

SUMBER OPTIK

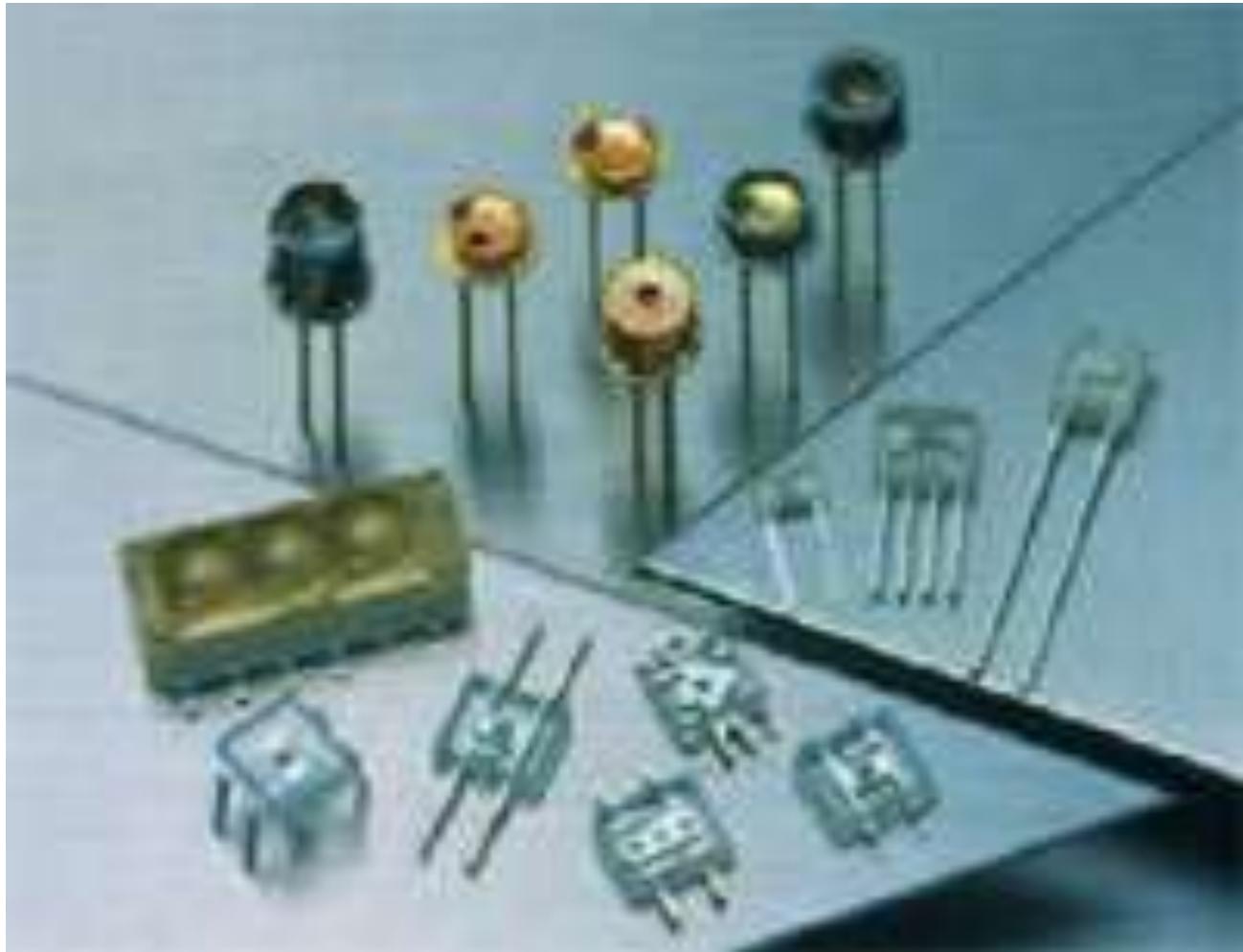
Ref : Keiser

Sumber semikonduktor

- **Sifat diharapkan :**
 - Small size
 - 850, 1300, or 1550 nm
 - Daya
 - Linieritas
 - Modulasi sederhana
 - Respon frekuensi Modulasi
 - Biaya murah
 - Reliabilitas tinggi
- **Panjang gel sumber :**
 - *Sumber panjang pendek :*
 - » 500→1,000 nm
 - » Binary alloy (e.g., GaP: 600-700 nm)
 - » Ternary alloy (e.g., GaAlAs: 800- 900 nm)
 - *Sumber panjang gel panjang :*
 - » 1200→1600 nm
 - » Quaternary alloy (e.g., InGaAsP: 1300-1600 nm)

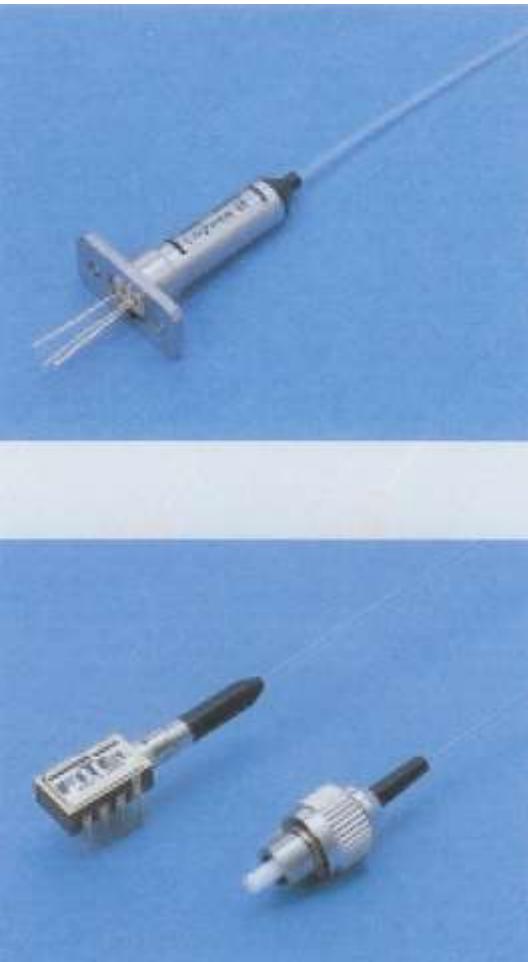
Sumber Optik

- **Sumber**
 - LED
 - Semiconductor laser
- **LED**
 - Biaya murah
 - Daya menengah
 - Hub jarak pendek, lintasan laju bit rendah
- **Laser**
 - Biaya mahal
 - Daya cukup
 - Hub jarak jauh, lintasan laju bit tinggi



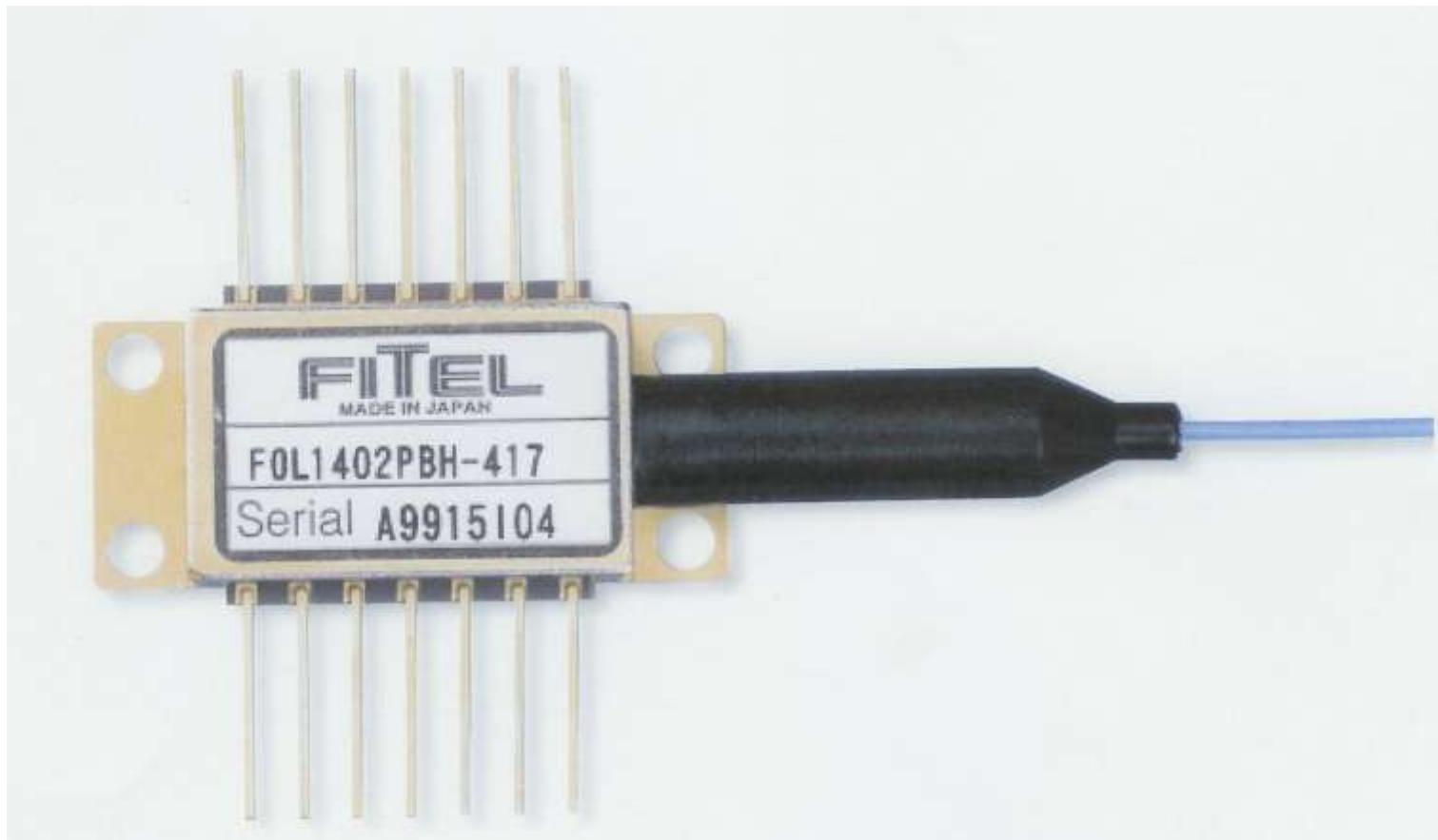
LED

Fakultas Teknik



Uncooled laser

Fakultas Teknik



Cooled laser

SEMIKONDUKTOR

Bahan semikonduktor memiliki sifat konduksi terletak diantara logam dan isolator.

