

SINTESA MATERIAL NANOCRYSTAL SILICON SEBAGAI BAHAN DASAR DIVAIS NANOELEKTRONIK

Nuryanti, Aris Budiarto, Pipit Anggraeni

Jurusan Teknik Otomasi Manufaktur & Mekatronika, Politeknik Manufaktur Negeri Bandung

Jl Kanayakan No. 21 – Dago, Bandung - 40135

Phone/Fax : 022. 250 0241 / 250 2649

Email: nuryanti@polman-bandung.ac.id

Abstrak

Dengan berkembangnya teknologi yang ditandai dengan penemuan-penemuan divais-divais elektronik yang semakin kecil maka tuntutan dunia material semikonduktor pun mengikuti suatu trend untuk mendukung fabrikasi divais elektronik yang semakin kecil pula. Untuk itu dibutuhkan sintesa material semiconductor yaitu nanocrystal Silicon (nc-Si) berbentuk bubuk yang kemudian dapat dikembangkan sebagai larutan silicon dengan mencampurnya dengan cairan pelarut. Larutan bubuk silicon menunjang pembentukan lapisan tipis yang dapat diterapkan pada substrat yang murah seperti kaca untuk pengembangan sel photovoltaic maupun tinta printer elektronik dimana pembuatan transistor yang langsung tercetak pada media tertentu.

Sintesa nanocrystal Silicon (nc-Si) dilakukan dengan metode *Aerosol*. Pada proses ini dimasukan gas silane sebagai precursor atau bahan dasar material yang dialirkan dalam suatu kamar bertemperatur tinggi (sekitar 1000° C). Untuk dapat menghasilkan suplai panas yang dapat mendekomposisi gas silane maka proses dilakukan dalam suatu reactor thermal dimana terdapat 2 tipe reactor thermal yaitu Hot Wall (HW) dan Microwave Reaktor (MW).

Karakterisasi bubuk nc-Si menggunakan metode pengujian dengan UV/Vis, Raman Spectroscopy, dan pengukuran arus-tegangan dengan menggunakan kontak dari pasta perak. Hasil dari karakterisasi tersebut diketahui dimensi bubuk nc-Si yang dicapai pada proses MW berkisar antara 5 – 20 nm, sedangkan pada proses HW berkisar antara 100 – 500 nm. Secara morfologi sifat keristalan nc-Si dengan MW lebih baik dibandingkan dengan nc-Si hasil dari proses HW. Hal ini karena struktur nc-Si dari MW mendekati sifat kristal tunggal Silikon. Uji pengukuran arus dan tegangan menunjukkan kerapatan arus berkisar $10^{-9} - 10^{-3}$ A/cm² pada tegangan -2 V sampai 2V.

Kata kunci: *nanomaterial, nanoelectronic, microwave reactor*

1. Pendahuluan

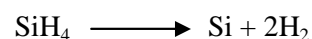
Dunia elektronika tidak terlepas dari peranan material semikonduktor yang merupakan material utama pembentukan berbagai divais elektronika. Material semikonduktor sendiri masih didominasi oleh material Silicon yang mudah didapat dan memiliki konduktivitas cukup baik dan tahan terhadap temperature [1].

Dengan berkembangnya teknologi yang ditandai dengan penemuan-penemuan divais-divais elektronik yang semakin kecil maka tuntutan dunia material semikonduktor pun mengikuti suatu trend untuk mendukung fabrikasi divais elektronik yang semakin kecil pula. Tuntutan jaman selain membuat alat-alat

elektronika menjadi ramping dari hari ke hari namun juga konsumsi energi yang semakin rendah. Jika sebelumnya kita telah mengenal Mikroelektronik yaitu ukuran-ukuran divais berkisar mulai dari 0.5 – 100 mikrometer maka terobosan teknologi telah bergerak ke ukuran material yang lebih kecil lagi yaitu skala nano (seper milyar meter). Nanomaterial memiliki dimensi berkisar antara 1- 100 nm

