Perbandingan Laju Pertumbuhan Kristal GaAs pada Reaktor Metal organic Chemical Vapour Deposition Suseptor Miring Melalui Analisis Numerik

Comparison of Growth Rate of GaAs Crystals in Metal Organic Chemical Vapor Deposition Slant Susceptor Reactor Through Numerical Analysis

Muh. Tawil
Pendidikan IPA, FMIPA Universitas Negeri Makassar, Indonesia
Email: muh.tawil@unm.ac.id

ABSTRAK

Reaktor MOCVD salah satu reaktor yang dapat dimanfaatkan memproduksi piranti elektronik berbentuk multi lapisan logam. Tujuan penelitian ini membandingkan laju pertumbuhan kristal GaAs pada Reaktor Metal organic Chemical Vapour Deposition (MOCVD) suseptor miring dengan menggunakan Analisis numerik. Penelitian ini menggunakan metode analisis numerik dengan tahapan: 1) mengidentifikasi parameter-parameter reactor MOCVD suseptor miring, 2) mengidentifikasi parameter-parameter hasil eksperimen, 3) menyelesaikan persamaan eksak laju pertumbuhan Kristal GaAs pada reactor MOCD suseptor miring, 4) menguji coba data-data ekseprimen ke dalam persamaan eksak, 5) mencari perbandingan hasil analisis numerik dan ahsil eksprimen melalui grafik hubungan antara daerah pertumbuhan Kristal GaAs terhadap laju pertumbahan, 6) menganalisis hasil perbandingan laju pertumbuhan krsital GaAs di dalam reactor MOCVD suseptor miring. Hasil penelitian ditemukan terdapat kesesuaian hasil analisis numerik dengan hasil ekseperimen laju pertumbuhan kristal GaAs konstan di daerah ujung suseptor dengan kemiringan 3.5^0 dengan kecepatan gas pembawa H_2 sebesar 15.7 cm/s, sedangkan pada daerah $z \leq z_o$ laju pertumbuhan Kristal GaAs berkurang dengan bertambahnya z.

Kata Kunci: *MOCVD, GaAs, kristal, reaktor, suseptor miring*

ABSTRACT

The MOCVD reactor is one of the reactors that can be used to produce electronic devices in the form of multi-layer metals.The purpose of this study was to compare the growth rate of GaAs crystals in the Metal organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) reactor with tilted acceptors using numerical analysis and experimental results. This study uses a numerical analysis method with the following steps: 1) identifying the parameters of the tilted susceptor MOCVD reactor, 2) identifying the parameters of the experimental results, 3) solving the exact equation for the growth rate of GaAs crystals in the tilted susceptor MOCD reactor, 4) testing the data. experimental data into exact equations, 5) compare the results of numerical analysis and experimental results through the graph of the relationship between GaAs crystal growth area and growth rate, 6) analyze the results of the comparison of the growth rate of GaAs crystals in the inclined susceptor MOCVD reactor. The results of the study found that there was a match between the results of numerical analysis with experimental results of constant GaAs crystal growth rate in the susceptor tip area with a slope of 3.50 with H2 carrier gas velocity of 15.7 cm/s, while in the z≤z_o region the GaAs crystal growth rate decreased with increasing z.

Keywords: *MOCVD, reactor, oblique, susceptor, GaAs crystal*

PENDAHULUAN

Dalam dasawarsa sekarang ini, penelitian dan pengembangan serta aplikasinya endapan uap kimia organo logam (metal organic chemical vapour deposition, MOCVD) banyak dilakukan, berkaitan dengan aspek teknis terutama pada teknik industri yang menyangkut tentang pengolahan campuran bahan III-V (Masakazu Sugiyama, 2000; Ik-Tae Im, et al, 2004; Yao-Chen Chung, 2014). Masyhiro et al (1994), melaporkan bahwa dengan melalui proses MOCVD berhaasil dikembangkan teknik pertumbuhan bermacam-macam material III-V dan II-VI dan menjadi salah satu metode yang sangat penting untuk pertumbuhan komponen devais semikonduktor.

