

## **LASER ZAT-PADAT**

A. B. Setio Utomo  
Jurusan Fisika FMIPA-UGM.

### **INTI SARI**

Sejak demonstrasi laser zat-padat yang pertama kali, variasi beberapa material zat-padat lain dapat digunakan dan dioperasikan sebagai laser zat-padat.

Dari banyak jenis material zat-padat yang dapat dibuat sebagai bahan aktif laser, hanya beberapa diantaranya yang terbukti berhasil secara komersial, beberapa diantaranya merupakan laser yang dapat divariasikan panjang gelombangnya (ditala) dan hal ini sangat berguna untuk riset-riset ilmiah spektroskopi.

### **SOLID STATES LASER**

A. B. Setio Utomo

### **ABSTRACT**

Since the first demonstration of a solid state laser, a variety of other solid state materials has been used to be operated as solid state lasers.

A lot of solid state materials can be made as an active material of laser, only a few have proven to be commercially successful, a few of them is tunable lasers which are very useful for scientific/spectroscopic researchs.

## **I. PENDAHULUAN.**

Pada saat A. L. chawlow dan C. H. Townes mempublikasikan makalah tentang emisi terstimulasi yang terkenal " Infra-merah dan Maser Optik" di majalah Physical Review tahun 1958, belum ada orang yang yakin seperti apa bentuk lasernya. Dalam makalah tersebut Schawlow dan Townes mengajukan bahwa uap potasium dan cesium maupun kristal garam tanah-jarang dapat mengemisikan cahaya laser jika diradiasi dengan cahaya yang cukup kuat intensitasnya dan dengan panjang gelombang yang tepat.

Sistem amplifikasi optik dan osilator pertama yang didasarkan pada emisi terstimulasi dibuat pada tahun 1960 oleh T.H. Maiman menggunakan bentuk padatan batang ruby dengan pemompaan optik dari tabung lucutan. Sejak itu pengembangan laser bahan padat mengalami perkembangan yang pesat, baik untuk laser yang tertala (tunable) maupun yang tak-tertala (non-tunable).

Perkembangan kearah jenis-jenis bahan aktif yang dapat digunakan sebagai laser, daya yang dihasilkan oleh laser maupun tunabilitas panjang gelombang laser (dapat divariasikan panjang gelombangnya) maju dengan pesat. Hal ini menjadi pendorong pengembangan dibidang yang lain, a.l : bidang teknik, kimia, fisika, biologi dan lain-lain. Dalam hal perkembangan di bidang fisika, salah satu diantaranya penggunaan laser tertala (tunable laser) adalah untuk spektroskopi.

Sebagai sumber cahaya yang dapat di tala (tune) pada suatu transisi tertentu dari atom atau molekul, laser tertala merupakan sistim baku di laboratorium fisika atom dan molekul.

## **II. ASPEK UMUM LASER ZAT-PADAT.**

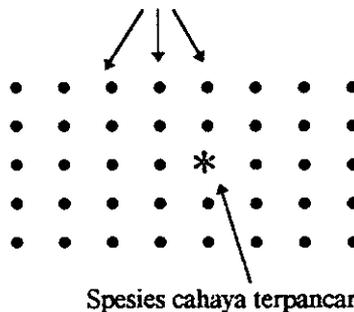
Secara umum sistim laser zat-padat didasarkan pada medium kristal atau "glassy" yang berlaku sebagai bahan "host" nya (pengemban) untuk

tempat penempatan bahan aktif laser. Interaksi antara elemen bahan aktif laser dengan materi hostnya sangat berpengaruh pada operasi laser zat-padat. Dalam hal ini medium host harus memenuhi beberapa kriteria a.l: konduktor optik yang bagus (non-konduktor listrik), transparan terhadap cahaya pemompa, hanya sedikit menyerap cahaya pada panjang gelombang laser dan mempunyai indeks bias yang seragam agar diperoleh efisiensi yang tinggi.

## II.1. Materi Laser Zat-Padat.

Seperti jenis laser pada umumnya, atom bahan aktif pengemisi cahaya dalam laser zat-padat hanya merupakan sebagian kecil dari atom kristal secara keseluruhan (kristal laser). Secara kimiawi elemen atom bahan aktif laser hanya merupakan "dopant" yang ditambahkan kedalam suatu kristal yang berlaku sebagai host (gambar 1).

Atom-atom dalam kristal induk



Gambar 1. Bahan aktif laser dalam kristal.  
(Hecht, 1992)

Elemen atom pengemisi cahaya yang digunakan sebagai elemen aktif bahan laser harus mempunyai aras tenaga yang dapat menyerap cahaya pemompa optik dari luar agar diperoleh keadaan pembalikan populasi (population inversion) pada aras tenaga metastabil. Elemen aktif laser yang sering digunakan a.l: chromium, neodymium, erbium, holmium dan titanium.