2. Sintesa bubuk nc-Si

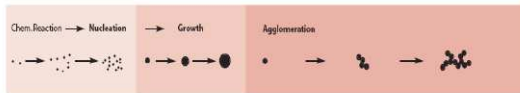
Sintesa bubuk nanocrystal silicon adalah berasal dari gas silane (SiH₄) yang secara thermal teraktivasi dan terdekomposisi menjadi Silicon dan Hydrogen :



Adapun terbentuknya bubuk dari fasa gas didominasi oleh proses termodinamika dan adanya proses reaksi kimia antara lain [5]:

a. Reaksi Fasa Gas Homogen

Reaksi fasa gas homogen yang berasal dari dekomposisi SiH_4 akan memicu terbentuknya molekul atau cluster. Hal ini disebabkan karena uap superjenuh yang tidak stabil cenderung untuk berubah bentuk menjadi zat yang terkondensasi



Gbr 1. Pembentukan partikel dari gas SiH_4 [2]

b. Nukleation

Jika cluster secara termodinamis stabil, maka akan saling bertumbukan satu dengan yang lain dan membentuk nucleus. Jika cluster tidak stabil juga akan cenderung menyeimbangkan diri dengan evaporasi atau kondensasi antara atom-atomnya sehingga mencapai kondisi termodinamis yang stabil dan membentuk nucleus

c. Pertumbuhan partikel

Dengan proses kondensasi, reaksi permukaan, dan koagulasi maka nucleus akan tumbuh menjadi buliran yang lebih besar. Sifat-sifat dari material produk akan sangat dipengaruhi oleh mekanisme ini

d. Agglomerasi

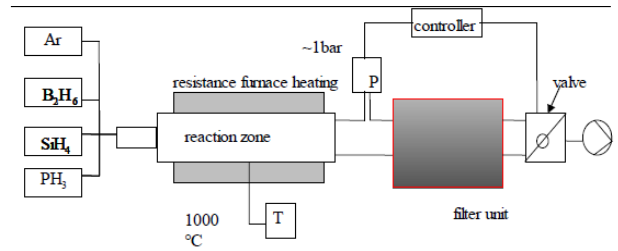
Jika laju tumbukan partikel lebih cepat daripada waktu yang dibutuhkan proses nukleasi dan pertumbuhan maka akan terjadi bentuk yang tidak sferis atau muncul agregat pada partikel. Sebaliknya jika waktu nukleasi dan pertumbuhan yang jauh lebih cepat daripada laju tumbukan yang biasa maka bentuk partikel akan menjadi tajam dan akan timbul kerapatan.

3. Metode sintesa bubuk nc-Si

Untuk dapat menghasilkan suplai panas yang dapat mendekomposisi gas silane maka proses dilakukan dalam suatu reactor thermal dimana terdapat 2 tipe reactor thermal :

- Hot Wall Reactor (Reaktor Berdinding Panas)
- Microwave Reaktor

3.1 Hot Wall Reactor (HW)

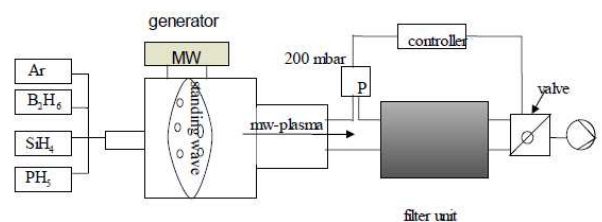


Gbr.2 Hot Wall Reactor

Sebagai precursor dipakai gas silane (SiH_4) dan argon, sedangkan B_2H_6 dan PH_3 dapat ditambahkan sebagai dopan. B_2H_6 untuk menghasilkan tipe p dan PH_3 untuk menghasilkan tipe n. Argon digunakan untuk mengencerkan gas reaktif silane. Seluruh gas akan dialirkan pada tabung panas dengan temperature sekitar 1000°C dan tekanan 1 bar. Pada tabung panas tersebut terjadilah reaksi kimia. Pada Hot Wall reactor, laju aliran precursor maupun temperatur dapat dikontrol sehingga menghasilkan partikel spesifik yang diinginkan. Untuk mendapatkan nanopartikel yang halus maka laju partikel dipercepat sehingga waktu pertumbuhannya dipersingkat di zone reaksi

