

## IX. TEKNIK PENUMBUHAN SEMIKONDUKTOR

### 9.1 Kristal Semikonduktor

Piranti semikonduktor dibuat dari kristal dengan kualitas yang baik dan parameter yang khusus. Idealnya, kristal semikonduktor memiliki kemurnian yang tinggi dan tingkat kristalinitas yang sempurna. Suatu piranti elektronika secara khusus memerlukan material dengan parameter dasar seperti tingkat doping, energi gap, sifat optik dan sifat kelistrikan tertentu.

Gambar 9.1 memperlihatkan hubungan antara energi gap sebagai fungsi dari konstanta kisi untuk material semikonduktor unsur Si, Ge dan paduan III-V dan II-VI pada temperatur 300K. Paduan tiga unsur (*ternary*) atau empat unsur (*quaternary*) dapat diperoleh dengan membentuk “campuran” dengan komposisi yang tepat. Konstanta kisi merupakan parameter yang sangat penting saat dua jenis semikonduktor disambungkan melalui proses penumbuhan lapisan (*epitaxy*), ketidaksesuaian kisi harus diusahakan sekecil mungkin. Di antara semikonduktor paduan III-V, sistem sambungan AlGaAs/GaAs telah mendapat perhatian untuk aplikasi piranti elektronik. Kedua material ini memiliki ketidaksesuaian kisi yang sangat kecil, seperti terlihat pada gambar 9.1, ketidaksesuaian kisi GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  dengan ( $0 \leq x \leq 1$ ) hampir tidak bergantung pada kandungan Al. Hal yang sama juga diperlihatkan pada sistem AlGaSb/GaSb.

Gambar 9.1 Energi gap pada temperatur 300K terhadap konstanta kisi semikonduktor paduan, Si dan Ge.

Teknologi penumbuhan semikonduktor berkembang seiring dengan perkembangan aplikasi semikonduktor. Silikon masih mendominasi pasaran piranti elektronika sampai sekarang. Namun semikonduktor paduan, misalnya dari kelompok III-V, mulai menunjukkan beberapa keunggulan dibandingkan dengan silikon. Dengan semikonduktor paduan ini berbagai piranti seperti sambungan-beda dan multi sumur potensial dapat dibuat, dimana ini tidak mungkin jika masih menggunakan material silikon.

Teknik penumbuhan semikonduktor silikon dimulai dengan model penarikan. Teknik penumbuhan semikonduktor berkembang pesat dengan dikembangkannya semikonduktor paduan dan ditemukannya teknologi penumbuhan lapisan (*epitaxial growth*) seperti LPE (*Liquid-phase epitaxy*), VPE (*vapour-phase epitaxy*), MOCVD (*metalorganic chemical vapour deposition*) dan MBE (*molecular-beam epitaxy*). Pada bagian ini akan kita bahas masing-masing teknik penumbuhan ini.

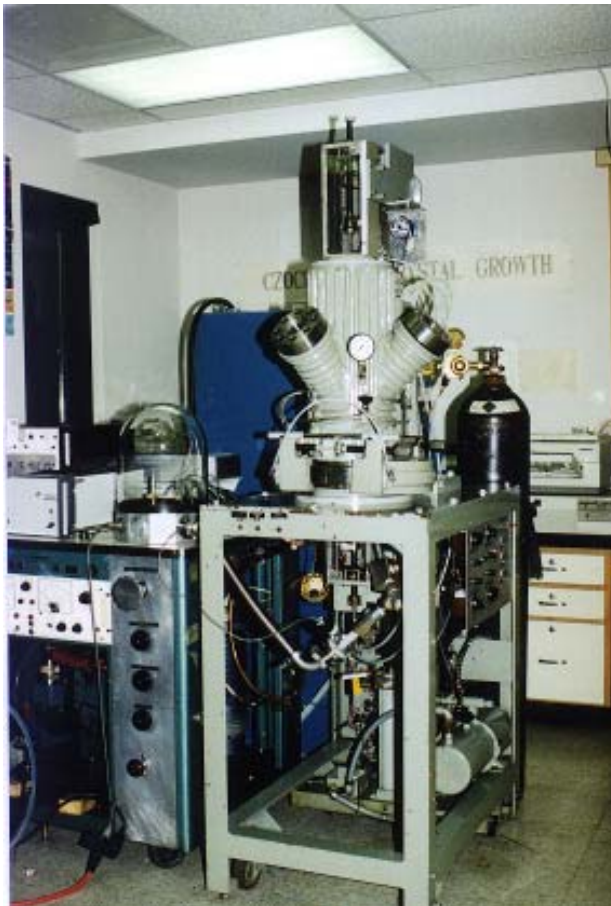
## 9.2 Teknik Czochralski

Teknik Czochralski dikenal juga sebagai teknik tarikan. Metode penumbuhan ini merupakan teknik standar untuk menghasilkan kristal silikon dan germanium. Peralatan penarikan kristal (*puller*) untuk penumbuhan kristal silikon memiliki tiga komponen utama (lihat gambar 9.2 dan 9.3), yaitu i) tungku, di dalamnya terdapat bahan dasar silika ( $\text{SiO}_3$ ), susceptor grafit, mekanik putar (searah jarum jam), elemen pemanas dan catu daya, ii) mekanik penarik kristal, termasuk di dalamnya pemegang “benih” kristal dan mekanik putar (berlawanan arah dengan jarum jam) dan iii) pengontrol ruang, di dalamnya terdapat sumber gas (misalnya argon), pengontrol aliran dan sistem keluaran.

Dalam proses penumbuhan, silikon polikristal ditempatkan pada tungku dan dipanaskan di atas temperatur leleh silikon. Keping material kristal-tunggal disebut sebagai “benih” kristal, dengan orientasi tertentu (misalnya  $\langle 111 \rangle$ ) ditempatkan pada pemegang benih. Benih kristal ini kemudian disentuhkan ke lelehan silikon. Benih kristal tersebut kemudian secara perlahan-lahan ditarik sambil diputar, sambil sedikit terjadi proses pengadukan lelehan sehingga memberikan temperatur yang lebih merata. Kecepatan penarikan biasanya dalam orde beberapa milimeter per menit. Bentuk kristal hasil penumbuhan dengan teknik ini diperlihatkan pada gambar 9.3-b.