Silikon (Si) terletak di grup IV (memiliki 4 elektron di shell terluar) dr tabel periodik elemen.

Sifat konduksi dpt diinterpretasikan dng bantuan diagram pita energi.

Kristal murni pd suhu rendah pita konduksi tidak ada elektron sama sekali dan pita valensi sangat penuh.

Kedua pita tsb dipisahkan oleh celah energi atau celah pita yg tidak terdapat level energi.

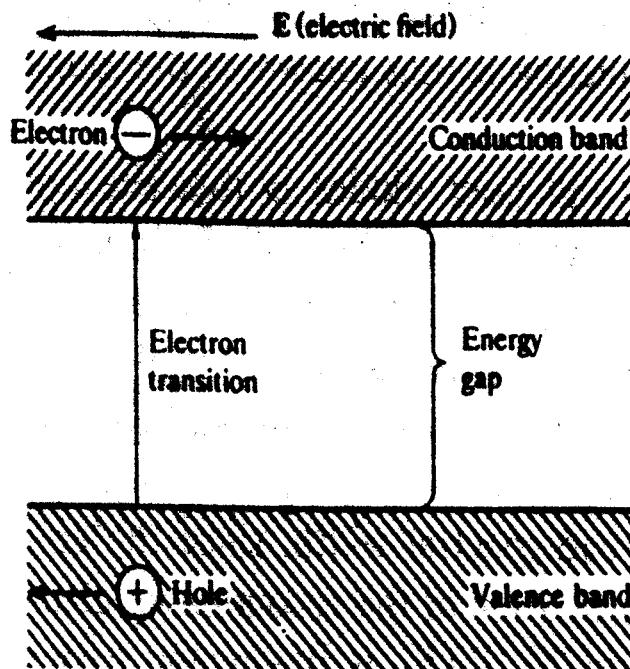
Jika suhu naik, beberapa elektron menyeberang celah energi menuju ke pita konduksi.

SUSUNAN BERKALA

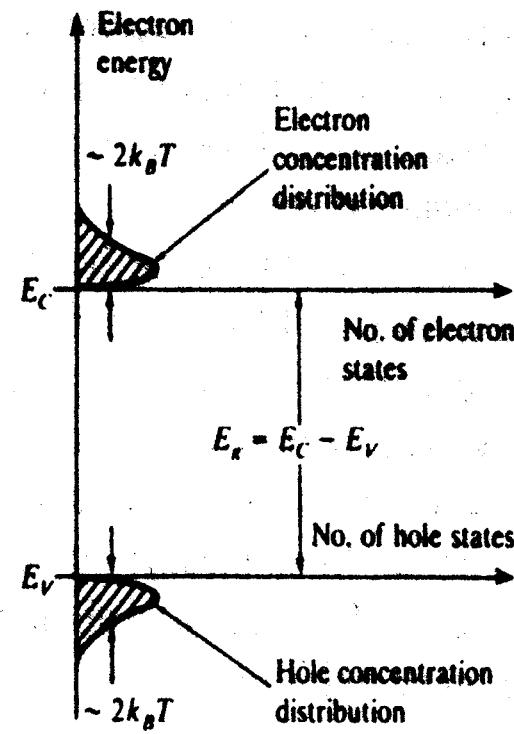
UNSUR-UNSUR KIMIA

GOLONGAN

1	1.0079	H	IIA
2	-26.7 -25.2 -27.1	C	
3	6.928	Li	2.212
4	1.181	Be	2
5	13.98	Na	22.99
6	10.85	Mg	24.312
7	9.03		
8	1.0079		
9	1.0079		
10	1.0079		
11	1.0079		
12	1.0079		
13	1.0079		
14	1.0079		
15	1.0079		
16	1.0079		
17	1.0079		
18	1.0079		
19	1.0079		
20	1.0079		
21	1.0079		
22	1.0079		
23	1.0079		
24	1.0079		
25	1.0079		
26	1.0079		
27	1.0079		
28	1.0079		
29	1.0079		
30	1.0079		
31	1.0079		
32	1.0079		
33	1.0079		
34	1.0079		
35	1.0079		
36	1.0079		
37	1.0079		
38	1.0079		
39	1.0079		
40	1.0079		
41	1.0079		
42	1.0079		
43	1.0079		
44	1.0079		
45	1.0079		
46	1.0079		
47	1.0079		
48	1.0079		
49	1.0079		
50	1.0079		
51	1.0079		
52	1.0079		
53	1.0079		
54	1.0079		
55	1.0079		
56	1.0079		
57	1.0079		
58	1.0079		
59	1.0079		
60	1.0079		
61	1.0079		
62	1.0079		
63	1.0079		
64	1.0079		
65	1.0079		
66	1.0079		
67	1.0079		
68	1.0079		
69	1.0079		
70	1.0079		
71	1.0079		
72	1.0079		
73	1.0079		
74	1.0079		
75	1.0079		
76	1.0079		
77	1.0079		
78	1.0079		
79	1.0079		
80	1.0079		
81	1.0079		
82	1.0079		
83	1.0079		
84	1.0079		
85	1.0079		
86	1.0079		
87	1.0079		
88	1.0079		
89	1.0079		
90	1.0079		
91	1.0079		
92	1.0079		
93	1.0079		
94	1.0079		
95	1.0079		
96	1.0079		
97	1.0079		
98	1.0079		
99	1.0079		
100	1.0079		
101	1.0079		
102	1.0079		
103	1.0079		
104	1.0079		
105	1.0079		
106	1.0079		
107	1.0079		
108	1.0079		
109	1.0079		
110	1.0079		
111	1.0079		
112	1.0079		
113	1.0079		
114	1.0079		
115	1.0079		
116	1.0079		
117	1.0079		
118	1.0079		
119	1.0079		
120	1.0079		
121	1.0079		
122	1.0079		
123	1.0079		
124	1.0079		
125	1.0079		
126	1.0079		
127	1.0079		
128	1.0079		
129	1.0079		
130	1.0079		
131	1.0079		
132	1.0079		
133	1.0079		
134	1.0079		
135	1.0079		
136	1.0079		
137	1.0079		
138	1.0079		
139	1.0079		
140	1.0079		
141	1.0079		
142	1.0079		
143	1.0079		
144	1.0079		
145	1.0079		
146	1.0079		
147	1.0079		
148	1.0079		
149	1.0079		
150	1.0079		
151	1.0079		
152	1.0079		
153	1.0079		
154	1.0079		
155	1.0079		
156	1.0079		
157	1.0079		
158	1.0079		
159	1.0079		
160	1.0079		
161	1.0079		
162	1.0079		
163	1.0079		
164	1.0079		
165	1.0079		
166	1.0079		
167	1.0079		
168	1.0079		
169	1.0079		
170	1.0079		
171	1.0079		
172	1.0079		
173	1.0079		
174	1.0079		
175	1.0079		
176	1.0079		
177	1.0079		
178	1.0079		
179	1.0079		
180	1.0079		
181	1.0079		
182	1.0079		
183	1.0079		
184	1.0079		
185	1.0079		
186	1.0079		
187	1.0079		
188	1.0079		
189	1.0079		
190	1.0079		
191	1.0079		
192	1.0079		
193	1.0079		
194	1.0079		
195	1.0079		
196	1.0079		
197	1.0079		
198	1.0079		
199	1.0079		
200	1.0079		
201	1.0079		
202	1.0079		
203	1.0079		
204	1.0079		
205	1.0079		
206	1.0079		
207	1.0079		
208	1.0079		
209	1.0079		
210	1.0079		
211	1.0079		
212	1.0079		
213	1.0079		
214	1.0079		
215	1.0079		
216	1.0079		
217	1.0079		
218	1.0079		
219	1.0079		
220	1.0079		
221	1.0079		
222	1.0079		
223	1.0079		
224	1.0079		
225	1.0079		
226	1.0079		
227	1.0079		
228	1.0079		
229	1.0079		
230	1.0079		
231	1.0079		
232	1.0079		
233	1.0079		
234	1.0079		
235	1.0079		
236	1.0079		
237	1.0079		
238	1.0079		
239	1.0079		
240	1.0079		
241	1.0079		
242	1.0079		
243	1.0079		
244	1.0079		
245	1.0079		
246	1.0079		
247	1.0079		
248	1.0079		
249	1.0079		
250	1.0079		
251	1.0079		
252	1.0079		
253	1.0079		
254	1.0079		
255	1.0079		
256	1.0079		
257	1.0079		
258	1.0079		
259	1.0079		
260	1.0079		
261	1.0079		
262	1.0079		
263	1.0079		
264	1.0079		
265	1.0079		
266	1.0079		
267	1.0079		
268	1.0079		
269	1.0079		
270	1.0079		
271	1.0079		
272	1.0079		
273	1.0079		
274	1.0079		
275	1.0079		
276	1.0079		
277	1.0079		
278	1.0079		
279	1.0079		
280	1.0079		
281	1.0079		
282	1.0079		
283	1.0079		
284	1.0079		
285	1.0079		
286	1.0079		
287	1.0079		
288	1.0079		
289	1.0079		
290	1.0079		
291	1.0079		
292	1.0079		
293	1.0079		
294	1.0079		
295	1.0079		
296	1.0079		
297	1.0079		
298	1.0079		
299	1.0079		
300	1.0079		
301	1.0079		
302	1.0079		
303	1.0079		
304	1.0079		
305	1.0079		
306	1.0079		
307	1.0079		
308	1.0079		
309	1.0079		
310	1.0079		
311	1.0079		
312	1.0079		
313	1.0079		
314	1.0079		
315	1.0079		
316	1.0079		
317	1.0079		
318	1.0079		
319	1.0079		
320	1.0079		
321	1.0079		
322	1.0079		
323	1.0079		
324	1.0079		
325	1.0079		
326	1.0079		
327	1.0079		
328	1.0079		
329	1.0079		
330	1.0079		
331	1.0079		
332	1.0079		
333	1.0079		
334	1.0079		
335	1.0079		
336	1.0079		
337	1.0079		
338	1.0079		
339	1.0079		
340	1.0079		
341	1.0079		
342	1.0079		
343	1.0079		
344	1.0079		
345	1.0079		
346	1.0079		
347	1.0079		
348	1.0079		
349	1.0079		
350	1.0079		
351	1.0079		
352	1.0079		
353	1.0079		
354	1.0079		
355	1.0079		
356	1.0079		
357	1.0079		
358	1.0079		
359	1.0079		
360	1.0079		
361	1.0079		
362	1.0079		
363	1.0079		
364	1.0079		
365	1.0079		
366	1.0079		
367	1.0079		
368	1.0079		
369	1.0079		
370	1.0079		
371	1.0079		
372	1.0079		
373	1.0079		
374	1.0079		
375	1.0079		
376	1.0079		
377	1.0079		
378	1.0079		
379	1.0079		
380	1.0079		
381	1.0079		
382	1.0079		
383	1.0079		
384	1.0079		
385	1.0079		
386			



(a)



(b)

(a) Eksitasi elektron dr pita valensi ke pita konduksi

(b) Konsentrasi elektron dan hole sama pd semikonduktor intrinsic.