Temperatur yang lebih tinggi cenderung menghasilkan efek yang sama yaitu meningkatkan laju nukleasi dan juga menurunkan jumlah reaktan yang ada pada partikel yang tumbuh. Demikian juga dengan meningkatkan gas argon yang mengencerkan gas silane maka akan menurunkan tingkat aglomerasi. Setelahnya nc-si yang telah terbentuk dikumpulkan di suatu pada suatu unit filter.

3.2 Microwave Reactor (MW)



Gbr 3. Microwave Reactor

Metode alternative adalah reactor microwave yang memiliki mekanisme yang hampir serupa dengan Hot Wall Reactor. Jika pada hot Wall reactor panas dihasilkan oleh tungku elektrik turbular, maka reactor microwave menghasilkan power yang dipasangkan dengan gas precursor oleh plasma microwave. Generator microwave banyak

digunakan pada industry kimia karena beberapa keuntungan [3] :

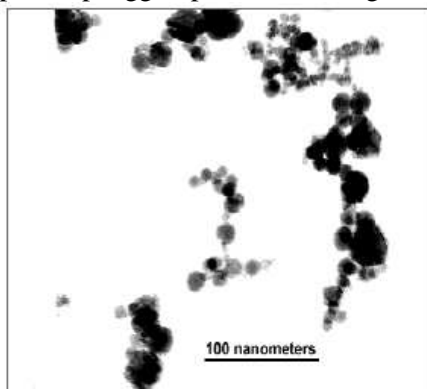
1. Temperature dapat diukur secara tepat sehingga proses dapat berjalan pada temperature konstan tanpa fluktuasi yang besar.
2. Tingginya densitas energi dapat memanaskan secara cepat material precursor pada daerah pemaparan yang sangat singkat sehingga hanya membutuhkan ruang yang sedikit dan mengurangi waktu produksi
3. Pemanasan yang langsung pada precursor menyebabkan efisiensinya lebih tinggi 50% daripada pemanasan konvensional

Serupa dengan yang terjadi pada hot wall reactor dimana kondensasi gas menjadi nc-Si dengan melalui mekanisme : nukleasi, pertumbuhan dan aglomerasi pada temperature yang tinggi (1000°C) dan tekanan yang relative tinggi (200mBar). Hasil dari nc-Si juga dikumpulkan pada unit filter.

4. Partikel hasil

Partikel yang dihasilkan oleh reactor MW lebih kurang berbentuk spheris dengan ukuran yang bervariasi pada rentang 5-20nm, seperti yang diperlihatkan pada gambar 4. Beberapa partikel membentuk suatu gumpalan aglomerasi menjadi gumpalan/*cluster* yang lebih besar. Sedangkan partikel yang diperoleh dari reactor HW memiliki dimensi yang lebih besar (10-500nm) dan strukturnya memiliki banyak cabang.

