

Elementy optroniki

#_

dr inż. Dawid Kucharski

Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych
Instytut Technologii Mechanicznej
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Politechnika Poznańska

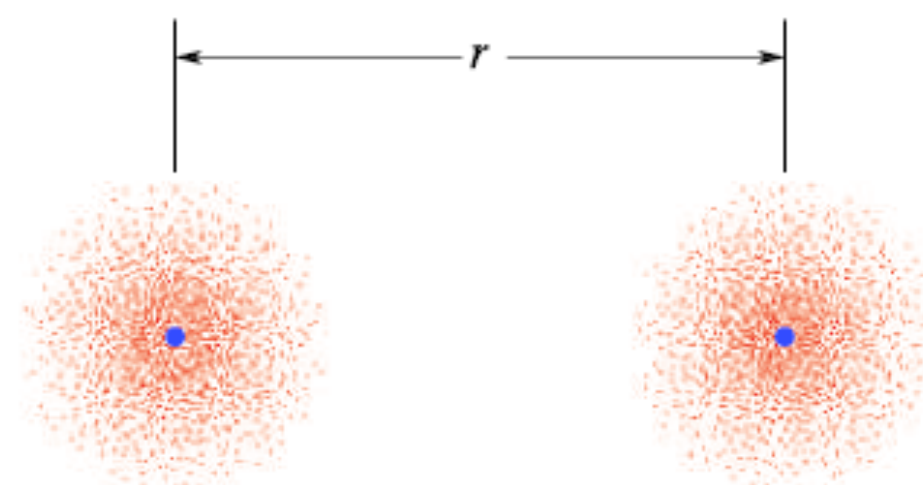
pokój 129 CM (lab. 135, 214, 212 CM)

dawid.kucharski@put.poznan.pl

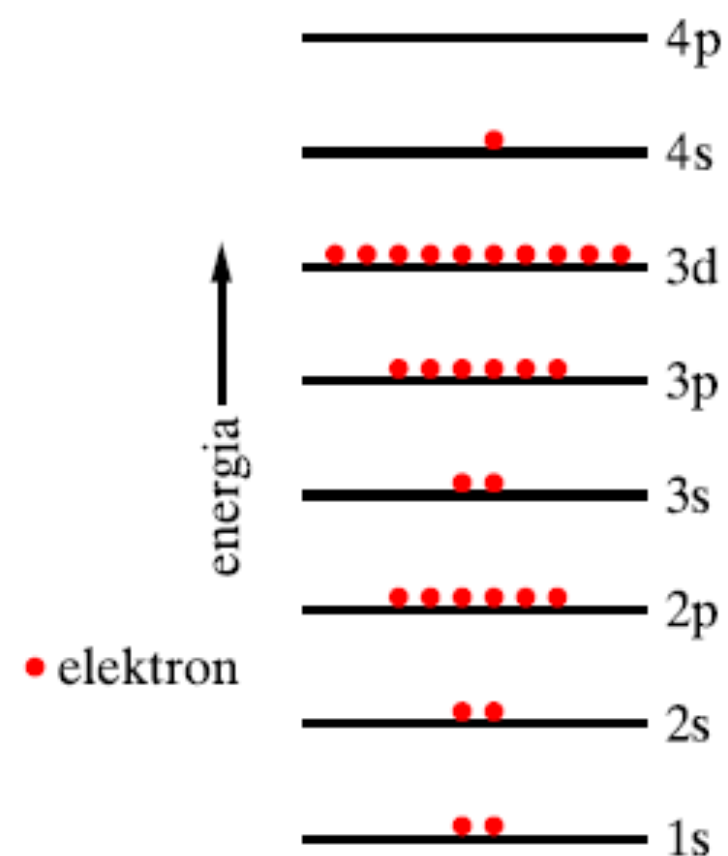
www.dawid.kucharski.pracownik.put.poznan.pl



Ciało stałe

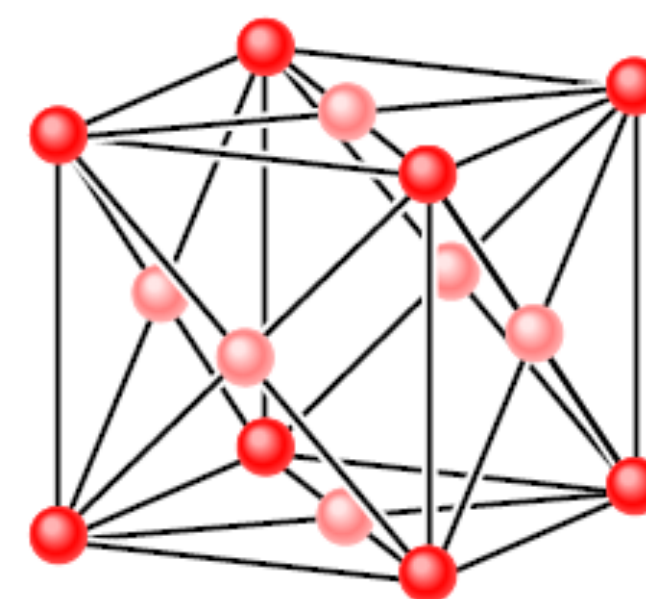
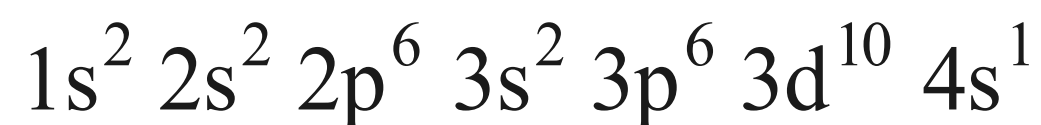


a)

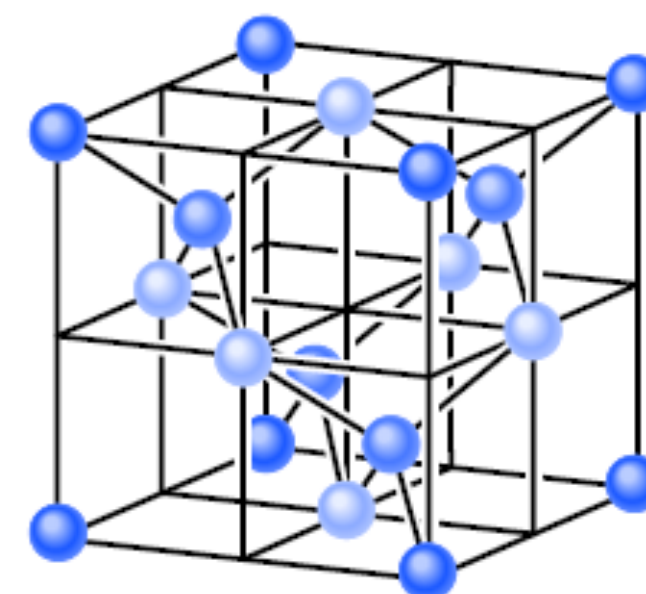


b)

Rys. 42.2. a) Dwa atomy miedzi znajdują się w dużej odległości od siebie. Rysunek przedstawia rozkłady gęstości prawdopodobieństwa elektronu. b) Każdy atom miedzi ma 29 elektronów obsadzających zbiór podpowłok elektronowych. W obojętnym elektrycznie atomie w stanie podstawowym wypełnione są wszystkie podpowłoki aż do podpowłoki 3d. Na podpowłoce 4s (która może przyjąć dwa elektrony) znajduje się jeden elektron, a wyższe podpowłoki są puste. Dla uproszczenia odległość pomiędzy podpowłokami jest na schemacie jednakowa



Cu a)



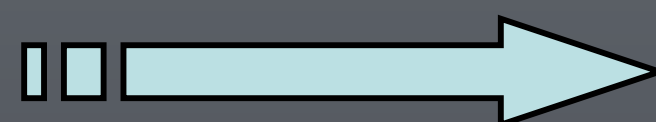
b)

Si

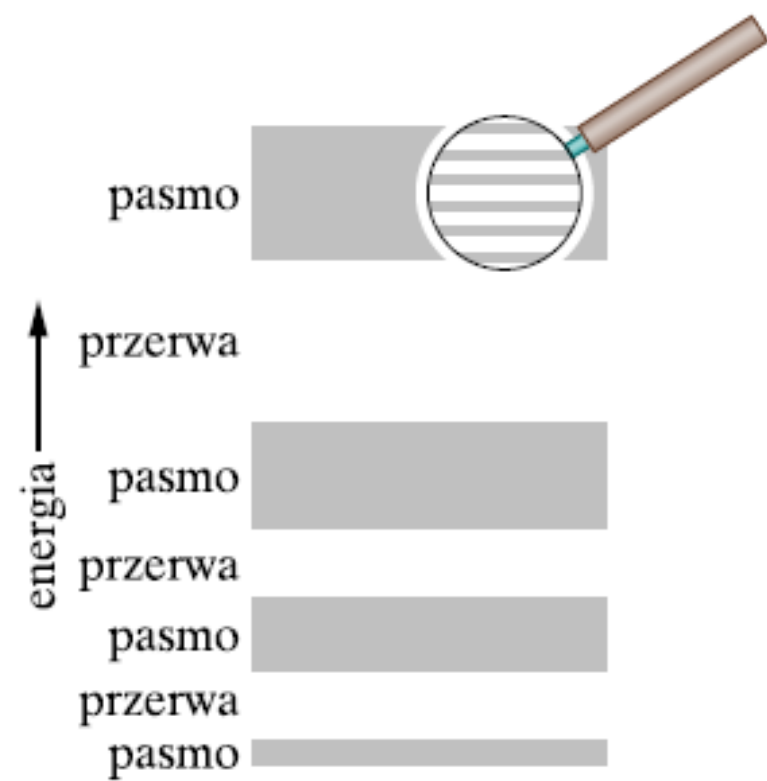
Rys. 42.1. a) Komórka elementarna struktury krystalicznej miedzi jest sześcianem. W każdym wierzchołku tego sześcianu (atom ciemniejszy) i w środku każdej z jego ścian (atom jaśniejszy) znajduje się jeden atom miedzi. Taka struktura krystaliczna nazywana jest siecią regularną powierzchniowo centrowaną (fcc — ang. *face centered cubic*). b) Komórka elementarna krzemu i diamentu jest także sześcianem, a sieć taką nazywa się *strukturą diamentu*. Jeden atom znajduje się w każdym wierzchołku tego sześcianu (atom najciemniejszy) i w środku każdej z jego ścian (atom najjaśniejszy). Ponadto cztery atomy (o pośrednim kolorze) znajdują się wewnątrz sześcianu. Każdy atom wiąże się ze swoimi czterema najbliższymi sąsiadami czterema dwuelektronowymi wiązaniami kowalencyjnymi (jedynie dla czterech wewnętrznych atomów pokazano na rysunku wszystkich najbliższych sąsiadów)

konfiguracja elektronowa
w swobodnym atomie **Cu**

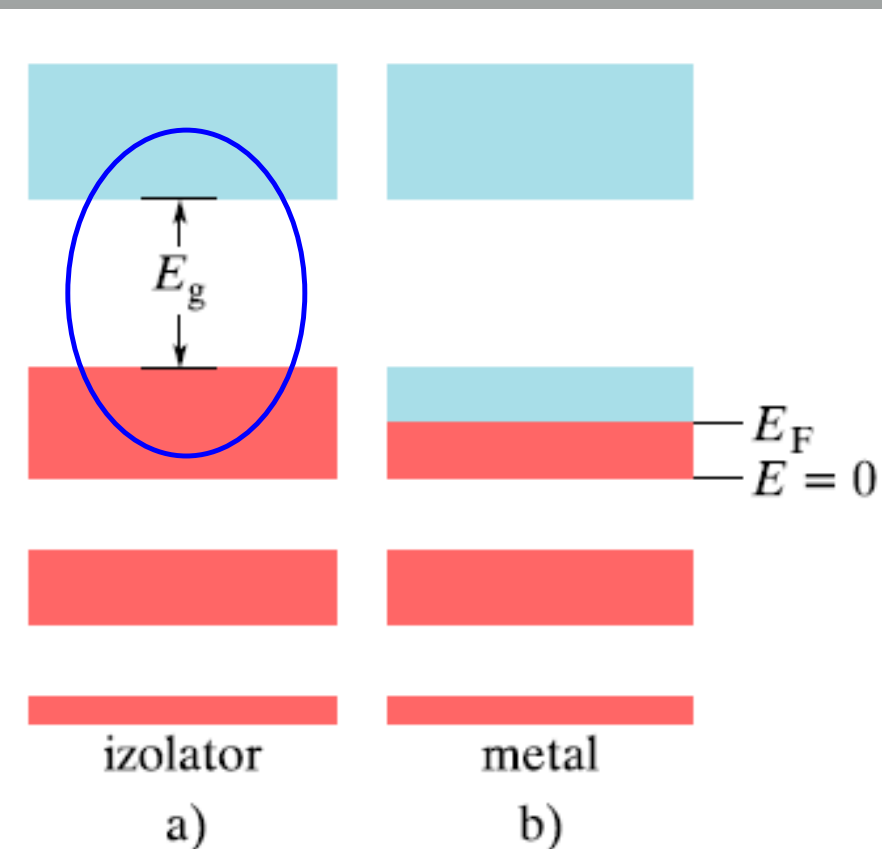
poziomy energetyczne



pasma energetyczne

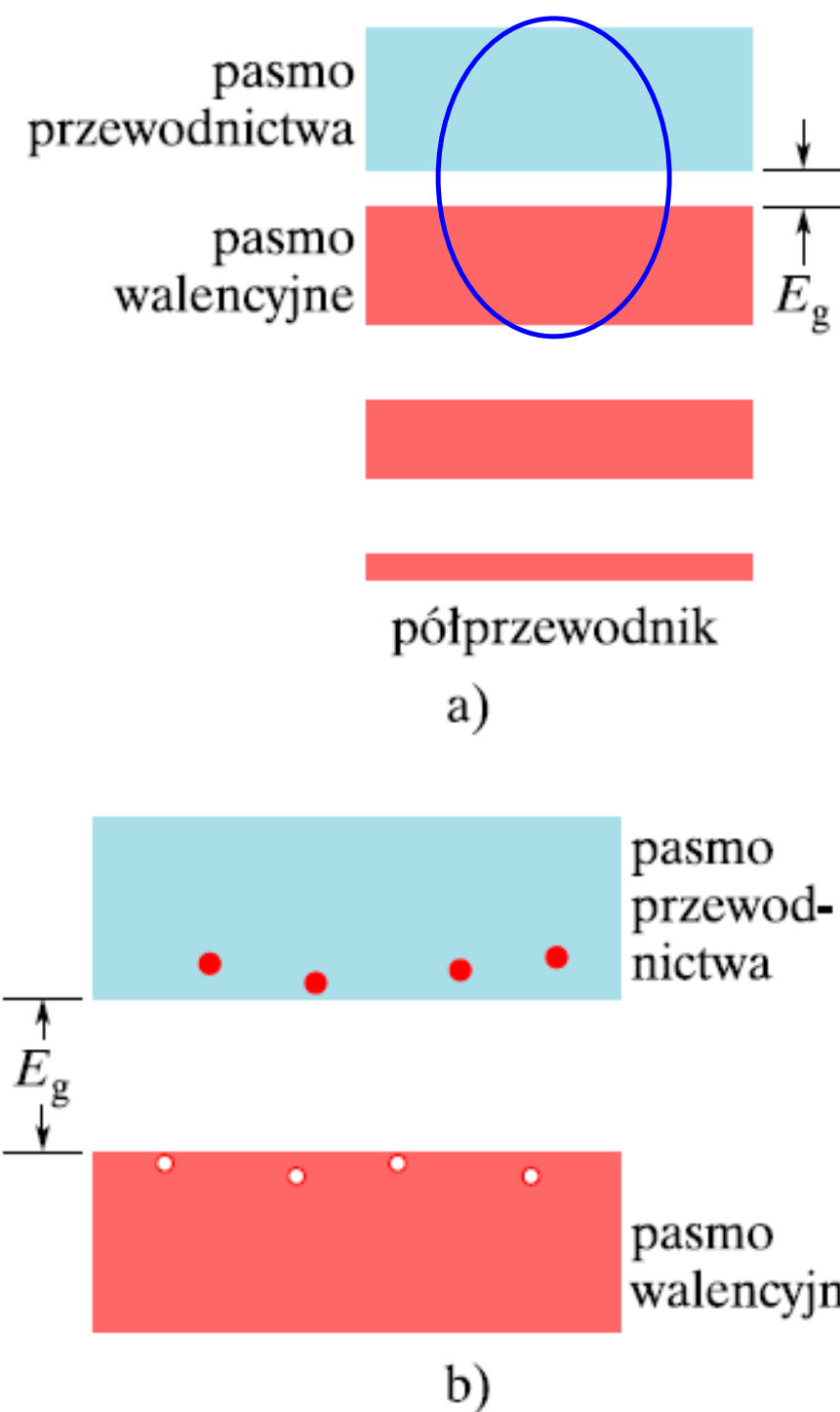


Rys. 42.3. Układ pasm i przerw tworzący strukturę energetyczną wyidealizowanego ciała stałego o strukturze krystalicznej. Tak jak to sugeruje powiększenie, każde pasmo składa się z ogromnej liczby poziomów energetycznych, znajdujących się bardzo blisko siebie. (W wielu ciałach stałych kolejne pasma mogą się przekrywać. Dla większej czytelności przypadek taki nie został pokazany)



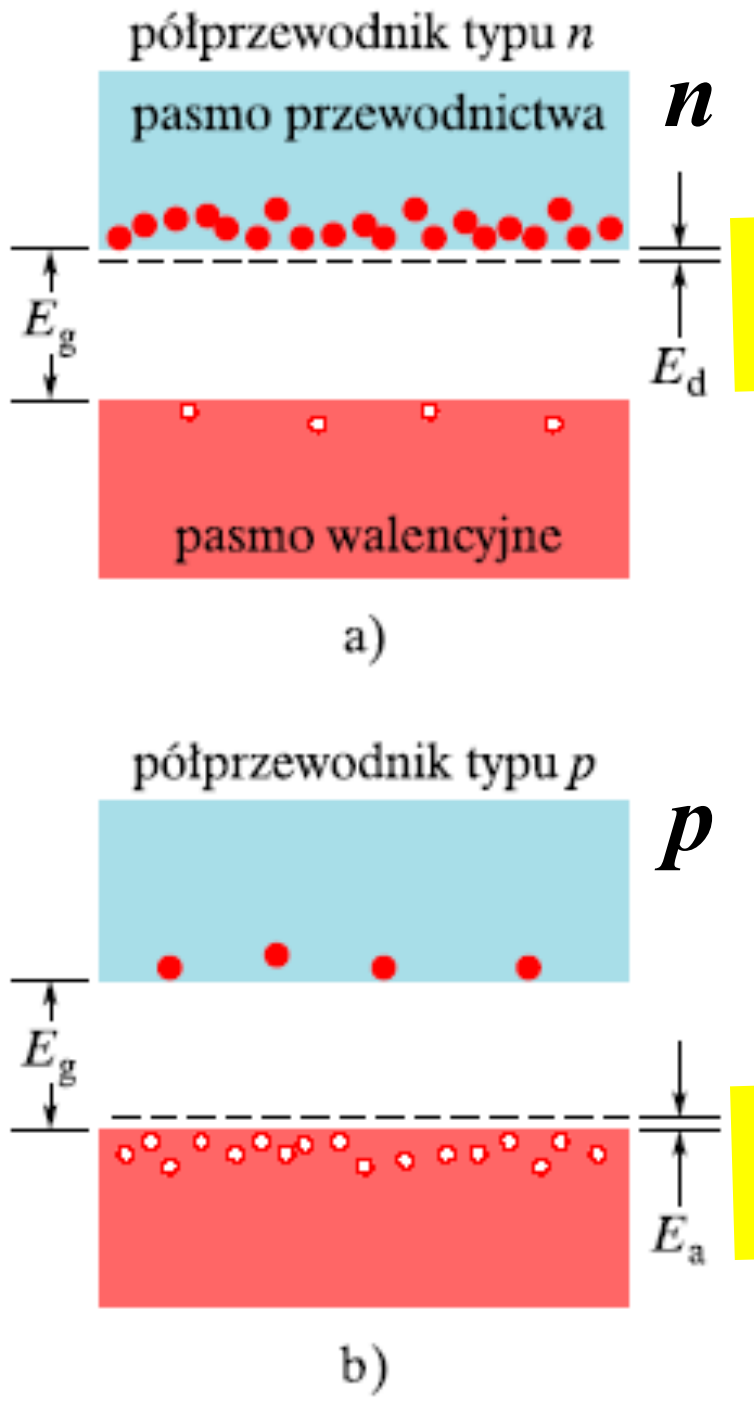
Pasma energetyczne

półprzewodnik

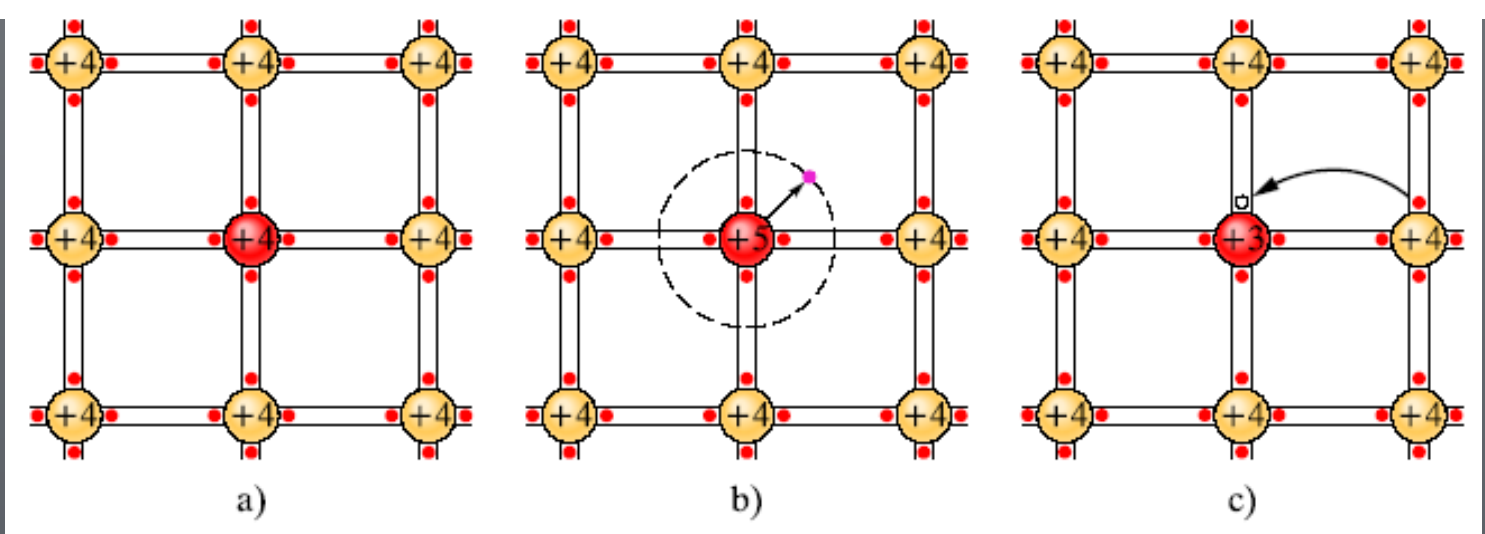


Rys. 42.8. Układ pasm i przerw energetycznych półprzewodnika. Układ ten przypomina strukturę energetyczną izolatora (patrz rys. 42.4a), jedynie przerwa energetyczna E_g jest w półprzewodniku znacznie mniejsza. W efekcie elektrony mogą w wyniku drgań termicznych z rozsądnym prawdopodobieństwem pokonać tę przerwę. b) Drgania termiczne umożliwiły kilku elektronom z pasma walencyjnego pokonanie przerwy energetycznej i przejście do pasma przewodnictwa. W paśmie walencyjnym pozostała taka sama liczba dziur