Sejumlah pengotor kemungkinan masuk ke dalam batang kristal yang dihasilkan dan ini tentu tidak diharapkan. Untuk itu perlu dilakukan proses pemurnian. Kumpulan



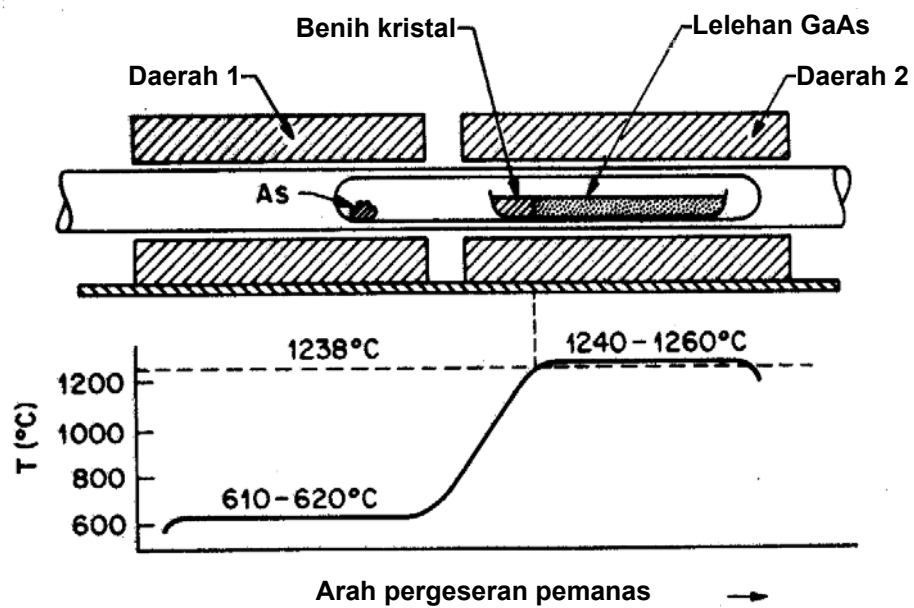


(a)



(b)

Gambar 9.3 a) Foto sistem penumbuh kristal dengan teknik Czochralski dan b) Batang kristal hasil penumbuhan.



Gambar 9.4 Skema alat penumbuh GaAs dengan teknik Bridgman beserta profil temperatur tungku (Sze, 1981).

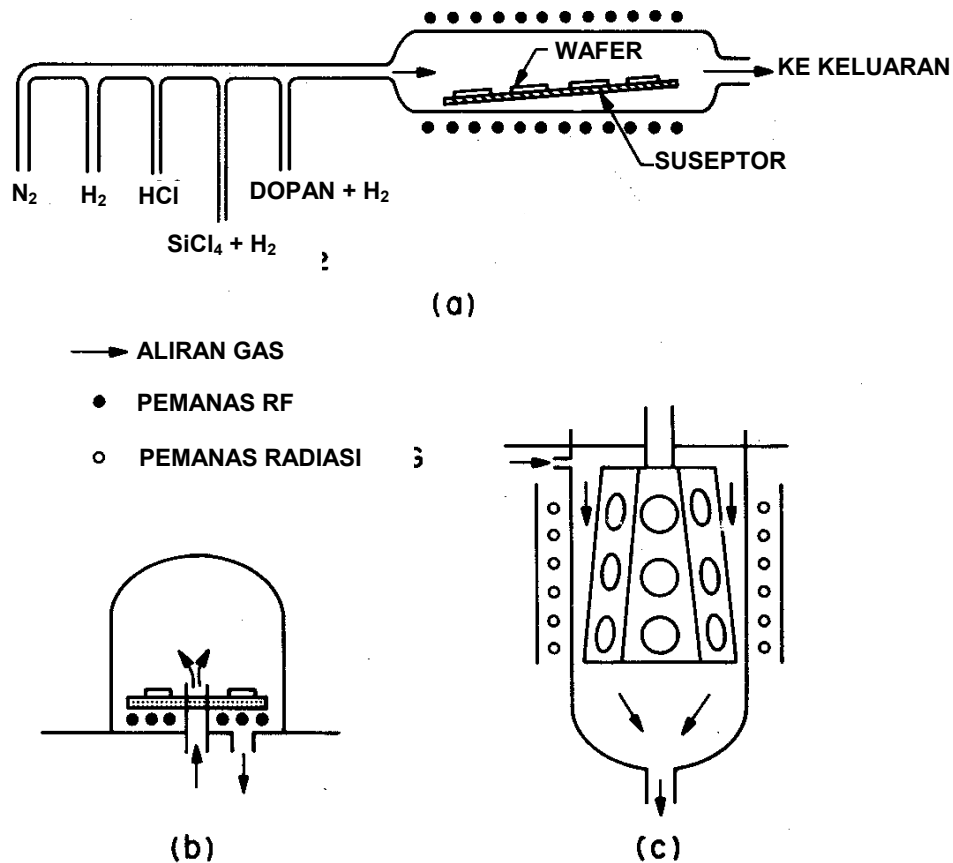
### 9.3 Teknik Bridgman

Pada gambar 9.4 diperlihatkan skema alat penumbuh teknik Bridgman beserta profil temperatur tungku, dimana dua-daerah tungku digunakan untuk menumbuhkan GaAs. Tungku sebelah kiri berada pada temperatur untuk menjaga kondisi “overpressure” ( $\sim 610^{\circ}\text{C}$ ) diperlukan oleh arsenik, sedangkan tungku sebelah kanan berada pada suhu di atas titik lebur GaAs ( $\sim 1240^{\circ}\text{C}$ ). Tabung penumbuh bagian luar terbuat dari *quartz* dan *boat*. Dalam pengoperasiannya, GaAs polikristal ditaruh pada *boat* dengan arsenik ditaruh pada ujung lain tabung. Foto tipe alat penumbuh kristal teknik Bridgman diperlihatkan pada gambar 9.5.

