

STABILITAS MEKANIK MATERIAL MULTIKRISTAL SILICON WAFER PADA PEMBUATAN SEL SURYA (SOLAR CELLS)

A z w a r

Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Lhokseumawe

Email : azar_pnl@yahoo.co.uk

Perkembangan aplikasi sel surya sebagai salah satu sumber energi meningkat secara signifikan dalam beberapa tahun belakangan ini yang menyebabkan kebutuhan terhadap silikon sebagai material dasar pembuatan sel surya menjadi meningkat. Akibat dari semakin tingginya permintaan maka harga silikon menjadi naik, sehingga harga produksi sel surya ikut naik yang berimbas pada meningkatnya harga jual produk. Hal ini dikarenakan 40 % dari total biaya produksi berasal dari bahan baku silikon. Para industri pembuat sel surya mencoba untuk mengurangi penggunaan silikon yang berakibat langsung pada semakin tipis dan luasnya silikon wafer yang dihasilkan. Konsekuensinya adalah menurunnya kekuatan mekanik silikon wafer sehingga mudah mengalami patah selama proses produksi. Untuk itu meningkatkan kekuatan mekanik silikon wafer adalah cara untuk mengurangi perpatahan selama produksi. Perpatahan diinisiasi oleh adanya retak mikro (micro crack) baik pada permukaan, sisi atau bahkan didalam silikon wafer. Retak tersebut akan sangat mudah menjalar apabila diberikan gaya eksternal maupun internal. Memahami tentang bagaimana retak mikro itu terjadi dan sumber-sumber yang memungkinkan kan munculnya retak mikro tersebut harus bisa diketahui dan dimitigasi, sehingga dapat diantisipasi atau diminimalisir dengan cara melakukan optimasi pada setiap langkah-langkah proses produksi sel surya. Maka memahami perilaku mekanik material multicrystalline silikon wafer menjadi sangat penting dalam rangka meningkatkan kekuatan mekanik material tersebut sebagai bahan dasar pada pembuatan sel surya. Sehingga sel surya dengan harga yang sebanding dengan sumber energi listrik konvensional memungkinkan untuk dicapai.

Kata kunci : Sel surya, multikristal silikon, stabilitas mekanik, retak mikro, optimasi proses, energi listrik konvensional

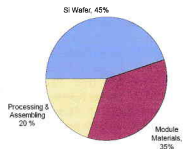
PENDAHULUAN

Permasalahan energy menjadi salah satu bidang yang menjadi perhatian masyarakat dunia di akhir abad ke-20, dimana perhatian difokuskan untuk mencari dan menemukan energy baru yang dapat diperbaharui. Hal ini disebabkan oleh semakin terbatasnya sumber energy yang berasal dari hydrocarbon (minyak dan gas) akibat meningkatnya permintaan oleh pertambahan populasi penduduk bumi. Jumlah konsumsi energy oleh 6 milyar penduduk bumi pada akhir abad ke-21 mencapai 1.3×10^{10} kW [13].

Penggunaan sel surya (solar cells) sebagai pembangkit tenaga listrik masih terkendala dengan mahalnya biaya produksi yang berimbas langsung kepada harga penjualan ke konsumen. Berbagai upaya telah dilakukan oleh para peneliti untuk menurunkan biaya produksi sehingga bisa diperoleh harga jual yang sebanding dengan harga listrik konvensional. Dalam tahun 1997, harga jual per kWh listrik sel surya adalah 30 cent €

berbanding dengan 5-8 cent € harga listrik konvensional [18].

Dalam proses produksi sel surya, komponen biaya terbesar berasal dari bahan baku silikon wafer dengan porsi 45 % dari total biaya produksi sebagaimana ditunjukkan oleh gambar (1). Oleh karena itu optimasi penggunaan material multikristal silikon menjadi salah satu alternative untuk menurunkan harga sel surya.



Gambar 1. Perincian biaya produksi multikristal sel surya [18].

