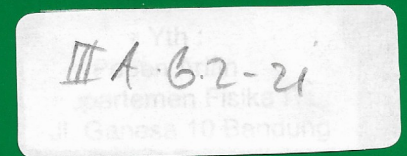


# INDONESIAN JOURNAL OF PHYSICS

Kontribusi Fisika Indonesia



Volume 14 Nomor 2, April 2003

## Isi

- Rosari Saleh dan  
Lusitra Munisa
- Pengaruh Perlakuan Implantasi Hidrogen terhadap Sifat Struktur Lapisan Tipis Amorf Silikon Karbon ( $\alpha$ -SiC:H) Hasil Deposisi Metode DC Sputtering**
- Rosari Saleh dan  
Lusitra Munisa
- Relasi Gas Optis dengan Struktur Ikatan Lapisan Tipis Amorf Silikon Karbon ( $\alpha$ -SiC:H) Hasil Deposisi Metode DC Sputtering**
- A. Suhandi,  
D. Rusdiana,  
Shofiah, dan  
P. Arifin
- Optimalisasi Struktur Sel Surya GaAs Sambungan p-n dengan Lapisan Antirefleksi yang terganggu dengan Lapisan *Window* AlGaAs**
- A. K. Jahja, N. Effendi,  
dan S. Purnama
- Karakterisasi Pendaaran Sel Baterai Sekunder  $\text{RbAg}_4\text{I}_5$  dengan Katode C**
- Frida U Ermawati
- Radical Formation in X-Irradiated Amino Acids and Its Relation to The Crystal Structures**
- Agus Yulianto,  
Satria Bijaksana, and  
Walojo Loeksmanto
- Comparative Study on Magnetic Characterization of Iron Sand from Several Locations in Central Java**
- Tuti Budiwati,  
Rukmi Hidayati,  
dan Iis Sofiati
- Pengaruh Keketuhan Atmosfer Terhadap Kesetimbangan Radiasi Matahari**



# INDONESIAN JOURNAL OF PHYSICS

**EDITORIAL BOARD (April 2003 – December 2003)**

## **Chief Editor**

A Rusli (Dept. of Physics, ITB)

## **Editors**

Abdul Waris (Dept. of Physics, ITB)

Anung Kusnowo (National Physics Institute, LIPI)

Hans J Wospakrik (Dept. of Physics, ITB)

Khairurrijal (Dept. of Physics, ITB)

Mitra Djamal (Dept. of Physics, ITB)

Muh. Yahaya (Dept. of Physics, UKM)

Muslim (Dept. of Physics, UGM)

Siti Nurul Khotimah (Dept. of Physics, ITB)

Wahyu Srigutomo (Dept. of Physics, ITB)

Zaki Su'ud (Dept. of Physics, ITB)



**Published by Department of Physics, Bandung Institute of Technology**

Jl. Ganesa No. 10, Telp. (022) 2500834, Fax. (022) 2506452 Bandung 40132

E-mail : [kfi@fi.itb.ac.id](mailto:kfi@fi.itb.ac.id). Website: <http://www.fi.itb.ac.id/~kfi>.

**INDONESIAN JOURNAL OF PHYSICS**  
Kontribusi Fisika Indonesia

Volume 14 Nomor 2 April 2003

ISSN 0854 - 6878

	Hal
Daftar Isi	i
Editorial	ii
<b>Pengaruh Perlakuan Implantasi Hidrogen terhadap Sifat Struktur Lapisan Tipis Amorf Silikon Karbon (a-SiC:H) Hasil Deposisi Metode DC Sputtering</b> Rosari Saleh dan Lusitra Munisa	33
<b>Relasi Gas Optis dengan Struktur Ikatan Lapisan Tipis Amorf Silikon Karbon (a-SiC:H) Hasil Deposisi Metode DC Sputtering</b> Rosari Saleh dan Lusitra Munisa	39
<b>Optimalisasi Struktur Sel Surya GaAs Sambungan p-n dengan Lapisan Antirefleksi yang terdangeng dengan Lapisan Window AlGaAs</b> A. Suhandi, D. Rusdiana, Shofiah, dan P. Arifin	43
<b>Karakterisasi Pendaauran Sel Baterai Sekunder RbAg<sub>4</sub>I<sub>5</sub> dengan Katode C</b> A. K. Jahja, N. Effendi, dan S. Purnama	51
<b>Radical Formation in X-Irradiated Amino Acids and Its Relation to The Crystal Structures</b> Frida U Ermawati	57
<b>Comparative Study on Magnetic Characterization of Iron Sand from Several Locations in Central Java</b> Agus Yulianto, Satria Bijaksana, and Waloejo Loeksmanto	63
<b>Pengaruh Kekeruhan Atmosfer Terhadap Kesetimbangan Radiasi Matahari</b> Tuti Budiwati, Rukmi Hidayati, dan Iis Sofiati	67

## Optimalisasi Struktur Sel Surya GaAs Sambungan p-n dengan Lapisan Antirefleksi yang terdang dengan Lapisan Window AlGaAs

A. Suhandi<sup>1,2)</sup>, D. Rusdiana<sup>1,2)</sup>, Shofiah<sup>1)</sup>, dan P. Arifin<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Jurusan Fisika, Universitas Pendidikan Indonesia,