Saat tungku digerakkan ke kanan, lelehan akan mengalami pendinginan pada salah satu ujungnya. Biasanya benih ditempatkan pada ujung kiri untuk mendapatkan kristal dengan orientasi tertentu. Dengan pembekuan secara perlahan, kristal tunggal GaAs akan terbentuk. Seperti halnya pada teknik Czochralski, sejumlah atom impuritas dapat dengan sengaja ditambahkan ke lelehan sebagai dopan, sehingga kristal yang dihasilkan dapat bertipe-*n* atau bertipe-*p*.



Gambar 9.5 Foto alat penumbuh kristal teknik Bridgman.



Gambar 9.6 Tiga bentuk suseptor yang biasa digunakan untuk VPE model: a) Horizontal, b) Pemanggang kue dan c) Tong (Sze, 1981).

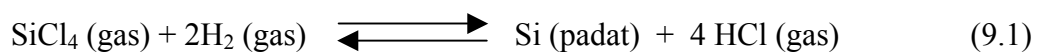
#### 9.4 VPE (*Vapour-Phase Epitaxy*)

Pada penumbuhan dengan cara pelapisan (*epitaxial*), substrat (kristal penyangga) berfungsi sebagai benih. Proses penumbuhan epitaksial berbeda dengan teknik penumbuhan cara lelehan. Pada teknik epitaksial, penumbuhan dapat dilakukan pada temperatur yang lebih rendah dari titik lebur material (sekitar 30-50% lebih rendah). Di antara teknik epitaksial, VPE paling banyak digunakan untuk menumbuhkan silikon. VPE juga digunakan untuk menumbuhkan kristal GaAs.

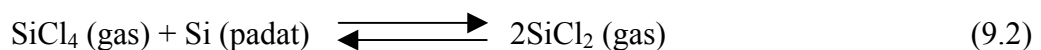
Gambar 9.6 memperlihatkan tiga bentuk suseptor untuk penumbuhan epitaksial. Nama suseptor disesuaikan dengan bentuk geometri reaktor, yaitu horizontal, "pemanggang kue" dan bentuk "tong" kesemuanya terbuat dari blok grafit. Suseptor pada epitaksial reaktor berfungsi seperti "tempat peleburan" pada penumbuh kristal dengan tungku. Suseptor tidak hanya berfungsi sebagai penyangga wafer (substrat)

tetapi juga pada reaktor pemanasan-induksi bagian ini juga berfungsi sebagai sumber energi panas agar terjadi reaksi.

Untuk penumbuhan kristal silikon dengan VPE digunakan empat sumber, yaitu  $\text{SiCl}_4$ ,  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ ,  $\text{SiHCl}_3$  dan  $\text{SiH}_4$ . Di antara sumber tersebut, silikon tetraklorida ( $\text{SiCl}_4$ ) paling banyak digunakan untuk industri. Temperatur reaksi biasanya sekitar  $1200^\circ\text{C}$ . Sumber silikon yang lain digunakan karena temperatur reaksi relatif lebih rendah. Penggantian atom hidrogen untuk setiap atom klorin dari silikon tetraklorida mengakibatkan penurunan temperatur reaksi sekitar  $50^\circ\text{C}$ . reaksi keseluruhan adalah sebagai berikut:

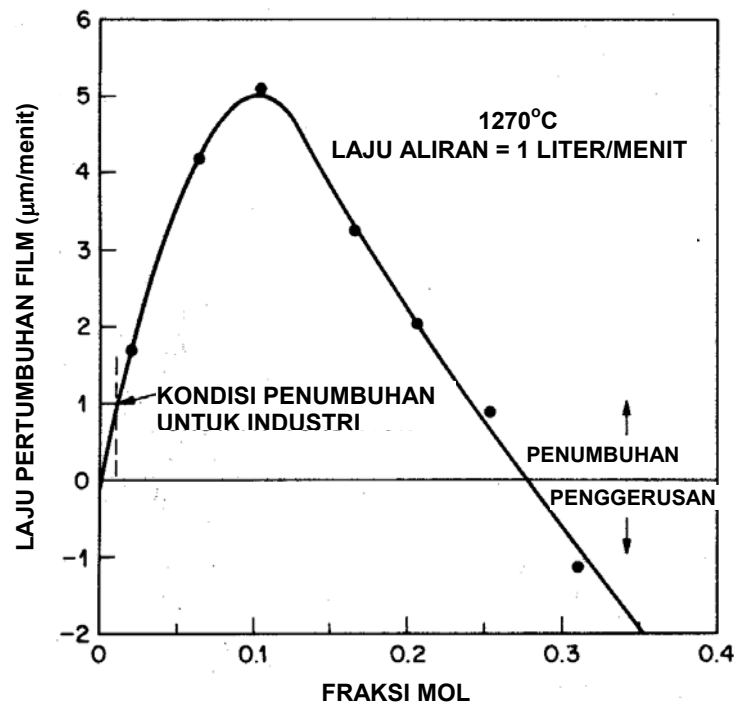


Selain reaksi seperti pada persamaan 9.1 berlangsung juga reaksi



Sebagai akibatnya, jika konsentrasi silikon tetraklorida terlalu tinggi, akan terjadi proses penggerusan bukannya penumbuhan. Gambar 9.7 memperlihatkan efek dari konsentrasi silikon tetraklorida dalam gas pada reaksi, dimana “fraksi mol” didefinisikan sebagai nisbah jumlah molekul dari suatu jenis tertentu terhadap jumlah total molekul. Perhatikan bahwa mula-mula laju penumbuhan naik secara linier dengan adanya kenaikan konsentrasi silikon tetraklorida. Saat konsentrasi silikon tetraklorida dinaikkan terus, maka akan dicapai harga laju penumbuhan maksimum. Sesudah harga tersebut, laju penumbuhan akan mulai turun dan akhirnya terjadi proses penggerusan. Biasanya, silikon ditumbuhkan pada daerah konsentrasi yang rendah seperti ditunjukkan pada gambar 9.7.

Reaksi pada persamaan 9.1 dapat berlangsung bolak-balik atau dua arah. Jika gas pembawa yang memasuki reaktor mengandung asam hidrokloride, penggerusan akan berlangsung. Penggerusan ini sebenarnya juga bermanfaat untuk proses pembersihan permukaan substrat silikon di dalam sistem (*in-situ*) sebelum dimulai proses penumbuhan kristal.



Gambar 9.7 Efek konsentrasi  $\text{SiCl}_4$  pada penumbuhan silikon secara epitaksial.

