

# Studi Pengaruh Rasio masukan sumber V/III Terhadap Distribusi Sb Dan Karakteristik Kelistrikan Lapisan Tipis GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> yang Ditumbuhkan dengan Teknik MOCVD

Andi Suhandi <sup>1)</sup>, Pepen Arifin <sup>2)</sup>, Maman Budiman <sup>2)</sup>, dan Moehamad Barmawi <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Jurusan Fisika FPMIPA UPI Bandung

<sup>2)</sup> Kelompok keahlian FISMATEL, Prodi Fisika FMIPA ITB Bandung

e-mail : andisuhandi@upi.edu

## Abstrak

Telah dilakukan studi tentang kebergantungan distribusi Sb dalam lapisan GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> dan karakteristik kelistrikan lapisan GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> yang ditumbuhkan dengan teknik MOCVD menggunakan sumber metalorganik TMGa, TDMAAs dan TDMASb terhadap rasio masukan sumber V/III. Komposisi Sb dalam lapisan GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> ditentukan dengan menggunakan aturan Vegard, berdasarkan pergeseran puncak intensitas difraksi sinar-X. Karakteristik kelistrikan lapisan GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> diinvestigasi melalui pengukuran efek Hall Van der Pauw pada temperatur ruang. Hasil investigasi menunjukkan bahwa komposisi unsur Sb yang terinkorporasi dalam film GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> sangat ditentukan oleh rasio masukan sumber V/III yang digunakan. Untuk penggunaan rasio masukan sumber V/III yang hampir sama dengan satu, ternyata nilai koefisien distribusi Sb yang merupakan rasio komposisi Sb dalam lapisan GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> terhadap fraksi masukan uap sumber Sb juga mendekati satu. Koefisien distribusi Sb menurun terhadap kenaikan rasio masukan sumber V/III untuk rasio masukan V/III > 1. Seluruh sampel lapisan tipis GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> tanpa doping merupakan semikonduktor tipe-p dengan konsentrasi hole berorde 10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup>. Rentang nilai mobilitas pembawa muatan berkisar antara 200–430 cm<sup>2</sup>/V.s bergantung pada rasio masukan sumber V/III dan komposisi Sb. Nilai mobilitas pembawa muatan paling tinggi terjadi pada penggunaan rasio masukan sumber V/III mendekati 1.

**Kata kunci :** GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>, MOCVD, Rasio masukan sumber V/III, Komposisi Sb, Karakteristik kelistrikan.

## Abstract

The study of the dependence of the Sb distribution in GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> films and the electrical properties of the GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> films grown by MOCVD technique with using TMGa, TDMAAs, and TDMASb to the V/III source input ratio has been done. The Sb solid composition in GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> film was determined by using Vegard's law from the shift of the peak intensity of X-Ray diffraction pattern. Electrical properties of the GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> films were investigated via room temperature Hall effect measurement. The results suggest that the concentration of Sb incorporation into the GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> films is strongly affected by V/III source input ratio. For V/III source input ratio of unity, the Sb distribution coefficient, which is the ratio of the Sb composition in GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> solid to the Sb vapor input mole fraction, is nearly unity. The Sb distribution coefficient is decrease with increasing of V/III source input ratio, for V/III input ratio > 1. Unintentionally doped GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> films were p-type semiconductors with background hole concentrations of approximately 10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup>. The range of carrier mobility are between 200 – 430 cm<sup>2</sup>/V.s, depending on the V/III input ratio, and the Sb composition. The highest carrier mobility can be reached at V/III input ratio of approximately .

**Keywords:** GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>, MOCVD, V/III source input ratio, Sb composition, Electrical properties.