Industri pembuat sel surya diharuskan untuk mengoptimalkan setiap langkah dalam proses produksi untuk meningkatkan efisiensi biaya produksi. Topik tentang efisiensi biaya produksi menjadi salah satu subjek penelitian oleh para peneliti dalam bidang sel surya di masa yang akan datang dengan memfokuskan pada cara untuk meningkatkan efisiensi penggunaan bahan, efisiensi daya listrik yang dihasilkan, menurunkan tingkat kerusakan wafer (losses) dalam rantai produksi. Dalam penelusuran ini difokuskan tentang perilaku mekanik material multikristal silikon sebagai bahan dasar pada pembuatan sel surya sebagai bagian dari upaya menemukan penyebab menurunnya kekuatan mekanik silikon wafer selama proses produksi [17, 7].

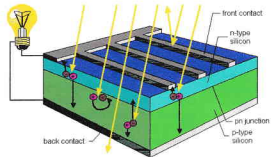
Rusaknya silikon wafer karena patah selama proses produksi merupakan permasalahan utama yang dihadapi oleh industri pembuat sel surya yang berakibat pada mahalnya harga produksi. Hal ini menjadi sangat penting karena industry sel surya hendak mengurangi penggunaan bahan dengan membuat sel surya yang semakin tipis dan luas dengan tujuan efisiensi pemakaian bahan untuk mencapai harga produk yang rasional. Konsekuensinya dapat menurunkan stabilitas mekanik wafer yang berakibat banyaknya kemungkinan wafer patah atau rusak selama proses produksi [7]. Untuk itu silikon wafer dengan kekuatan mekanik yang bagus sangat diperlukan. Penelitian ini dimaksudkan untuk mempelajari stabilitas mekanik material multikristal silikon untuk mempelajari sumber-sumber yang menyebabkan penurunan kekuatan mekanik, kemudian memitigasi penyebab tersebut untuk dapat diminimalisir bahkan ditiadakan.

TINJAUAN PUSTAKA

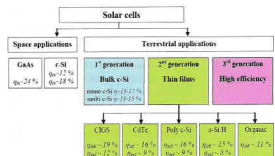
Sel surya merupakan salah satu jenis energy terbarukan yang bekerja berdasarkan prinsip photovoltaic dimana radiasi sinar matahari diubah menjadi energy listrik dengan menciptakan beda potensial antara 2 bahan silikon yang berbeda (type n dan type P) untuk membangkitkan pembawa muatan (carrier) dalam bentuk pasangan electron-hole [1]. Skematik cara kerja sel surya diilustrasikan pada gambar (2).

Jenis kristal silikon sebagai bahan sel surya dapat dikelompokkan menjadi silikon kristal tunggal, multikristal silikonjamak dan amorphous. Tipe sel surya beserta dengan efisiensi listrik yang mampu

dihasilkan ditunjukkan secara skematik pada gambar (3).



Gambar 2. Prinsip kerja sel surya [1]

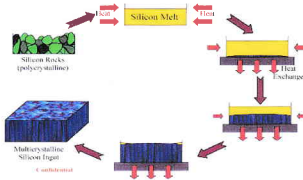


Gambar 3. Skematik type sel surya [13]

Sel surya tipe single crystal (kristal tunggal) mempunyai susunan struktur kristal yang seragam karena keseluruhan struktur kristalnya tumbuh dari jenis kristal yang sama tanpa dibatasi oleh batas butir (grain boundary), namun biaya produksinya sangat mahal. Sementara itu, sel surya tipe multikristal (kristal jamak) mengandung butir (grain) yang banyak dengan dibatasi oleh batas butir antara satu butir dengan butir lainnya. Karakteristik dari sel surya multikristal adalah sifat mekaniknya yang tidak homogen, karena banyak terdapat batas butir, dislokasi antar butir, pengotor (impurity), dan bahan sisipan (precipitate). Namun biaya produksinya lebih murah karena prosesnya relative sederhana [13, 9, 14].

