

Fabrikasi dan Analisis Struktur Sel Surya Amorf Menggunakan Sistem PECVD

Fabrication and Structure Analysis of Amorphous Solar Cells Using the PECVD System

Soni Prayogi^{1,2*}, Ayunis¹, Yoyok Cahyono¹, Darminto¹

¹Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Alamiah Dasar, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

²Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Industri, Universitas Pertamina

*Corresponding author: soni.prayogi@universitaspertamina.ac.id

ABSTRAK

DOI:
[10.30595/jrst.v7i2.16874](https://doi.org/10.30595/jrst.v7i2.16874)

Histori Artikel:

Diajukan:
07/02/2023

Diterima:
15/08/2023

Diterbitkan:
15/09/2023

Pada studi ini, telah dilakukan pembuatan lapisan sel surya silikon amorf terhidrogenasi (a-Si:H) tipe p dengan menggunakan sistem PECVD pada substrat kaca ITO. Deposisi yang dilakukan selama 30 menit dengan daya RF 3-Watt dan temperatur 270°C. Fabrikasi sel surya amorf menggunakan metode eksperimen dengan mengalirkan gas silan (SiH₄) 20 sccm dengan variasi laju gas Hidrogen (H₂) dari 30 sccm sampai 70 sccm dan laju gas Boron (B₂H₆) 2 sccm dan 4 sccm. Hasil fabrikasi sel surya amorf mendapatkan ketebalan lapisan yang diukur dengan spektrometer (NanoCalc-2000) sebesar 302,8-324,0 nm. Dengan menggunakan pengukuran *four-point probe* didapatkan konduktivitas gelap $3,34 \times 10^{-3}$ S/cm dan konduktivitas terang didapatkan $3,91 \times 10^{-3}$ S/cm. Serta, hasil pengukuran menggunakan UV-VIS mendapatkan energi gap sebesar 1,7-1,8 eV. Fabrikasi lapisan sel surya amorf ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi sel surya berbasis a-Si: H.

Kata Kunci: PECVD, Konduktivitas, Energi Gap, Sel Surya

ABSTRACT

In this study, a layer of p-type hydrogenated amorphous silicon (a-Si: H) solar cells was prepared using the PECVD system on an ITO glass substrate. The deposition was carried out for 30 minutes with 3-Watt RF power and a temperature of 2700C. The fabrication of amorphous solar cells used an experimental method by flowing 20 sccm of silan gas (SiH₄) with varying rates of Hydrogen (H₂) gas from 30 sccm to 70 sccm and rates of Boron gas (B₂H₆) 2 sccm and 4 sccm. The results of the amorphous solar cell fabrication obtained a layer thickness as measured by a spectrometer (NanoCalc-2000) of 302.8-324.0 nm. Using a four-point probe measurement, the dark conductivity is 3.34×10^{-3} S/cm and the light conductivity is 3.91×10^{-3} S/cm. Also, the results of measurements using UV-VIS get an energy gap of 1.7-1.8 eV. The fabrication of amorphous solar cell layers is expected to increase the efficiency of a-Si: H based solar cells.

Keywords: PECVD, Conductivity, Bandgap, Solar Cells

1. PENDAHULUAN

Sel surya terbuat dari bahan semikonduktor seperti silikon, yang berfungsi sebagai isolator pada suhu rendah dan sebagai konduktor jika ada energi dan panas (Ghosh & Prelas, 2011). Sel surya silikon pada dasarnya adalah dioda yang terdiri dari dua lapisan: lapisan silikon tipe-n (silikon yang didoping

fosfor) dan lapisan silikon tipe-p (silikon yang didoping boron) (Bhatia, 2014). Sejauh ini, sel surya diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu *monocrystalline*, *polikristalin* dan *amorf*. Pada jenis yang pertama bahan yang digunakan adalah silikon kristalin (c-Si) yang sering disebut silikon wafer. Sel surya dari c-Si sebelum 1980 effisiensinya mencapai 15% dan sekarang

mencapai 25% (Irvine, 2007). Sel surya jenis c-Si memerlukan biaya pembuatan yang tinggi (Phillips, 2019). Pada tipe amorf, idenya untuk mengurangi biaya pembuatan hingga mencapai 1% dari jenis wafer silikon (Prayogi, 2022c). Bahan yang digunakan adalah silikon amorf (*amorphous silicon*) (Guha, 2001). Bahan yang lainnya yaitu *copper-sulphide*, *cadmium-sulphide*, *cadmium-telluride*, dan *copper indium diselenide*.

Silikon Amorf Terhidrogenasi adalah salah satu kekuatan pendorong di balik sebagian besar teknologi fotovoltaik saat ini yang digunakan selama 25 tahun terakhir (Morigaki & Ogihara, 2007). Di laboratorium, efisiensi awal sekitar 2-3% dicapai untuk senyawa tunggal (*single junction cells*), kemudian nilai naik sampai 13% dengan *multiple structure* (tandem atau *triple-junction*) serta paduan silikon (sebagian besar dengan Ge) (Prior, 2005). Meskipun efisiensi a-Si:H lebih rendah dibandingkan dengan c-Si (dan mc-Si), a-Si:H berpotensi untuk mengurangi biaya produksi sehingga akan menggantikan teknologi silikon kristal yang lebih stabil (Prayogi et al., 2017).