## 1. Pendahuluan

Galium-arsenat-antimonat ( $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ) merupakan *alloy* hasil perpaduan elemen-elemen golongan III dan V yang memiliki nilai celah pita energi dalam rentang 1,42 - 0,72 eV tergantung dari komposisi Sb di dalamnya. Kondisi ini membuat material  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  begitu potensial untuk aplikasi divais-divais optik yang beroperasi pada daerah panjang gelombang besar dan divais-divais *switching* berkecepatan ultra tinggi (Wu *et al.*, 2004). *Quantum Well* berbasis  $\text{GaAsSb}/\text{GaAs}$  memiliki potensi untuk aplikasi laser yang dapat memancarkan foton dengan panjang gelombang 1,3 - 1,55  $\mu\text{m}$  yang sangat dibutuhkan untuk system komunikasi serat optik (Jiang *et al.*, 2004). Struktur hetero  $\text{GaAsSb}/\text{InP}$  sangat cocok digunakan sebagai lapisan basis pada Transistor Bipolar dengan struktur persambungan hetero (*Hetrojunction Bipolar Transistors = HBTs*) generasi yang akan datang, karena sistem persambungan hetero ini memiliki struktur pita energi tipe-II yang merupakan struktur pita ideal untuk struktur HBTs (Oda *et al.*, 2004).

*Alloy*  $\text{GaAsSb}$  memiliki rentang komposisi dimana fase dari kedua material *binary* penyusunnya yaitu  $\text{GaAs}$  dan  $\text{GaSb}$  tidak bisa dicampur (*miscibility gap*) yang cukup lebar yaitu  $0,2 < x < 0,8$  pada temperatur 600°C. Dengan kondisi ini *alloy*  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  tidak mungkin untuk ditumbuhkan dalam rentang komposisi *miscibility gap* nya dengan menggunakan teknik penumbuhan yang berada dalam kesetimbangan termodinamika, seperti *Liquid Phase Epitaxy* (LPE) dan hanya mungkin ditumbuhkan dengan menggunakan teknik penumbuhan yang tidak berada dalam kesetimbangan termodinamika, seperti *Metalorganic Chemical Vapour Deposition* (MOCVD) (Shin *et al.*, 1997).

Dalam penumbuhan *ternary alloy* yang mengandung dua elemen golongan V seperti  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ , biasanya terjadi kesulitan dalam pengontrolan komposisi masing-masing elemen secara tepat. Hal ini dikarenakan terjadinya kompetisi diantara atom-atom As dan Sb dalam proses inkorporasi untuk pembentukan ikatan pada lapisan tipis. Telah dilaporkan bahwa komposisi dari dua elemen golongan V tidak bergantung secara linier pada rasio masukan sumber-sumber elemen golongan V, sehingga sangat penting untuk dapat memahami bagaimana pengontrolan komposisi yang akurat dalam penumbuhan film  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  (Wu *et al.*, 2004). *Pyrolysis* dari sumber metalorganik dalam bentuk *Trimethyl* (TM) akan menghasilkan radikal-radikal *methyl* yang dapat teradsorpsi pada permukaan substrat, dan jika spesies golongan V jumlahnya kurang maka dekomposisi dari radikal-radikal ini akan menghasilkan spesies *carbene* ( $=\text{CH}_2$ ) yang memiliki ikatan kuat pada permukaan, dan sebagai akibatnya karbon akan terinkorporasi pada film dan berperilaku sebagai dopan tipe-p. Untuk mereduksi tingkat inkorporasi karbon ini dapat dilakukan dengan cara memperbesar rasio masukan sumber V/III (Abernathy *et al.*, 1991).

Dalam paper ini dipaparkan hasil-hasil investigasi tentang pengaruh rasio masukan sumber V/III terhadap komposisi sb dalam lapisan tipis  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  dan karakteristik kelistrikan film tipis  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  yang ditumbuhkan dengan metode MOCVD menggunakan sumber-sumber metalorganik golongan III berupa *Trimethylgallium* (TMGa), dan golongan V berupa *Trisdimethylaminoarsenic* (TDMAAs) dan *Trisdimethylaminoantimony* (TDMASb). TDMAAs dan TDMASb dapat melepaskan atom-atom As dan Sb pada temperatur yang cukup rendah (300-450°C) (Yamamoto *et al.*, 1997). Temperatur dekomposisi dan nukleasi yang relatif rendah sangat menguntungkan untuk fabrikasi struktur nano dengan MOCVD (Kuramochi *et al.*, 2002).

