

ISSN 1693-9425

JURNAL TEKNOLOGI

(Journal of Technology)

JURNAL ILMU TEKNIK DAN SAINS

Penanggung Jawab:

Dekan Fakultas Teknik Universitas Pattimura

Penerbit:

Fakultas Teknik
Universitas Pattimura - Ambon

TEKNOLOGI

Jurnal Ilmu-Ilmu Teknik dan Sains

Volume 13. No 1 April 2016

D a f t a r I s i

| | | |
|---|---|------------------|
| Analisis Getaran Pada Roller Cam Dual Tangensial Pompa Injeksi Bahan Bakar Motor Diesel Dengan Variasi Putaran. | Benjamin G. Tentua Apriandi Pulu | 2124-2130 |
| Laser Semikonduktor Gaas Jenis Double Heterojunction Sebagai Sumber Cahaya Dalam Komunikasi Optik | Samy J. Litololy | 2131-2137 |
| Design Dan Asesmen Karakteristik Model Francis Turbin Kecepatan Rendah | Wulfilla M. Rumaherang J. Louhenapessy A.I. Laboki | 2138-2144 |
| Studi Numerik Pengaruh Variasi Bilangan Reynolds Dan Bilangan Prandlt Terhadap Karakteristik Aliran Fluida Dan Perpindahan Panas Melintasi Silinder Sirkular Tunggal | Cendy S.E Tupamahu | 2145-2149 |
| Faktor-Faktor Penyebab Terjadinya Keterlambatan Waktu Persediaan Material Pada Proyek Konstruksi Jalan Di Maluku | Felix Taihuttu Christy G. Buyang | 2151-2155 |
| Pengaruh Sifat Mekanis Kekuatan Tarik Fraksi Volume Komposit Serat Ijuk Aren Dengan Matriks Polyester | Arthur Y Leiwakabessy | 2156-2159 |

LASER SEMIKONDUKTOR GaAs JENIS DOUBLE HETEROJUNCTION SEBAGAI SUMBER CAHAYA DALAM KOMUNIKASI OPTIK

Samy J. Litolily*)

Abstrak

Telah dilakukan riset Laser Semikonduktor untuk mempelajari suatu sistem junction yang tepat sebagai gelombang carrier dalam komunikasi optik. Mula-mula disampaikan asal muasal munculnya Laser Semikonduktor GaAs, kemudian struktur homojunction-nya, khususnya uraian tentang rapat arus ambang dan daya output saat forward-bias; yang memberikan λ_{output} dengan profil yang tidak tajam (pelebaran = 2 μm) dan daya dibawah 10 mW. Setelah itu semua, pencampuran III-V terhadap GaAs murni, diciptakan untuk mempertajam profil laser output dan memperbesar dayanya. Struktur yang terbaik untuk keperluan ini adalah double heterojunction (DH) dengan salah satu bahan unggulannya adalah $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$. Kemudian ditunjukkan juga bahwa bahan ini memberikan $\lambda_{\text{output}} \approx 1,55 \mu\text{m}$ dan daya output diatas 10 mW dengan efisiensi operasi 70%. Prospektifitas tinggi untuk komunikasi optik fiber silikon, sekarang dan masa depan dari laser semikonduktor bahan GaAs murni dan campuran III-V-nya; dideklarasikan pada kesimpulan.

Kata kunci : Laser Semikonduktor GaAs, Double Heterojunction, dan Komunikasi Optik

I. PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang Laser Semikonduktor GaAs

Sejak Einstein meletakkan asas-asas emisi stimulasi yang mendasari semua aksi laser, banyak usaha dilakukan oleh banyak pionir untuk memperoleh medium yang tepat; dimana stimulasi berlangsung. Empat puluh tiga tahun kemudian, Maiman (1960) melaporkan laser zat padat “**Ruby**” ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}^{3+}$) dengan $\lambda_{\text{output}} = \lambda_0 \sim 0,6993 \mu\text{m}$ (pulsa); sebagai “Real” laser pertama didunia. Menyusul kemudian $\lambda_0 \approx 1,1500 \mu\text{m}$ (CW) dari medium gas He-Ne , mengoperasikan laser dengan beberapa mW; didemonstrasikan oleh Javan dkk. pada tahun 1961. Riset intensif dalam komunikasi optik pada awal dasawarsa 60-an di Amerika Serikat, membuat orang melirik ke laser untuk dijadikan gelombang *carrier* yang *qualified*. Ruby dan He-Ne tidak memenuhi syarat karena kendala tegangan operasi yang sangat tinggi, daya yang rendah, λ_0 yang tidak menguntungkan, juga *cost* yang terlalu mahal saat itu. Untuk mengatasi hal ini Benhard dan Duraffog, juga Basov dkk., secara terpisah mengusulkan medium stimulasi lain, dimana stimulasi foton dapat menghasilkan laser yang menjanjikan. Medium yang dihasilkan oleh para pionir tersebut adalah *junction* antara semikonduktor type p dengan semikonduktor type n yang sedang *Forward-Bias*. Kemajuan yang luar biasa terjadi hanya dalam waktu satu tahun, sehingga pada tahun 1962; lahirlah laser generasi ketiga yaitu

Laser Semikonduktor, yang pada waktu itu memakai bahan GaAs (Galium Arsenit) sebagai bahan pertama yang bisa menghasilkan laser dengan $\lambda_0 \approx 1,1 \mu\text{m}$ s/d $1,6 \mu\text{m}$ dan Daya yang bisa mencapai puluhan mW.

Pada bab II, makalah ini menyampaikan bentuk standar laser semikonduktor GaAs yang junctionnya homogen (Homojunction) beserta pola penguatannya (Gain) terhadap gelombang yang masuk. Juga syarat populasi inversi yang berlaku supaya laser homojunction dapat beraksi, serta prospek menuju junction yang tidak homogen; atau junction yang berasal dari GaAs yang sudah dicampuri dengan bahan-bahan lain seperti Al,P, In, Sb yaitu pola pencampuran III-V, guna memperoleh gain yang lebih tajam. Bab III berisi uraian teoretis tentang rapat arus ambang yang harus diterapkan pada sistim homojunction agar forward-bias bisa menghasilkan foto-foton terstimulasi ketika rekombinasi, serta daya output yang dihasilkannya. Bab IV merupakan rumusan hipotesa, yang menunjukkan bahwa sistim homojunction GaAs, dapat menghasilkan gain yang lebih tinggi dan lebih monokromatis; bila sistim dibuat heterojunction. Bab V memuat ulasan singkat tentang cara penelitian yang pada akhirnya menyelesaikan makalah ini. Bab VI berisikan hasil-penelusuran literatur terhadap struktur heterojunction kombinasi III-V terhadap homojunction GaAs; termasuk disini Daya output dan λ_{output} yang dihasilkannya serta pemakaiannya dalam komunikasi optik. Bab VII memuat rumusan kesimpulan terhadap

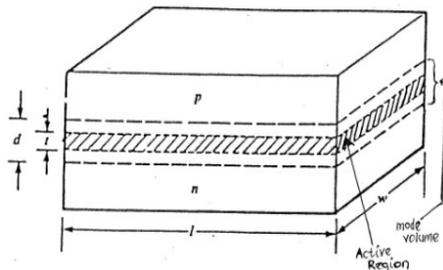
seluruh uraian dari bab I s/d VI, yang sekaligus adalah kesimpulan penelitian ini.

I.2. Tujuan Penelitian

Demikianlah setelah melihat uraian pada 1.1 maka dapat dimengerti bahwa, tujuan penelitian ini adalah: Mencari atau dalam ini adalah mempelajari suatu sistim laser homojunction GaAs agar dapat menghasilkan λ_0 yang lebih monokromatis dengan cukup besar, untuk bisa dipakai sebagai carrier yang qualified dalam komunikasi optik.

