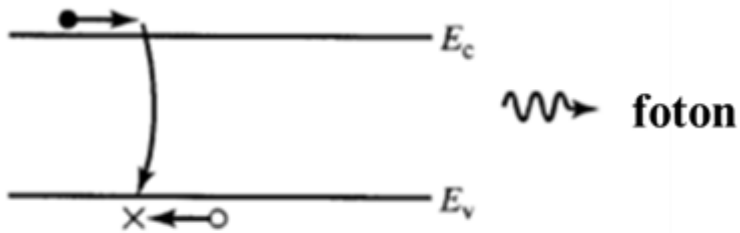


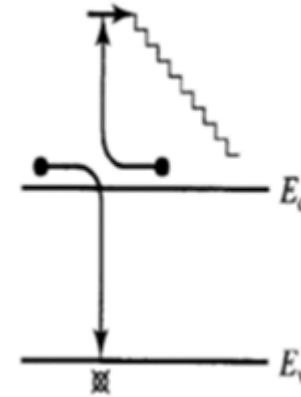
Wykład VIII

- 1. Rekombinacja**
- 2. Nośniki nadmiarowe w półprzewodnikach**
- 3. Rekombinacja bezpośrednia i pośrednia**

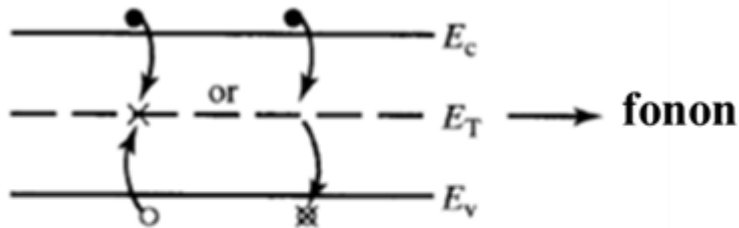
Procesy rekombinacji



(a) Rekombinacja prosta



c) Rekombinacja Augera



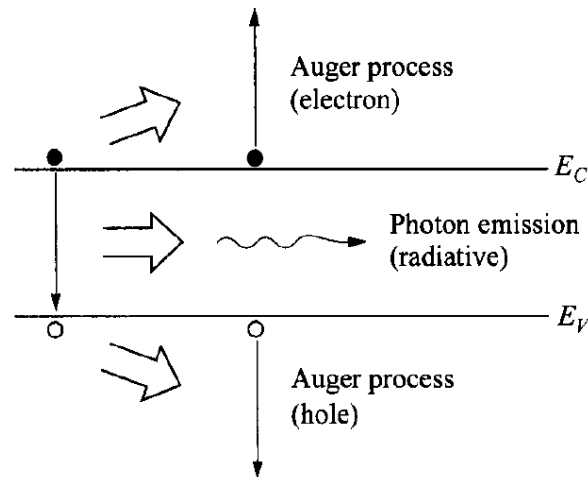
(b) Rekombinacja z udziałem poziomów pułapkowych

Shockley-Read-Hall

Rekombinacje: prosta, Augera i SRH

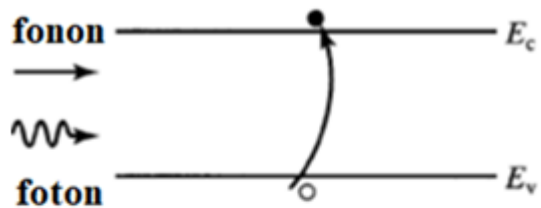
$$n_n p_n \gg n_i^2$$

- Półprzewodnik z prostą przerwą wzbronioną rekombinacja prosta
- Półprzewodnik ze skośną przerwą wzbronioną, rekombinacja Shockley'a-Reada-Halla i rekombinacja Augera

