Wykład VI

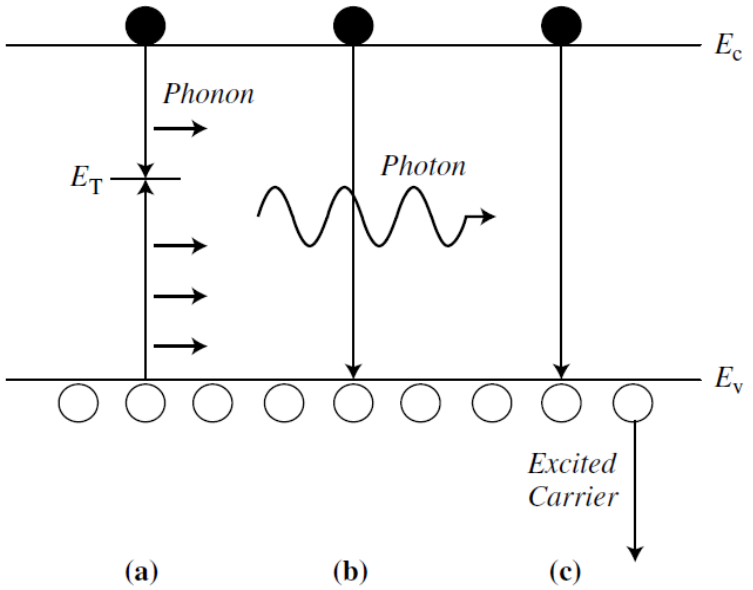
1. Rekombinacja bezpośrednia
2. Generacja nośników
3. Rekombinacja SRH, Augera i z udziałem stanów powierzchniowych

Rekombinacje: prosta, Augera i SRH

$$n_n p_n >> n_i^2$$

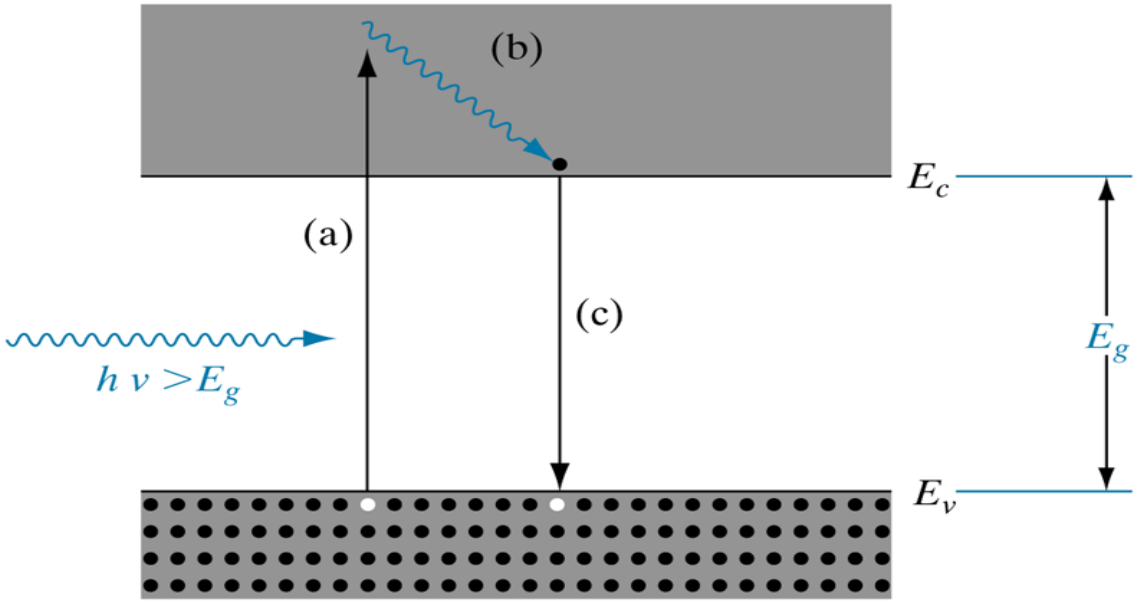
a) Rekombinacja Shockley'a-Reada-Halla.
b) Półprzewodnik z prostą przerwą wzbronioną - rekombinacja prosta

c) Półprzewodnik ze skośną przerwą wzbronioną, mała przerwa – rekombinacja Augera.



$$\tau_r = \frac{1}{\tau_{SRH}^{-1} + \tau_{rad}^{-1} + \tau_{Auger}^{-1}}$$

Rekombinacja prosta



Emisja światła:

- **Gdy $h\nu \geq E_g$ generowana jest para elektron-dziura**
- **Wzbudzony elektron oddaje energię sieci**
- **Elektron rekombinuje z dziurą w pasmie walencyjnym**

Rekombinacja prosta

W półprzewodniku samoistnym w stanie równowagi szybkość generacji termicznej EHP $g(T) = g_i$, jest równoważona przez szybkość rekombinacji, tak, że równowagowe koncentracje elektronów n_0 i dziur p_0 nie zmieniają się :

$$r_i = \alpha_r n_0 p_0 = \alpha_r n_i^2 = g_i$$

Rekombinacja prosta zachodzi spontanicznie, prawdopodobieństwo, że elektron zrekombinuje z dziurą nie zależy od czasu. Szybkość zaniku nadmiarowych nośników w wyniku rekombinacji w dowolnej chwili jest proporcjonalna do liczby elektronów i dziur. Współczynnik proporcjonalności nazywa się współczynnikiem rekombinacji, α_r.