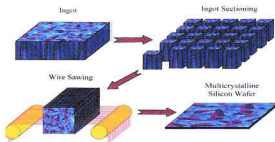
Pembuatan multikristal silikon sel surya merupakan suatu proses yang terdiri dari beberapa langkah yang saling berhubungan yang dimulai dengan proses pengecoran silikon ingot dalam

kapasitas yang besar (± 300 kg) seperti diilustrasikan pada gambar (4) [3].



Gambar 4. Ilustrasi proses pengecoran silikon ingot [3]

Kemudian silikon ingot dibuang bagian sisinya yang bersentuhan langsung dengan cetakan, kemudian dibelah menjadi bagian-bagian kecil (sectioning) yang dilanjutkan dengan proses pengirisan (wire sawing) untuk menghasilkan silikon wafer. Proses tersebut diilustrasikan pada gambar (5).

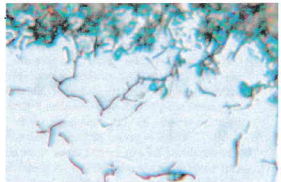


Gambar 5. Ilustrasi proses sectioning dan wire sawing silikon ingot [3]

Selanjutnya silikon wafer diproses menjadi sel surya melalui beberapa langkah proses berikut : etching dan texturing, pembentukan p-n junction melalui diffusi fosfor, pembentukan anti reflection coating pada permukaan, proses penyablonan pasta logam Perak (Ag) untuk membentuk kontak elektroda pada sisi permukaan depan dan Aluminium (Al) pada sisi bagian belakang yang dilanjutkan dengan proses pengeringan dan pembakaran didalam dapur untuk membentuk senyawa dengan silikon wafer [5]. Semua langkah tersebut dilakukan secara proses berantai yang berkesinambungan. Setiap langkah proses tersebut memungkinkan untuk

dapat menurunkan atau menaikkan kekuatan mekanik silikon wafer, bahkan kemungkinan untuk mengalami kerusakan atau patah sebelum proses produksi sel surya selesai. Namun ada banyak kemungkinan optimasi yang dapat dilakukan pada setiap langkah proses tersebut, sehingga kemungkinan terjadinya penurunan sifat mekanik selama pada setiap langkah dapat di minimalkan bahkan di hilangkan [10].

Proses sectioning dan pengirisan silikon ingot yang menggunakan kawat (wire sawing) akan menjadi salah satu proses yang sangat krusial terhadap sifat mekanik, karena dapat menyebabkan retak dalam skala mikro (microcrack) pada permukaan atau sisi silikon wafer dengan kedalaman yang bervariasi antara 10 μ m-30 μ m sebagaimana ditunjukkan pada gambar (6). Retak mikro ini harus di minimalkan karena dapat menyebabkan penurunan kekuatan silikon wafer secara signifikan, serta dapat mengurangi efisiensi listrik dikarenakan terjadinya proses rekombinasi pembawa muatan (electron-hole). Proses etching dengan larutan asam (acid) atau basa (alkaline) dapat digunakan untuk meminimalkan ukuran retak mikro [5].



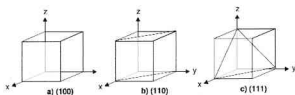
Gambar 6. Tampilan potongan dari multikristal silikon wafer [5]

Perilaku mekanik suatu bahan merupakan hubungan antara gaya dan respon serta perubahan bentuk yang dialami oleh suatu benda akibat pembebanan. Beberapa sifat mekanik yang sangat penting adalah kekuatan, kekerasan, kekakuan, ketahanan, dll. [19].

Pada temperature kamar bahan multikristal silikon adalah material yang sangat getas dan kuat dikarenakan tidak terjadinya pergerakan dislokasi atom. Kegagalan atau kerusakan pada material multikristal silikon terjadi ketika gaya yang

diberikan dan ukuran retak mikro atau cacat-cacat pada material memiliki ukuran yang telah melebihi nilai batas kritis [16]. Kebanyakan penurunan sifat mekanik pada bahan multikristal silikon disebabkan oleh cacat yang dihasilkan selama proses produksi.