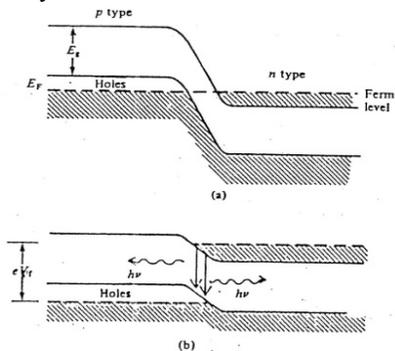
II. TINJAUAN PUSTAKA

Secara fisik, semua literatur standar (termasuk refrensi: Wilson J., and Hawkes J. F. B.; "Optoelectronics An Introduction", Prentice Hall, 1998) mengemukakan situasi fisik material laser semikonduktor homojunction adalah sebagai berikut:



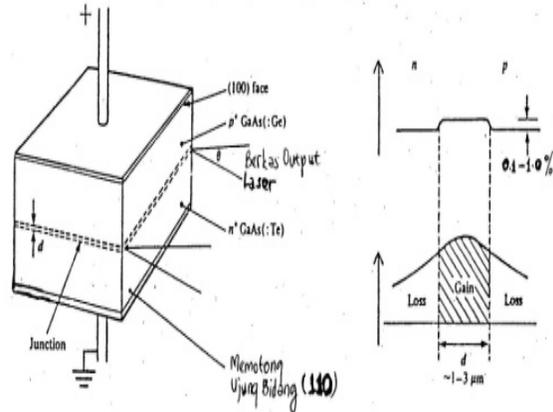
Gambar II.1 Situasi fisik homojunction p-n

Disini; l = panjang fisik bahan, w = lebarnya, t = tebal daerah dimana stimulasi terjadi (daerah aktif), d = tebal tambahan dari t dimana stimulasi masih mungkin terjadi. Baik t maupun d , masih berada dalam daerah junction. Keadaan pita tenaga dari sistim homojunction bila bahan p dan n didoping sangat banyak adalah:



Gambar II.2 p-n junction heavily doping : a). Kestimbangan ; b. Forward-Bias

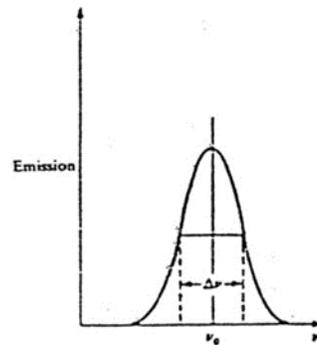
Bila tegangan forward-bias mendekati nilai E_g/e , maka elektron-elektron dan hole-hole akan diinjeksikan dalam jumlah yang cukup untuk menciptakan populasi inversi di daerah aktif, sbb.:



Gambar II.3. skema Forward-Bias homojunction GaAs Disini, emisi foton terkurung di daerah t dan d pada junction dimana besarnya divergensi laser sangat ditentukan oleh perbedaan t dan d . Gambar 1.3.b menunjukkan sangat kecilnya perubahan indeks bias pada daerah junction, sedangkan gambar 1.3.c menunjukkan pola penguatan yang tidak terlalu baik pada daerah aktifnya. Pada sistim ini, syarat ambang yang harus dipenuhi untuk populasi inversi adalah populasi ambang hole dalam pita valensi, yaitu:

$$(N2)_{th} = d/t \left[\frac{8\pi v_0^2 K_{th} \tau_{21} \Delta v n^2}{c^2} \right] \dots \dots \dots (1)$$

Disini, v_0 dan Δv diperoleh dari kurva emisi transisi sbb:



Gambar II.4 Kurva emisi antara $N2$ ke $N1$

K_{th} = Penguatan ambang, τ_{21} = Lifetime dari $N2$, dan n adalah indeks bias bahan GaAs. Yang penting untuk diperhatikan adalah faktor d/t yang ditentukan langsung oleh keadaan fisik semikonduktor (Lihat gambar I.1), dengan hasil terbaik adalah $d/t = 1$.

Jadi, dengan mengatur besaran-besaran diatas dan dengan memperhatikan pengaruhnya terhadap Δv pada gambar II.4, maka dapat dibuat suatu bahan dari campuran GaAs dengan unsur-unsur segolongannya yaitu III dan V, agar Δv yang terjadi sekecil mungkin (se-monokromatis mungkin), sesuatu yang sangat diperlukan pada komunikasi optik. Struktur yang bisa menjamin semua itu adalah struktur heterojunction.

Setelah populasi inversi tercapai menurut (2) maka emisi stimulasi akan terjadi. Namun untuk mencapai itu semua, perlu adanya suplai arus yang kontinyu dan mencapai harga ambang tertentu.