Jl. DR. Setiabudhi 229 Bandung, Indonesia 40154

<sup>2)</sup>Lab. Fisika Material Elektronik (FISMATEL),

Departemen Fisika, Institut Teknologi Bandung

Jl. Ganesa 10 Bandung 40132

*e-mail:* a bakrie@yahoo.com

### Abstract

Optimization of solar cell performance is normally carried out by varying the device makeup, such as the semiconductor layer thickness and impurity doping concentration, as well as the device parameters, such as the minority-carrier lifetime, the minority-carrier diffusion coefficient, and the surface recombination velocity. The performance of a p-n junction GaAs solar cell was calculated analytically using device makeup-dependent parameters determined from experimental observation or, if uncertainty arises, from physical judgement based on available information. The presence of antireflecting coating systems coupled with AlGaAs window layers in this calculation was modeled by its transmissivity. The design criteria to determine the optimum structure of the solar cell is the achievement of optimum photogenerated current density. The results suggest that the presence of antireflecting coating systems coupled with AlGaAs window layers over a GaAs solar cell can improve photocurrent density significantly. An MgF<sub>2</sub>/ZnS system coupled with an AlGaAs window layer can yield a high photogenerated current density as compared to other antireflecting coating systems. The optimized cell has an MgFWnS antireflecting coating, an AlGaAs window layer with the thickness of 20 nm, a p-type layer with the thickness of 1.5 μm, a n-type layer with the thickness of 3.5 μm, and acceptor (N<sub>A</sub>) and donor (N<sub>D</sub>) concentrations of 1 × 10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup> and 1 × 10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup>, respectively. This optimized cell can yield a photocurrent density of 46.5 mA/cm<sup>2</sup>.

**Keywords :** GaAs solar cell, antireflecting coating, window layer, photocurrent density

### Abstrak

Telah dilakukan proses optimalisasi struktur sel surya GaAs sambungan p-n melalui perhitungan secara analitik, dengan variabel perhitungan meliputi makeup divais seperti ketebalan lapisan-lapisan semikonduktor dan konsentrasi doping ketakmurnian, serta parameter parameter divais seperti waktu hidup pembawa muatan minoritas, koefisien difusi pembawa muatan minoritas, dan laju rekombinasi permukaan. Parameter-parameter divais telah diambil dari data-data hasil eksperimen, hasil simulasi, maupun dari hasil kajian teoretik. Kehadiran lapisan anti refleksi yang terdang dengan lapisan window AlGaAs dalam perhitungan ini diwakili dengan nilai transmisivitasnya. Kriteria struktur sel surya optimum ditentukan berdasarkan tingkat pencapaian rapat photocurrent yang optimum. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kehadiran lapisan anti refleksi yang terdang dengan lapisan window AlGaAs dapat meningkatkan rapat photocurrent yang dapat dibangkitkan sel surya GaAs secara signifikan. Dibanding dengan bahan lapisan anti refleksi lain, sistem MgFWnS dapat membangkitkan rapat photocurrent paling besar jika dipasang pada sel surya GaAs. Struktur optimum sel surya GaAs terjadi ketika bahan lapisan anti refleksi terbuat dari MgF<sub>2</sub>/ZnS, ketebalan lapisan window (AlGaAs) sebesar 20 nm, ketebalan lapisan tipe-p dan tipe-n berturut-turut sekitar 1,5 μm dan 3,5 μm, serta konsentrasi doping akseptor di tipe-p (N<sub>A</sub>) dan konsentrasi doping donor di tipe-n (N<sub>D</sub>) berturut-turut sekitar 1 × 10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup> dan 1 × 10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup>. Dengan struktur seperti itu dapat dibangkitkan rapat photocurrent optimum sekitar 46,5 mA/cm<sup>2</sup>.

**Kata kunci :** sel surya GaAs, lapisan anti refleksi, lapisan window, rapat photocurrent

### 1. Pendahuluan

Galium Arsen (GaAs) merupakan bahan semikonduktor paduan yang memiliki celah pita energi sekitar 1,43 eV, terletak pada rentang celah pita energi

optimum untuk bahan pembuat sel surya, yakni antara 1,4 sampai 1,6 eV, sehingga sangat potensial untuk bahan pembuat sel surya yang akan memiliki unjuk kerja optimum. Namun demikian terdapat masalah yang menghambat tercapainya unjuk kerja optimum

sel surya GaAs ini, yaitu tingginya laju rekombinasi pada permukaan sel<sup>1)</sup>. Untuk mengurangi laju rekombinasi pada permukaan depan sel, dapat digunakan lapisan *window* yang ditempatkan di depan lapisan sel surya GaAs. Bahan yang biasa digunakan sebagai lapisan *window* untuk sel surya GaAs adalah *ternary*  $Al_xGa_{1-x}As$  yang memiliki celah pita energi optik lebih besar dari GaAs. Keberadaan lapisan *window* ini, selain akan mempengaruhi karakteristik listrik sel surya GaAs, juga akan mempengaruhi karakteristik optisnya, yaitu akan mengurangi reflektansi cahaya pada daerah perbatasan AlGaAs/GaAs akibat adanya perbedaan indeks bias bahan GaAs dan AlGaAs. Dengan lapisan *window* ini foton yang dapat diserap dalam rentang 300-900 nm mencapai 71,8 %, lebih besar dibanding tanpa lapisan *window* yang hanya mencapai 63,4 % saja<sup>2)</sup>. Hasil-hasil penelitian yang telah dilaporkan menunjukkan bahwa tanpa menggunakan lapisan *window*, rapat *photocurrent* yang dapat dicapai sel surya GaAs sambungan p-n hanya sekitar 27,12 mA/cm<sup>2</sup><sup>3)</sup>; dengan penambahan lapisan *window*, rapat *photocurrent* yang dapat dicapai meningkat menjadi sekitar 38,6 mA/cm<sup>2</sup><sup>4)</sup>.