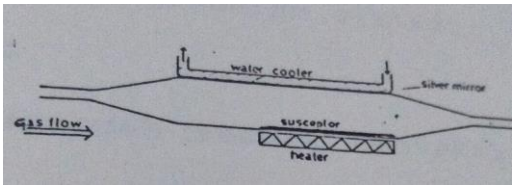
Ada beberapa alasan dikembangkan proses pengendapan organo logam, diantaranya, i.e: 1) pengendapan uap kimia kombinas Gas relatif pada temperatur rendah 400-600^{o}C, sedangkan secara konvensional berkisar 700^{o}C; 2) pertumbuhan GaAs dengan menggunakan substrat Silikon (Si) diperoleh lapisan GaAs dengan luas permukaan yang besar dan lebih ekonomis; 3) teknik MOCV mampu memproduksi diode laser dan piranti-piranti photodioda, dioda gun, FET dan lain-lain dengan ketebalan lapisan berksiar 1,3-1,5 μm.

Pengembangan sifat-sifat sel reaktor MOCVD telah banyak dilakukan secara teoritis, misalnya Arifin et al, 2021; Bloem, 2022; Brown et al, 2022; Chang-Hun et al, 2022; Chen et al, 2022), menyarankan model lapisan diam, dengan asumsi bahwa ketebalan lapisan kosntan di atas suseptor, model split-off, lapisan batas laminer dapat muncul apabila menggunakan N_2 dan Ar sebagai gas pembawa pada bilangan Raylerigh yang tinggi (Ra); model sel reaktor horizontal, dimana profil aliran temperatur dan daerah pertumbuhan kristal terjadi pada daeraj jalan masuk reaktor; model lapisan diam tidak tepat untuk sistem aliran laminer dengan bilangan Ra yang rendah; sedangkan pada Ra > 1700 aliran gas di dalam reaktor horizontal terjadi turbulen, yakni terjadi gerak vorteks positif di sekitar wilayah petumbuhan kristal maupun pada wilayah jalan masuk reaktor terjadi gerak vortek negatif.

Berdasarkan kajian teoritis tersebut, maka dalam penelitian ini dikaji mengenai masalah perbandingan laju pertumbuhan kristal GaAs pada reaktor MOCVD suseptor miring melalui analisis numeric. Model yang digunakan adalah model persegi empat dengan bilangan Ra yang rendah (Ra < 1700), dibagian atas sel dilengkapi dengan alat pendingin (air-pendingin) atau udara pendingin, dan pada bagian bawahnya alat pemanas. Pemodelan berkisar distribusi laju pertumbuhan kristal GaAs sebagai fungsi terhadap posisi pada suseptor.

Pemodelan Reaktor MOCVD

Pemodelan reaktor MOCVD telah banyak dikembangkan seperti, model MOCVD horizontal dan selinder (Ik-Tae; Oh; Nakano , 2008; Komeno, 2011;Chengyan; Chengming;& Xianglin, 2012; Chulsoo, 2013; Chun-Pin et al, 2020; Jiadai-An et al, 2021; Chen et al, 2022b), Pada penelitian ini dikembangkan model reaktor MOCVD persegi dengan luas penampang saling tegak lurus dengan menggunakan suseptor miring. Alat pemanas bagian bawa sel bertemperatur 700^{o}C (organo logam dapat terurai pada temperatur 400-570^{o}C). Model reaktor MOCVD tersebut seperti gambar 1.



Gambar 1. Model Reaktor MOCVD

Persamaan matematis yang diterapkan dalam menganalisis secara numerik laju pertumbuhan kristal GaAs pada suseptor miring reaktor MOCVD seperti berikut ini.