Jeśli nie ma równowagi, to całkowita zmiana koncentracji elektronów w pasmie przewodnictwa = szybkość generacji termicznej (g_i) - szybkość rekombinacji:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \alpha_r n_i^2 - \alpha_r n(t) p(t)$$

Rekombinacja

Załóżmy, że nadmiarowa para elektron-dziura jest kreowana w chwili $t = 0$ przez impuls światła i początkowe nadmiarowe koncentracje elektronów i dziur (Δn i Δp) są takie same. Wtedy chwilowe koncentracje nadmiarowe są też równe: $\delta n(t) = \delta p(t)$

$$\frac{dn(t)}{dt} = \alpha_r n_i^2 - \alpha_r n(t)\, p(t) = \alpha_r n_i^2 - \alpha_r [n_0 + \Delta n][p_0 + \Delta p]$$

$$\frac{d\delta n(t)}{dt} = \alpha_r n_i^2 - \alpha_r [n_0 + \delta n(t)][p_0 + \delta p(t)]$$

$$= -\alpha_r [(n_0 + p_0)\delta n(t) + \delta n^2(t)]$$

Jeśli nadmiarowe koncentracje są małe, to człon δn^2 można zaniedbać. Dla półprzewodnika typu p, $n_0 \ll p_0$ i też można zaniedbać.

$$\longrightarrow \qquad \frac{d\delta n(t)}{dt} = -\alpha_r [(n_0 + p_0)\delta n(t)] = -\alpha_r p_0 \delta n(t)$$

$$\delta n(t) = \Delta n e^{-\alpha_r p_0 t} = \Delta n e^{-t/\tau_n}$$

- τ_n czas życia na rekombinację = czas życia nośników mniejszościowych.

Czas życia nośników

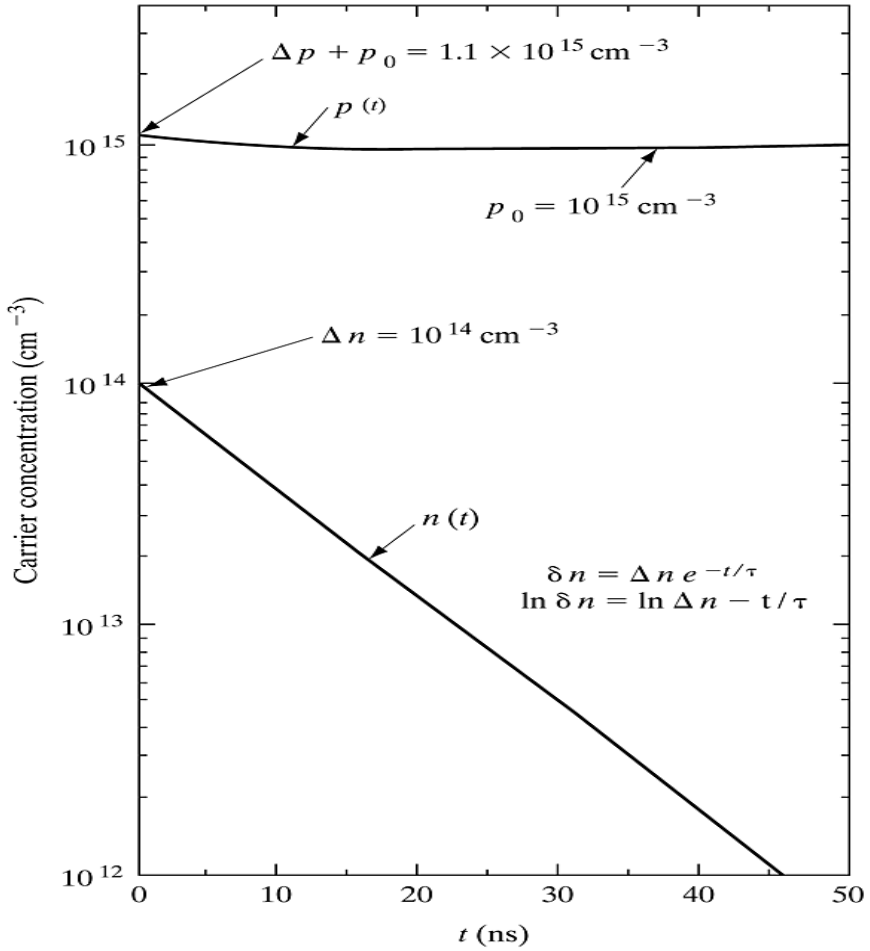
$$\delta n(t) = \Delta n e^{-\alpha_r p_0 t} = \Delta n e^{-t/\tau_n} \qquad (*)$$

Gdzie τ_n to czas życia na rekombinację, czyli czas życia nośników mniejszościowych i $\tau_n = (\alpha_r p_0)^{-1}$

Ogólne wyrażenie na czas życia na rekombinację prostą :

$$\tau_{rad} = \frac{1}{\alpha_r (p_0 + n_0 + \Delta n)}$$

Przykład 1. Zanik nadmiarowych dziur i elektronów w wyniku rekombinacji



Załóżmy, że mamy próbkę GaAs z $N_A = 10^{15} cm^{-3}$. Koncentracja samoistna w GaAs jest ~$10^6 cm^{-3}$, więc

$$n_0 = n_i^2 / p_0 = 10^{-3} cm^{-3}$$

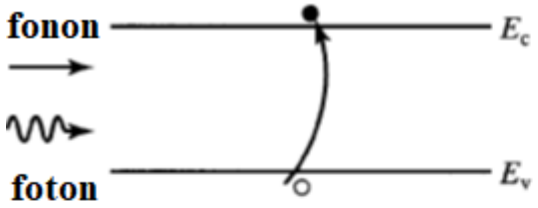
czyli $p_0 >> n_0$.

Załóżmy dalej, że dla t=0 koncentracja generowanych światłem nadmiarowych elektronów i dziur $\Delta n = \Delta p = 0.1 p_0$. Na rys. pokazano zanik nadmiarowych dziur i elektronów w wyniku rekombinacji, obliczony ze wzoru (*) przy założeniu, że τ = 10 ns. Wykładniczy zanik $\delta n(t)$ w skali półlogarytmicznej jest liniowy.