## II.2. Sifat Termal Laser Zat-Padat.

Sifat termal/penimbunan termal dari host juga memerlukan perhatian khusus akibat adanya pemompaan cahaya dari luar.

Penimbunan termal ini terjadi oleh karena hanya sebagian kecil dari cahaya pemompa yang diserap oleh elemen aktif laser. Sedangkan sebagian besar tenaga pemompa yang tidak terserap akan diubah menjadi panas dan menyebar di seluruh kristal. Penimbunan panas dalam kristal ini dapat berpengaruh pada sifat "gain" (penguatan) dari laser dan biasanya akan mengurangi efisiensi laser dan daya keluarannya. Akibat lain dari adanya penimbunan panas ini akan menimbulkan indeks bias secara difrensial dalam kristal. Hal ini akan menjadikan osilasi cahaya dalam kristal tidak sempurna dan berakibat akan mengurangi daya keluaran laser. Oleh sebab itu kristal zat-padat biasanya dibentuk menjadi silinder berdiameter kecil agar lebih mudah panas keluar dari kristal.

## II.3. Sifat Interaksi Dalam Laser Zat-Padat

Interaksi antara elemen aktif laser dengan host kristal dan membentuk ikatan kristal baru akan berpengaruh pada struktur aras-aras tenaga.

Adanya ikatan kristal dan pengaruh atom yang berdekatan akan menggeser sedikit aras tenaga dari atom bahan aktif laser. Hal ini akan merubah panjang gelombang emisi laser. Sebagai contoh, atom neodymium akan mengemisikan cahaya pada panjang gelombang 1054 nm jika menggunakan host kristal glass phosphat, dan jika dalam host glass silica akan mengemisikan cahaya pada panjang gelombang 1062 nm. Apabila menggunakan kristal YAG (Yttrium Aluminum Garnet), atom aktif neodymium akan mengemisikan cahaya pada panjang gelombang 1064 nm (Hecht, 1992).

#### II.4. Kualitas Kristal Laser Zat-Padat.

Hal lain yang perlu diperhatikan mengenai laser zat-padat adalah bentuk/kuran kristal yang memenuhi kualitas optik (al: transparan, keseragaman indeks bias).

Kristal zat-padat selain harus transparan harus juga mempunyai indeks bias yang seragam, sehingga osilasi cahaya akan berlangsung secara sempurna didalam kristal maupun di dalam rongga resonator laser.

### III. SUMBER PEMOMPA OPTIK DAN SISTEM PEMOMPAAN LASER ZAT-PADAT

Oleh karena kristal laser zat-padat bersifat non-konduusif, maka secara praktis untuk menghasilkan pembalikan populasi adalah dengan cara menyinari kristal laser dengan cahaya yang cukup terang (optical pumping). Dalam hal ini pemilihan sumber cahaya pemompa bergantung pada sifat alamiah dari materi laser.

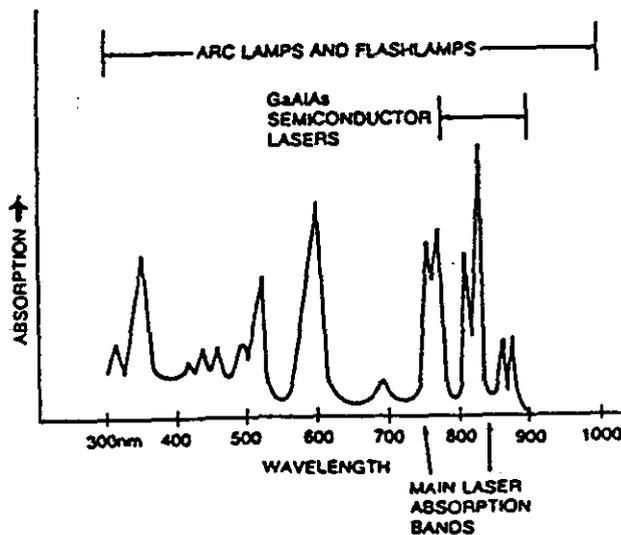
#### III.1. Pemompaan Optik Dan Proses Serapan.

Sebagai bahan laser, materi bahan aktif laser mempunyai sifat yang khas. Setiap atom akan mengemisikan cahaya dari transisi tertentu jika mereka deeksitasi dari aras tenaga eksitasi ke aras tenaga yang lebih rendah, seperti halnya jika mereka menyerap cahaya pada panjang gelombang yang khas. Proses serapan ini merupakan bagian yang berperanan penting dalam proses pemompaan optik (optical pumping).