## 2. Eksperimen

Lapisan tipis  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  ditumbuhkan dengan teknik MOCVD tipe vertikal pada basis tekanan reaksi sekitar 50 Torr. Reaktan-reaktan golongan III dan V dasarurkan ke ruang reaksi (*chamber*) melalui pipa-pipa *stainless-steel* yang terpisah, hal ini dilakukan untuk menghindari terjadinya reaksi parasitik pada pipa-pipa saluran. Sebagai gas pembawa digunakan hidrogen ( $\text{H}_2$ ) yang sebelumnya telah dimurnikan dengan cara didifusikan melalui membran palladium. Untuk mengontrol tekanan uap sumber-sumber metalorganik, TMGa, TDMAAs, dan TDMASb disimpan dalam *bubbler-bubbler* yang temperaturnya dikontrol secara ketat, TMGa dikontrol pada temperatur  $-10^\circ\text{C}$  hingga  $-12^\circ\text{C}$ , TDMAAs dan TDMASb pada temperatur  $24^\circ\text{C}$ . TMGa, TDMAAs, dan TDMASb yang digunakan memiliki tingkat kemurnian yang tinggi (99,999%) sehingga tidak perlu dilakukan proses pemurnian dalam penggunaannya.

Sebagai media tumbuh digunakan substrat *Semi-Insulating GaAs* (SI-GaAs) dengan orientasi (100). SI-GaAs dipilih sebagai substrat karena dua alasan, yaitu ; pertama, karena basis dari material  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  adalah GaAs sehingga ketidaksesuaian parameter kisi antara material ini dengan substrat GaAs tidak terlalu besar yaitu maksimum 7% (Nooh, 2003), kedua, sifat insulatornya diperlukan untuk pengukuran karakteristik kelistrikan lapisan tipis  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ . Sebelum dipergunakan, terlebih dahulu substrat dibersihkan dari debu dan lemak dengan cara dicuci menggunakan aseton, metanol, dan *Deionized-Wate (DI-water)*, masing-masing selama 10 menit. Selanjutnya dilakukan pengetsaan menggunakan larutan  $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{DI-Water}$  dengan perbandingan 3 : 1 : 1 selama 2 menit. Setelah itu dibilas kembali dengan *DI-Water* dan dikeringkan dengan cara menyemprotkan gas nitrogen, kemudian dengan segera dimasukkan ke dalam reaktor agar terhindar dari oksidasi.

Proses penumbuhan dilakukan pada temperatur  $540^\circ\text{C}$ ,  $560^\circ\text{C}$ , dan  $580^\circ\text{C}$  sesuai dengan rasio masukan sumber V/III yang digunakan. Parameter penumbuhan lainnya ditunjukkan dalam tabel 1. Temperatur penumbuhan ini dipilih atas dasar hasil optimasi penumbuhan film tipis GaAs sebagai material basis untuk penumbuhan  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  yang menunjukkan bahwa nilai optimum dari temperatur untuk setiap penggunaan rasio masukan sumber V/III, terjadi pada temperatur maing-masing tersebut.

Tabel 1. Parameter penumbuhan lapisan tipis  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$

Sampel	Fraksi masukan uap sumber Sb	Rasio masukan sumber V/III (temperatur penumbuhan)
#1a,b,c	0,00	a : 1,2 ( $540^\circ\text{C}$ )
#2a,b,c	0,14	b : 3,0 ( $560^\circ\text{C}$ )
#3a,b,c	0,42	c : 4,8 ( $580^\circ\text{C}$ )
#4a,b,c	0,68	
#5a,b,c	1,00	

Fraksi masukan uap sumber Sb (TDMASb) ditentukan berdasarkan formula ( $x_v = [\text{TDMASb}]/[\text{TDMAAs}]+[\text{TDMASb}]$ ). Peningkatan fraksi masukan uap TDMASb dilakukan sedemikian rupa sehingga rasio masukan sumber V/III terjaga konstan.