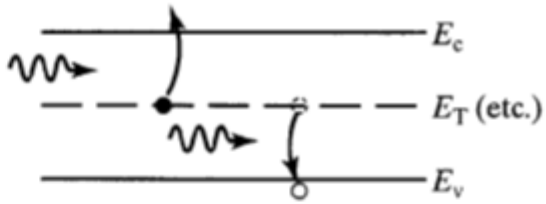
Względna zmiana koncentracji nośników mniejszościowych jest bardzo duża zaś niewielka dla nośników większościowych

Procesy generacji

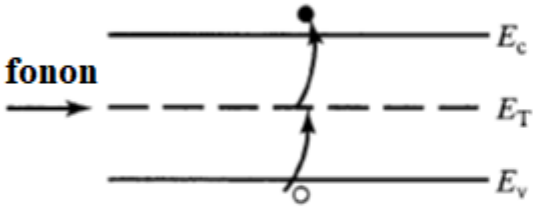
$$n_n p_n \ll n_i^2$$



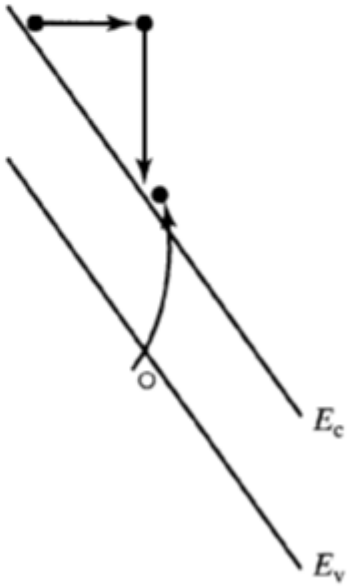
(a) generacja pasmo-pasmo



(c) Fotoemisja z centrów pułapkowych



(b) generacja przez centrum pułapkowe



(d) Jonizacja zderzeniowa

Generacja nośników w stanie stacjonarnym

W stanie równowagi szybkość generacji termicznej EHP $g(T) = g_i$, jest równoważona przez szybkość rekombinacji, tak, że równowagowe koncentracje elektronów n_0 i dziur p_0 nie zmieniają się :

$$g(T) = \alpha_r n_i^2 = \alpha_r n_0 p_0$$

Po oświetleniu próbki <u>stałym</u> strumieniem światła pojawi się generacja optyczna (g_{op}) oprócz generacji termicznej. Koncentracje nośników n i p wzrosną.

Nowa równowaga między procesami rekombinacji i generacji może być zapisana przy pomocy koncentracji równowagowych (n_0 *i* p_0) i odchyłek od równowagowych wartości (δn *i* δp):

$$g(T) + g_{op} = \alpha_r np = \alpha_r (n_0 + \delta n)(p_0 + \delta p)$$

Generacja nośników w stanie stacjonarnym

$$g(T) + g_{op} = \alpha_r np = \alpha_r (n_0 + \delta n)(p_0 + \delta p)$$

W stanie stacjonarnym, bez pułapkowania: $\delta n = \delta p$ ⇒

$$g(T) + g_{op} = \alpha_r n_0 p_0 + \alpha_r [(n_0 + p_0)\delta n + \delta n^2]$$

$$g(T) = \alpha_r n_i^2 = \alpha_r n_0 p_0 \quad \Rightarrow \quad g_{op} = \alpha_r [(n_0 + p_0)\delta n + \delta n^2]$$

Dla niskiego poziomu pobudzania optycznego δn^2 można zaniedbać,

$$g_{op} = \alpha_r (n_0 + p_0)\delta n = \frac{\delta n}{\tau_n}$$

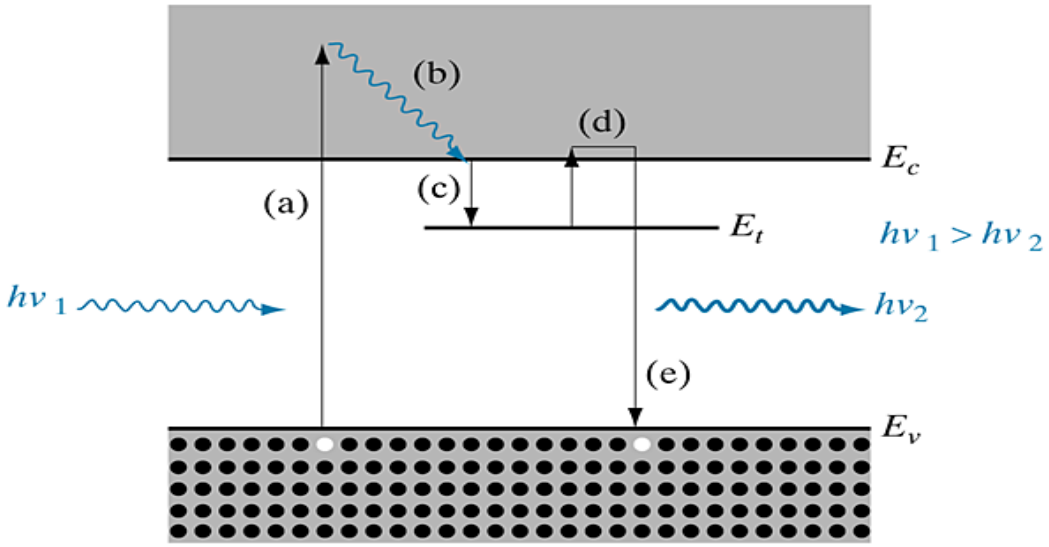
Nadmiarowe koncentracje :

$$\boxed{\delta n = \delta p = g_{op}\tau_n}$$

Jeśli nie ma pułapkowania:

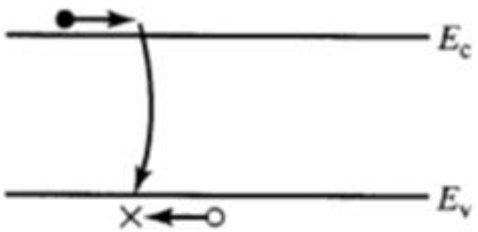
$$\boxed{\tau_n = \tau_p}$$

Wzbudzenie i rekombinacja z udziałem poziomu pułapkowego



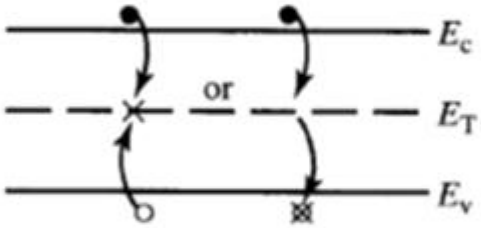
a) Kreacja pary elektron-dziura,
b) elektron relaksuje do dna pasma przewodnictwa
c) elektron zostaje spułapkowany na poziom E_T i
d) ponownie wzbudzony termicznie do pasma przewodnictwa
e) rekombinacja z dziurą z pasma walencyjnego – emisja swiatła.
Proces c) i d) może być wielokrotnie powtarzany, zanim nastąpi e). Stąd proces emisji światła w fosforach (ZnS) może trwać b. długo.