Proses serapan dapat terjadi pada daerah cakupan panjang gelombang yang sempit maupun lebar, bergantung pada transisi yang terlibat. Secara umum proses pemompaan optik akan lebih efisien apabila menggunakan sumber cahaya yang mempunyai cakupan panjang, misalnya lampu kilat (flash) atau lampu busur

api (arc lamp). Sedangkan pemompaan menggunakan laser cenderung tidak efisien kecuali menggunakan laser dioda GaAlAs.

Lampu kilat atau lampu busur api sering digunakan untuk memompa laser neodmium karena mengemisikan cahaya dengan daerah cakupan panjang gelombang yang lebar, dari daerah panjang gelombang infra-merah dekat (near infrared) sampai daerah ultra- ungu dekat (near ultraviolet), yang sebagian besar dapat terserap oleh atom neodmium (gambar 2). Dilain pihak laser dioda GaAlAs mempunyai emisi sekitar panjang gelombang infra-merah dekat (near infrared) dan sangat sesuai dengan daerah serapan terkuat atom neodmium. Hal ini yang menyebabkan proses serapan menggunakan sistim pemompa optik laser dioda GaAlAs menjadi sangat efisien (Hecht, 1992).

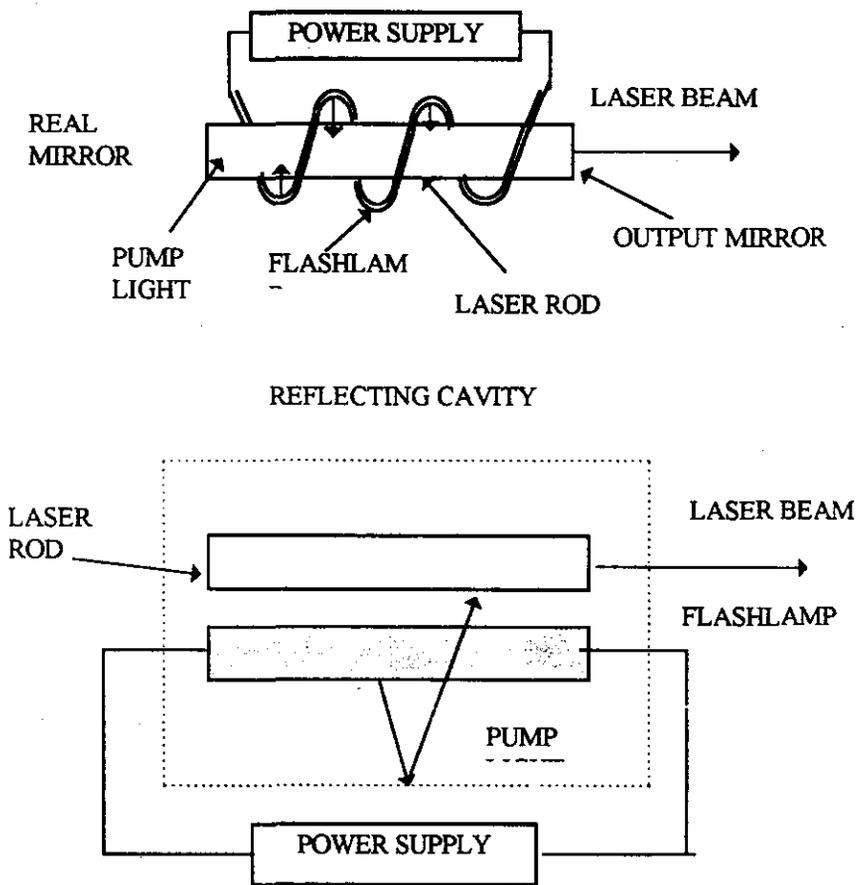


Gambar 2. Cakupan panjang gelombang serapan atom neodmium (Hecht, 1992)

Proses pemompaan optik menggunakan lampu kilat biasanya digunakan untuk laser zat-padat pulsa, karena adanya batasan pada sistem elektronik pembangkitnya maupun pada lampunya sendiri. Dilain pihak laser zat-padat gelombang kontinu (Continuous Wave-CW) menggunakan pemompa lampu busur

api ataupun dengan menggunakan laser dioda GaAlAs (meskipun tidak seluruh materi laser zat-padat dapat beroperasi secara gelombang kontinu- CW).

Beberapa sistem pemompaan optik yang paling umum digunakan adalah lampu kilat atau lampu busur api. Lampu ini berbentuk tabung gas melingkar (spiral) ataupun tabung gas linear dengan kombinasi cermin silinder ataupun ellip, melingkupi bahan kristal laser beserta lampu tabungnya (gambar 3 dan 4).