Pemberian dopan dilakukan bersamaan dengan  $\text{SiCl}_4$  pada saat penumbuhan silikon secara epitaksial (lihat gambar 9.6-a). Gas  $\text{B}_2\text{H}_6$  digunakan sebagai dopan tipe- $p$ , sedangkan  $\text{PH}_3$  dan  $\text{AsH}_3$  digunakan sebagai dopan tipe- $n$ . Gas hidrogen biasanya digunakan untuk mengontrol laju aliran sehingga sesuai dengan konsentrasi doping yang dikehendaki.

VPE untuk GaAs pada prinsipnya sama dengan yang ditunjukkan pada gambar 9.6-a. Karena GaAs akan mengalami dekomposisi menjadi galium dan arsenik, maka diperlukan dua sumber agar terjadi penumbuhan kristal.  $\text{As}_4$  biasanya digunakan sebagai komponen As dan  $\text{GaCl}_3$  digunakan sebagai komponen Ga. Secara keseluruhan, akan terjadi reaksi penumbuhan GaAs secara epitaksial sebagai



Bahan  $\text{As}_4$  diperoleh dari dekomposisi termal arsin ( $\text{AsH}_3$ ):



dan galium klorida merupakan hasil dari reaksi



Reaktan akan masuk ke reaktor melalui gas pembawa (biasanya hidrogen). Substrat/wafer GaAs biasanya berada pada interval temperatur 650 – 859°C. Reaktor harus berada pada tekanan arsenik yang cukup agar substrat dan lapisan yang tumbuh terhindar dari proses dekomposisi termal.

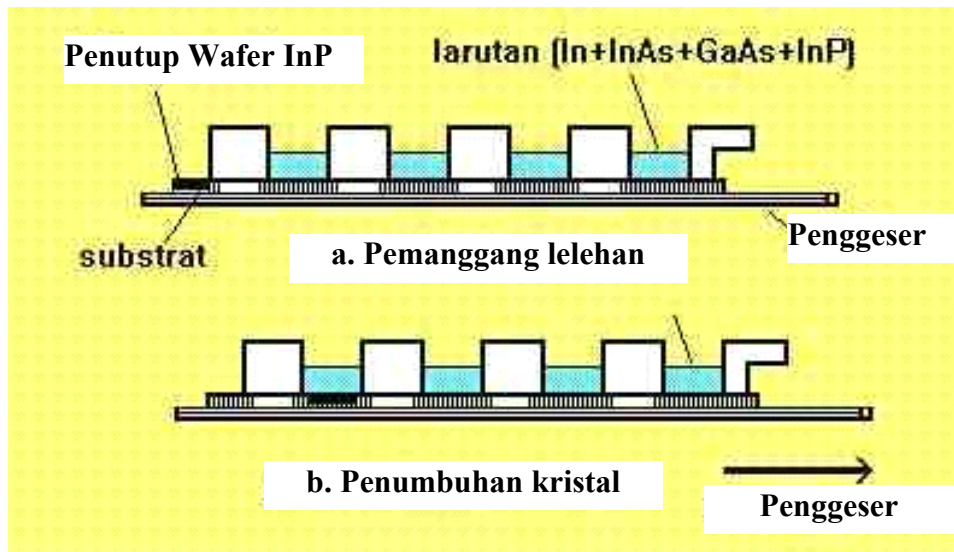
### 9.5 LPE (*Liquid-Phase Epitaxy*)

LPE merupakan metode penumbuhan lapisan kristal semikonduktor dari lelehan di atas substrat padat. Ini terjadi pada temperatur di bawah titik lebur semikonduktor yang terdeposisi. Semikonduktor larut dalam lelehan material lain. Pada kondisi mendekati kesetimbangan antara pelarutan dan deposisi, kristal tumbuh secara perlahan-lahan dan merata. Kondisi kesetimbangan tergantung pada temperatur dan konsentrasi semikonduktor yang larut dalam lelehan.

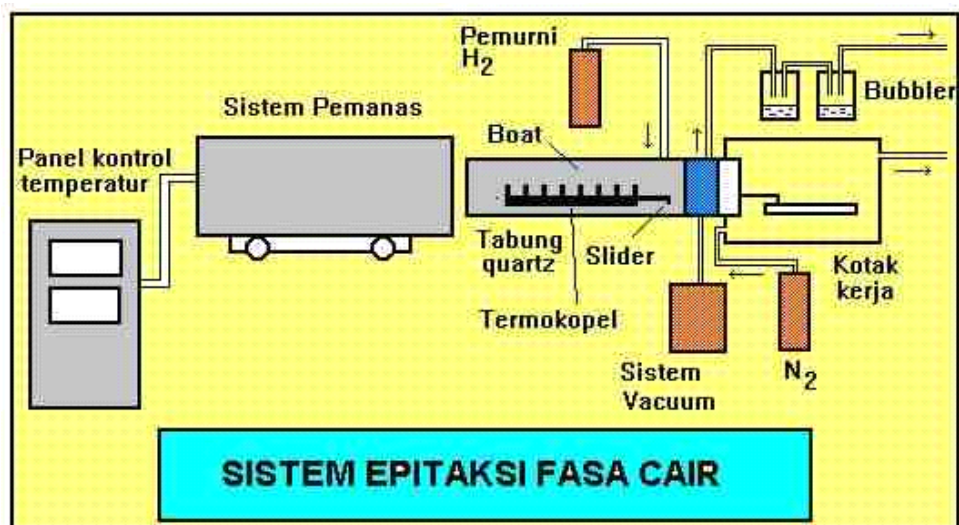
Teknik penumbuhan kristal dengan sistem epitaxy fasa cair (*liquid-phase epitaxy*) banyak digunakan untuk menumbuhkan material kelompok III-V seperti GaAs dan *ternary* maupun *quaternary*-nya. LPE digunakan untuk menumbuhkan lapisan tipis epitaxial dengan ketebalan  $\geq 0,2 \mu\text{m}$ . LPE banyak digunakan untuk menumbuhkan material dengan banyak lapisan dengan kontrol komposisi dan doping yang diperlukan.