Parameter penting di dalam penumbuhan material tipe p dan n diantaranya koefisien absorpsi spektrum cahaya, sifat optik yaitu optical band gap, dan sifat elektronik yaitu

konduktivitas gelap dan terang (Hamdani et al., 2022b). Penelitian ini bertujuan untuk menemukan material tipe-p terbaik untuk sel surya. Metode yang digunakan adalah dengan mengalirkan gas diboran, silan, dan hidrogen melalui chamber PECVD dengan berbagai laju aliran gas.

2. METODE PENELITIAN

Pada metode penelitian ini berisi tentang alat dan bahan, kegiatan yang dilakukan peneliti mengambil data dan langkah-langkah peneliti dalam melakukan analisis terhadap data yang digunakan. Kaca ITO (*Indium Tin Oxide*) digunakan sebagai substrat untuk mendepo-sisikan sel surya a-Si:H (Prayogi, Cahyono, Hamdani, et al., 2022). Untuk membersihkan kotoran yang kemungkinan menempel pada permukaan sampel, substrat dibersihkan dengan alkohol didalam ultrasonic cleaner selama 15 menit, kemudian dibilas dengan diwater dengan menggunakan ultrasonic cleaner yang sama (S.-H. Wang et al., 2020). Setelah itu dikeringkan dengan hairdryer atau disemprot dengan nitrogen (Rozati & Ziabari, 2022). Langkah selengkapnya persiapan sebelum preparasi sampel seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Urutan persiapan proses preparasi lapisan sel surya a-Si:H tipe-p

Pekerjaan ini dimulai dengan menumbuhkan lapisan sel surya tipe- p a-Si: H dalam sistem PECVD. Langkah pertama sebelum penumbuhan film tipis adalah menyiapkan kaca yang telah dibersihkan sebagai substrat untuk menumbuhkan lapisan sel surya tipe-p a-Si: H. Substrat kaca kemudian ditempatkan di ruang PECVD seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Suhu untuk menumbuhkan lapisan sel surya a-Si:H diatur ke PL 4 dengan temperatur 150 C dan tekanan ruang 2 Torr sebelum dimasukkan ke dalam ruang penumbuh film tipis (Prayogi, Cahyono,

& Darminto, 2022a). Kemudian, tunggu terlebih dahulu ruang pertumbuhan lapisan sel surya tipe a-Si:H hingga mencapai suhu 150 °C. Laju aliran SiH_4 , laju aliran H_2 , dan daya RF (frekuensi radio) kemudian disesuaikan untuk menghasilkan parameter pertumbuhan yang ditunjukkan pada Tabel 1. Proses pertumbuhan lapisan sel surya tipe-p a-Si:H dimulai saat plasma muncul di chamber PL 4 (Prayogi et al., 2021). Proses penumbuhan lapisan tipe-p dilakukan selama 1 jam. Selanjutnya, sampel dibawa masuk ke dalam ruang chamber PL 4 (Duan et al., 2014). Sampel kemudian

dikeluarkan dari alat PECVD. Hasil yang diperoleh berupa lapisan tipis berwarna orange pada substrat ITO.



Gambar 2. Sistem Reaktor Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD)

Tabel 1. Variabel deposisi lapisan sel surya a-Si:H tipe-p

Sampel	Laju SiH ₄ (sccm)	Laju B ₂ H ₆ (sccm)	Laju H ₂ (sccm)
1	20	2	20
2	20	2	30
3	20	2	40
4	20	4	50
5	20	4	60
6	20	4	70

Setelah penyiapan sampel selesai, masing-masing sampel diperiksa sifat elektroniknya yaitu konduktivitas, dan sifat optiknya yaitu energi gap. Menghitung energi gap dapat menggunakan metode Tauc's Plot. Hukum Tauc's dapat ditulis:

$$(\alpha h \nu)^{1/2} = B (h\nu - E_{opt}) \quad (1)$$

Dimana α adalah koefisien absorpsi, h konstanta planck, ν frekuensi cahaya E_{opt} adalah *optical band gap*.

Konduktivitas listrik diukur dengan metode empat titik (*four-point probe*) (Prayogi et al., 2019). Konduktivitas yang dimaksud ada dua yaitu pada saat gelap (*dark conductivity*) dan pada saat penyorotan (*photoconductivity*).

Sebelum menghitung konduktivitas, ketebalan lapisan diukur (Hamdani et al., 2022a). Konduktivitas listrik sel surya amorf (σ_A) teragantung pada pembawa muatan (NA) dan mobilitas pembawa muatan (μ_A), dengan rumus sebagai berikut:

$$\sigma_A = NA e \mu_A \quad (2)$$

Ketebalan lapisan ditandai dengan memaparkan sampel atau lapisan ke cahaya pada panjang gelombang tertentu dan kemudian mengamati cahaya yang dipantulkan dari lapisan tersebut (Kasap et al., 2007). Alat yang digunakan adalah spektrometer yang menggunakan software Nano-Calc-2000 (Schulze et al., 2010). Sementara itu, spektrometer UV-VIS menggunakan pengukuran energi gap dan kinerja lapisan sel surya a-Si:H tipe-p.

