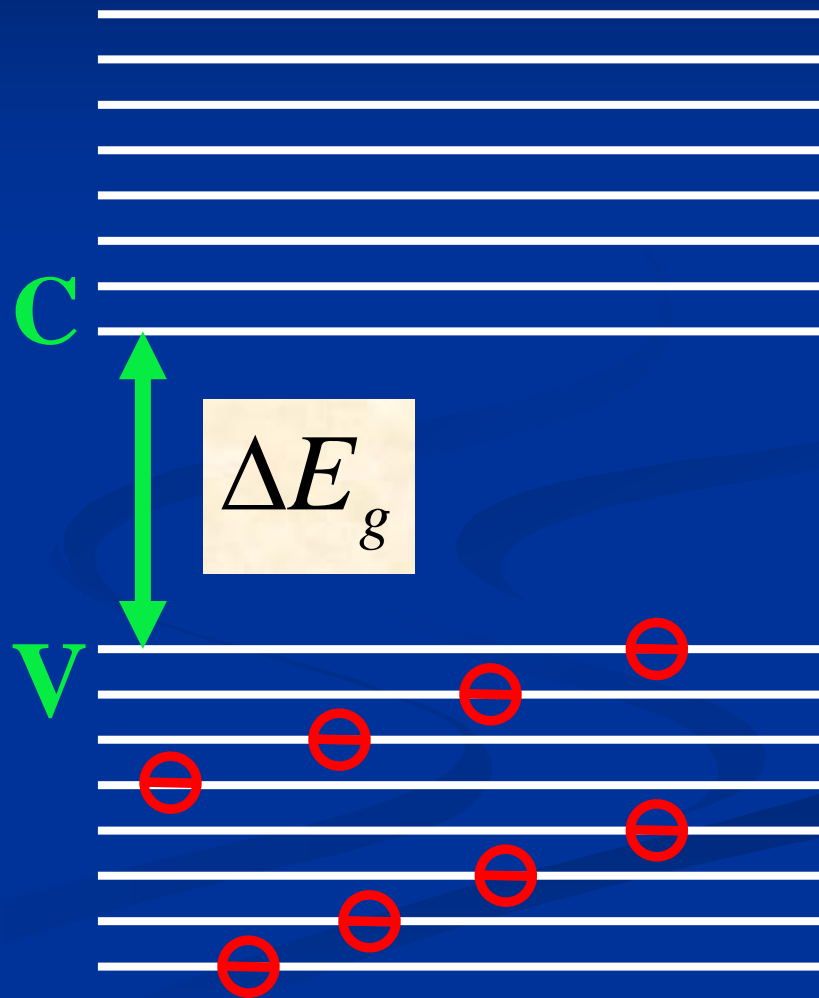


Półprzewodniki

Półprzewodniki

Pierwiastek (i)	ΔE_g
C (diament)	7,0 eV
Si	1,1 eV
Ge	0,7 eV
Sn (szara cyna)	0,08 eV
GaAs	1,45 eV
GaSb	0,8 eV
GaN	3,1 eV



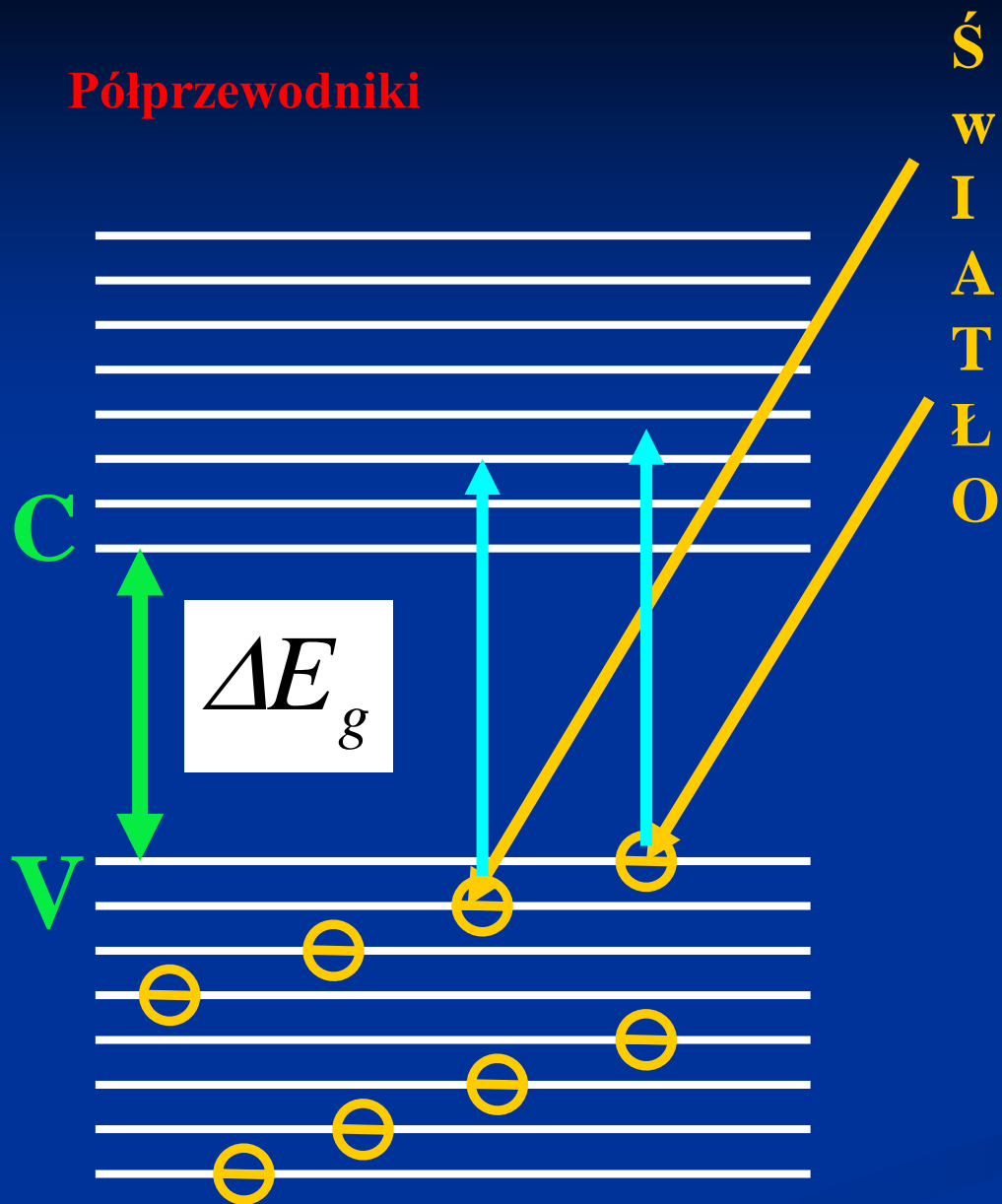
Półprzewodniki samoistne

Ze struktury pasmowej półprzewodników, podobnej do struktury pasmowej materiałów izolacyjnych wynika że na skutek całkowitej obsady poziomów przez elektrony w paśmie walencyjnym oraz z powodu braku elektronów w paśmie przewodzenia półprzewodnik nie powinien przewodzić prądu elektryczny przy temperaturach w pobliżu 0 K. Taki półprzewodnik nazywamy **samoistnym**.

Są trzy podstawowe sposoby które umożliwiają przepływ prądu w półprzewodnikach.

PIERWSZY z nich polega na naświetlaniu półprzewodnika światłem o energii kwantów większej niż szerokość pasma zabronionego.

Półprzewodniki

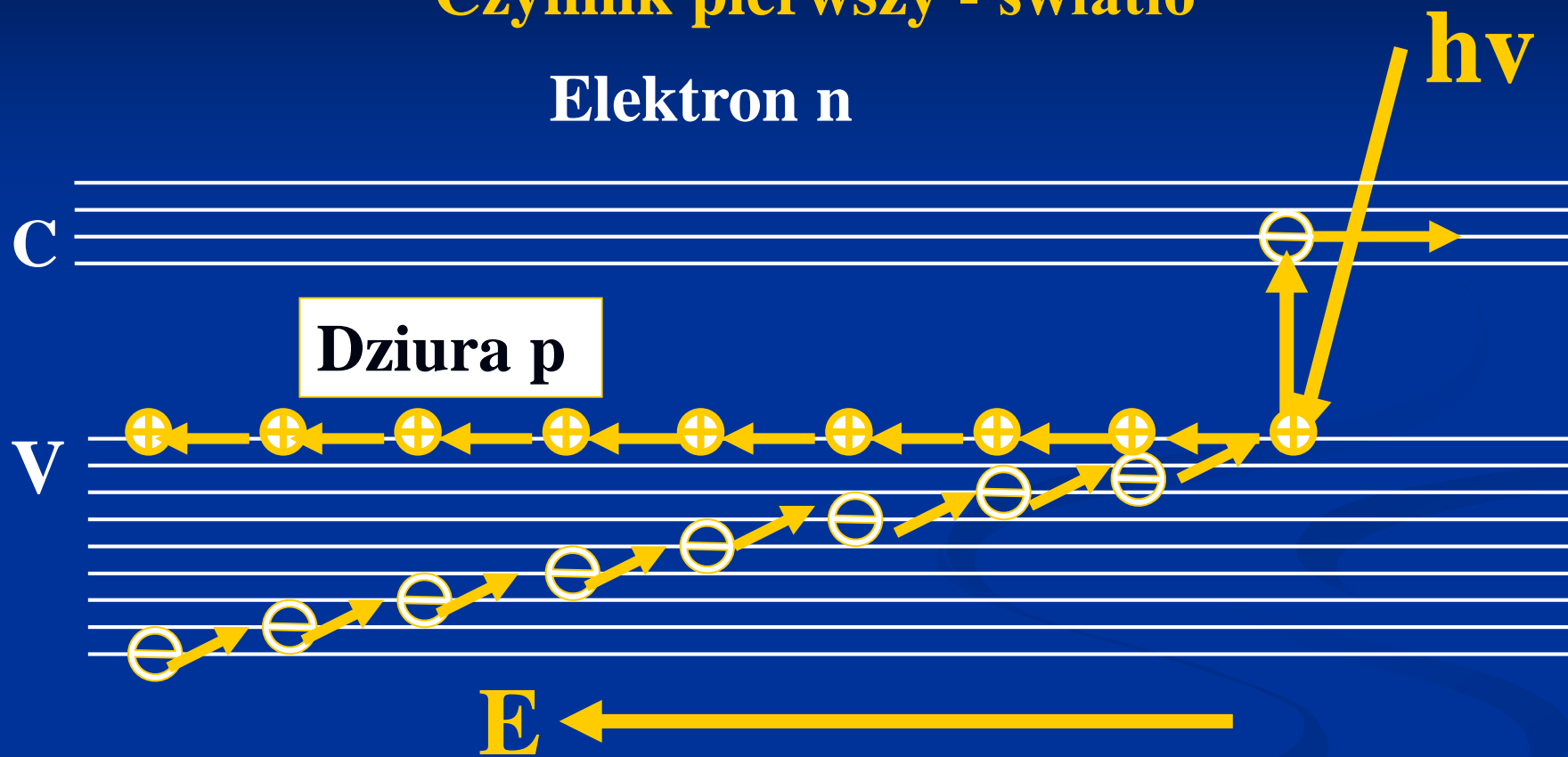


$$h\nu > \Delta E_g$$

Przewodnictwo samoistne

Czynnik pierwszy - światło

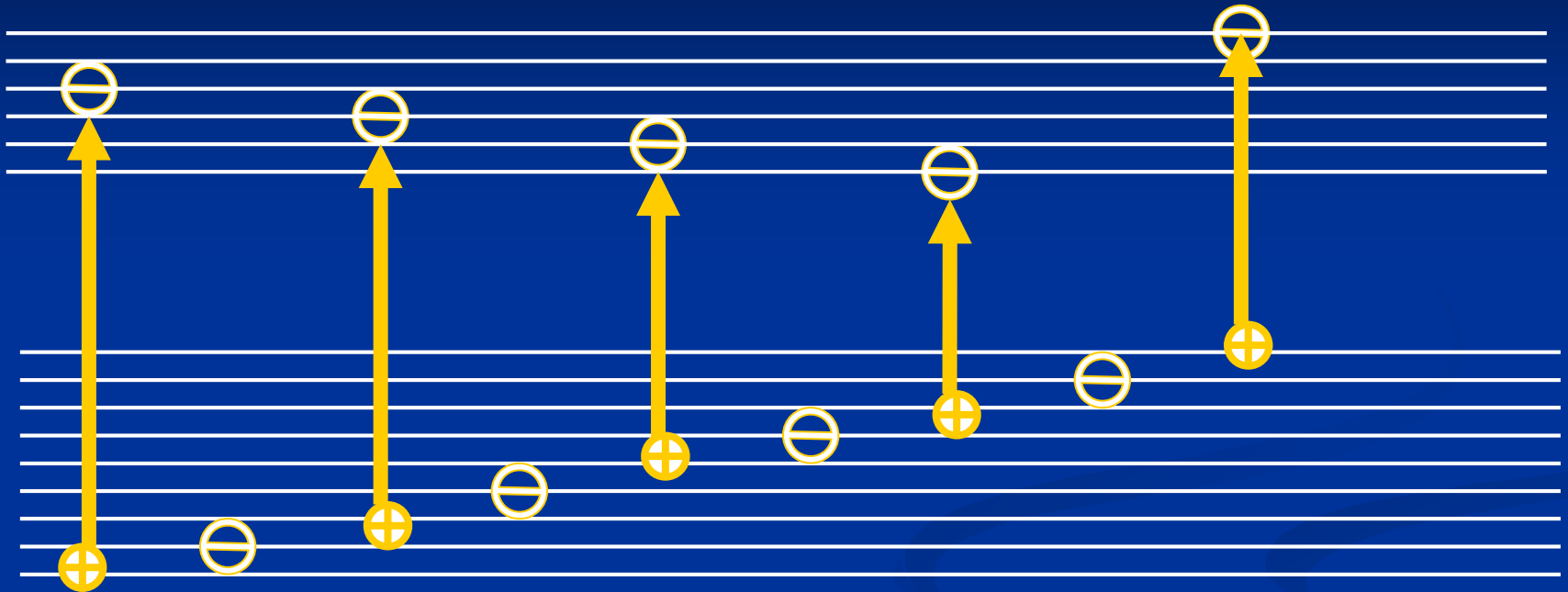
Elektron n



$$p = n,$$

Półprzewodniki

Czynnik drugi – temperatura



p – koncentracja dziur, n – koncentracja elektronów

$$p = n,$$

Półprzewodniki

Wraz ze wzrostem temperatury co raz więcej elektronów przechodzi z pasma walencyjnego V do pasma przewodzenia C pozostawiając po sobie dziury. Koncentracje elektronów i dziur opisywane są wzorem:

$$p = n = B(T) \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{2kT}\right) \quad (\text{a})$$

gdzie: $B(T)$, współczynnik słabo zależny od T .

Ponieważ wykres funkcji \exp jest stosunkowo trudny do wykreślenia, stosują tzw. wykres Arheniusa, wprowadzając nowe zmienne $Y = \log(n)$ oraz $X = 1/T$. W matematyce taką operację nazywają operacją linearyzacji lub wyrównaniem.

Półprzewodniki

W nowych współrzędnych wzór (a) będzie funkcją liniową, ponieważ:

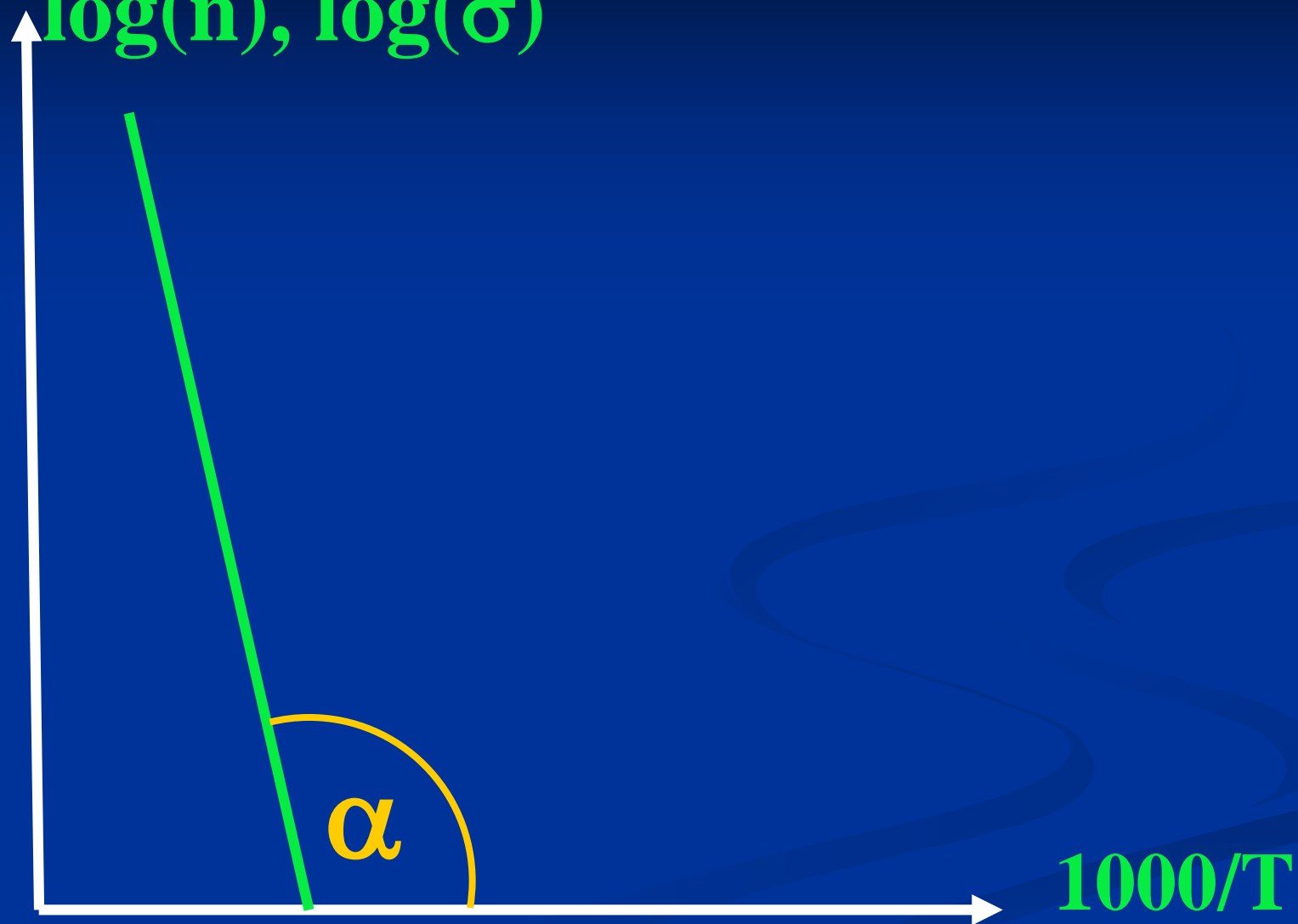
$$Y = \log(p) = \log(n) = \log \cdot \{B(T)\} - \frac{\Delta E_g}{2k} \cdot X, \text{ gdzie } X = \frac{1}{T}.$$

Przy praktycznym sporządzeniu wykresów często stosują zmienną $X=1000/T$, co zapobiega używaniu bardzo małych ułamków. Współczynnik kierunkowy linii prostej wykresu Arrheniusa (tangens kąta nachylenia) wynosi wtedy:

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{\Delta E_g}{2000k}$$

Półprzewodniki

$\log(n), \log(\sigma)$



Półprzewodniki

Konduktywność opisywana jest zależnością:

$$\sigma_p = e \cdot p \cdot \mu_p, \quad \sigma_n = e \cdot n \cdot \mu_n$$

wartości

$$\mu_p \quad i \quad \mu_n$$

nazywane są ruchliwość dziur i

elektronów odpowiednio słabo zależą od temperatury. W związku z tym możemy założyć, że konduktywność jest funkcją liniową koncentracji nośników prądu (elektronów, dziur lub ich sumy).