Konsentrasi elektron dan hole dikenal sbg konsentrasi pembawa intrinsik :

$$n = p = n_i = K e^{\left(-\frac{E_g}{2k_B T} \right)}$$

Dimana :

$$K = 2 \left(\frac{2\pi k_B T}{h^2} \right)^{3/2} (m_e m_h)^{3/4}$$

T : suhu mutlak

k_B : konstanta Boltzman = 1.38×10^{-23} J/ $^\circ$ K

m : massa diam elektron = 9.11×10^{-31} Kg

h : Konstanta Planck = 6.626×10^{-34} JS

m_e : massa efektif elektron

m_h : massa efektif hole

Konduksi dpt ditingkatkan dgn doping yg penambahan campuran bahan dr grup V, spt P, As, Sb.

Jika atom bahan tsb menggantikan sebuah atom Si, 4 elektron digunakan utk covalent bonding dan yg ke-5 elektron bebas digunakan utk konduksi.

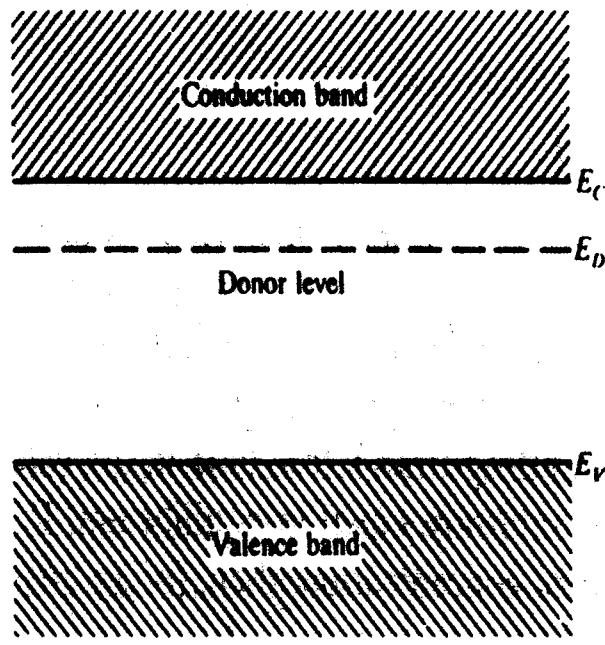
Campuran disebut donor krn dpt memberikan sebuah elektron pd pita konduksi.

Pd bahan tsb arus ditimbulkan oleh elektron (negatif) → bahan n-type.

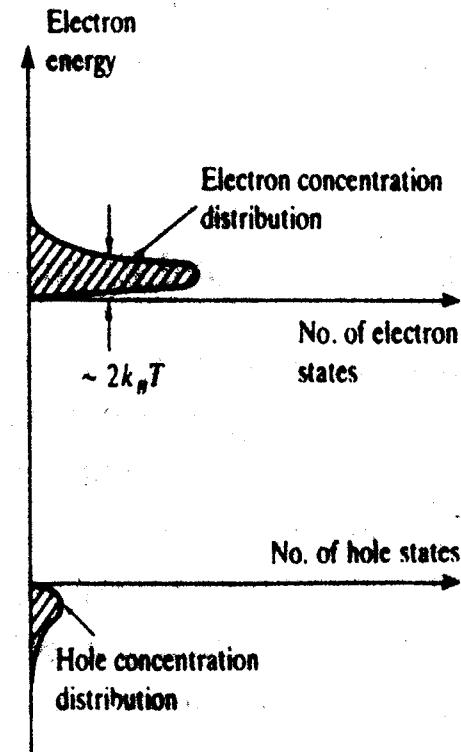
Konduksi juga dpt ditingkatkan dgn penambahan bahan dr grup III, yg memiliki 3 elektron di shell terluar.

3 elektron membentuk covalent bond, shg terbentuk sebuah hole yg bersifat sama dgn elektron donor → konsentrasi hole bebas meningkat di pita valensi.

Bahan tsb disebut akseptor dan bahan p-type krn konduksi dilakukan oleh hole (positif).



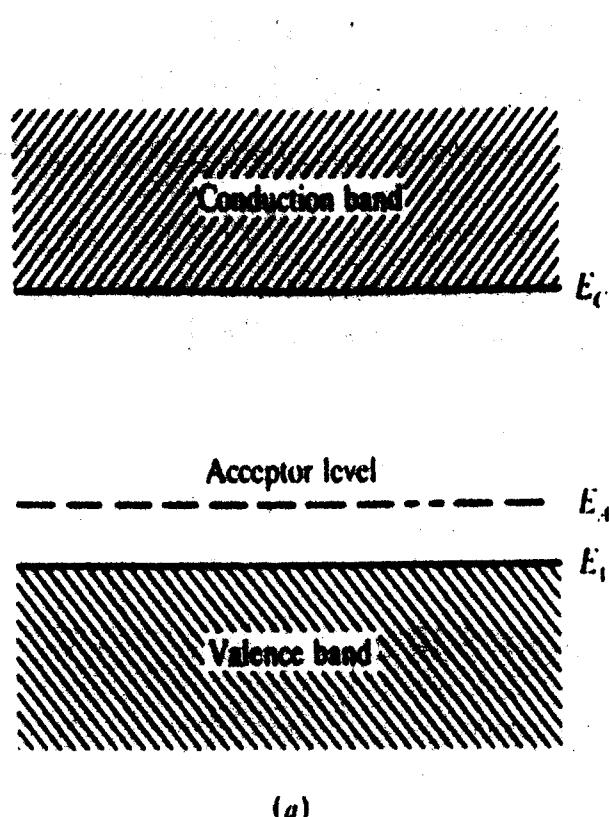
(a)



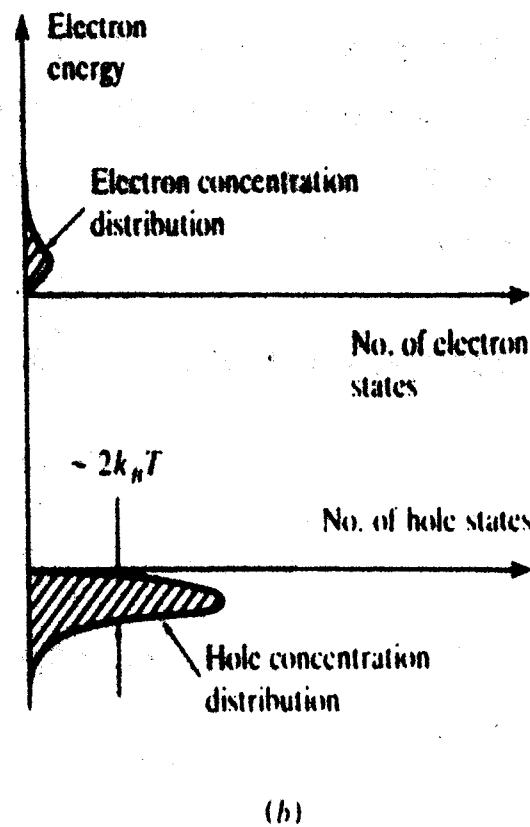
(b)

(a) Donor level bahan tipe n

(b) Ionisasi campuran donor menghasilkan peningkatan distribusi konsentrasi elektron



(a)



(b)

(a) Level akseptor pd bahan tipe-p

(b) Ionisasi campuran akseptor meningkatkan distribusi konsentrasi hole

Bahan intrinsik dan ekstrinsik

Bahan tidak ada campurannya disebut bahan intrinsik.

Vibrasi thermal atom kristal → elektron keluar ke pita konduksi

Proses pembangkitan thermal → pasangan elektron-hole

Proses rekombinasi → elektron bebas melepaskan energi turun ke hole bebas di pita valensi.

Kondisi seimbang :

$$\text{Laju pembangkitan} = \text{laju rekombinasi}$$

Bahan intrinsik : $p_n = p_0 n_0 = n_i^2$

p_0 : konsentrasi hole seimbang

n_0 : konsentrasi elektron seimbang

n_i : kepadatan pembawa bahan intrinsik

Bahan intrinsik dan ekstrinsik

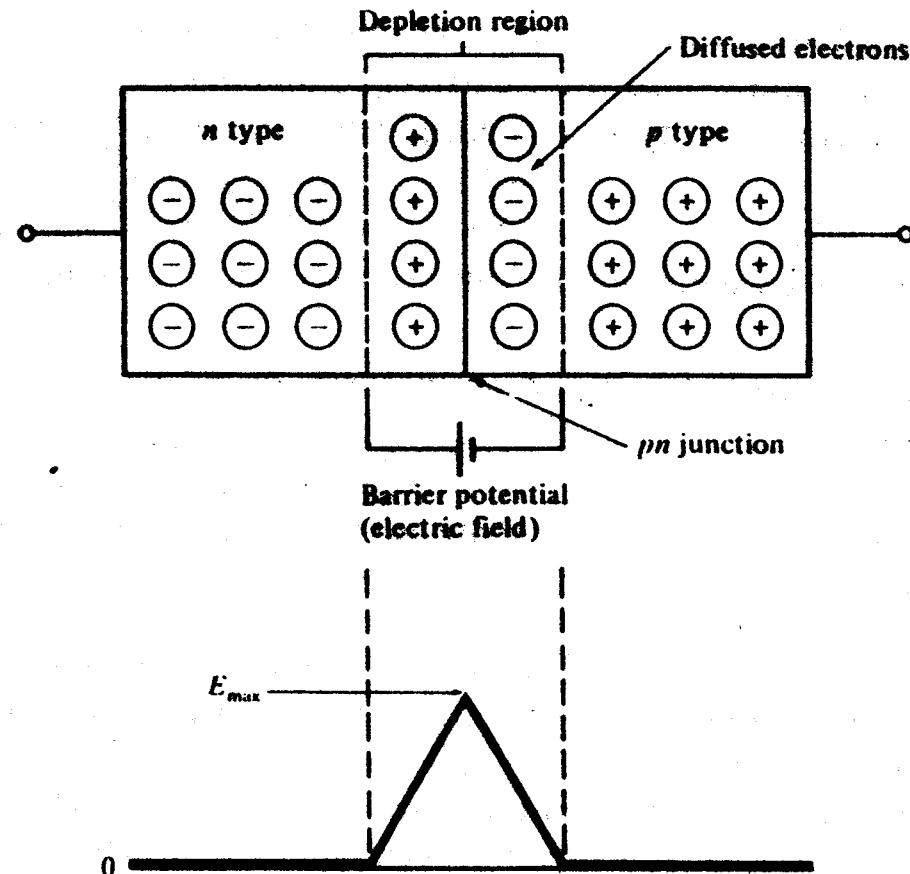
Pemberian sedikit campuran kimia pd kristal menghasilkan semikonduktor ekstrinsik.