Procesy rekombinacji



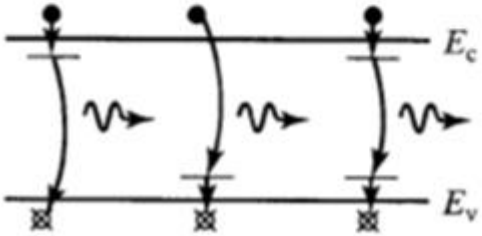
foton

(a) **Rekombinacja prosta**



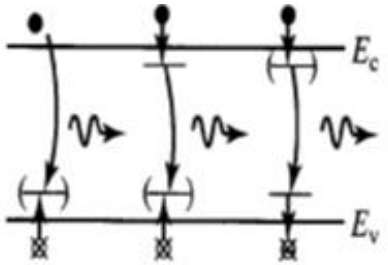
fonon

(b) **Rekombinacja z udziałem poziomów pulapkowych**



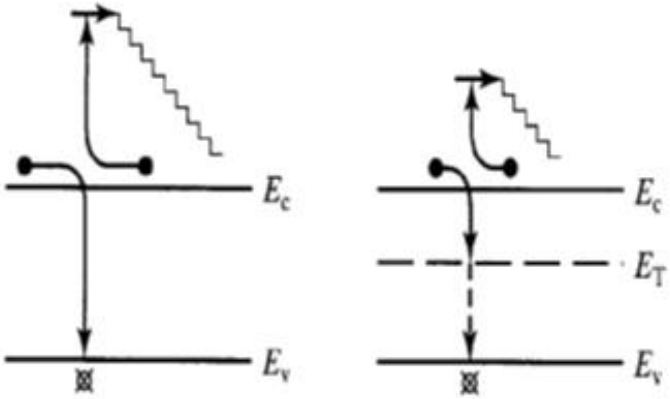
foton

(c) **Rekombinacja z udziałem płytkich poziomów domieszkowych**



foton

(d) **Rekombinacja z udziałem ekscytonów**



(e) **Rekombinacja Augera**

Luminescencja w półprzewodnikach

W zależności od rodzaju wzbudzenia :

	[wzbudzenie]	[emisja]
- fotoluminescencja :	**absorpcja fotonu**	**rekombinacja**
- katodoluminescencja :	**wysokoenerget. elektrony**	**rekombinacja**
- elektroluminescencja :	**wstrzykiwanie prądu**	**rekombinacja**

Przejścia bezpośrednie

-Fluorescencja : szybka luminescencja (średni czas życia $\langle t \rangle = 10^{-8}$ sec)

Przejścia z udziałem poziomów pułapkowych

-Fosforescencja : wolna luminescencja (t = kilka sek - min)

Rekombinacja pośrednia SRH: wychwyt

(a) W półprzewodnikach ze skośną przerwą wzbronioną (m.in. Si i Ge) rekombinacja bezpośrednia jest b. mało prawdopodobna.

(b) Najczęściej zachodzi rekombinacja poprzez centra rekombinacyjne i z udziałem fononów.

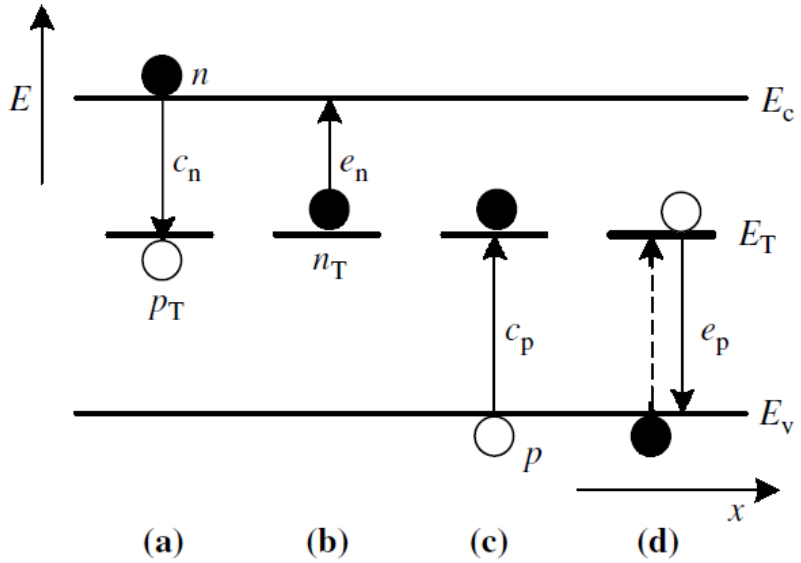
(c) Domieszka lub defekt zachowują się jak centrum rekombinacji, jeśli po przejęciu nośnika jednego typu wychwytują nośnik przeciwnego typu, co w efekcie prowadzi do anihilacji pary elektron – dziura [EHP].

(d) Czas życia dla takiego procesu jest bardziej skomplikowany, bo czas życia na wychwyt każdego rodzaju nośnika jest inny. Często rekombinacja opóźnia się, bo wychwycony nośnik jest termicznie wzbudzany do swojego pasma zanim nastąpi wychwyt nośnika drugiego typu.

(e) Kiedy nośnik zostanie wychwycony a następnie wzbudzony ponownie termicznie zanim zostanie wychwycony następny nośnik, to taki proces nazywa się chwilowym pułapkowaniem a odpowiednie centrum (defekt, domieszka) nazywane jest centrum pułapkowym.