II.1. Rapat Arus Ambang Sistem Homojunction

Berangkat dari (2), jika rapat arus yang mengalir melalui sistim adalah J ($A\ m^{-2}$), maka jumlah elektron tiap detik yang masuk ke volume $l \times t \times w$ adalah J/e . Jadi rapat elektron tiap detik adalah J/e t elektron $s^{-1} \ m^{-3}$. Dalam kesetimbangan, jumlah rapat elektron pada pita konduksi; harus dapat mensuplai suatu kecepatan rekombinasi yang mesti sama dengan kecepatan injeksi N_2/τ_e dimana τ_e adalah lifetime elektron yang bisa saja tidak sama dengan τ_{12} . Jadi, rapat elektron tiap detik adalah:

$$\frac{(J)_{th}}{et} = \frac{(N_2)_{th}}{\tau_e} \dots\dots\dots(2)$$

dan substitusi (1) menghasilkan:

$$(J)_{th} = \frac{ed(8\pi v_0^2 ed K_{th} \tau_{21} \Delta v n^2)}{e^2} \dots\dots\dots(3)$$

Masukan bentuk eksplisit K_{th} ; maka

$$(J)_{th} = \frac{8\pi v_0^2 ed K_{th} \tau_{21} \Delta v n^2}{\tau_e e^2} \left[\gamma + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) \right] \dots\dots\dots(4)$$

Disini $\gamma \equiv$ koefisien kehilangan efektif, dimana τ_c/τ_{21} pada persamaan sering ditulis sebagai $\eta_i \equiv$ Efisiensi Kuantum Internal; yang secara fisis menyatakan seberapa besar elektron-elektron (atau hole-hole) di N_2 , terlibat rekombinasi radiativ.

II.2. Daya Output

Daya keluaran yang bisa dicapai oleh sistim bisa ditulis sebagai:

$$P = A [J - (J)_{th}] \frac{\eta_i h v}{e} \dots\dots\dots(5)$$

dimana A adalah luasan junction. Efisiensi Kuantum Eksternal selanjutnya didefinisikan sebagai perbandingan dari kecepatan output foton yang dicapai terhadap kecepatan injeksi (muatan-muatan tiap detik) yaitu:

$$\eta_{ex} = \frac{d[P_o/hv]}{d \left[\frac{A}{e} [J - (J)_{th}] \right]} \dots\dots\dots(6)$$

dimana P_o diperoleh lewat (5) dikalikan (K_{th} tanpa γ) dibagi (K_{th} dengan γ) yaitu:

$$P_o = P \frac{K_{th} \text{ tanpa } \gamma}{K_{th} \text{ dengan } \gamma} \dots\dots\dots(7)$$

Output daya yang dicari; dimana bentuk eksplisitnya adalah:

$$P_o = \frac{A [J - (J)_{th}] \eta_i h v}{e} \frac{\left[\frac{1}{2} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right]}{\left[\gamma + \frac{1}{2} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right]} \dots\dots\dots(8)$$

sehingga dengan asumsi $R_1 = R_2$, maka (6) menjadi

$$\eta_{ex} = \eta_i \frac{\ln \left(\frac{1}{R_1} \right)}{\gamma + \ln \left(\frac{1}{R_1} \right)} \dots\dots\dots(9)$$

Dari sini, dengan cara eksperimen kita bisa menghitung efisiensi kuantum internal dengan memanfaatkan beragam nilai η_{ex} dan 1 yang sudah diketahui sebelumnya, karena γ dan R_1 bisa dibuat tetap (konstanta). Khusus untuk GaAs, telah dihitung bahwa η_i -nya adalah 0,7 s/d 1,0. Kalau misalnya sekarang tegangan forward-bias adalah V_f , kemudian daya masukan adalah $V_f A J$; maka efisiensi laser GaAs dalam input elektrik ke output laser adalah :

$$\eta = \eta_i \left(\frac{J - (J)_{th}}{J} \right) \left(\frac{h v}{e V_f} \right) \frac{\ln \left(\frac{1}{R_1} \right)}{\gamma + \ln \left(\frac{1}{R_1} \right)} \dots\dots\dots(10)$$

Dimana dari gambar II-2 maka $e V_f = h v$; sehingga untuk $J \gg (J)_{th}$ dimana $[1/1] [1/R_1] \gg \gamma$, maka η dapat didekati oleh η_i . Dan khusus untuk laser semikonduktor GaAs; maka η_i -nya yang diatas 0,7 adalah tergolong besar, sehingga ia dikatakan mempunyai efisiensi daya yang sangat tinggi.