Pada daerah $0 \leq Z \leq Z_{o,\theta}$

Persamaan laju peretumbuhan kristal GaAs pada suseptor miring θ pada reaktor MOCVD persegi berlaku

$$G(z) = \frac{0{,}89 D_o P_o}{R_a T_m}\left[\frac{T_m}{T_o}\right]^{1.89}\left\{\frac{D_o (h-\tan\theta)^2}{V_o h}\left(\frac{T_m}{T_o}\right)^{0{,}88}(Z)\right\}^{\frac{-1}{3}} \quad (1)$$

Dalam hal ini: $V_o = \frac{V_{o,\theta}(z)(h - z\tan\theta)}{h}$ dan $Z_{o,\theta} = \frac{Z_o}{1+\left(Z_o \tan\frac{\theta}{h}\right)}$

Pada daerah Z > $Z_{o,\theta}$

$$G(z) = \frac{0{,}89 D_o P_o}{R_a T_m (h - z\tan\theta)}\left[\frac{T_m}{T_o}\right]^{1.89} exsp\left\{\frac{2{,}84 D_o}{V_o h \tan\theta}\left[\frac{T_m}{T_o}\right]^{0{,}88} Ln\left[1 - \frac{z\tan\theta}{h}\right]\right\} \quad (2)$$

Dalam hal ini: $V_o = \frac{2{,}86 D_o}{h \tan\theta}\left[\frac{T_m}{T_o}\right]^{0{,}88}$

Parameter-parameter input analisis numerik yang digunakan: 1) konsentrasi: harga batas konsentrasi (C), konsetrasi awal (C_o), rata-rata konsentasi pada komponen posisi z $\bar{C}(z)$, 2) difusi: koefisien difusi pada 300K (D_o), koefisien difusi pada temperatur T (D_T), koefisien difusi (D); 3) kecepatan: kecepatan gas (v), kecepatan rata-rata gas pada reaktor 300K (v_o), kecepatan rata-rata gas pada temperatur T (v_T); 4) panjang: tinggi di atas suseptor (h), panjang suseptor (z), panjang jalan masuk konsentrasi gas (z_o), panjang jalan masuk aliran gas terhadap temperatur (z_T); 5) tekanan: tekanan parsial input (P_o), tekanan parisal TMG (P_{TMG}), tekanan input AsH_3 (P_{AsH3}); 6) temperatur: temperatur acuan 300K (T_o), temperatur di atas dinding reaktor MOCVD (T_h), temperatur pada suseptor miring ($T_{o,\theta}$), temperatur efektif (T_m).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode analisis numerik dengan tahapan: 1) mengidentifikasi parameter-parameter reaktor MOCVD suseptor miring, 2) mengidentifikasi parameter-parameter hasil eksperimen, 3) menyelesaikan persamaan eksak laju pertumbuhan kristal GaAs pada reaktor MOCVD suseptor miring, 4) menguji coba data-data ekseprimen ke dalam persamaan eksak, 5) mencari perbandingan hasil analisis numerik dan ahsil eksprimen melalui grafik hubungan antara daerah pertumbuhan kristal GaAs terhadap laju pertumbahan, 6) menganalisis hasil perbandingan laju pertumbuhan krsital GaAs di dalam reactor MOCVD suseptor miring.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1. Parameter Data Hasil eksperimen yang dilakukan oleh Van de Ven et al (2019)

h (cm)	D_h (cm)	b/h	V_o(cm/s)	H_2		
				Ra	z_T(cm)	z_o(cm)
0.9	1.4	6.3	3.4	16	3.6	0.7
			6.9	35	7.9	2.3
			10.3	50	11.9	2.2