Sistem LPE dapat berbasis tungku horizontal maupun vertikal. Sistem pemanasan dapat berupa elemen pemanas. Untuk sistem horizontal kontak antara lelehan dan substrat dapat dilakukan dengan menggeser sistem *boat*. Dengan melakukan kontak secara berulang-ulang sesuai dengan lapisan yang diinginkan, maka akan terbentuk multi-lapisan.

Salah satu contoh penggunaan teknik ini adalah untuk proses pembuatan lapisan jamak kristal/wafer untuk fotodetektor GaInAsP/InP. Wafer pembentuk divais didisain terdiri atas substrat kristal tunggal InP (Indium Phosphide) dengan tebal  $\sim 380 \mu\text{m}$ , *n-clad* dengan konsentrasi  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , lapisan intrinsik GaInAsP sebagai lapisan aktif dengan daerah kerja  $\sim 1.3 \mu\text{m}$  serta lapisan clad dengan konsentrasi  $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .



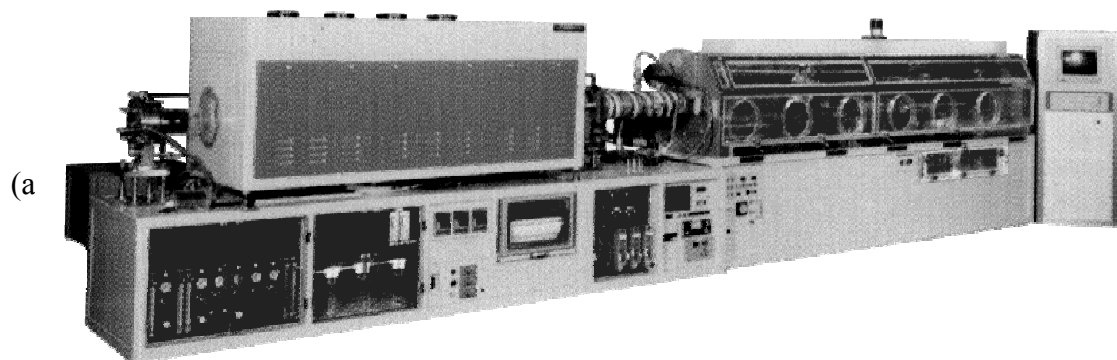
Gambar 9.8. Contoh tahapan proses penumbuhan lapisan GaInAsP/InP.



Gambar 9.9. Diagram sistem LPE .

Untuk menumbuhkan suatu lapisan multi komponen, sistem GaInAsP/InP misalnya, diperlukan suatu komposisi larutan yang khusus terdiri dari fraksi-fraksi atom pembentuknya (Ga, In, As dan P). Untuk menumbuhkan lapisan kristal fotodetektor, larutan jenuh disentuhkan pada substrat dan kemudian didinginkan di bawah suhu titik jenuh. Beberapa lapisan dapat ditumbuhkan dengan cara menyentuhkan larutan jenuh secara berurutan pada substrat dan mendinginkannya pada suatu suhu tertentu sesuai tebal yang dikehendaki.

Pada gambar 9.8 diperlihatkan satu contoh tahapan proses penumbuhan lapisan wafer untuk fotodetektor GaInAsP/InP. Proses penumbuhan ini berlangsung dalam suatu sistem reaktor yang terdiri dari suatu tabung quartz horisontal dan sistem pemanasnya, *growth boat* dengan beberapa lubang; tempat meleburnya material, serta suatu thermokopel terletak dibawah *boat* untuk memonitor suhu penumbuhan. Diagram sederhana dari sistem LPE diberikan pada gambar 9.9. Foto sistem LPE komersial untuk penumbuhan material semikonduktor multi-lapisan diperlihatkan pada gambar 9.10.

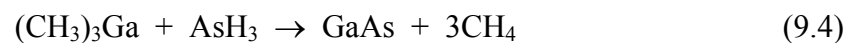


Gambar 9.10 Foto sistem LPE komersial untuk penumbuhan material semikonduktor multi-lapisan.

### 9.6 MOCVD (*Metalorganic Chemical Vapour Deposition*)

Lebih dari 25 tahun terakhir ini, telah banyak diusahakan penggunaan MOCVD yang mampu memenuhi pengontrolan komposisi dan tingkat pertumbuhan film kristal yang tepat untuk konsumsi pembuatan piranti elektronika. MOCVD mampu memproduksi beberapa paduan III-V pada peralatan yang sama dengan proses yang bervariasi untuk memenuhi kebutuhan penelitian maupun industri komersial. Beberapa desain MOCVD telah dikembangkan untuk mencapai hasil yang optimum. Pada tahun 1969, Manasevit telah memelopori sistesis senyawa semikonduktor untuk pertama kali dengan MOCVD yang kemudian hasil kerjanya terus dikembangkan oleh peneliti-peneliti lain di seluruh dunia.

Alkil dari logam kelompok III dan hidrida dari kelompok V biasanya digunakan sebagai bahan dasar untuk MOCVD. Uap gas-gas kimia dari bahan dasar dialirkan ke reaktor dan terjadi reaksi penumbuhan kristal. Untuk penumbuhan kristal GaAs terjadi reaksi