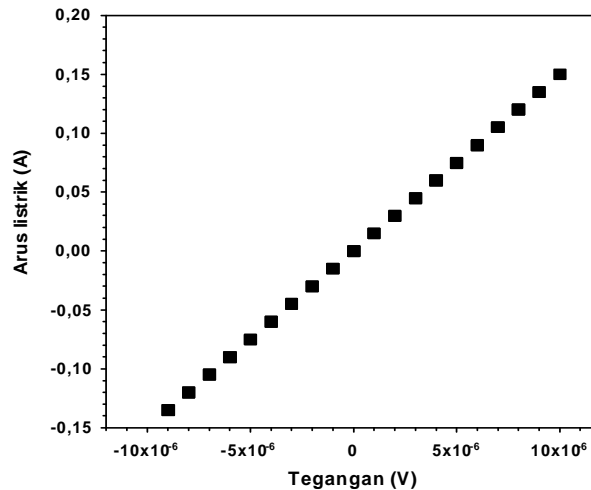
Pengaruh rasio masukan sumber V/III terhadap komposisi Sb dalam lapisan tipis  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  dan karakteristik kelistrikan lapisan tipis  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  yang dihasilkan, diinvestigasi melalui karakterisasi kekristalan dan kelistrikannya. Komposisi Sb dalam lapisan  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  ditentukan dengan menggunakan persamaan Vegard berdasarkan pergeseran pola puncak difraksi sinar-X untuk bidang tertentu ketika komposisi Sb dalam lapisan  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  meningkat, seperti berikut : (Basignana *et al.*, 1997)

$$x_{\text{pada tan}} = \frac{a(\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x) - a(\text{GaAs})}{a(\text{GaSb}) - a(\text{GaAs})} \quad (1)$$

disini  $a$  adalah parameter kisi. Seperti halnya material-material basisnya, yaitu GaAs dan GaSb yang berstruktur kubik, kristal  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  juga berstruktur kubik, (Nooh, 2003). Untuk kristal kubik, parameter kisinya dapat ditentukan melalui persamaan : (Narayanan dan Norton, 1998)

$$a = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (2)$$

dengan  $\lambda$  adalah panjang gelombang sinar-X yang digunakan, dan  $\theta$  adalah sudut difraksi. Untuk mendapatkan gambaran pola difraksi sinar-X dari sampel dilakukan karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD) dengan menggunakan radiasi  $\text{Cu K}\alpha$  ( $\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$ ) (Philips PW3710), sedangkan karakteristik kelistrikan diukur menggunakan metode efek Hall dengan geometri Van der Pauw pada suhu ruang. Sebagai kontak logam dipergunakan emas (Au).



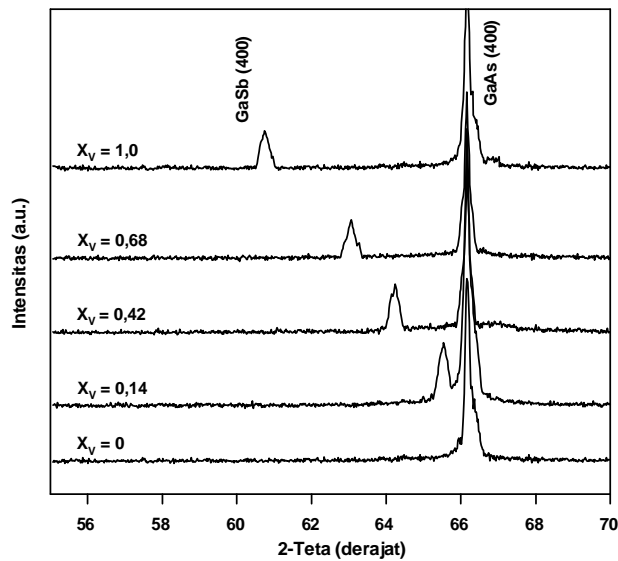
Gambar 1. Karakteristik I-V dari sistem kontak  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x/\text{Au}$

Gambar 1 menunjukkan karakteristik arus-tegangan dari sistem kontak  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x/\text{Au}$ . Tampak bahwa terjadi hubungan yang linier antara arus dan tegangan. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik sistem kontak  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x/\text{Au}$  adalah ohmik, sebagaimana yang disyaratkan dalam pengukuran efek Hall.