Tabel 2. Parameter temperatur dalam kelvin

Air Pendingin			
T_o	T_s	T_h	T_{gas}
300	975	400	700

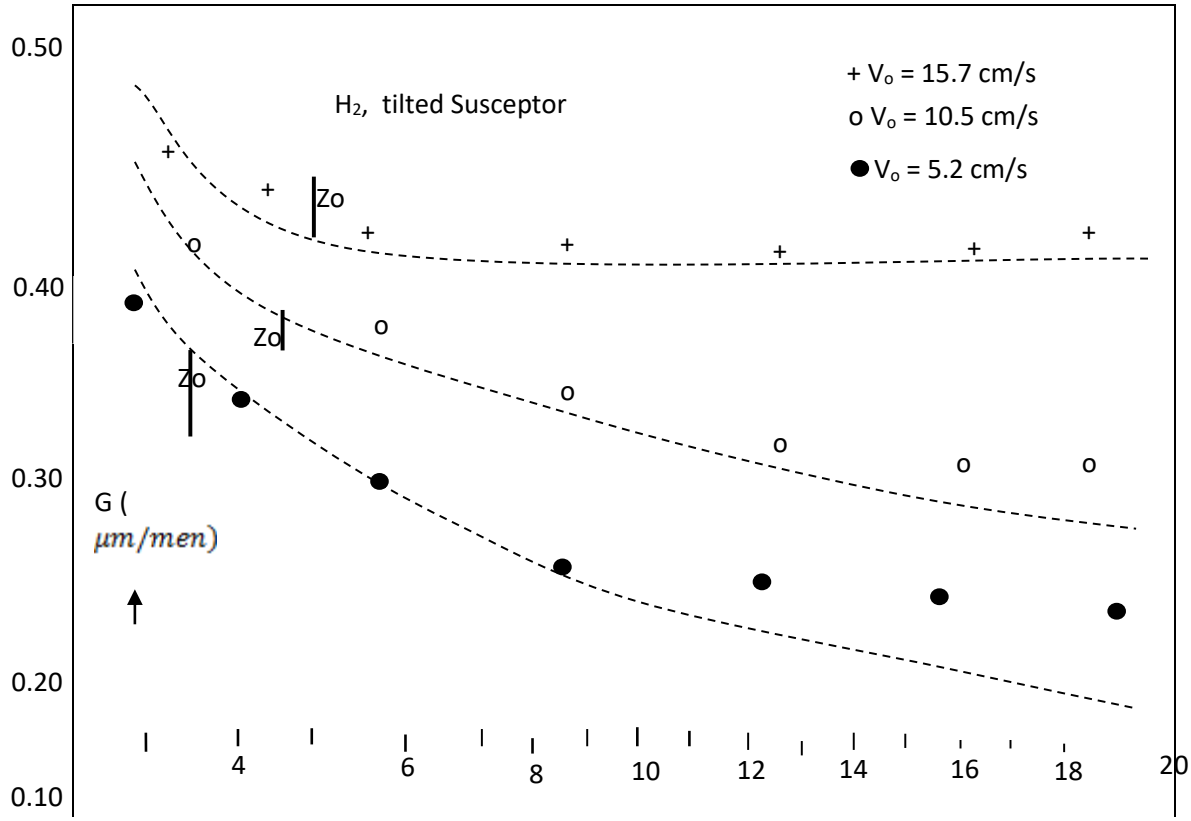
Persamaan matematis yang digunakan dalam menganalisis laju pertumbuhan kristal GaAs di dalam reaktor MOCVD dengan suseptor miring 3.5^o seperti berikut ini

$$G(z) = 6{,}85x10^{-3}(0{,}021 - 0{,}06\,z)^{-1}exp\left[\left(\frac{0{,}1726}{V_o}\right) Ln\left(1 - 2{,}80\,z\,\frac{1}{m}\right)\right] \quad (3)$$

Dengan: $Z_{o,\theta} = \frac{Z_o}{1+\left(Z_o \tan\frac{\theta}{h}\right)}$ dan

$Z_o = \frac{h^2 v_o}{16\,D_o}\left(\frac{T_m}{T_o}\right)^{-0{,}88}$

Dengan menerapkan persamaan (3) maka diperoleh hasil hubungan antara laju pertumbuhan kristal GaAs terhadap nilai posisi aksial z pada Gambar 2.



Gambar 2. Laju pertumbuhan GaAs (G)

pada z = 0 susceptor miring dengan H_2 gas pembawa dan P_{TMG} = 50 Pa sebagai fungsi z untuk kecepatan gas input 5.2;10.5 dan 15.7 cm/s. (--------) perhitungan numerik dan (+,o,●) hasil eksperimen