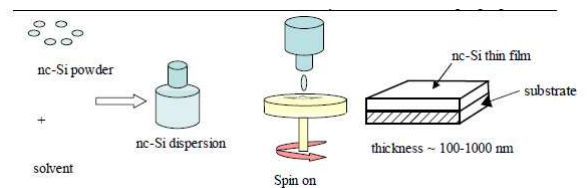
Perbedaan morfologi yang cukup besar antara nc-Si dari reactor HW dan reactor MW dapat dijelaskan karena perbedaan zona reaksi. Dengan HW dimana proses terjadi pada silinder panas yang panjang sehingga cenderung terjadinya aglomerasi/penggumpalan. Sedangkan pada reactor MW gradient temperature yang terjadi cukup tajam sehingga proses penggumpalan bisa dicegah



Gbr.4. Nc-Si dari pabrikasi MW

5. Metode Pengujian Sampel

Bubuk nc-Si yang telah dihasilkan kemudian dicampurkan dengan cairan solvent sehingga membentuk suatu larutan seperti tinta yang kemudian didispersikan pada substrat seperti Gbr 5. Substrat yang diputar dengan kecepatan tertentu akan menghasilkan dekomposisi nc-Si yang lebih merata sehingga akan membentuk lapisan film nc-Si yang cukup tipis



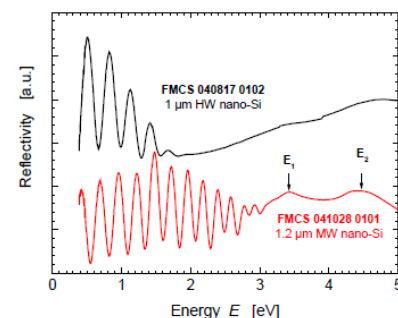
Gbr.5 Proses dekomposisi larutan nc-Si pada substrat

6. Karakterisasi material nc-Si

6.1 Karakterisasi Morfologi

6.1.1 Karakterisasi Optik

Karakterisasi optik menggunakan metode UV/Vis (Ultra violet/Visible) yaitu pengujian dengan menembakkan cahaya monokromatis yang dapat menscan komponen panjang gelombang dari 3280 nm – 186 nm atau berkorelasi dengan energi phonon 0.378 – 6.67eV. Selain itu dengan metode transmisi dan refleksi cahaya yang melalui sampel dapat diperkirakan seberapa banyak cahaya yang dapat diserap oleh material.



Gbr.6 Reflektifitas sebagai fungsi dari energi pada nc-Si HW dan nc-Si MW

Pada nc-Si Hw dengan ketebalan 1μm terlihat bahwa puncak energi tidak terlihat tajam melainkan melebar. Sedangkan pada nc-Si MW dengan ketebalan 1.2 μm terlihat

memiliki 2 puncak yang tajam sehingga level energi E_1 dan E_2 dapat terlihat.

Dengan kurva reflektifity maka dapat dihitung refraktif indek dari material dengan formula :

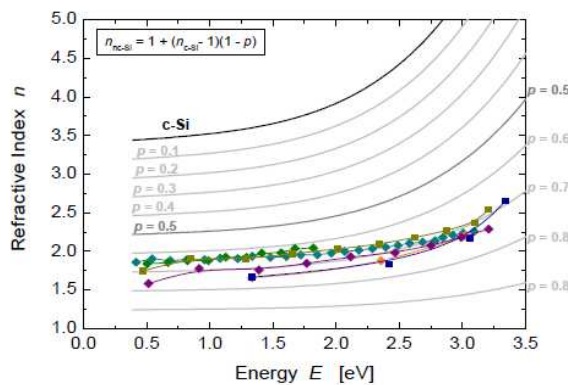
$$n = \frac{k.1240}{4.d.E} \tag{1}$$

Dimana k adalah orde reflektifitas ,1240 adalah konversi dari panjang gelombang ke energi eV, d adalah ketebalan material, E adalah energi (Ev). Refraktif indeks juga dipengaruhi oleh porositas dari material yang dapat dihitung dengan formula sebagai berikut [4]:

$$n_{nc-Si} = p + n_{c-Si}(1 - p) \tag{2}$$

Dengan n_{nc-Si} dapat diketahui dari besarnya level energi yaitu :

$$n_{c-Si} = 3.4 + 0.00005E^7 + 0.0012E^5 + 0.012E^4 + 0.01E^3 + 0.1E \tag{3}$$



Gbr.7. Refraktif indeks sebagai fungsi dari energi tiap nilai porositas.