Głębokie poziomy pułapkowe

Centra generacji – gdy nośników jest mniej od koncentracji równowagowej
Centra rekombinacji - gdy nośników jest więcej od koncentracji równowagowej

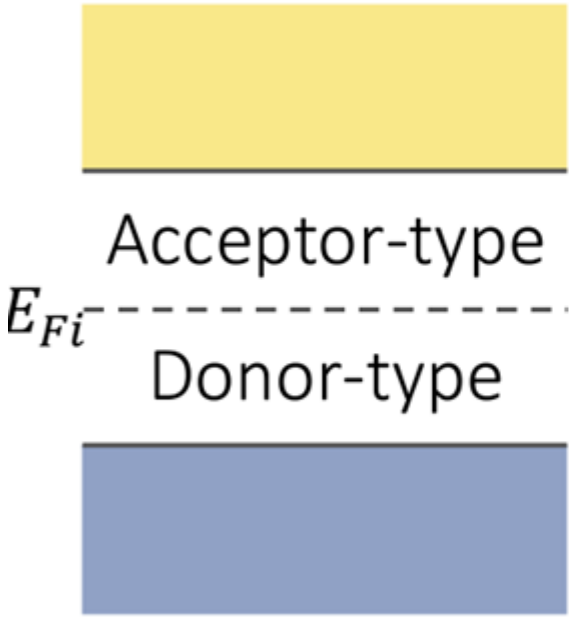


a) Wychwyt elektronu; c_n - szybkość wychwytu elektronów [cm^3/s]
b) Emisja elektronu; e_n - szybkość emisji elektronów [1/s]
c) Wychwyt dziury; c_p - szybkość wychwytu dziur [cm^3/s]
d) Emisja dziury; e_p - szybkość emisji dziur

Proces a) i c) – centrum rekombinacji;
Proces b) i d) – centrum generacji;

Proces a) po którym następuje proces b) lub proces c) po którym następuje proces d) - centrum pułapkowe.

Podział poziomów pułapkowych



	Pułapka akceptoro-podobna	Pułapka donoro-podobna
	obsadzona	**pusta**
	-	0
	0	+

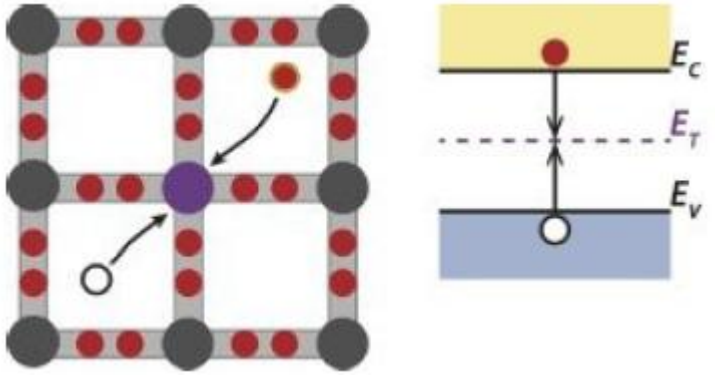
Rekombinacja Shockley-Read-Hall

Rekombinacja przez stany pułapkowe, które mogą z równym prawdopodobieństwem pułapkować elektron i dziurę

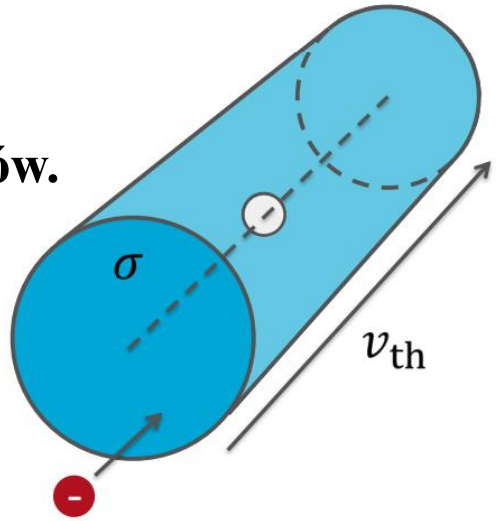
Szybkość wychwytu elektronów/dziur:

$$c_{n,p} = \sigma_{n,p} v_{th}$$

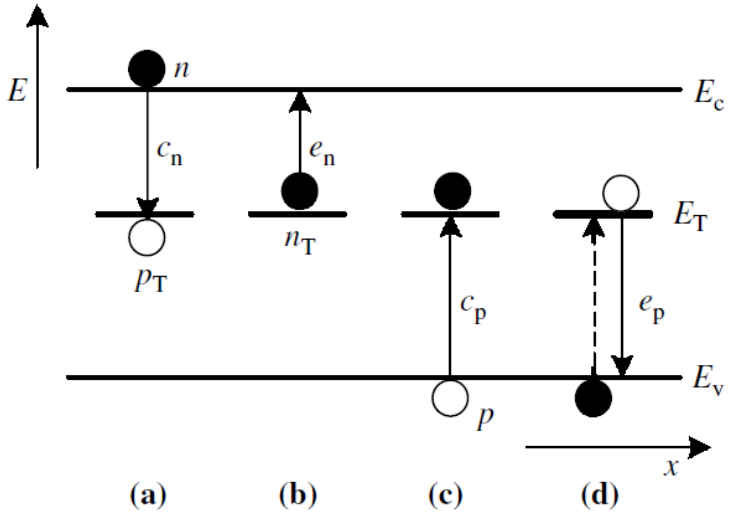
$$v_{th} = \sqrt{3kT/m^*_{n,p}}$$



gdzie $\sigma_n[cm^2]$- przekrój czynny na wychwyt elektronów, v_{th}- prędkość termiczna elektronów.



Równanie kinetyczne



N_T - koncentracja pułapek na poziomie E_T,
n_T /p_T - koncentracja pułapek obsadzonych elektronami /dziurami
i $N_T = n_T + p_T$.

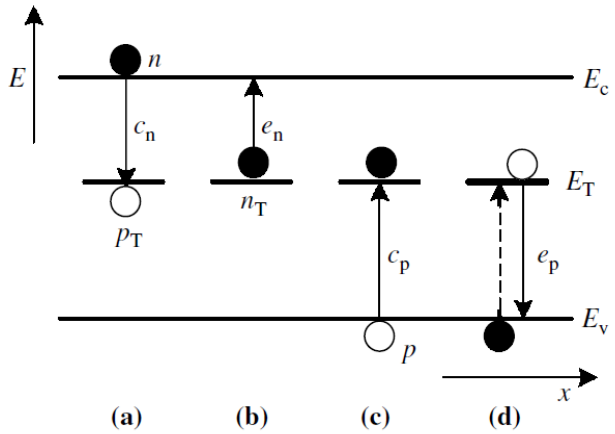
- **Zmiana czasowa stanu obsadzenia pasma przewodnictwa elektronami:**