Oznacza to że na podstawie pomiaru temperaturowej zależności konduktywności możemy określić szerokość pasma zabronionego półprzewodnika, przekształcając wzór:

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{\Delta E_g}{2000k}, \quad \text{do postaci } \Delta E_g = -2000 \cdot k \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

Półprzewodniki

W celu określenia szerokości pasma wzbronionego półprzewodnika należy dokonać pomiarów rezystancji przy temperaturach z zakresu 20C – 250C z krokiem w 10 – 20C. Następnie na podstawie wymiarów geometrycznych próbki obliczyć konduktywność i sporządzić wykres logarytmu jej zależności $\log(\sigma)=f(1000/T)$. Wybrać na tym wykresie odcinek, na którym występuje liniowa zależność, określić dla niego współczynnik kierunkowy i dalej obliczyć szerokość pasma wzbronionego ze wzoru:

$$\Delta E_g = -2000 \cdot k \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

Półprzewodniki

Sposób trzeci – domieszkowanie

Domieszkowanie wyjaśnimy na przykładzie podstawowego materiału do budowy układów scalonych – krzemu, który jest pierwiastkiem IV grupy układu okresowego i posiada na powłoce walencyjnej 4 elektrony, które tworzą wiązania kowalencyjne z 4 sąsiednimi atomami.

Domieszkowanie donorowe – półprzewodniki elektronowe

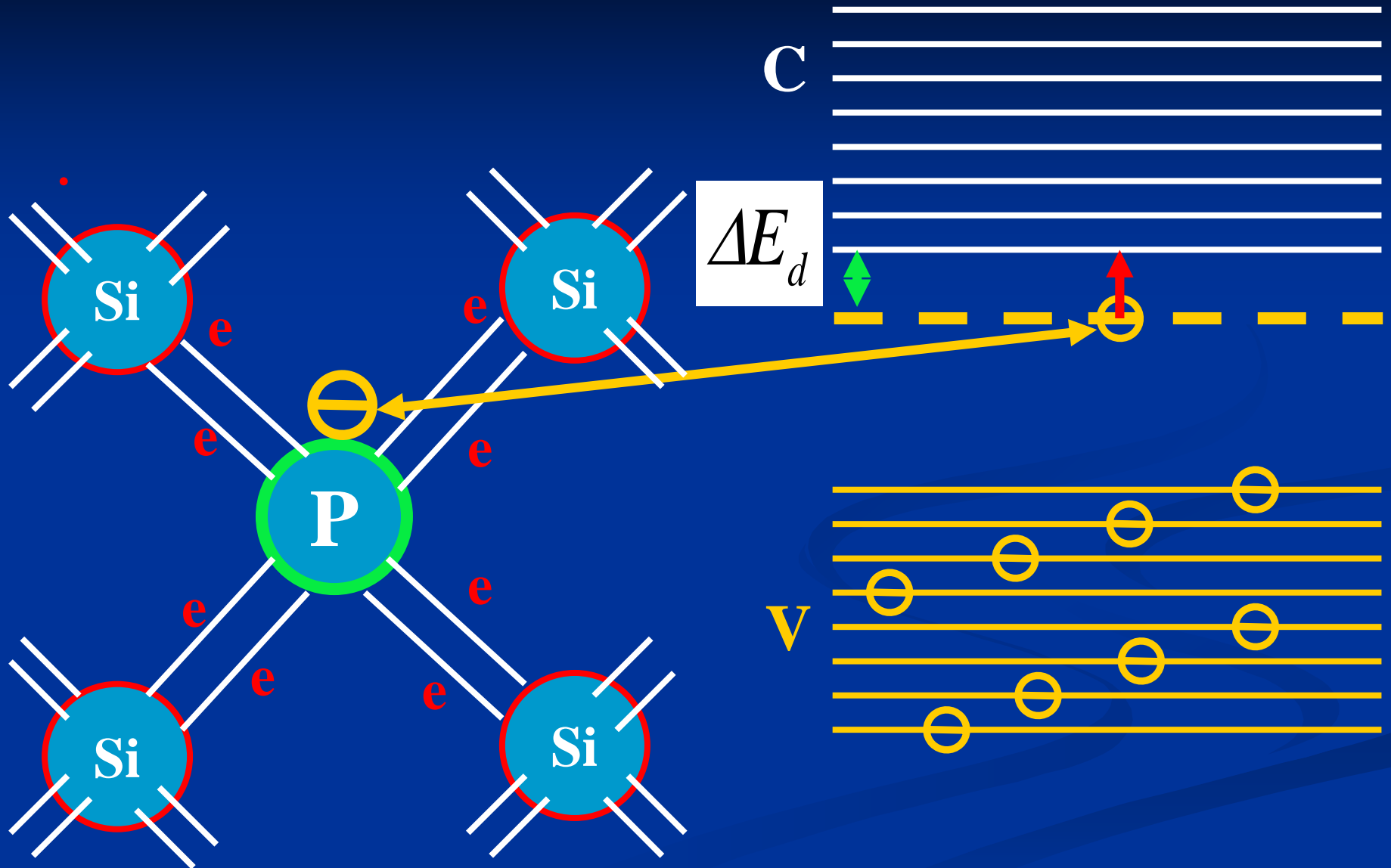
Do domieszkowania donorowego używają pierwiastków V grupy układu okresowego. Atomy P, As, Sb posiadają po 5 elektronów na powłoce walencyjnej. 4 z nich stworzą wiązania kowalencyjne z 4 sąsiednimi atomami Si i znajdują się w całkowicie obsadzonym paśmie walencyjnym. Piąty elektron nie tworzy wiązań kowalencyjnych, i w związku z tym jest bardzo luźno związany z atomem P.

Półprzewodniki

Piąty elektron znajduje się na poziomie energetycznym, który po wprowadzeniu do krzemu atomu P powstaje w paśmie zabronionym w pobliżu pasma przewodzenia. Brakuje temu elektronowi niewiele energii, żeby oderwać się od atomu P i zostać swobodnym, to znaczy przejść do pasma przewodzenia. Energię potrzebną do przejścia elektronu z atomu P do pasma przewodzenia nazywają energią jonizacji domieszki donorowej i oznaczają:

$$\Delta E_d$$

Półprzewodniki



Półprzewodniki

Wartość energii

$$\Delta E_d$$

zależy od rodzaju pierwiastka z grupy V układu okresowego:

	P	As	Sb
Si	0,045eV	0,050eV	0,039eV
Ge	0,012eV	0,013eV	0,010eV

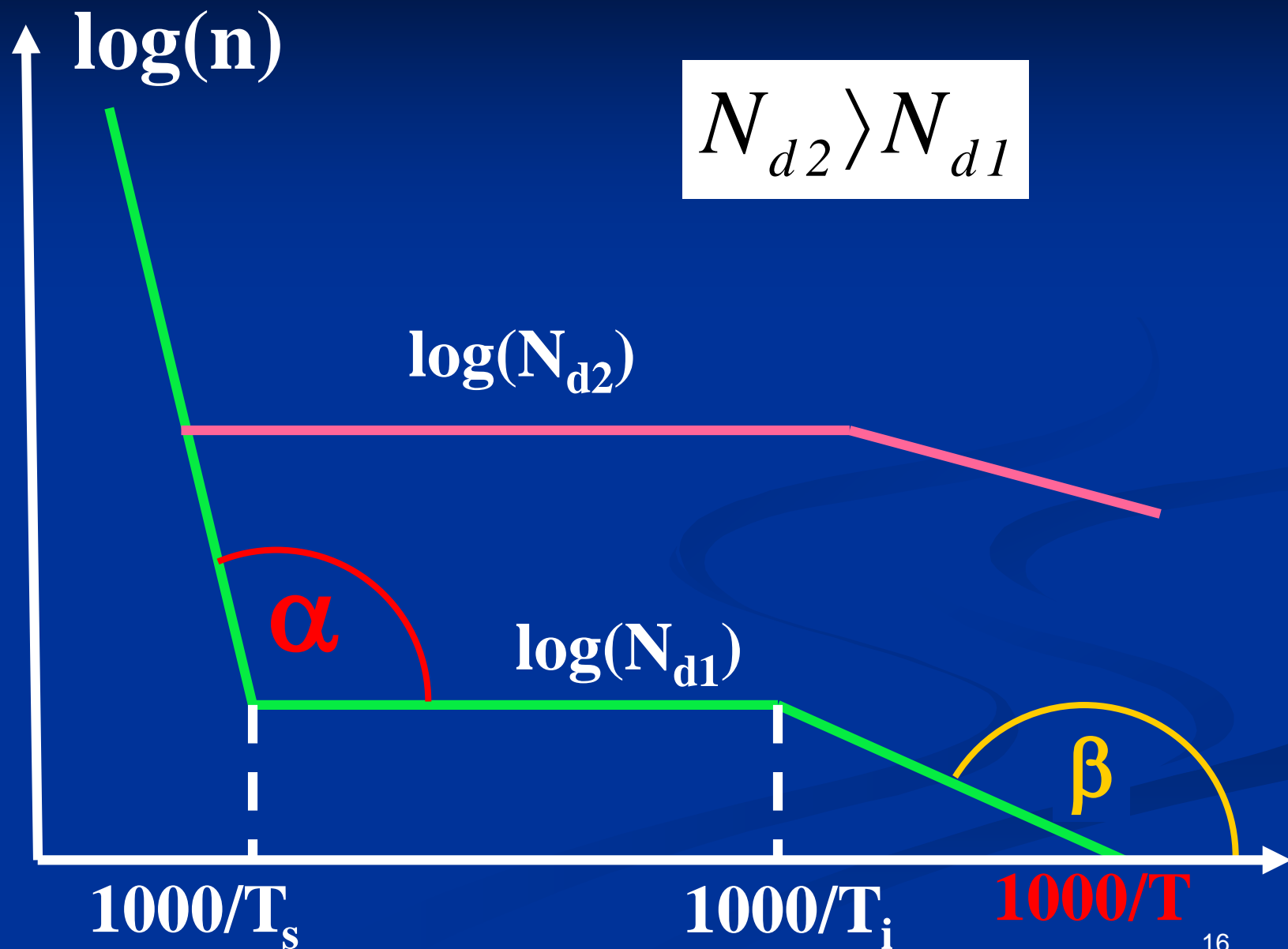
Półprzewodniki

W mikroelektronice stosują bardzo małe zawartości domieszek N_d , w granicach od 10^{13}cm^{-3} do 10^{19}cm^{-3} , to znaczy od ok. 0,0000001% do 0,02% atomowych.

Już przy niewielkich temperaturach elektrony pod wpływem ruchu cieplnego zaczynają odrywać się od atomów P i przechodzą do pasma przewodzenia. Zależność ich koncentracji w paśmie przewodzenia od temperatury podaje wzór:

$$n \cong B(T) \cdot \sqrt{N_d} \exp\left(-\frac{\Delta E_d}{2kT}\right)$$

Półprzewodniki



Półprzewodniki

Przy dalszym wzroście temperatury co raz więcej elektronów przechodzi do pasma przewodzenia, pozostawiając w półprzewodniku jony dodatnie domieszki donorowej. Przy osiągnięciu pewnej temperatury, nazywanej temperaturą wyczerpania domieszek i oznaczanej T_s , w paśmie przewodnictwa będzie tyle elektronów, ile zostało wprowadzono domieszek:

$$n=N_d$$

Temperatury te są stosunkowo niewielkie i wynoszą ok. 25 - 35K. Przy dalszym wzroście temperatury w paśmie przewodnictwa będzie utrzymywała się stała koncentracja elektronów.

Po osiągnięciu wysokich temperatur na skutek nasilających się przejść elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa (obszar przejścia w stan przewodnictwa

Półprzewodniki

samoistnego) następuje dalszy wzrost koncentracji elektronów. Temperatura, przy której następuje przejście do przewodzenia samoistnego oznaczana jest jako T_i i jest funkcją liniową szerokości pasma wzbronionego ΔE_g . Łącząc ze sobą na wykresie Arrheniusa przebiegi koncentracji elektronów dla przypadków domieszkowania donorowego i przewodnictwa samoistnego otrzymamy temperaturową zależność koncentracji elektronów, z przebiegu której przy niskich temperaturach określano energię jonizacji atomów domieszki:

$$\Delta E_d = -2000 \cdot k \cdot \text{tg} \beta$$

Półprzewodniki

Domieszkowanie akceptorowe – półprzewodniki typu p

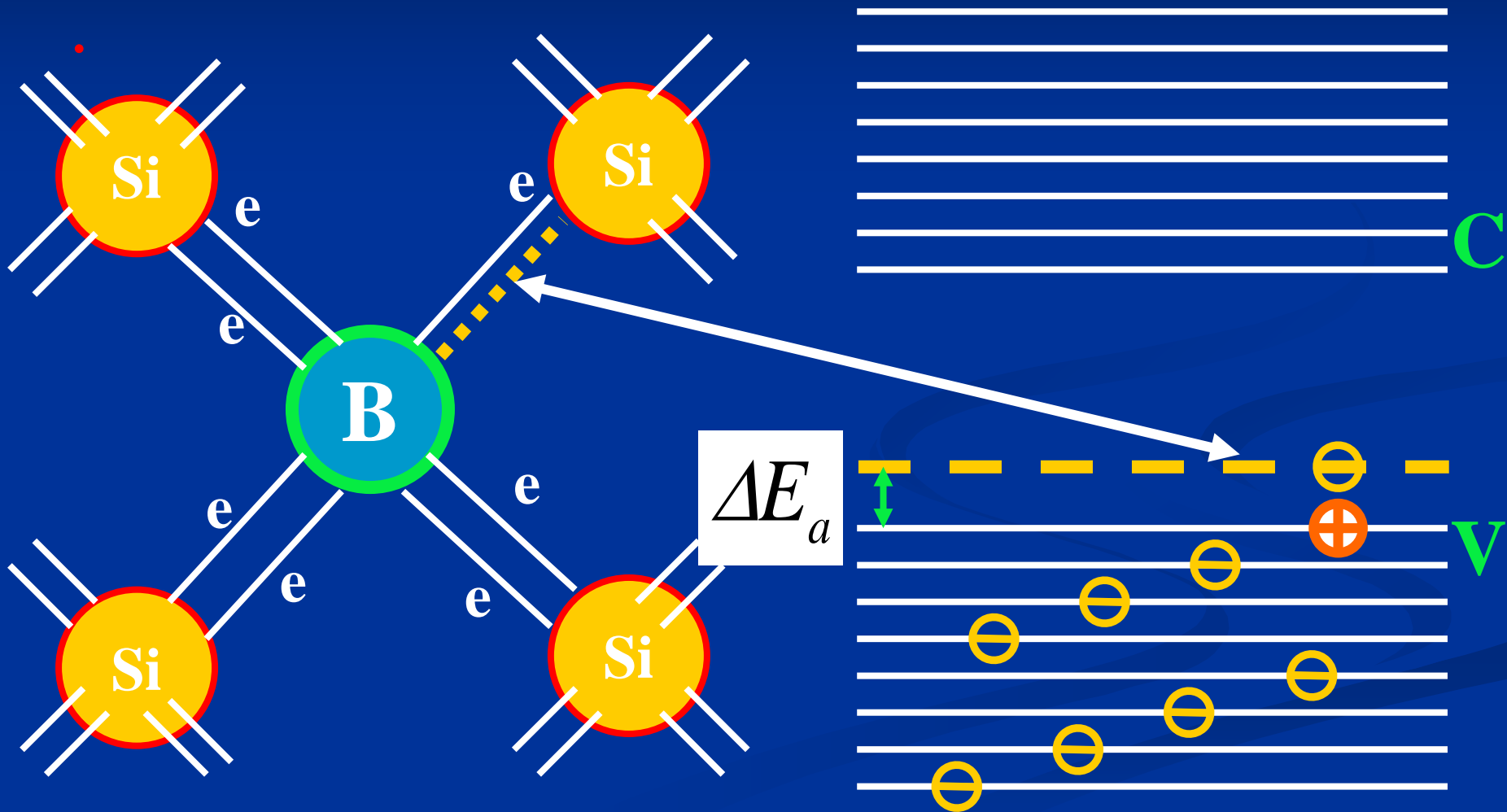
W celu wytworzenia półprzewodników o przewodzeniu za pomocą dziur stosują domieszki akceptorowe – atomy pierwiastków III grupy układu okresowego. Są to pierwiastki B, Al, Ga, In.