Pada gambar 2, menjelaskan plot laju pertumbuhan kristal GaAs sebagai fungsi terhadap posisi aksial pada suseptor miring dengan tiga kecepatan aliran dimana H_2 sebagai gas berturut-turut sebesar 5.2;10.5 dan 15.7 cm/s. Garis putus-putus (----) pada plot hasil analisis numerik dan garis tanda (+,o,) hasil eksperimen. Di daerah jalan masuk reaktor MOCVD ($z \leq z_{o,\theta}$) laju peretumbuhan kristal semakin kecil dengan bertambahnya z, sedangkan untuk harga z yang lebih besar laju pertumbuhan kristal GaAs menjadi semakin konstan, artinya pertumbuhan kristal GaAs lapisannya semakin homogen ketebalannya untuk pemilihan kecepatan aliran gas H_2 yang tepat. Secara kenyataam menunjukkan bahwa terdapat kesesuaian laju pertumbuhan kristal GaAs antara hasil numerik dan eksperime. Hasil temuan ini memperkuat hasil penelitian (Masakiyo; Kojima; Yuzo, 1986; Stock; Richter, 1986; Masakazu, 2000; Masakazu et al, 2009; Shu-Quan et al, 2010; Yao-Chen et al, 2014; Liu et al ,2022; Ming-Tsang et al, 2022; Rasha et al, 2022; Schimmel., Sun., & Dropka, 2022; Sittig et al, 2022), yang menemukan bahwa dengan menggunakan suseptor miring tertentu dapat menghasilkan laju pertumbuhan kristal material di ujung suseptor konstan dengan lapisan homogen. Hasil analisis numerik ini dengan menggunakan kecepatan aliran gas H_2 yang tinggi akan dipe diperoleh endapan kristal GaAs homogen sekitar 40-50% dari lebar suseptor miring. Apabila digunakan kecepatan gas H_2 yang rendah pertumbuhan kristal kurang homogen lapisan ketebalannya dan menunjukkan perbedaan yang agak jauh hasilnya dengan eksperimen. Penemuan ini mendukung hasil penelitian yang dilakukan oleh (Takahashi., & Ogirima,1982; Yang, 2014; Vilasam et al, 2022; Vladimir., Dubrovskii,2022; Wang et al, 2022; Zenk et al, 2022). Gejala ini diperkirakan disebabkan karena beebrapa asumsi yang digunakan dalam menyelesaikan persamaan model matematis laju pertumbuhan, i.e: sistem isotermal pada temperatur kosntan dimana kecepatan aktif cepat terurai pada suseptor pada y = 0, pada semua posisi aksial z > 0, dengan demikian konsentrasi pada y = 0 adalah nol, untuk semua nilai z di daerah komposisi; transport massa ke arah suseptor hanya dipengaruhi oleh konveksi-paksa, akibatnya gerak material yang sepenuhnya menuju ke arah y bergerak secara difusi (aliran laminer); profil kecepatan kosntan dan linear; syarat batas C(0,z) = 0 untuk setiap nilai $z \geq 0$, perubahan konsentrasi terhadap y sama dengan 0 utntuk setiap nilai $z \geq 0$, berarti transport materail tidak terjadi pada bagian atas dinding reaktor, dan C $(y,0) = C_o$ untuk setiap nilai $0 \leq y \leq h$.

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Hasil analisis numerik laju pertumbuhan kristal GaAs pada suseptor miring 3.5º dengan laju kecepatan gas pembawa H_2 yang tinggi akan dihasilkan pertumbuhan kristal GaAs dengan ketebalan lapisan homegen pada daerah z yang besar (di daerah ujung suseptor) dengan ketebalan berkisar 40-50%. Hasil tersebut mendukung hasileksperimen. Memakai model yang dikembangkan dalam penelitian ini salah satu cara yang dapat dipikirkan untuk meningkatkan efisiensi distribusi laju pertumbuhan kristal GaAs sebagai fungsi terhadap posisi aksial z pada suseptor miring yang dapat memberikan informasi yang sangat berguna terkait sifat-sifat aliran dan mekanisme pertumbuhan epitaksial kristal.

B. Saran

Penelitian berikutnya dapat dikembangkan dengan variasi sudut suseptor dengan kecepatan gas yang bervariasi.

DAFTAR PUSTAKA

Arifin, P., Sutanto, H., Sugianto., & Subagio, A. (2021). Plasma-Assisted MOCVD Growth of Non-Polar GaN and AlGaN on Si(111) Substrates Utilizing GaN-AlN Buffer Layer. *Coatings*,*12*(1), 94.

https://doi.org/10.3390/coatings12010094

Bloem, J. (2022). High chemical vapour deposition rates of epitaxial silicon layers. *Journal of Crystal Growth*. 18(1): 70-76. https://doi.org/10.1016/0022-0248(73)90150-4

Brown, R., Bogdan, P.R ., Hui, J., Khalifa, M; Azizur-Rahman., Manyu, D., Mingchu, T., Baolai, L., Huiyun, L ., & Qiang, L. (2022). Mid-infrared InAs/InAsSb Type-II superlattices grown on silicon by MOCVD. *Journal of Crystal Growth*, 506: 126860. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.