Półprzewodniki domieszkowane



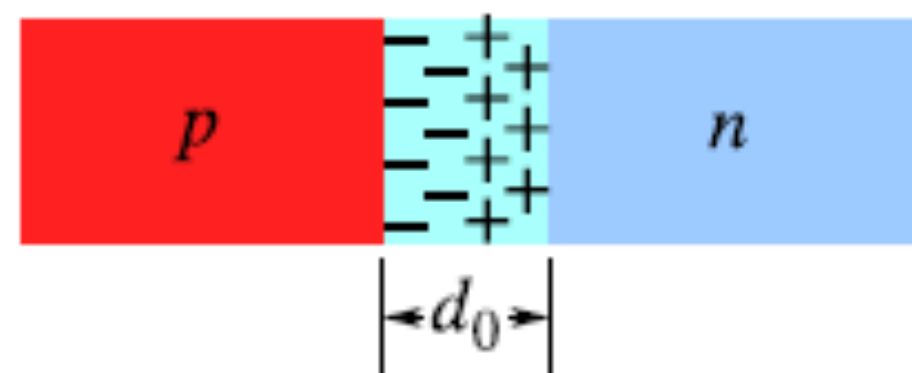
Rys. 42.10. a) W domieszkowanym półprzewodniku typu *n* poziomy energetyczne elektronów donora znajdują się w małej odległości E_d poniżej dna pasma przewodnictwa. Ponieważ elektrony te można łatwo wzbudzić do pasma przewodnictwa, w paśmie tym jest teraz znacznie więcej elektronów niż w przypadku półprzewodnika niedomieszkowanego. W paśmie walencyjnym znajduje się taka sama liczba elektronów jak poprzednio. b) W domieszkowanym półprzewodniku typu *p* poziomy energetyczne elektronów akceptora znajdują się w małej odległości E_a powyżej wierzchołka pasma walencyjnego. W paśmie walencyjnym będzie teraz znacznie więcej dziur niż w przypadku półprzewodnika niedomieszkowanego. W paśmie przewodnictwa pozostanie taka sama liczba elektronów jak w niedomieszkowanym półprzewodniku. Stosunek koncentracji nośników większościowych do koncentracji nośników mniejszościowych jest w rzeczywistości znacznie większy, niż sugerują to ilustracje



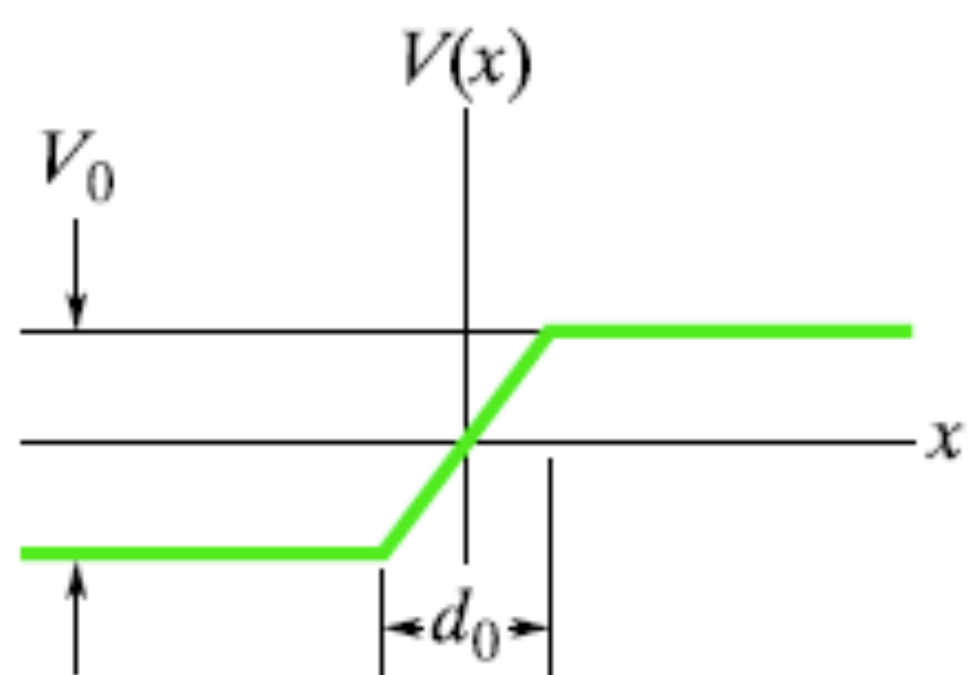
typ	<i>n</i>	<i>p</i>
materiał	Si	Si
przerwa energetyczna	1,2 eV	1,2 eV
domieszka	fosfor	glin
rodzaj domieszki	donor	akceptor
nośniki większościowe	elektrony	dziury
nośniki mniejszościowe	dziury	elektrony
energia jonizacji domieszki	0,045 eV	0,067 eV
wartościowość domieszki	5	3
wypadkowy ładunek jonu domieszki	+e	-e



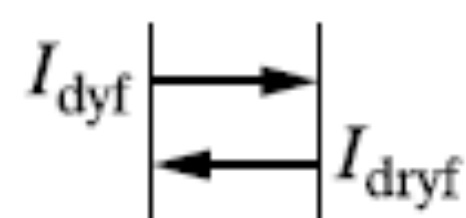
a)



b)



c)

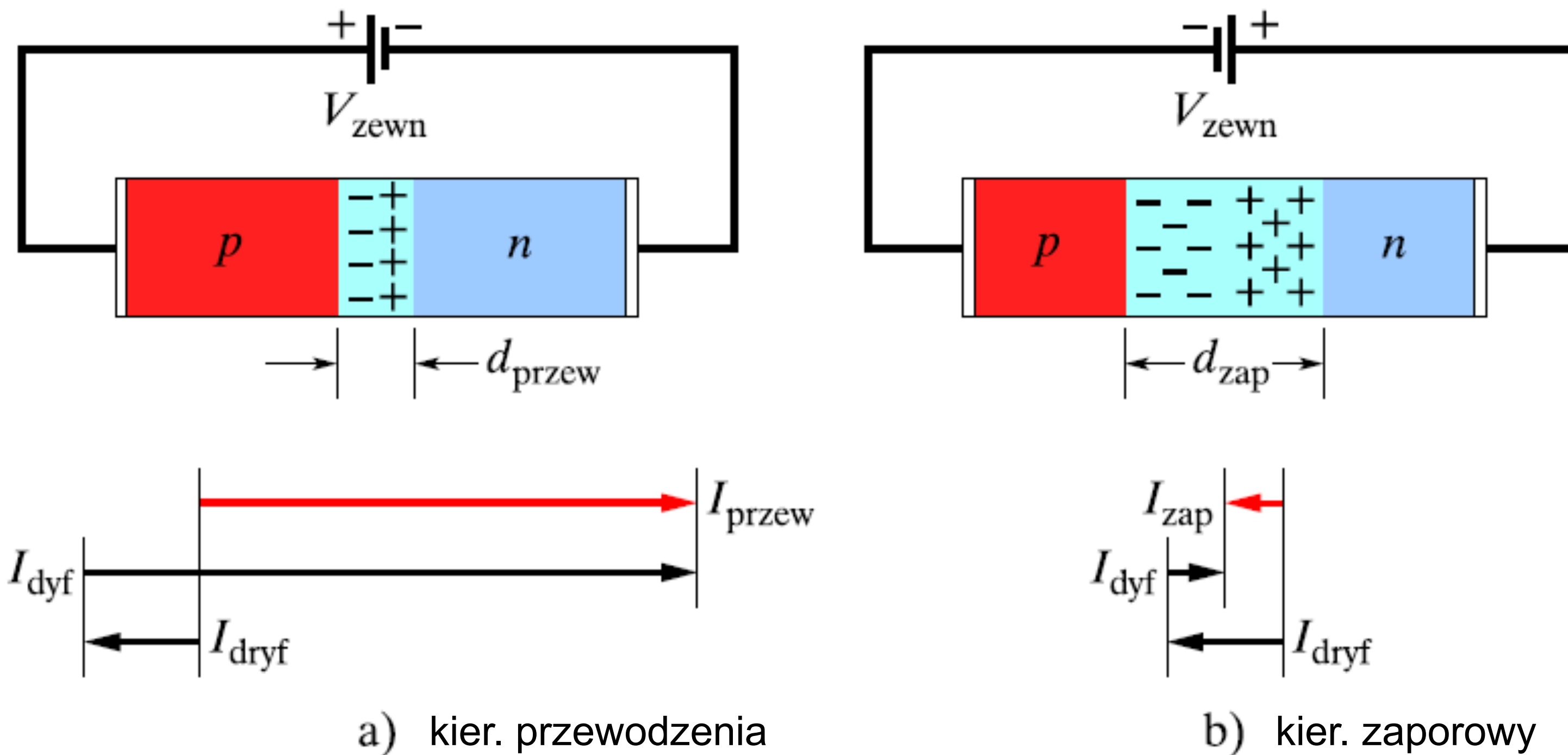


d)

Rys. 42.11. a) Złącze p - n . b) Przepływ nośników większościowych przez płaszczyznę złącza powoduje wystąpienie ładunku przestrzennego związanego z nieskompensowanymi jonami donorów (po prawej stronie złącza) i akceptorów (po lewej stronie złącza). c) Z powstaniem obszaru ładunku przestrzennego o szerokości d_0 wiąże się kontaktowa różnica potencjałów V_0 . d) Dyfuzja nośników większościowych (zarówno elektronów, jak i dziur) przez płaszczyznę złącza wywołuje przepływ prądu dyfuzji I_{dyf} . (W rzeczywistym złączu p - n granice obszaru zubożonego nie są ostre, a zatem zależność potencjału kontaktowego od położenia (rys. c) nie jest krzywą łamaną)

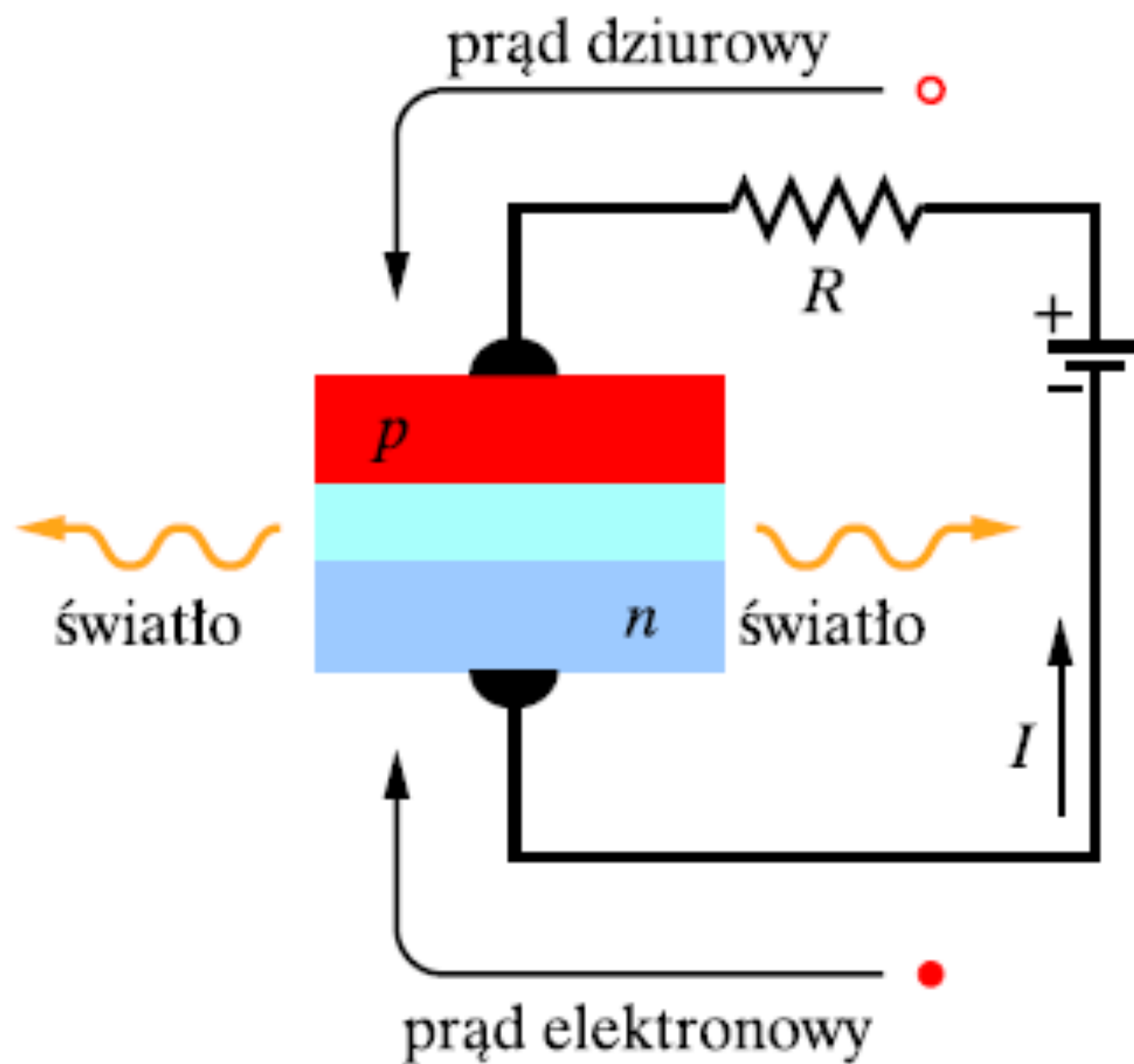
Złącze p - n

Złącze $p - n$

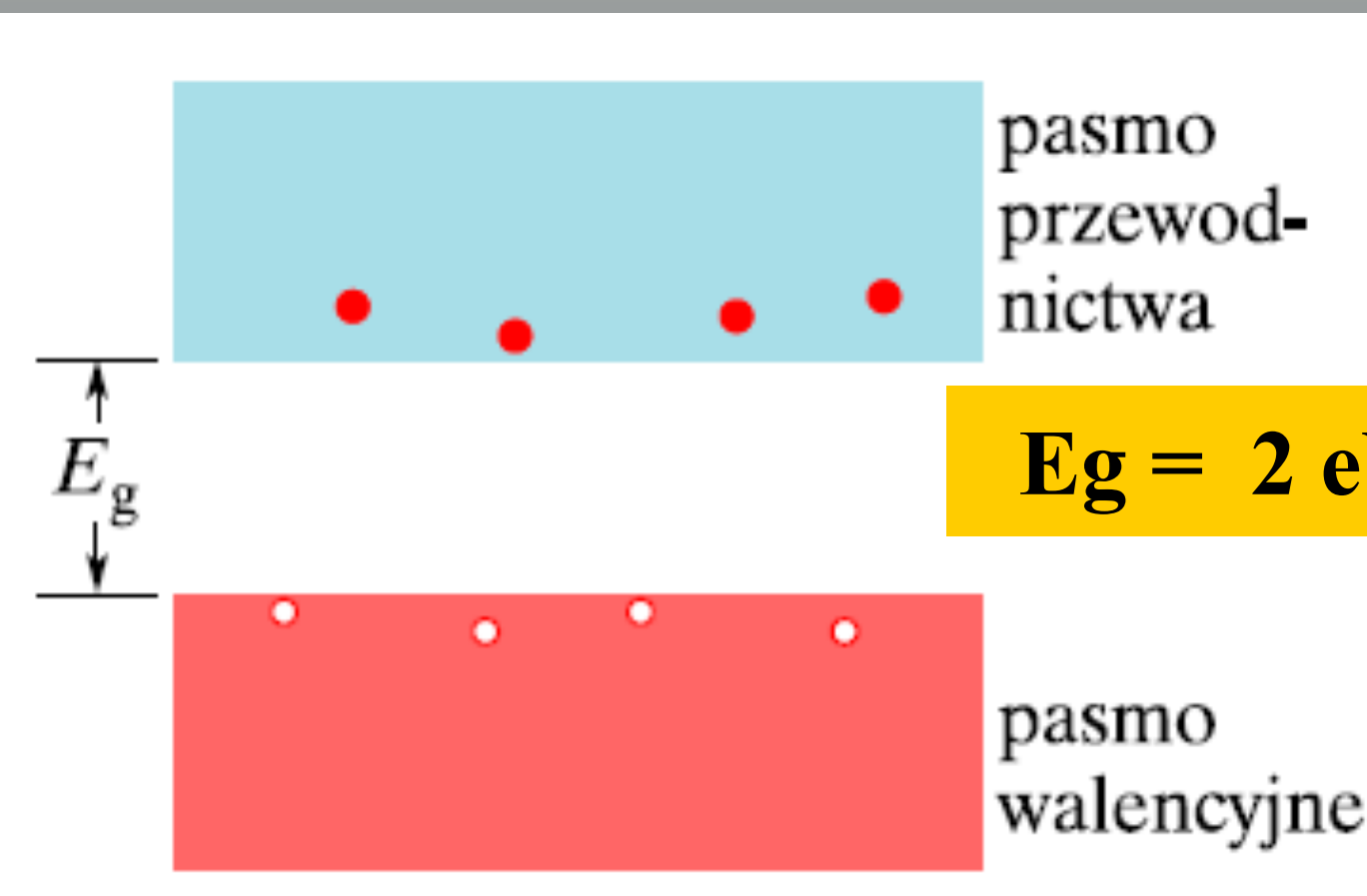


Rys. 42.14. a) Złącze $p-n$ spolaryzowane w kierunku przewodzenia: obszar zubożony zawęża się, przez złącze płynie duży prąd przewodzenia I_{przew} . b) Złącze $p-n$ spolaryzowane w kierunku zaporowym: obszar zubożony poszerza się, przez złącze płynie mały prąd zaporowy I_{zap}

Spolaryzowane, świecące złącze $p - n$



Rys. 42.15. Złącze $p-n$ spolaryzowane w kierunku przewodzenia: elektrony wstrzykiwane są do materiału typu n , dziury zaś do materiału typu p . (Dziury poruszają się zgodnie z kierunkiem prądu I , który jest przeciwny do kierunku ruchu elektronów). Za każdym razem, gdy w wąskim obszarze zubożonym elektron rekombinuje z dziurą, emitowane jest stamtąd światło



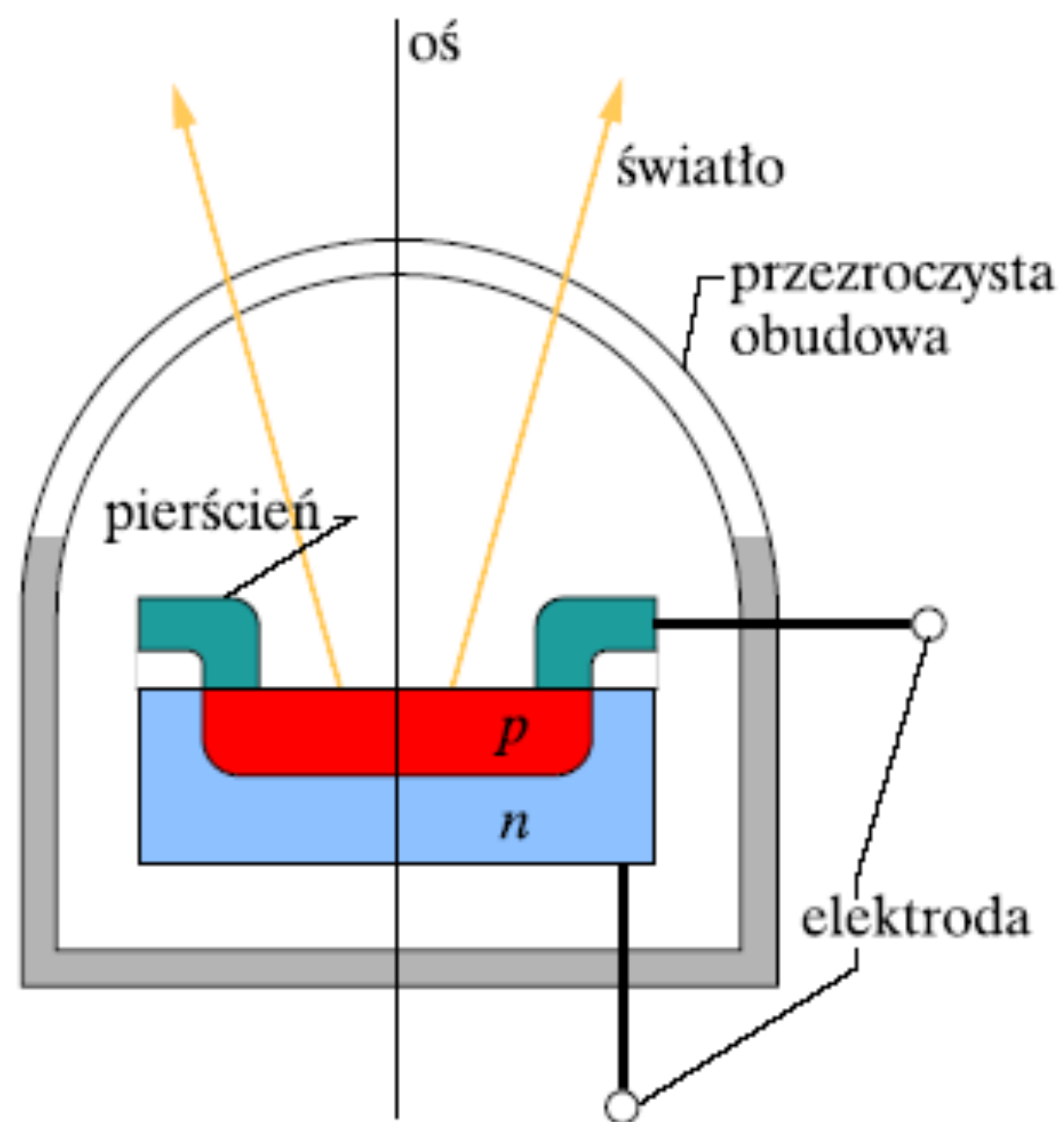
$$E_g = 2 \text{ eV} \Rightarrow \sim 620 \text{ nm}$$

$$E_g = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \Rightarrow \lambda = h \frac{c}{E_g}$$