$$\frac{dn}{dt}|_{G-R} = (b) - (a) = e_n n_T - c_n n p_T$$

- **Zmiana czasowa stanu obsadzenia pasma walencyjnego dziurami:**

$$\frac{dp}{dt}|_{G-R} = (d) - (c) = e_p p_T - c_p p n_T$$

Zasada równowagi szczegółowej



Zasada ta mówi, że w warunkach równowagi, każdy proces musi być równoważony przez proces odwrotny. Np. proces a) na rys. wyżej, musi być równoważony przez proces b). Tzn. że

$$\frac{dn}{dt} = 0$$

$$\frac{dn}{dt}|_{G-R} = (b) - (a) = e_n n_T - c_n n p_T$$

Rekombinacja SRH

Równanie otrzymuje się korzystając z zasady równowagi szczegółowej: R=G

$$R_{\mathrm{SRH}} = v_{\mathrm{th}}^2 \sigma_p \sigma_n N_{\mathrm{T}} \frac{np - n_i^2}{v_{\mathrm{th}} \sigma_n n + v_{\mathrm{th}} \sigma_p p + e_n + e_p}$$

***n*-type**

$$R_{\mathrm{SRH}} = c_p N_T (p - p_0)$$

***p*-type**

$$R_{\mathrm{SRH}} = c_n N_T (n - n_0)$$

$n = n_0 + \Delta n \cong n_0, \;\; p = p_0 + \Delta p, \;\; n \gg p$

$p = p_0 + \Delta p \cong p_0, \;\; n = n_0 + \Delta n, \;\; p \gg n$

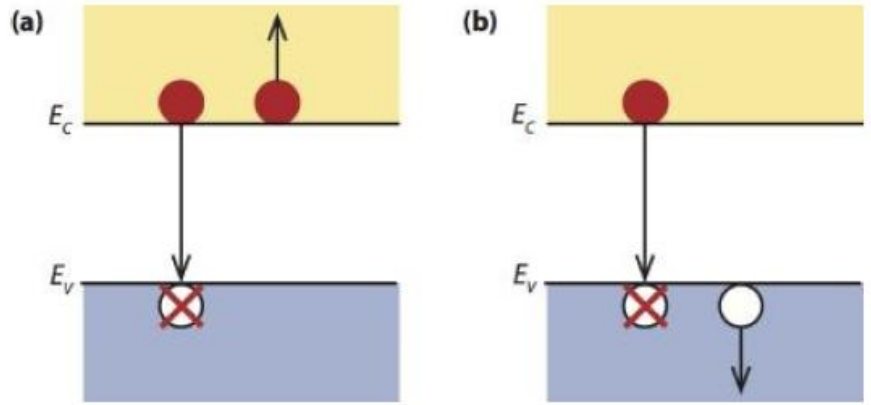
$R_{\mathrm{SRH}} = \frac{\Delta p}{\tau_p}$ ... *n*-typ $R_{\mathrm{SRH}} = \frac{\Delta n}{\tau_n}$ ... *p*-typ

$$\tau_{p,\mathrm{SRH}} = \frac{1}{c_p N_T}$$

$$\tau_{n,\mathrm{SRH}} = \frac{1}{c_n N_T}.$$

Rekombinacja Augera

Podobnie jak w przypadku rekombinacji prostej, elektron przechodzi z pasma przewodnictwa do pasma walencyjnego, ale nadmiar energii przekazuje innemu nośnikowi (elektronowi/dziurze), który relaksuje termicznie do dna pasma przewodnictwa/ wierzchołka pasma walencyjnego.



Rekombinacja Augera odgrywa rolę, gdy koncentracja nośników jest duża. Rekombinacja Augera dominuje w półprzewodnikach ze skośną przerwą wzbronioną i gdy przerwa wzbroniona jest mała.

$$R_{\mathrm{eeh}} = C_n n^2 p,$$

$$R_{\mathrm{ehh}} = C_p n p^2,$$

Rekombinacja Augera

Szybkość rekombinacji:

$$R_{\mathrm{Aug}} = C_n n^2 p + C_p n p^2$$

$$R_{\mathrm{Aug}} \approx C_n N_D^2 p$$

$n \approx N_D \qquad p \ll n$

***n*-typ**

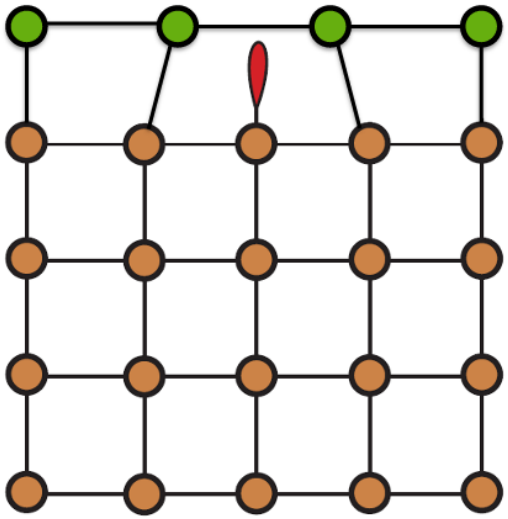
$$R_{\mathrm{Aug}} \approx C_n N_D^2 p$$