Konduktifitas elektris sebanding dgn konsentrasi pembawa → ada 2 jenis bahan pembawa muatan :

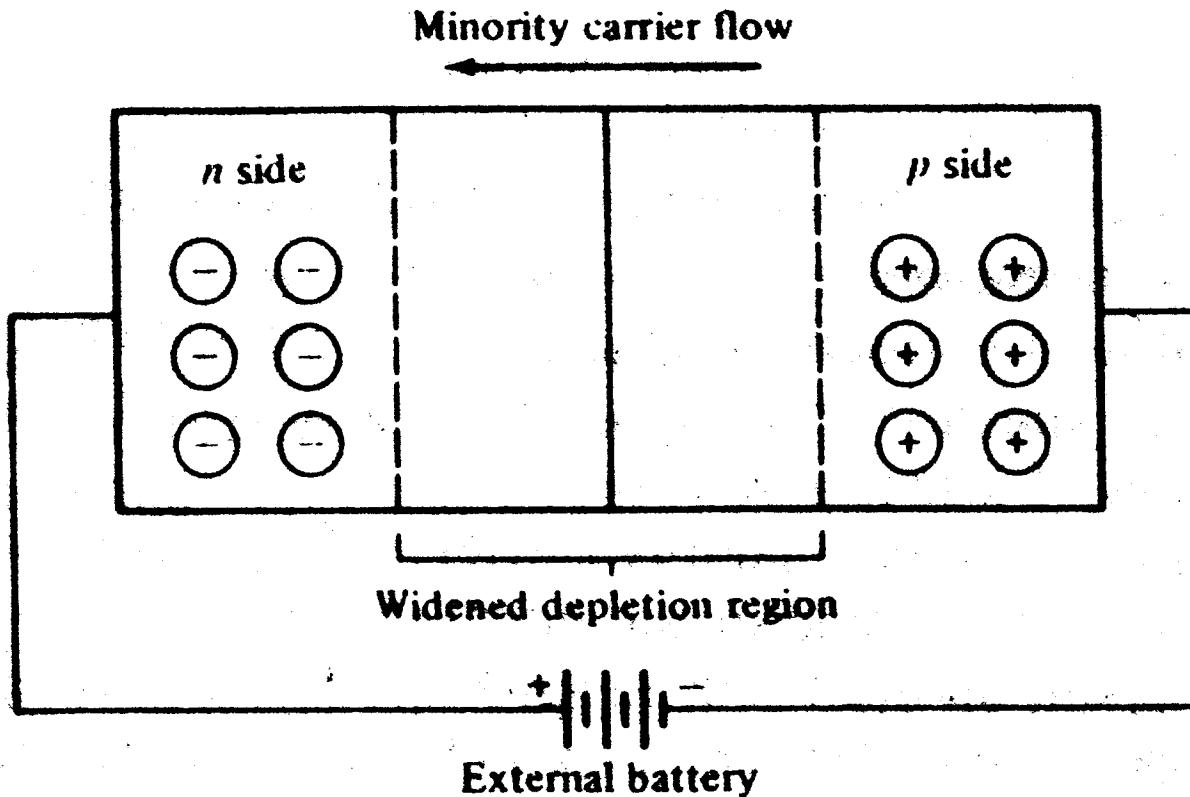
- (a) Pembawa mayoritas : elektron pd bahan tipe-n atau hole pd bahan tipe-p.**
- (b) Pembawa minoritas : hole pd bahan tipe-n atau elektron pd bahan tipe-p.**

Operasi perangkat semikonduktor secara esensial didasarkan pd injeksi dan ekstraksi pembawa minoritas.

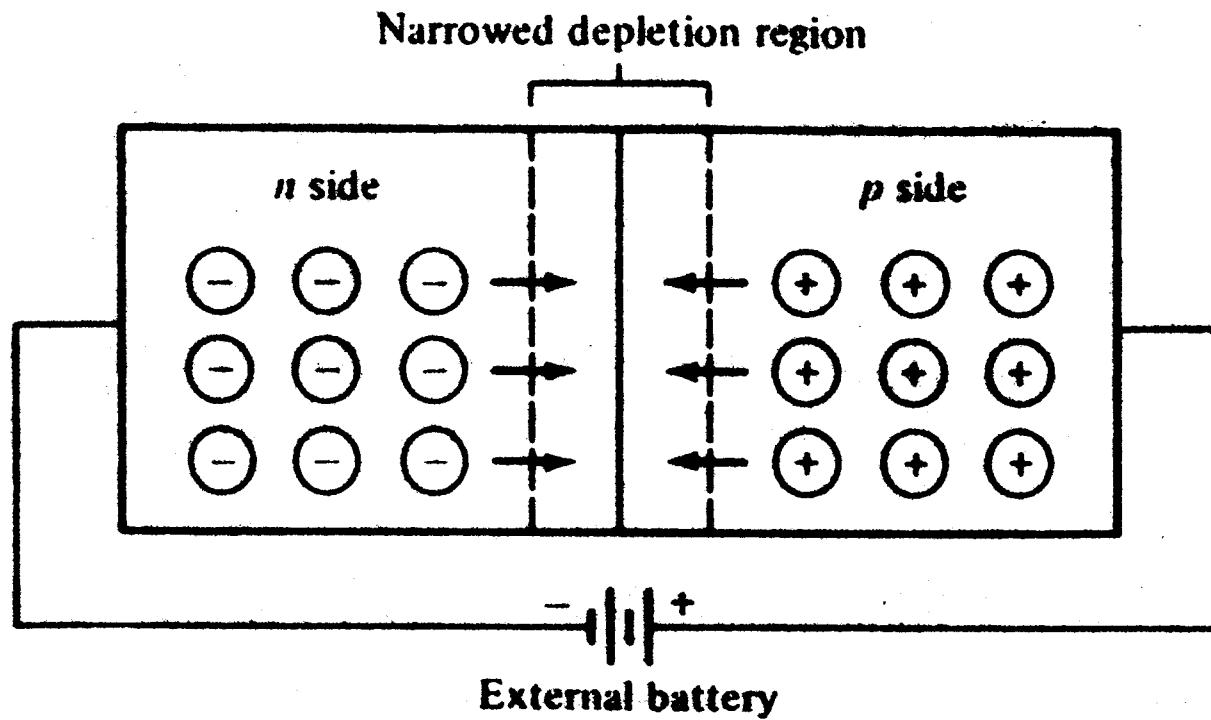
pn junction



Difusi elektron melintasi pn junction menghasilkan potensial barrier di daerah deplesi

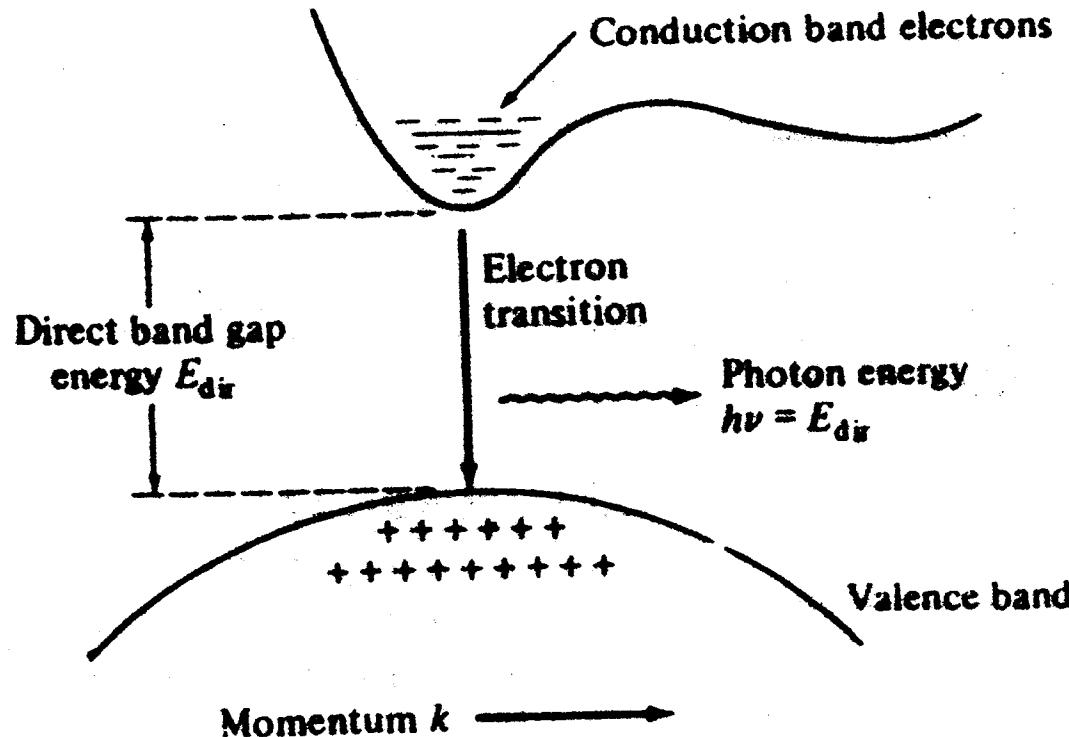


Bias mundur melebarkan daerah deplesi, tetapi memungkinkan pembawa minoritas bergerak bebas.