Sifat elastis bahan multikristal silikon adalah anisotropik dimana harga modulus young (E) tergantung dari arah dan bidang kristal. Modulus young akan bervariasi antara 187 GPa dalam arah $\langle 111 \rangle$, 130 GPa dalam arah $\langle 100 \rangle$ dan suatu nilai tengah (intermediate value) sebesar 169 GPa yang terjadi dalam arah $\langle 110 \rangle$. Nilai young modulus rata-rata untuk bahan multikristal silikon adalah 163 GPa. [11]. Gambar (7) berikut ini menunjukkan indeks miller pada bidang tertentu suatu material jenis kristal kubik.



Gambar 7. Indeks miller material jenis kristal kubik [16].

Deformasi plastik pada material silikon wafer hanya dapat terjadi pada temperatur diatas 600 °C. Dikarenakan struktur kristal penyusun material silikon adalah diamond kubik, maka deformasi akan terjadi oleh slip akan terjadi antara bidang kristal $\{111\}$ sepanjang arah kristal $\langle 100 \rangle$. Suatu gaya didalam kristal akan menyebabkan bidang kristal atom akan bergerak dari suatu posisi keseimbangan ke posisi lainnya. Slip pada material multikristal silikon wafer dapat merambat dengan cepat dari sebuah inisiasi retak mikro atau cacat (defects) yang mungkin terdapat pada permukaan atau bagian sisi silikon wafer yang dihasilkan selama proses produksi [20].

PEMBAHASAN

Stabilitas mekanik silikon ingot, silikon wafer dan silikon solar cells (sel surya) telah menjadi suatu topik penelitian yang sangat penting dalam beberapa tahun terakhir, hal ini erat kaitannya dengan peningkatan penggunaan sel surya yang cukup signifikan dalam kehidupan manusia. Pada kasus proses produksi sel surya secara massal di industri, kemungkinan kerusakan silikon wafer

pada setiap langkah proses telah menyebabkan menurunnya hasil dan kecepatan produksi. Karena terjadi pemborosan waktu untuk membersihkan serpihan silikon wafer pada jalur produksi. Hal ini secara langsung dapat meningkatkan harga produksi sel surya sehingga harga jual ke konsumen menjadi mahal [4].

Peningkatan stabilitas mekanik sel surya dapat menurunkan kerusakan wafer selama proses produksi. Industri pembuat sel surya saat ini masih bisa mentolerir 5 % - 10 % kerusakan wafer selama proses produksi, namun angka ini secara otomatis akan meningkat seiring penghematan penggunaan bahan baku silikon sebagai langkah efisiensi biaya; akibatnya wafer dibuat menjadi lebih tipis (200 μm). Tentunya masalah ini menjadi sangat penting untuk dicari solusinya, mengingat industri pembuat sel surya saat ini mencoba mengurangi penggunaan bahan silikon namun disisi yang lain dapat meningkatkan efisiensi yang bermuara pada harga sel surya yang lebih rasional [15]. Oleh karenanya optimasi pada setiap langkah dari proses produksi harus dilakukan secara maksimal.

Suatu parameter penting untuk menjelaskan stabilitas mekanik adalah kekuatan patah (fracture strength) dari silikon wafer. Dimana kekuatan patah yang dimaksud adalah ketahanan silikon wafer terhadap patah akibat ditebani oleh gaya luar. Test bending (tekuk) dipakai untuk mengukur kekuatan patah material silikon wafer, yang merupakan suatu metoda yang paling banyak digunakan untuk menentukan stabilitas mekanik silikon wafer [8].