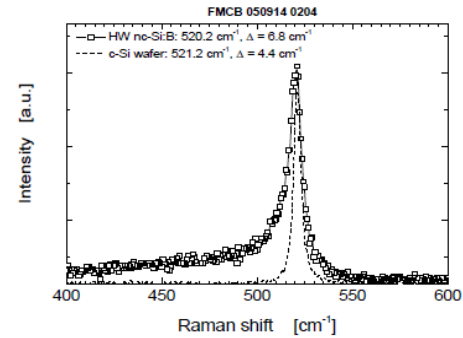
Pada Gbr 5 terlihat bahwa porositas dari material nc-Si yang dilapiskan ke substrat sebanyak 70%. Atau dapat dikatakan bahwa material nc-Si yang terdeposisi pada substrat hanya 30% dan 70% nya hanyalah ruang kosong.

6.1.2 Sifat Kekristalan

Pengujian sifat kekristalan dengan menggunakan Spectroscopy Raman. Pada metode raman material yang telah dideposisikan pada suatu substrat ditembakkan secara langsung dengan sinar laser. Kemudian sinar laser tersebut akan dipantulkan/dibiaskan oleh partikel phonon yang terdapat pada sampel.

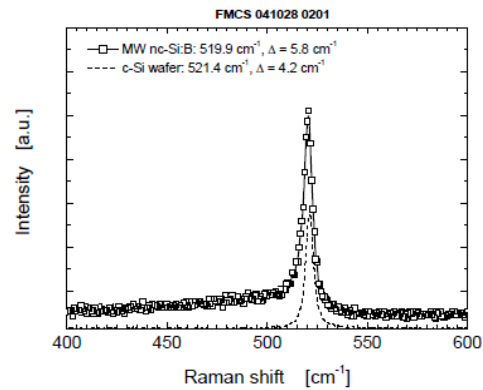
Pemantulan sinar laser ini kemudian akan dideteksi oleh detector Charge Coupled Device (CCD) untuk selanjutnya dianalisa dengan rentang energi 140/cm sampai dengan 840/cm.

Pada nc-Si yang berasal dari HW maupun MW diuji pula dengan spectroscopy Raman sehingga menghasilkan gambar 8.



Gbr.8.Raman Spectra pada nc-Si HW

Pada raman spectra puncak energi nc-Si dengan reactor HW terjadi pada 520.2/cm dan terlihat



Gbr.9. Raman Spectra pada nc-Si MW

lebih lebar. Sedangkan pada nc-Si dengan reactor MW puncak energi terjadi pada pergeseran raman sebesar 519.19/cm. Selain itu puncaknya juga terlihat lebih lancip jika dibandingkan dengan puncak nc-Si HW. Jika dibandingkan dengan bentruk spectra raman pada Mono kristal silicon maka nc-Si HW memiliki deviasi yang lebih besar dibandingkan dengan nc-Si MW. Dengan demikian sifat kekristalan nc-Si MW lebih mendekati sifat mono Kristal silicon atau dapat dikatakan sifat kekristalan nc-Si MW lebih baik dari pada nc-Si HW.

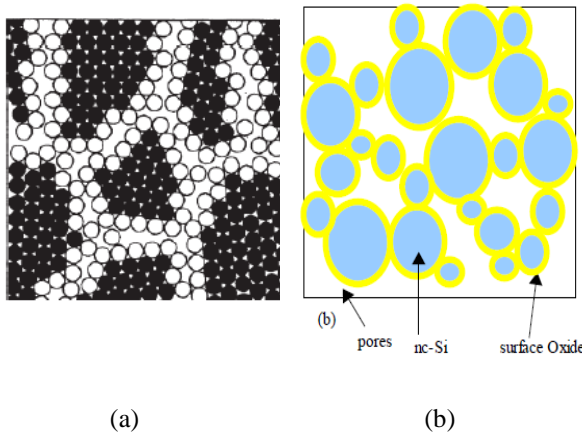
6.2 Karakterisasi elektronik

Sifat-sifat kelistrikan pada nc-Si tergantung pada struktur mikronya. Pada nc-Si sampel yang diteliti memiliki struktur mikro yang sedikit berbeda dengan biasanya dikarenakan besarnya area hampa (70% porositas). Pada dasarnya