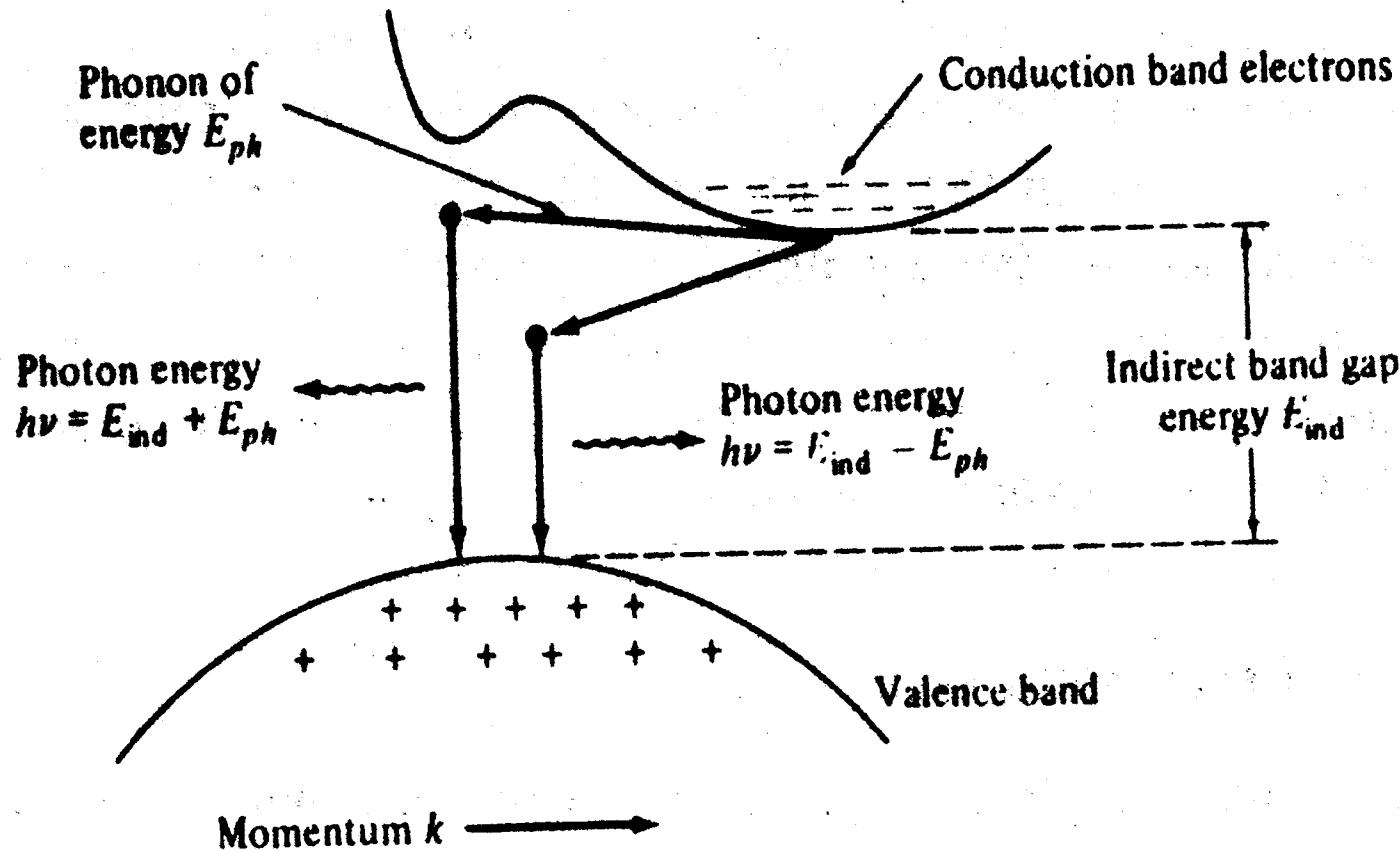


Bias maju mengecilkan potensial barrier memungkinkan pembawa mayoritas berdifusi melintasi junction

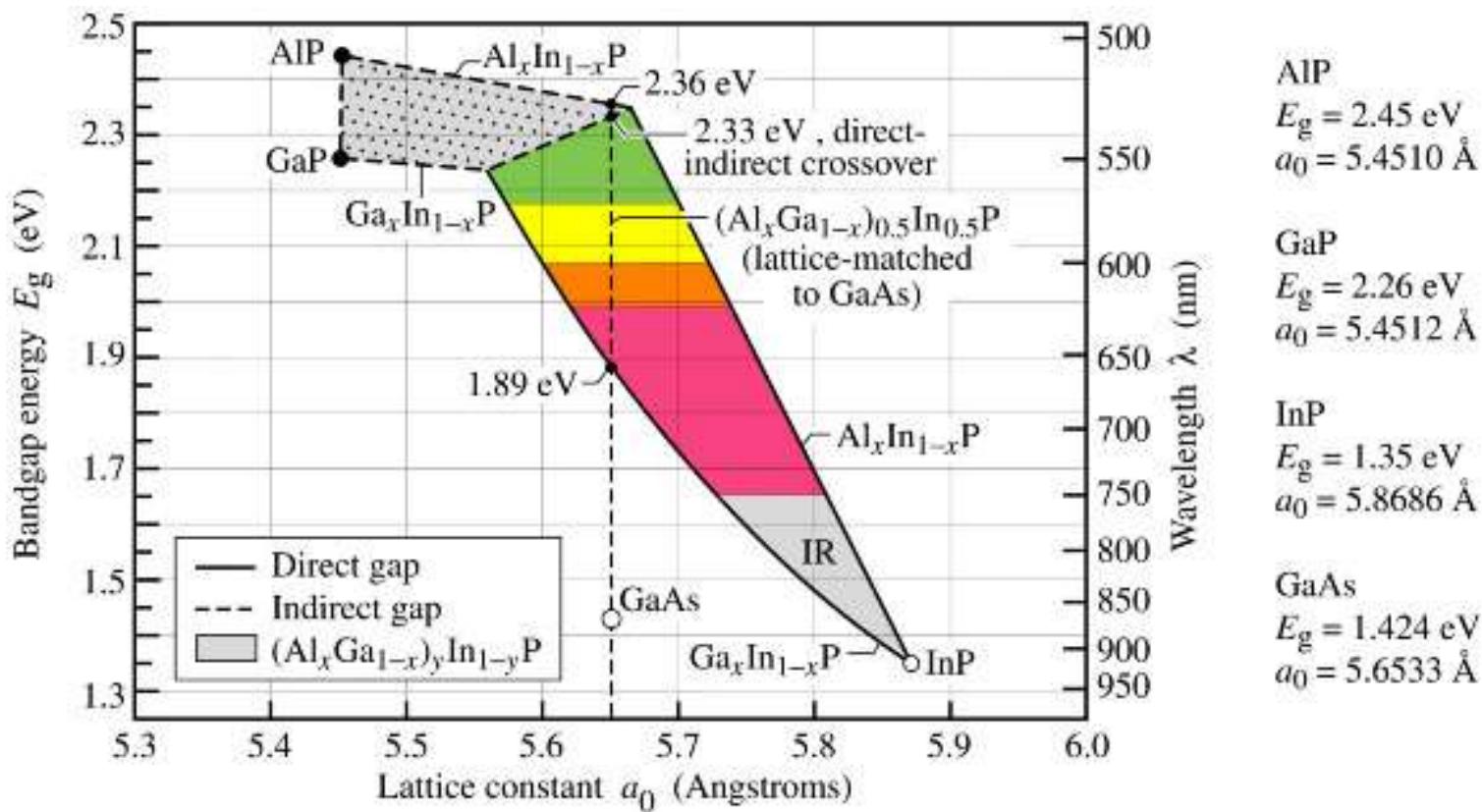
Direct dan indirect band gap



Rekombinasi elektron dan emisi photon yg berkaitan pd suatu bahan direct-band-gap (elektron dan hole memiliki nilai momentum sama)



Rekombinasi elektron pd suatu bahan indirect-band-gap
(elektron dan hole memiliki nilai momentum berbeda)
membutuhkan energi E_{ph} dan momentum k_{ph}



Bandgap energy and corresponding wavelength versus lattice constant of $(Al_xGa_{1-x})_yIn_{1-y}P$ at 300K. The dashed vertical line shows $(Al_xGa_{1-x})_0.5In_{0.5}P$ lattice matched to GaAs (adopted from Chen *et al.* 1997).

LED

Pembangkitan Cahaya

- Forward-bias *pn* junction
 - Doping lebih banyak drpd dioda elektronik
 - Tambahan fitur utk menahan pembawa muatan dan medan cahaya
- Pembangkitan cahaya
 - Rekombinasi radiatif elektron dan hole
 - Rekombinasi radiatif dan nonradiatif
 - » Efisiensi meningkat dgn membanjiri wilayah pembangkitan cahaya dgn ...
 - Pembawa muatan kerapatan tinggi dan...
 - Cahaya berdaya tinggi

Pembangkitan Cahaya

- Forward-biased *pn* junction
 - Hole diinjeksi ke material n
 - Elektron ke material p
- Carrier rekombinasi dng mayoritas
 - carrier dekat junction
- Energi dilepas≈ material bandgap
- energi E_g
 - jika radiatif, $f \approx E_g / h$
- Transisi Radiatif
 - Emisi Spontan :
 - » Tdk koheren
 - » Polarisasi Random
 - » Arah Random
 - » Menambah noise pd sinyal
 - Emisi terstimulasi :
 - » Koheren (sama phasa, polarisasi, frekuensi dan arah)
- Silikon dan germanium radiator tidak efisien
 - Digunakan campuran semikonduktor

Double hetero structure GaAlAs

$x > y \rightarrow$ batasi
pembawa &
pandu optis

(a)

Metal contact	n -type GaAs substrate	n -type $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$	n -type $\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{As}$	p -type $\text{Ga}_{1-z}\text{Al}_z\text{As}$	p -type GaAs	Metal contact
		Light guiding and carrier confinement $\sim 1 \mu\text{m}$	Recombination region	Light guiding and carrier confinement $\sim 0.3 \mu\text{m}$	$\sim 1 \mu\text{m}$	Metal contact improvement layer $\sim 1 \mu\text{m}$