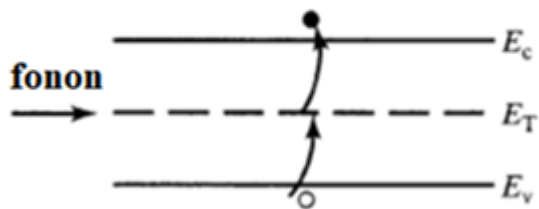


Procesy generacji

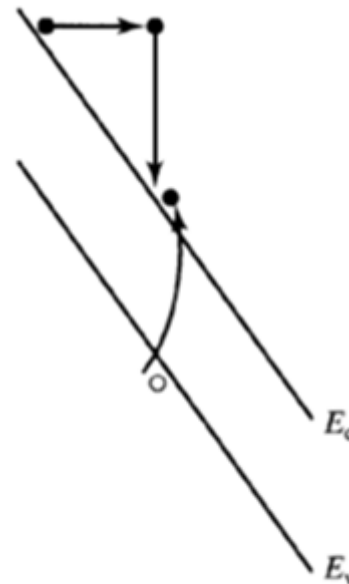
$$n_n p_n \ll n_i^2$$



(a) generacja pasmo-pasmo

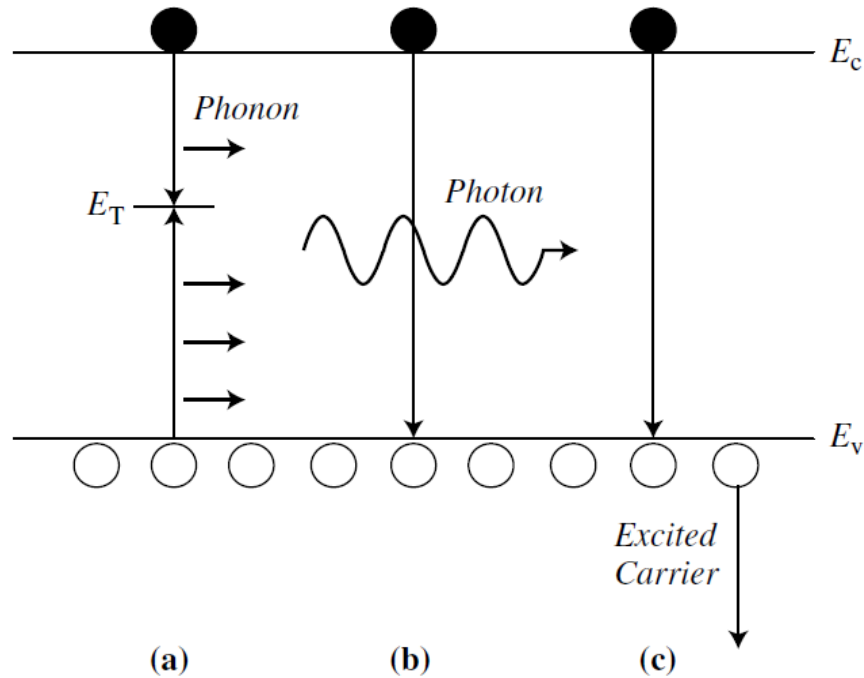


(b) generacja przez centrum pułpkowe



(d) Jonizacja zderzeniowa

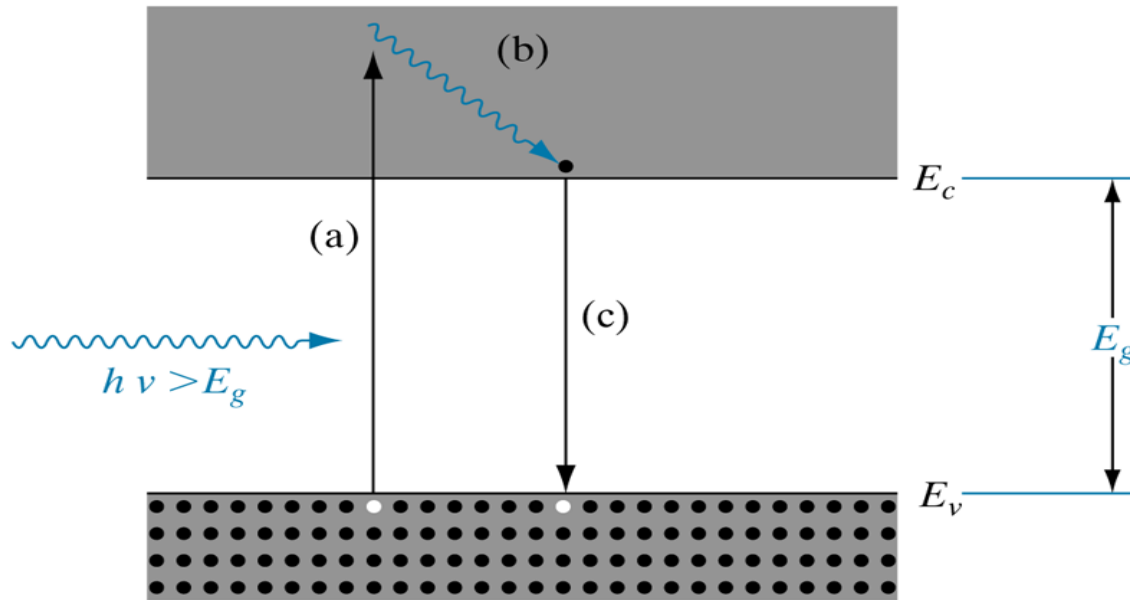
Rekombinacija



a) Shockley-Read-Hall b) Prosta c) Auger'a

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

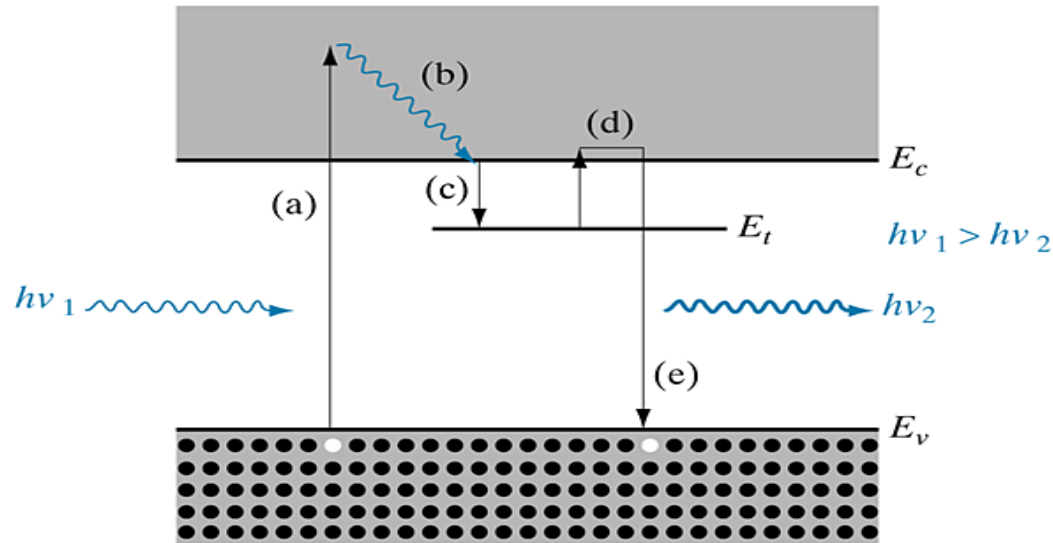
Rekombinacja prosta



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, emisja fotonu

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.

Proces c) i d) może być wielokrotnie powtarzany, zanim nastąpi e). Stąd proces emisji światła w fosforach (ZnS) może trwać b. długo.

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 prosta

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 .

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 :

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

Załóżmy, że nadmiarowa para elektron-dziura jest kreowana w chwili $t = 0$ przez impuls światła. Całkowita zmiana koncentracji elektronów w pasmie przewodnictwa = szybkość generacji termicznej (g_i) - szybkość rekombinacji, przy czym 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):

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

Rekombinacja prosta

Załóżmy, że 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 człon z p_0 też można zaniedbać.

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

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

- czas życia na rekombinację = czas życia nośników mniejszościowych.