Perhitungan efisiensi sel surya dilakukan dengan mengukur parameter V_{oc} (*open circuit voltage*), I_{sc} (*short circuit current*) dan FF (*Fill Factor*). Nilai *Fill Factor* ditentukan melalui Persamaan:

$$FF = (I_m V_m) / (I_{sc} V_{oc}) = P_m / (I_{sc} V_{oc}) \quad (3)$$

Dimana I_m dan V_m adalah arus dan tegangan listrik pada titik kerja optimum, yaitu yang menghasilkan daya keluaran maksimum. Sedangkan efisiensi konversi (η) dihitung melalui persamaan:

$$\eta = P_m / P_{in} = ((FF V_{oc} I_{sc}) / P_{in}) \times 100\% \quad (4)$$

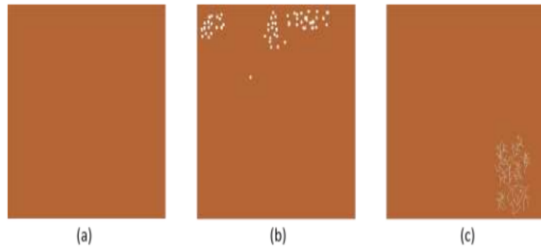
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Fabrikasi Lapisan sel surya a-Si:H tipe-p

Lapisan sel surya a-Si:H tipe-p ditanam pada substrat ITO dalam sistem reaktor PECVD menggunakan frekuensi radio (rf) 13,6 MHz. Sistem reaktor PECVD yang digunakan terdiri atas dua ruang deposisi, masing-masing digunakan khusus untuk deposisi lapisan intrinsik dan lapisan ekstrinsik (Prayogi, Cahyono, & Darminto, 2022b).

Hasil yang diperoleh dari deposisi ini adalah lapisan orange seragam seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 (a). Lapisan tersebut dianggap sebagai tanda homogen dengan warna coklat seragam. Probabilitas untuk mendapatkan hasil lapisan homogen sangat kecil (Xu & Yan, 2010). Probabilitas yang paling besar yaitu lapisan jenis kedua. Pada jenis yang ketiga, terjadi pada laju Hidrogen tinggi yaitu 60 sccm dan 70 sccm. Hasil awal deposisi pada jenis ketiga sama dengan hasil yang didapat dari jenis yang pertama yaitu lapisan berwarna coklat yang merata tanpa ada bintik-

bintik seperti Gambar 3(a), tetapi setelah beberapa saat lapisan berubah menjadi seperti Gambar 3(c). Beberapa dari sampel terus menjalar sampai seluruh permukaan lapisan sehingga sampel tidak dapat digunakan karena lapisan sel surya a-Si:H tidak menempel lagi pada substrat (Prayogi et al., 2022).



Gambar 3. Kategori Hasil Deposisi (a) lapisan merata (b) lapisan ada bintik-bintik (c) lapisan timbul retak-retak

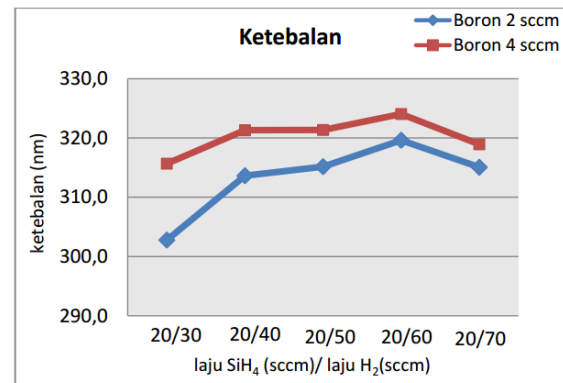
Hasil deposisi jenis yang kedua, debu (*dust*) sangat mungkin terbentuk selama tahap kedua deposisi. Pada permukaan, debu-debu menghasilkan kekosongan (*voids*) yang besar (Q. Wang et al., 2021). Debu-debu saat mencapai permukaan tidak bisa bergerak bebas sehingga tampak bahwa sangat besar terbentuknya ruang kosong (*voids*) yang besar (Illiberi et al., 2011). Hal tersebut yang mengakibatkan pada jenis kedua muncul adanya bintik-bintik pada lapisan sebagai ruang kosong (Meng et al., 2015). Dengan kejadian tersebut, maka peluang terbentuknya hasil deposisi jenis kedua sangat besar

Hasil deposisi jenis yang ketiga, sangat mungkin terjadi melalui tahap ketiga dan keempat pada proses deposisi. Pada langkah ketiga dari persamaan reaksi kedua, ikatan silang terjadi setelah dispersi gugus Si-H, sehingga molekul hidrogen tetap terbungkus dalam lapisan (Chittick et al., 1969). Pada tahap yang keempat, *stress* dan *strain* yang besar menghasilkan permukaan yang lemah (Welser et al., 2019). Ikatan lemah pada permukaan mudah putus dengan adanya energi aktivasi. Pemutusan ikatan menyebabkan pelepasan atom H ke udara terbuka (Krenckel et al., 2021). Peristiwa seperti ini tercermin dalam hasil pengendapan jenis ketiga. Setelah deposisi selesai, terjadi seperti ranting yang terus tumbuh dan hasil akhir lapisan sel surya a-Si:H terlepas dari substrat seperti yang terlihat pada Gambar 1(c).