III. METODA PENELITIAN

Ada masalah pada (4) yaitu bahwa $(J)_{th}$ yang besar, akan membuat d yang besar juga. Padahal d sangat berpengaruh pada konvergensi berkas laser yang dihasilkan; berarti juga monokromasitas (Gambar II-3). Biasanya $(J)_{th}$ yang diizinkan itu $\approx 10 \text{ mm}^{-2}$ pada temperatur kamar, untuk homojunction GaAs yang memberikan $d \approx 2 \mu m$; suatu penyebab munculnya dispersi/losses yang potensial dalam komunikasi optik bila GaAs mau dipakai sebagai laser semikonduktor untuk sumber Carrier Waves. Masalah lain adalah γ pada penyebut (3-7) yang langsung bila dia menjadi besar mengecilkan Daya Output bila dia menjadi besar sedikit saja, padahal untuk GaAs maka $\gamma = 10^3 \text{ m}^{-1}$. Penyebab d dan γ yang merepotkan ini terletak pada indeks bias bahan GaAs murni yang didalamnya emisi stimulasi mengalami gain. Profil gain dan variasi indeks bias yang dimaksud, sudah diberikan digambar (II-3);

sedangkan γ sebagai loss coefficient, bergantung semata-mata pada sifat alami GaAs. Apa yang bisa dilakukan para pionir untuk mengatasi masalah ini adalah usaha untuk membentuk suatu bahan semikonduktor yang laser-nya mempunyai profil gain yang tajam dengan Output Daya yang (biasanya diatas 10 milli-watt). Inilah "Drive" dari para Saintis Solid-State dan Insinyur Optoelectronics diawal dasawarsa 60-an, guna memberi kemajuan yang luar biasa buat Teknologi Komunikasi Optik. "Drive" tersebut, dalam makalah ini penulis angkat kembali sebagai Hipotesa; sesuatu yang akan menuntun kita semua kepada apa yang saat ini dikenai sebagai laser Heterojunction.

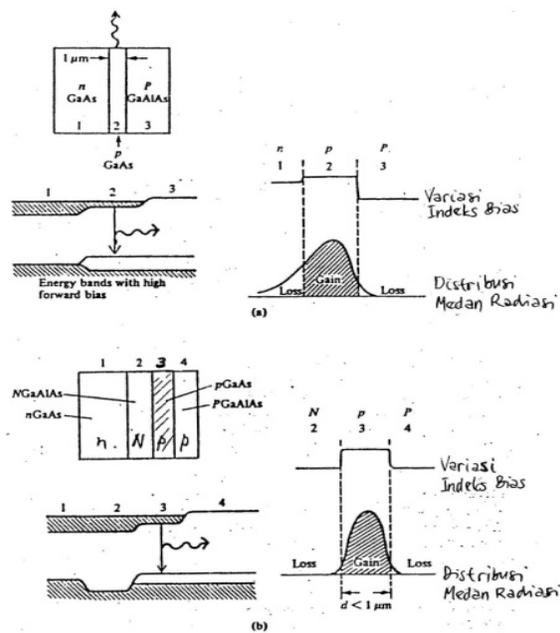
Parameter-parameter yang bercerita tentang homojunction GaAs, terutama d dan γ ; didalam rekayasa untuk membuktikan hipotesa (Bab IV), penulis hanya melakukan penelusuran literatur terhadapnya; terutama dalam hal ini penulis melihat bagaimana konsep heterojunction itu diwujudkan dalam bentuk struktur nyata, serta berkas laser yang diperoleh lewat struktur tersebut. Semua ini dilakukan dengan mengandalkan referensi utama (Wilson J, Hawkes J.F.B, "Optoelectronics An Introduction", Prentice Hall, 1983) dan beberapa referensi tambahan yang bisa penulis dapatkan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Laser *heterojunction* dari bahan GaAs dan campuran-nya adalah merupakan golongan III untuk mengganti beberapa bagian dari As. Fraksi dari penambahan tersebut diatur sedemikian rupa sehingga bersama-sama dengan GaAs murni, bisa diperoleh suatu struktur yang variasi indeks bias dan Energi Gap-nya adalah tajam. Juga disini $(J)_{th}$ diusahakan serendah mungkin, supaya d -nya sekecil mungkin; atau stimulasi betul-betul dapat dipusatkan di active region (lihat gambar II.1).