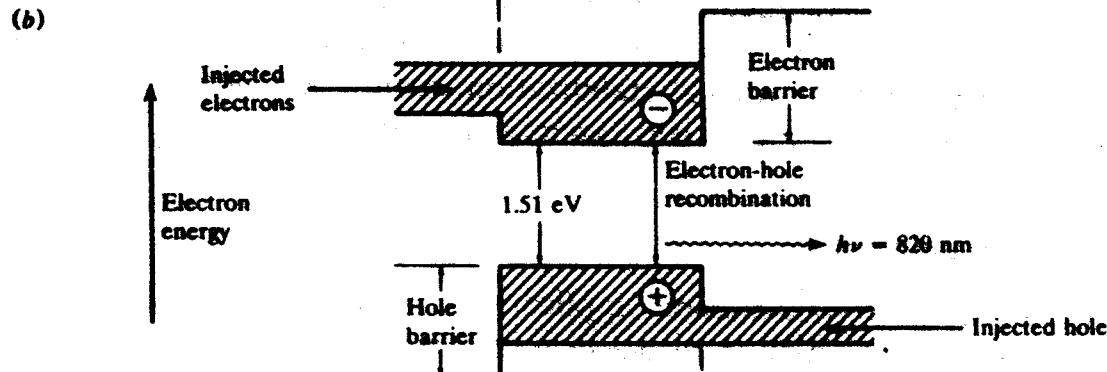
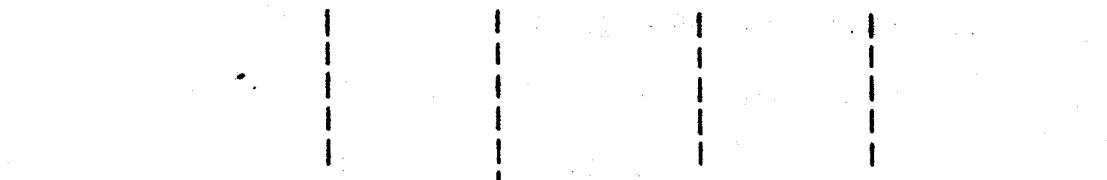
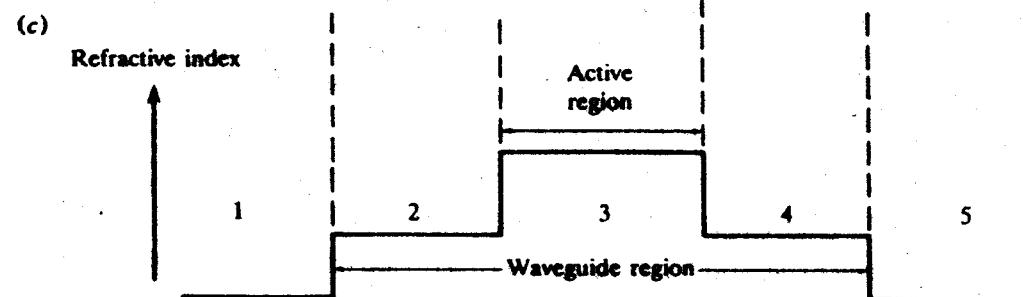


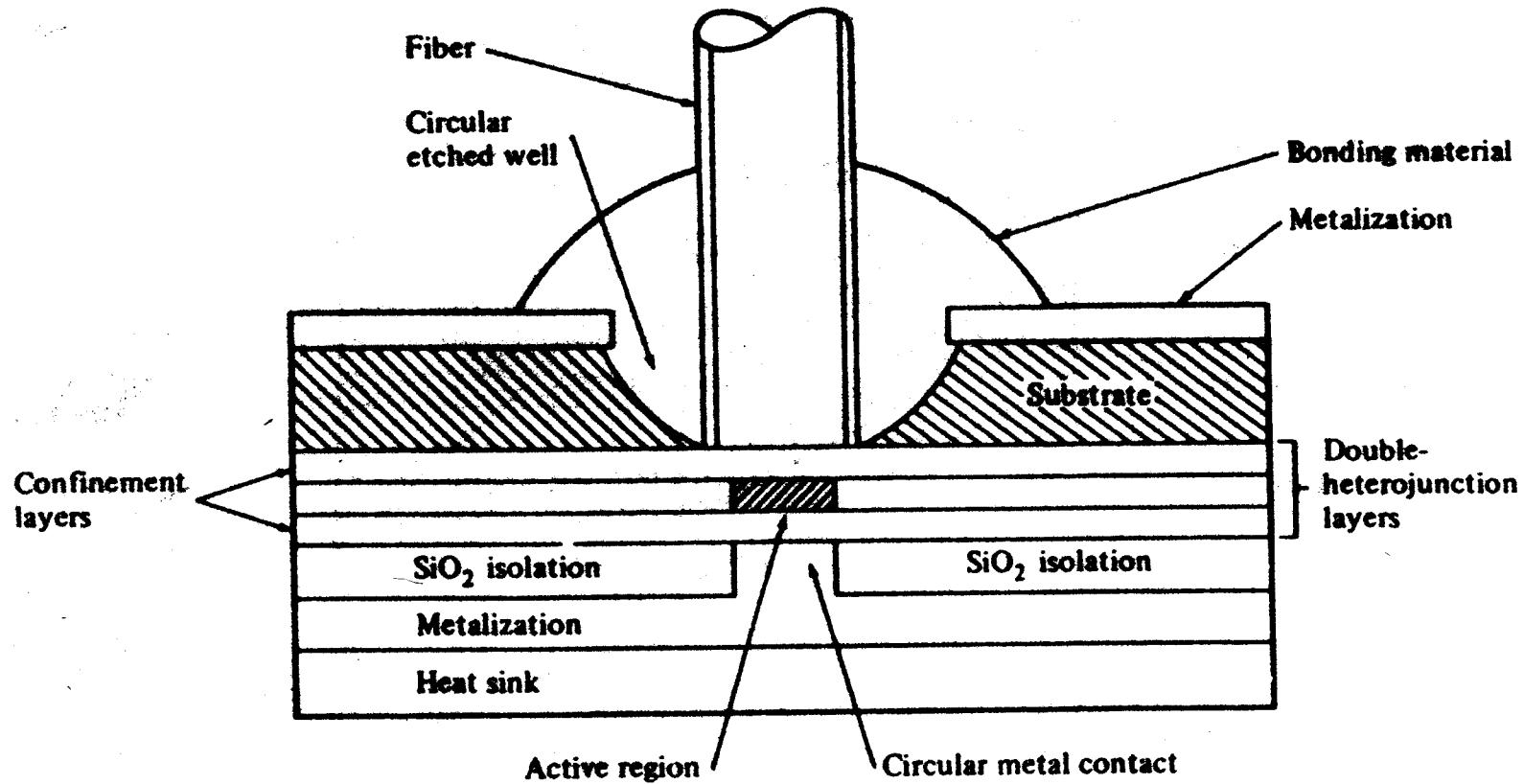
Diagram pita energi



Variasi indeks bias

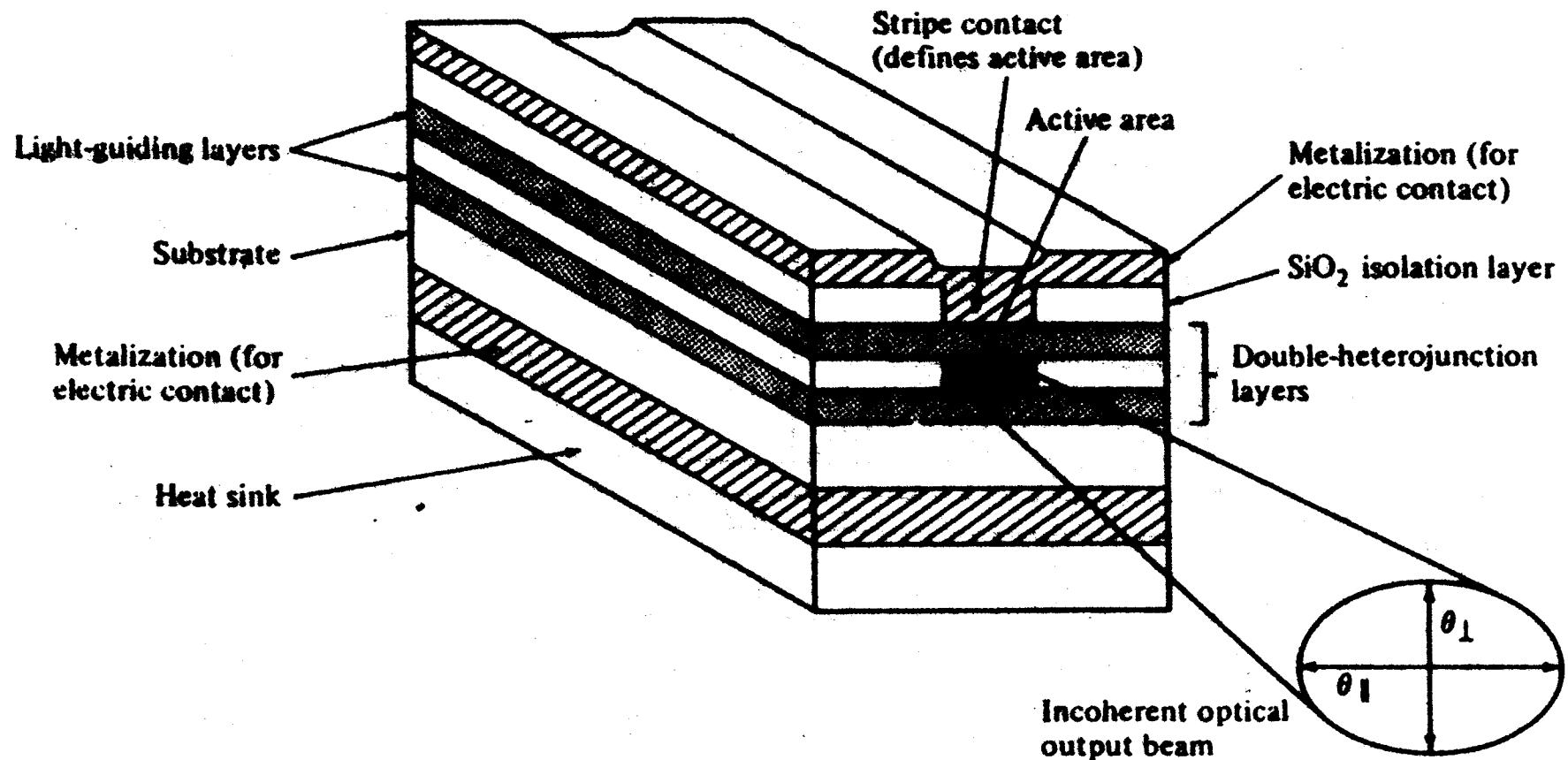
Konfigurasi

- **2 konfigurasi dasar :**
 - Emisi permukaan/depan atau Burrus
 - Emisi ujung
- **Emisi permukaan :**
 - bidang daerah aktif pengemisi cahaya diorientasikan tegak lurus sumbu fiber.
 - Suatu sumur di-etsa/etched pd bahan substrat device, dimana fiber ditanam utk menerima cahaya.
 - Daerah lingkaran aktif berdiameter 50 μm dan tebal s/d 2,5 μm .
 - Pola emisi isotropik secara esensial (lambertian) dng pola daya $\cos \theta$ shg HPBW 120°.