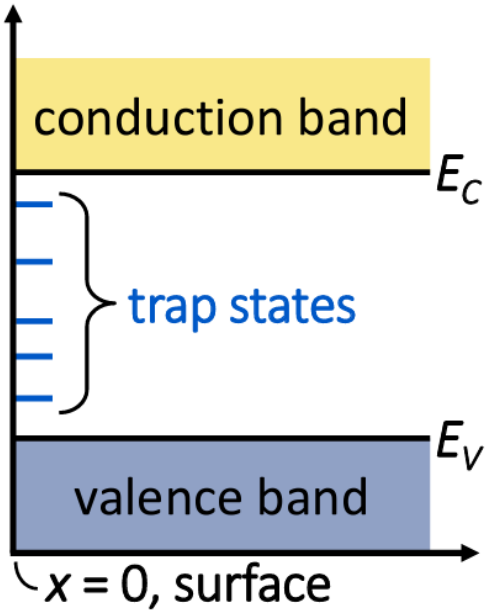
***p*-typ**

$$R_{\mathrm{Aug}} \approx C_p N_A^2 n$$

Rekombinacja powierzchniowa

Zerwane wiązania





***n*-typ**

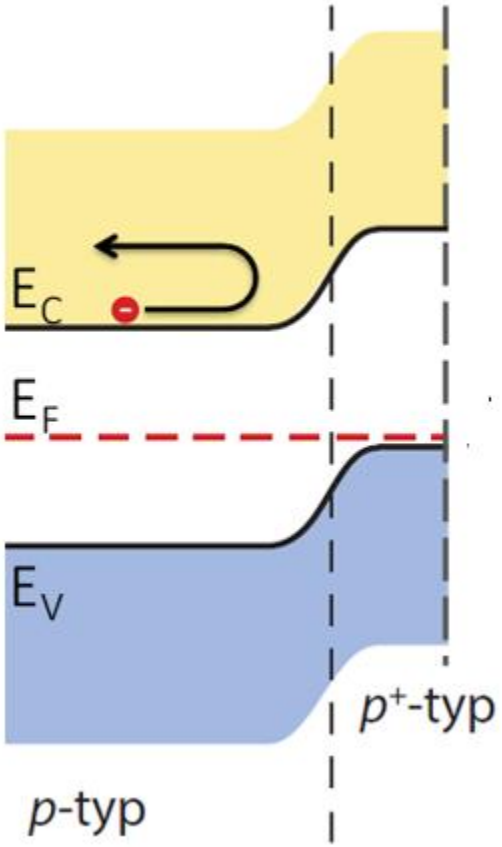
$$R_s \approx v_{th}\sigma_p N_{sT}(p_s - p_0)$$

***p*-typ**

$$R_s \approx v_{th}\sigma_n N_{sT}(n_s - n_0)$$

Rekombinacja powierzchniowa

Zmniejszenie rekombinacji powierzchniowej – sposób 1



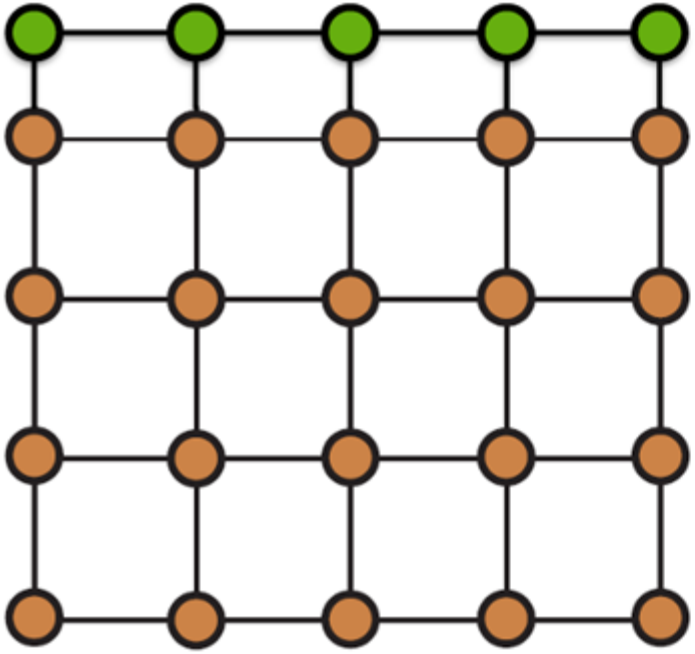
p-typ

$$R_s \approx v_{\mathrm{th}} \sigma_n N_{\mathrm{sT}} (n_s - n_0)$$

Ograniczenie n_s – koncentracji elektronów (nośników mniejszościowych)

Rekombinacja powierzchniowa

Zmniejszenie rekombinacji powierzchniowej – sposób 2



p-typ

$$R_s \approx v_{th}\sigma_n N_{sT}(n_s - n_0)$$

Ograniczenie N_{sT} – koncentracji pułapek (pasywacja powierzchni)

Fotoprzewodnictwo

- **Efekty rekombinacji i pułapkowania można mierzyć metodą zaniku fotoprzewodnictwa. Obsadzenie nadmiarowymi elektronami i dziurami zanika ze stałą czasową charakterystyczną dla danego procesu rekombinacji. Przewodnictwo podczas zaniku jest dane wzorem :**

$$\delta\sigma(t) = q(\mu_n + \mu_p)\delta n(t)$$

$$\delta n(t) = \Delta n e^{-t/\tau_n}$$

- **Zależność czasowa koncentracji nośników może być monitorowana poprzez zmianę oporności próbki w funkcji czasu.**

Półprzewodnik w polu elektrycznym

$$F = -\frac{dE_p}{dx}$$

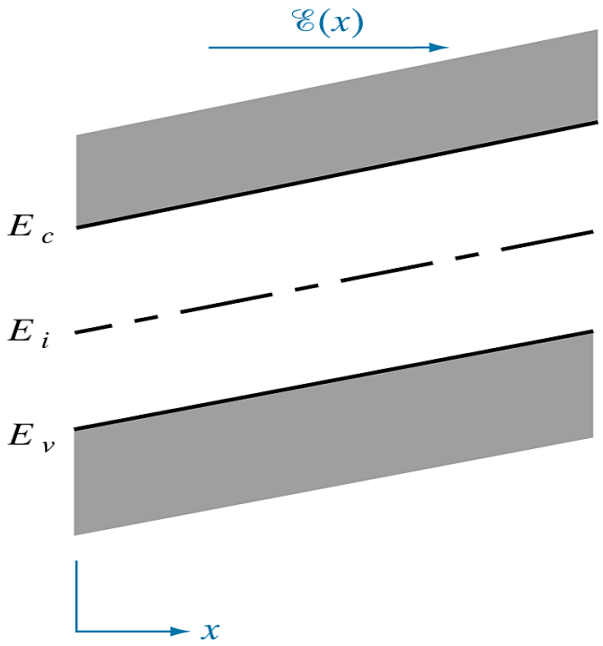
$$-e\varepsilon(x) = -(-e)\frac{dV}{dx}$$