Untuk lebih meningkatkan lagi foton yang dapat diserap oleh sel surya, maka di atas lapisan *window* AlGaAs dapat digandengkan suatu lapisan anti refleksi. Dengan adanya lapisan ini, maka intensitas cahaya yang dipantulkan kembali ke udara ketika cahaya menumbuk permukaan depan sel surya (lapisan AlGaAs) dapat dikurangi. Lapisan anti refleksi yang dapat digandengkan dengan lapisan *window* AlGaAs dapat terbuat dari bahan ZnS, MgF<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MgF<sub>2</sub>/ZnS<sup>2)</sup>.

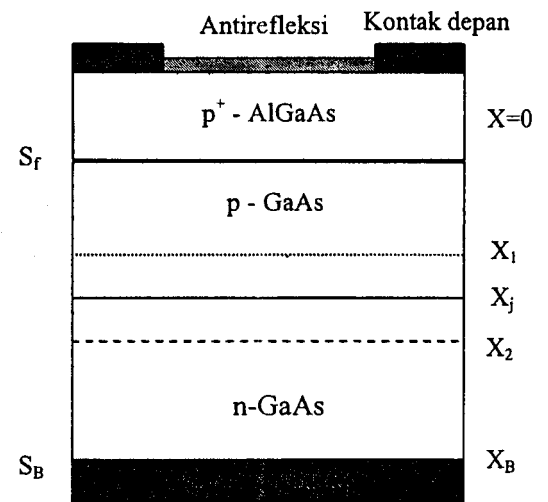
Dalam makalah ini akan dipaparkan hasil kajian teoretis dan perhitungan analitik tentang pengaruh penggunaan lapisan anti refleksi yang tergandeng dengan lapisan *window* AlGaAs terhadap besarnya rapat *photocurrent* yang dapat dicapai sel surya GaAs dengan struktur yang dioptimasi. Optimasi struktur meliputi *makeup* divais seperti ketebalan lapisan tipe-p dan tipe-n, konsentrasi doping pada tiap-tiap lapisan tersebut, serta parameter-parameter divais seperti waktu hidup pembawa muatan minoritas, koefisien difusi pembawa muatan minoritas, dan laju rekombinasi permukaan. Kriteria struktur sel surya GaAs yang optimum ditetapkan berdasarkan pencapaian rapat *photocurrent* yang optimum.

## 2. Tinjauan Teoretik

### 2.1 Struktur Sel Surya Sambungan p-n

As merupakan material yang memiliki celah pita energi langsung, sehingga memiliki harga koefisien absorpsi optik yang tinggi. Pembawa-pembawa muatan minoritas akan dibangkitkan di dekat permukaan depan

sel surya, karena itu pada lapisan depan sel surya akan dikoleksi *photocurrent* paling besar. Dalam kondisi ini sel surya sambungan p-n (p di atas n) akan memiliki keunggulan dibandingkan sel surya n-p (n di atas p), karena panjang difusi elektron dalam lapisan tipe-p (dimana sebagian besar *photocurrent* dibangkitkan) lebih besar dari pada panjang difusi *hole* dalam lapisan tipe-n<sup>1)</sup>. Struktur sel surya sambungan p-n dapat dilihat dalam gambar 1.  $S_f$  dan  $S_b$  secara berturut-turut menyatakan laju rekombinasi elektron-*hole* pada permukaan depan ( $x=0$ ) dan permukaan belakang ( $x=x_B$ )



Gambar 1. Diagram skematik sel surya GaAs dengan lapisan *window* yang tergandeng dengan lapisan anti refleksi

### 2.2 Rapat Arus Penyerapan (*Photocurrent*)

Ketika cahaya dengan panjang gelombang ( $\lambda$ ) tertentu jatuh ke permukaan sel surya, maka dalam sel tersebut akan dibangkitkan pasangan elektron-*hole* dengan laju pembangkitan sebagai fungsi jarak  $x$  dan permukaan depan sebagai berikut<sup>5)</sup>:

$$G(\lambda) = (\lambda)F(\lambda)[1-R(\lambda)]\exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (1)$$