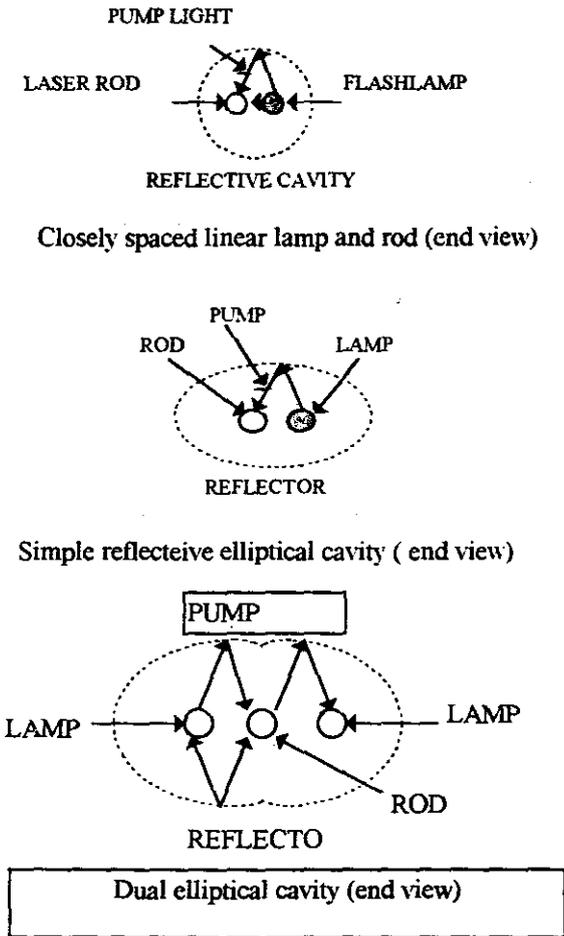
Gambar 3. Sistem pemompaan optik laser zat-padat menggunakan tabung spiral dan melingkar. (Hecht, 1992)

#### IV. JENIS LASER ZAT-PADAT

Ditinjau dari sifat panjang gelombang berkas cahaya yang dipancarkan, laser zat-padat dapat dibedakan menjadi dua kelompok yaitu laser zat-padat

"monokromatis" (a.l. laser ruby, Nd:YAG) dan laser zat-padat "polikromatis" (dapat dipilih panjang gelombangnya) (a.l. laser alexandrite, titanium:sapphire).

Laser ruby adalah jenis laser zat-padat yang pertama tetapi jauh dari ideal. Jenis ini termasuk jenis laser 3-tingkat yang kurang efisien, dalam hal pemompaan optik, dibanding dengan jenis laser 4-tingkat, misalnya: neodmium laser.



Gambar 4. Sistem pemompaan optik laser zat-padat menggunakan rongga reflektor (Hecht, 1992).

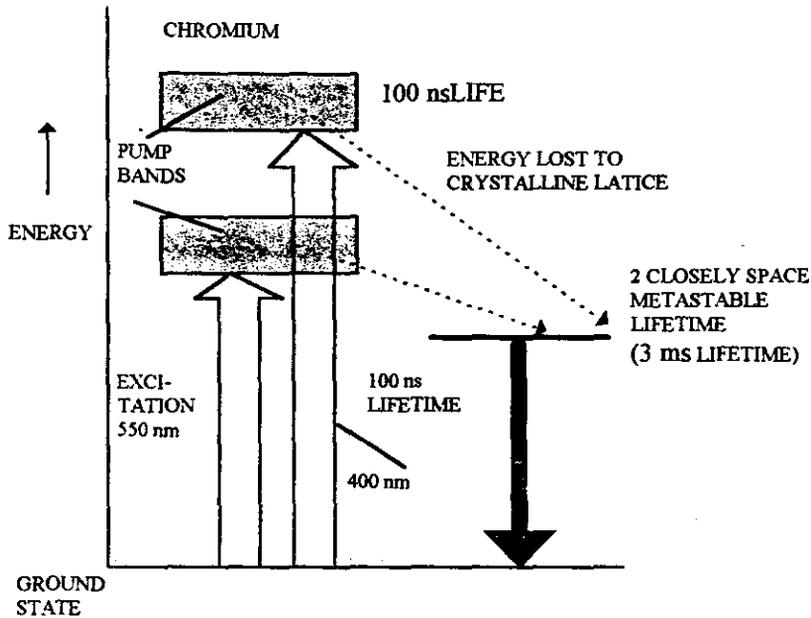
Disamping jenis laser zat-padat yang hanya mengemisikan cahaya monokromatis, ada jenis laser zat-padat yang dapat mengemisikan cahaya polikromatis (range of wavelength) sehingga dapat - ditala (tune) panjang gelombangnya, misalnya: Alexandrite, Titanium-sapphire laser.

#### IV.1. Laser Ruby

Laser ruby yang terbuat dari sintetis ruby menggunakan aluminum oksida dengan doping chromium membentuk kristal transparan dan berwarna merah muda.