LED emisi permukaan

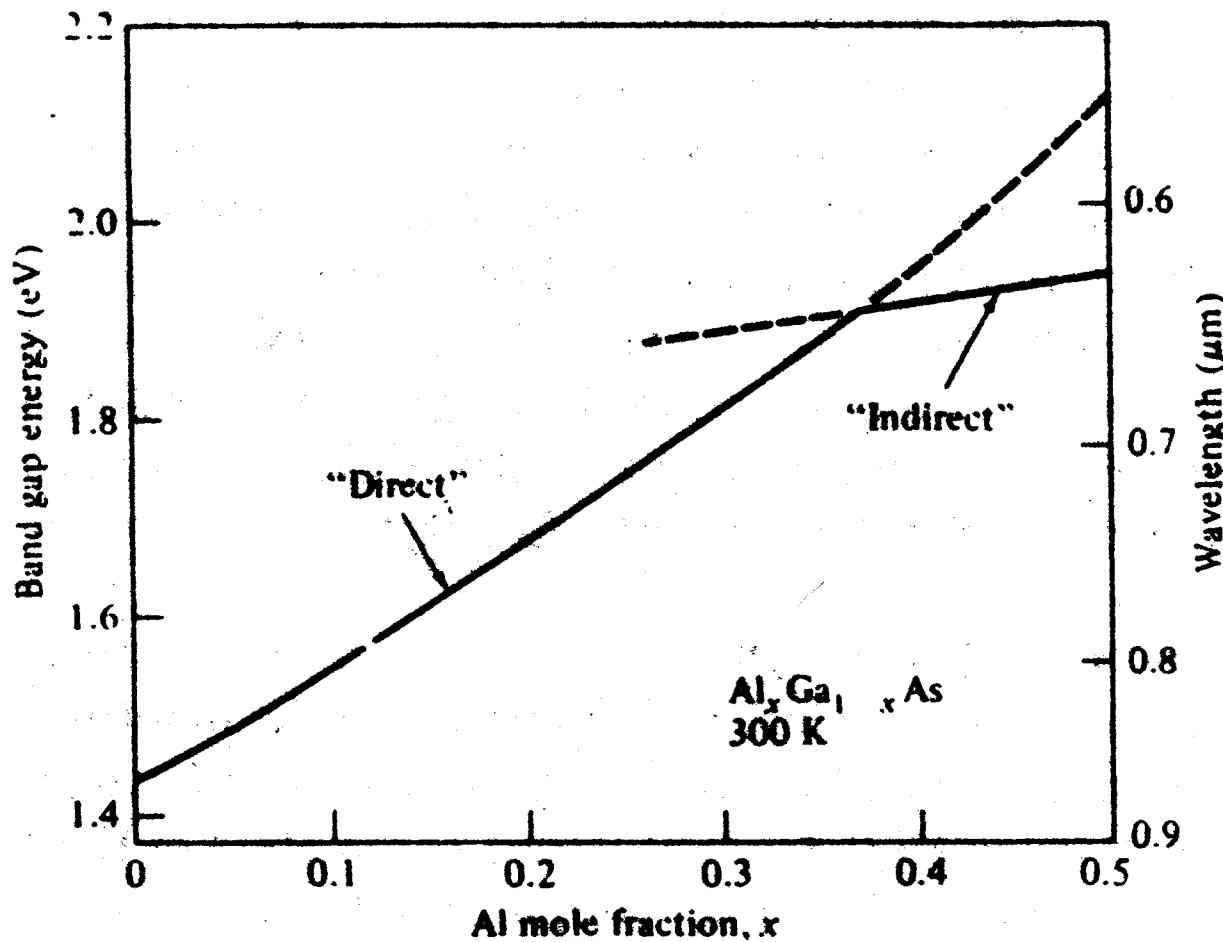
- Emisi Ujung :
 - Terdiri dr daerah junction aktif mrpk sumber inkoheren dan dua lapisan pemandu.
 - Lapisan pemandu memiliki indeks bias lebih rendah dr daerah aktif tetapi lebih besar dr bahan sekitarnya.
 - Struktur tsb membentuk pandu gel yg mengarahkan rdiasi optik ke inti fiber.
 - Pita penyambung lebar 50 s/d 70 μm agar sesuai dgn ukuran fiber 50 s/d 100 μm .
 - Pola emisi lebih terarah dibanding emisi permukaan.
 - Pd bidang sejajar dgn junction pola emisi lambertian, pd arah tegak lurus junction memiliki HPBW 25 s/d 35° cocok dgn ketebalan pandu gel.



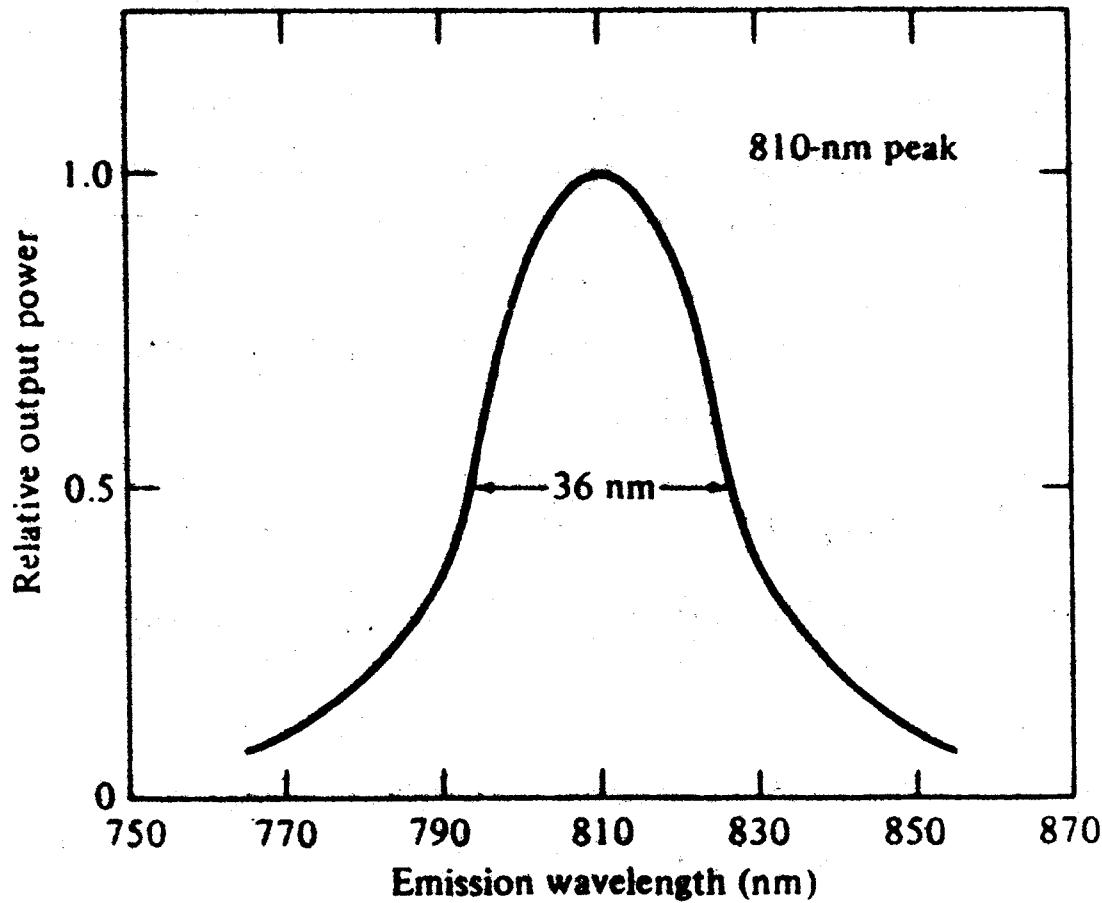
LED emisi ujung

Panjang gelombang dan material

- Wavelength and *bandgap energy Eg* of material
- Panj gel (dan bandgap energy) juga fungsi dr suhu, bertambah ~0.6 nm/C
- $\lambda = hc/Eg$
- $\lambda[\mu\text{m}] = 1,24/Eg [\text{eV}]$
- Typical wavelengths
 - GaP LED
 - » 665 nm
 - » Jarak pendek, sistem murah.
 - $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ LED and laser
 - » 800 → 930 nm
 - » Sistem fiber awal
 - $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ LEDs and lasers
 - » 1300 nm (akhir '80an, awal '90an, FDDI data links)
 - » 1550 nm (pertengahan '90an - sekarang)



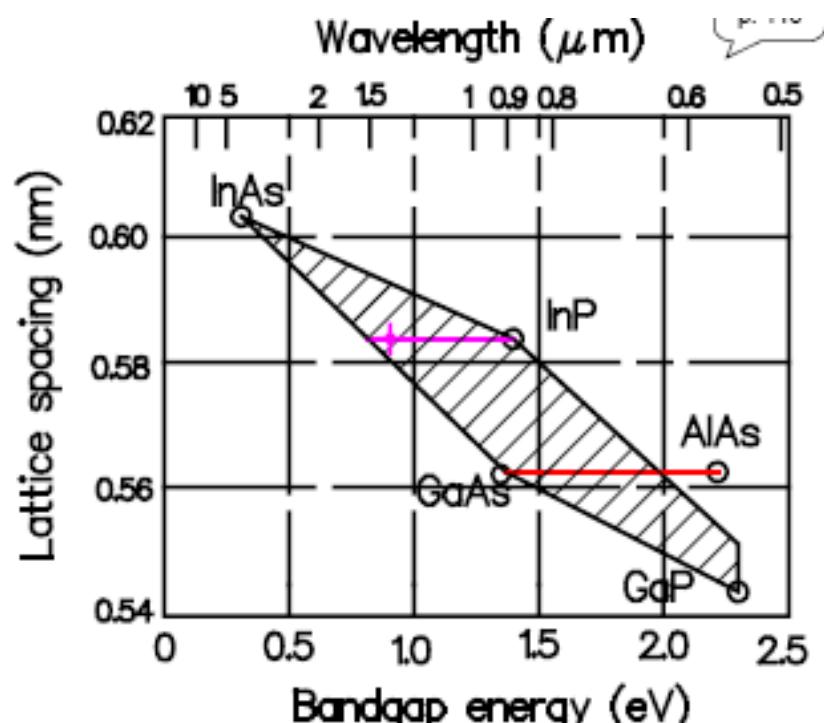
Energi band-gap dan panjang gelombang keluaran sebagai fungsi bagian molekul Al pada $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ pada suhu ruang.