Pembawa-pembawa muatan ini akan mengalir karena ada beda potensial dan menghasilkan *photocurrent*. Total rapat *photocurrent*  $J_{ph}$  (A/cm<sup>2</sup>) yang dapat dikoleksi dalam suatu sel surya adalah<sup>3)</sup>:

$$J_{ph} = J_{n,ph}(x_1) + J_{p,ph}(x_2) + J_{scr,ph} \quad (2)$$

dimana  $J_{n,ph}(x_1)$ ,  $J_{p,ph}(x_2)$  dan  $J_{scr,ph}$  berturut-turut adalah rapat *photocurrent* yang dapat dikoleksi dalam lapisan tipe-p, lapisan tipe-n dan lapisan muatan ruang (*space charge*) sambungan p-n pada suatu panjang gelombang tertentu.  $x_1$  dan  $x_2$  merupakan batas lapisan muatan ruang. Untuk sel surya sambungan p-n dengan konsentrasi doping tak murni seragam, ketiga persamaan rapat *photocurrent* ini dirumuskan sebagai berikut:

$$J_{nph}(X_1) = K_1 \alpha L_n \exp(-\alpha X_1) + \frac{K_1}{A} \left[ (S_f L_n / D_n + \alpha L_n) - \exp(-\alpha X_1) \left( (S_f L_n / D_n) \cosh(X_1 / L_n) + \sinh(X_1 / L_n) \right) \right] \quad (3)$$

$$J_{pph}(X_2) = K_2 \alpha L_p - \frac{K_2}{B} \left[ (S_b L_p / D_p) \cosh(W_b / L_p) - \exp(-\alpha W_b) \right] + \sinh(W_b / L_p) + \alpha L_p \exp(-\alpha W_b) \quad (4)$$

$$J_{scph} = qF(1-R) \exp(-\alpha X_1) (1 - \exp(-\alpha W)) \quad (5)$$

dimana

$$A = (S_f L_n / D_n) \sinh(X_1 / L_n) + \cosh(X_1 / L_n)$$

$$B = (S_b L_p / D_p) \sinh(W_b / L_p) + \cosh(W_b / L_p)$$

$$K_1 = qF(1-R) \alpha L_n / (\alpha^2 L_n^2 - 1)$$

$$K_2 = [qF(1-R) \alpha L_p / (\alpha^2 L_p^2 - 1)] \exp(-\alpha X_2)$$

$$W_b = X_b - X_2$$

$F(\lambda)$  adalah rapat fluks foton yaitu jumlah foton yang menumbuk permukaan depan sel surya per  $\text{cm}^2$  per detik per satuan lebar pita panjang gelombang. Kondisi AM1,5 dapat didekati dengan dua persamaan kurva linear sebagai berikut<sup>3)</sup>:

$$F(\lambda) = C(19,7\lambda - 4,7) \times 10^{15} \text{ untuk } 0,24 \leq \lambda \leq 0,47 \mu\text{m} \quad (6.a)$$

$$F(\lambda) = C(-2,5\lambda + 5,7) \times 10^{15} \text{ untuk } \lambda \geq 0,48 \mu\text{m} \quad (6.b)$$

$C$  adalah konsentrasi fluks sinar matahari ( $C=1$  untuk kondisi tanpa konsentrator). Kehadiran lapisan antirefleksi dinyatakan dengan parameter Transmisivitasnya ( $T(\lambda)$ ), yang dalam persamaan di atas diungkapkan dalam reflektivitas  $R(\lambda)$ , dimana hubungan  $R(\lambda)$  dan  $T(\lambda)$  dinyatakan sebagai  $R(\lambda) = 1 - T(\lambda)$ . Data-data tentang nilai transmisivitas untuk berbagai jenis lapisan anti refleksi yang terdang dengan lapisan *window* AlGaAs, dapat dilihat pada referensi 2.

Persamaan rapat *photocurrent* yang dikemukakan di atas (pers. 2) berlaku untuk suatu panjang gelombang ( $\lambda$ ) tertentu dan hanya cocok untuk lebar pita panjang gelombang yang sangat sempit ( $\approx 10 \text{ nm}$ )<sup>3)</sup>. Dengan demikian total rapat *photocurrent* merupakan jumlah rapat *photocurrent* yang dibangkitkan oleh setiap 10 nm lebar pita panjang gelombang, sehingga dapat dirumuskan seperti berikut:

$$J_{ph} = \sum_{i=1}^n J_{ph}(\lambda_i), \lambda_i = 0,24 + 0,01(i-1) \quad (7)$$

$n$  adalah bilangan bulat yang besarnya bergantung dari panjang gelombang terbesar yang dapat diserap oleh sel surya. Untuk sel surya GaAs, panjang gelombang terbesar yang dapat diserap adalah  $0,88 \mu\text{m}$  (bersesuaian dengan  $E_g = 1,42 \text{ eV}$ ), maka  $n$  paling besar adalah 65.

### 2.3 Parameter-parameter material GaAs

Dalam proses optimalisasi ini, parameter-parameter bahan pembuat sel surya diambil dari berbagai literatur baik hasil eksperimen, hasil simulai perhitungan, maupun hasil kajian teoritik. Parameter-

parameter bahan seperti koefisien difusi, waktu hidup (*life time*), dan mobilitas dari pembawa-pembawa muatan minoritas, sangat bergantung pada bahannya itu sendiri, konsentrasi doping tak murnian, serta temperaturnya.