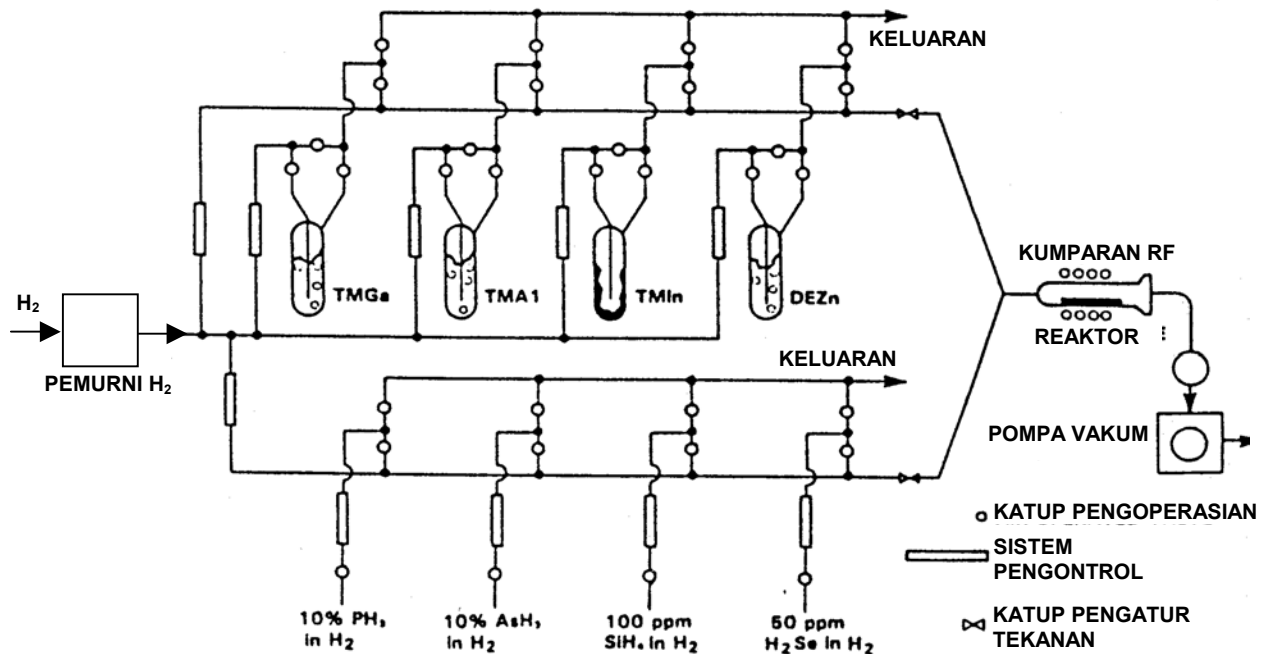
Untuk senyawa-senyawa MOCVD kelompok III-V yang lain dapat digunakan bentuk umum dari persamaan 9.4 berikut:



dimana  $\text{M} = \text{Al}, \text{Ga}$  atau  $\text{In}$ ;  $\text{R} = \text{CH}_3$  atau  $\text{C}_2\text{H}_5$  dan  $\text{E} = \text{P}, \text{As}$  atau  $\text{Sb}$ . Persamaan 9.5 merupakan bentuk yang lebih sederhana dan mengesampingkan kemungkinan langkah-langkah di tengah proses. Jika terdapat lebih dari satu persamaan (selain persamaan 9.5) yang terjadi secara simultan, maka semikonduktor yang terjadi merupakan senyawa campuran tipe  $\text{M}_{1-x}$  (misalnya  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ ). Komposisi dari campuran ( $x$ ) ditentukan oleh beberapa faktor diantaranya berupa difusi gas, langkah-langkah reaksi dan dinamika gas pada reaktor.

Sistem MOCVD memiliki empat komponen utama meliputi: i) sistem pengaturan gas termasuk fasilitas pengaturan sumber alkil dan hidrida dengan berbagai kran kontrol dan proses pencampuran gas, ii) rongga reaktor dimana reaksi pirolisis dan deposisi terjadi, iii) sistem pemanasan untuk memperoleh temperatur pirolisis dan iv) sistem pembuangan gas sisa.

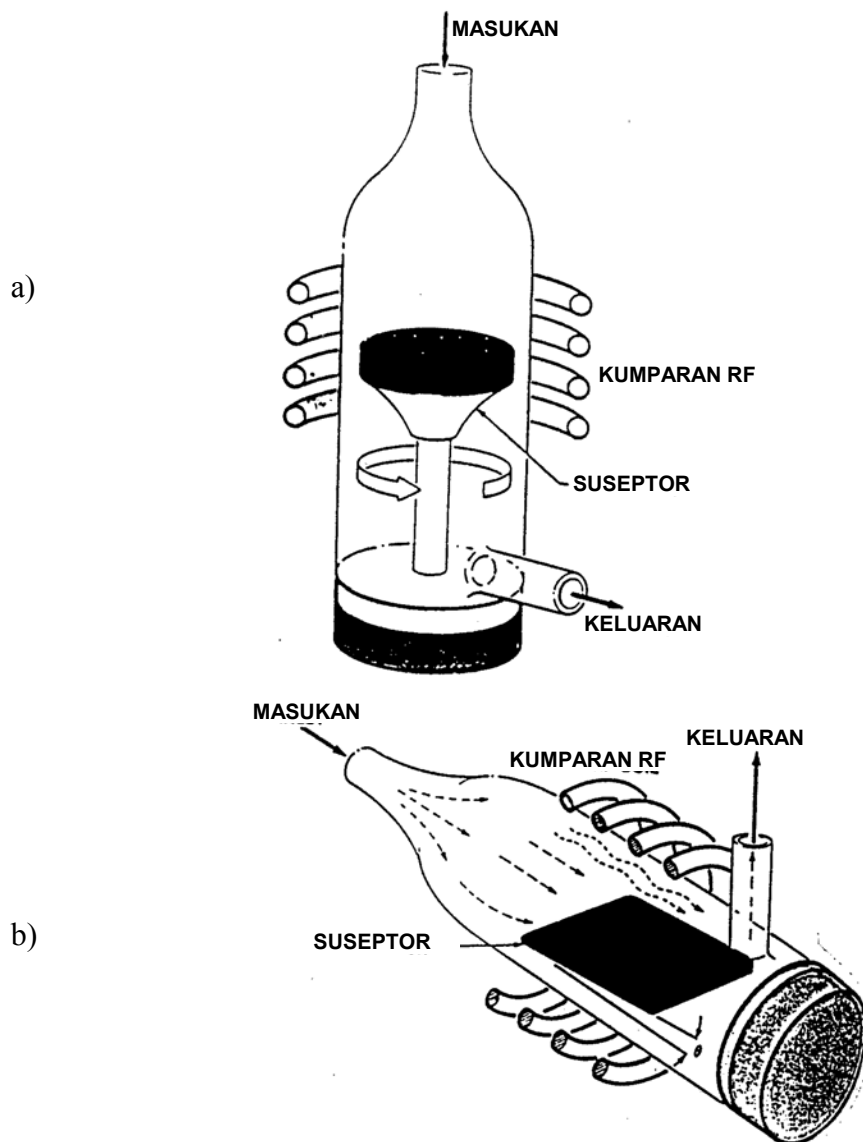
Sistem pengaturan gas berfungsi sebagai pengatur agar gas yang tersalur dapat diukur secara persis. Skema sistem pengaturan gas pada MOCVD diperlihatkan pada gambar 9.11.