Czas życia nośników

Dla półprzewodnika typu p, ($n_0 \ll p_0$) nadmiarowa koncentracja nośników mniejszościowych (elektronów) :

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

τ_n to czas życia na rekombinację i jest to czas życia nośników mniejszościowych !

Rekombinacja pośrednia SRH: wychwyty

- (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 przejściu nośnika jednego typu wychwytyją 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 wychwyty każdego rodzaju nośnika jest inny. Często rekombinacja opóźnia się, bo wychwycony nośnik jest termicznie wzbudzany do swojego pasma zanim nastąpi wychwyty 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.

Rekombinacja Shockley-Read-Hall

Rekombinacja przez stany pułpkowe o koncentracji N_T , które mogą z równym prawdopodobieństwem pułpkować elektron i dziurę.

Szybkość pułpkowania (c) i przekrój czynny na pułpkowanie (σ):

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

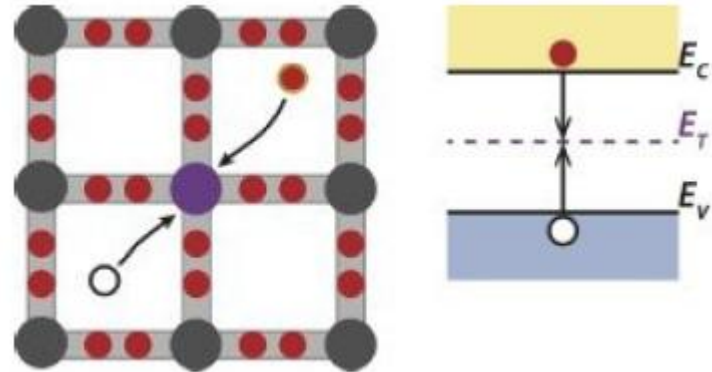
gdzie prędkość termiczna nośników:

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

Czas życia:

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

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



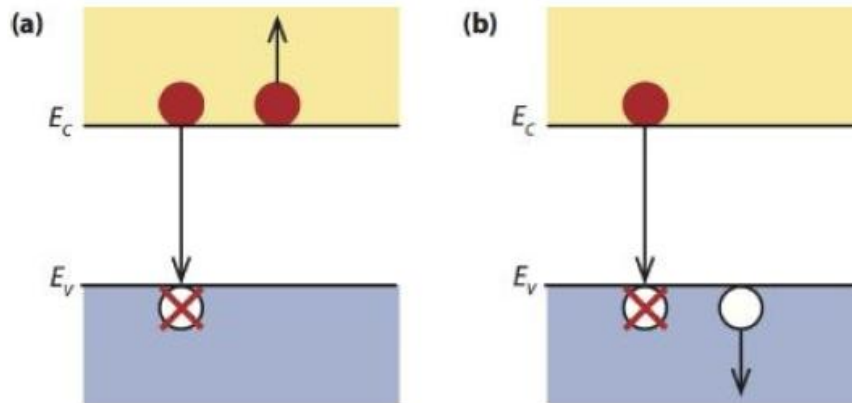
Szybkość rekombinacji SRH:

$$R_{SRH} = \frac{\Delta p}{\tau_p} \quad \dots n\text{-typ}$$

$$R_{SRH} = \frac{\Delta n}{\tau_n} \quad \dots p\text{-typ}$$

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. Szybkość rekombinacji Augera:

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

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

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 :

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

W przypadku rekombinacji S-R-H oprócz generacji pasmo-pasmo może mieć miejsce generacja z poziomów pułapkowych.

Po oświetleniu próbki stałym 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 pobudzenia optycznego δn^2 można zaniedbać,

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

Nadmiarowe koncentracje :

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

Jeśli nie ma pułapkowania:

$$\tau_n = \tau_p$$

Generacja nośników w stanie stacjonarnym

Można pokazać, że przy niskim pobudzeniu nadmiarowe koncentracje

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

Jeśli nie ma pułapkowania:

$$\tau_n = \tau_p$$