#### Koefisien absorpsi optik

Koefisien absorpsi optik  $\alpha(\lambda)$  untuk bahan GaAs dapat didekati dengan persamaan berikut<sup>3)</sup>:

$$\alpha(\lambda) = 0 \quad \text{untuk } \lambda > 0,88 \mu\text{m}$$

$$\alpha(\lambda) \approx 10^{-37,5\lambda + 34} \text{ cm}^{-1} \quad \text{untuk } 0,8 \leq \lambda \leq 0,88 \mu\text{m} \quad (8)$$

$$\alpha(\lambda) \approx 10^{-3,3\lambda + 6,64} \text{ cm}^{-1} \quad \text{untuk } \lambda < 0,8 \mu\text{m}$$

#### Koefisien difusi dan mobilitas pembawa muatan minoritas

Koefisien difusi pembawa-pembawa muatan minoritas elektron dan *hole* masing-masing dirumuskan sebagai  $D_n = (kT/q)\mu_n$  dan  $D_p = (kT/q)\mu_p$ <sup>6)</sup>, dengan  $\mu_n$  dan  $\mu_p$  adalah mobilitas elektron dan *hole* yang dirumuskan sebagai berikut<sup>7)</sup>:

$$\mu_n = 7200 \left\{ \left( \frac{T}{300} \right)^{2,3} + \frac{N_A}{10^{17}} \ln \left[ 1 + \left( \frac{6 \times 10^{16}}{N_A} \right)^{2,3} \right] \right\} \left( \frac{300}{T} \right)^{1,5} \quad (9.a)$$

$$\mu_p = 370 \left\{ \left( \frac{T}{300} \right)^{2,3} + \frac{N_D}{10^{17}} \ln \left[ 1 + \left( \frac{4 \times 10^{16}}{N_D} \right)^{2,3} \right] \right\} \left( \frac{300}{T} \right)^{1,5} \quad (9.b)$$

#### Panjang difusi dan waktu hidup pembawa muatan minoritas

Panjang difusi dari pembawa-pembawa muatan minoritas elektron dan *hole* dirumuskan sebagai  $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$  dan  $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$  [6],  $\tau_n$  dan  $\tau_p$  adalah waktu hidup elektron dan *hole* yang dapat ditentukan dengan persamaan berikut<sup>3)</sup>:



$$\tau_n = 0,1 \mu s \quad \text{untuk } N_A \leq 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$\tau_n = \frac{0,1}{\sqrt{(N_A - 10^{16})/10^{16}}} \mu s \quad \text{untuk lainnya} \quad (10.a)$$

$$\tau_p = 0,1 \mu s \quad \text{untuk } N_A \leq 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

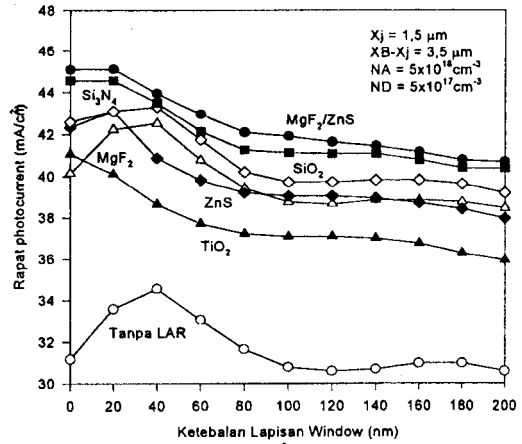
$$\tau_p = \frac{0,1}{\sqrt{(N_D - 10^{16})/10^{16}}} \mu s \quad \text{untuk lainnya} \quad (10.b)$$

Laju rekombinasi pada permukaan depan dan permukaan belakang ( $S_f$  dan  $S_b$ ) untuk GaAs sebesar  $1,25 \times 10^5$  cm/s telah diajukan oleh Righel dan Rohatgi. [3] Nilai ini lebih kecil dari pada yang diusulkan dalam referensi 1, sebesar  $4 \times 10^5$  cm/s. Rapat pembawa muatan intrinsik ( $n_i$ ) untuk GaAs pada temperatur kamar harganya  $2,25 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$  [7], dan konstanta dielektrik ( $\epsilon$ ) untuk GaAs pada temperatur kamar harganya  $13,1$  [6].