Atomy tych pierwiastków posiadają po 3 elektrony na powłocę walencyjnej i tworzą wiązania kowalencyjne z trzema atomami krzemu. Czwarty z otaczających domieszkę B atomów Si ma wiązanie niekompletne, składające się z jednego elektronu.

Poziom energetyczny, odpowiadający niekompletnemu wiązaniu znajduje się w paśmie zabronionym w pobliżu pasma walencyjnego. Energia, która oddziela ten poziom od pasma walencyjnego jest bardzo mała w porównaniu z szerokością pasma zabronionego i oznaczana jako:

$$\Delta E_a$$

Półprzewodniki



Półprzewodniki

Wartość energii

$$\Delta E_a$$

zależy od rodzaju pierwiastka:

	B	Al	Ga	In
Si	0,045eV	0,060eV	0,070eV	0,16eV
Ge	0,010eV	0,010 eV	0,011eV	0,011eV

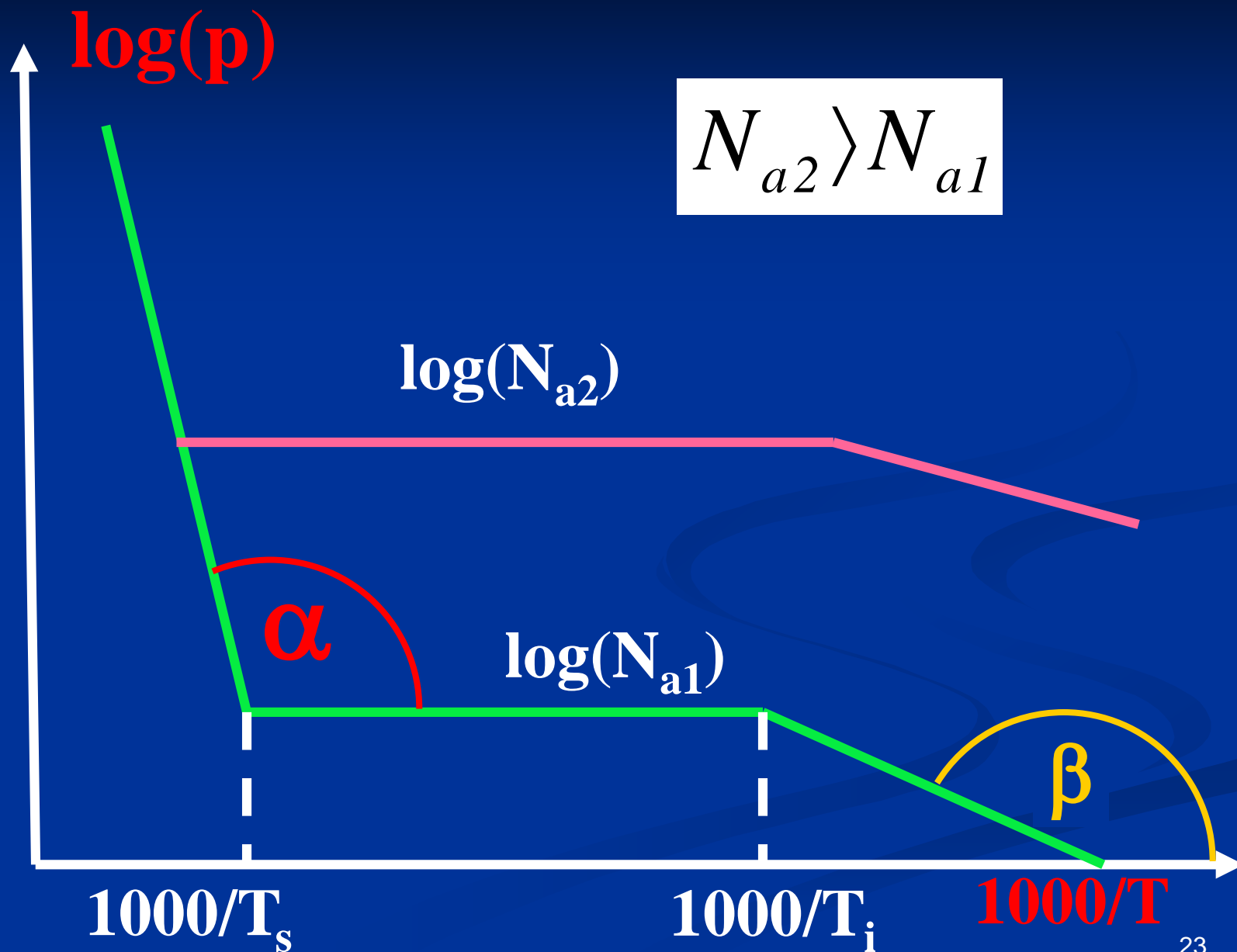
Wykres zależności $p=f(1000/T)$ jest podobny do wyżej pokazanego wykresu $n=f(1000/T)$:

Półprzewodniki

Zależność koncentracji dziur w paśmie walencyjnym od temperatury podaje wzór:

$$p \cong B(T) \cdot \sqrt{N_a} \exp\left(-\frac{\Delta E_a}{2kT}\right)$$

Półprzewodniki



Półprzewodniki

W półprzewodniku typu n konduktywność opisywana jest wzorem:

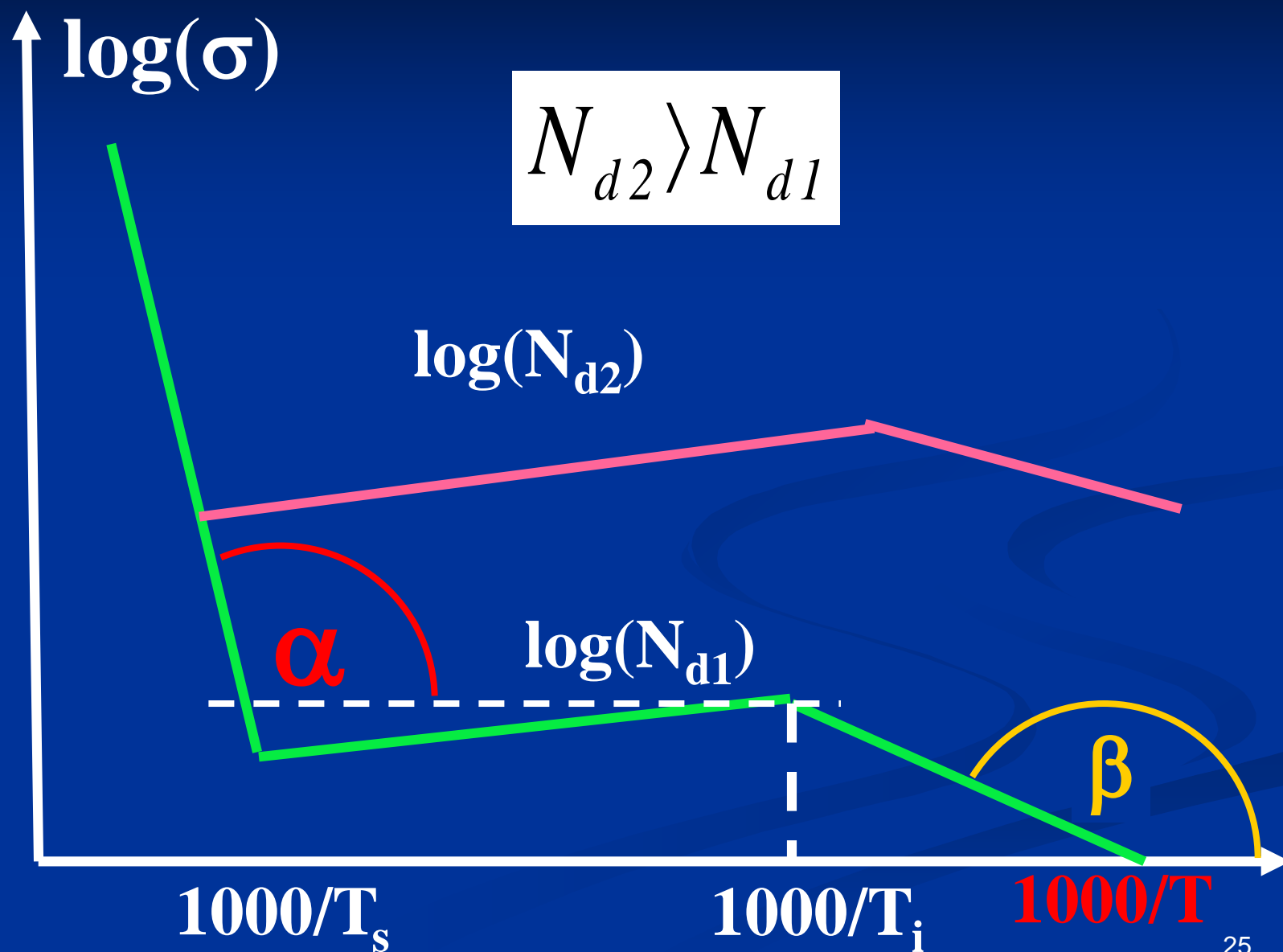
$$\sigma_n = e \cdot n \cdot \mu_n$$

W półprzewodniku typu p - wzorem:

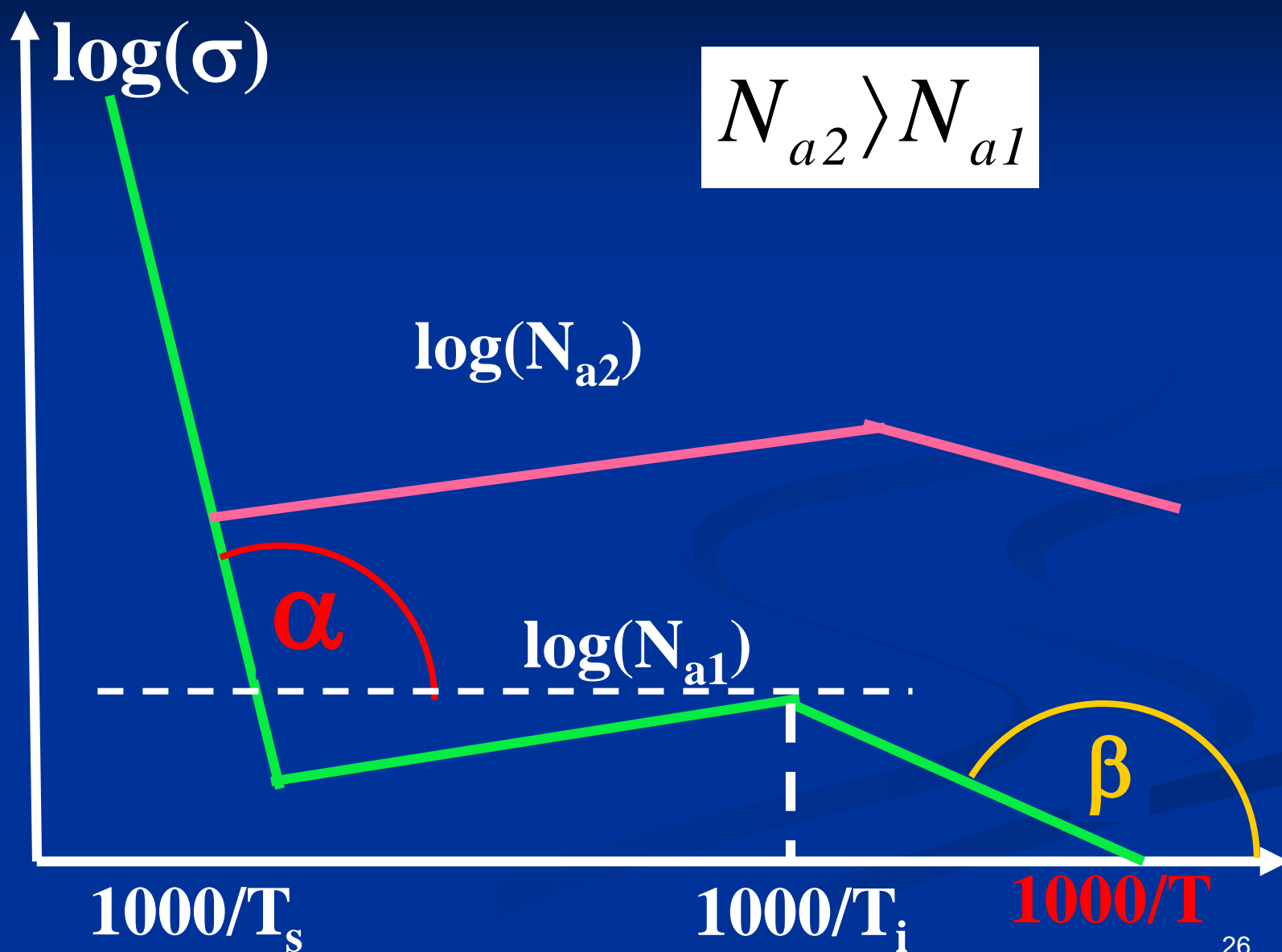
$$\sigma_p = e \cdot p \cdot \mu_p$$

Wchodzące do wzorów wartości μ_n i μ_p nazywamy ruchliwością elektronów i dziur. Wartości te powoli zmniejszają się wraz ze wzrostem temperatury. W związku z tym zależność temperaturowa konduktywności będzie miała nieco inny przebieg, niż zależność koncentracji elektronów lub dziur.

Półprzewodniki



Półprzewodniki



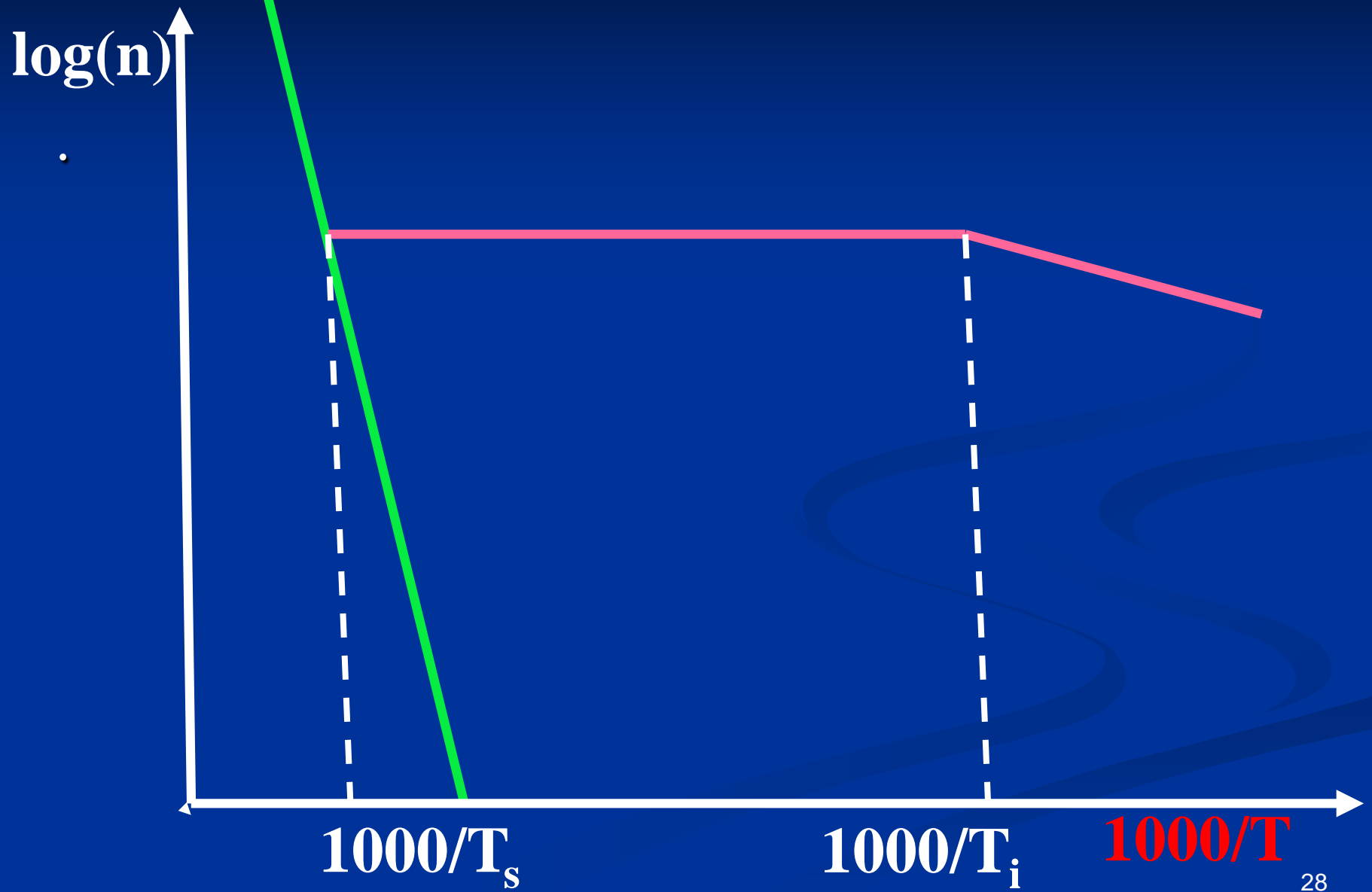
Półprzewodniki

Nośniki mniejszościowe

Okazuje się, że w półprzewodniku donorowym, zawierającym elektrony w koncentracji n są jednocześnie, w niewielkich ilościach dziury. Takie dziury nazywamy nośnikami mniejszościowymi a ich koncentrację oznaczamy p_n , co oznacza, że dziury znajdują się w materiale typu n (dolny indeks n). Podstawowe nośniki prądu, w danym przypadku – elektrony, nazywają nośnikami większościowymi i oznaczają n_n .