Atom chromium dalam host kristal ruby akan menyerap cahaya biru (400 nm) atau hijau ( 550 nm) dari suatu lampu kilat xenon. Hal ini akan mengakibatkan adanya loncatan elektron yang berada di aras dasar (ground state) ke aras eksitasi (pump bands). Setelah sekitar 100 nanodetik dalam aras tenaga eksitasi, terjadi peluruhan dari aras eksitasi ke aras metastabil yang berada dibawahnya dengan menyebar kelebihan tenaga ke sistim kristal. Hal ini akan menyebabkan adanya inversi populasi pada aras metastabil. Setelah 3 millidetik dalam aras tenaga tersebut, emisi terstimulasi akan terjadi jika elektron meloncat kembali ke aras dasarnya atau akan meluruh ke keadaan dasar dengan proses fluorensensi. Emisi akibat transisi dari aras metastabil terendah ke aras dasar chromium ini menimbulkan cahaya merah 694,3 nm (gambar 5).

Sebagai sistem laser 3-tingkat, akan membuat pemompaan optik tidak efisien. Hal ini dikarenakan adanya proses yang berakhir di aras dasar sehingga diperlukan pemompaan pada sejumlah besar elektron keluar dari aras dasar agar dapat terjadi proses inversi populasi dan emisi cahaya berikutnya. Tingginya tenaga yang diperlukan untuk inversi populasi dalam kristal ruby ini akan membuat sulitnya laser beroperasi secara gelombang kontinu (CW).



Gambar 5. Aras tenaga chromium dalam laser ruby.  
(Hecht, 1992)

Akan tetapi setelah inversi populasi telah tercapai, maka sejumlah besar tenaga dapat ditampung dalam kristal ini dan dalam keadaan yang tepat tenaga yang tertampung ini dapat dilepas menjadi pulsa laser tunggal yang berdaya besar (giant pulse). Sistem pelepasan tenaga menjadi pulsa laser yang bersifat tunggal dan berdaya besar paling efektif adalah menggunakan "electro-optics shutter" (Q-switch) dalam rongga laser. Dalam hal ini Q-switch akan menahan aksi laser berhenti beberapa saat sampai keadaan inversi populasi mencapai maksimum dan dibuka pada saat yang tepat sehingga menghasilkan emisi laser pulsa tunggal yang berdaya besar.

#### IV.2. Laser Neodymium

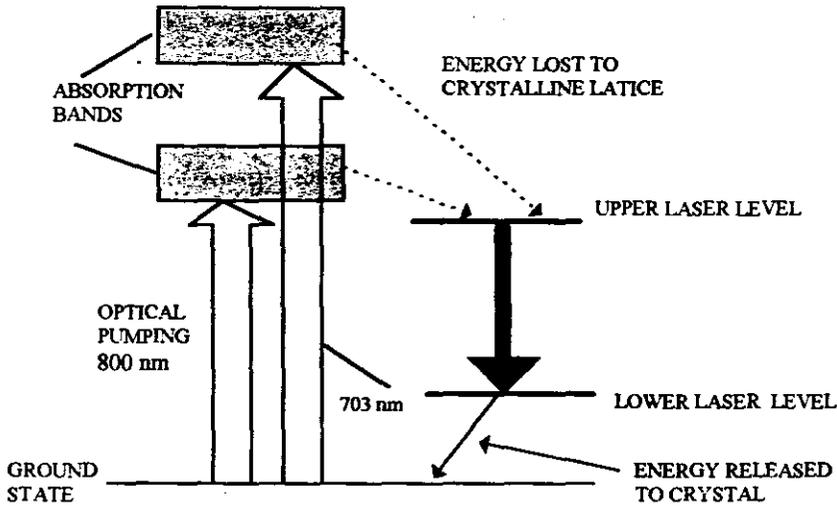
Pemompaan optik yang lebih efisien dapat dicapai pada sistim laser 4-tingkat, misalkan laser Nd:YAG (neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet) yang dapat beroperasi secara gelombang kontinu (CW) maupun secara pulsa.

Elektron atom neodymium akan tereksitasi ke aras yang lebih tinggi jika menyerap cahaya infra-merah dekat (near infra red) 703 nm dan 800 nm. Seperti halnya pada laser ruby, elektron akan menyebarkan kelebihan tenaga ke sistim kristal untuk menempati aras tenaga metastabil yang berada dibawah aras eksitasi (absorption bands). Adanya inversi populasi di aras tenaga metastabil ( $\tau$  230 mikrodetik) (Higgins, 1995) akan diikuti oleh adanya emisi utama foton berpanjang gelombang 1064 nm apabila terjadi loncatan elektron ke aras tenaga "intermediate" sebelum kembali ke keadaan aras dasarnya (gambar 6).