**3. Hasil dan Pembahasan**

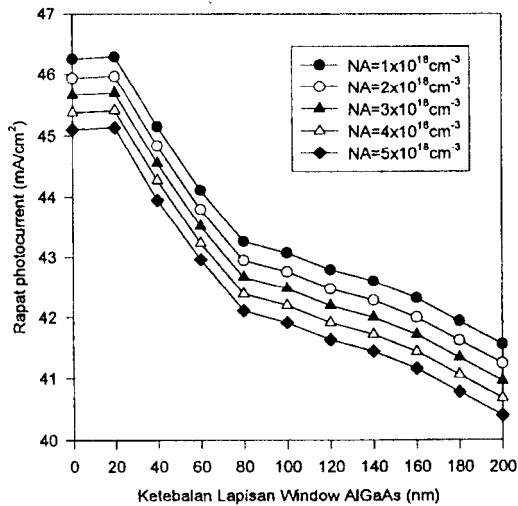
Gambar 2 menunjukkan kurva rapat *photocurrent* sebagai fungsi ketebalan lapisan *window* AlGaAs untuk masing-masing jenis lapisan antirefleksi yang terdapat dengannya pada sel surya GaAs yang memiliki ketebalan lapisan tipe-p ( $X_j$ ) dan ketebalan tipe-n ( $X_B - X_j$ ) masing-masing  $1,5 \mu m$  dan  $3,5 \mu m$  serta konsentrasi doping tak murnian di tipe-p dan di tipe-n masing-masing sebesar  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  dan  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Dari gambar tersebut tampak bahwa untuk setiap jenis lapisan antirefleksi yang digunakan, terdapat kecenderungan yang sama yaitu mula-mula terjadi peningkatan rapat *photocurrent* hingga suatu ketebalan lapisan *window* AlGaAs tertentu lalu terjadi penurunan kembali, kecuali untuk lapisan antirefleksi dari bahan  $TiO_2$  yang *photocurrentnya* cenderung terus menurun dengan tebal lapisan *window*. Kehadiran lapisan antirefleksi yang terdapat dengan lapisan *window* AlGaAs, memiliki pengaruh yang cukup dominan dalam meningkatkan *photocurrent* dalam sel surya GaAs. Dapat dilihat pada gambar 2, tanpa adanya lapisan antirefleksi, rapat *photocurrent* yang dapat dibangkitkan pada sel surya GaAs hanya berkisar sekitar  $30 \text{ mA/cm}^2$ . Namun dengan adanya lapisan anti refleksi, rapat *photocurrent* dapat ditingkatkan hingga mencapai sekitar  $45 \text{ mA/cm}^2$ . Hal ini dapat dipahami, karena dengan penambahan lapisan anti refleksi di permukaan depan sel surya, maka jumlah sinar matahari yang dapat ditransmisikan ke dalam sel surya untuk dikonversi menjadi energi listrik akan lebih banyak, akibatnya arus listrik yang dihasilkan juga bertambah besar. Dibandingkan dengan jenis anti refleksi lain, penggunaan lapisan antirefleksi dari bahan  $MgF_2/ZnS$  dapat membangkitkan rapat *photocurrent* paling tinggi. Kenyataan ini dapat terjadi karena bahan ini memiliki harga transmisivitas ( $T$ ) paling besar dibanding dengan yang lainnya (lihat ref. 2). Dengan menggunakan lapisan anti refleksi dari bahan  $MgF_2/ZnS$ , rapat *photocurrent*

paling besar yang dapat dibangkitkan, terjadi pada ketebalan lapisan *window* AlGaAs sekitar  $20 \text{ nm}$ .

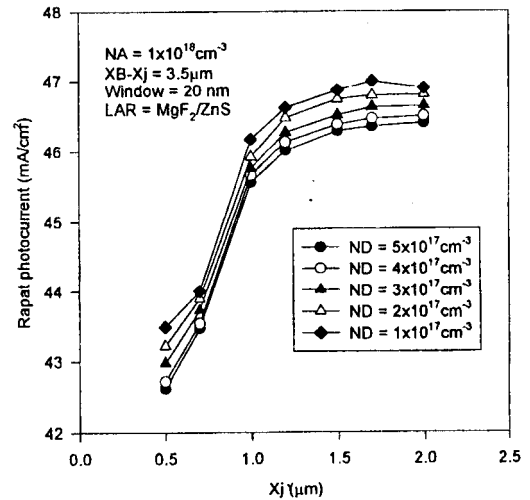


Gambar 2. Grafik rapat *photocurrent* terhadap ketebalan lapisan *window* AlGaAs untuk masing-masing jenis lapisan antirefleksi yang terdapat

Atas dasar hasil yang diperoleh tersebut, maka untuk selanjutnya akan ditetapkan penggunaan bahan  $MgF_2/ZnS$  sebagai lapisan anti refleksi pada sel surya GaAs. Gambar 3 menunjukkan kurva rapat *photocurrent* sebagai fungsi ketebalan lapisan *window* AlGaAs yang terdapat dengan lapisan antirefleksi dari bahan  $MgF_2/ZnS$  untuk konsentrasi doping tak murnian di tipe-p yang berbeda-beda. Tampak bahwa semakin kecil konsentrasi doping tak murnian, rapat *photocurrent* yang dibangkitkan semakin besar, hal ini terjadi karena waktu hidup pembawa minoritas di tipe-p (elektron) akan meningkat ketika konsentrasi doping akseptor  $N_A$  diperkecil (lihat pers.10), dengan demikian maka elektron-elektron yang dibangkitkan memiliki peluang yang lebih besar untuk tetap bergerak pada pita konduksi dan menghasilkan arus listrik. Rentang konsentrasi doping akseptor dari  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  hingga  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  dipilih dalam perhitungan atas dasar pertimbangan optimasi rapat *photocurrent* yang dilakukan jangan sampai engorbankan parameter unjuk kerja sel surya yang lainnya, misalnya penurunan tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ ) sel surya. Ini tidak diharapkan, karena secara keseluruhan nantinya akan berpengaruh pada rendahnya efisiensi konversi yang dicapai sel surya. Konsentrasi doping terlalu tinggi (di atas orde  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) dapat mengakibatkan penyempitan celah pita energi bahan semikonduktor, sedangkan konsentrasi doping terlalu rendah (di bawah orde  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) akan menyebabkan terjadinya peningkatan hambatan seri pada sel surya [6].