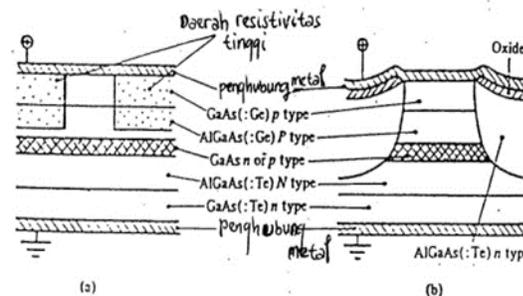
VI.1. Struktur Heterojunction GaAs

Disini dikenal dua macam struktur, yaitu Single Heterojunction (SH) dan Double Heterojunction (DH). Sesuai dengan namanya maka SH hanya akan mempertajam profil gain pada suatu bagian, sedangkan DH pada kedua bagiannya. Ilustrasi untuk kedua macam struktur tersebut, ada dalam gambar VI.1 dibawah ini.



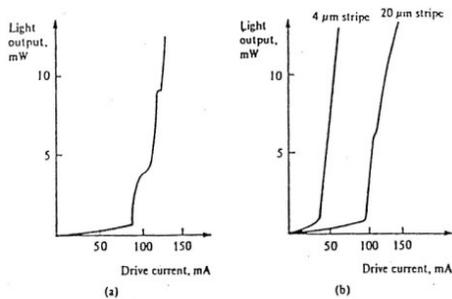
Gambar VI.1 Forward-Bias Heterojunction : a). SH dan b). DH

Terlihat bahwa masalah dispersi maupun loss pada i (Gambar II.3) segera terselesaikan dengan kehadiran $d < 1 \mu m$. Untuk SH, maka lapisan GaAs type P diletakan sebagai lapisan antara (Sanwiched) yang diapit oleh bahan yang berindeks bias lebih rendah $Ga_{1-x}Al_xAs$ type P pada satu sisi, dan GaAs type n pada sisi yang lain. Disini x menyatakan seberapa bagian/fraksi Ga yang diambil oleh Al. Pada DH, selain $Ga_{1-x}Al_xAs$ type P, type N-nya pun diletakkan juga pada sisi yang lain dari sistem yaitu diantara GaAs type N-P-P (untuk SH) dan N-N-P (untuk DH), dimana sisi active region berada di GaAs type P. Disamping itu, lewat struktur DH seperti ini maka $(J)_{th}$ dapat dibuat seoptimal mungkin untuk menghindari pembesaran d . Struktur lanjutan untuk ini, disebut sebagai "Stripe Geometry" yang skemanya bisa dilihat pada gambar VI.2. Pada type P di GaAs dimana active region-nya berada.



Gambar VI.2 DH Stripe geometry

Namun dengan Stripe Geometry, Output Daya sering mengalami gangguan yang disebut “Kink” pada panjang stripe tertentu; misalnya pada drive current ~ 100 mA dengan 20 μm stripe. Keadaan “Kink” ini dapat dilihat pada gambar VI.3 sbb :

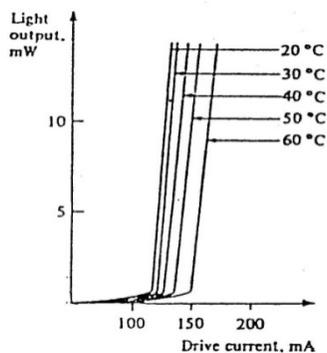


Gambar VI.3 Kink pada DH stripe Geometry : a). Secara umum, dan b). Pada 4 μm dan 20 μm

“Kink” ini berkaitan dengan losses atau dispersi berupa pun kecilnya yang muncul diluar active region pada daerah (d-t) yang memang cukup kecil (gambar II. 1) dan memang terjadi pada $J > (J)_{th}$. Disini terjadi interaksi antara sifat-sifat optik bahan, dengan distribusi foton emisi stimulasi diluar active region. Dengan membuat stripe yang cukup panjang (diatas 20 μm) maka ketidakstabilan “Kink” tersebut dapat diperkecil; seperti yang ditunjukkan pada gambar VI.3.b.