material nc-Si terdiri dari 2 struktur komponen [5] yaitu :

- a. Kristal-kristal kecil dengan orientasi kristalografi yang berbeda
- b. Jaringan antar Kristal yang terdiri dari lapisan batas butiran

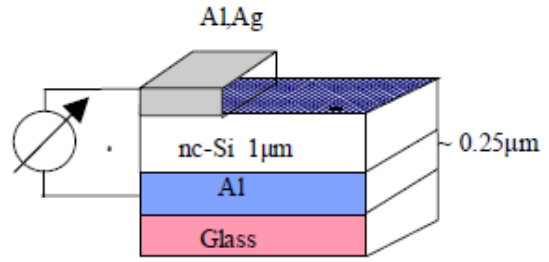
Pada model yang ditunjukkan pada Gbr 10a terlihat struktur butiran yang seragam dan hanya sedikit fraksi pori sehingga material terlihat lebih padat [6],[7]. Sedangkan untuk model pada sampel nc-Si (Gbr 10b) yang diteliti terdiri dari butiran-butiran dengan ukuran yang bermacam-macam (5 – 50nm) maka secara skematis akan terlihat banyaknya fraksi hampa, permukaan yang teroksidasi dan juga kerusakan pada batas butiran akan terjadi pula.



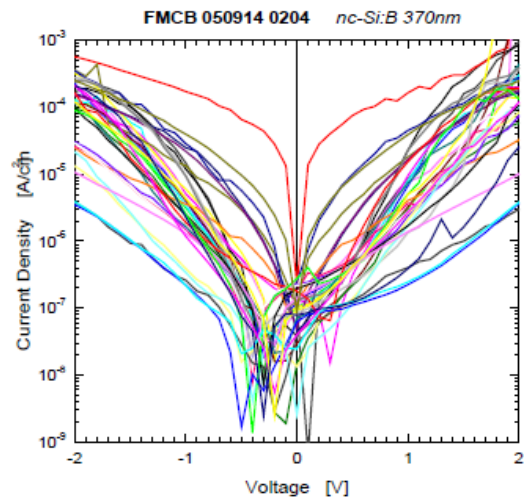
Gbr.10 Model material nc-Si : (a) Struktur nc-Si normal,(b) Struktur nc-Si sampel

Karena resistivity yang besar pada butiran nc-Si sampel maka untuk melakukan karakterisasi digunakan metode kontak aluminium dimana probe electrometer digunakan untuk mengukur arus dan tegangan sampel (Gbr 11). Kepadatan arus bervariasi antara $10^{-9} - 10^{-3} \text{ Acm}^{-2}$ dalam rentang tegangan -2 sampai 2V seperti yang terlihat pada Gbr.12.

Sifat-sifat listrik pada nc-Si sampel masih relative rendah dikarenakan struktur mikronya dan juga rendahnya mobilitas muatan pembawa dikarenakan adanya ikatan mikrostruktur yang terputus (dangling bond). Hal ini dapat kita ketahui dengan Elektron Paramagnetic Resonance (EPR) yaitu $10^{15} - 10^{16} / \text{mg}$. Dangling bond ini akan menjebak muatan pembawa (baik hole maupun electron) yang kemudian akan membentuk potensial baru. Potensial ini menyebabkan Coulomb barrier pada sekeliling butiran.