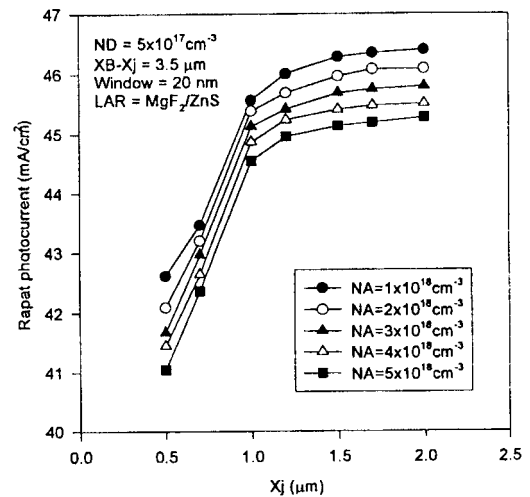


Gambar 3. Grafik rapat *photocurrent* terhadap ketebalan lapisan *window* AlGaAs yang tergandeng dengan lapisan antirefleksi dari bahan MgF<sub>2</sub>/ZnS untuk N<sub>A</sub> yang berbeda-beda.



Gambar 4. Grafik rapat *photocurrent* terhadap ketebalan lapisan tipe-p (X<sub>j</sub>) untuk konsentrasi doping akseptor (N<sub>A</sub>) yang berbeda

Kebergantungan rapat *photocurrent* terhadap ketebalan lapisan tipe-p (X<sub>j</sub>) dan tipe-n (X<sub>B</sub>-X<sub>j</sub>) untuk konsentrasi doping tak murnian di tipe-p yang berbeda-beda dapat dilihat pada gambar 4 dan 5. Dari kedua grafik tersebut tampak bahwa terdapat kecenderungan yang sama yaitu terjadi peningkatan rapat *photocurrent* ketika ketebalan lapisan tipe-p maupun lapisan tipe-n ditambah. Peningkatan secara tajam terjadi hingga mencapai ketebalan lapisan tipe-p 1,5 μm dan ketebalan lapisan tipe-n 3,5 μm, lebih dari itu peningkatannya relatif kecil bahkan cenderung konstan. Hal ini dapat terjadi karena ketika lapisan tipe-p maupun tipe-n terlalu tipis maka pasangan elektron *hole* yang dibangkitkan tidak terlalu banyak, sehingga rapat *photocurrent* yang dihasilkan juga akan kecil. Jika ketebalan lapisan ditambah maka pasangan elektron-*hole* yang dibangkitkan juga akan semakin banyak dan akibatnya rapat *photocurrent* yang dihasilkan juga akan meningkat. Akan tetapi apabila ketebalan lapisan-lapisan yang terlalu tebal akan berpengaruh pada difusivitas pembawa muatan. Dari kedua grafik tersebut itu juga dapat dilihat bahwa terjadi pergeseran kurva rapat *photocurrent* ke arah yang lebih kecil ketika konsentrasi doping tak murnian di lapisan tipe-p (N<sub>A</sub>) ditambah.



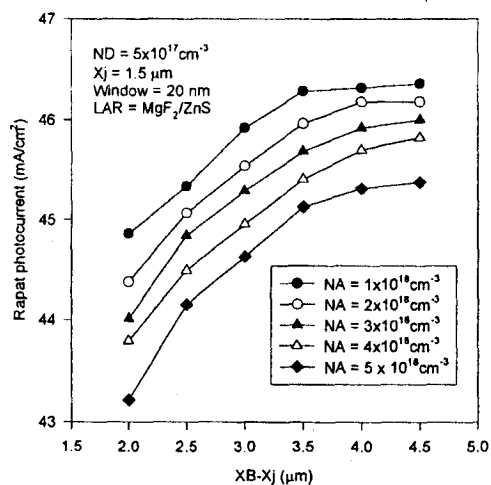
Gambar 5. Grafik rapat *photocurrent* terhadap ketebalan lapisan tipe-n (X<sub>B</sub>-X<sub>j</sub>) untuk konsentrasi doping akseptor (N<sub>A</sub>) yang berbeda-beda

Kebergantungan rapat *photocurrent* terhadap ketebalan lapisan tipe-p (X<sub>j</sub>) dan lapisan tipe-n (X<sub>B</sub>-X<sub>j</sub>) untuk konsentrasi doping tak murnian di lapisan tipe-n (N<sub>D</sub>) yang berbeda-beda, memiliki kecenderungan yang



sama seperti untuk konsentrasi doping tak murnian di lapisan tipe-p yang berbeda-beda, yaitu mula-mula meningkat tajam hingga ketebalan tipe-p 1,5  $\mu\text{m}$  dan ketebalan tipe-n 3,5  $\mu\text{m}$  lebih dari itu peningkatannya relatif kecil, sebagaimana terlukis dalam gambar 6 dan gambar 7. Tampak pula bahwa terjadi pergeseran kurva ke arah yang lebih besar ketika konsentrasi doping di tipe-n ( $N_D$ ) diperkecil. Rata-rata konsentrasi doping di tipe-p ditentukan sekurang-kurangnya 10 kali lebih tinggi dari konsentrasi doping di tipe-n. Hal didasarkan pada pertimbangan eksperimen, dimana keadaan ini akan terjadi dalam proses pembuatan sambungan p-n akibat adanya difusi termal<sup>3)</sup>.