VI.2. Daya Output dan λ_{output} DH GaAlAs

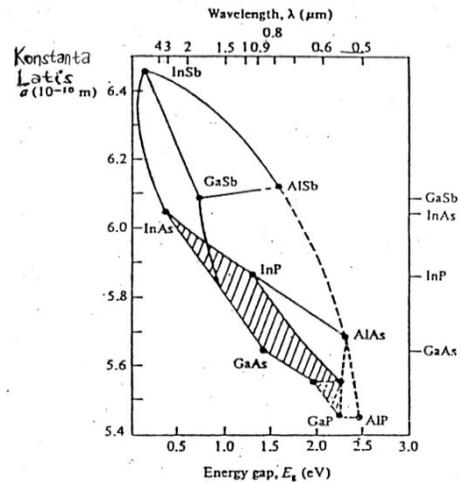
Untuk pencampuran Al terhadap GaAs yang menghasilkan GaAlAs, maka Daya Output juga bergantung kepada temperatur. Bagaimana bentuk ketergantungan tersebut? dapat dilihat dalam gambar VI.4 berikut ini:



Gambar VI.4 Daya Output DH GaAlAs 20 μm stripe pada temperatur tertentu.

Sedangkan produk daya ini mempunyai λ_{output} yang khas yang berhubungan langsung dengan Energy Gap dari latis-latis yang dibentuk melalui pola III-V,

terhadap GaAs murni. Disini, konstanta latis juga turut menentukan λ_{output}, karena foton-foton stimulasi bisa mengalami difraksi disana. Hubungan antara pola campuran III-V dengan konstanta latis terhadap Energy Gap dan λ_{output} DH; dapat dilihat pada gambar berikut ini:

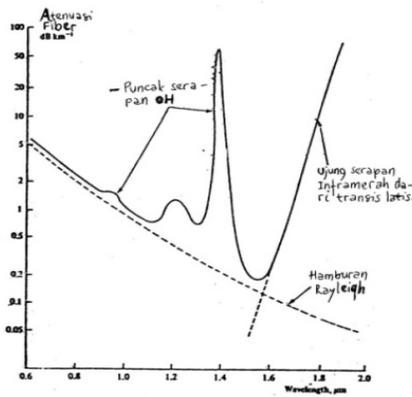


Gambar VI.5 λ_{output} (Energy Gap) versus konstanta latis; pencampuran III-V.

Disini garis putus-putus menghubungkan indirect bang-gap, daerah arsiran menunjukkan daerah campuran Ga_xIn_{1-x}P_yAs_{1-y}; dengan x dan y dapat berasal dari GaAs dan InP.

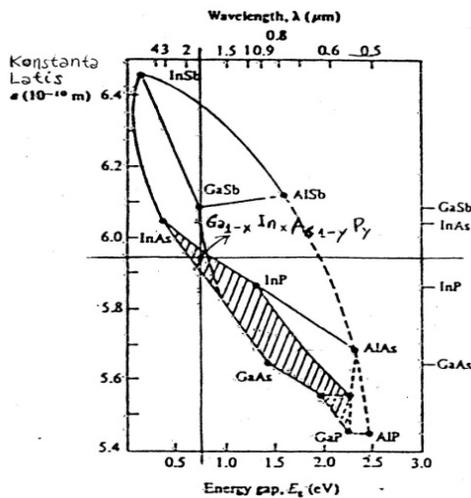
VI.3. Kilas Balik Laser DH GaAs dalam Komunikasi Optik