Podobno w półprzewodniku akceptorowym nośnikami większościowymi są dziury, oznaczane jako p_p a nośniki mniejszościowe – elektrony, oznaczane jako n_p . Obecność nośników mniejszościowych w półprzewodnikach pokazuje następujący rysunek:

Półprzewodniki



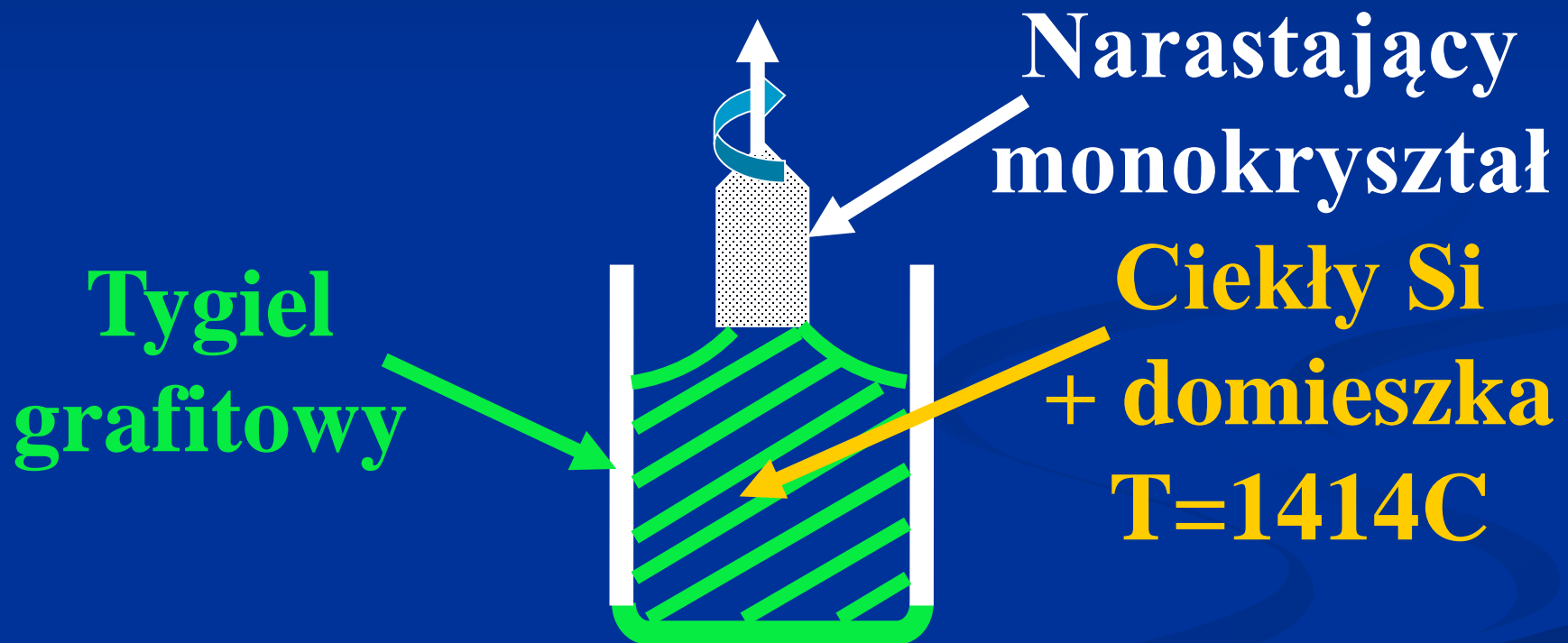
Półprzewodniki

Jak widać z rysunku, koncentracja nośników mniejszościowych określana jest przewodzeniem samoistnym, spowodowanym przejściami elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa pod wpływem energii cieplnej. Przy temperaturach niższych od temperatury przewodnictwa samoistnego koncentracja nośników mniejszościowych jest o wiele mniejsza, niż koncentracja nośników większościowych:

$$p_n \ll n_n, \quad n_p \ll p_p$$

Półprzewodniki

Wytwarzanie krzemu monokrystalicznego metodą Czochralskiego



Nierównowagowe nośniki ładunku

Generacja pod wpływem światła

Przy naświetlaniu półprzewodnika światłem o energii:

$$h\nu > \Delta E_g$$

powstają w nim pary elektron – dziura. Nośniki takie nazywamy nośnikami nierównowagowymi. Ich koncentracja tym wyższa, im wyższe natężenie światła. W półprzewodniku typu **n** koncentracja nośników większościowych wynosi **n_n** a koncentracja nośników mniejszościowych – dziur **p_n** . Przy naświetleniu światłem o niedużych natężeniach wzrasta jedynie koncentracja nośników mniejszościowych.

Półprzewodniki

W jednostce objętości w ciągu jednej sekundy powstaje g par elektron – dziura. Wartość ta jest proporcjonalna do natężenia światła. Gdyby nie było żadnych innych procesów związanych z nośnikami nierównowagowymi, ich koncentracja wzrastała by wraz ze zwiększeniem czasu naświetlania. W praktyce po pewnym czasie następuje stabilizacja koncentracji nośników nierównowagowych. Jest to związane z nasilaniem się wraz ze wzrostem koncentracji mniejszościowych nośników nierównowagowych procesów rekombinacji – wzajemnej eliminacji elektronu i dziury przy ich spotkaniu się w półprzewodniku. Przy tym następuje przejście elektronu z pasma przewodnictwa do pasma walencyjnego, gdzie zajmuje on miejsce dziury.

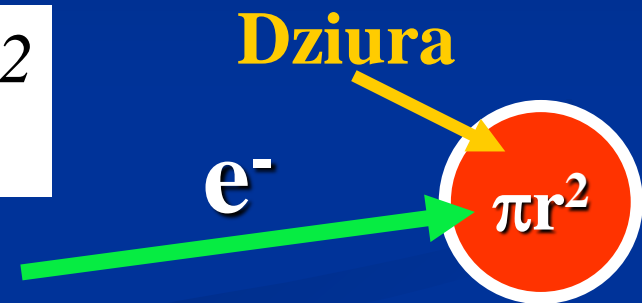
Szybkość procesów rekombinacji określa czas życia nośników nierównowagowych, oznaczany literą τ .

Półprzewodniki

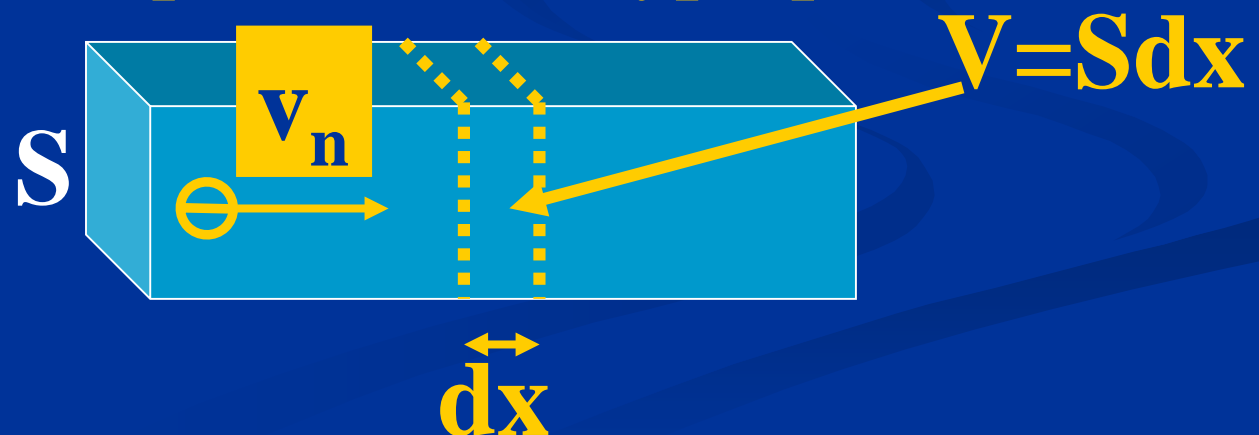
Czas życia nierównowagowych nośników prądu

Wprowadzimy pojęcie przekroju czynnego na wychwyty elektronu przez dziurę:

$$A_n = \pi \cdot r^2$$



Półprzewodnik typu p



Półprzewodniki

Koncentracja dziur w półprzewodniku akceptorowym wynosi p . W warstwie o objętości Sdx znajduje się $pSdx$ dziur, a ich całkowity przekrój czynny $S_z = A_n p S dx$.

Prawdopodobieństwo wychwytu elektronu przez dziury znajdujące się w warstwie o grubości dx :

$$W_n = S_z / S = A_n p dx.$$

Ponieważ $dx = v_n dt$, więc

$$W_n = A_n p v_n dt$$

Prawdopodobieństwo wychwytu elektronu w jednostkę czasu:

$$P_n = \frac{W_n}{dt} = A_n \cdot p \cdot v_n$$

Półprzewodniki

Wartość prawdopodobieństwa podaje liczbę zderzeń w jednostkę czasu. Średni czas życia elektronu w półprzewodniku akceptorowym jest równy czasowi pomiędzy dwoma kolejnymi zderzeniami:

$$\tau_n = \frac{1}{P_n} = \frac{1}{A_n v_n p}$$

W przypadku półprzewodnika donorowego średni czas życia dla dziur można zapisać jako:

$$\tau_p = \frac{1}{P_p} = \frac{1}{A_p v_p n}$$

Półprzewodniki

Gdy czas naświetlania t jest o wiele większy, niż czas życia ($t \gg \tau$), w półprzewodniku następuje stan stacjonarny, w którym szybkości generacji nośników nierównowagowych i ich rekombinacji są jednakowe. Koncentrację nośników nierównowagowych możemy zapisać jako:

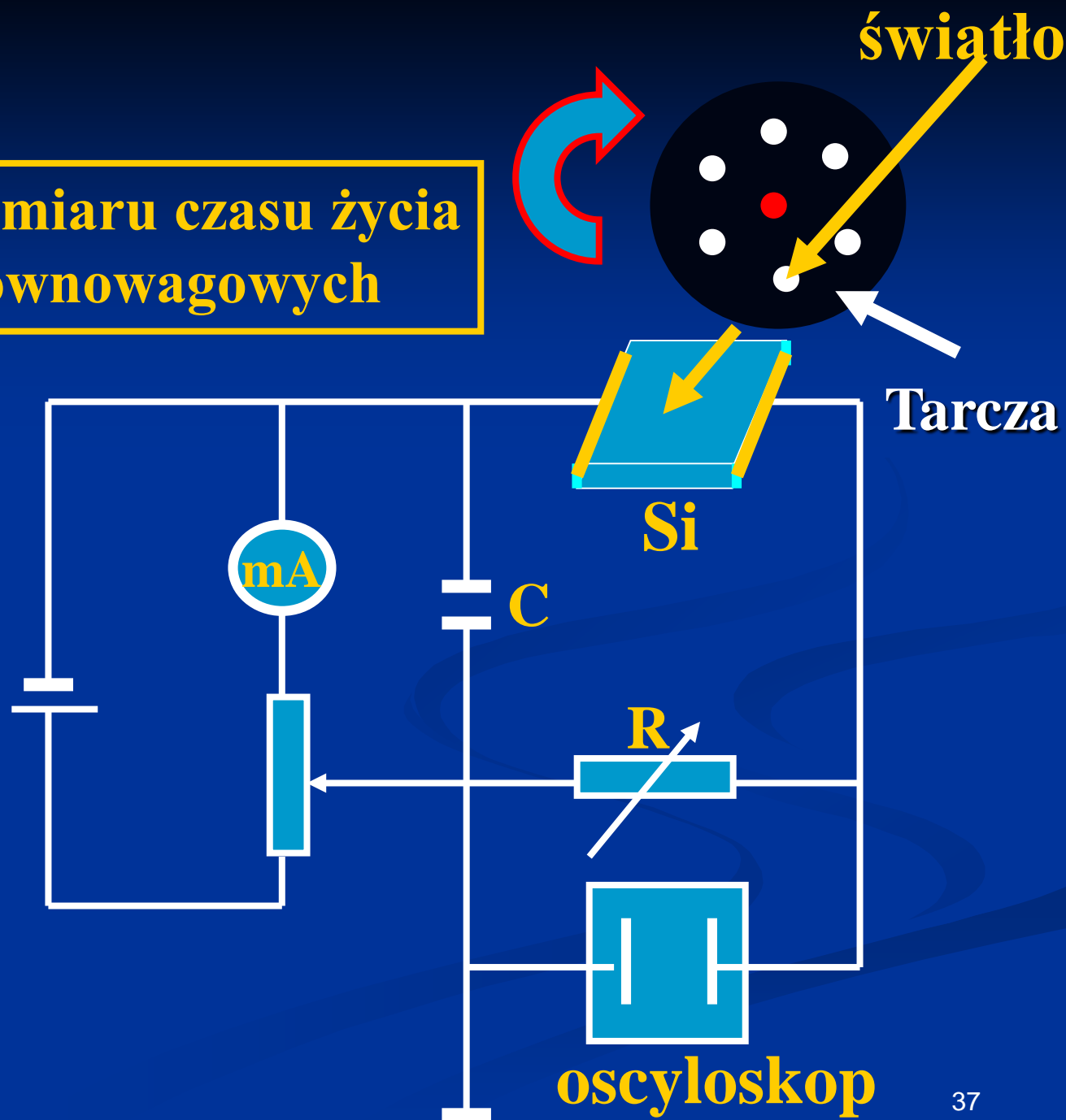
$$\Delta n(t) = \Delta p(t) = g \cdot \tau \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right\}$$

Po wyłączeniu naświetlania:

$$\Delta n(t) = \Delta p(t) = g \cdot \tau \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