Seperti pada kebanyakan laser, transisi lain yang mungkin dalam Nd:YAG adalah adanya emisi pada panjang gelombang 1300 nm.

Pemompaan optik laser neodymium biasanya menggunakan lampu busur api berisi gas krypton karena sesuai dengan daerah serapan kuat dari Nd:YAG. Dengan adanya perkembangan laser semikonduktor dimungkinkan pemompaan secara lebih efisien pada laser Nd:YAG menggunakan dioda GaAlAs yang berdaya besar (diode array) berpanjang gelombang 800 nm (lihat gambar 2).

Atom neodymium mempunyai sifat yang berbeda dalam materi host selain YAG. Jika atom Nd berada dalam glass phosphate, emisi cahayanya akan bergeser menjadi 1053 nm dan melebar 60 kali dari pada jika atom Nd berada dalam YAG. Hal ini akan menaikkan batas ambang "lasing" dan kapasitas penimbunan tenaga dari laser Nd:glass, sehingga laser Nd:glass lebih sesuai jika digunakan untuk laser pulsa berdaya tinggi, bukan laser yang mengemisikan gelombang kontinu (CW).



Gambar 6. Aras tenaga laser neodmium (Hecht, 1992).

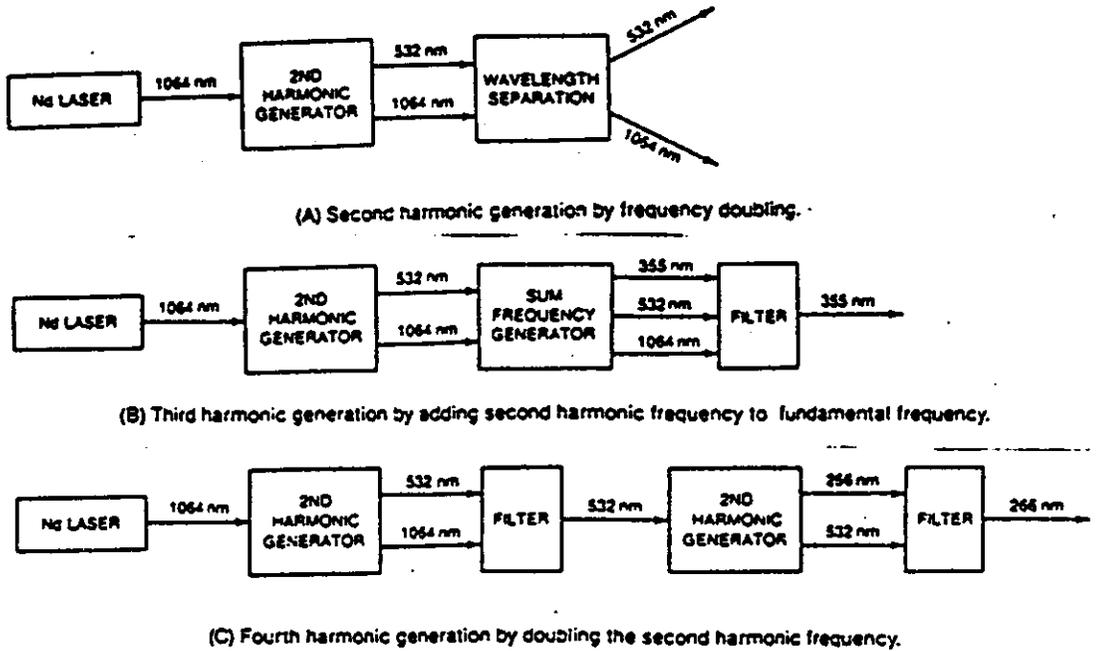
Untuk maksud tertentu, tambahan sistem optik kristal non-linear pada laser zat-padat Nd:YAG atau Nd:glass dapat berpengaruh terhadap panjang gelombang cahaya emisi. Penggunaan kristal non-linear pengganda frekuensi (Second Harmonic Generator-SHG) akan berkaitan dengan setengah panjang gelombang, sehingga jika keluaran laser neodmium berpanjang gelombang 1064 nm akan menjadi hijau (532 nm) setelah melewati kristal non-linear SHG ini (gambar 7).

Materi host lain yang sering dipakai dengan bahan aktif laser Nd antara lain : YLF (yttrium lithium fluoride), GSGG (gadolinium scandium gallium garnet) dan YALO (yttrium aluminate). Disamping materi dopant menggunakan Nd, dipakai pula erbium, thulium dan holmium sebagai bahan aktif laser (tabel 1).