Pengukuran Ketebalan

Hasil pengukuran ketebalan dengan Spektrometer (NanoCalc-2000), seperti Gambar 4. Diagram yang dihasilkan dengan membandingkan jumlah silan dan laju hidrogen

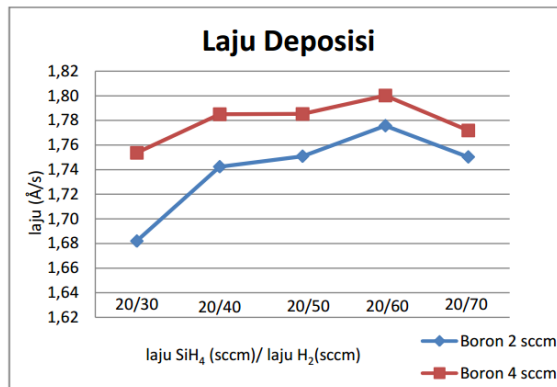
menurut Sampel 1-6, yaitu silan 20 sccm dan laju hidrogen meningkat dari 30 sccm menjadi 70 sccm.



Gambar 4. Diagram ketebalan lapisan sel surya a-Si:H tipe p

Melihat Gambar 4 terlihat bahwa sampel yang paling tebal menggunakan kadar H₂ sebesar 60 sccm. Pada laju Boron yang sama, terjadi peningkatan ketebalan lapisan pada laju H₂ dari 30 sccm sampai dengan 60 sccm. Hal yang berbeda tampak pada laju H₂ 70 sccm yaitu terjadi penurunan ketebalan lapisan. Nilai ketebalan pada Gambar 4 digunakan untuk menghitung kecepatan rata-rata proses pelapisan a-Si:H tipe-p (Bhattacharya & John, 2019). Laju deposisi rata-rata dihitung dengan tebal dari sampel dibagi dengan waktu total selama proses deposisi (Prayogi, 2022b). Laju pengendapan rata-rata dengan peningkatan a-Si:H tipe-p dengan laju boron dan hidrogen yang berbeda diperoleh dari penelitian.

Laju pengendapan persiapan lapisan sel surya a-Si:H Laju hidrogen sebagai fungsi suhu substrat 270 °C ditunjukkan pada Gambar 5. Dari grafik terlihat bahwa laju pengendapan meningkat seiring dengan perubahan laju H₂ dari 30 sccm menjadi 60 sccm, tetapi menurun pada 70 sccm. Hal ini karena laju pengendapan sangat dipengaruhi oleh keadaan plasma (Liu et al., 2022). Pada laju hidrogen dari 30 sccm menjadi 60 sccm, peningkatan laju deposisi disebabkan oleh peningkatan densitas radikal di dekat substrat sebagai akibat dari peningkatan densitas elektron dalam plasma (Wen et al., 2018). Hal sebaliknya terjadi pada laju hidrogen 70 sccm. Plasma mengandung banyak ion H, yang memungkinkan hidrogen untuk dihilangkan (dilepaskan) dari permukaan lapisan.



Gambar 5. Diagram deposisi sel surya a-Si:H tipe p

Grafik laju deposisi juga memperlihatkan bahwa peningkatan laju Boron 2 sccm menjadi 4 sccm diiringi dengan terjadinya perubahan laju deposisi. Seiring meningkatnya laju H₂, jumlah perubahan laju deposisi semakin menurun yaitu dari 0,07 Å/s sampai 0,02 Å/s. Hal ini menunjukkan semakin besar laju H₂ maka radikal dari Boron kurang efektif untuk mengikat atom-atom H selama proses deposisi berlangsung (Beyer, 2003). Jadi hasil ini berdampak kuat pada kualitas lapisan sel surya a-Si:H tipe-p terbentuk.

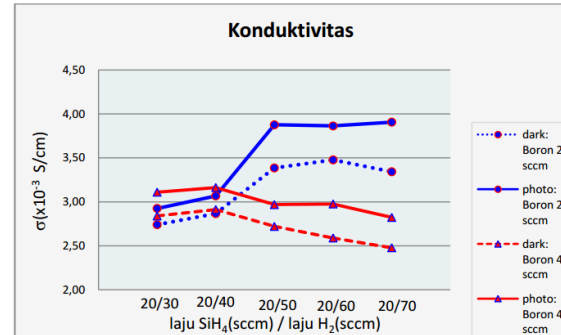
Konduktivitas listrik

Dalam penelitian ini, konduktansi gelap diukur tanpa adanya cahaya. Sehingga pada pengukuran ini sampel dan sensor yang digunakan untuk pengukuran harus tertutup untuk mendapatkan kondisi gelap tanpa cahaya. Fotokonduktivitas harus diukur di bawah sinar matahari langsung pada AM 1.5 (Zhang et al., 2022). Mode ini tidak memungkinkan, jadi hanya lampu 50 watt yang digunakan saat mengukur sampel.