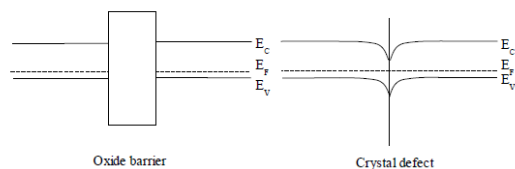


Gbr.11 Sampel dengan Al “back contact”



Gbr.12.Karakteristik Arus-Tegangan pada nc-Si yang di doping maupun yang tidak didoping pada sandwich geometri

Hasil sintesa bubuk nc-Si yang dibiarkan terekspos di udara bebas memungkinkan terjadinya oksidasi yang membentuk oksida penghalang. Arus transport kemudian akan diblok oleh dua tipe penghalang jika pada kasus polycrystal silicon tipe p maka energi Fermi yang semula terletak di dekat pita valensi di sekitar daerah batas akan di pindahkan ke tengah-tengah pita energi gap sehingga menyebabkan pembengkokan pita seperti pada gambar Gbr.13 Jika butiran partikel berukuran kecil maka kondisi ini hampir sama dengan kondisi material yang tidak di dop.



Gbr.13 Pita Energi pada tipe p nc-Si dengan oksida dan potensial penghalang

7. Kesimpulan

Pada penelitian ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

- a. Buliran hasil sintesa nc-Si yang dihasilkan dengan reactor MW lebih memenuhi syarat sebagai bahan nanomaterial karena ukurannya telah mencapai 5-20nm
- b. Nc-Si dengan ukuran yang sudah semakin kecil tapi tetap memiliki sifat-sifat kekristalan Si dengan ukuran yang lebih besar, sehingga tidak terjadi perubahan karakteristik.
- c. Dengan uji UV/Vis nc-Si menunjukkan kemampuan menyerap cahaya yang cukup baik sehingga dapat digunakan sebagai bahan dasar photovoltaic
- d. Kerapatan arus yang masih rendah ($10^{-9} - 10^{-3} \text{Acm}^{-2}$) pada tegangan $-2 - 2 \text{ V}$, namun tetap menunjukkan potensi sebagai bahan dasar divais nanoelektronik

8. Saran

Kerapatan arus dapat ditingkatkan lagi dengan menambahkan partikel doping dan proses lebih lanjut untuk dijadikan polycrystal sehingga efek ikatan terputus dapat dikurangi dan potensial penghalang antar buliran juga menurun. Selain itu dengan polycrystal porositas atau daerah hampunya juga semakin berkurang. Dengan demikian diharapkan mobilitas pembawa akan meningkat dan arus akan meningkat pula

Ucapan Terimakasih

Dengan makalah ini, penulis sangat berterimakasih kepada :

1. Walter Schottky Institute, Technische Universitaet Muenchen atas fasilitas yang telah diberikan
2. Dr.Robert Lechner dan Prof.Dr.Martin Stuzman yang telah memberikan bimbingan dan pengarahan
3. Politeknik Manufaktur Bandung khususnya jurusan Mekatronika atas dukungan dan pemberian fasilitasnya

Daftar Pustaka

- [1] Flyod, Thomas L, "Electronic Device", (2002), Prentice Hall, New Jersey
- [2] DR. Heike Muehlenweg, Guido Zimmerman, "Gas Phase Reaction

Open Up New Element ", Degussa Science Newsletter (2004)

- [3] Industrial Microwave system, <http://www.industrialmicrowave.com>
- [4] J.Humlíček, M.Garriga,M.I Alonso, M Cardona, Jurnal of Applied Physic 65,2827, 1989
- [5] Ulrich Schubert, Nicola huesing, "Synthesis of Inorganic Materials", p 17, Wiley-Vch Verlag GmbH&Co KGaA, Weinheim, 2005
- [6] Gleiter H, Acta Mater 48:1, 2000
- [7] Gleiter H, Nanostructure Material 6:3, 1995