Stabilitas mekanik silikon wafer bisa menurun secara drastis oleh kehadiran sebuah retak mikro (microcrack). Karena retak mikro akan menjadi lokasi terlemah yang menjadi titik awal penyaluran retak yang berakibat pada patahnya silikon wafer bila gaya yang diterima dan ukuran panjang retak telah mencapai titik kritis. Sehingga silikon wafer yang bebas dari retak mikro atau ukuran retak mikro yang tidak mencapai nilai kritis bahan akan memiliki kekuatan yang lebih baik. Adapun beberapa kemungkinan asal dari retak mikro tersebut adalah : cacat pada ingot, gaya akibat pengirisan (wire sawing) serta gaya yang timbul akibat transport dari satu proses ke proses lainnya dalam rantai proses produksi [11].

Sementara gaya yang menyebabkan perpatahan pada silikon wafer dapat berupa gaya local yang menjadi inisiatif untuk terjadi nya retak pada lokasi tertentu; seperti gaya yang terjadi akibat benturan selama proses produksi, gaya penekanan pada saat proses etching dan texturing serta polishing, kemudian gaya tekan akibat proses penyablonan (screen printing) pasta logam untuk membentuk elektoda kontak pada permukaan depan dan belakang silikon wafer serta tegangan sisa yang terjadi akibat perbedaan ekspansi panas (thermal expansion) antara pasta Al atau pasta Ag dengan silikon wafer [16].

Tegangan sisa atau tegangan dalam akibat perbedaan ekspansi tersebut perlu untuk dihindari karena dapat menyebabkan kerusakan silikon wafer, dimana suatu retak mikro akan menjalar secara sangat cepat akibat tegangan sisa tersebut sehingga memungkinkan untuk merusak material walaupun tanpa hadirnya gaya dari luar (external force). Tegangan sisa juga akan dapat menyebabkan silikon wafer menjadi melengkung yang menyebabkan wafer tidak stabil baik secara mekanik maupun listrik. Salah satu cara untuk mengurangi tegangan sisa adalah dengan proses annealing untuk merelaksasi material sehingga tegangan sisa tersebut dapat di minimalkan [6].

Kemudian stabilitas mekanik silikon wafer juga sangat tergantung dari ukuran dan arah butir kristal penyusun silikon wafer tersebut. Dari hasil pengecoran silikon ingot telah diamati bahwa kekuatannya lebih rendah 5-10 % dibanding dengan bagian atas ingot [1]. Hal ini berhubungan dengan ukuran butir kristal yang lebih kecil pada lokasi ingot bagian bawah.

Multikristal silikon wafer yang memiliki arah butir kristal yang tidak beraturan dapat menyebabkan distribusi tegangan yang tidak beraturan pula, dimana distribusi tegangan tergantung dari arah dan bidang kristal juga ukuran butir kristal. Distribusi tegangan yang tidak homogen diperkirakan terjadi pada lokasi dekat dengan batas butir antara butir-butir kristal. Sehingga tegangan yang berada pada lokasi dekat dengan batas butir menjadi sangat kritis yang dapat menyebabkan penurunan stabilitas mekanik; dimana dapat menjadi sumber pembentukan retak apabila dibebani gaya luar [12]. Batas butir (grain boundary) biasanya dipertimbangkan sebagai sumber utama penurunan kekuatan mekanik, juga penurunan efisiensi listrik yang mampu dihasilkan oleh multikristal sel surya. Secara lebih khusus

disebutkan bahwa batas butir adalah daerah yang getas (intrinsic fragility) dimana ikatan atomnya lebih lemah dibandingkan dengan didalam butir bidang kristal. [2].

KESIMPULAN

1. Penggunaan sel surya sebagai sumber energy masih lebih mahal bila dibandingkan dengan sumber energy dari jenis konvensional.
2. Pengurangan penggunaan bahan baku silikon merupakan salah satu cara yang untuk menurunkan harga jual energy sel surya dengan membuat wafer yang lebih tipis.
3. Stabilitas mekanik (kekuatan) wafer akan menurun bila ketebalan wafer dikurangi hingga mencapai 200 μm yang menyebabkan patah dalam proses produksi.
4. Beberapa penyebab penurunan stabilitas mekanik adalah: adanya retak mikro, tegangan luar dan tegangan sisa, serta batas butir (grain boundary)
5. Stabilitas mekanik dapat diperbaiki dengan memahami sumber-sumber penyebab penurunan kekuatan pada setiap langkah produksi, kemudian melakukan optimalisasi dan perbaikan sehingga diharapkan adanya perbaikan kekuatan silikon wafer.

