری لازم در پهنای باند f ➤

$$P_{OP} \cdot A = NEP = \frac{2 \hbar \omega f}{\eta Q}$$

NEP توان معادل اغتشاش Noise Equivalent Power

آشکار کنندگی Detectivity ➤

$$D = \frac{1}{NEP}$$

آشکار کنندگی ویژه Specific Detectivity ➤

$$D^* = \frac{\sqrt{Af}}{NEP}$$

اثر فرآیندهای تکثیر در افزاره بهمنی

جریان اغتشاش در اثر تکثیر حامل ها

$$(I_{sh})^2 = 2eMF_n I_f$$

M : ضریب تکثیر

F_n : ضریب اغتشاش

ضرب اغتشاش برای تکثیر الکترون و حفره

$$F_e = M_e \left[1 - \frac{(1 - \bar{K})(M_e - 1)^2}{M_e^2} \right] \quad \text{تکثیر الکترون} \quad \blacktriangleright$$

$$F_h = M_h \left[1 + \frac{(1 - \bar{K})(M_h - 1)^2}{\bar{K} M_h^2} \right] \quad \text{تکثیر حفره} \quad \blacktriangleright$$

\bar{K} : نسبت $\beta_{imp} / \alpha_{imp}$ مربوط به ضرایب یونیزه شدن برخوردی الکترون و حفره

$M_e (M_h)$: ضرب تکثیر الکترون (حفره)

ماده با \bar{K} کوچکتر، ضرب اغتشاش کمتری دارد.

مثال:

اگر عامل محدود کننده اغتشاش ضربه ای باشد، حداکثر پهنای باند
چقدر است؟

شار (S / ذره) 8×10^6

SNR برابر واحد

حل:

$$SNR = \sqrt{\frac{a}{2f}} = \sqrt{\frac{8 \times 10^6 \text{ s}^{-1}}{2f \text{ s}^{-1}}} = 1$$

$$f = 4 \times 10^6 \text{ Hz}$$

مثال:

جریان لازم برای اطمینان از SNR برابر 100 (یا 40dB) و محدود شده با اغتشاش ضربه ای در 1GHz:

حل:

$$a = (SNR)^2 (2f) = 2 \times 10^{13} \text{ (ذره /s)}$$

$$I = ea = 3.2 \times 10^{-6} \text{ A}$$

مثال:

اگر آشکارساز توسط اغتشاش ضربه ای محدود شده باشد، حداقل انرژی نوری لازم برای هرپالس را جهت کد کردن بیت او میانگین توان لازم را حساب کنید. ارسال توسط لیزر GaAs

آهنگ خطای بیت 10^{-9} آهنگ ارسال 1Gbit/s

حل:

$$\bar{N} = -\ln(10^{-9}) = 21$$

$$E(1) = \bar{N} \hbar \omega = 21 (1.43) eV = 4.8 \times 10^{-18} J$$

$$\text{توان} = \frac{4.8 \times 10^{-18} J}{2} (10^9 s^{-1}) = 2.9 \times 10^{-9} W$$

مثال:

- 1) پاسخ دهی 2) توان معادل اغتشاش 3) آشکار کنندگی
- 4) آشکار کنندگی ویژه افزاره

$$I_{sh} = 10 \text{ pA} \quad \text{جریان اغتشاش}$$

$$A = 1 \text{ cm}^2$$

$$\lambda = 1 \mu\text{m}$$

$$\eta_Q = 20\%$$

$$f = 1 \text{ Hz}$$

حل:

$$R = \frac{\eta_{qe}}{\hbar \omega} = 0.16 \text{ A/W}$$

(1)

$$NEP = \frac{I_{sh} \hbar \omega}{\eta_{qe}} = 62 \text{ pW}$$

(2)

$$D = \frac{1}{NEP} = 1.61 \times 10^{10} \text{ W}^{-1}$$

(3)

$$D^* = D(Af)^{\frac{1}{2}} = 1.61 \times 10^{10} \text{ cm} - \text{Hz}^{\frac{1}{2}} / \text{W}$$

(4)

نکات مهم در آشکارسازها

1) قابلیت تنظیم Tunability

استفاده از موادی با شکاف انرژی مختلف

2) سرعت

آشکارساز فلز- نیمه هادی شاتکی

3) قابلیت مجتمع شدن

ترانزیستورهای دو قطبی و FETها

Clip2ni.com