Chang-Hun, S., Minwoo, K., Hyunchul, J., Sang, T. L., Hyeong-Ho, P., Donghyun, K., Keunman, S., Dae-Hong, K., & Chan-Soo, S. (2022). Morphology Transition of Te-Doped InAs Nanowire on InP(111)B Grown Using MOCVD Method. *Crystals*, *12*(12), 1846.

https://doi.org/10.3390/cryst12121846

Chen,W., Jiao,T., Li,Z., Diao,Z., Li,Z., Dong, Xin., Zhang, Y., Zhang , B. (2022). Preparation of β-Ga_2O_3 nanostructured films by thermal oxidation of GaAs substrate. *Crystals* .48(4): 5698-5703. .https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.11.115

Chen,X; Xiao,Y; Yang, C; Zhicheng, Z; Yudan, G; & Jun, W. (2022). MOCVD growth and thermal stability analysis of 1.2 μm InGaAs/GaAs multi quantum well structure. *Journal of Alloys and Compounds*, 922(20): 166173

https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166173

Chengyan, Gu; Chengming, L; & Xianglin, L. (2012). Design of a three-layer hot-wall horizontal flow MOCVD reactor. Journal of Semiconductors, 33(9): 33093005. **DOI** 10.1088/1674-4926/33/9/093005

Chulsoo, B; Dae-Hyeon, K; Kang, W. J; Kwang-Sun, K. (2013). Numerical Analysis on the Development of the Large-Scale Showerhead for Depositing AlGaInN Films. Conference Paper

Chun-Pin, H; Rather, M. A; Chien-Ting, W; Loganathan, R. (2020). Crystal Transformation of Cubic BN Nanoislands to Rhombohedral BN Sheets on AlN for Deep-UV Light-Emitting Diodes. DOI:10.1021/acsanm.0c00681

Ik-Tae, I; Oh, H.O; Nakano, Y. (2008). A Study on the Non-linear Surface Reaction Model for the GaAs Film Growth During MOCVD Process.Journal of Crystal Growth 261(2):214-224.

DOI:10.1016/j.jcrysgro.2003.11.024

Jiadai -An; Dai, X; Feng, L; & Zheng, J. (2021). Parameter study of the high temperature MOCVD numerical model for AlN growth using orthogonal test design.Scientific Reports, 11(8877). https://www.nature.com/articles/s41598-021-87554-8

Komeno, J. (2011). Gas Phase Reactions in Horizontal MOCVD Reactors. MRS Online Proceedings Library (OPL) , 94(255).: Symposium D – Initial Stages of Epitaxial Growth , Cambridge University Press. DOI: https://doi.org/10.1557/PROC-94-255

Masakazu, S. (2000). MOCVD of InGaAsP, InGaAs and InGaP over InP and GaAs substrates: Distribution of composition and growth rate in a horizontal reactor**.** Applied Surface Science 159:318-327. DOI:10.1016/S0169-4332(00)00150-1

Masakazu, S; Satoshi, Y; Tomohari, S; & Yoshiaki, N. (2009). Reaction Kinetics of GaN Metal-Organic Vapor-Phase Epitaxy Analyzed by Multi-Scale Profiles of Growth Rate.. ECS Transactions 25(8). DOI:10.1149/1.3207632

Masakiyo, I, K. S; Kojima; Yuzo, K. (1986). Uniform growth of GaAs by MOCVD on multi-wafers. Journal of Crystal Growth. 77(1–3): 157-162. https://doi.org/10.1016/0022-0248(86)90296-4

Yao-Chen, C. (2014);Chyi-Tsong Chen;Yao-Chen Chung. (2014). Mathematical modeling and optimal design of an MOCVD reactor for GaAs film growth**.**Journal Taiwan Inst Chem E.