światło widzialne

700nm - 400nm
 ~429THz - 750THz



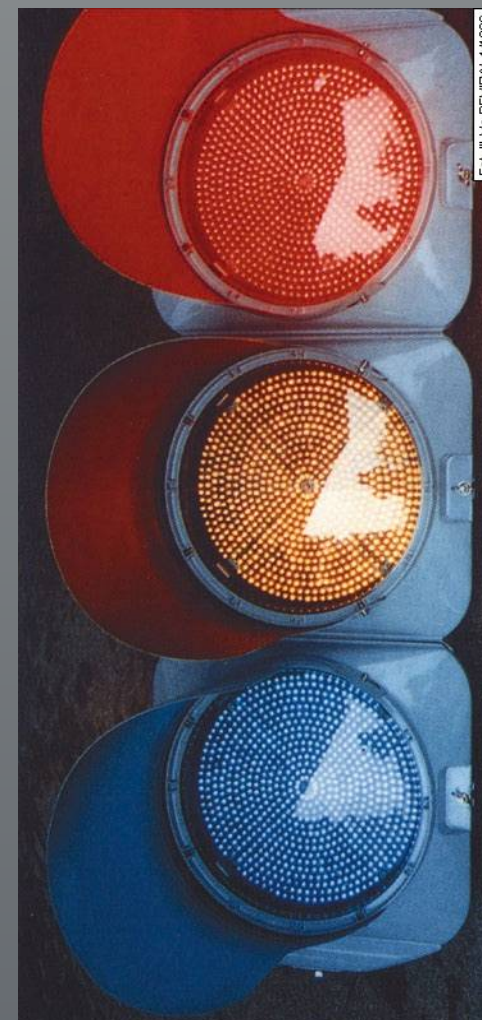
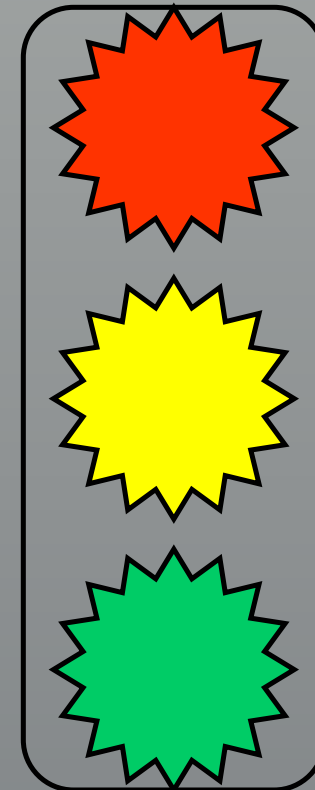
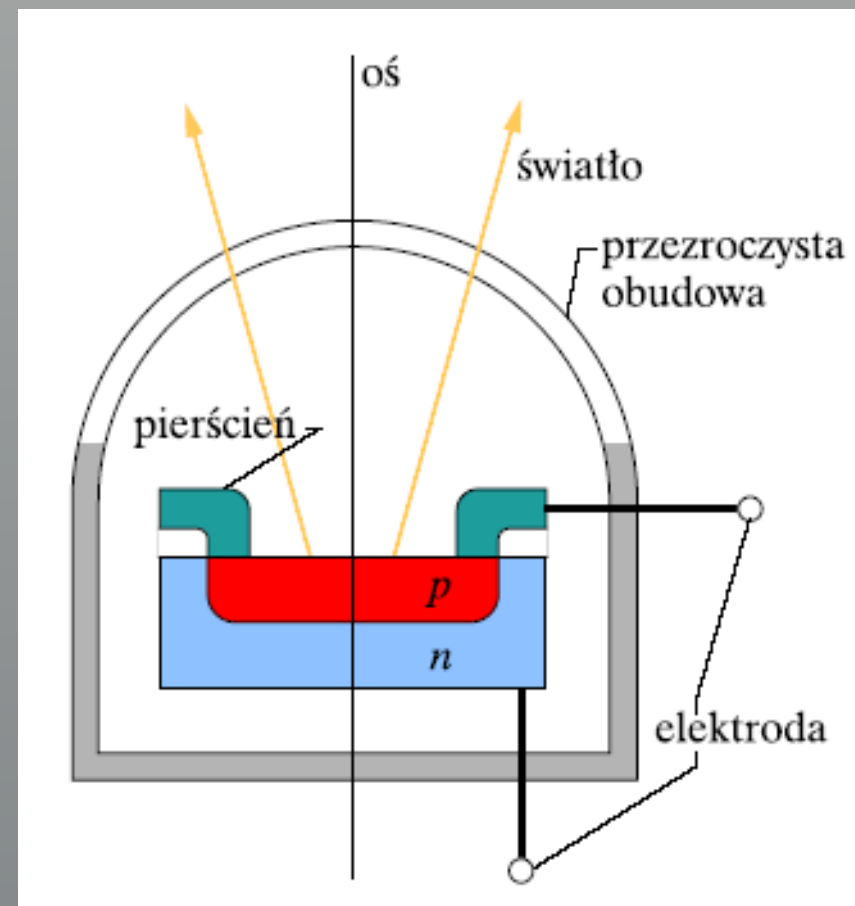
Rys. 42.16. Przekrój diody świecącej — LED (dioda ma symetrię osiową wokół przedstawionej osi). Materiał typu p , na tyle cienki, aby przepuszczał światło, ma kształt dysku. Kontakt elektryczny z tym materiałem zapewnia metalowy pierścień znajdujący się na jego obwodzie. Obszar zubożony pomiędzy materiałem typu n i materiałem typu p nie został pokazany

LED

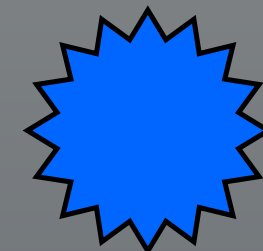
Diody półprzewodnikowe LED (Light Emitting Diode)

Zalety LED:

- sprawność świecenia $> 30\%$
- bardzo wysoka luminancja
luminancja = energia wypromieniowana/powierzchnia promieniująca
- bardzo krótki czas załączania (pojedyncze ns)
czas ograniczony tylko ruchliwością nośników elektrycznych
- miniaturowe wymiary
- mały pobór mocy
- odporność na drgania mechaniczne



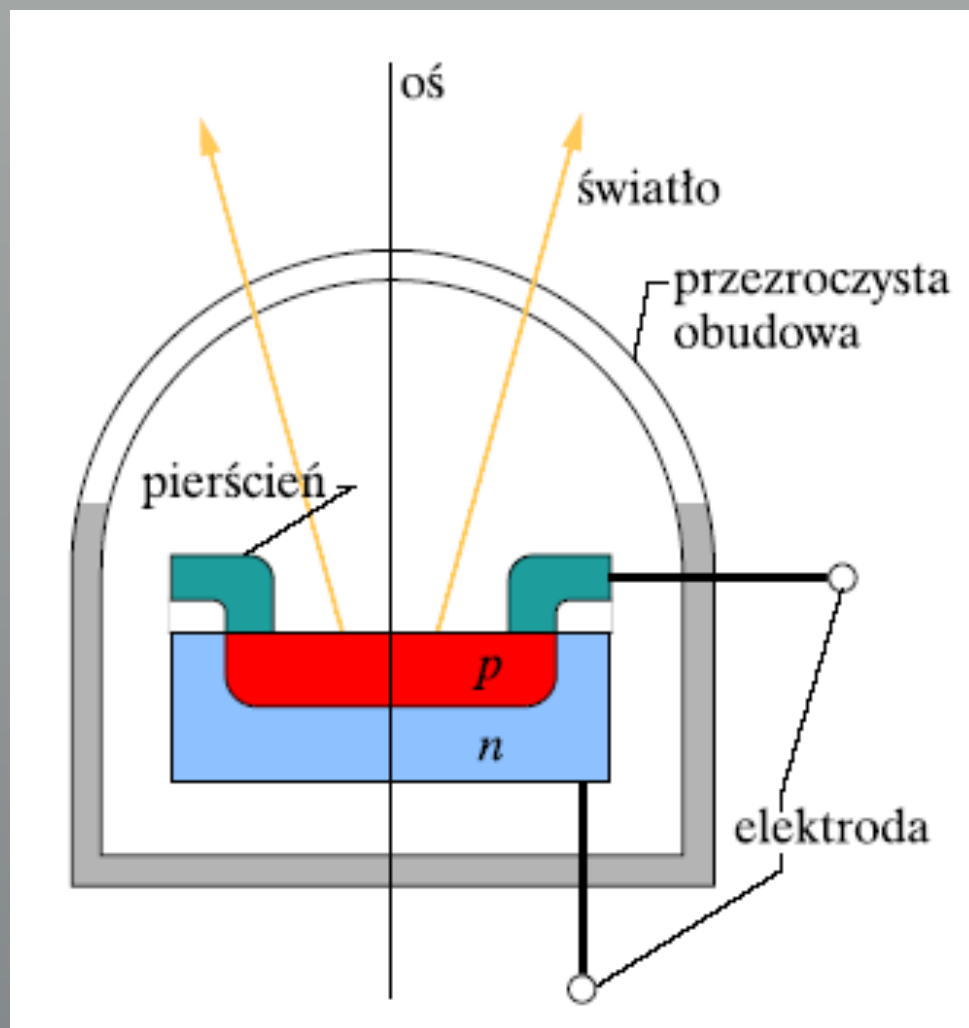
~~START!~~



START!

niezbędna paleta barw do uzyskania koloru białego:
 czerwony, zielony, niebieski,
płaskie monitory zużywające dziesięciokrotnie mniej energii,
 o dużej jasności obrazu,
 szybko powielające obraz,
 nie wymagające zasilania wysokonapięciowego, ani
 warunków podciśnienia (zagrożenie implozyjne).

**UWAGA: LED jest źródłem światła o klasycznych właściwościach;
 światło to nie jest monochromatyczne,
 jest niespójne, nieukierunkowane, niespolaryzowane.**



DL



lasery na półprzewodnikach

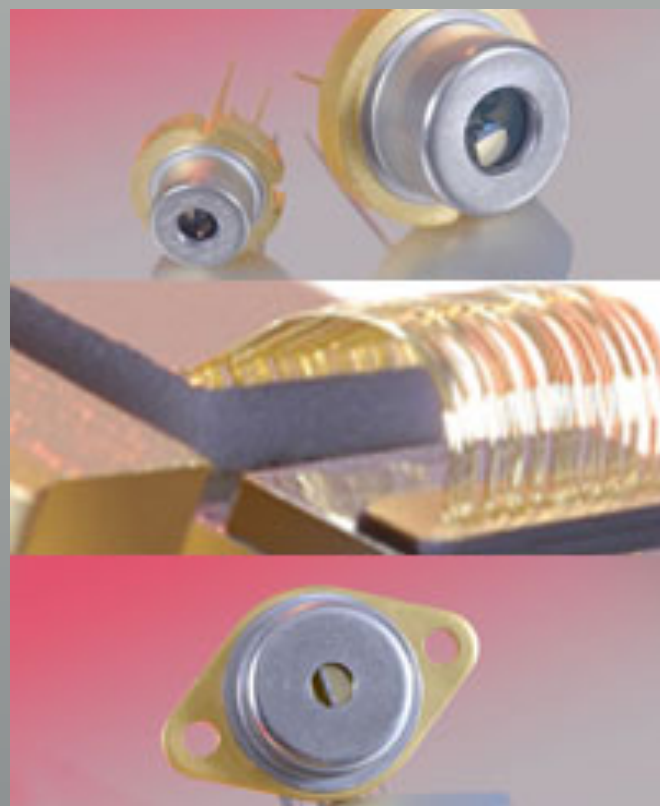
UWAGA: LD - Laser półprzewodnikowy jest źródłem światła o nieklasycznych właściwościach; emitowane promieniowanie jest monochromatyczne i spójne, najczęściej o polaryzacji eliptycznej.

LED



DL

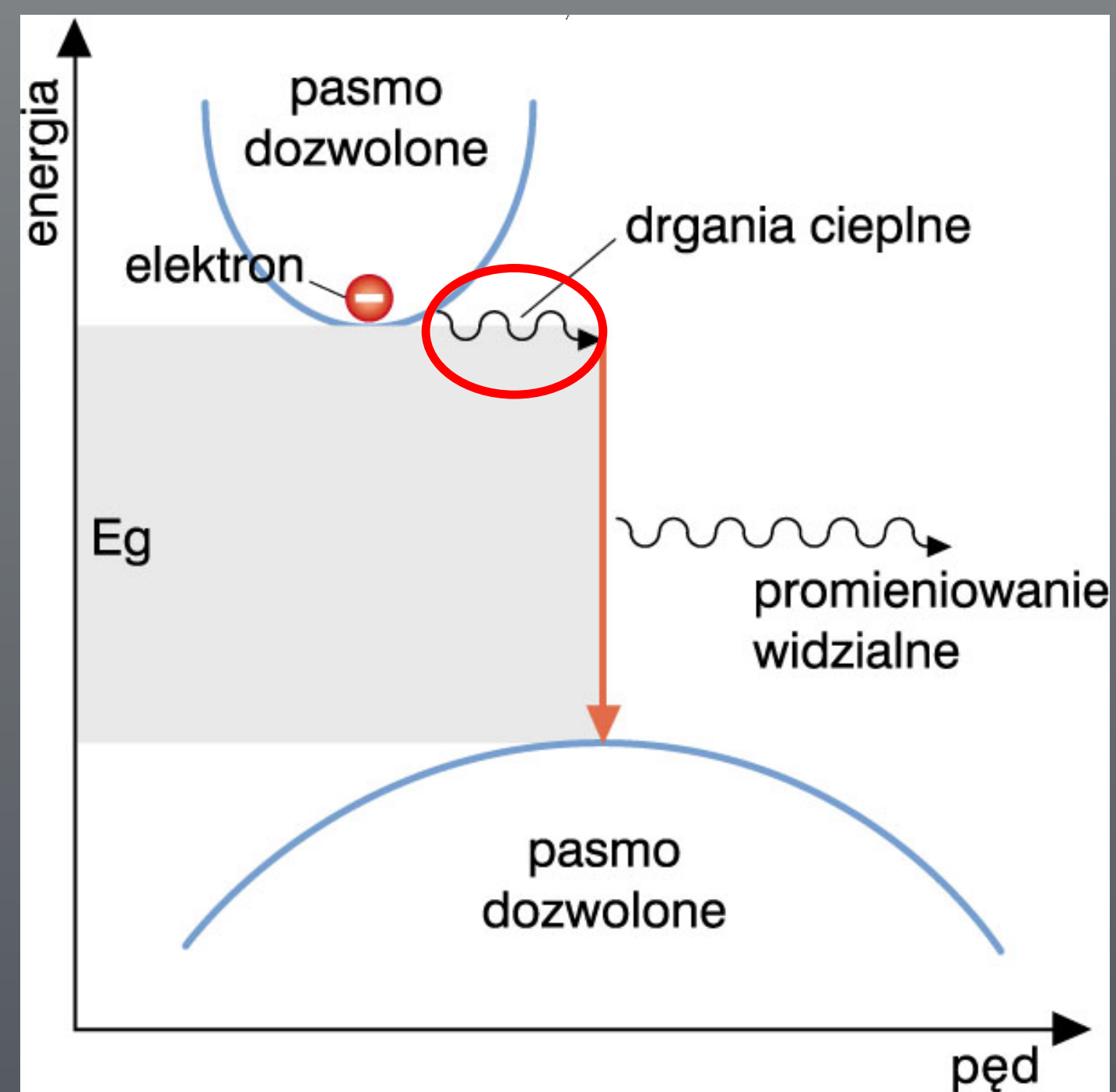
- wywołanie inwersji obsadzeń w materiale optycznie czynnym
(**I, U przyłożone do złącza p-n**)
- minimalizacja strat w rezonatorze
- minimalizacja generacji drgań cieplnych sieci krystalicznej



DL

UWAGA: Wzbudzenie akcji laserowej wymaga dużych gęstości prądu, co zwiększa wymagania co do poprawności struktur krystalograficznych. Warstwa podłoża dla warstwy laserującej, decyduje o własnościach strukturalnych warstwy aktywnej i o możliwości **odprowadzania ciepła.**

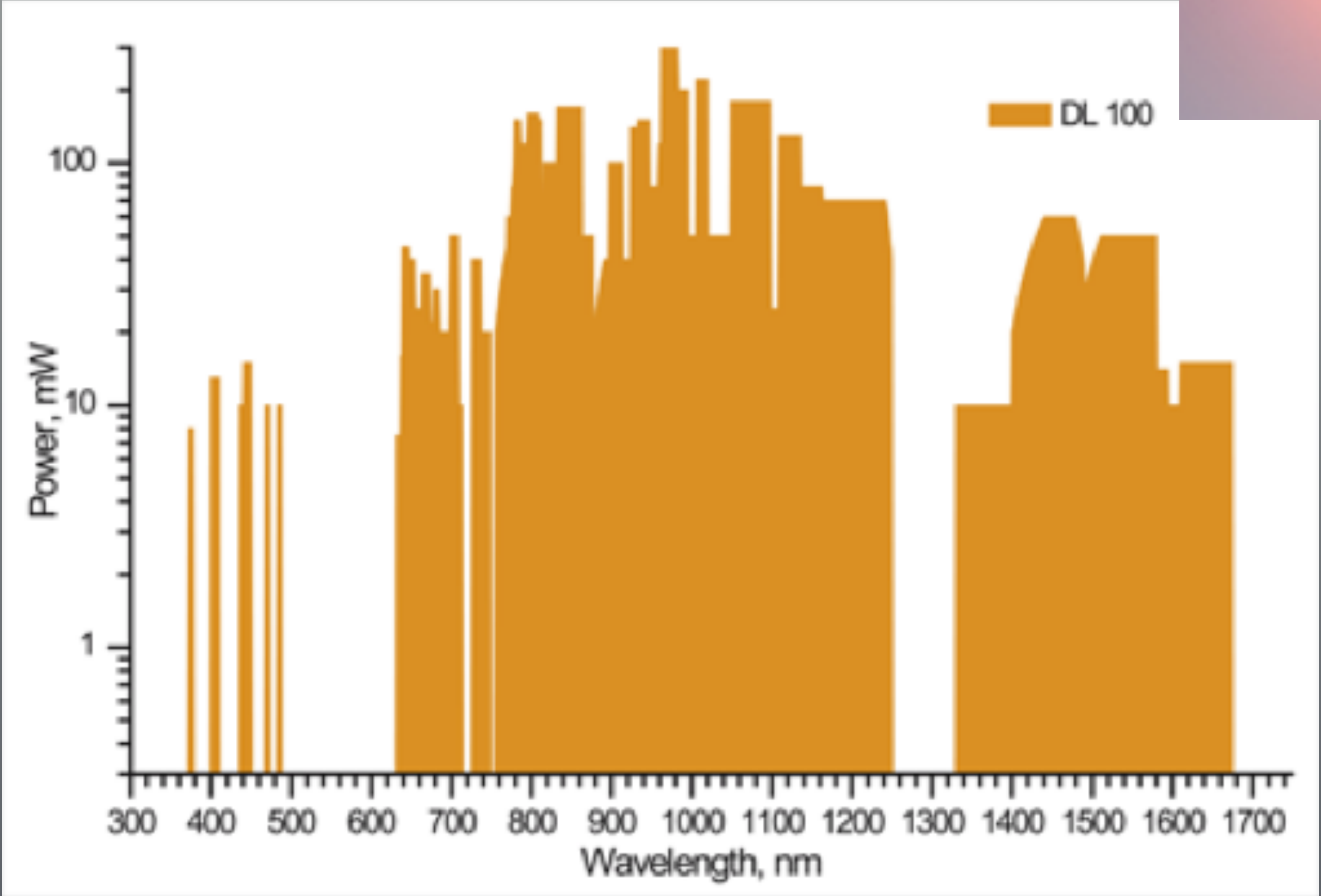
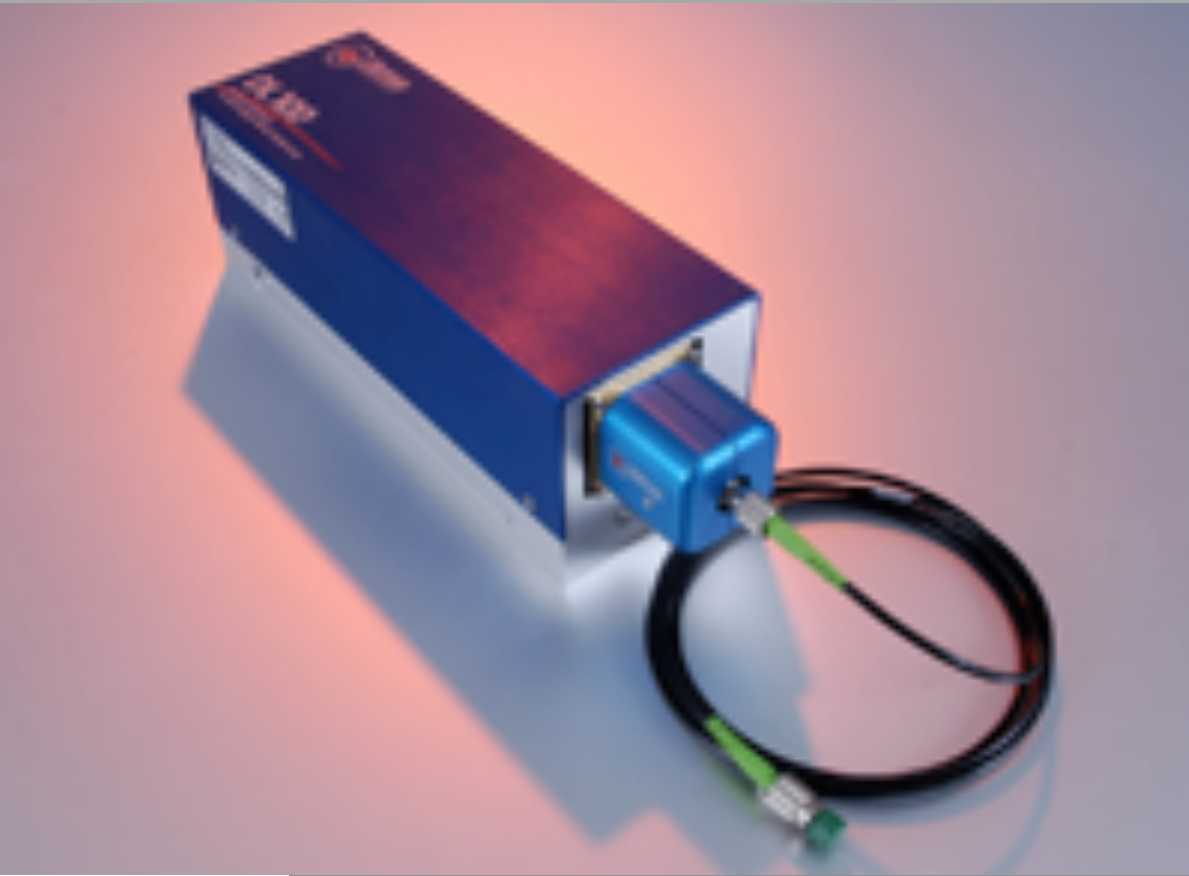
Idealne podłoże byłoby z tego samego materiału, co warstwa laserująca.