Gambar 9.11 Skema rangkaian pengatur gas pada sistem MOCVD

Hidrogen ( $H_2$ ) dan nitrogen ( $N_2$ ) murni banyak digunakan sebagai pembawa gas reaktan. Sumber alkil ditempatkan pada ruangan dengan suhu yang dapat dikontrol dan besarnya gas yang mengalir diatur dengan sistem pengontrol elektronik. Aliran pembawa gas diasumsikan dalam keadaan jenuh berisi uap alkil, pemanasan akibat aliran gas atau pendinginan akibat penguapan tidak berpengaruh pada stabilitas temperatur. Sumber hidrida biasanya dicampur dengan  $H_2$  dan aliran gas diatur dengan pengontrol aliran elektronik. Untuk penumbuhan material yang sederhana, masih dimungkinkan pengaturan secara manual. Namun untuk penumbuhan material dengan banyak lapisan yang kompleks, sistem pengaturan dilakukan oleh komputer.

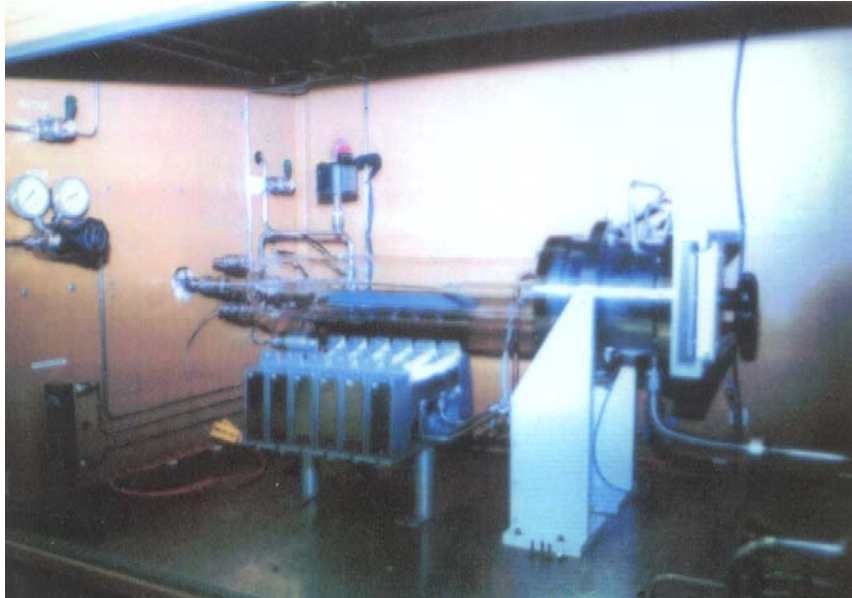
Rongga reaksi (reaktor) yang paling banyak digunakan berbentuk vertikal dan horizontal seperti terlihat pada gambar 9.12. Untuk konfigurasi vertikal, reaktan dialirkan dari ujung atas, kadang-kadang dengan perputaran sekitar 2 – 10 rpm. Reaktor vertikal lebih sulit dikontrol untuk memproduksi lapisan dengan permukaan relatif luas dan model aliran gas tidak mudah dibuat dibandingkan dengan reaktor horizontal.



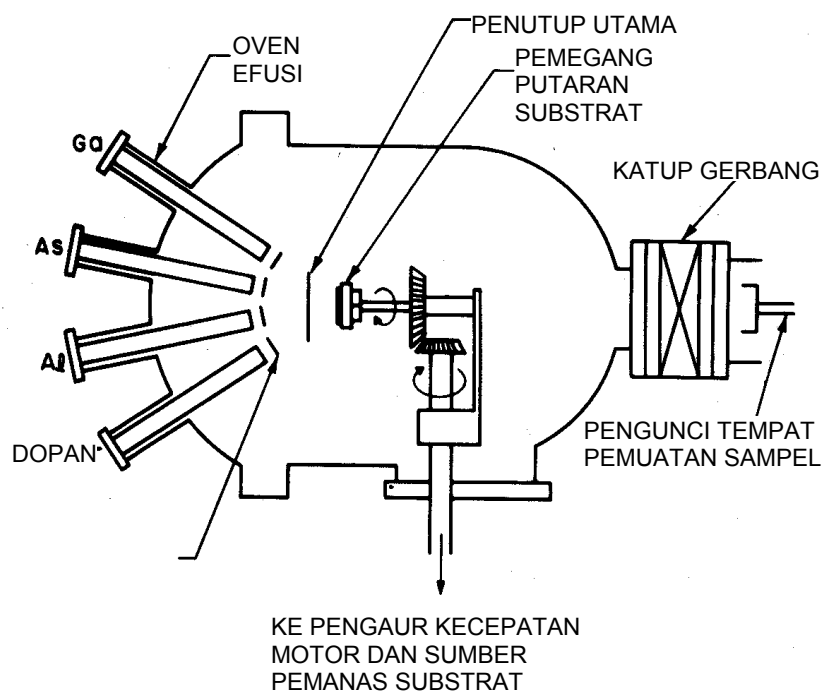
Gambar 9.12 Skema rongga reaksi (reaktor) MOCVD: a) model vertikal dan b) model horizontal

Desain reaktor horizontal menggunakan susceptor grafit persegi panjang yang dapat diatur letaknya terhadap aliran gas agar terjadi peningkatan homogenitas. Kadang-kadang dipasang juga pemantul quartz untuk mengurangi aliran turbulen. Konfigurasi bentuk geometri reaktor lain kadang-kadang juga digunakan. Beberapa reaktor komersial seperti terlihat pada gambar 9.13 telah banyak digunakan.

Suseptor dapat dipanaskan dengan beberapa cara untuk menghindari pemanasan langsung sekitar permukaan. Induksi RF biasanya digunakan untuk maksud tersebut. Sebagai sumber pemanas biasanya digunakan lampu quartz-halogen. Sebagai alternatif dapat digunakan hambatan pemanas di bawah suseptor.