Tegangan (V) yang digunakan dalam perhitungan konduktivitas adalah tegangan yang diukur pada dua ujung pengukuran terendah. Tegangan ini dapat terjadi dan diukur dengan voltmeter ketika arus listrik (I) dialirkan ke dua sensor eksternal (Jiang et al., 2021). Sedangkan untuk tebal lapisan, diambil dari pengukuran spektrometer (NanoCalc-2000). Dengan metode empat titik (*four point sensor*), nilai tegangan dan arus listrik diperoleh sedemikian rupa sehingga dapat dihitung besarnya resistivitas dan konduktivitas.

Hubungan antara konduktivitas listrik lapisan sel surya a-Si:H Untuk tipe-p indeks hidrogen dan indeks doping yaitu boron dapat dilihat pada Gambar 6. Dari grafik, tampak bahwa nilai konduktivitas gelap maupun terang menunjukkan sebuah fungsi dari laju gas sumber. Pada laju Boron 2 sccm terlihat pada

warna biru, nilai konduktivitasnya meningkat seiring dengan bertambahnya laju Hidrogen. Hasil yang berbeda tampak pada laju Boron 4 sccm terlihat pada Gambar merah, nilai konduktivitasnya menurun seiring dengan meningkatnya laju Hidrogen (Tuttle, 2018).



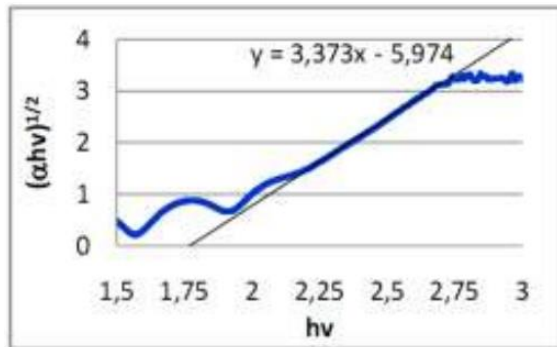
Gambar 6. Grafik konduktivitas sebagai fungsi dari laju gas sumber

Diagram menunjukkan bahwa laju hidrogen adalah 30 sccm dan 40 sccm, nilai konduktivitas a-Si:H tipe-p dengan laju doping 4 sccm lebih besar dari jumlah doping 2 sccm. Tetapi berbeda dalam indeks hidrogen dari 50sccm hingga 70sccm, yang merupakan nilai konduktivitas a-Si:H tipe-p yang didoping dengan laju diboron 4 sccm lebih rendah daripada laju doping 2 sccm. Pada hal ini menunjukkan bahwa laju Hidrogen dan laju Boron sangat mempengaruhi sifat a-Si:H tipe p yang dihasilkan (Vora, 2015). Dari grafik juga menunjukkan pada saat plasma kaya akan radikal Boron dan Hidrogen maka daya ikat B dan Si terhadap H semakin berkurang, tetapi terjadi ikatan yang efektif pada laju H₂ yang paling kecil yaitu 30 sccm (Singh et al., 2022).

Energi gap

Properti lain dari film tipis adalah energi gap. Energi gap menentukan sifat semikonduktor, termasuk mobilitas pembawa muatan dalam semikonduktor, densitas pembawa muatan, dan spektrum absorpsi. Ketika mikroelektronika dibuat dengan semikonduktor, ukuran energi gap menentukan tegangan tembus sambungan semikonduktor, arus yang mengalir di perangkat, dan ketergantungan suhu arus (Prayogi, 2022a). Untuk menentukan energi gap, sampel disinari dengan gelombang elektromagnetik agar elektron menyerap energi dari foton (Lin et al., 2015). Elektron yang telah menyerap energi foton mencoba melompat (bergerak) ke tingkat energi yang lebih tinggi, yaitu elektron berpindah dari pita valensi ke pita konduksi (Das & Samanta, 2020).

Dalam uji UV-VIS, foton dengan energi berbeda diterapkan pada sampel dengan panjang gelombang dari 500 nm hingga 900 nm dan kemudian koefisien penyerapan diukur pada setiap panjang gelombang (Delyannis & Belessiotis, 2013). Berikutnya dalam penentuan, dengan menggunakan metode Tauch plot (Dhass et al., 2020). Dengan mengambil persamaan liniernya, didapatkan perpotongan terhadap sumbu mendatar seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Pengukuran Spektrometer UV-VIS

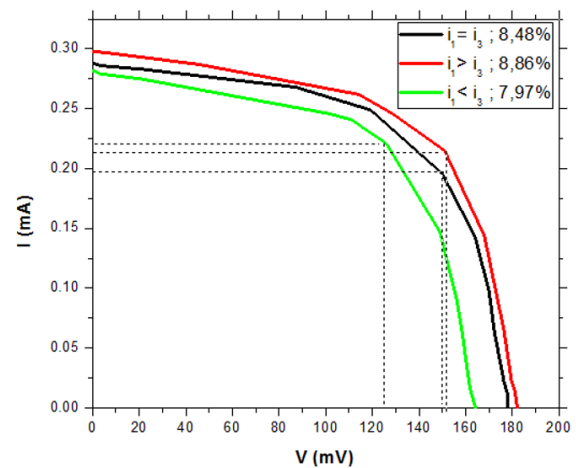
Dengan variasi laju gas sumber pada proses deposisi didapatkan nilai bandgap yang bervariasi dengan rentang 1,75 - 1,79 eV. Hasil tersebut dapat disimpulkan laju gas tidak mempengaruhi nilai bandgap, lapisan sel surya a-Si:H tipe-p yang terbentuk masih berstruktur amorf karena memiliki nilai bandgap antara 1,65 - 1,8 eV (Malik et al., 2006).