1995 r. grudzień, Shuji Nakamura – wywołanie pierwszej akcji laserowej w zakresie niebieskim,
arsenek galu (InGaN) na podłożu szafirowym.

KOMENTARZ: Materiał ten był badany w latach 60-siątych i został wtedy uznany za mało przydatny.





Comparison of Scientific Diode Lasers

	Tunable Diode Lasers		High Power, Amplified Diode Lasers			Frequency Converted Diode Lasers		
	DL 100	DL-DFB	DLX 110 RockSolid	BoosTA	TA 100	DL-SHG 110	TA-SHG 110 (FL-SHG 110)	TA-FHG 110 (FL-FHG 110)
Wavelength range	373-472 nm* 632-1700 nm*	760-2800 nm	755-860 nm*	730..1080 nm*	658-1080 nm*	390-560 nm	329-540 nm* (520 - 560 nm)	205-270 nm* (260 - 280 nm)
Typical power range	3..220 mW	10..150 mW	500..1000 mW	+ 20 dB (max 1.5 W)	250..1500 mW	1.40 mW	50..300 mW (400 mW)	1..20 mW (100 mW)
Typical tunability range	2..80 nm	2..4 nm	10..15 nm	10..20 nm	10..20 nm	< 10 nm	< 10 nm	< 2 nm
Typical mode hop free tunability	≥ 20 GHz	≥ 1000 GHz	15..20 GHz	dep. on master	≥ 20 GHz	≥ 20 GHz	≥ 20 GHz	≥ 40 GHz
Typical linewidth (5 μs)	300 kHz	0.5 .. 2 MHz	500 kHz	dep. on master	300 kHz	600 kHz	600 kHz	1 MHz
Minimum (typ.) FiberDock coupling effic.****	55 (65) 65 (75 %)**	55 (65) 65 (75 %)**	50 (> 60 %)	50 (> 60 %)**	50 (> 60 %)			

* Spectral coverage with gaps ** Requires APP *** With DL 100 master laser **** -15% for < 470 nm

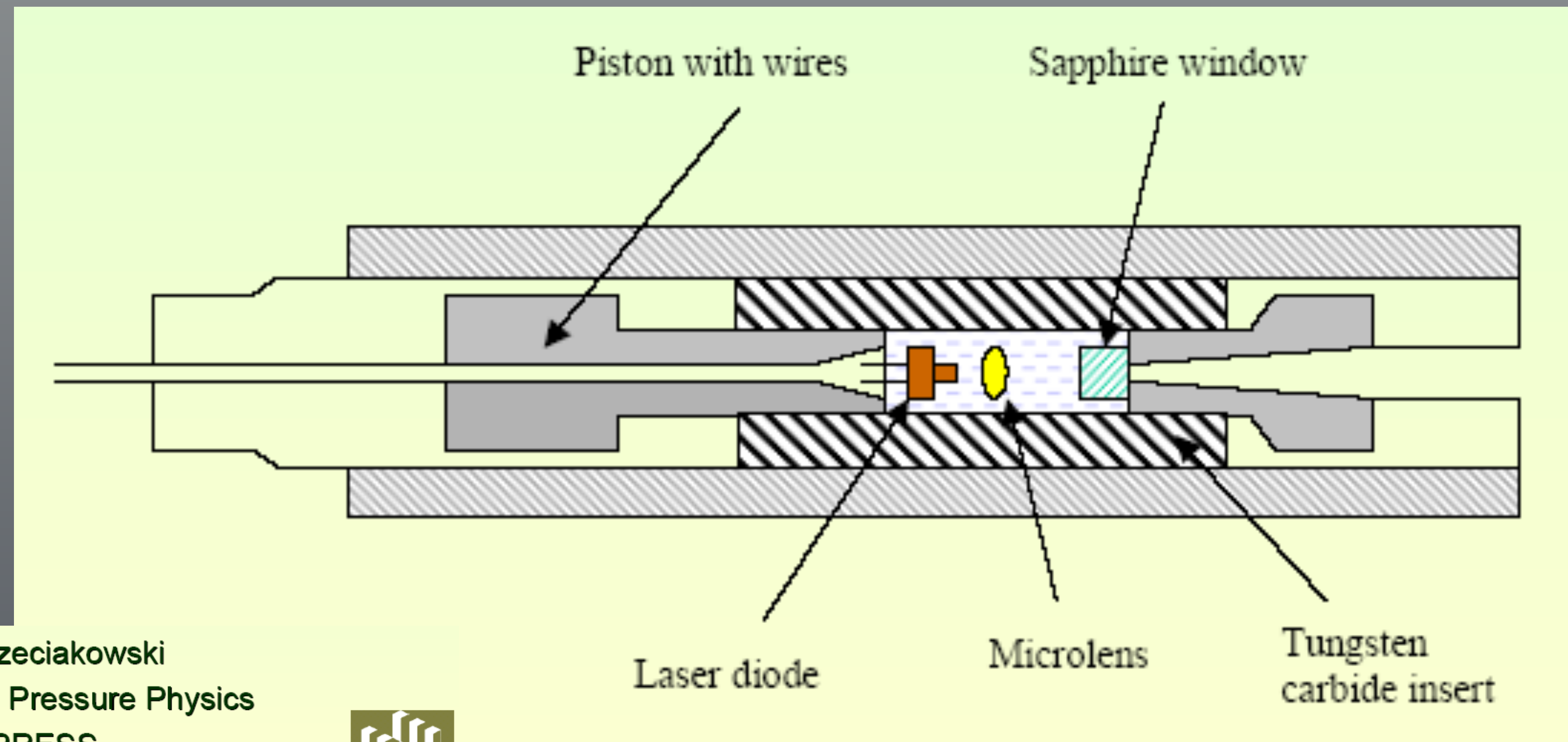
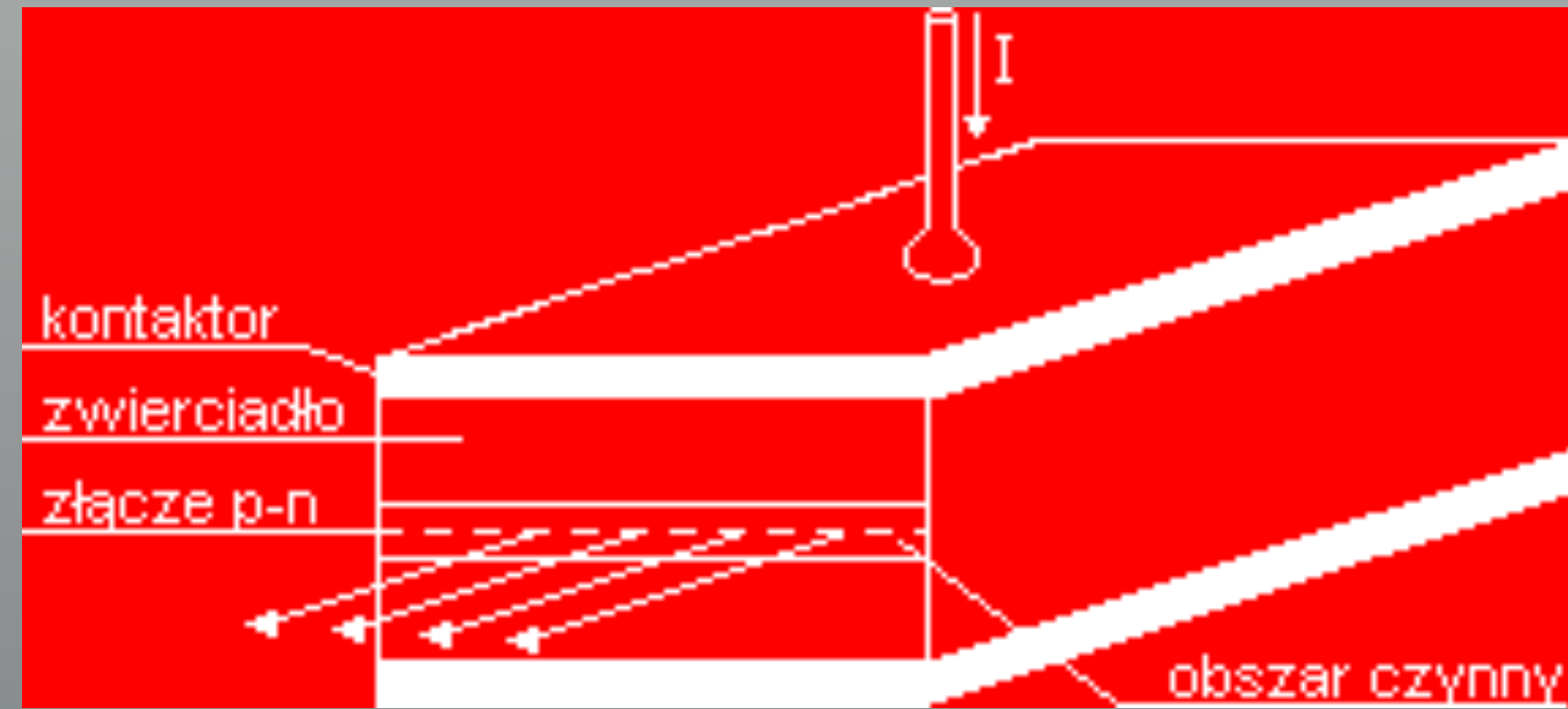
Krótką długość fali monochromatycznej

pozwala na wielokrotnioną gęstość zapisu informacji.

$$(\nu \cong 714 \text{ THz}, \quad \Delta\nu < 1 \text{ MHz})$$

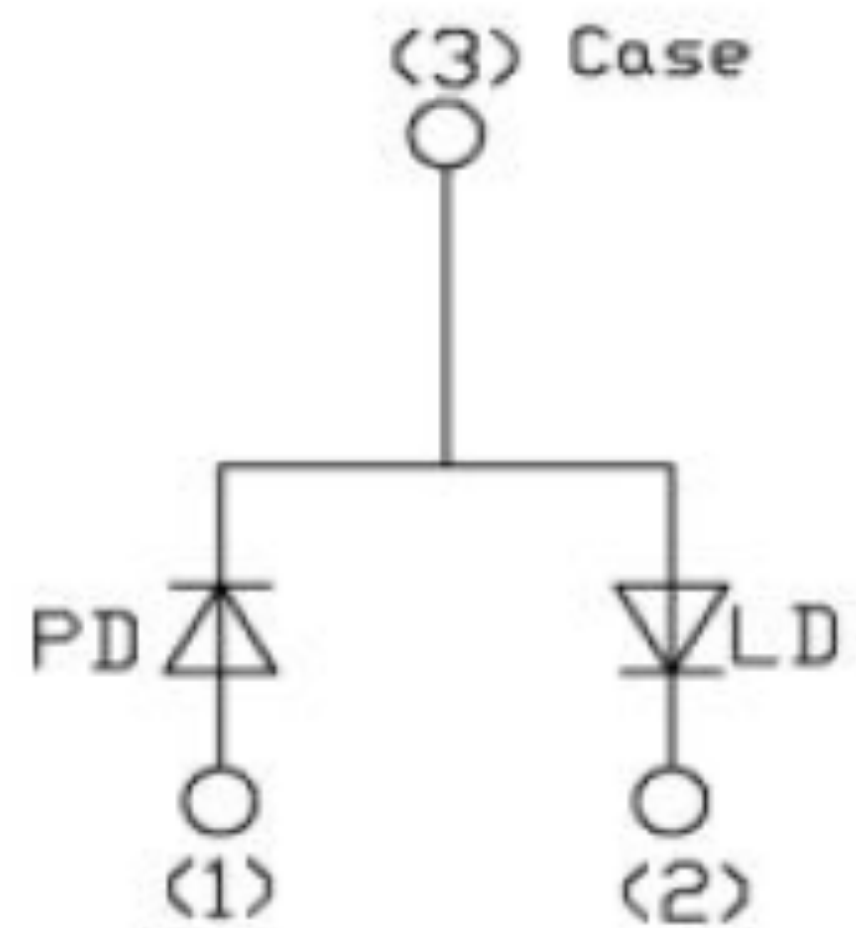
$$(\nu \cong 714\,000\,000 \text{ MHz}, \quad \Delta\nu < 1 \text{ MHz}, \quad \Delta\nu/\nu \cong 10^{-9})$$

DL



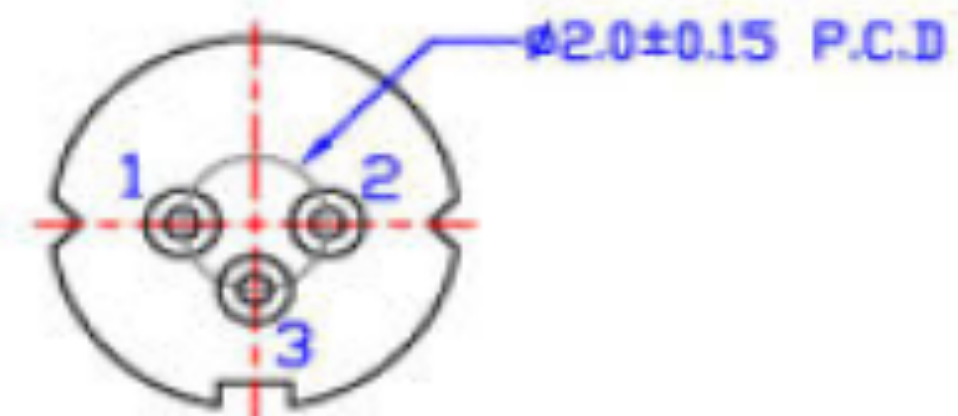
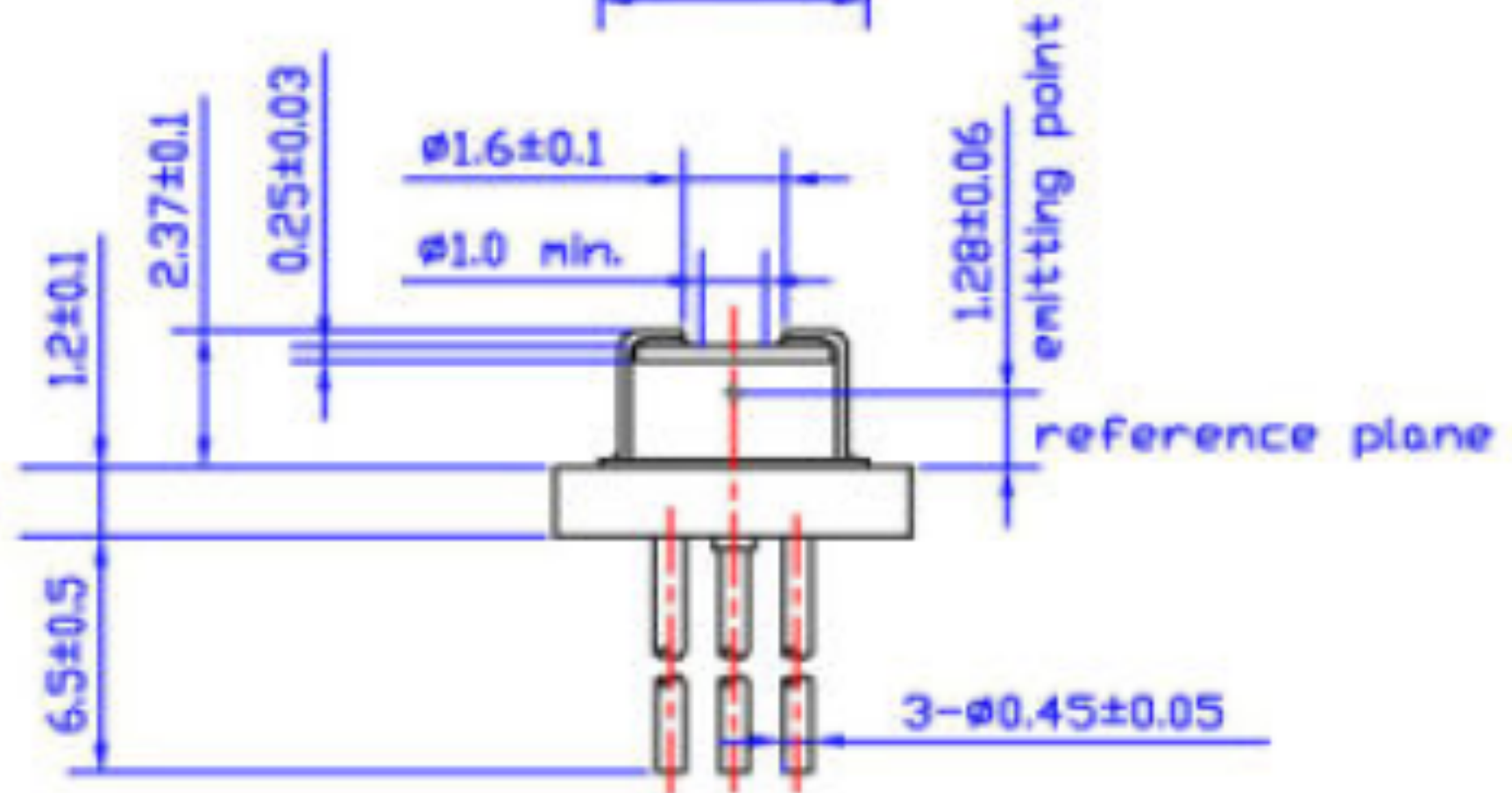
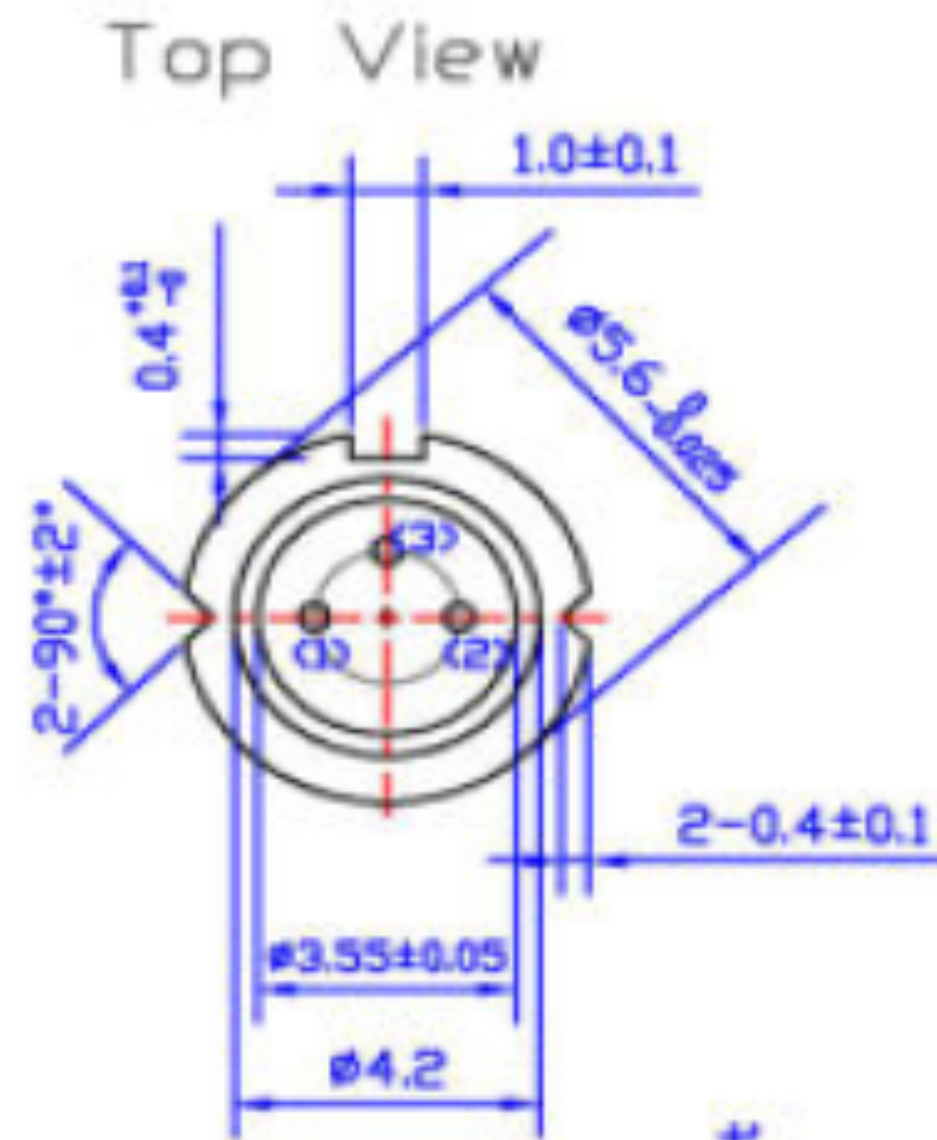
Witold Trzeciakowski
Institute of High Pressure Physics
UNIPRESS





A

- | | | |
|---|----|-------------|
| 1 | PD | Anode(+) |
| 2 | LD | Cathode (-) |
| 3 | PD | Cathode (-) |
| | LD | Anode(+) |