#### IV.3. Laser Vibronik.

Kedua jenis laser zat-padat tersebut diatas (ruby dan Nd:YAG) hanya mengemisikan cahaya yang bersifat monokromatis, misalnya laser ruby hanya pada panjang gelombang 694.3 nm dan Nd:YAG hanya pada panjang

gelombang 1064 nm. Ada laser zat-padat jenis lain yang dapat mengemisikan cahaya polikromatis (dalam suatu daerah cakupan panjang gelombang kontinu) yaitu jenis laser "vibronic" (vibrational-electronic).

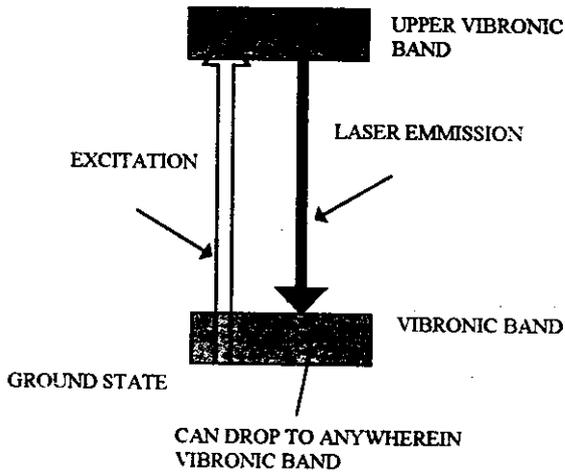


Gambar 7. Sistem laser Nd:YAG dengan kombinasi kristal non-linear (Hecht, 1992).

Type	Wavelength (nm)
Ruby	694.3
Nd:YAG	1064
Nd:glass	
Phosphate	1054
Silicate	1061
Nd:YLF	1047
	1053
Nd:GSGG	1061
Er:YAG	2940
Er:glass	1540
Er:YLF	850
	1230
	1730
	2800
Ho:YAG	2127
Ho:YSGG	2088
Ho:YALO	2850
	2920

Tabel 1. Laser zat-padat dan panjang gelombang emisi (Higgins, 1995)

Laser jenis vibronik ini mempunyai aras tenaga elektron dari bahan aktif laser yang dipengaruhi oleh adanya sub-aras tenaga vibrasi atom dalam kisi kristal. Hal ini menyebabkan aras tenaga atom bahan aktif laser melebar menjadi pita tenaga (energy band) (gambar 8).



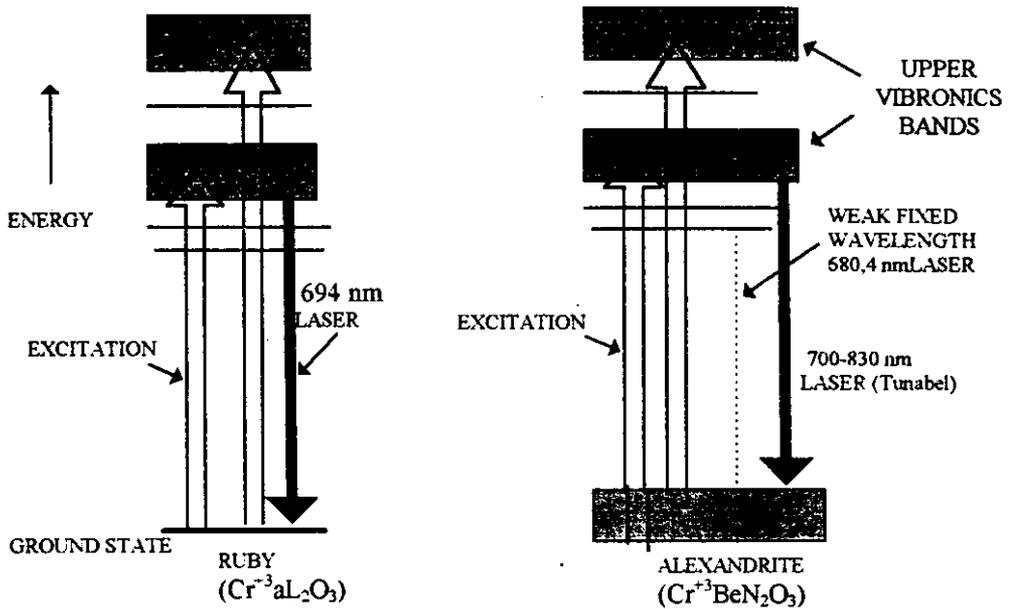
Gambar 8. Type aras tenaga laser viibronik.(Hecht, 1992).

Dalam hal ini transisi de-eksitasi dari pita tenaga eksitasi ke manapun dalam pita tenaga vibronik lebih rendah dapat terjadi, sehingga menghasilkan emisi cahaya dalam cakupan panjang gelombang polikromatis yang kontinu (range of wavelengths).

Dalam keadaan tanpa pengaturan optik, panjang gelombang emisi cahaya akan bebas bergantung pada posisi "gain" tertinggi dan apabila dengan pengaturan optik yang sesuai, panjang gelombang emisi dapat diatur pada posisi emisi cahaya berpanjang gelombang tertentu (tuning wavelength).