DAFTAR PUSTAKA

1. A. Schneider, G. Buhler, F. Huster, K. Peter, P. Fath. *Impact of individual process steps on stability of silicon solar cells studied with a simple mechanical stability tester, Conference on PV In Europe from PV technology to energy solutions*, 2002.
2. Alessandra Satta, Enrico Pisanu, Luciano Colombo and Fabrizio Cleri; *Microstructure Evaluation at a Triple Junction in Polycrystalline Silicon, Journal of Physics: Condensed Matter* 14, 2002.
3. Arthur Weeber, *lecture note of crystalline silicon photovoltaic*, ECN, 2007.
4. Bhusan Sopori, *Ninth workshop on Crystalline Silicon Solar Cell Materials and Process: Summary Discussion sessions, Breckenridge, Colorado August 1999*
5. Dirk-Holger Neuhaus, Adolf Munzer. *Industrial Silicon Wafer Solar Cells, Advances in Opto Electronics Volume 2007, Article ID 24521*, 2007.

6. F. Huster, Investigation if the allowing process of screen printed aluminum pastes for the BSF formation on silicon solar cells, 20th European Photovoltaic Solar energy Conference and Exhibition, Barcelona, Spain, June 2005.
7. G. Coletti, N.J.C.M. van der Borg, S. De Iuliis, C.J.J. Tool and L.J. Geerligs, Mechanical strength of silicon wafers depending on wafer thickness and surface treatment, 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Dresden Germany, September 2006.
8. G. Coletti, Quantifying surface damage by measuring mechanical strength of silicon wafers, 20th European Photovoltaic Solar energy Conference and Exhibition, Barcelona, Spain, June 2005
9. H.J. Moller, T. C. Funke, M. Rinio, S. Scholz, Multicrystalline silicon for solar cells, *Thin Solid Films* 487 (2005) 179– 187
10. Hanna Larsson, Jörgen Gustafsson, Hans Jörgen Solheim and Tobias Boström. The impact of saw damage etching on microcracks in solar cell production, 2008.
11. Hanna Larsson, Jörgen Gustafsson, Hans Jörgen Solheim and Tobias Boström. The impact of saw damage etching on microcracks in solar cell production, 2008.
12. M. Becker, H. Scheel, grain Orientation, Texture, and internal stress optically evaluatyed by micro-Raman spectroscopy, *journal of applied physics* 1001, 2007.
13. Miro Zeman, solar cells, Delft University of Technology, 2008.
14. Partain, Larry D, Solar cells and their applications, Wiley New York, 1995
15. Przemyslaw Rupnowski, Bhusan Sopori, Sternghth of silicon wafer: fracture mechanics approach, Springer Science+Businnes Media B.V. 2009.
16. R.F.Cook, Strength and sharp contact fracture of silicon, *J Mater SCI* 41 841 – 872, 2006.
17. Steve Hudelson, Katy Hartman, Yun Seog Lee, and Tonio Buonassisi, Electrical and Mechanical Defects in Solar Cell Materials and Devices, 4th JSPS Workshop: Future Direction of PV, Tokyo, March 2008.
18. Vera popovich, Literature review for Mechanical Behaviors of Multicrystalline Silicon solar cells, Tu Delft – ECN, 2008.
19. W.D. Callister Jr, Fundamentals of Materials Science and Engineering, fifth edition, Wiley, 2001.
20. William C.O'Mara, Robert B. Herring, Lee P. Hunt, Handbook of Semiconductor Silicon Technology, Noyes Publications, New Jersey USA, 1990.