Bottom View

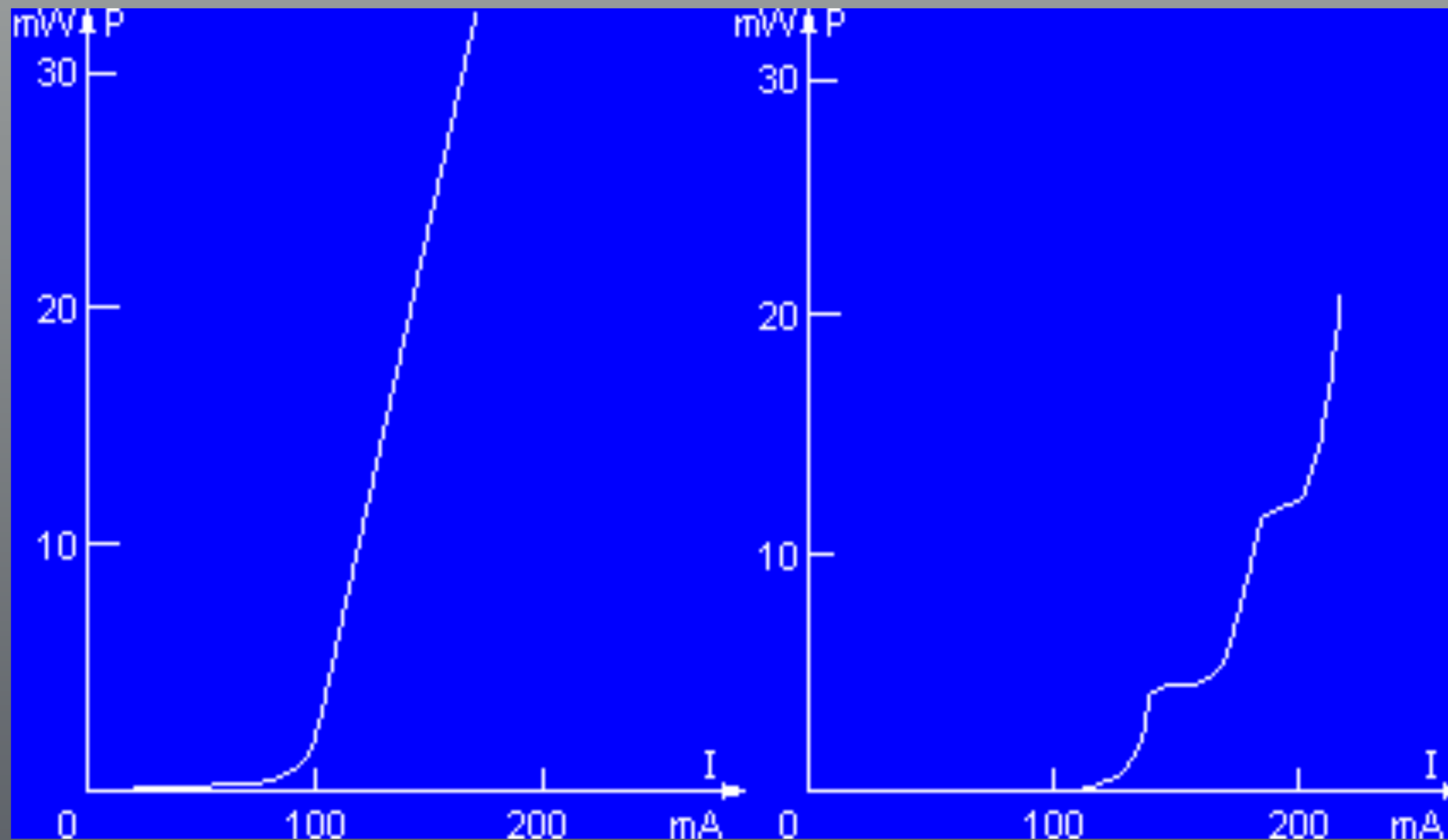
635nm Laser Diode■Electrical and Optical Characteristics($T_c=25^\circ\text{C}$)

Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit	
Threshold Current	I_{th}	-	-	25	30	mA	
Operating Current	I_{op}	$P_o=5\text{mW}$	-	35	40	mA	
Operating Voltage	V_{op}	-	-	2,2	2,5	Volt	
Slope Efficiency	η	$3.75\text{mW}-1.25\text{mW}$	0,5	0,6	-	mW/mA	
		$I_{3.75\text{mW}}-I_{1.25\text{mW}}$					
Monitor Current	I_m	$P_o=5\text{mW}, V_r=0\text{V}$	0.05	0.1	0.2	mA	
Beam Divergence (FWHM)	Parallel	$\theta_{//}$	$P_o=5\text{mW}$	6	7,5	11	deg.
	Perpendicular	θ_{\perp}	$P_o=5\text{mW}$	30	33	38	deg.
Lasing Wavelength	λ	$P_o=5\text{mW}$	630	638	640	nm	

© $\theta_{//}$ and θ_{\perp} are defined as the angle within which the intensity is 50% of the peak value.

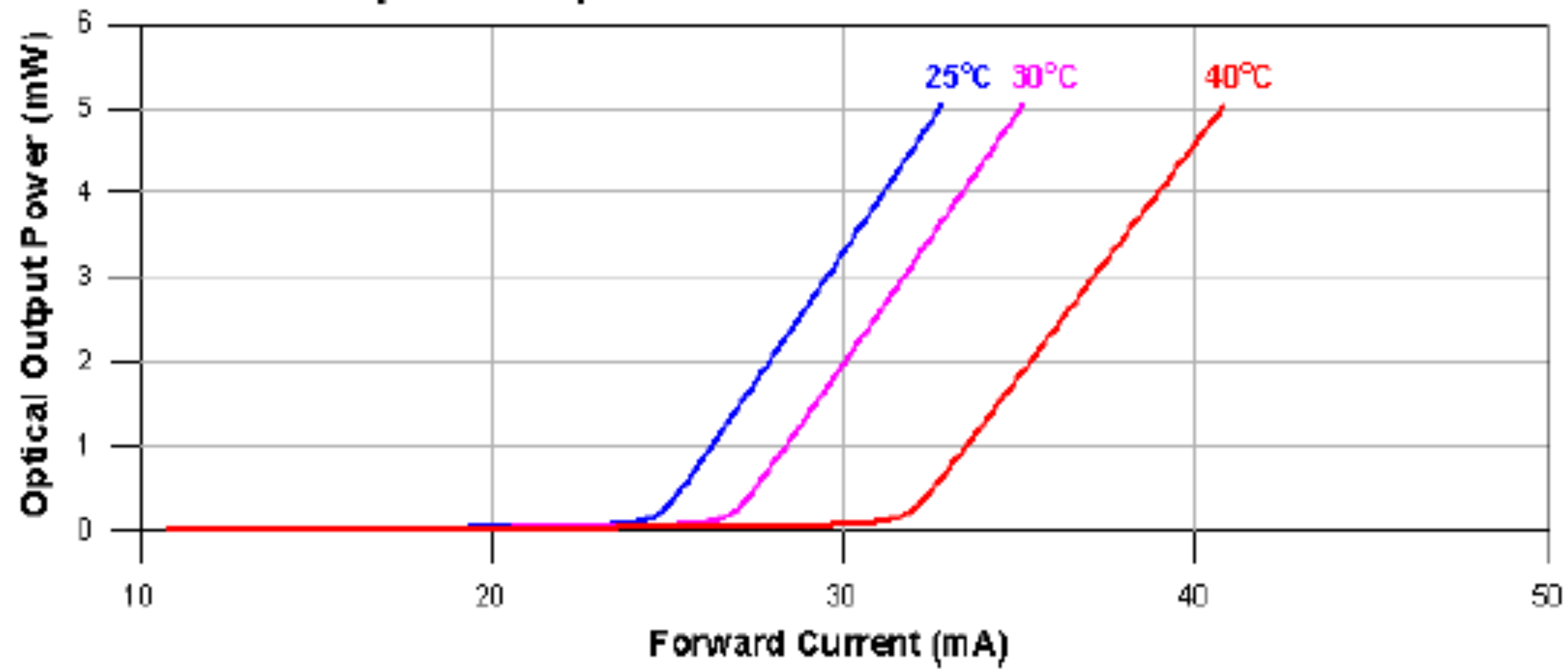
DL

moc promieniowania lasera

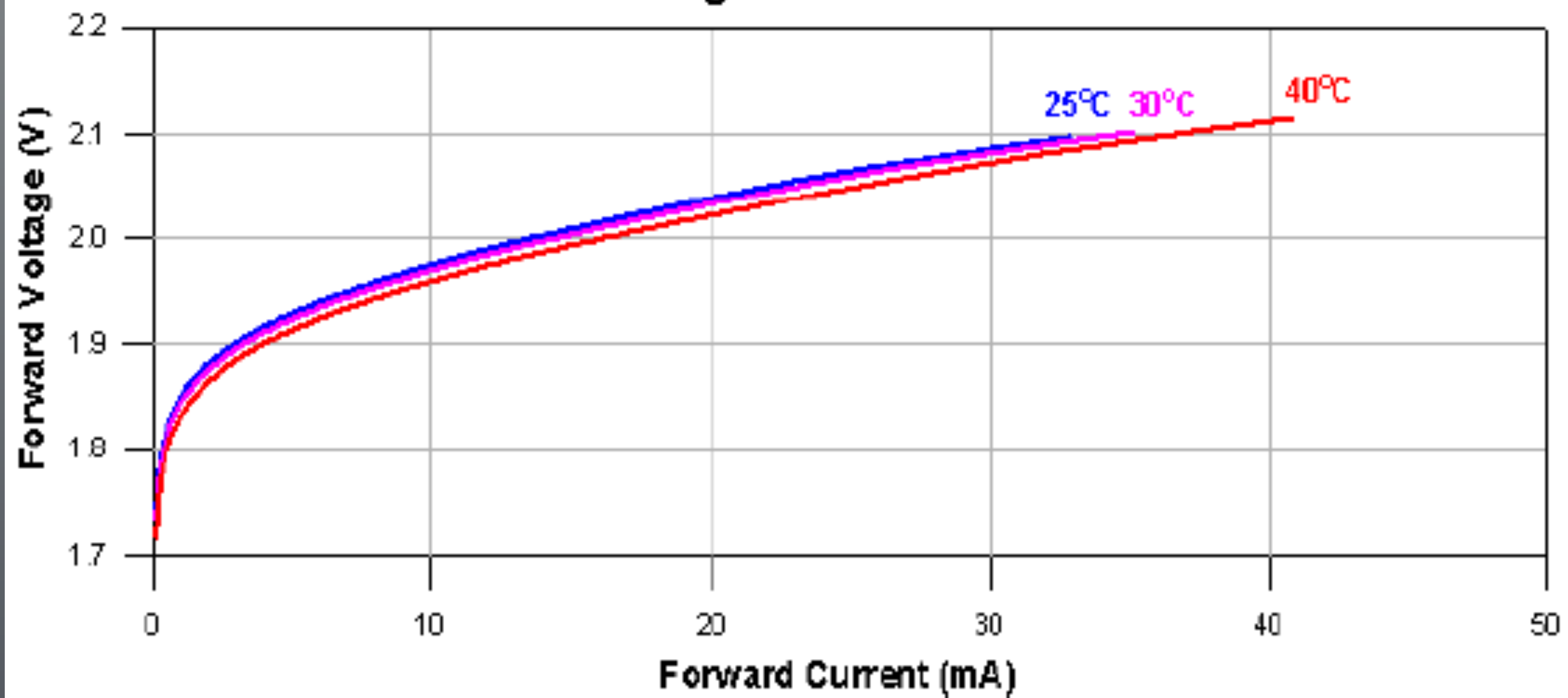


natężenie prądu zasilania lasera

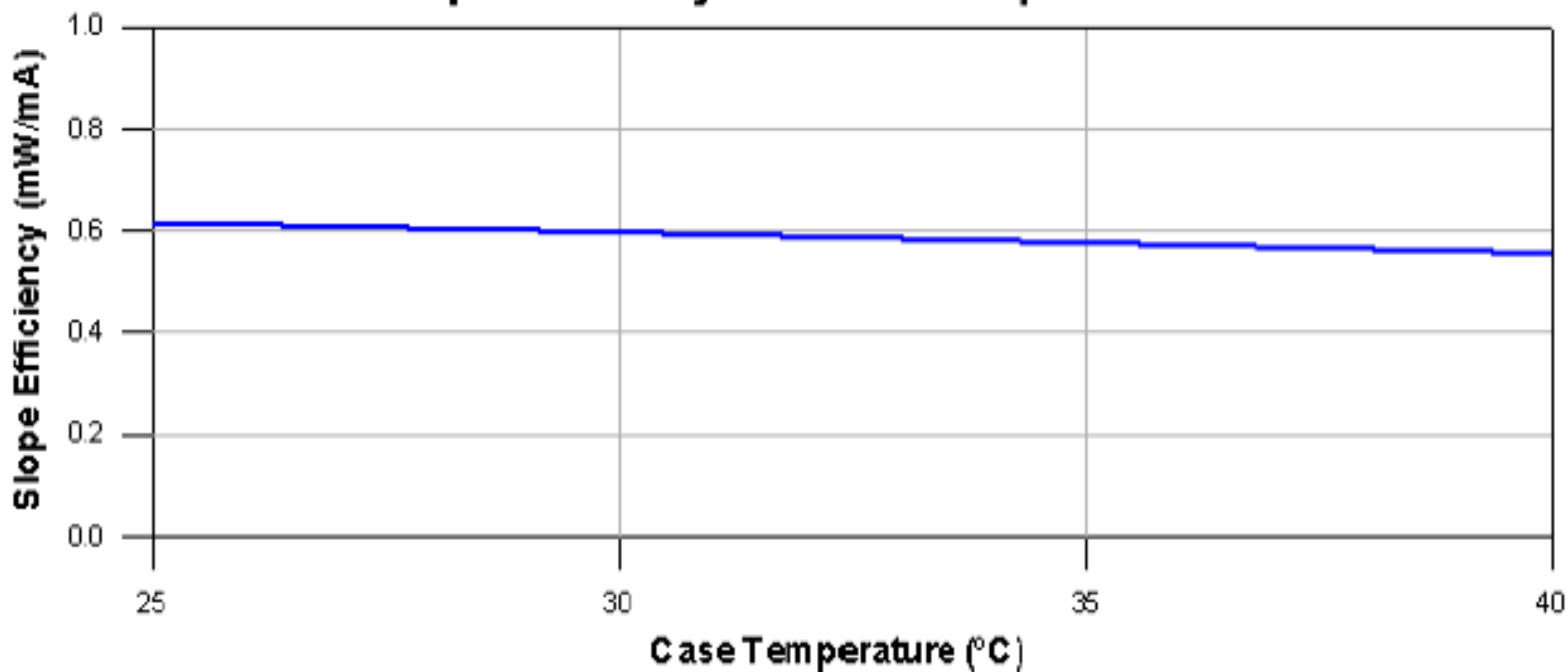
Optical Output Power v.s. Forward Current