### 3. Hasil dan pembahasan

Gambar 2 menunjukkan pola difraksi sinar-X untuk sampel-sampel lapisan tipis  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  yang ditumbuhkan pada temperatur  $580^\circ\text{C}$  dengan rasio masukan sumber V/III sebesar 4,8. Seluruh sampel lapisan tipis  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  yang ditumbuhkan

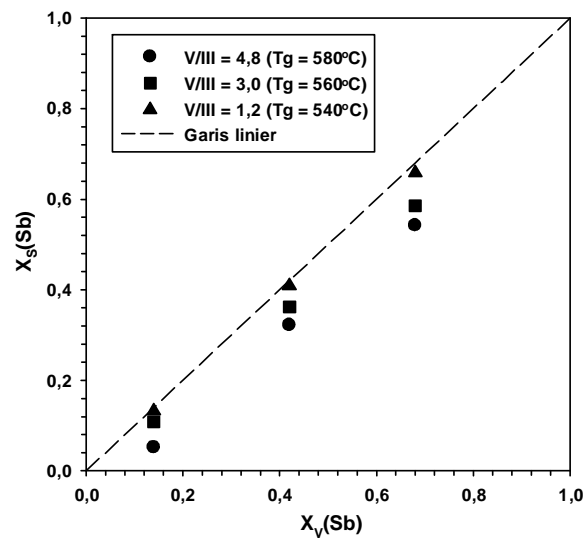
memiliki orientasi kristal tunggal yaitu pada bidang (200) dan (400) [pada gambar hanya diperlihatkan bidang (400)] mengikuti orientasi kristal dari substrat SI-GaAs (100).



Gambar 2. Pola XRD untuk lapisan tipis  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  yang ditumbuhkan pada  $580^\circ\text{C}$  dengan rasio masukan V/III 4,8 untuk setiap fraksi uap TDMASb

Terjadi pergeseran sudut puncak orientasi bidang kristal (400) ke arah  $2\theta$  yang semakin kecil ketika fraksi uap sumber Sb ( $x_v$ ) ditingkatkan. Berdasarkan aturan Vegard, hal ini menunjukkan terjadinya peningkatan nilai parameter kisi ( $a$ ) kristal  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  dari nilai parameter kisi kristal GaAs ke arah nilai parameter kisi kristal GaSb. Selanjutnya dengan menggunakan persamaan Vegard dapat ditentukan komposisi sb ( $x_s$ ) dalam lapisan  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  untuk masing-masing fraksi masukan uap sumber Sb ( $x_v$ ).

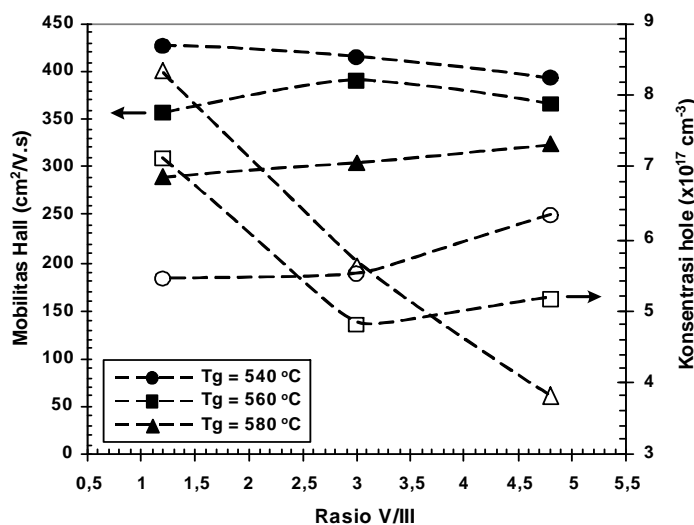
Gambar 3 memperlihatkan grafik hubungan antara fraksi masukan uap sumber Sb ( $x_v$ ) dengan komposisi Sb yang terikat dalam padatan lapisan tipis  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  ( $x_s$ ) untuk rasio masukan sumber V/III yang berbeda. Tampak bahwa terjadi perbedaan kuantitas antara fraksi masukan uap sumber Sb ( $x_v$ ) dengan fraksi Sb yang terikat dalam lapisan  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  ( $x_s$ ). Semakin besar rasio masukan sumber V/III yang digunakan, ternyata perbedaan antara fraksi padatan Sb ( $x_s$ ) yang terikat dalam kristal  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  dengan fraksi masukan uap sumber Sb ( $x_v$ ) semakin besar. Hasil serupa ini juga diperoleh oleh Cooper dan Cerng (Stringfellow, 1999). Pada penggunaan rasio masukan sumber V/III mendekati satu, hampir tidak terjadi kompetisi antara atom As dan Sb, karena seluruh atom golongan V tersebut memiliki pasangan atom Ga. Tetapi pada penggunaan rasio masukan sumber V/III yang jauh lebih besar dari satu, yang berarti atom-atom golongan V jumlahnya jauh lebih besar dari atom Ga, maka akan terjadi kompetisi diantara atom-atom golongan V (As dan Sb) untuk berikatan dengan Ga. Karena *driving force* untuk formasi GaAs lebih besar maka inkorporasi atom Sb dalam *ternary* akan sulit. Sebagai akibatnya fraksi Sb dalam lapisan  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  akan semakin kecil ketika rasio masukan sumber V/III yang digunakan terus ditingkatkan.