Półprzewodniki

Stanowisko do pomiaru czasu życia nośników nierównowagowych



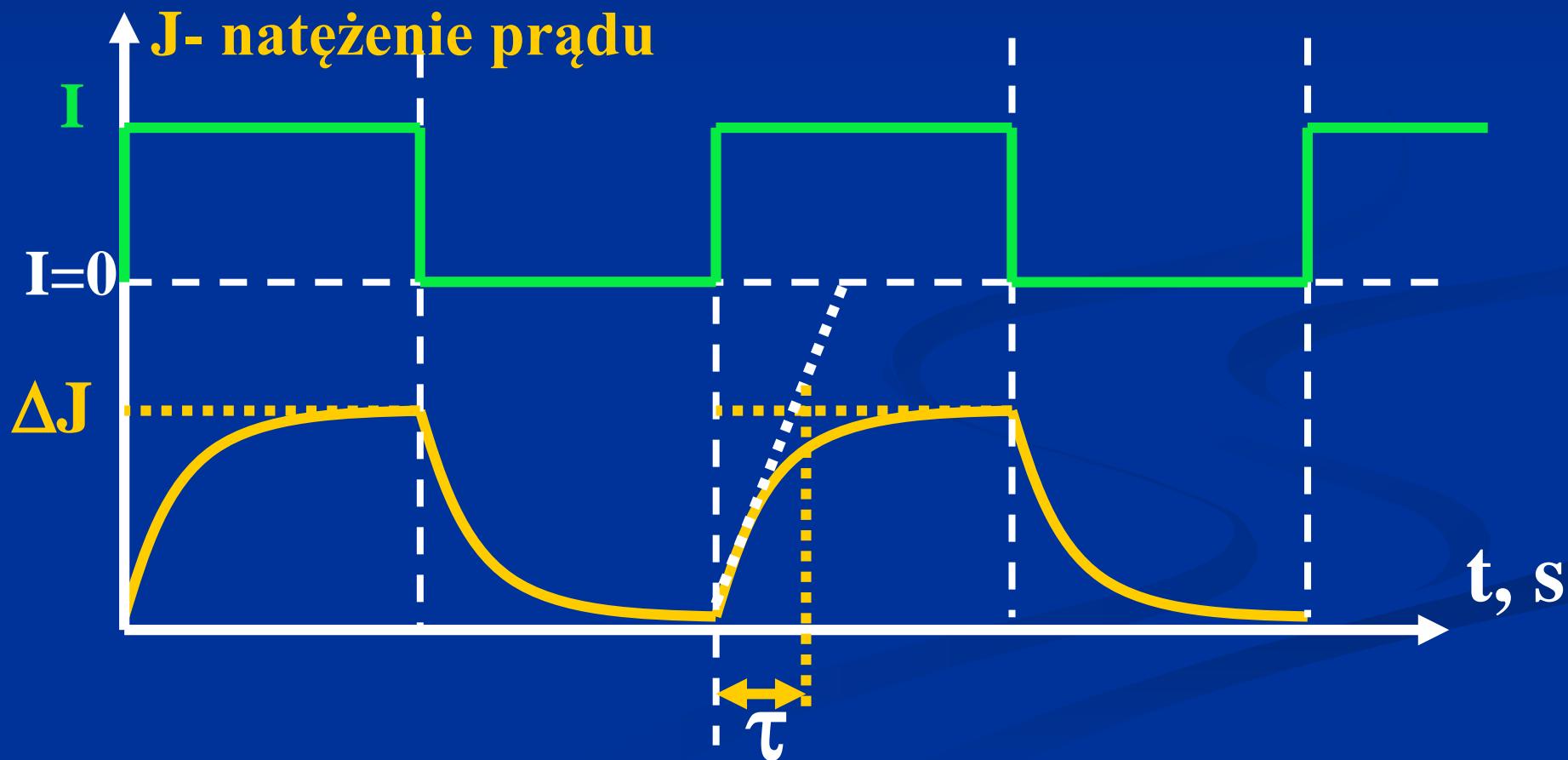
Półprzewodniki

$$J = J_0 + \Delta J.$$

ΔJ - prąd
nierównowagowy

I - natężenie światła

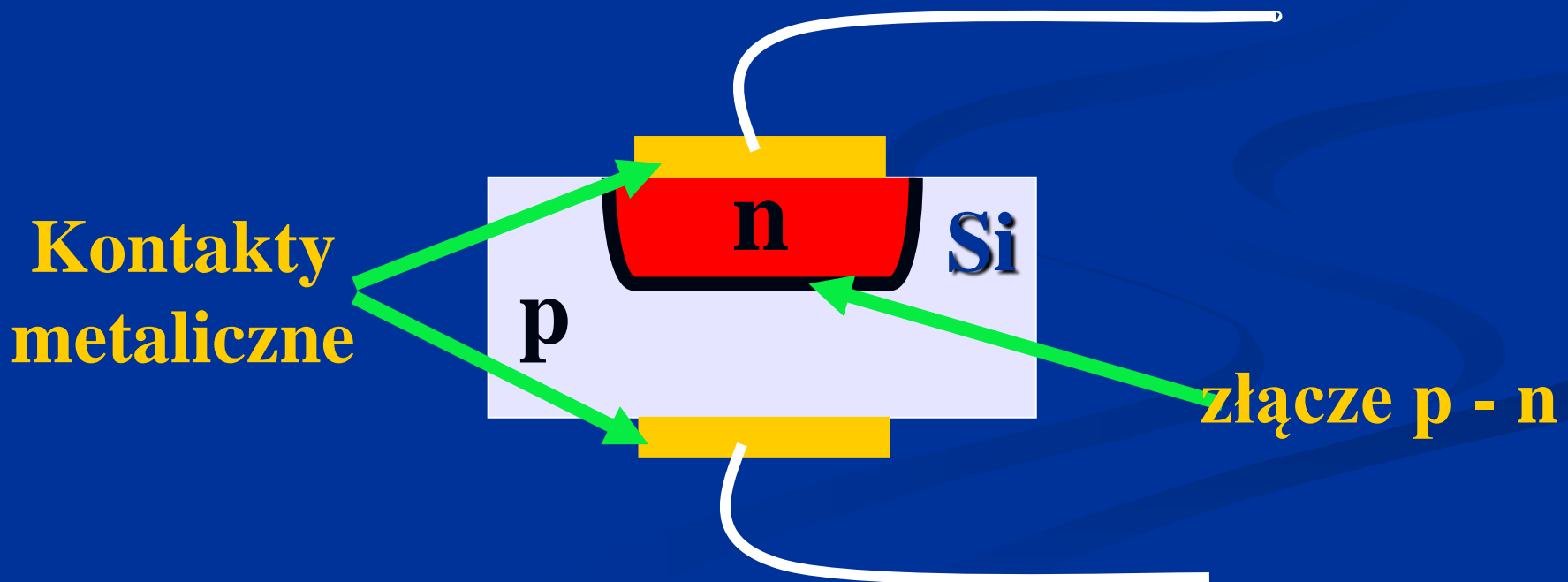
J - natężenie prądu



Półprzewodniki

Złącze p – n

Złączem p – n nazywamy występujący w monokryształe półprzewodnika styk pomiędzy dwoma obszarami o różnych typach przewodnictwa - donorowym (n) i akceptorowym (p):



Półprzewodniki

Obecnie są wykorzystywane dwa podstawowe sposoby wytwarzania złącz p – n. Pierwszy z nich – dyfuzja domieszki donorowej, na przykład, fosforu, do płytki krzemu, która podczas wytwarzania została domieszkowana domieszką akceptorową, na przykład, borem.

Dyfuzja atomów, elektronów lub dziur występuje tam gdzie jest gradient ich koncentracji, odbywa się pod wpływem ruchu cieplnego i polega na przemieszczaniu się cząstek z obszaru o dużej ich koncentracji do obszaru o koncentracji mniejszej.

Dyfuzja jest wielogodzinnym procesem wykonywanym przy bardzo wysokich, powyżej 1000C temperaturach. W celu przeprowadzenia dyfuzji płytki krzemowe umieszczają w piecu rurowym, w którym przez cały czas jest utrzymywana stabilna temperatura. Jednocześnie piec przedmuchiwany jest gazem argonem z domieszką gazu – związku chemicznego, w skład którego wchodzi domieszkujący pierwiastek.

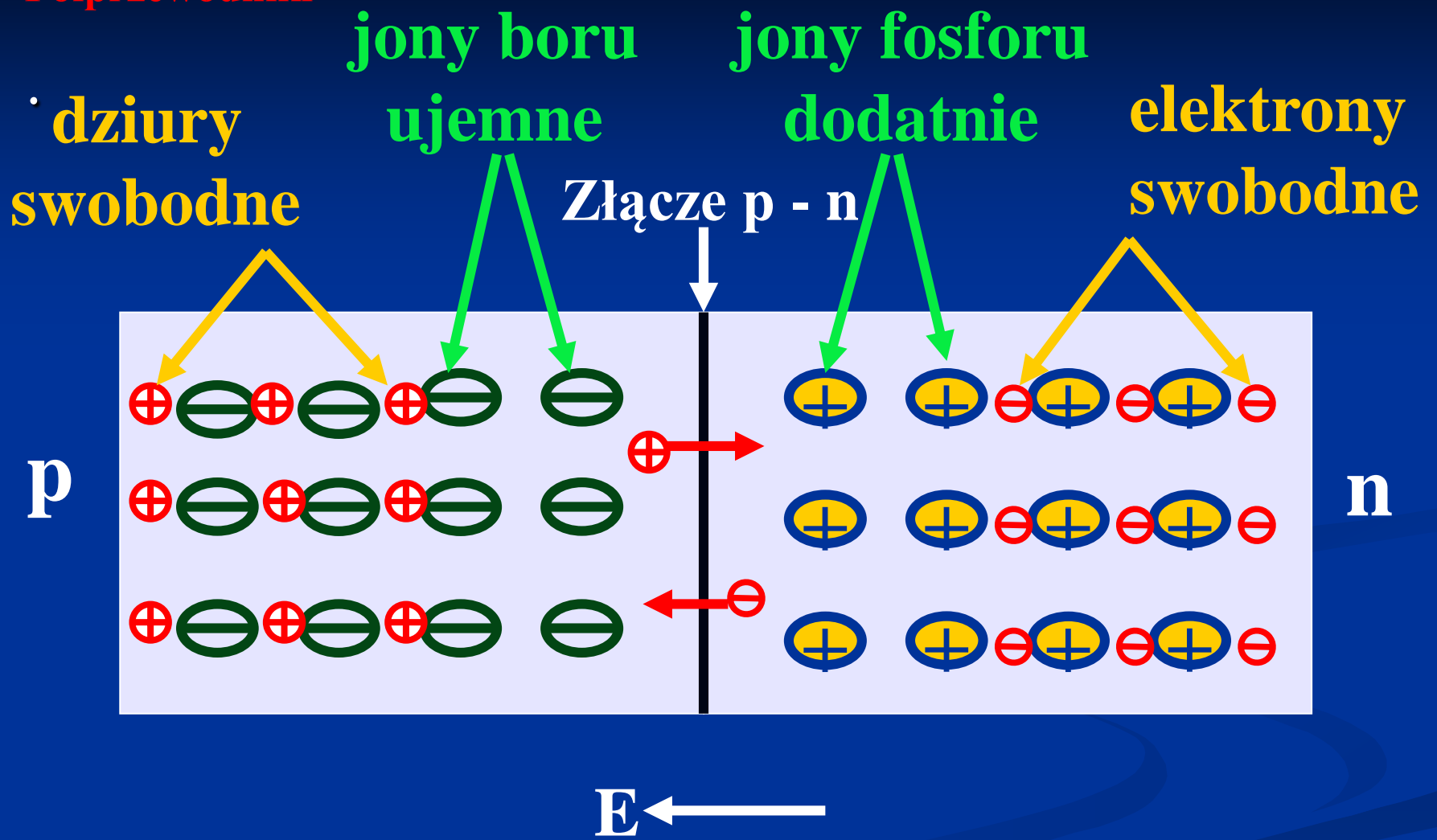
Półprzewodniki

Drugi sposób wytwarzania złącza p – n nazywa się implantacją jonową. Polega ona na wytwarzaniu za pomocą wyładowania jonów pierwiastka domieszkującego, przyspieszaniu jonów różnicą potencjałów ok. 100kV a następnie wbijaniu jonów domieszki do półprzewodnika. W celu aktywacji implantowanych jonów niezbędne jest półgodzinne wygrzewanie płytek krzemowych w temperaturze ok. 1000C.

Żeby powstało złącze p – n koncentracja domieszki, wprowadzonej do krzemu za pomocą dyfuzji lub implantacji jonowej, w naszym przypadku, koncentracja domieszki donorowej powinna być o wiele większa od koncentracji domieszki akceptorowej w płytce krzemowej:

$$N_d \gg N_a$$

Półprzewodniki



Półprzewodniki

W złączu p – n zachodzi dyfuzja elektronów z obszaru typu n, gdzie jest ich dużo (nośniki większościowe) do obszaru typu p, gdzie jest ich mało (nośniki mniejszościowe). Jednocześnie z obszaru typu p do obszaru typu n odbywa się dyfuzja dziur. W pobliżu złącza p – n elektrony i dziury spotykają się i ulegają rekombinacji. W ten sposób w pobliżu złącza w półprzewodniku donorowym powstaje warstwa składająca się z jonów dodatnich fosforu, a w półprzewodniku akceptorowym – warstwa zawierająca jony ujemne boru. Taki układ ładunków przestrzennych tworzy pewnego rodzaju naładowany kondensator, w którym pole elektryczne jest skierowane od ładunku dodatniego w obszarze n do ładunku ujemnego w obszarze p.

Półprzewodniki

Wraz ze wzrostem liczby elektronów i dziur, przemieszczających się pod wpływem dyfuzji rosną wartości ładunków przestrzennych, a znaczy i wartość natężenia pola elektrycznego w złączu p – n. Powstałe pole elektryczne utrudnia dyfuzję elektronów i dziur. Po osiągnięciu określonej wartości natężenia pola, gdy siła dyfuzyjna zostanie zrównoważona przez siłę elektryczną, dyfuzja zostanie całkowicie zahamowana. Dla zrozumienia zasady działania złącza p – n wprowadzimy pojęcie poziomu energii Fermi’ego E_F . Jest to poziom energetyczny, powyżej którego wszystkie poziomy są nie obsadzone przez elektrony, poniżej – wszystkie są zajęte. Poziom Fermi’ego jest stały w całej objętości półprzewodnika, bez względu na to w jaki sposób są domieszkowane różne jego części.

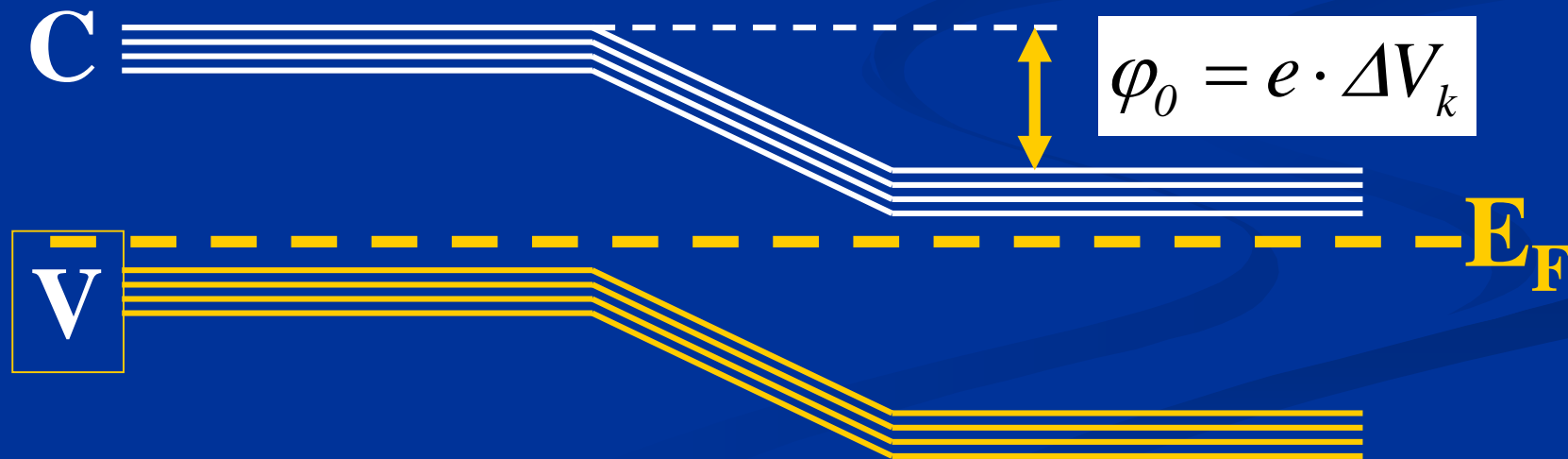
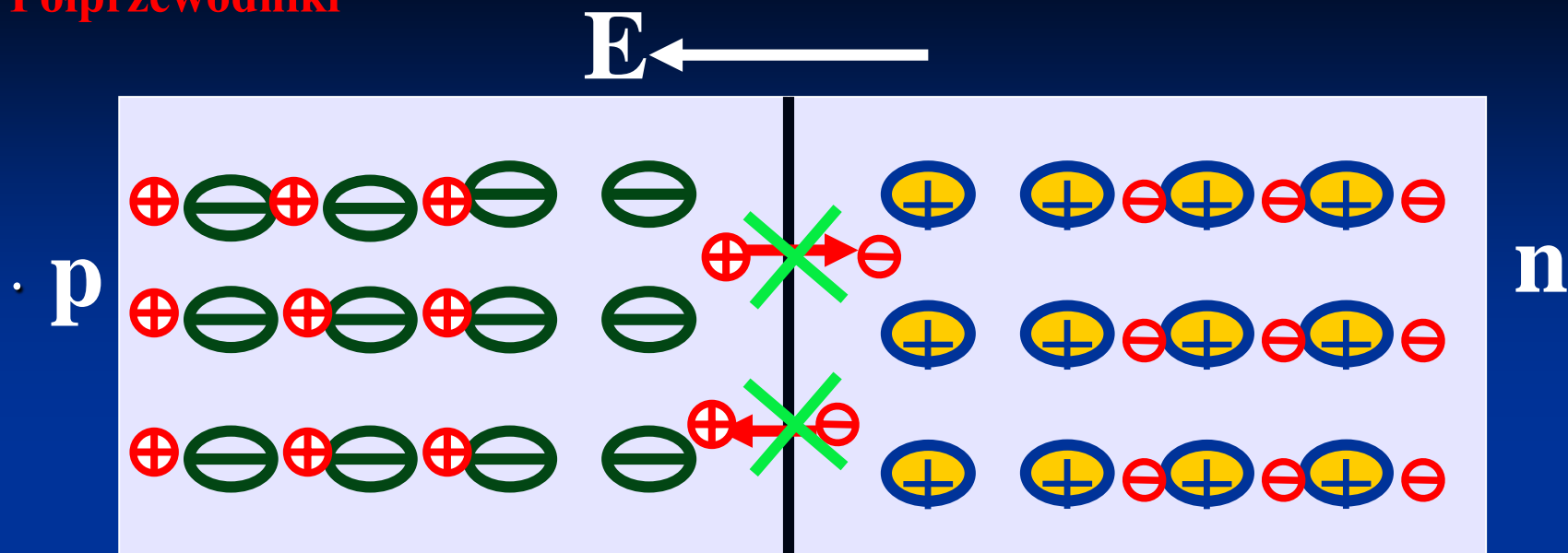
Półprzewodniki

W półprzewodniku donorowym przy temperaturach powyżej temperatury wyczerpania domieszki poziom Fermi'ego znajduje się w pobliżu poziomu donorowego.

W półprzewodniku samoistnym poziom Fermi'ego znajduje się w pobliżu środka pasma zabronionego.

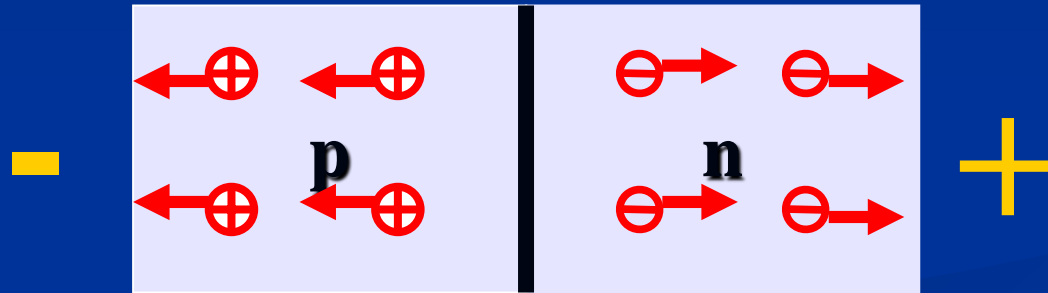
W półprzewodniku akceptorowym przy temperaturach powyżej temperatury wyczerpania domieszki poziom Fermi'ego znajduje się w pobliżu poziomu akceptorowego.