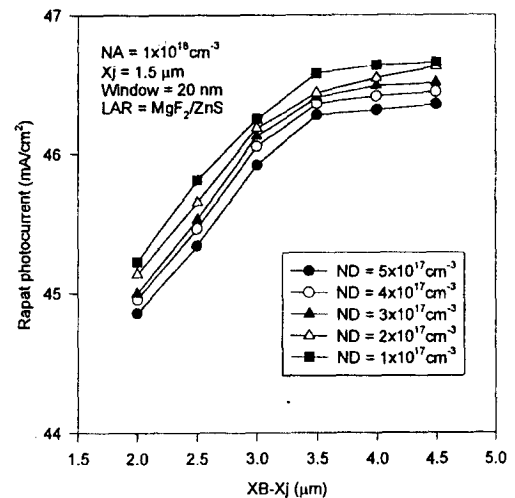
Dari data-data yang diperoleh dari hasil studi ini, maka dapat direkomendasikan suatu struktur optimum sel surya GaAs sebagai berikut : ketebalan lapisan tipe-p ( $X_j$ ) sekitar 1,5  $\mu\text{m}$ , ketebalan lapisan tipe-n ( $X_B - X_j$ ) sekitar 3,5  $\mu\text{m}$ , konsentrasi doping akseptor ( $N_A$ ) dan donor ( $N_D$ ) berturut-turut sebesar  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  dan  $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ , bahan lapisan anti refleksi  $\text{MgF}_2/\text{ZnS}$  yang digandengkan dengan lapisan *window* AlGaAs setebal 20 nm.



Gambar 6. Grafik rapat *photocurrent* terhadap ketebalan lapisan tipe-p ( $X_j$ ) untuk konsentrasi doping donor ( $N_D$ ) yang berbeda-beda.

Struktur sel surya GaAs ini direkomendasikan atas dasar pertimbangan bahwa meskipun terjadi peningkatan rapat *photocurrent* ketika ketebalan lapisan tipe-p dan tipe-n lebih besar dari 1,5  $\mu\text{m}$  dan 3,5  $\mu\text{m}$ , namun peningkatannya relatif kecil bahkan cenderung konstan. Peningkatan sebesar itu dipandang tidak ekonomis karena tidak sepadan dengan biaya (*cost*) yang harus dikeluarkan untuk menambah ketebalan pada proses fabrikasinya. Dengan menggunakan struktur sel

surya seperti itu, maka rapat *photocurrent* yang dibangkitkan dapat mencapai harga sekitar 46,5 mA/cm<sup>2</sup>.



Gambar 7. Grafik rapat *photocurrent* terhadap ketebalan lapisan tipe-n ( $X_B - X_j$ ) untuk konsentrasi doping donor ( $N_D$ ) yang berbeda-beda

#### 4. Kesimpulan

Kehadiran lapisan anti refleksi yang tergendeng dengan lapisan *window* AlGaAs dapat meningkatkan *photocurrent* yang dibangkitkan sel surya GaAs secara signifikan. Struktur optimum sel surya GaAs terjadi ketika ketebalan lapisan *window* (AlGaAs) sebesar 20 nm, bahan lapisan anti refleksi  $\text{MgF}_2/\text{ZnS}$ , ketebalan lapisan tipe-p dan tipe-n berturut-turut sekitar 1,5  $\mu\text{m}$  dan 3,5  $\mu\text{m}$ , serta konsentrasi doping akseptor ( $N_A$ ) dan konsentrasi doping donor ( $N_D$ ) sekitar  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  dan  $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ . Dengan struktur seperti itu dapat dibangkitkan rapat *photocurrent* optimum sekitar 46,5 mA/cm<sup>2</sup>.

#### Daftar Pustaka

- Ronald C. Knechtli, Robert Y. Loo, and G. Sanjiv Kamath, *High Efficiency GaAs Solar Cells*, IEEE Trans. Electron Dev., Vol-ED-31, no.5, May, pp. 577-587, (1984).
- Carlos Algora del Valle and Manuel Felices Alcaraz, *Performance of Antireflecting Coating-AlGaAs Window Layer Coupling for Terrestrial Concentrator GaAs Solar Cells*, IEEE Trans. Electron Dev., Vol. 44, No. 9, September, pp. 1499-1506, (1997).
- J.J. Liou and W.W. Wong, *Comparison and Optimization of The Performance of Si and GaAs*

- 
- Solar Cells, Solar Energy Material and Solar Cells*, Vol. 28, pp. 9-28, (1992).
4. R. H. Parekh and Allen M. Barnet, *Improved Performance Design of Gallium Arsenide Solar Cells for Space*, J. Appl. Phys., vol. ED-31, No.5, May, (1984).
  5. Hans Joachim Moller, *Semiconductors for Solar cells*, Artech House Inc., London, 1993
  6. S.M. Sze, *Semiconductors Devices : Physics and Technology*, John Wiley and Sons Inc., New York, (1985).
  7. Geraldo R. Araujo, *Compound Semiconductor solar cells*, dari Antonio Luque, *Solar cells and Optics for Photovoltaic Concentrations*, IOP Publishing Ltd., England, 1989.