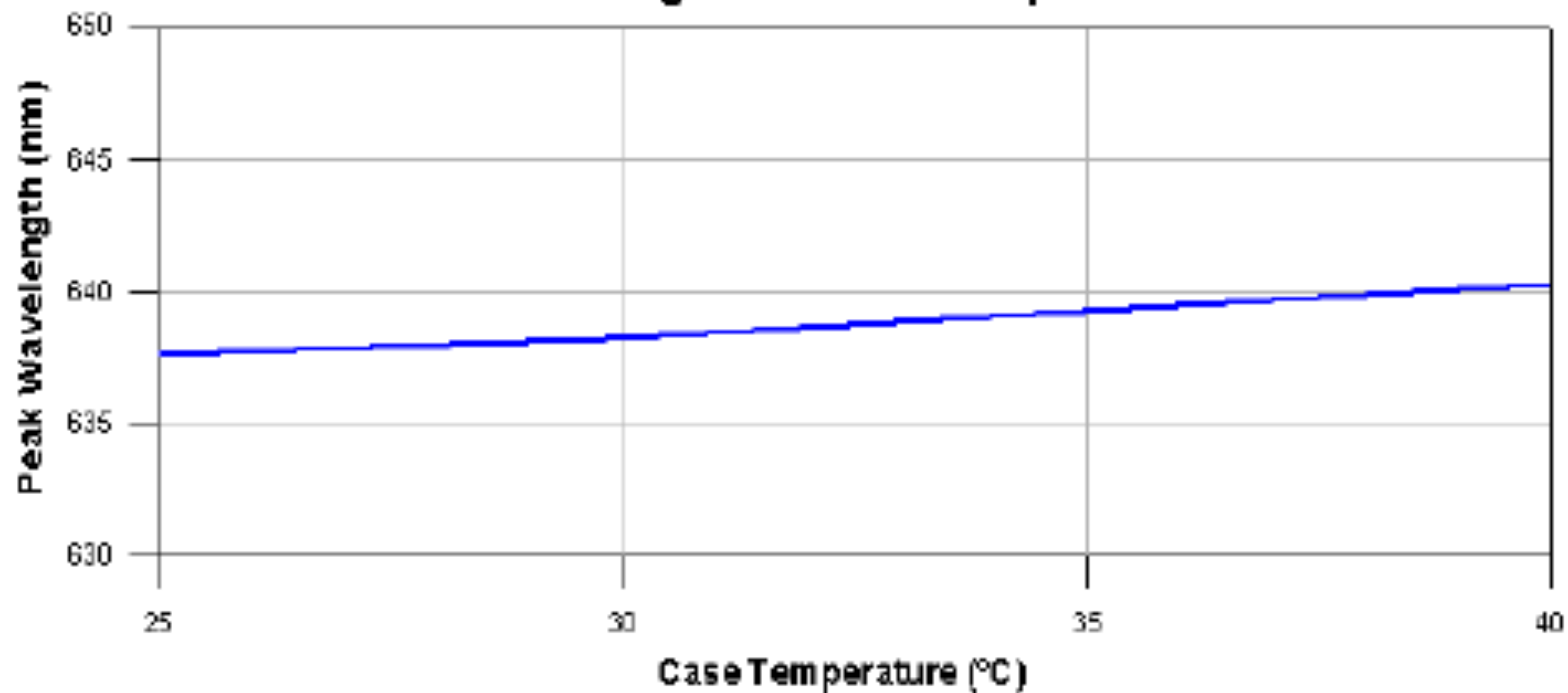
Forward Voltage v.s. Forward Current



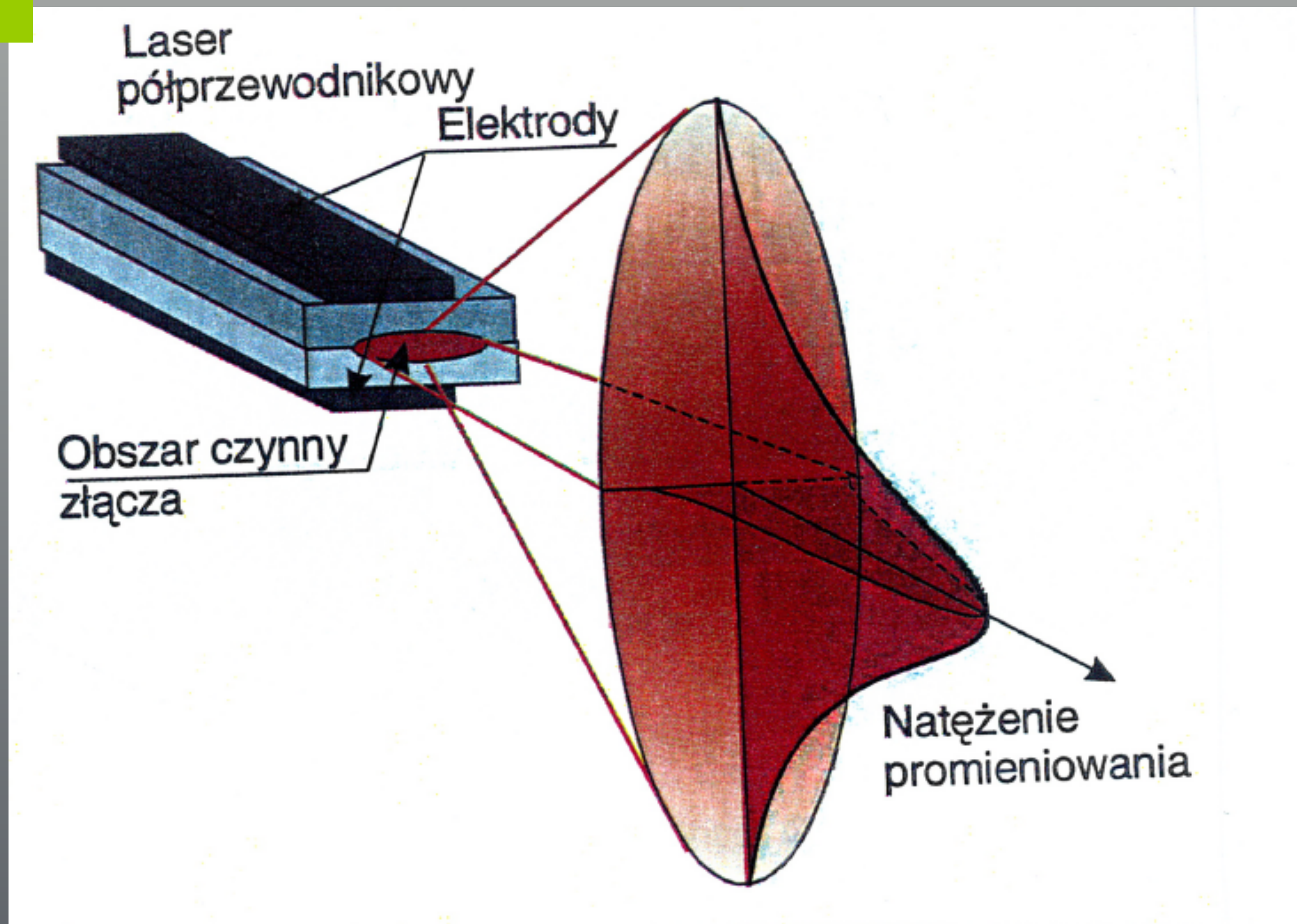
Slope Efficiency v.s. Case Temperature



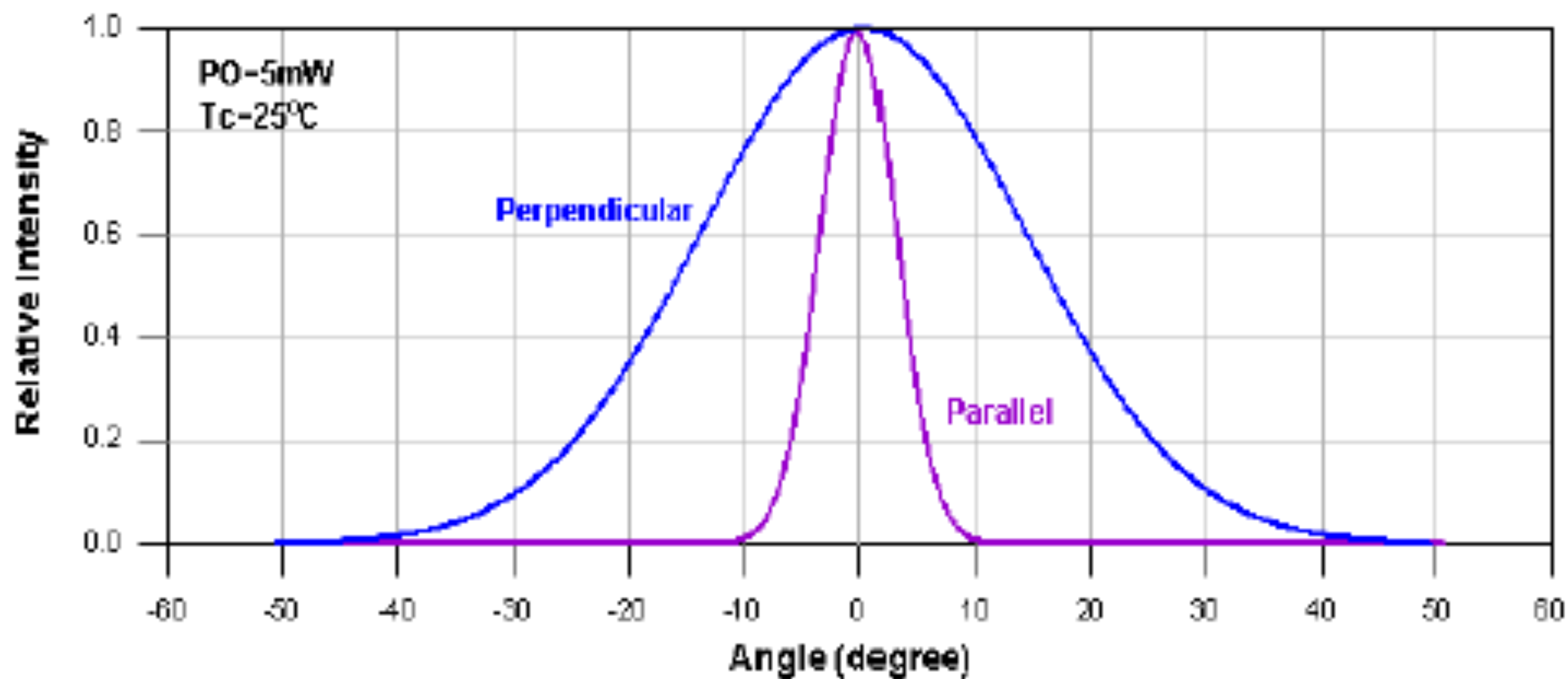
Peak Wavelength v.s. Case Temperature

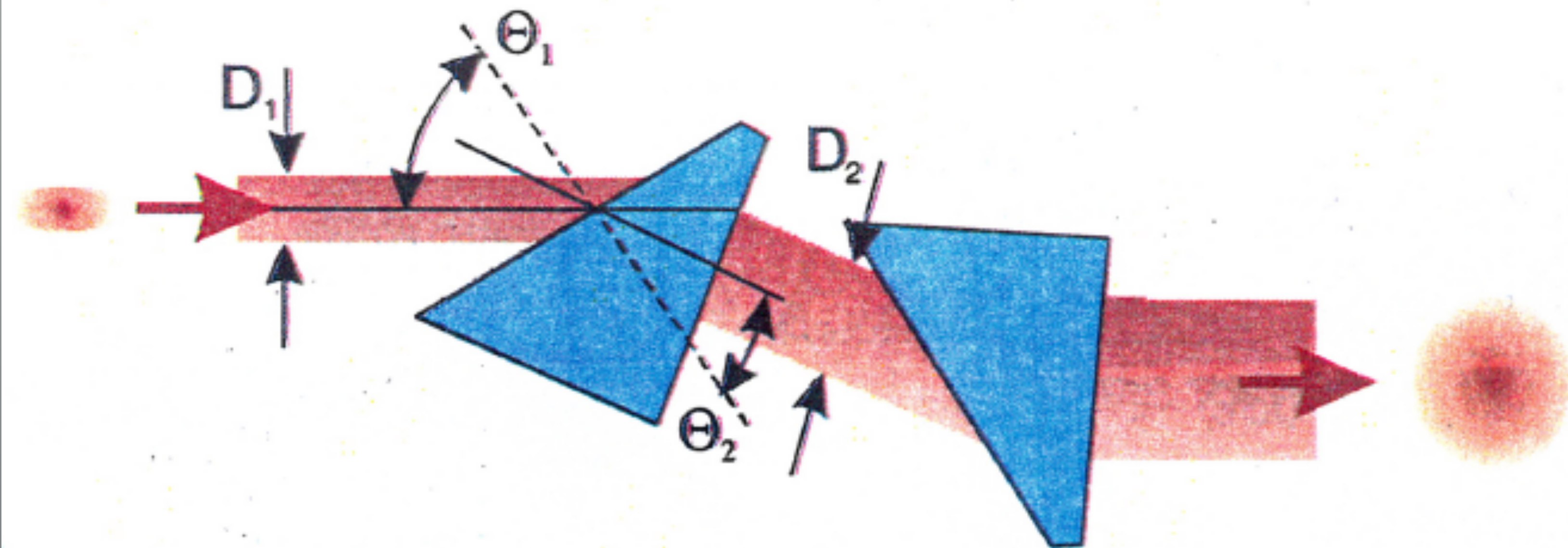


DL



Far-Field Pattern

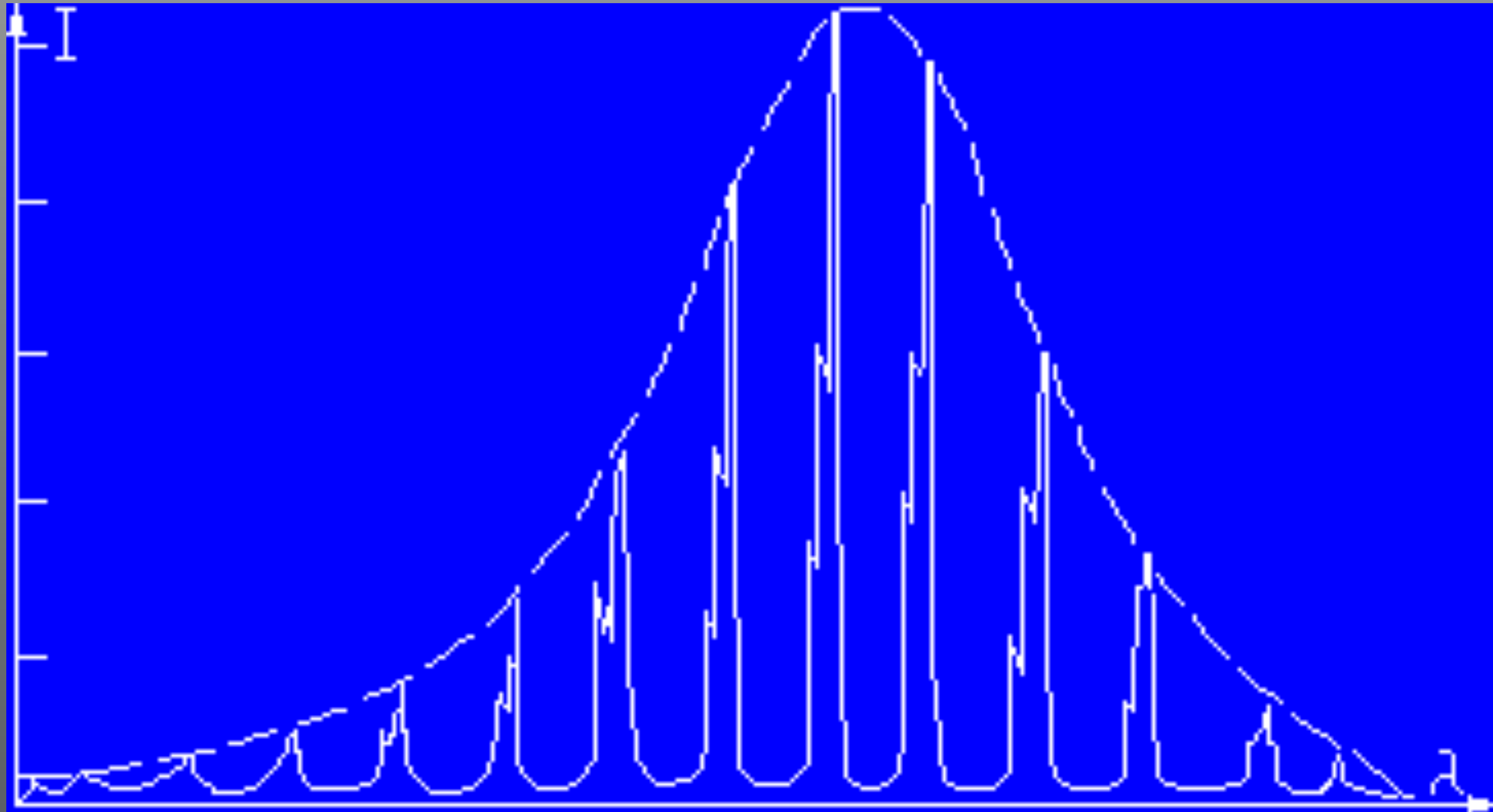




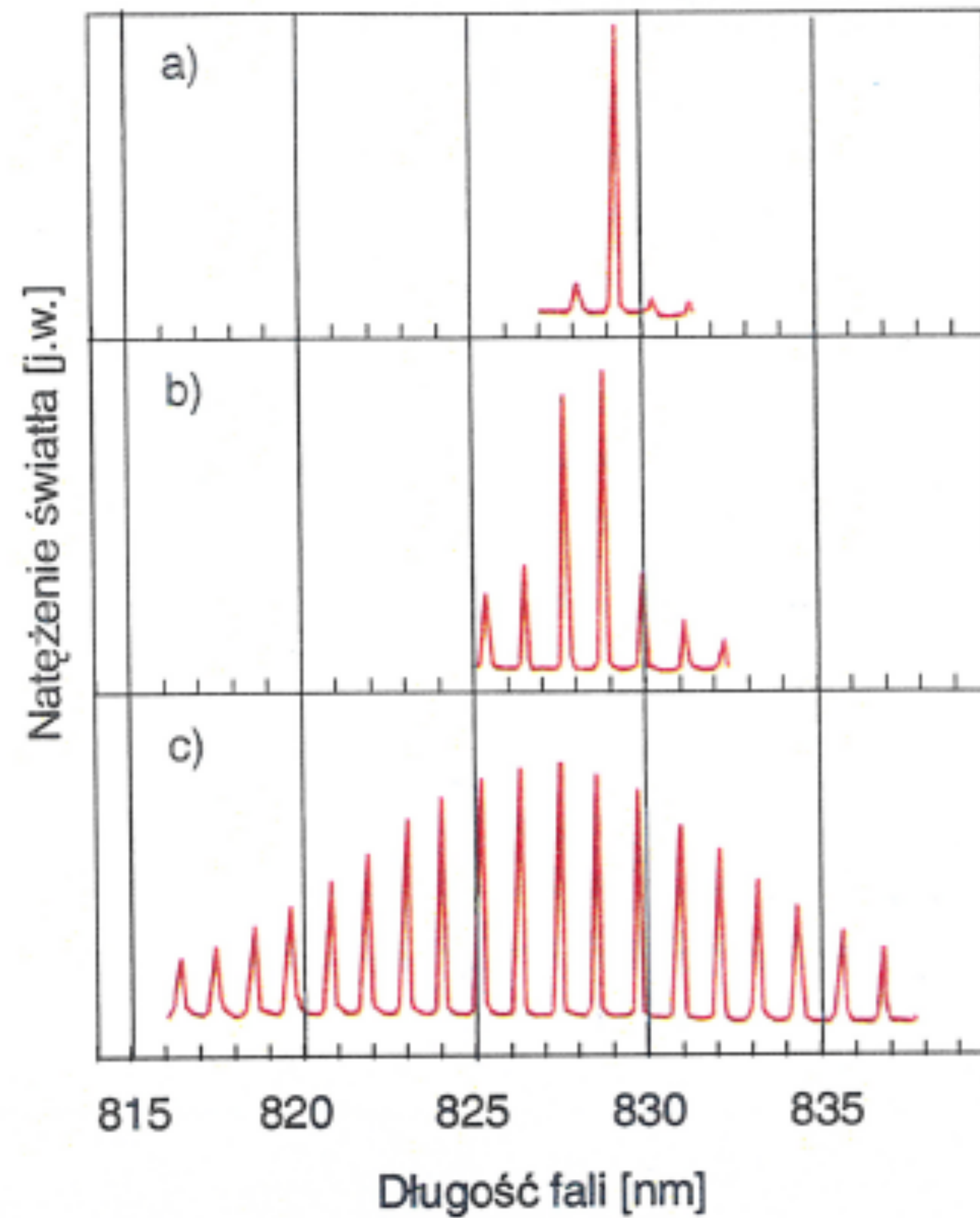
Rys. X.18. Działanie pryzmatów anamorficznych

Charakterystyka spektralna

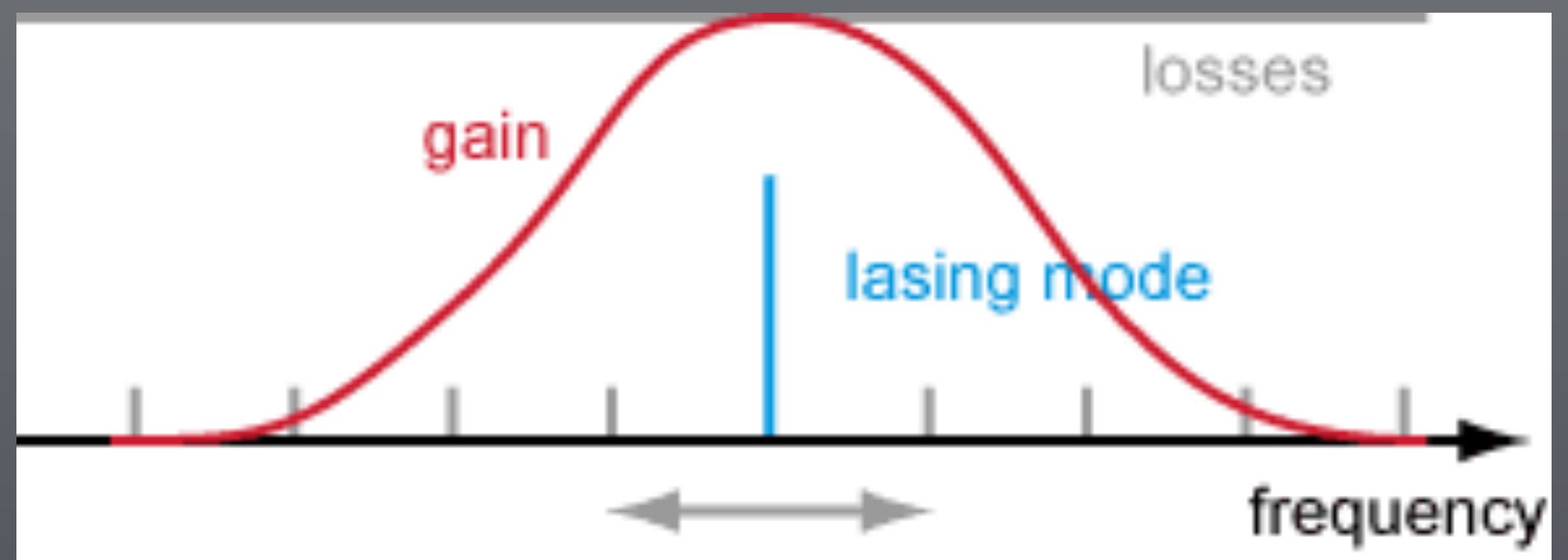
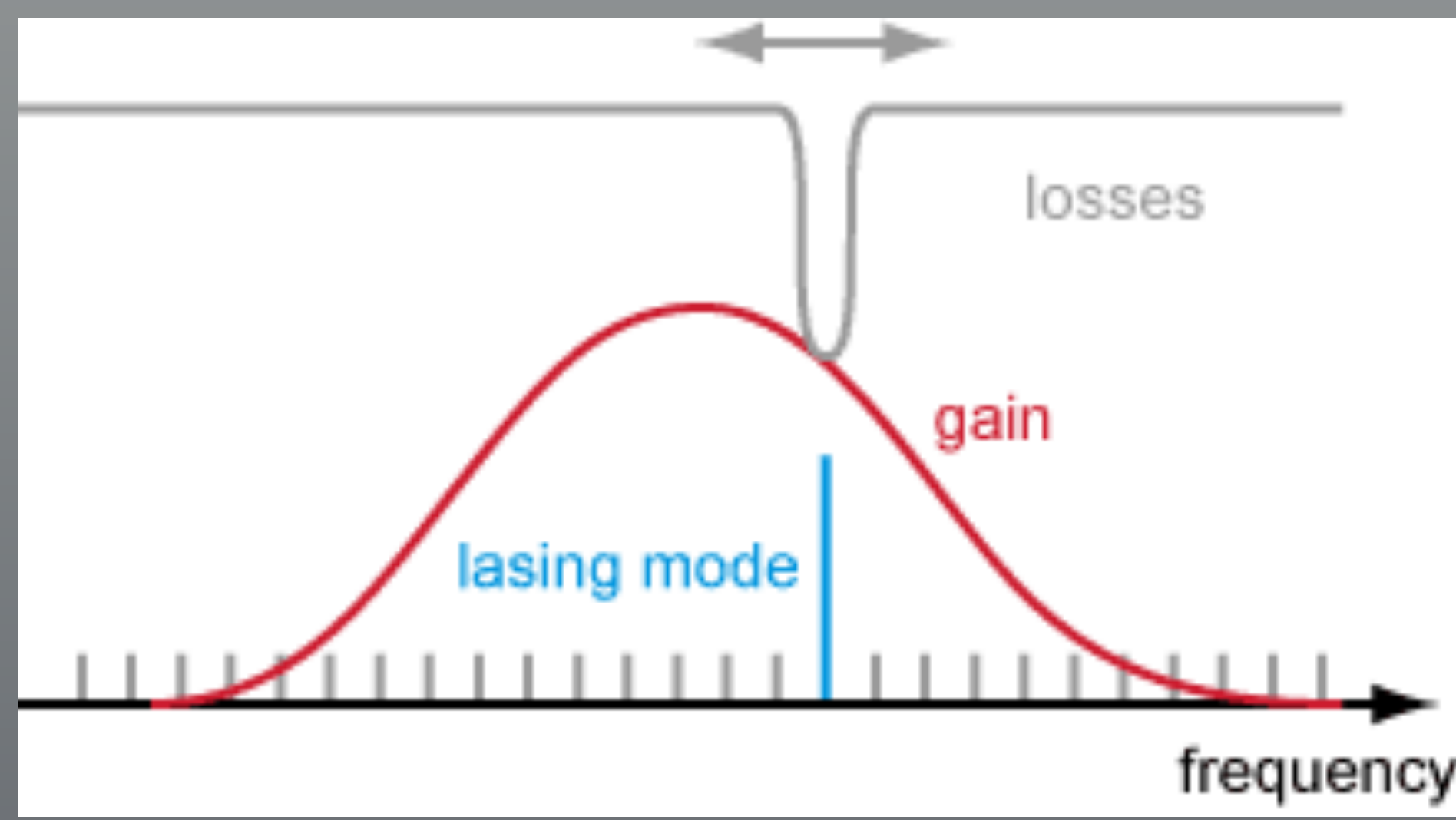
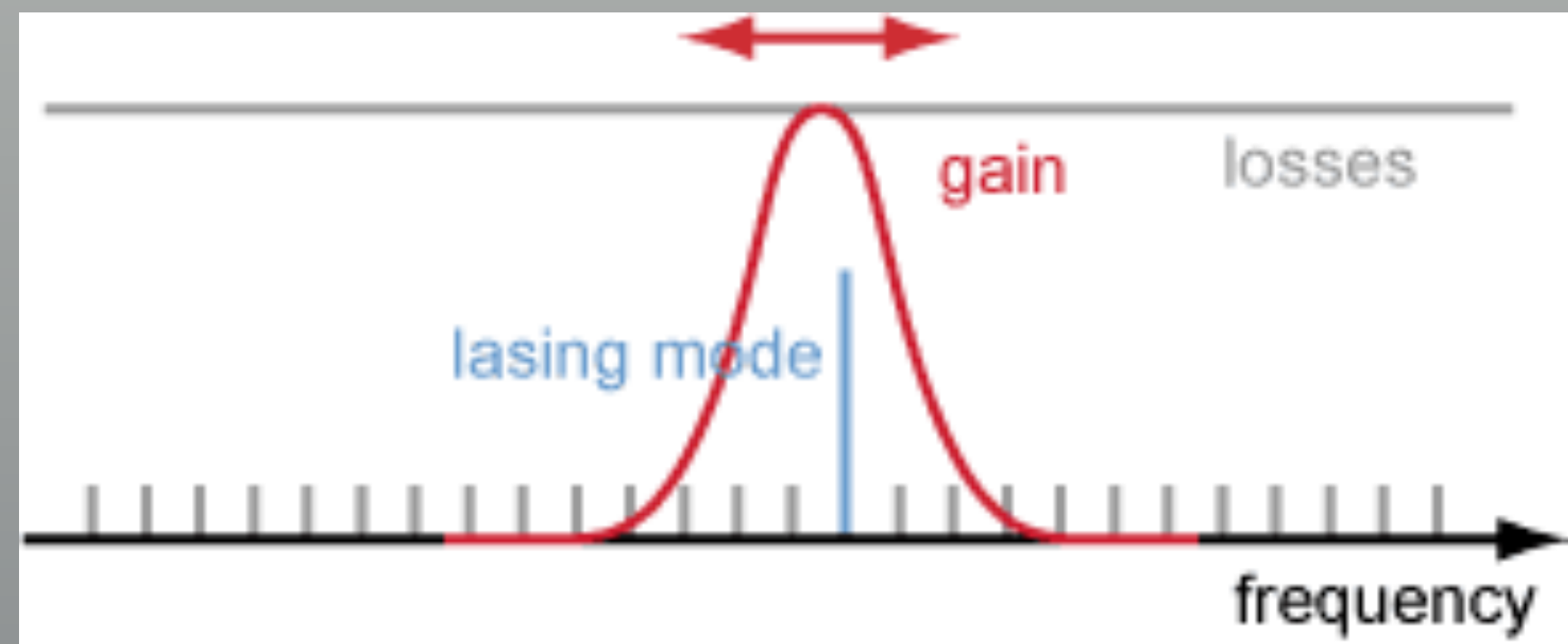
natężenie promieniowania lasera