Kinerja lapisan sel surya a-Si:H tipe p

Pada proses karakterisasi I-V dengan sinar matahari langsung yaitu sumber cahaya melalui sinar matahari langsung dimana intensitas cahayanya mencapai 850 mW/cm² (Fonash, 2010). Prosedur karakterisasi I-V sel surya ini, dilakukan tiga kali percobaan. Rangkaian dan hasil percobaan karakterisasi I-V dengan sinar matahari seperti Gambar 8 dan Gambar 9.

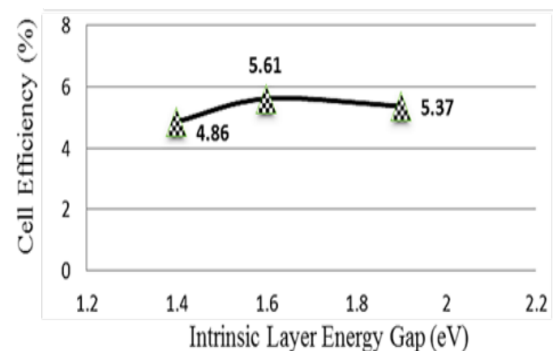


Gambar 8. Rangkaian listrik untuk sistem pengukuran karakterisasi I-V lapisan sel surya a-Si:H tipe p



Gambar 9. Hasil pengukuran karakterisasi I-V lapisan sel surya a-Si:H tipe p

Hasil karakterisasi I-V lapisan sel surya a-Si:H tipe p menggunakan sinar matahari langsung memperlihatkan pengukuran yang dihasilkan (Sundaram et al., 2016). Pada hasil penelitian sebelumnya dengan menggunakan alat PECVD yang sama dengan struktur p-i-n menghasilkan efisiensi sebesar 5,21% seperti ditunjukkan pada Gambar 10. Sementara dengan melakukan optimasi dengan memvariasi bangap, (Despotou, 2012) dan ketebalan masing-masing tiap sampel mendapatkan nilai efisiensi sebesar 8,14%. Terjadi peningkatan efisiensi yang sangat signifikan dimana hampir 60% dari yang sudah dilakukan sebelumnya.



Gambar 10. Efisiensi sel surya berdasarkan celah energi lapisan intrinsik.

4. KESIMPULAN

Secara ringkas, pada penelitian ini didapatkan: 1) Laju gas sumber (SiH₄, B₂H₆ dan H₂) mempengaruhi banyaknya radikal yang terbentuk didalam plasma sehingga akan mempengaruhi kualitas lapisan sel surya a-Si:H tipe-p. 2) Konduktivitas listrik dari lapisan sel surya a-Si:H tipe p dipengaruhi laju Hidrogen dan laju Boron. Nilai terbaik didapatkan konduktivitas gelap 3,34 x 10⁻³ S/cm dan konduktivitas terang didapatkan 3,91 x 10⁻³ S/cm, dan 3) Bandgap lapisan sel surya a-Si:H