Gambar 3. Komposisi Sb yang terikat dalam lapisan  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  sebagai fungsi fraksi masukan uap sumber Sb (TDMASb)

Gambar 4 menunjukkan kebergantungan konsentrasi dan mobilitas pembawa muatan terhadap rasio masukan sumber V/III untuk berbagai temperatur penumbuhan. Seluruh sampel lapisan tipis  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  tanpa doping yang ditumbuhkan merupakan semikonduktor tipe-p. Terbentuknya tipe-p dapat terjadi akibat adanya kekosongan (*vacancy*) unsur golongan V, *antisite* atom golongan III pada kedudukan atom golongan V, serta inkorporasi atom karbon yang berasal dari ikatan  $\text{Ga} = \text{C}$  yang memiliki ikatan kuat yang berasal dari sumber *methyl* yang digunakan, yaitu TMGa. Karbon merupakan atom golongan IV yang memiliki elektron valensi empat. Ketika atom ini berikatan dengan atom Ga dan menempati kedudukan atom As atau Sb yang bervalensi V, maka akan terjadi pembangkitan *hole* dalam lapisan akibat kekurangan elektron dalam ikatan ini. *Hole* merupakan pembawa muatan berjenis positif, sehingga dari proses ini terbentuk semikonduktor tipe-p. Hasil karakterisasi EDAX terhadap sampel lapisan tipis  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  yang ditumbuhkan pada temperatur  $580^\circ\text{C}$  dengan rasio masukan sumber V/III = 4,8 dan  $x_V = 0,14$  menunjukkan adanya kandungan karbon dalam lapisan tipis  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  sekitar 0,74 %.

Konsentrasi pembawa muatan (*hole*) untuk seluruh sampel berorde  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , yang tergolong sedang. Terdapat kecenderungan pergeseran nilai mobilitas optimum kearah rasio V/III yang besar ketika temperatur penumbuhan ditingkatkan. Nilai mobilitas tertinggi dapat dicapai oleh sampel yang ditumbuhkan pada pasangan temperatur dan rasio masukan V/III yang rendah ( $540^\circ\text{C}$  dan 1,2). Sebaliknya konsentrasi pembawa muatan terendah dapat dicapai oleh sampel yang ditumbuhkan dengan rasio masukan V/III yang tinggi.



Gambar 4. Mobilitas Hall dan konsentrasi hole sebagai fungsi rasio masukan V/III pada lapisan GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> yang ditumbuhkan pada berbagai temperatur penumbuhan

Seperti telah diungkapkan bahwa *pyrolysis* TMGa akan menghasilkan radikal-radikal *methyl* yang dapat teradsorpsi ke permukaan substrat, jika spesies golongan V jumlahnya kurang, maka dekomposisi lanjutan dari radikal-radikal ini akan menghasilkan spesies *carbene* (=CH<sub>2</sub>) yang memiliki ikatan kuat pada permukaan film (Stringfellow, 1999). Dengan memperbanyak masukan spesies golongan V (mempertinggi rasio masukan sumber V/III), maka kemungkinan masuknya spesies *carbene* pada lapisan tipis dapat dikurangi, sehingga kontaminasi karbon dalam lapisan tipis pun dapat direduksi pula. Selain itu dengan menggunakan rasio masukan sumber V/III yang tinggi, juga dapat mereduksi *antisite* atom Ga pada kedudukan atom golongan V. Kedua hal ini yang pada akhirnya dapat mereduksi konsentrasi pembawa muatan pada film yang ditumbuhkan.