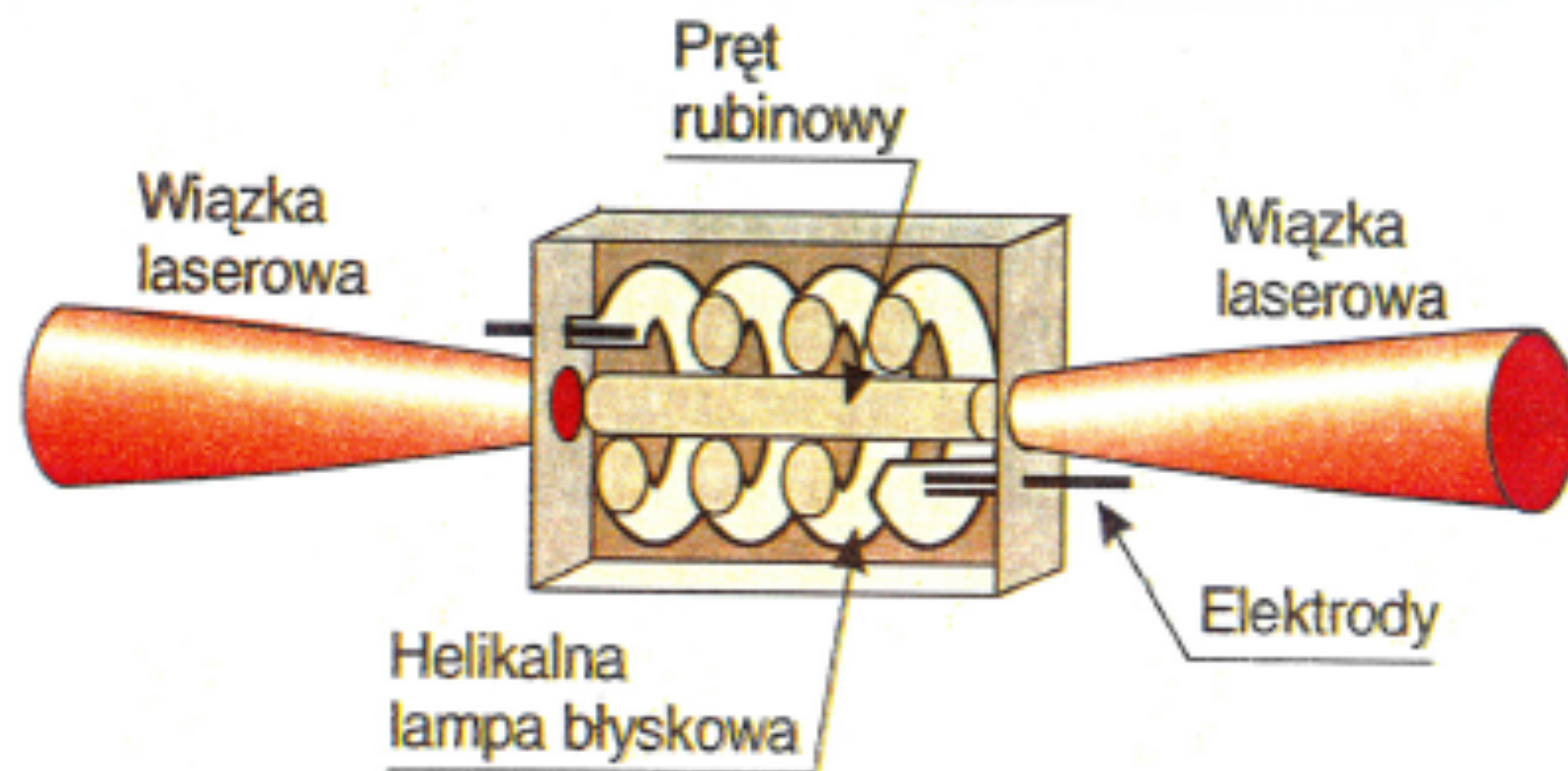


I_{zasil}



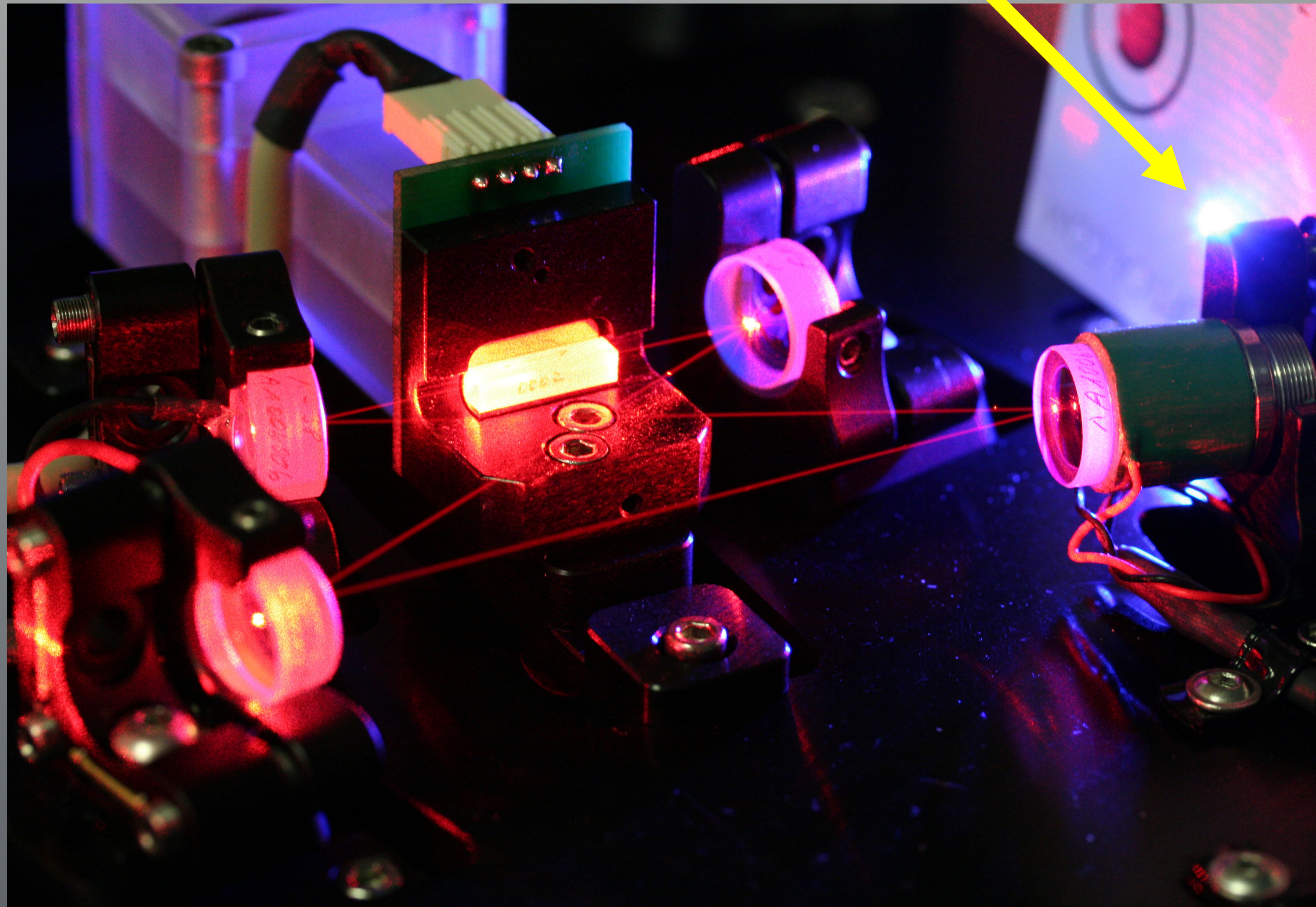
X.15. Widma emisji (unormowane do jedności w maksimum) lasera półprzewodnikowego w zależności od prądu zasilania: a) $I = 100$ mA; $P = 10$ mW; b) $I = 80$ mA, $P = 4$ mW; c) $I = 67$ mA, $P = 67$ mW (za [5])





Rys. IX.2. Schemat pierwszego lasera rubinowego

generacja promieniowania nadfioletowego (UV)

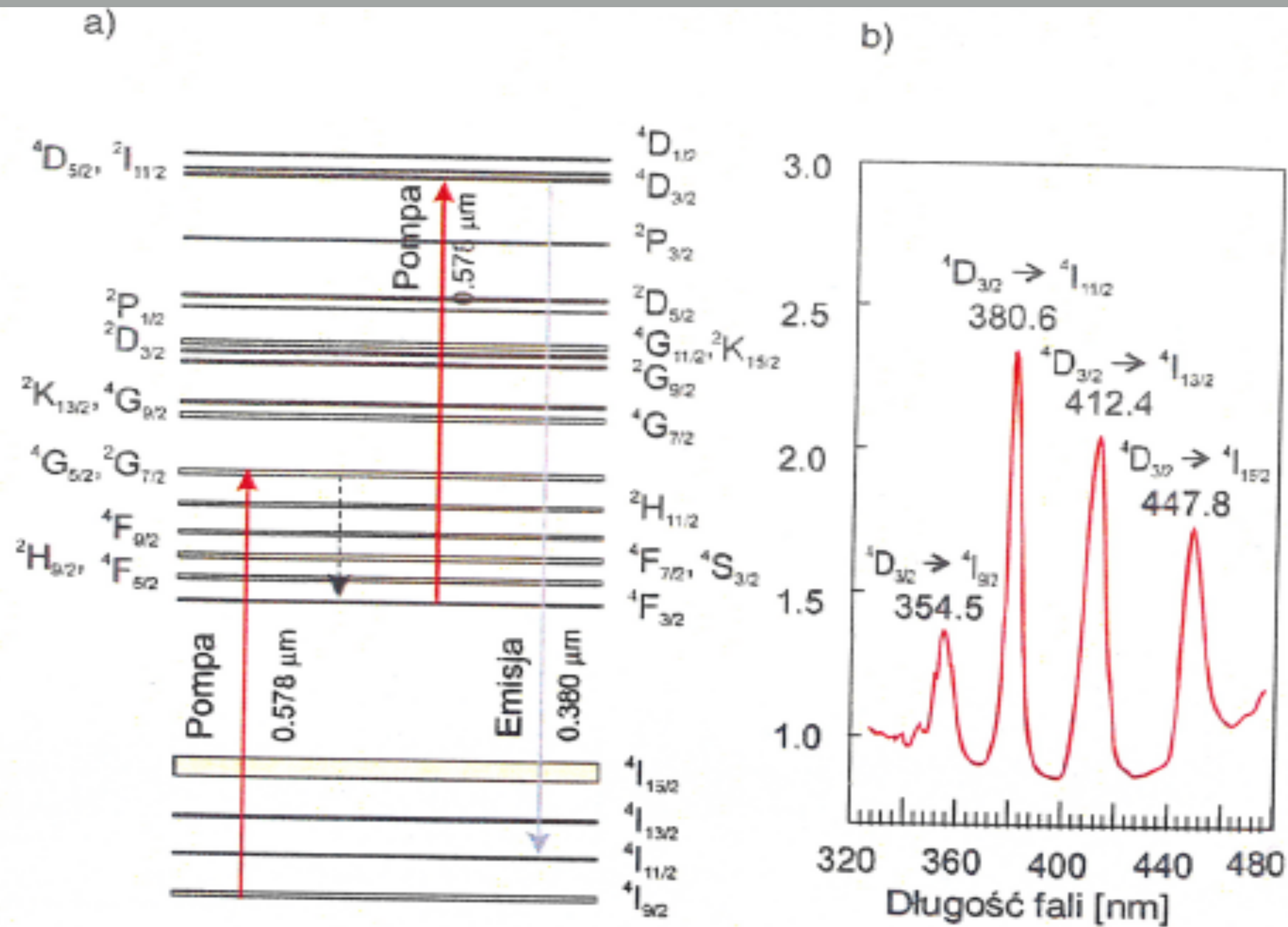


Tab. IX.2. Pierwiastki grup przejściowych

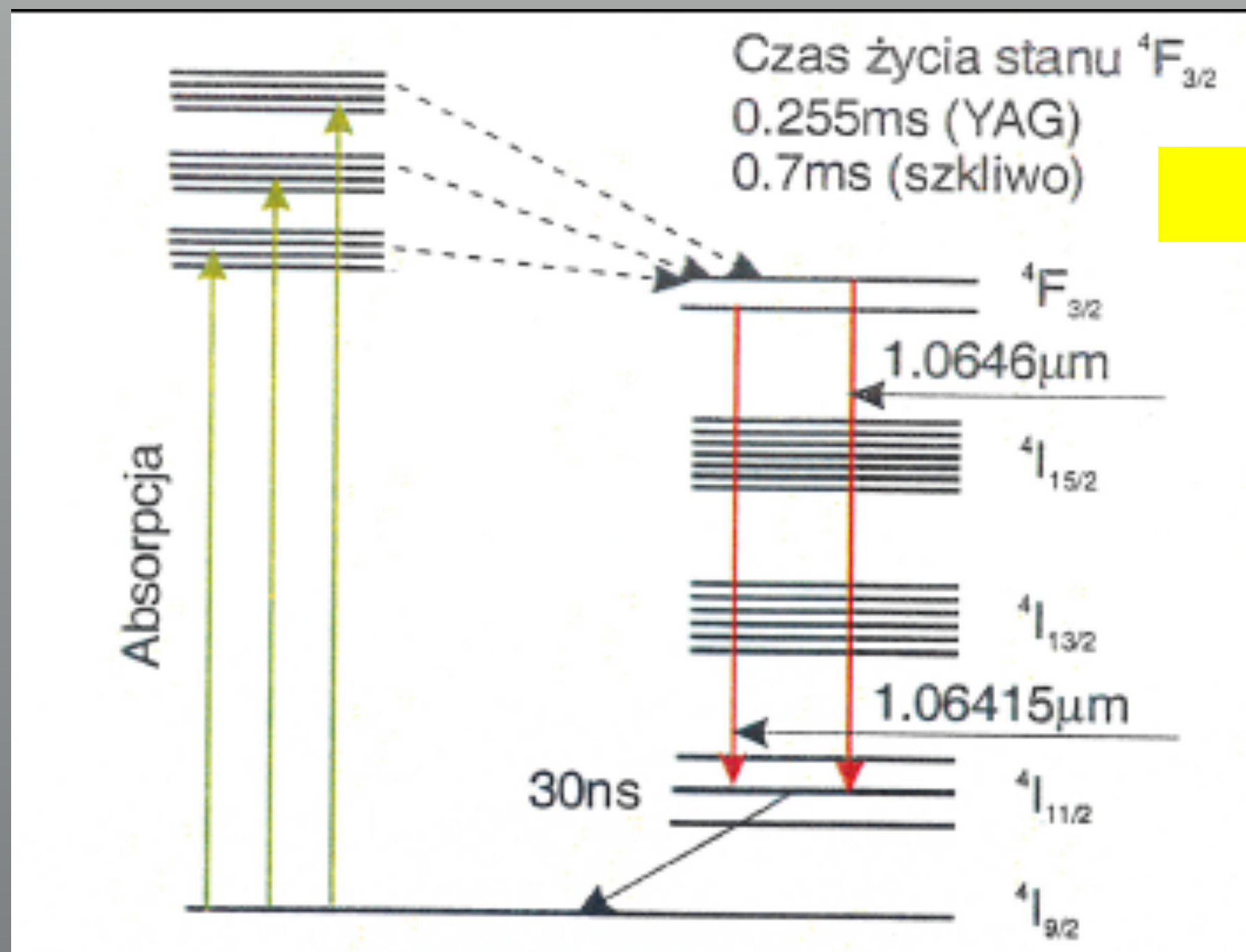
Grupa	Konfiguracja	Pierwiastki
Żelaza	$3d^m 4s$	od 21 do 30 np.: <i>Ti, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn</i>
Palladu	$4d^m 5s^1$	od 39 do 48 np.: <i>Y, Zr, Nb, Mo, Te, Ag, Cd</i>
Ziem rzadkich	$4f^n sd^0 6s^2$	od 57 do 70 np.: <i>Pr, Nd, Sm, Eu, Ho, Er, Yb</i>
Platyny	$5d^m 6s^2$	od 71 do 80 np.: <i>Ta, W, Re, Ir, Pt, Au, Hg</i>
Aktynowców	$5f^n 6d^0 7s^2$	od 89 do 98 np.: <i>Ac, Pa, U, Np, Pu, Am, Cf</i>

Tab. IX.1. Charakterystyki wybranych laserów na ciele stałym

Ośrodek czynny	Wzmocnienie γ_0	Moc/Energia	Sposób pracy
Rubinowy	20 m^{-1}	$> 10 \text{ J/impuls}$	impulsowy
<i>Nd : YAG</i>	5 m^{-1}	$> 1 \text{ J/impuls}$	impulsowy
<i>Nd : YVO₄</i>	25 m^{-1}	typ.: poj. W	ciągły
<i>Yb : YAG</i>	$20\text{-}40 \text{ m}^{-1}$	kilkaset W	ciągły
Aleksandryt	$4\text{-}20 \text{ m}^{-1}$	$> 1.2 \text{ J/impuls}$	impulsowy
<i>Ti : S</i>	10 m^{-1}	$> 50 \text{ W}$	ciągły
<i>Er : Szkło</i>	1.35 m^{-1}	typ.: poj. W	ciągły
Centra barwne	300 m^{-1}	$> 0.5 \text{ mW}$	ciągły

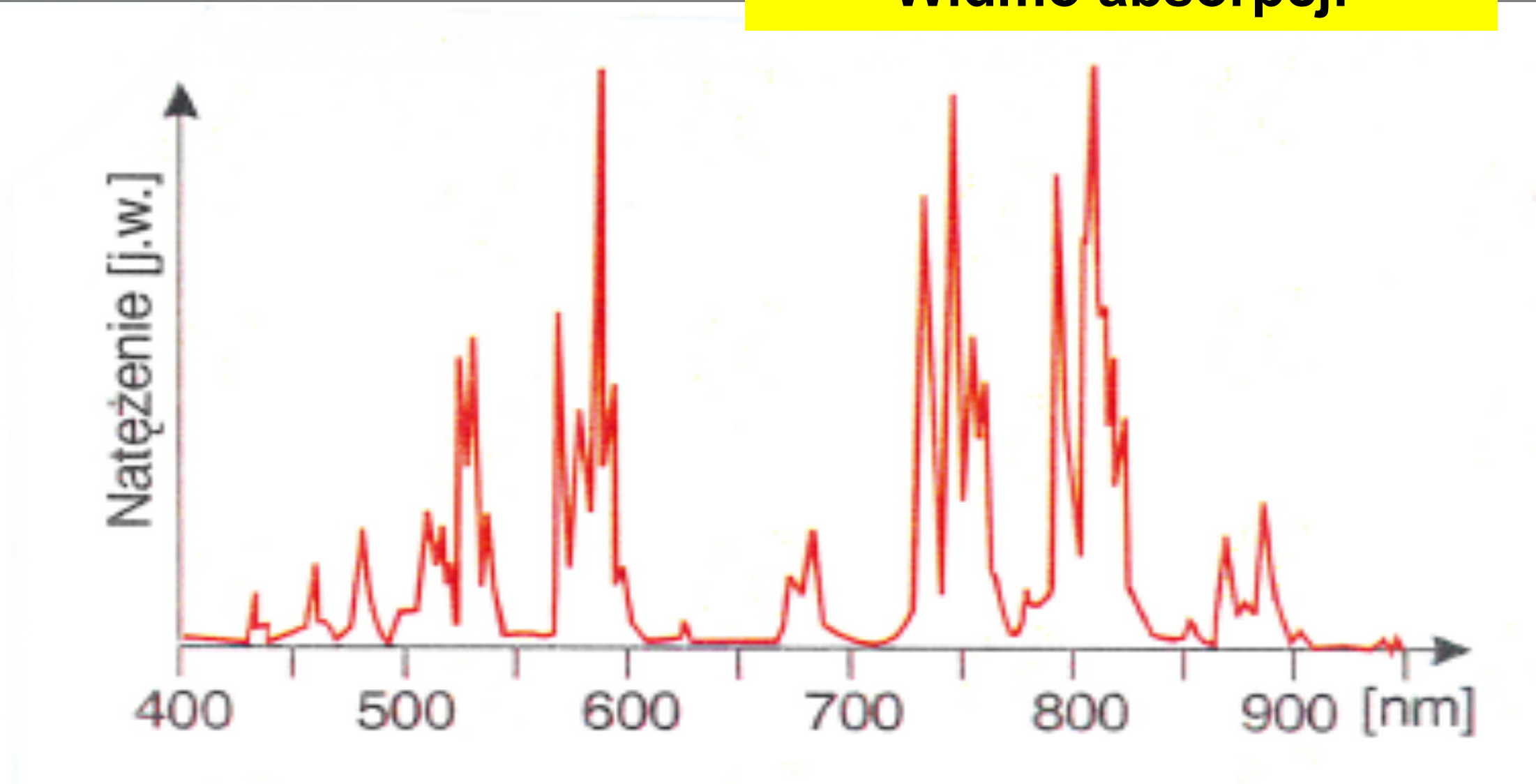


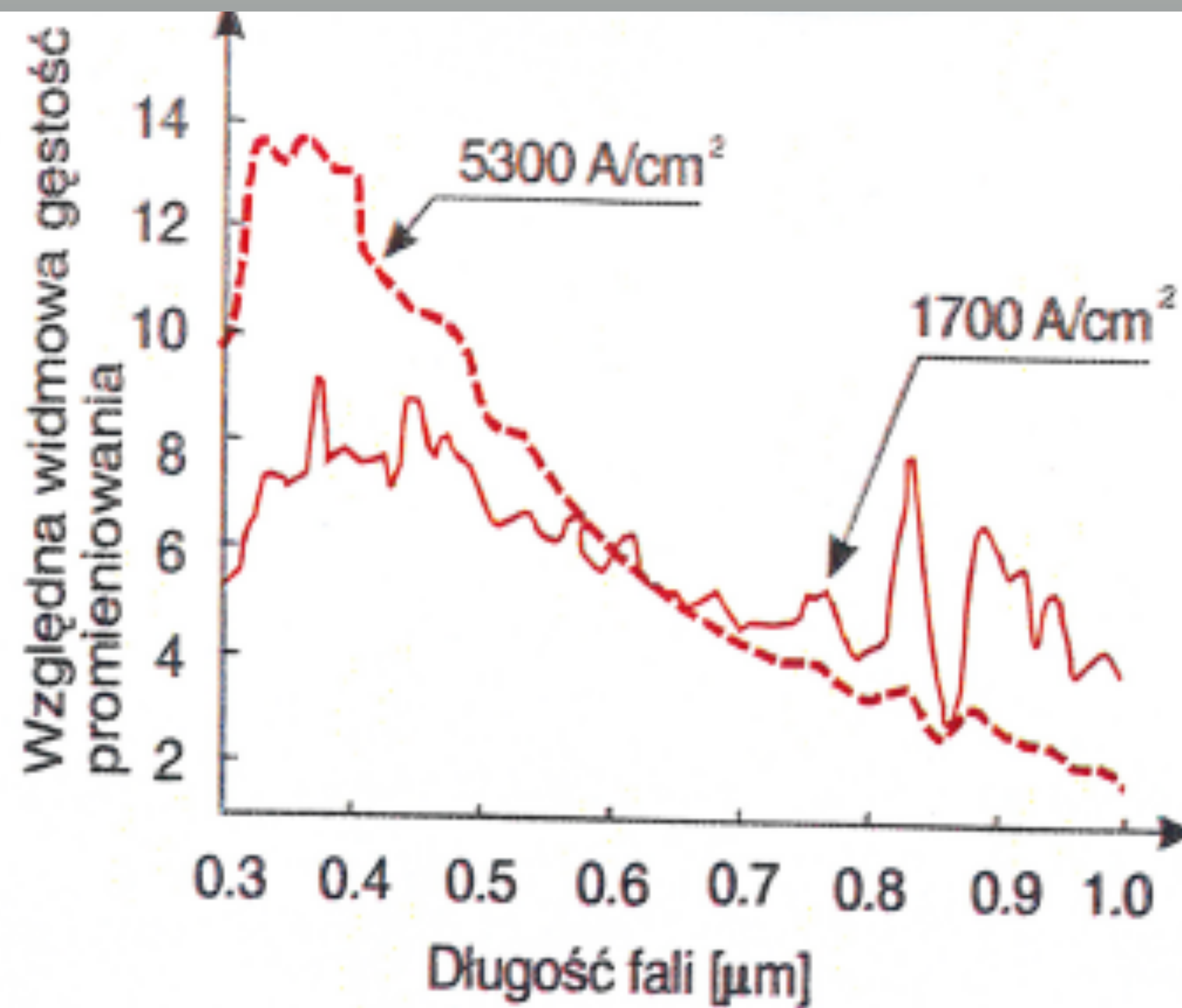
rys. IX.27. Schemat konwersji wzbudzenia przez dwustopniową absorpcję jonu Nd^{3+} . Wzbudzenie linią $0.578 \mu m$ (a) i widmo emisji z konwersją częstotliwości przy wzbudzeniu $0.5145 \mu m$ (b)