tipe-p bernilai 1,7 eV sampai 1,8 eV. Bandgap tidak dipengaruhi laju gas sumber.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Institut Teknologi Sepuluh Nopember atas dukungan dan fasilitas yang dukungan yang telah diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Beyer, W. (2003). Diffusion and evolution of hydrogen in hydrogenated amorphous and microcrystalline silicon. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 78(1), 235–267.
- Bhatia, S. C. (2014). 3—Solar devices. In S. C. Bhatia (Ed.), *Advanced Renewable Energy Systems* (pp. 68–93). Woodhead Publishing India.
- Bhattacharya, S., & John, S. (2019). Beyond 30% Conversion Efficiency in Silicon Solar Cells: A Numerical Demonstration. *Scientific Reports*, 9(1), Article 1.
- Chittick, R. C., Alexander, J. H., & Sterling, H. F. (1969). The Preparation and Properties of Amorphous Silicon. *Journal of The Electrochemical Society*, 116(1), 77.
- Das, D., & Samanta, S. (2020). Advanced nanocrystallinity with widened optical gap realized via microstructural control in P-doped silicon oxide thin films used as window layer in nc-Si solar cells. *Materials Chemistry and Physics*, 243, 122628.
- Delyannis, E., & Belessiotis, V. (2013). Solar Water Desalination☆. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier.
- Despotou, E. (2012). 1.10—Vision for Photovoltaics in the Future. In A. Sayigh (Ed.), *Comprehensive Renewable Energy* (pp. 179–198). Elsevier.
- Dhass, A. D., Prakash, Y., & Ramya, K. C. (2020). Effect of temperature on internal parameters of solar cell. *Materials Today: Proceedings*, 33, 732–735.
- Duan, W., Qiu, Y., Zhang, L., Yu, J., Bian, J., & Liu, Z. (2014). Influence of precursor a-Si:H dehydrogenation on the aluminum induced crystallization process. *Materials Chemistry and Physics*, 146(1), 141–145.
- Fonash, S. J. (2010). Chapter Three—Structures, Materials, and Scale. In S. J. Fonash (Ed.), *Solar Cell Device Physics (Second Edition)* (pp. 67–120). Academic Press.
- Ghosh, T. K., & Prelas, M. A. (2011). Solar Energy. In T. K. Ghosh & M. A. Prelas (Eds.), *Energy Resources and Systems: Volume 2: Renewable Resources* (pp. 79–156). Springer Netherlands.
- Guha, S. (2001). Amorphous Semiconductor Solar Cells. In K. H. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Ilshner, E. J. Kramer, S. Mahajan, & P. Veyssi re (Eds.), *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (pp. 259–263). Elsevier.
- Hamdani, D., Prayogi, S., Cahyono, Y., Yudoyono, G., & Darminto, D. (2022a). The Effects of Dopant Concentration on the Performances of the a-SiO_x:H(p)/a-Si:H(i1)/a-Si:H(i2)/ c-Si:H(n) Heterojunction Solar Cell. *International Journal of Renewable Energy Development*, 11(1), 173–181.
- Hamdani, D., Prayogi, S., Cahyono, Y., Yudoyono, G., & Darminto, D. (2022b). The influences of the front work function and intrinsic bilayer (i1, i2) on p-i-n based amorphous silicon solar cell's performances: A numerical study. *Cogent Engineering*, 9(1), 2110726.
- Illiberi, A., Kudlacek, P., Smets, A. H. M., Creatore, M., & van de Sanden, M. C. M. (2011). Effect of ion bombardment on the a-Si:H based surface passivation of c-Si surfaces. *Applied Physics Letters*, 98(24), 242115.
- Irvine, S. (2007). Solar Cells and Photovoltaics. In S. Kasap & P. Capper (Eds.), *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials* (pp. 1095–1106). Springer US.
- Jiang, H., Shang, T., Xian, H., Sun, B., Zhang, Q., Yu, Q., Bai, H., Gu, L., & Wang, W. (2021). Structures and Functional Properties of Amorphous Alloys. *Small Structures*, 2(2), 2000057.
- Kasap, S., Koughia, C., Singh, J., Ruda, H., & O'Leary, S. (2007). Optical Properties of Electronic Materials: Fundamentals and Characterization. In S. Kasap & P. Capper (Eds.), *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials* (pp. 47–77). Springer US.
- Krenckel, P., Hayama, Y., Schindler, F., Tr tschler, T., Riepe, S., & Usami, N. (2021). Propagation of Crystal Defects

- p>
during Directional Solidification of Silicon via Induction of Functional Defects.
- Crystals*
- , 11(2), Article 2.
- Lin, G.-S., Li, C.-Y., Huang, K.-C., & Houn, M.-P. (2015). Using chemical wet-etching methods of textured AZO films on a-Si:H solar cells for efficient light trapping. *Materials Chemistry and Physics*, 160, 264–270.
- Liu, W., Shi, J., Zhang, L., Han, A., Huang, S., Li, X., Peng, J., Yang, Y., Gao, Y., Yu, J., Jiang, K., Yang, X., Li, Z., Zhao, W., Du, J., Song, X., Yin, J., Wang, J., Yu, Y., ... Liu, Z. (2022). Light-induced activation of boron doping in hydrogenated amorphous silicon for over 25% efficiency silicon solar cells. *Nature Energy*, 7(5), Article 5.
- Malik, A. Q., Hah, C. C., Khwang, C. S., Ming, L. C., & Sheng, T. K. (2006). Characterisation of multicrystalline solar cells. *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*, 23(1–2), Article 1–2.
- Meng, F., Shen, L., Shi, J., Zhang, L., Liu, J., Liu, Y., & Liu, Z. (2015). Role of the buffer at the interface of intrinsic a-Si:H and p-type a-Si:H on amorphous/crystalline silicon heterojunction solar cells. *Applied Physics Letters*, 107(22), 223901.
- Morigaki, K., & Ogihara, C. (2007). Amorphous Semiconductors: Structure, Optical, and Electrical Properties. In S. Kasap & P. Capper (Eds.), *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials* (pp. 565–580). Springer US.
- Phillips, L. (2019). 9—Solar energy. In T. M. Letcher (Ed.), *Managing Global Warming* (pp. 317–332). Academic Press.
- Prayogi, S. (2022a). *Studi Struktur Elektronik Sel Surya a-Si: H Lapisan Jamak Menggunakan Spektroskopi Elipsometri* [Doctoral, Institut Teknologi Sepuluh Nopember].
- Prayogi, S. (2022b). Silikon Kristal vs Silikon Amorf: Perbedaan Struktural dalam Aplikasi Fotovoltaik. *Jurnal Teknik AMATA*, 3(2), Article 2.
- Prayogi, S. (2022c). Analisis Efisiensi Sel Surya a-Si:H Berdasarkan Penyusunan Lapisan Aktif. *Jurnal Rekayasa Bahan Alam Dan Energi Berkelanjutan*, 6(2).
- Prayogi, S., Asih, R., Priyanto, B., Baqiya, M. A., Naradipa, M. A., Cahyono, Y., Darminto, & Rusydi, A. (2022). Observation of resonant exciton and correlated plasmon yielding correlated plexciton in amorphous silicon with various hydrogen content. *Scientific Reports*, 12(1), Article 1.
- Prayogi, S., Ayunis, Kresna, Cahyono, Y., Akidah, & Darminto. (2017). Analysis of thin layer optical properties of A-Si:H P-Type doping CH₄ and P-Type without CH₄ is deposited PECVD systems. *Journal of Physics: Conference Series*, 853(1), 012032.
- Prayogi, S., Baqiya, M. A., Cahyono, Y., & Darminto. (2019). Optical Transmission of p-Type a-Si:H Thin Film Deposited by PECVD on ITO-Coated Glass. *Materials Science Forum*, 966, 72–76.
- Prayogi, S., Cahyono, Y., & Darminto. (2021). Fabrication of solar cells based on a-Si: H layer of intrinsic double (P-i-x-iy-N) with PECVD and Efficiency analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 1951(1), 012015.
- Prayogi, S., Cahyono, Y., & Darminto, D. (2022a). Electronic structure analysis of a-Si: H p-i1-i2-n solar cells using ellipsometry spectroscopy. *Optical and Quantum Electronics*, 54(11), 732.
- Prayogi, S., Cahyono, Y., & Darminto, D. (2022b). Hydrogenated Amorphous Silicon Density of State Analyzed by Dielectric Function Model Derived from Ellipsometric Spectroscopy. *JPSE (Journal of Physical Science and Engineering)*, 7(2).
- Prayogi, S., Cahyono, Y., Hamdani, D., & Darminto. (2022). Effect of active layer thickness on the performance of amorphous hydrogenated silicon solar cells. *Engineering and Applied Science Research*, 49(2).
- Prior, K. A. (2005). SEMICONDUCTOR PHYSICS | Impurities and Defects. In R. D. Guenther (Ed.), *Encyclopedia of Modern Optics* (pp. 442–450). Elsevier.
- Rozati, S. M., & Ziabari, S. A. M. (2022). A review of various single layer, bilayer, and multilayer TCO materials and their applications. *Materials Chemistry and Physics*, 292, 126789.
- Schulze, T. F., Beushausen, H. N., Leendertz, C., Dobrich, A., Hannappel, T., Korte, L., & Rech, B. (2010). Impact of a-Si:H