#### 4. Kesimpulan

Distribusi Sb yang terikat dalam padatan lapisan tipis GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> maupun karakteristik listrik lapisan tipis GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> yang ditumbuhkan dengan teknik MOCVD sangat bergantung pada besar rasio masukan sumber V/III yang digunakan. Pada penggunaan rasio masukan V/III yang hampir sama dengan satu, nilai koefisien distribusi Sb yang merupakan rasio komposisi Sb dalam lapisan GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> terhadap fraksi mol masukan uap sumber Sb juga nilainya mendekati satu. Inkorporasi Sb kedalam padatan GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> menurun terhadap kenaikan rasio masukan sumber V/III untuk rasio masukan V/III > 1. Seluruh sampel lapisan tipis GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> tanpa doping yang ditumbuhkan merupakan semikonduktor tipe-p dengan konsentrasi *hole* berorde 10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup>. Rentang nilai mobilitas pembawa muatan berkisar antara 200–430 cm<sup>2</sup>/V.s bergantung pada rasio masukan sumber V/III dan komposisi Sb. Nilai mobilitas Hall paling tinggi dicapai pada penggunaan rasio masukan sumber V/III yang mendekati 1.

#### Ucapan terimakasih

Penelitian ini didanai oleh proyek penelitian Hibah Pasca Angkatan I Tahun 2003-2005 Kementerian Pendidikan Nasional Republik Indonesia.

## Referensi

- Abernathy, C. R., Pearton, S. J., Baiocchi, F. A., Ambrose, T., Jordan, A. S., Bohling, D. A., Muhr, G. T., 1991, The Feasibility of Using TMAI as an Al Precursor for MOMBE, *J. Crystal Growth*, **110**, 547.
- Basignana, I. C., Macquistan, D. A., Streater, R. W., Hiller, G. C., Packwood, R., Moore, V., 1997, Setting limits on accuracy of X-Ray determination of Al concentration in AlGaAs/GaAs epitaxial layers, *Journal of Crystal Growth*, **172**, 25-36.
- Jiang, D. S., Bian, L. F., Liang, X. G., Chang, K., Sun, B. Q., Johnson, S., Zhang, Y. H., 2004, Structural and optical properties of GaAsSb/GaAs heterostructure quantum wells, *Journal of Crystal Growth*, **268**, 336-7.
- Kuramochi, H., Cui, J., Ozeki M., Uchida, H., Akinaga, H., Yoshida, H., Sanada, N., Fukuda, Y., 2002, Decomposition of TDMAAs and As Nucleation on GaAs (001)-2x4 at Low temperature, *Appl. Phys. Lett.*, **81:1**, 132.
- Narayanan S., Norton, M. G., 1998, X-RAY DIFFRACTION : A Practical Approach, Plenum Press, New York.
- Nooh M. S., 2003, Material growth and characterization of GaAsSb on GaAs grown by MOCVD for long wavelength laser applications, Dissertation, The University of Texas at Austin.
- Oda, Y., Watanabe, N., Uchida, M., Sato, M., Yokoyama, H., Kobayashi, T., 2004, Suppression of hydrogen passivation in carbon-doped GaAsSb grown by MOCVD, *Journal of Crystal Growth*, **261**, 393-397.
- Shin, J., Hsu, T. C., Stringfellow, G. B., 1997, OMPVE growth of metastable GaAsSb and GaInAsSb alloys using TBAs and TBDMSb, *Journal of Crystal Growth*, **179**, 1-9.
- Stringfellow, G.B, 1999, Metalorganic Vapor Phase Epitaxy : Theory and Practice, 2<sup>nd</sup> edition, Academic Press, San Diego, California.
- Wu, S. D., Guo, L. W., Wang, W. X., Li, Z. H., Shang, X. Z., Hu, H. Y., Huang, Q., Zhou, J. M., 2004, The incorporation behavior of arsenic and antimony in GaAsSb/GaAs grown by solid source molecular beam epitaxy, *Journal of Crystal Growth*, **270**, 359-363.
- Yamamoto, K., Asahi, H., Hayashi, T., Hidaka, K., Gonda, S., 1997, Selective area etching of III-V semiconductors using TDMAAs and TDMASb in metalorganic molecular beam epitaxy chamber, *Journal of Crystal Growth*, **175/176**, 1236-1241.