Gambar 9.13 Foto reaktor MOCVD komersial model horizontal

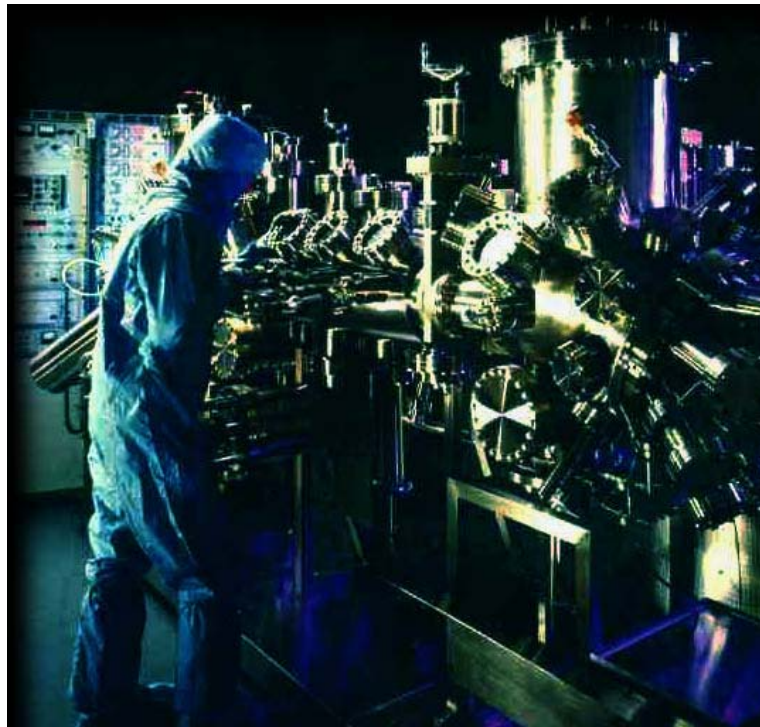


Gambar 9.14 Skema sistem penumbuh kristal MBE

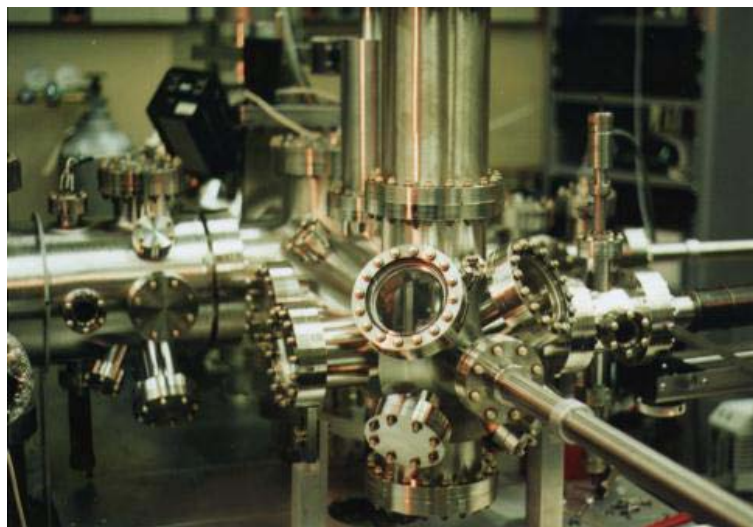
### 9.7 MBE (*Molecular-Beam Epitaxy*)

Teknik MBE merupakan proses penumbuhan kristal epitaksial melibatkan reaksi satu atau lebih berkas atom atau molekul dengan permukaan kristal di bawah kondisi vakum yang sangat tinggi ( $\sim 10^{-10}$  Torr). Dengan metode MBE kita dapat mengontrol baik komposisi maupun tingkat doping dengan presisi sangat tinggi. Kristal tunggal lapisan kompleks dengan dimensi dalam orde atom dapat dibuat dengan MBE. Pada prinsipnya MBE termasuk metode penumbuhan dengan evaporasi.

a)



b)



Gambar 9.15 Foto sistem MBE: a) Menunjukkan dimensi sistem secara keseluruhan dan b) Salah satu bentuk ruang penumbuh (*chamber*).

Skema sistem penumbuh kristal MBE untuk GaAs dan material kelompok III-V diperlihatkan pada gambar 9.14. Oven efusi dibuat terpisah masing-masing untuk galium, arsenik, dan dopan. Semua oven efusi ditempatkan pada ruang dengan tingkat kevakuman sangat tinggi ( $\sim 10^{-10}$  Torr). Temperatur pada masing-masing oven disesuaikan dengan tingkat penguapan yang diinginkan. Pemegang substrat berputar secara kontinu untuk mendapatkan lapisan epitaksi yang merata. Pengunci tempat pemuatan sampel digunakan untuk menjaga agar tekanan dapat tetap dipertahankan saat dilakukan penggantian substrat. Foto sistem MBE diperlihatkan gambar 9.15

Terdapat dua cara pembersihan permukaan kristal di dalam ruangan penumbuh MBE. Pemanasan dengan temperatur tinggi akan membuat oksida terdekomposisi dan mengangkat pengotor yang terserap pada permukaan wafer. Teknik lainnya adalah dengan menggunakan berkas ion gas energi rendah untuk membersihkan permukaan diikuti dengan pemanasan suhu-rendah untuk mengatur kembali struktur kisi pada permukaan.

MBE dapat digunakan untuk memberikan dopan yang lebih bervariasi dibandingkan pada teknik VPE, dan profil doping dapat dikontrol secara lebih baik. Namun proses doping sama dengan yang terjadi pada VPE. Pengaturan profil doping dilakukan dengan mengatur fluks dopan relatif terhadap fluks atom galium (untuk penumbuhan GaAs).

Temperatur substrat untuk MBE berkisar antara 400 sampai 900°C dengan laju pertumbuhan antara 0,001 – 0,3  $\mu\text{m}/\text{menit}$ . Karena proses penumbuhan pada temperatur rendah dan laju pertumbuhan kristal sangat lambat, profil doping dan komposisi yang unik pada MBE tidak dapat dilakukan dengan teknik konvensional LPE maupun VPE. Struktur yang kompleks seperti *superlattice* (misalnya untuk material  $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  dengan ketebalan masing-masing lapisan kurang dari 100 Å), sambungan-beda MESFET dapat ditumbuhkan dengan teknik ini.