Półprzewodniki



Półprzewodniki

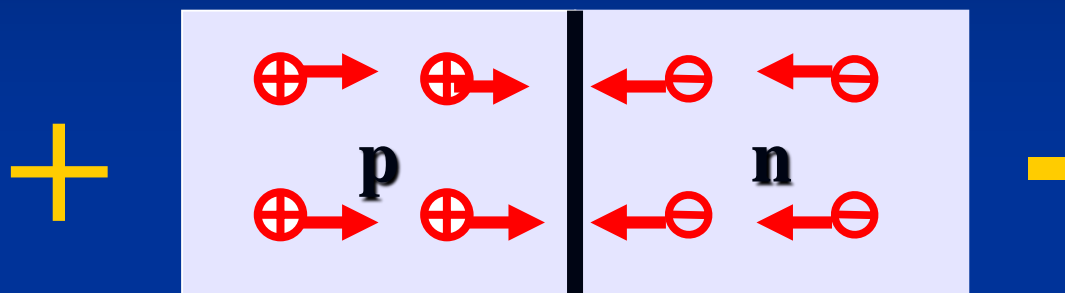
Przewodzenie prądu w złączu p – n kierunek zaporowy



$$i_{zap} = \frac{dq}{dt} = 0$$

Półprzewodniki

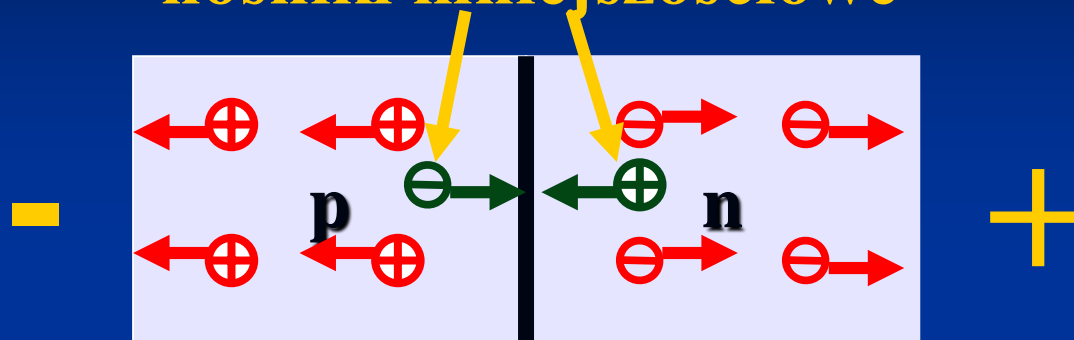
Kierunek przewodzenia



$$i_{prz} = \frac{dq}{dt} \neq 0$$

Półprzewodniki

Kierunek zaporowy nośniki mniejszościowe



$$i_{zap} \ll i_{prz}$$

ponieważ koncentracje nośników mniejszościowych są wiele mniejsze niż koncentracje nośników większościowych:

$$n_p \ll n_n, \quad p_n \ll p_p$$

Półprzewodniki

Charakterystyka prądowo – napięciowa złącza p – n:

$$i = C \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right) \cdot \left\{ \exp\left(-\frac{q \cdot V}{kT}\right) - 1 \right\}$$

Gdzie: i, V ze znakiem ($+$) dla kierunku przewodzenia,

i, V ze znakiem ($-$) dla kierunku zaporowego.

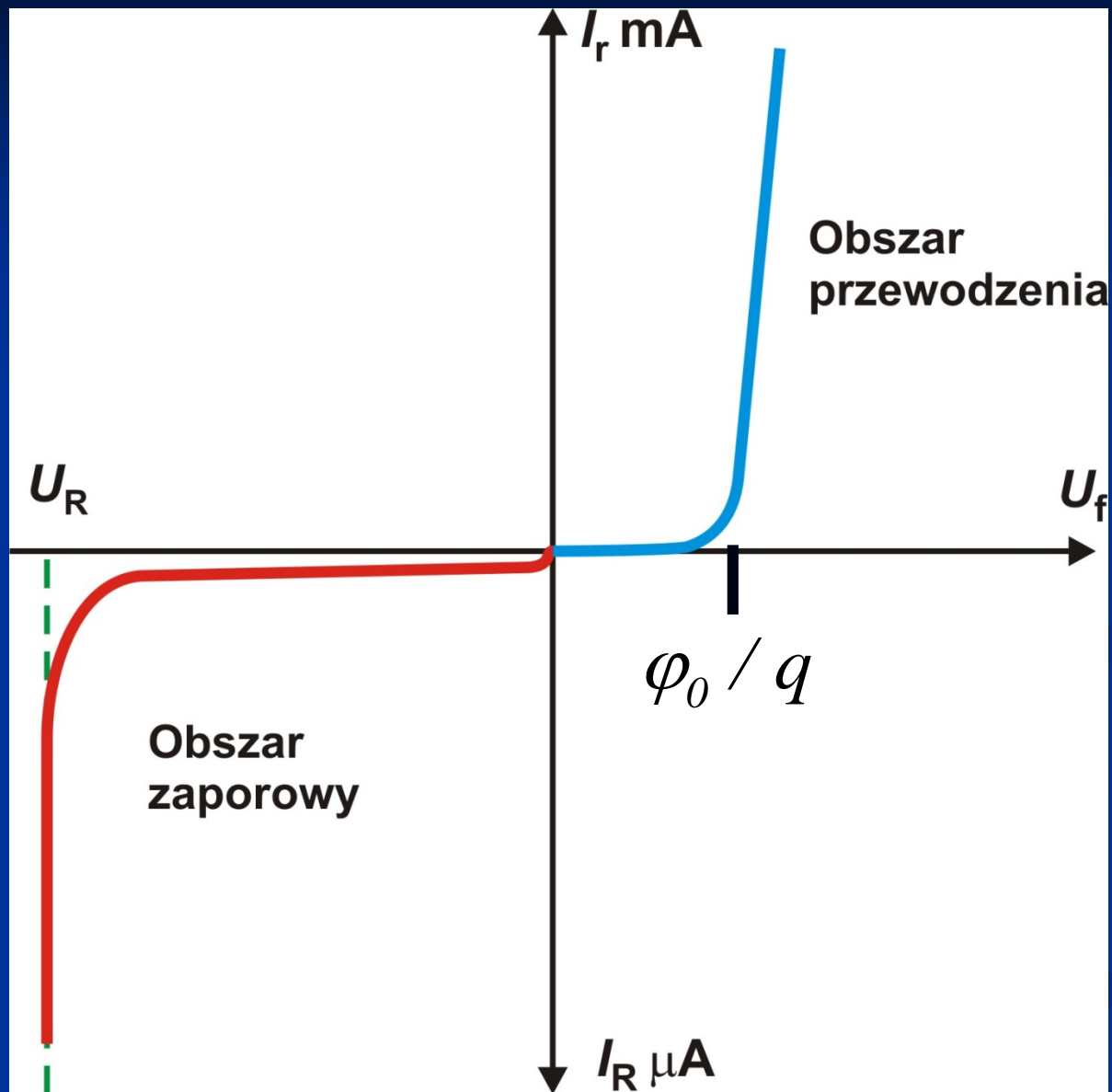
Półprzewodniki

Pierwsza eksponenta opisuje koncentrację nośników mniejszościowych i związane z nią natężenie prądu zaporowego, ponieważ dla wartości ujemnych V , zarówno dla elektronów jak i dla dziur druga eksponenta jest równa 0. Stąd:

$$i_{zap} = C \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right)$$

Druga – natężenie prądu w kierunku przewodzenia.

Półprzewodniki



Półprzewodniki

Przy zwiększeniu różnicy potencjałów przyłożonej w kierunku przewodzenia, dopóki stosunek pomiędzy wartością bariery potencjału na złączu a wartością energii uzyskiwanej przez elektron (dziurę) przy przejściu przez złącze jest :

$$V \ll \varphi_0 / q$$

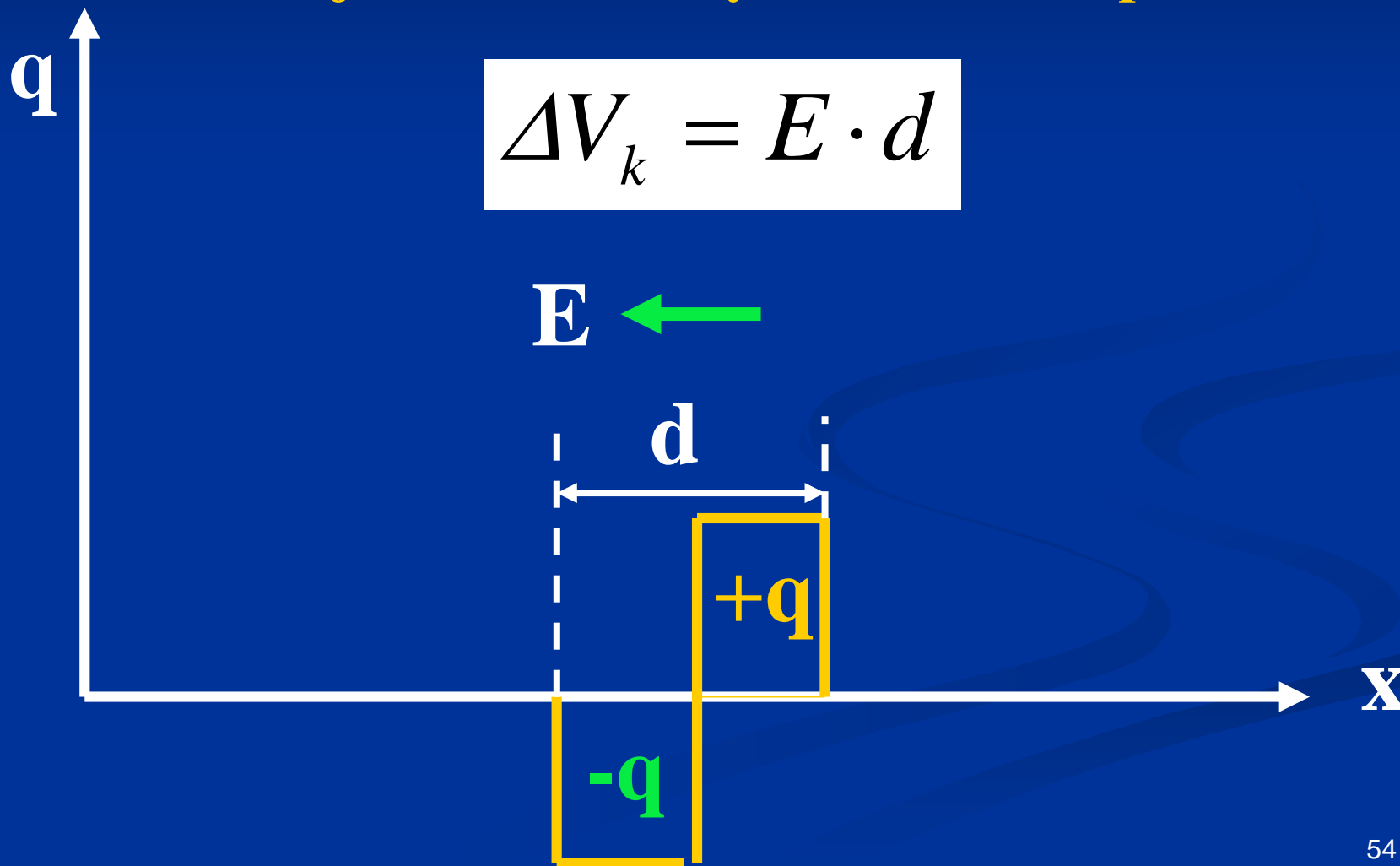
prąd przez złącze prawie nie płynie. Dopiero przy odwróceniu powyższej nierówności natężenie prądu zaczyna wzrastać.

$$V \gg \varphi_0 / q$$

Półprzewodniki

Pozostałe właściwości złącza p – n i ich zastosowania

1. Pojemność elektryczna. Warikap



Półprzewodniki

Grubość warstwy ładunku przestrzennego d podaje wzór:

$$d = \left[\frac{2\varepsilon_0\varepsilon(\varphi_0 \pm eV)}{n_n \cdot e^2} \right]^{1/2}$$

Gdzie φ_0 wartość potencjalnej bariery energetycznej na złączu

Pojemność kondensatora płaskiego:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{d},$$

Pojemność złącza p – n włączonego w kierunku zaporowym (tzw. pojemność barierowa):

$$C_b = S \left[\frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot e \cdot n_n}{2(\varphi_0 \pm e \cdot V)} \right]^{1/2}$$

Półprzewodniki

Zależność pojemności złącza p – n od napięcia jest funkcją trudną do wykreślenia. Również i w tym przypadku zastosujemy zamianę zmiennych, wyrównujących wykres:

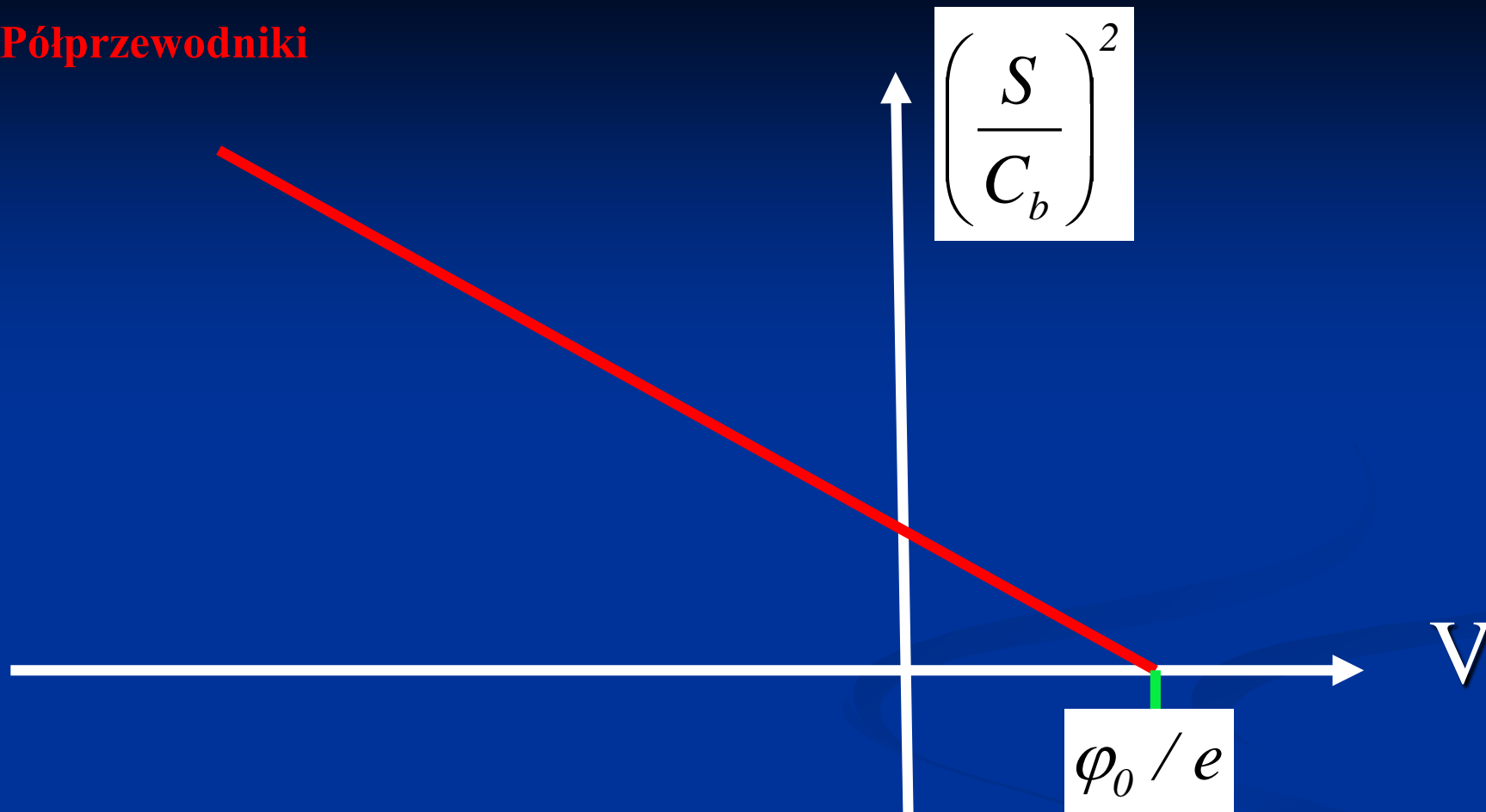
$$Y = \left(\frac{S}{C_b} \right)^2$$

Wykorzystując nowe Y uzyskamy:

$$Y = \left(\frac{S}{C_b} \right)^2 = \left(\frac{2}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot e \cdot n_n} \right) \cdot \left(\frac{\varphi_0}{e} - V \right)$$

W nowych współrzędnych (Y, V) wykres przyjmie następującą postać:

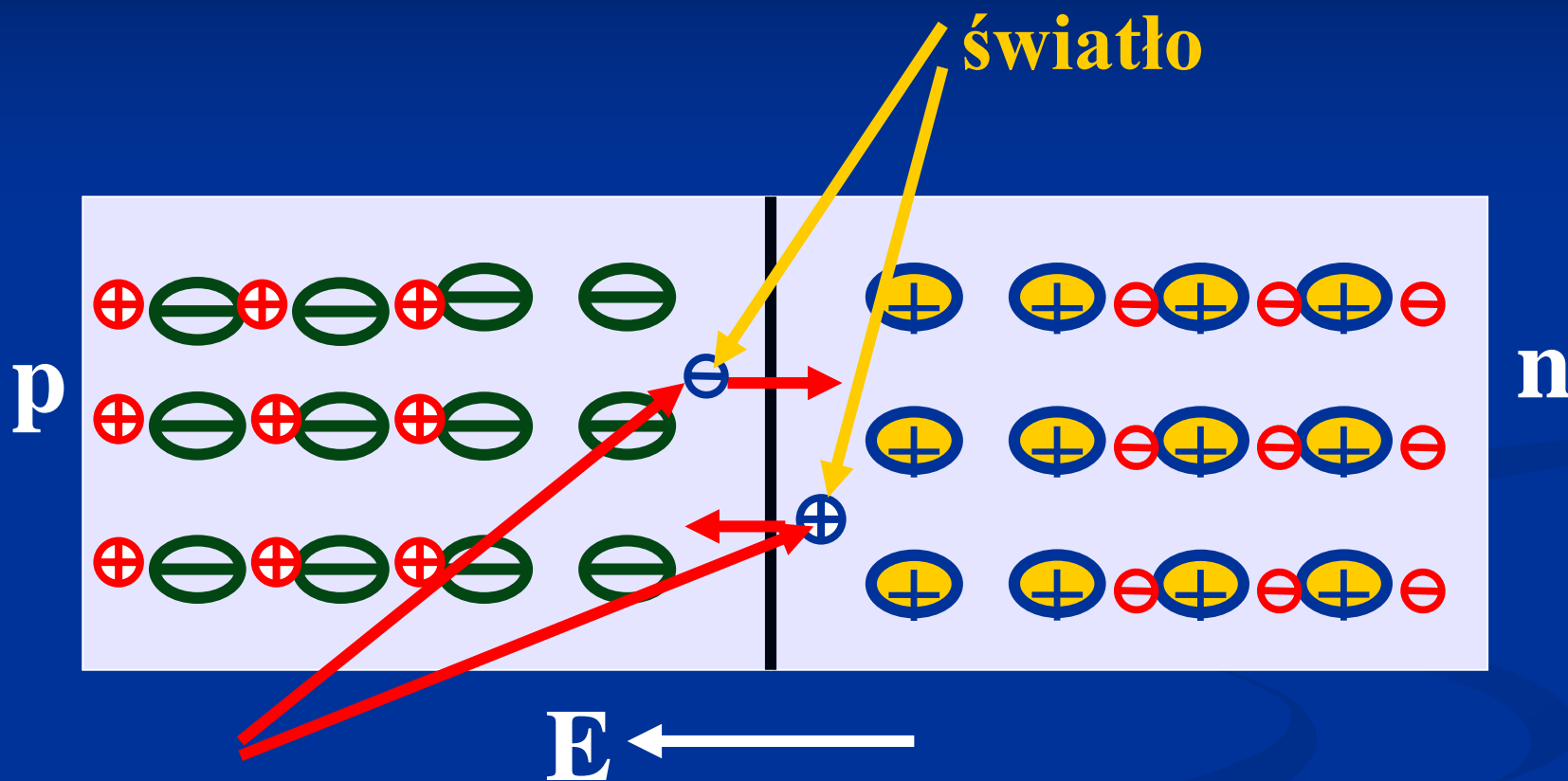
Półprzewodniki



Zależność pojemności złącza p – n od wartości napięcia przyłożonego w kierunku zaporowym wykorzystywana jest do budowy specjalnych diod o zmiennej pojemności sterowanych przyłożonym napięciem. Taka dioda ma nazwę warikap.