- p>structural properties on the annealing behavior of a-Si:H/c-Si heterostructures used as precursors for high-efficiency solar cells.
- MRS Online Proceedings Library*
- , 1268(1), 107.
- Singh, J., Kaur, P., Kaur, P., Kumar, V., Al-Buriahi, M. S., Alfryyan, N., Alrowaili, Z. A., & Singh, T. (2022). Optical and radiation shielding features for some phospho-silicate glasses. *Optik*, 261, 169140.
- Sundaram, S., Benson, D., & Mallick, T. K. (2016). Chapter 2—Overview of the PV Industry and Different Technologies. In S. Sundaram, D. Benson, & T. K. Mallick (Eds.), *Solar Photovoltaic Technology Production* (pp. 7–22). Academic Press.
- Tuttle, B. R. (2018). Dangling bond defects in SiC: An *ab initio* study. *Physical Review B*, 97(4), 045203.
- Vora, A. (2015). Increasing Solar Energy Conversion Efficiency in Thin Film Hydrogenated Amorphous Silicon Solar Cells with Patterned Plasmonic Silver Nano-Disk Array. *Dissertations, Master's Theses and Master's Reports*.
- Wang, Q., Zhou, Y., Guo, W., Yang, Y., Shang, J., Chen, H., Mao, H., Zhu, T., Zhou, Y., & Liu, F. (2021). P-type c-Si/SnO₂/Mg heterojunction solar cells with an induced inversion layer. *Applied Physics Letters*, 119(26), 263502.
- Wang, S.-H., Chang, H.-E., Lee, C.-C., Fuh, Y.-K., & Li, T. T. (2020). Evolution of a-Si:H to nc-Si:H transition of hydrogenated silicon films deposited by trichlorosilane using principle component analysis of optical emission spectroscopy. *Materials Chemistry and Physics*, 240, 122186.
- Welser, R. E., Polly, S. J., Kacharia, M., Fedorenko, A., Sood, A. K., & Hubbard, S. M. (2019). Design and Demonstration of High-Efficiency Quantum Well Solar Cells Employing Thin Strained Superlattices. *Scientific Reports*, 9(1), Article 1.
- Wen, X., Chen, C., Lu, S., Li, K., Kondrotas, R., Zhao, Y., Chen, W., Gao, L., Wang, C., Zhang, J., Niu, G., & Tang, J. (2018). Vapor transport deposition of antimony selenide thin film solar cells with 7.6% efficiency. *Nature Communications*, 9(1), Article 1.
- Xu, Y., & Yan, X.-T. (Eds.). (2010). Thermodynamics and Kinetics of Chemical Vapour Deposition. In *Chemical Vapour Deposition: An Integrated Engineering Design for Advanced Materials* (pp. 129–164). Springer.
- Zhang, Y., Xie, L., Li, S., & Hu, Z. (2022). Fabrication of multi-purposed supercapacitors based on N-doped porous carbon framework. *Results in Chemistry*, 4, 100479.