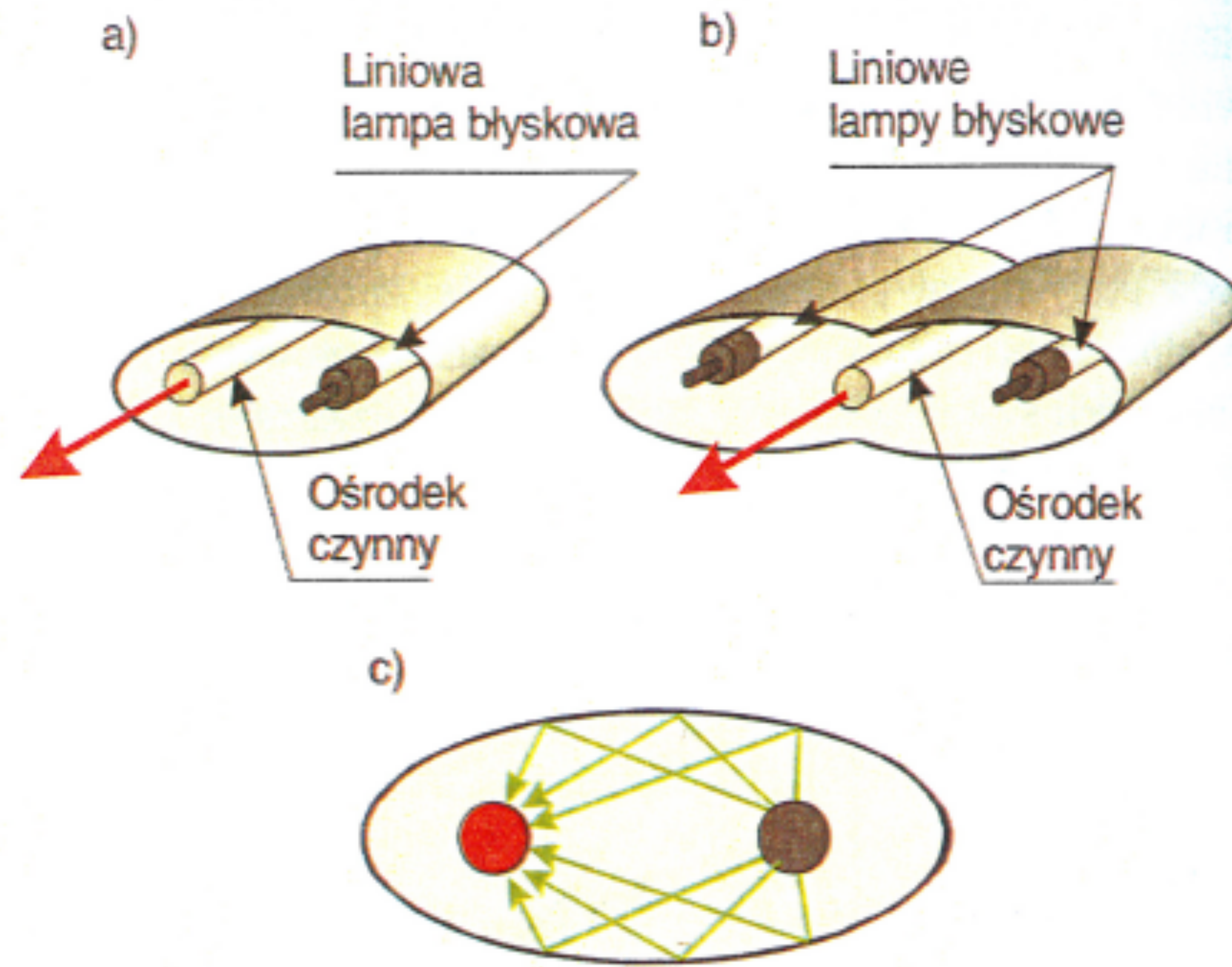
Schemat poziomów energetycznych Nd:YAG

Widmo absorpcji

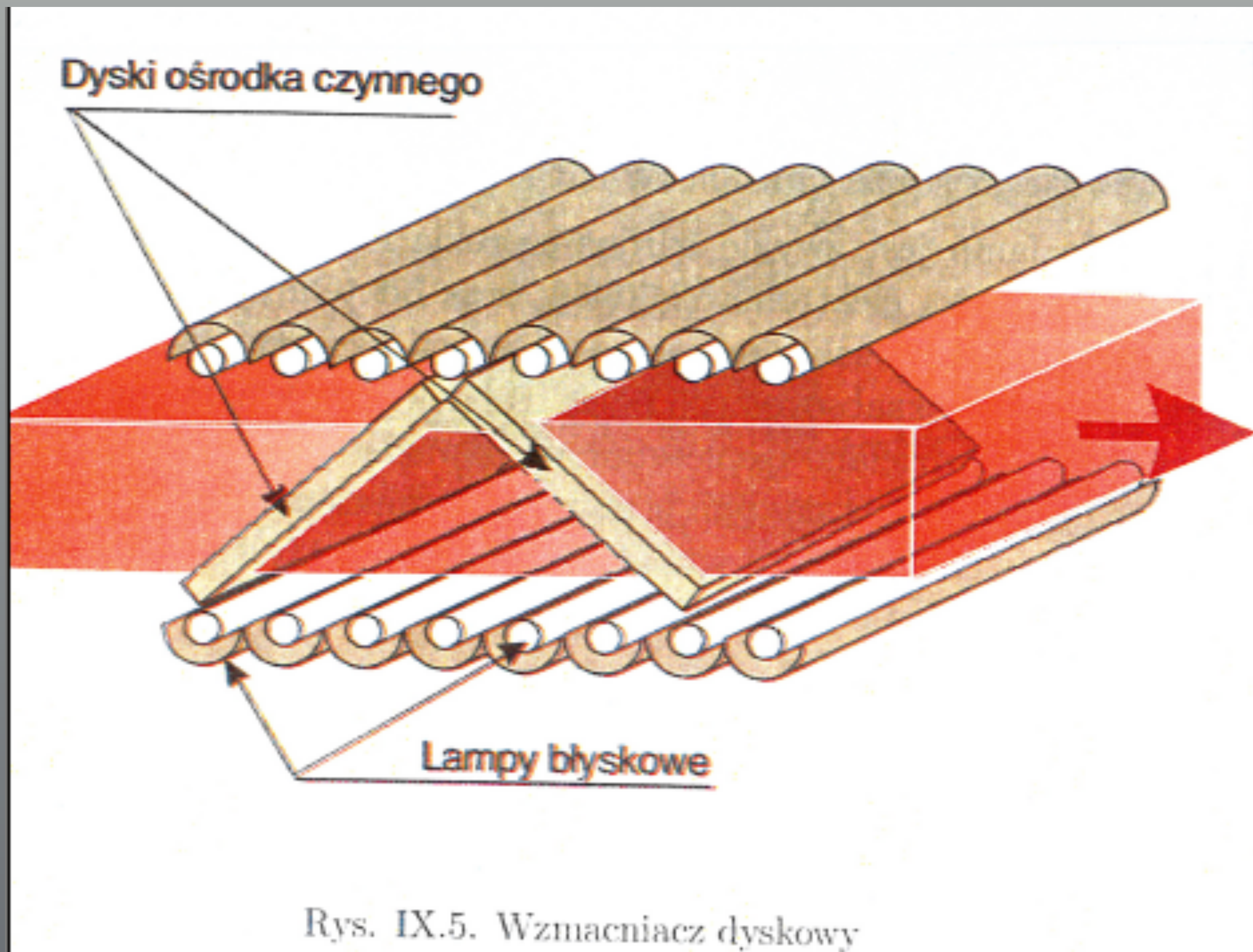




. IX.3. Widma lamp wypełnionych ksenonem o ciśnieniu 0.4 atm przy różnych gęstościach prądu. Widma można przybliżyć rozkładem promieniowania ciała doskonale czarnego w temperaturach 7000 i 9400 K (za [5])



rys. IX.4. Przykładowe schematy eliptycznych głowic laserowych z lampami liniowymi



Bezpieczeństwo pracy z laserami

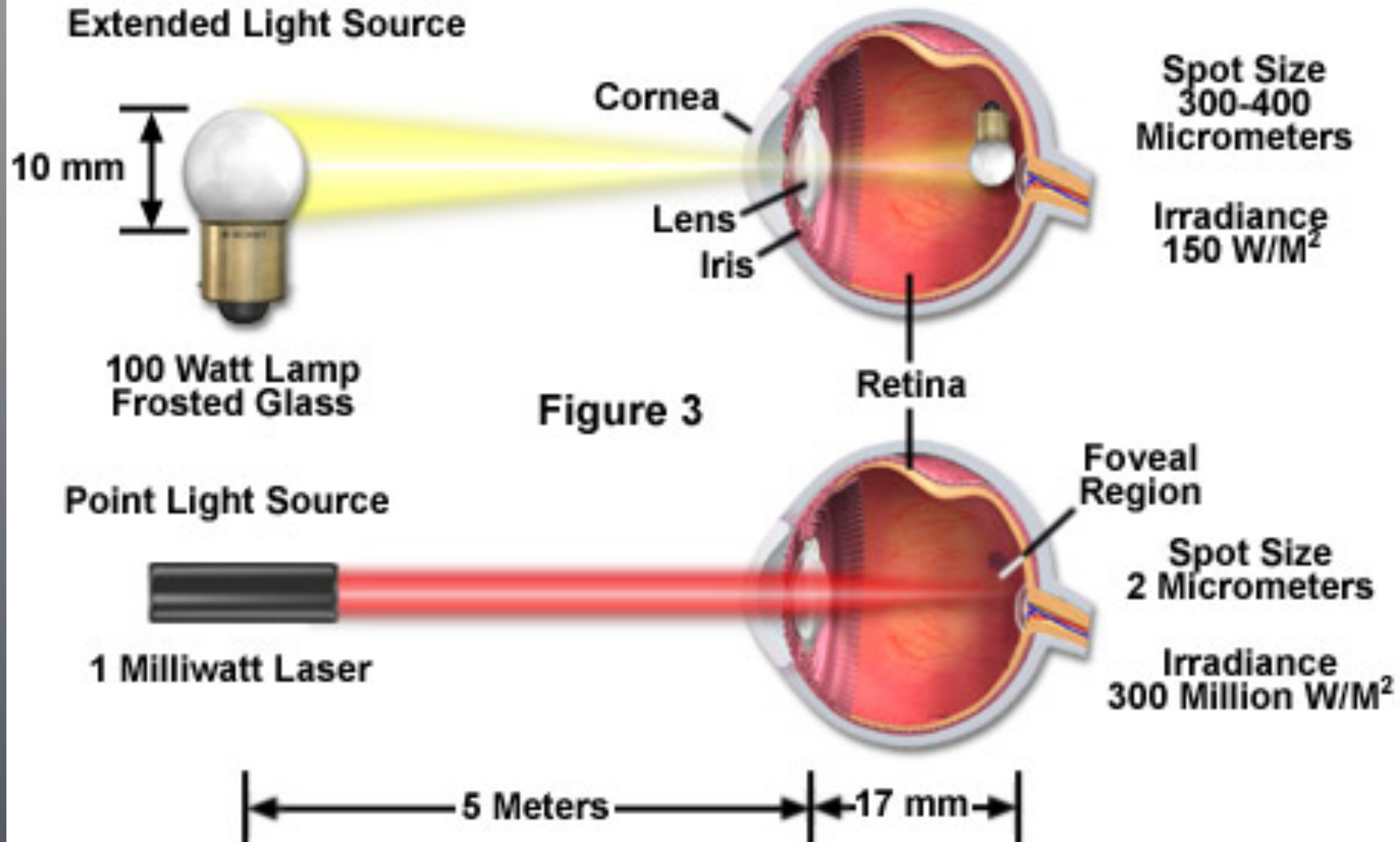
Laser Hazard Warning Signs

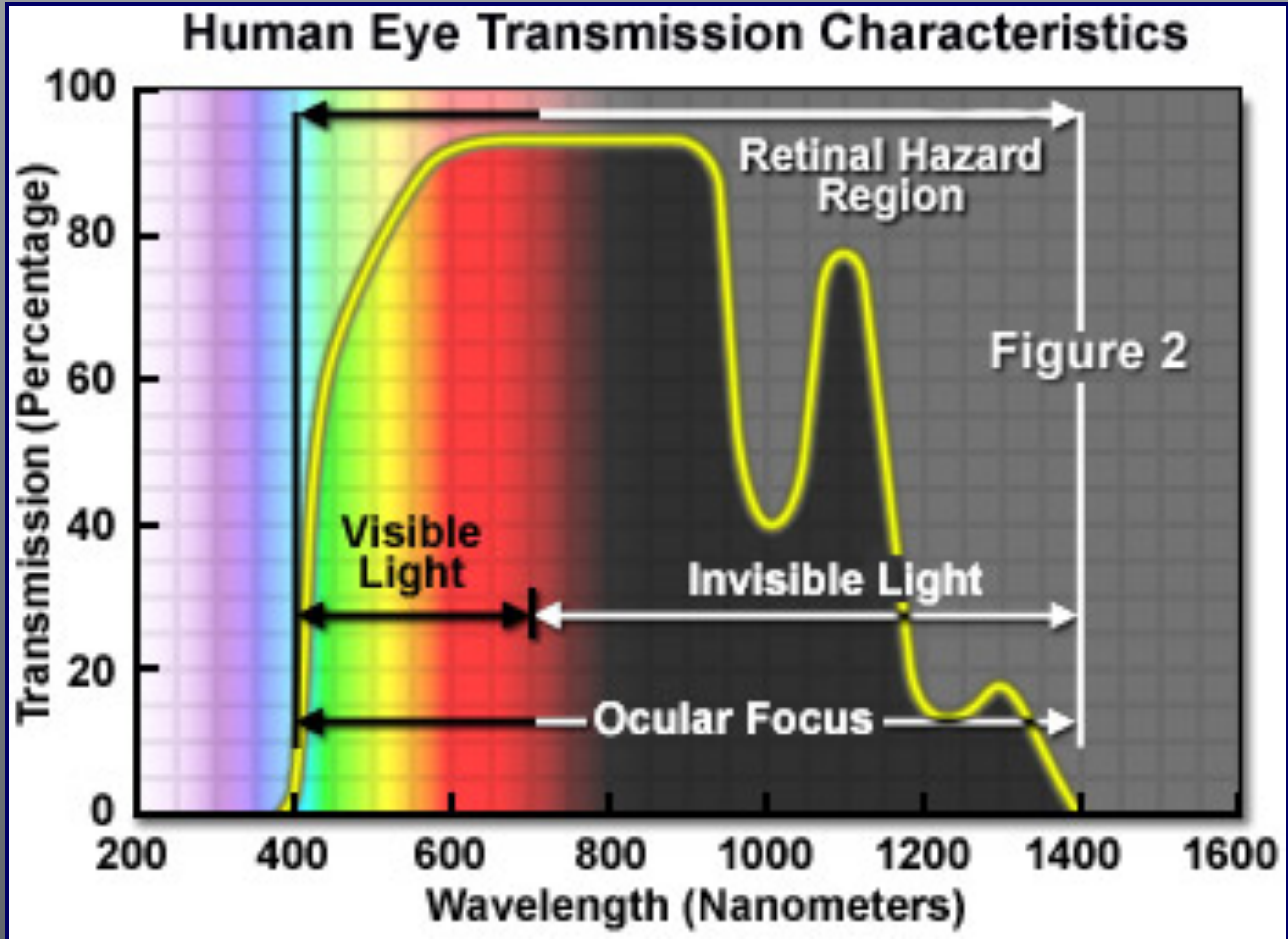
Figure 4



Bezpieczeństwo pracy z laserami

Extended and Point Source Power Density at the Retina





Photobiological Spectral Domain (CIE Band)	Eye Effects	Skin Effects
Ultraviolet C (200-280 nm)	Photokeratitis	Erythema (Sunburn) Skin Cancer
Ultraviolet B (280-315 nm)	Photokeratitis	Erythema (Sunburn) Accelerated Skin Aging Increased Pigmentation
Ultraviolet A (315-400 nm)	Photochemical UV Cataract	Pigment Darkening Skin Burn
Visible (400-780 nm)	Photochemical and Thermal Retinal Injury Color and Night Vision Degradation	Skin Burn Photosensitive Reactions
Infrared A (780-1400 nm)	Retinal Burns Cataract	Skin Burn
Infrared B (1400-3000 nm)	Corneal Burn Aqueous Flare IR Cataract	Skin Burn
Infrared C (3000-1 million nm)	Corneal Burn	Skin Burn

Normy Polskiego Komitetu Normalizacyjnego

Klasa 1 – promieniowanie laserowe całkowicie bezpieczne.

Klasa 1M – promieniowanie laserowe bezpieczne pod pewnymi warunkami. Kiedy operuje się optyką w ramach wiązki (warunki określają normy), należy stosować okulary ochronne. Należą tu lasery z obszaru 302,5 nm – 400 nm.

Klasa 2 – promieniowanie laserowe z obszaru widzialnego (400nm – 700nm), bezpieczne dla wzroku jeśli nie ma bezpośredniej ekspozycji na oko.

Klasa 2M – promieniowanie laserowe z obszaru widzialnego (400nm – 700nm), warunkowo bezpieczne. Zawiera w sobie lasery klasy 1M i 2.

Klasa 3R – promieniowanie laserowe **niebezpieczne** dla wzroku przy patrzeniu bezpośrednim w zakresie (302,5 nm – 10^6 nm). Normy bezpieczeństwa pięciokrotnie przekraczają normy dotyczące urządzeń klasy 2. Wymagane są okulary ochronne.

Normy Polskiego Komitetu Normalizacyjnego

Klasa 3B – promieniowanie laserowe **bezwzględnie niebezpieczne** dla wzroku przy patrzeniu bezpośrednim, chociaż promieniowanie rozproszone jest bezpieczne. Wymagane są okulary ochronne.

Klasa 4 – promieniowanie laserowe **bezwzględnie niebezpieczne** dla wzroku i dla skóry w każdych warunkach, również promieniowanie rozproszone.

Światło może wywołać pożar.

Wymagane są okulary ochronne i odzież ochronna.



Zastosowania promieniowania laserowego

o wąskiej linii spektralnej:

- ◆ optyka kwantowa i spektroskopia laserowa,
- ◆ fizyka bardzo zimnej materii, BEC,
- ◆ atomowa interferometria itd.
- ◆ standardy czasu i częstotliwości, optyczny grzebień,
- ◆ global positioning systems GPS,
- ◆ biofotonika,
- ◆ monitorowanie zanieczyszczenia atmosfery LIDAR,
- ◆ litografia optyczna,
- ◆ optyczny zapis informacji,
- ◆ kwantowe przetwarzanie informacji, komputery kwantowe

Krótką długość fali monochromatycznej

pozwała na wielokrotną gęstość zapisu informacji.

$$(\nu \cong 714 \text{ THz}, \quad \Delta\nu < 1 \text{ MHz})$$

$$(\nu \cong 714\,000\,000 \text{ MHz}, \quad \Delta\nu < 1 \text{ MHz}, \quad \Delta\nu/\nu \cong 10^{-9})$$

Przykłady zastosowania laserów

1. Telekomunikacja

Kable światłowodowe, przewodzące sygnały w formie impulsów świetlnych o różnej intensywności, przenoszące wielokrotnie więcej informacji, niż tradycyjne miedziane kable telefoniczne. W światłowodowych sieciach telekomunikacyjnych pojedyncze włókno może równocześnie przesyłać tysiące rozmów telefonicznych.

2. Medycyna

Lasery stosowane są między innymi w okulistyce, dermatologii, laryngologii i chirurgii. Zaletą lasera jest to, że cięcia laserowe nie powodują obfitych krwawień, energia promieniowania laserowego zgrzewa przecinane naczynia krwionośne.

3. Przemysł

Lasery stosowane są do precyzyjnego cięcia, do mikroobróbki, wiercenia niezwykle małych otworów i usuwania bardzo cienkich warstw materiału.

Lasery tną żelazo i stal, topiąc metal.

Energia lasera jest tak skoncentrowana, że stopiona zostaje jedynie bardzo cienka warstwa materiału. Energia lasera jest na tyle duża, że metal spoiny zostaje stopiony, a jej brzegi połączone.

4. Pomiary odległości

Dalmierze laserowe do bardzo dokładnych pomiarów odległości (od kilku metrów do 3 kilometrów).

Wiązka dalmierza laserowego jest kierowana na odbijający ją cel. Tam zostaje odbita z powrotem do urządzenia. które mierzy czas jaki upłynął od wysłania impulsu świetlnego do jego odbioru i na tej podstawie oblicza odległość do celu.

5. Pomiar zanieczyszczeń atmosfery – LIDAR.

6. Zapis i odczyt informacji na płytach CD, DVD, itp.

7. Sensory laserowe

Dziękuję za uwagę!

W wykładzie wykorzystano materiały z podręcznika:

„Podstawy fizyki”- D.Halliday, R.Resnick, J.Walker, PWN Warszawa 2006,

i ze stron internetowych: www.toptica.com , nobelprize.org ..

<http://pl.wikipedia.org/wiki>, www.fotonika.pl

oraz z książki B.Ziętek „Optoelektronika”, Wydawnictwo UMK, Toruń 2005