Dalam bab I sudah diungkapkan bahwa riset dalam komunikasi optik-lah yang mendorong kelahiran laser semikonduktor GaAs. Saat itu sedang dicari gelombang pembawa yang memberikan attenuasi minimal ($1,1 \mu\text{m} < \lambda < 1,6 \mu\text{m}$), dan ternyata dengan pencampuran III-V terhadap GaAs, hal itu bisa dipenuhi. Grafik transmission loss dari single mode fiber silikon dalam komunikasi optik adalah:



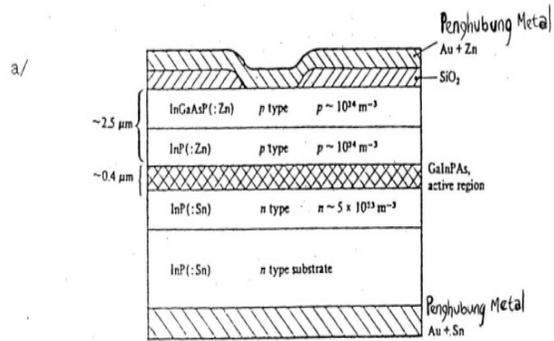
Gambar VI.6 Fiber Silikon Attenuasi versus X (Single Mode)

Disini λ yang memberikan loss minimal ($\sim 0,15 \text{ db km}^{-1}$) adalah $\lambda \approx 1,55 \mu\text{m}$ betul-betul dapat dipenuhi oleh DH Laser Campuran $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$. Bahan semacam ini terdapat didaerah arsiran pada gambar VI. 5 berikut ini:

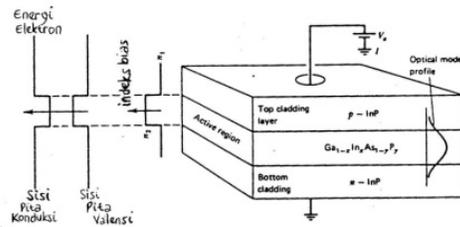


Gambar V.7 $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ pada diagram λ versus campuran III-V

Dalam hal ini, struktur $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ untuk keperluan tersebut adalah sebagai berikut:



b/



Gambar VI.8 DH $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ Laser : a). Struktur, b). Forward-Bias

Disini, struktur Forward-Bias-nya akan memberikan Output Daya diatas 10 mW, sesuai gambar VI. 4 dengan $\lambda_{\text{output}} \approx 1,55 \mu\text{m}$.

I. KESIMPULAN

Umum:

Laser Semikonduktor sebagai laser generasi ketiga, mempunyai keunggulan komparatif terhadap laser "Ruby" dan laser "He-Ne"; karena bisa digunakan dalam komunikasi optik. Tegangan operasi yang rendah, $1,1 \mu\text{m} < \lambda_{\text{output}} < 1,6 \mu\text{m}$, dan Output Daya yang diatas 10 mW; membuat Homojunction terus diperbaiki hingga menjadi Heterojunction; semuanya dengan pola campuran III-V terhadap GaAs. Sedangkan efisiensi laser yang diperoleh yaitu $\sim 70\%$ adalah tinggi sekali.

Khusus:

Double Heterojunction (DH) Laser $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ telah memberikan solusi terbaik untuk memperoleh gelombang carrier yang qualified dalam sistim komunikasi optik dengan fiber silikon. Yaitu karena λ_{output} -nya $\sim 1,55 \mu\text{m}$ dan Output Daya-nya diatas 10 mW, adalah sangat prospektif untuk waktu sekarang dan dimasa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Laud, B. B., 1988, "Laser dan Optik Non-Linier" (Penerjemah: Susanto), UI-Press, Jakarta.
- Leinwoll, S., 1965, "Understanding Lasers and Masers", 37-42, John F. Rider Publ. Inc., New York.
- Steele, E. L., 1968, "Optical Lasers in Electronics", 224-255, John Wiley and Sons, New York.
- Suematsu, Y. Iga, K-I., 1982, "Introduction to Optical Fiber Communications", John Wiley and Sons, New York.
- Wilson, J. and Hawkes, J. F. B., 1998, "Optoelectronics An Introduction", Prentice Hall International, New Jersey.
- Yariv, A., 1989, "Quantum Electronics", Third Edition, 243-253, John Wiley and Sons, New York.