Ming-Tsang Lee, Chien-Fu Tseng;Tsung-Yen Tsai; Yen-Hsiu Huang.Journal of Crystal Growth 432.DOI:10.1016/j.jcrysgro.2015.09.003

Liu, W. C., Wang, H., Wang, J. B., Wang, Q., Wang, J., Fan, J., Zou, Y., & Ma, Xiaohui. (2022). The improvement properties of InGaAs/InGaAsP multiple quantum wells using the GaAs insertion layer. *Thin Solid Films*, 756: 139363

https://doi.org/10.1016/j.tsf.2022.139363
Get rights and content

Rasha, H., El-Jaroudi., Kyle, M., McNicholas., Herbert, S. M., Robert, K., & Seth, R. B**. (2022).** Growth Advancement of GaAs-Based BGaInAs Alloys Emitting at 1.3 μm by Molecular Beam Epitaxy. *Cryst. Growth.* 22(6): 3753–3759.

https://doi.org/10.1021/acs.cgd.2c00131

Shu-Quan, Z; Xiao, M. R; Yong-Qing, H; Qi-Wang; & Hui, H. (2010). Numerical studies on flow and thermal fields in MOCVD reactor. Chinese Science Bulletin, 55:560–566. https://link.springer.com/article/10.1007/s11434-009-0590-8

Schimmel, S., Sun, W., & Dropka, N. (2022). Artificial Intelligence for Crystal Growth and

Characterization. *Crystals*, *12*(9), 1232. https://doi.org/10.3390/cryst12091232

Sittig, R., Cornelius, N., Sascha, K., Stephanie, B., Richard, S., Jiasheng, H, Ponraj, V.,Pascal Pruy., Simone, L.P., Michael, J., & Peter, M. (2022). Thin-film InGaAs metamorphic buffer for telecom C-band InAs quantum dots and optical resonators on GaAs platform. *Journal* Nanophotonics. 8(2):67-90. https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0552

Stock, L; Richter, W. (1986). Vertical versus horizontal reactor: An optical study of the gas DOI:10.1016/0022-0248(86)90294-0

Van de Ven, J., Rutten, G.M.J., Raaijmakers, M.J., & Giling, L.J. (2019). Gas phase depletion and flow dynamics in horizontal MOCVD reactors. Journal of Crystal Growth, 76(2): 352-372 https://doi.org/10.1016/0022-0248(86)90381-7

Vilasam, A. G. S., Prasanna, P. K., Yuan, W., Azimi, Z., Kremer, F., Jagadish, C., Chakraborty, S., & Tan, H. H. **(2022).** Epitaxial Growth of GaAs Nanowires on Synthetic Mica by Metal–Organic Chemical Vapor Deposition. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 14(2): 3395–3403 https://doi.org/10.1021/acsami.1c19236

Vladimir, G., Dubrovskii (2022). Theory of MOCVD Growth of III-V Nanowires on Patterned Substrates. *Nanomaterials*, *12*(15): 2632. https://doi.org/10.3390/nano12152632

Takahashi, R., & Ogirima. M. (1982). Chemical Reactions in Epitaxial Growth. *Journal of Crystal Growth*, 24(1): 92-102. DOI:https://doi.org/10.5940/jcrsj.24.92

Wang, B., Zeng, Y., Song, Y., Wang, Y., Liang, L., Qin, L., Zhang, J., Jia, P., Lei, Y., Qiu, C., Ning, Y., & Wang, L. (2022). Principles of Selective Area Epitaxy and Applications in III–V Semiconductor Lasers Using MOCVD: A Review**.** *Crystals*, *12*(7), 1011; **https://doi.org/10.3390/cryst12071011**

Yang, F.H. (2014). Modern metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) reactors and growing nitride-based materials. Metal organic chemical depostion.Semiconduktor. https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/metal-organic-chemical-vapor- deposition

Zenk, M; Lukin , **G**; Bastin, **D**; Doradziński, **R**; Beyer , F.C.; Meissner ,**E**; & Friedrich ,**J.** (2022). *J.Crystals* **2022**, *12*(9), 1248; **https://doi.org/10.3390/cryst12091248**