Jenis laser vibronik komersial yang pertama sukses adalah laser alexandrite ( $\text{Cr:chrysoberyl BeAl}_2\text{O}_4$ ). Aras tenaga laser ini mirip aras tenaga laser ruby, hanya laser ini mempunyai pita serapan di daerah panjang gelombang biru ( $\sim 380\text{ nm}$ ) dan merah ( $\sim 630\text{ nm}$ ) sehingga dapat dipompa dengan lampu kilat xenon atau laser dioda infra-merah dekat. Seperti halnya pada laser ruby,

laser alexandrite dapat digunakan sebagai laser berdaya tinggi dalam operasi pulsa. Akan tetapi laser alexandrite juga dapat dioperasikan secara gelombang kontinu (CW), tidak seperti halnya laser ruby yang hanya mampu beroperasi secara pulsa (gambar 9).



Gambar 9. Perbandingan aras tenaga laser ruby dengan laser alexandrite (Hecht, 1992).

Tanpa pengaturan rongga optik yang tepat, emisi cahaya laser alexandrite bergantung pada posisi “gain” tertinggi (~ 680 nm). Akan tetapi dengan pengaturan rongga optik yang sesuai, hanya panjang gelombang tertentu yang beresilasi menjadi cahaya laser (tuning) dengan daerah cakupan panjang gelombang emisi 700 - 830 nm (tuning range).

Sedangkan laser vibronik paling sukses secara komersial adalah laser titanium sapphire (Ti:Sapphire). Kehebatan laser ini terletak pada daerah cakupan panjang gelombang emisinya yang relatif lebar, yaitu sekitar panjang gelombang merah sampai dengan infra-merah dekat (670 nm - 1070 nm).

Pita tenaga serapan utama laser Ti:sapphire sekitar cahaya biru-hijau ~ 490 nm dengan aras tenaga metastabil berumur sangat pendek ~ 3.2 mikrodetik (Higgins, 1993). Hal ini menjadikannya tidak efisien apabila dipompa dengan lampu kilat. Laser jenis ini dipompa dengan menggunakan laser "hijau" ion-argon atau laser uap-metal (metal-vapour laser) jika beroperasi dalam gelombang kontinu (CW) dan jika beroperasi secara pulsa dipompa dengan Nd:YAG atau Nd:YLF berpengganda frekuensi (SHG).

Salah satu keistimewaan dari laser ini terletak pada pemakaian dibidang spektroskopi karena daerah cakupan panjang gelombang yang luas antara 670 nm - 1070 nm (tuning range ~ 300 nm) di daerah panjang gelombang merah sampai infra-merah dekat. Jika menggunakan kristal non-linear akan menjadikan emisi didaerah cakupan panjang gelombang biru (Messenger, 1990). Hal ini menjadikan adanya kompetisi pada daerah cakupan sekitar panjang gelombang tersebut dengan laser dye, mengingat untuk setiap jenis dye cakupan panjang gelombang emisi yang dihasilkannya hanya berkisar ~ 30 nm.

Selain laser alexandrite dan titanium:sapphire, laser zat- padat jenis vibronik yang dapat ditala lainnya adalah Co:MgF<sub>2</sub>, Li:CAF, Cr:emerald (tabel 2).

Vibronic lasers	
Type	Wavelength range (nm)
Ti:sapphire	670-1070
Alexandrite	700-830
Li:CAF	720-840
Cr:emerald	729-842
Nd:GSGG	740-850
Li:SAF	780-920
Cr:fosfente	1167-1345
Co:MgF <sub>2</sub>	1750-2500
Tm:YAG	1870-2160

Tabel 2. Laser vibronik dan daerah cakupan panjang gelombang emisinya (Higgins, 1995).

## V. PENUTUP

Dengan adanya sejumlah penemuan-penemuan baru dibidang perkembangan material zat-padat, semikonduktor dan optika nonlinear, maka semakin terbukalah perkembangan laser zat-padat dan sistim pemompaannya. Hal ini menjadikan laser zat-padat suatu pilihan yang cukup penting dalam pemakaian dibidang riset-riset ilmiah maupun spektroskopi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Hecht J, 1992, *Understanding Lasers : An Entry-Level Guide*, IEEE Press, NJ.
- Higgins T V, 1993, *Solid state laser materials search demands luck, art, and science*, Laser Focus World edisi April, p133.
- Higgins T V, 1995, *The three phases of lasers: solid state, gas and liquid*, Laser Focus World edisi Juli, p 73.
- Messenger H W, 1990, *Solid state lasers tune into diverse applications*, Laser Focus World edisi Juni, p 69.