$$\varepsilon(x) = -\frac{dV}{dx}$$

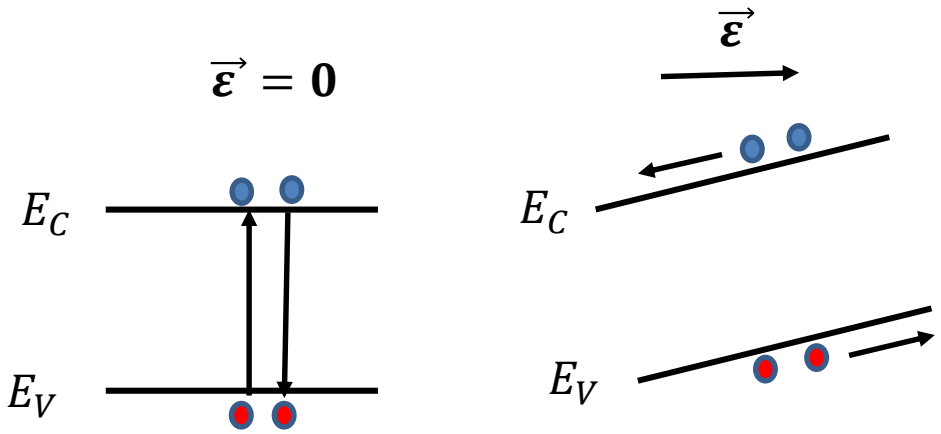
$$\varepsilon(x) = const = c \rightarrow$$

$$V = -cx \rightarrow$$

$$E_p = cex$$

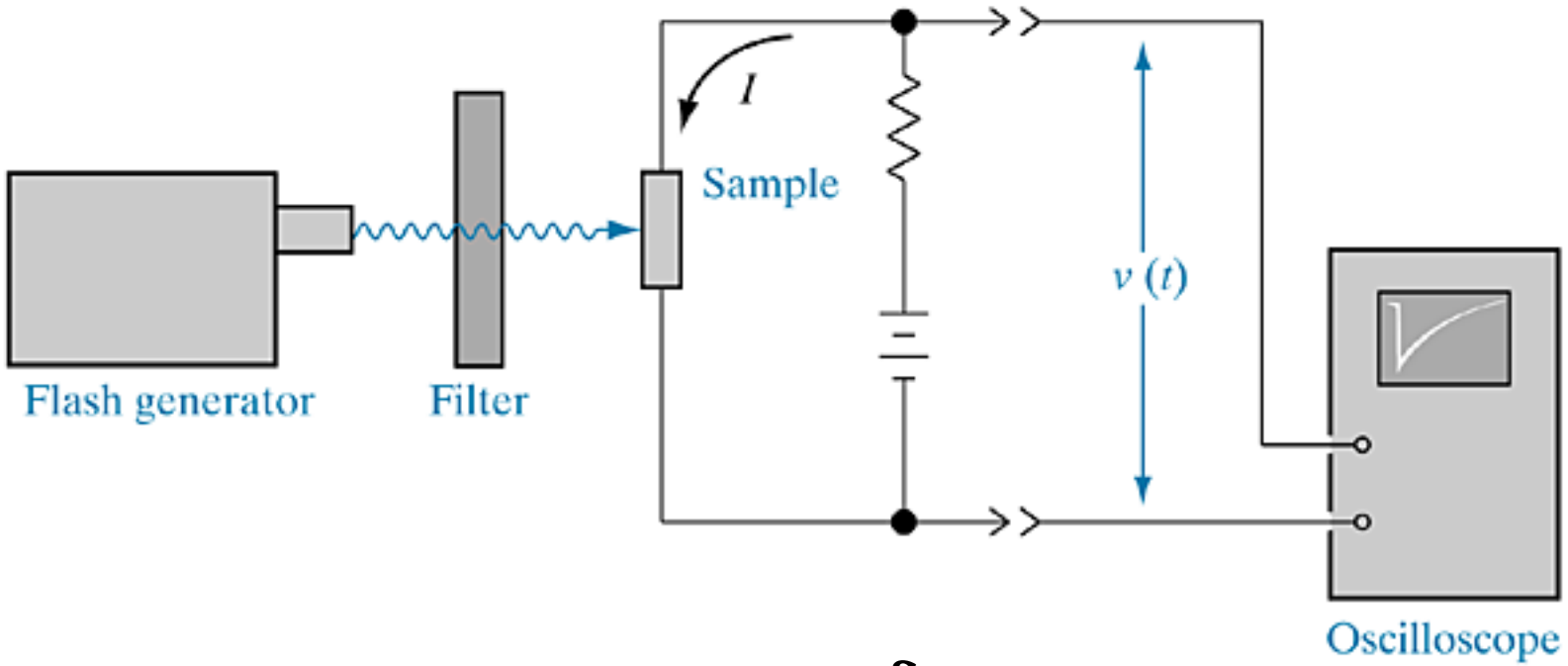


Półprzewodnik w polu elektrycznym



Efekt fotoprzewodnictwa jest możliwy po spolaryzowaniu półprzewodnika. Wówczas pary elektron-dziura wygenerowane światłem zostaną rozseparowane. Elektrony zaczną się poruszać w stronę potencjału dodatniego a dziury w stronę potencjału ujemnego – zacznie płynąć prąd. W przeciwnym razie swobodne nośniki wygenerowane światłem zrekombinują, tzn. elektron wróci do pasma walencyjnego a nadmiar energii zostanie wypromieniowany w postaci ciepła. Proces rekombinacji następuje bardzo szybko, po czasie rzędu 10^{-8}s.

Pomiar zaniku fotoprzewodnictwa



$$\delta n = \frac{\delta \sigma}{q(\mu_n + \mu_p)}$$

$$\delta n(t) = \Delta n e^{-t/\tau_n}$$

Test 1

1. Foton o energii 1,35eV jest absorbowany w półprzewodniku kreując parę elektron-dziura. Energia tracona na relaksację nośników wynosi 0,27eV. Ile wynosi przerwa wzbroniona półprzewodnika ?

2. Który z poniższych mechanizmów rekombinacji zachodzi z udziałem defektów:

- Mechanizm rekombinacji Augera
- Mechanizm SRH
- Mechanizm rekombinacji promienistej prostej
- Wszystkie wymienione