Spektrum pola emisi LED $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ dgn $x = 0,008$

Material sumber

- Hambatan panj gel dan lattice spacing
 - Lattice spacing:
 - » Atomic spacing lapisan
 - » Harus sama saat lapisan dibuat (toleransi of 0.1%)
- Garis horisontal hanya pd diagram
 - Paling banyak perangkat panjang gel panjang dibuat pd substrat InP
 - » Garis horisontal ditarik ke kiri dr ttk InP
 - Panj gel pendek
 - » $Ga_{1-x}Al_xAs$ garis horisontal



Lattice Spacing

Hukum Vegard

- Bahan yang terdiri dari empat jenis bahan/unsur berbeda (ikatan quartener) dengan komposisi $A_{1-x}B_xC_yD_{1-y}$,
 - A dan B adalah unsur dari golongan IIIA (Al, In, atau Ga)
 - C dan D adalah unsur dari golongan VA (As, P, atau Sb)

Besarnya lattice spacing :

$$a(x, y) = xy a(BC) + x(1 - y)a(BD) + (1 - x)y a(AC) + (1 - x)(1 - y)a(AD)$$

$a(KL)$: nilai *lattice spacing* dari ikatan biner antara atom K dan L.

- bahan semikonduktor $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$, jika $a(GaAs) = 5,6536 \text{ } \text{\AA}^\circ$, $a(InAs) = 6,0590 \text{ } \text{\AA}^\circ$, $a(GaP) = 5,4512 \text{ } \text{\AA}^\circ$, $a(InP) = 5,8696 \text{ } \text{\AA}^\circ$
persamaan untuk menghitung nilai *lattice spacing* nya menjadi seperti berikut:

$$a(x, y) = 0,1894y - 0,4184x + 0,0130xy + 5,8696 \text{ } \text{\AA}$$

Material sumber

Hubungan fundamental quantum-mechanical :

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

atau

$$\lambda(\mu m) = \frac{1,240}{E_g(eV)}$$

Utk campuran tiga bahan AlGaAs, besarnya Eg (eV) besarnya :

$$E_g = 1,424 + 1,266x + 0,266x^2$$

Utk campuran empat bahan $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$, besarnya Eg (eV) besarnya :

$$E_g = 1,35 - 0,72y + 0,12y^2$$

$$y \cong 2,20x$$

Contoh

Bahan Sumber $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ dng $x = 0,07$

Berapa E_g dan λ ?

Bahan Sumber $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$, dengan $x = 0,26$

Berapa E_g dan λ ?

Efisiensi kuantum internal

- Ekses elektron di bahan p-type dan hole di bahan n-type terjadi di semikonduktor sumber cahaya karena injeksi pembawa di kontak device.
- Kepadatan ekses elektron Δn sama dgn ekses hole Δp , krn pembawa diinjeksikan terbentuk dan berekombinasi dlm pasangan utk keperluan netralitas muatan kristal.
- Jika injeksi pembawa berhenti → kepadatan pembawa kembali ke nilai keseimbangan.
- Kepadatan ekses pembawa :

$$\Delta n = \Delta n_o e^{-t/\tau}$$

Δn_o : kepadatan ekses elektron diinjeksikan awal

- Ekses pembawa dpt berekombinasi secara radiatif maupun non radiatif.
- Pd rekombinasi radiatif akan menghasilkan emisi photon.
- Jika elektron-hole berekombinasi nonradiatif → melepaskan energi dlm bentuk panas (vibrasi lattice).
- Efisiensi kuantum internal : bagian pasangan elektron-hole yg berekombinasi radiatif.
- Efisiensi kuantum internal :

$$\eta_o = \frac{R_r}{R_r + R_{nr}}$$

R_r : laju rekombinasi radiatif per satuan volume

R_{nr} : laju rekombinasi nonradiatif

Utk penurunan eksponensial ekses pembawa, lifetime rekombinasi radiatif :

$$\tau_r = \frac{\Delta n}{R_r}$$

Lifetime rekombinasi non radiatif :

$$\tau_{nr} = \frac{\Delta n}{R_{nr}}$$

Efisiensi kuantum internal :

$$\eta_o = \frac{1}{1 + (\tau_r / \tau_{nr})} = \frac{\tau}{\tau_r}$$

Lifetime rekombinasi bulk τ :

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}}$$

Tanggapan transien

- Asumsi dasar pendekatan tanggapan transien :
 - Kapasitansi muatan ruang junction C_s bervariasi lebih lambat krn arus dibanding dng kapasitansi difusi $C_d \rightarrow$ dipandang konstan.
 - Harga C_s antara 350 s/d 1000 pF utk arus menengah sampai besar.
- Berdasar asumsi tsb, rise time sampai ttk setengah arus (juga ttk setengah daya) LED :

$$t_{1/2} = \frac{C_s}{\beta I_P} \ln \frac{I_P}{I_S} + \tau \ln 2$$

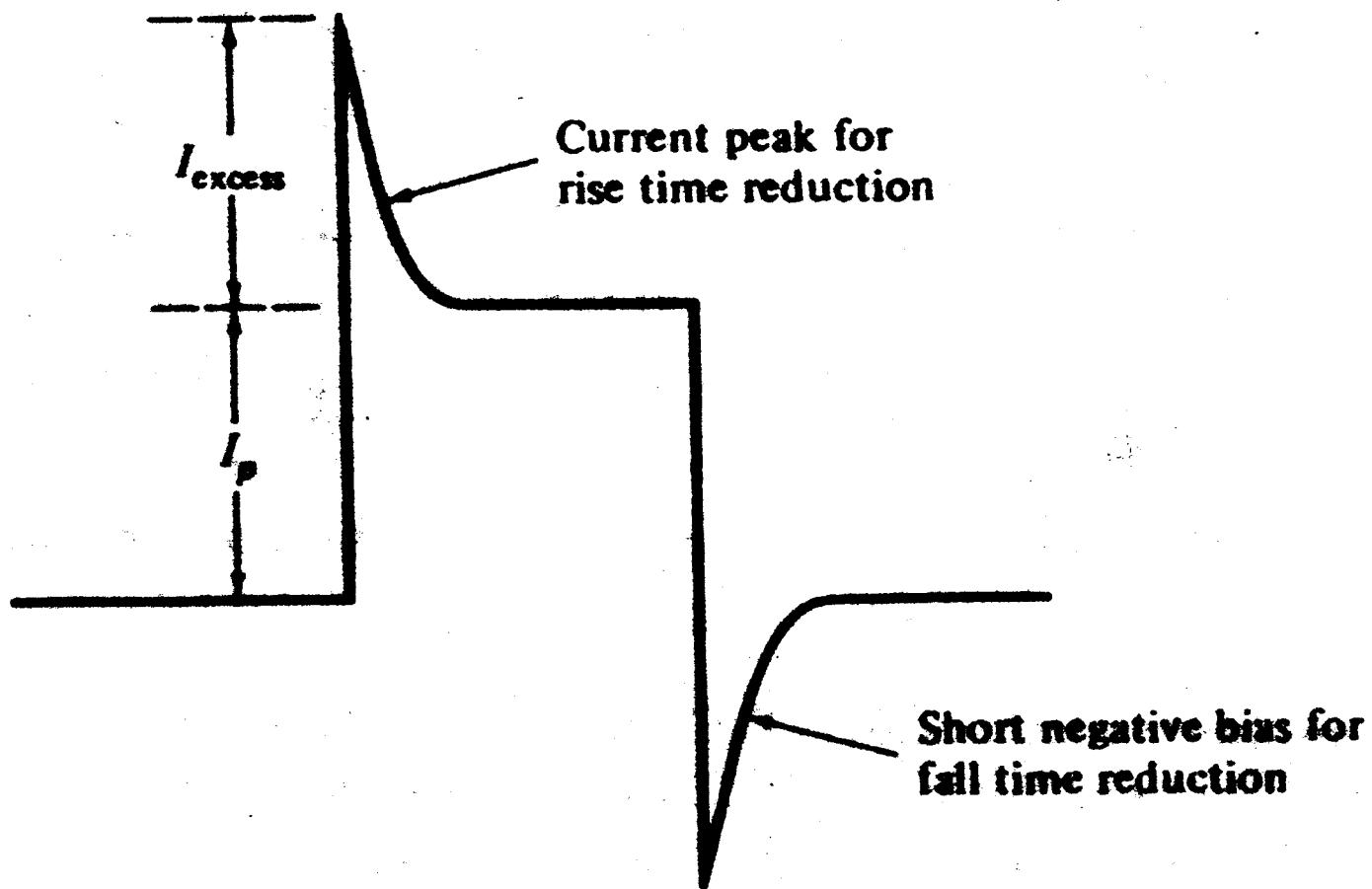
- Rise time 10 s/d 90 % :

$$t_{10-90} = \left(\frac{C_s}{\beta I_P} + \tau \right) \ln 9 \quad \beta = \frac{q}{2k_B T}$$

I_P : amplitudo fungsi tangga arus utk memacu LED

I_s : arus saturasi dioda

τ : lifetime pembawa minoritas



Bentuk gelombang arus