Półprzewodniki

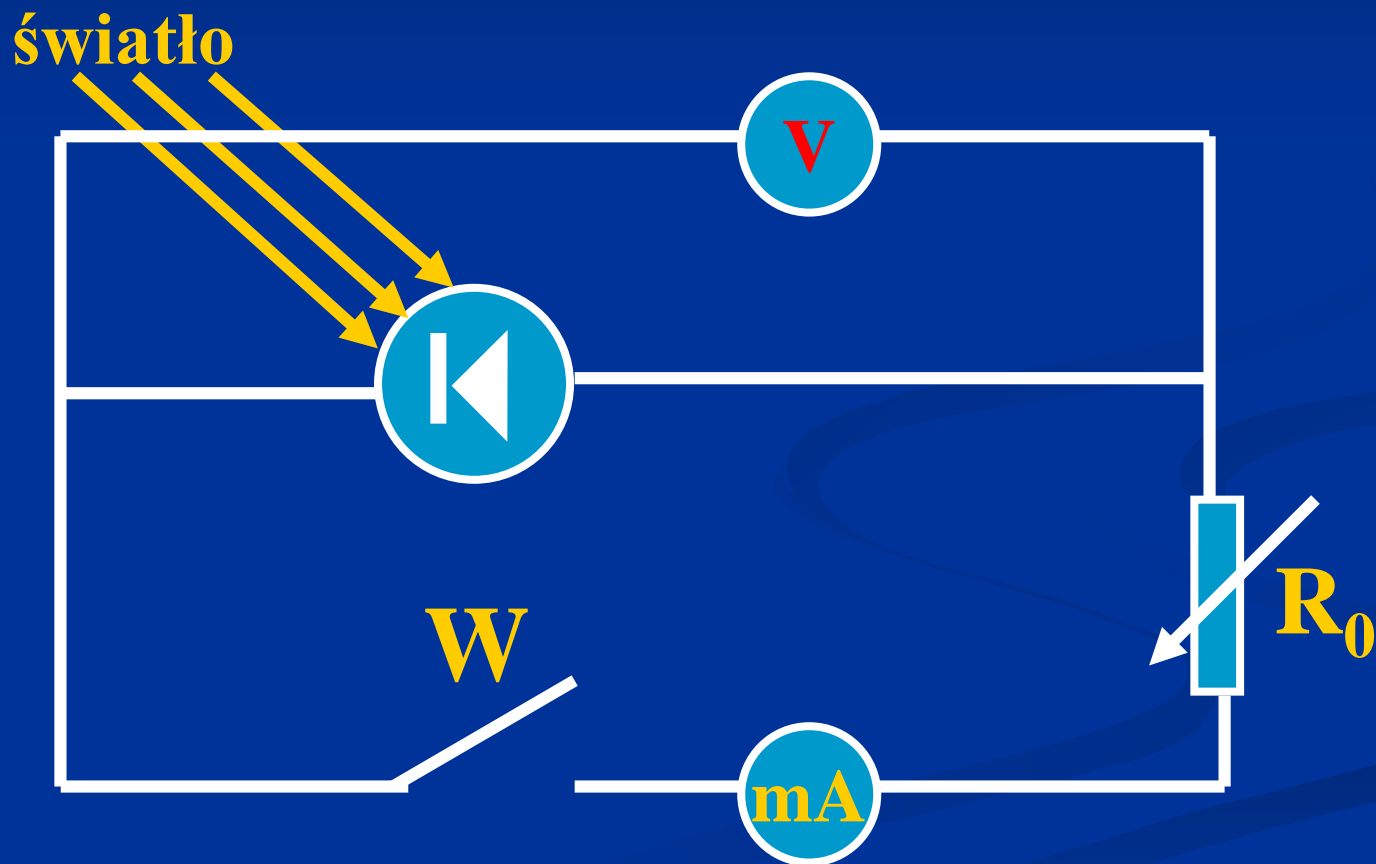
2. Zjawiska fotoelektryczne w złączu p - n



Nośniki mniejszościowe generowane światłem

Półprzewodniki

Schemat stanowiska do badań właściwości fotoelektrycznych złącza p - n



Półprzewodniki

Gdy wyłącznik W jest w stanie wyłączonym, woltomierz wskazuje maksymalną wartość napięcia - napięcie biegu jałowego na fotoogniwie, spowodowane przez światło. Jego wartość z dobrym przybliżeniem jest równa:

$$V_j = \varphi_0 / e$$

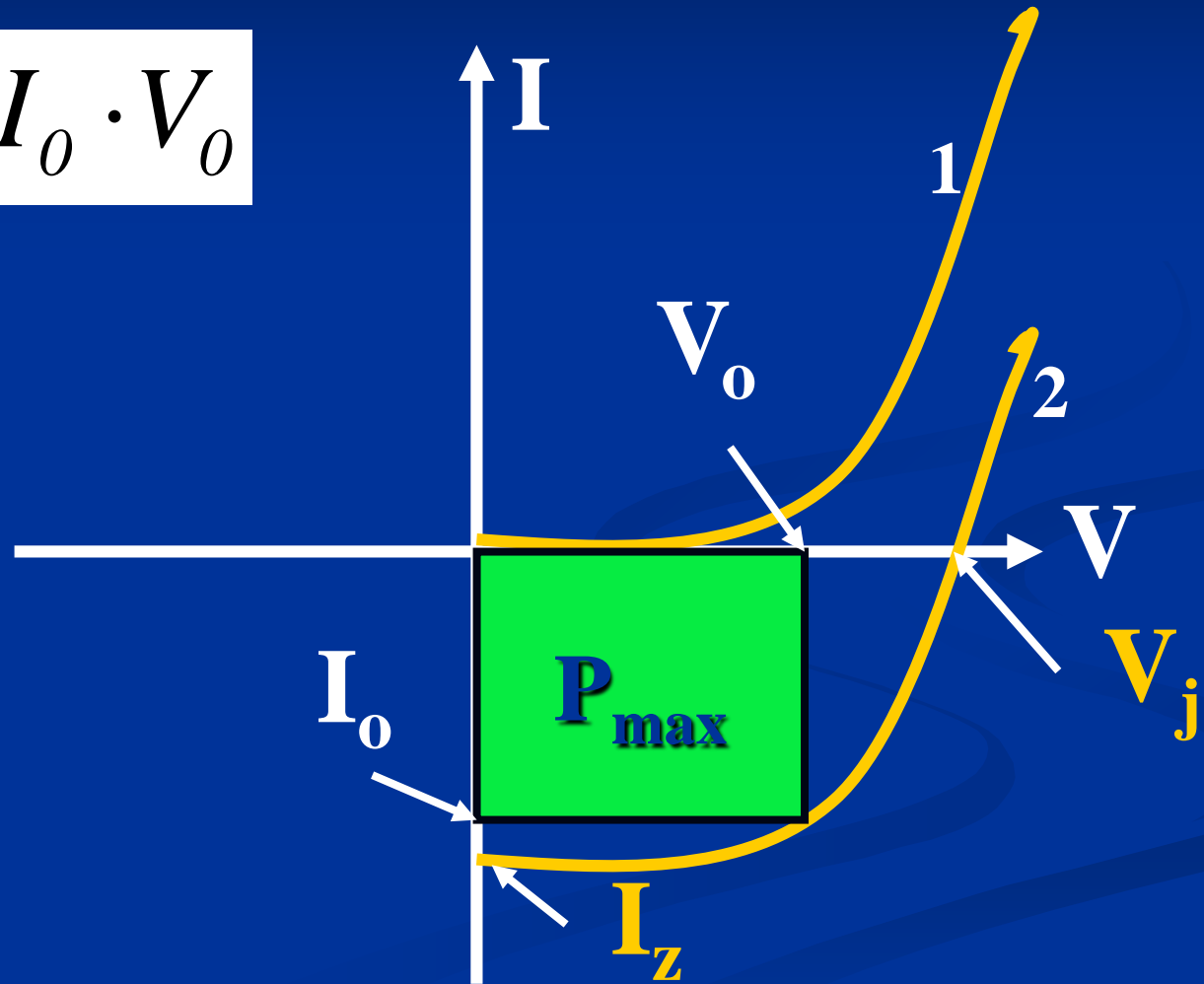
Natężenie prądu w obwodzie $i=0$.

Przy zamkniętym wyłączniku i rezystancji odbiornika $R=0$ w obwodzie płynie prąd o maksymalnym natężeniu, tzw. prąd zwarciaowy I_z . Spadek napięcia na fotoogniwie $V=0$.

W obydwu przypadkach moc, oddawana do obwodu
 $P=0$.

Półprzewodniki

$$P_{max} = I_0 \cdot V_0$$

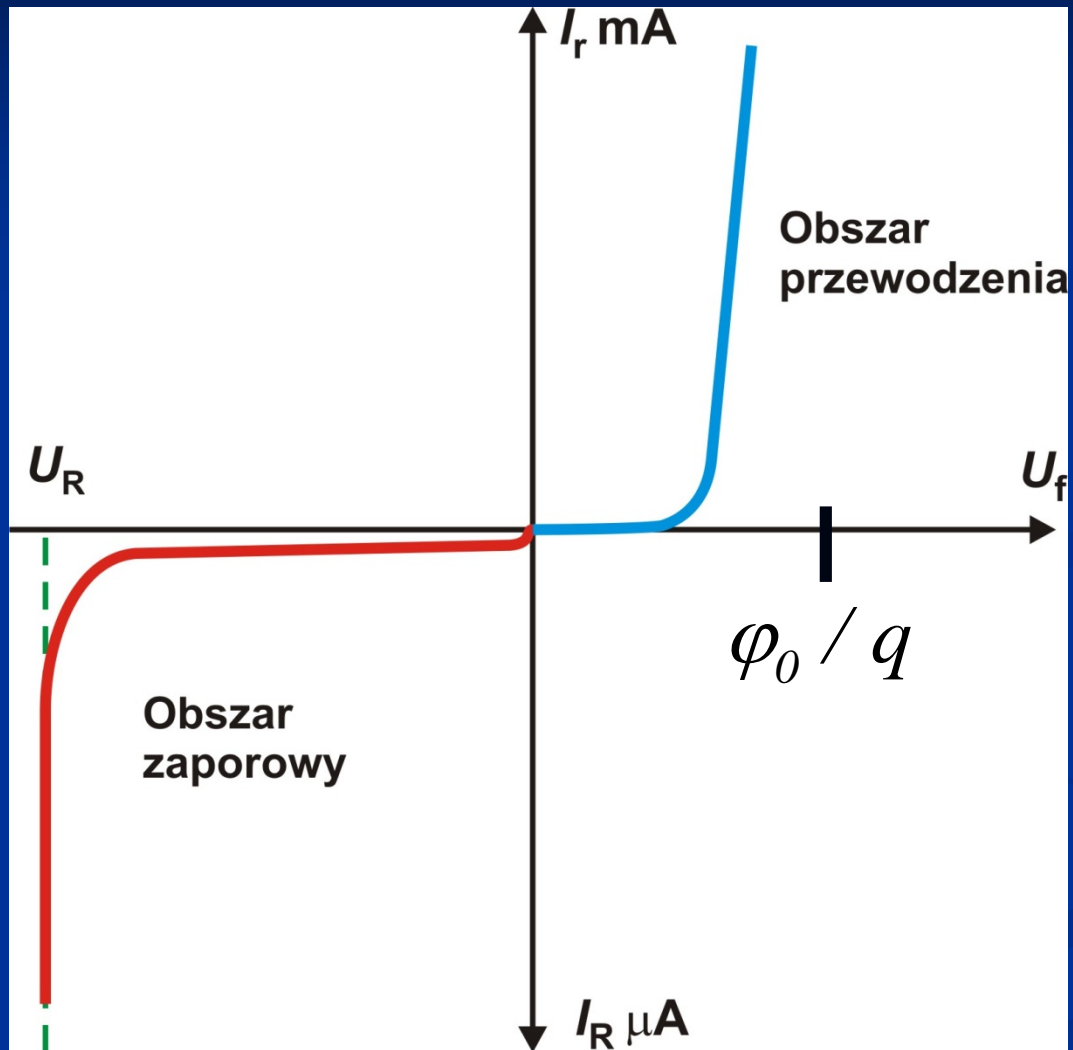


3.Przebiecie złącza p - n

Gwałtowny wzrost natężenia prądu przy przyłożeniu napięcia U_R w kierunku zaporowym nazywany jest przebicciem lawinowym. Zjawisko to spowodowane jest przyśpieszeniem elektronów w silnym polu elektrycznym złącza i uzyskaniem przez nie energii większej od szerokości pasma wzbronionego. Energia ta jest przekazywana podczas zderzeń z elektronami z pasma walencyjnego.

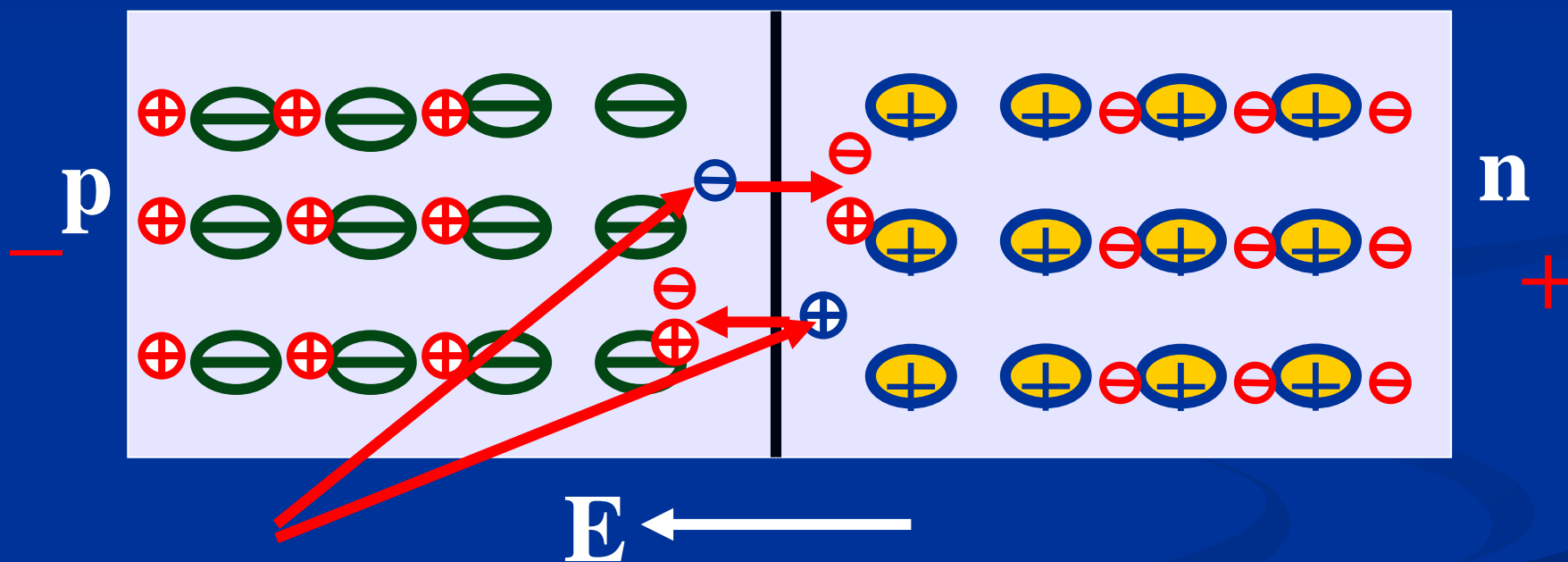
Pod wpływem tej energii elektrony przechodzą do pasma przewodzenia, zastawiając na swoim miejscu dziury. Oznacza to, że w pobliżu złącza p – n powstają nośniki mniejszościowe, które gwałtownie zwiększają konduktywność w pobliżu złącza, co powoduje gwałtowny wzrost natężenia prądu przez złącze:

Półprzewodniki



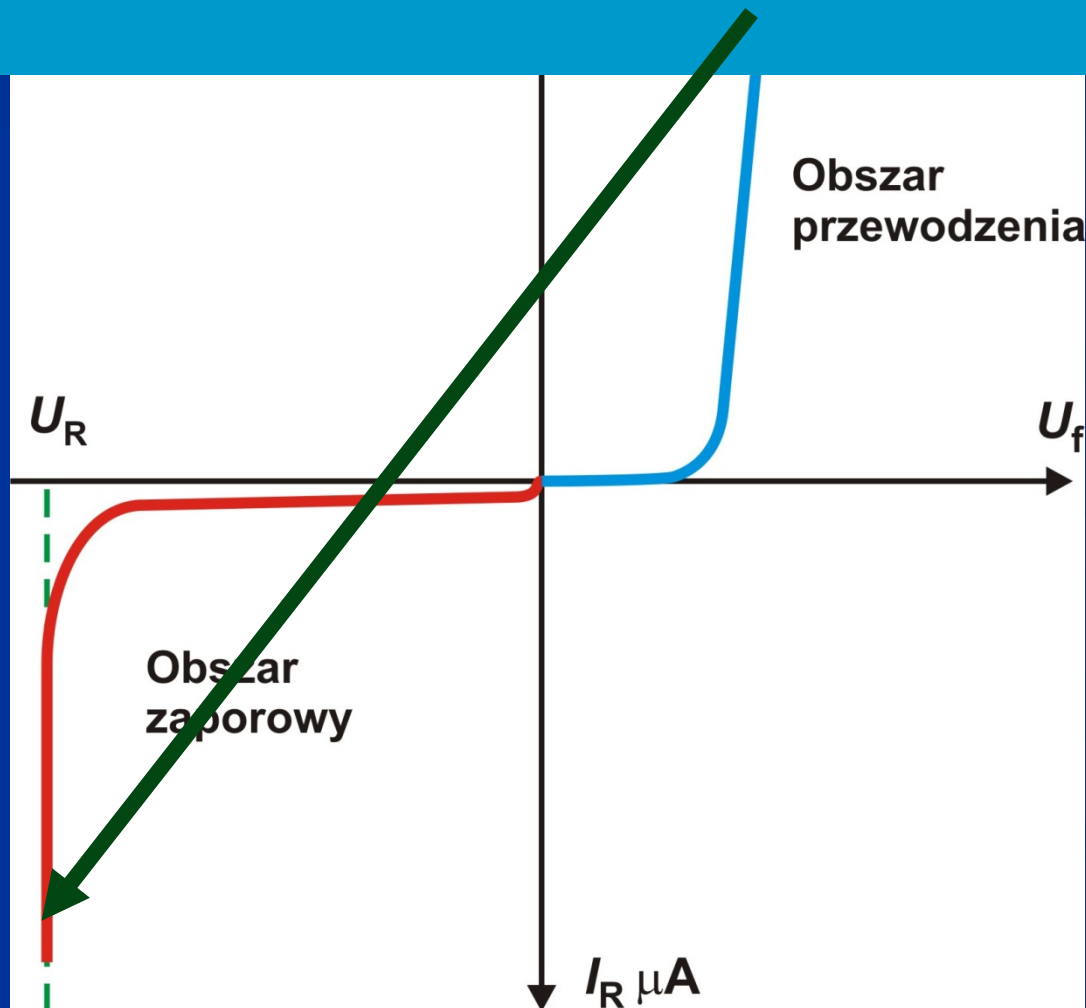
Półprzewodniki

$$W = F \cdot \lambda = e \cdot E \cdot \lambda > \Delta E_g$$



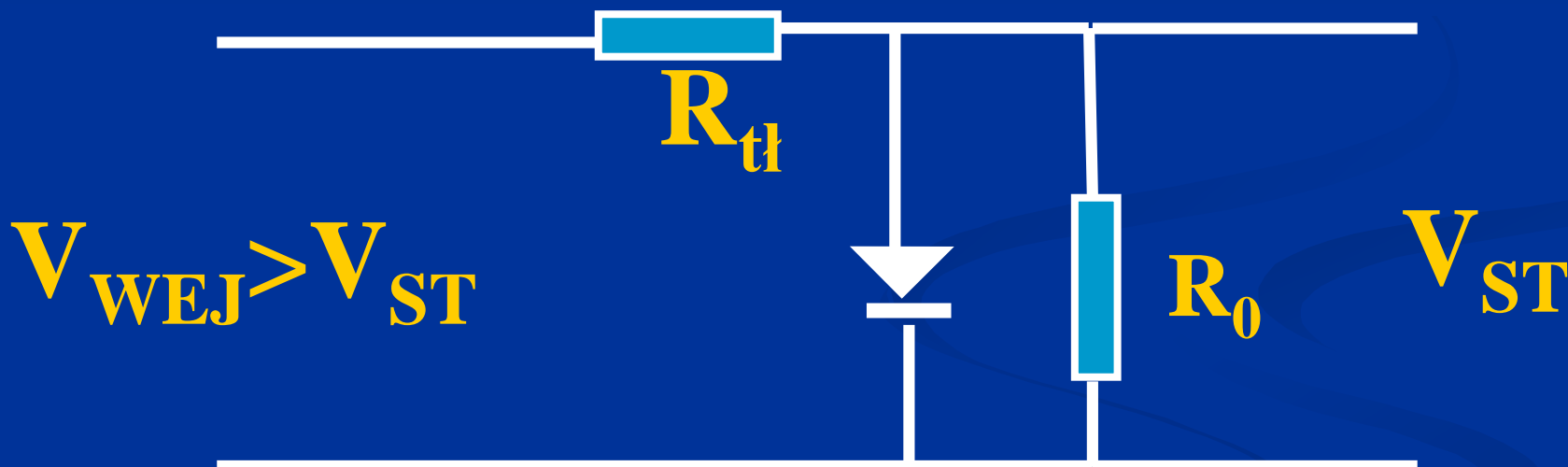
Nośniki mniejszościowe generowane silnym polem elektrycznym w kierunku zaporowym

Oznacza to, że w pobliżu złącza p – n powstają nośniki mniejszościowe, które gwałtownie zwiększają konduktywność w pobliżu złącza, co powoduje gwałtowny wzrost natężenia prądu przez złącze:



Półprzewodniki

Zjawisko to jest wykorzystywane do budowy elementów elektronicznych przeznaczonych do stabilizacji napięcia, nazywanych stabilitronami lub diodami Zenera.

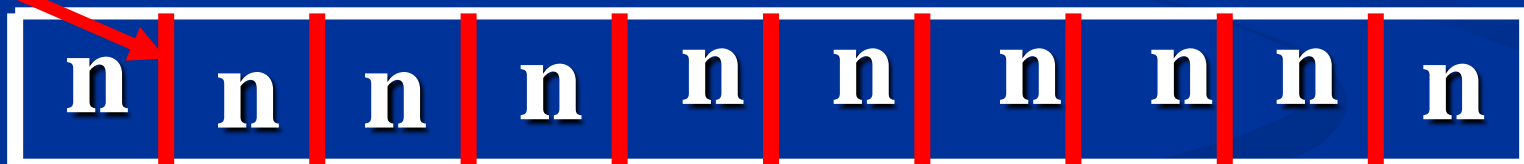


Warystory

Warystory są to płytki z polikrystalicznego materiału półprzewodnikowego o nieliniowej charakterystyce prądowo – napięciowej. Najczęściej stosowany jest obecnie tlenek cynku ZnO.

Na granicach ziaren w takim materiale, po wytworzeniu w wysokich temperaturach, powstają złącza p – n. Jak łatwo przekonać się, połowa złącz wzdłuż każdej linii zostanie włączona w kierunku przewodzenia, a druga połowa – w kierunku zaporowym:

p



Półprzewodniki

Dla każdego kierunku polaryzacji taki szereg naprzemiennie włączonych diod będzie włączony w kierunku zaporowym. Przy wzroście napięcia, na diodach, włączonych w kierunku zaporowym, nastąpi przebicie lawinowe, i natężenie prądu wzrośnie z ułamków mikroamperów do wielu amperów.

Napięcie przebicia lawinowego pojedynczego złącza wynosi kilkadziesiąt woltów. Warystor zawiera do stu złącz. Całkowite napięcie przebicia pojedynczego warystora wynosi, w zależności od konstrukcji od 100V do ok. 2 kV.

Zastosowanie warystorów – ochrona urządzeń elektrycznych przed przepięciami, powstającymi podczas wyładowań atmosferycznych lub tzw. łączeniowych.

Element ochronny, zawierający warystor włączany jest pomiędzy fazą a ziemią. Do napięcia ok. $1,5 U_{ZN}$ $I_W < 0,5 \mu A$.

Półprzewodniki

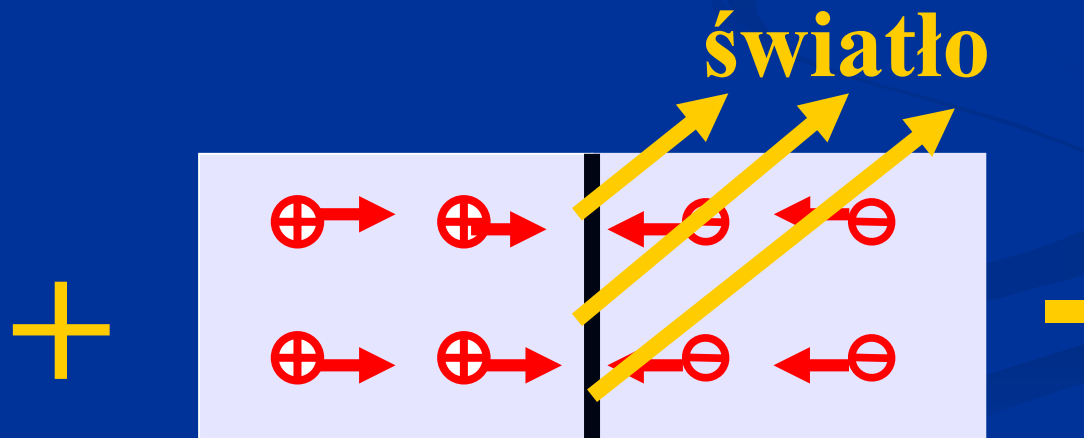
Przy przepięciach gdy $U > 1,5 U_{ZN}$ natężenie prądu przez element ochronny gwałtownie wzrasta i impuls przepięciowy zostaje odprowadzony do ziemi. Gdy napięcie obniży się do poziomu $U < 1,5 U_{ZN}$, warystor wraca do stanu o wysokiej rezystancji i odcina fazę od ziemi.

Obecnie w celu pewnego zabezpieczenia przed przepięciami stosują ochronę strefową, polegającą na zastosowaniu czterech elementów ochronnych. Strefa zerowa – na wejściu do stacji transformatorowej SN. Pierwsza na wejściu do budynku, druga – w pomieszczeniu chronionym, trzecia – w gniazdku zasilania odbiornika.

Półprzewodniki

4. Elektroluminescencja w złączu p - n

Przy przepływie prądu przez złącze p – n włączone w kierunku przewodzenia elektrony z obszaru n przechodzą do obszaru p, gdzie są wychwytywane przez dziury i ulegają rekombinacji. Podczas rekombinacji wydzielana jest energia w przybliżeniu równa szerokości pasma wzbronionego. W niektórych półprzewodnikach ta energia wydzielana jest w postaci kwanta światła – zachodzi bezpośrednia przemiana energii elektrycznej w energię promieniowania elektromagnetycznego:



Półprzewodniki

Ga As – 1,4 e V podczerwień

**Ga P - 2,26 e V w zależności od rodzaju domieszek
luminescencja w obszarach czerwonym, żółtym oraz
zielonym.**

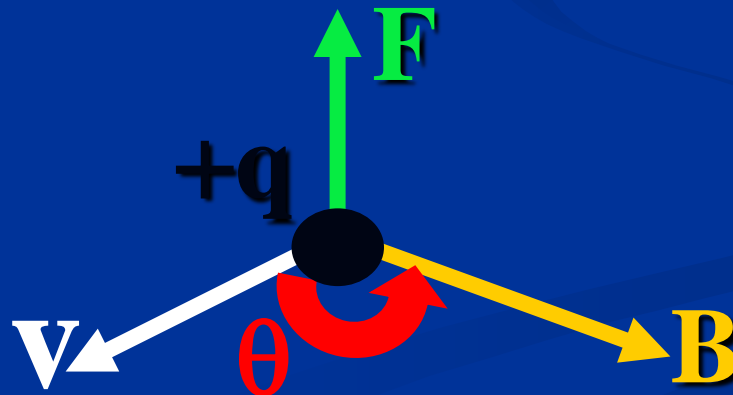
Ga N -3,40 e V - luminescencja w obszarze niebieskim.

Czujniki Halla

Zjawisko Halla należy do dużej grupy zjawisk magneto – elektrycznych tzn takich, w których na półprzewodnik oddziałują jednocześnie pole elektryczne i magnetyczne.

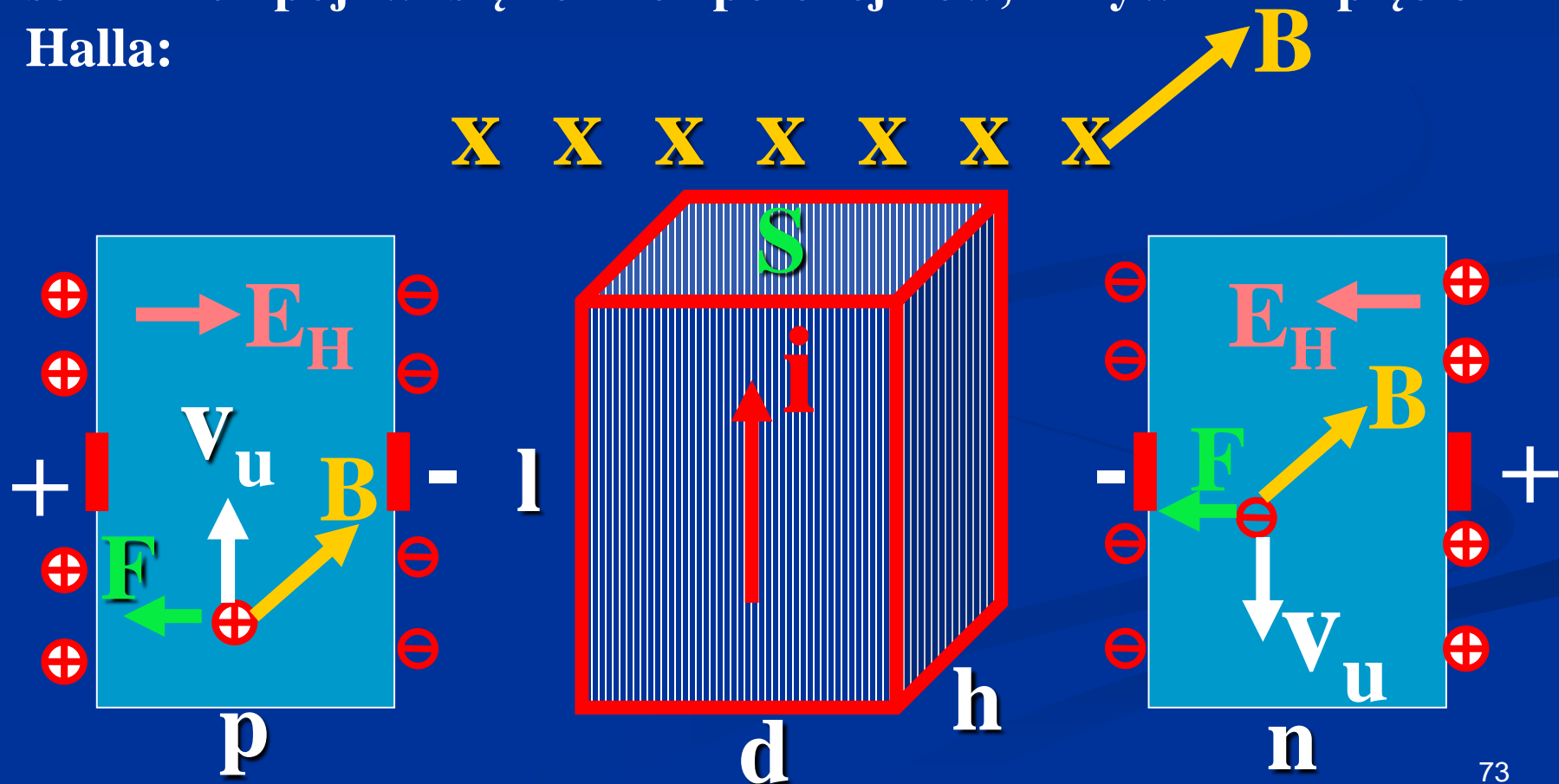
Pole magnetyczne o indukcji B oddziałuje na ładunek $+q$, poruszający się z prędkością v z siłą:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}, \quad F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \theta, \quad \theta = \angle \vec{v}, \vec{B}.$$



Półprzewodniki

Gdy umieścimy w polu magnetycznym o indukcji B półprzewodnik o wymiarach l – długość, d – szerokość, h – grubość, przez który płynie prąd o natężeniu i , na jego bocznych ściankach pojawi się różnica potencjałów, nazywana napięciem Halla:



Półprzewodniki

$$\theta = \vec{v}_U \wedge \vec{B} = 90^0, \quad F_M = q \cdot v_U \cdot B, \quad F_E = q \cdot E_H$$

$$F_M = -F_E, \quad E_H = v_U \cdot B, \quad v_U = \frac{j}{n \cdot e} = \frac{i}{n \cdot e \cdot S},$$

$$E_H = \frac{B \cdot i}{n \cdot e \cdot S}, \quad V_H = E_H \cdot d, \quad B = \frac{n \cdot e \cdot V_H \cdot S}{i \cdot d}.$$

Półprzewodniki

$$B = \frac{neV_H S}{id}, n = \frac{Bid}{eV_H S}$$

