

**KRISTAL FOTONIK 2-DIMENSI SEBAGAI LAPISAN ANTI-REFLEKSI
UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI SEL SURYA SILIKON DENGAN
SIMULASI FDTD**

SKRIPSI

diajukan untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan Pendidikan Sarjana
Program Studi Fisika Kelompok Bidang Kajian Fisika Material



oleh
Yuni Rahmawati
1901306

**PROGRAM STUDI FISIKA
DEPARTEMEN PENDIDIKAN FISIKA
FAKULTAS PENDIDIKAN MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS PENDIDIKAN INDONESIA
2023**

LEMBAR PENGESAHAN
KRISTAL FOTONIK 2-DIMENSI SEBAGAI LAPISAN ANTI-REFLEKSI
UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI SEL SURYA SILIKON DENGAN
SIMULASI FDTD

Yuni Rahmawati

NIM 1901306

Disetujui dan disahkan oleh tim pembimbing:

Pembimbing I,



Prof. Dr. Lilik Hasanah, M.Si.

NIP. 197706162001122002

Pembimbing II,



Prof. Dr. Budi Mulyanti, M.Si.

NIP. 196301091994022001

Mengetahui,

Ketua Prodi Fisika FPMIPA UPI,



Dr. Endi Suhendi, M.Si.

NIP. 197905012003121001

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi/tesis/disertasi dengan judul "Kristal Fotonik 2-Dimensi Sebagai Lapisan Anti-Refleksi Untuk Meningkatkan Efisiensi Sel Surya Silikon dengan Simulasi FDTD" ini beserta seluruh isinya adalah benar-benar karya saya sendiri. Saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika ilmu yang berlaku dalam masyarakat keilmuan. Atas pernyataan ini, saya siap menanggung risiko/sanksi apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran etika keilmuan atau ada klaim dari pihak lain terhadap keaslian karya saya ini.

Bandung, 22 Desember 2022

yang membuat pernyataan,



Yuni Rahmawati

NIM 1901306

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT, yang telah memberikan rahmat dan karunianya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Kristal Fotonik 2-Dimensi Sebagai Lapisan Anti-Refleksi Untuk Meningkatkan Efisiensi Sel Surya Silikon dengan Simulasi FDTD”. Sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan Pendidikan Sarjana di Program Studi Fisika Departemen Pendidikan Fisika Fakultas Pendidikan dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Pendidikan Indonesia.

Penulis mengucapkan terimakasih atas dukungan, bimbingan dan bantuan dari semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi ini sehingga penulis mendapatkan ilmu pengetahuan serta wawasan yang sesuai dengan bidang studi yang sedang ditempuh. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Dr. Taufik Ramlan Ramalis, M.Si., selaku Ketua Departemen Pendidikan Fisika, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia
2. Dr. Endi Suhendi, M.Si., selaku Ketua Program Studi Fisika yang telah membimbing dan mengarahkan selama menjadi mahasiswa di Program Studi Fisika
3. Dr. Judhistira Aria Utama, M.Si., selaku pembimbing akademik yang telah membimbing penulis selama menjadi mahasiswa di Program Studi Fisika
4. Prof. Dr. Lilik Hasanah, M.Si., selaku pembimbing I yang telah meluangkan waktunya untuk membimbing dan membantu dalam penyelesaian skripsi.
5. Prof. Dr. Budi Mulyanti, M.Si., selaku pembimbing II yang telah memberikan masukan dan saran dalam penyelesaian skripsi ini.
6. Chandra Wulandari, M.T., yang telah membantu penulis selama penelitian dan penulisan skripsi ini.
7. Bapak Maman dan Ibu Sopinah selaku orang tua penulis yang telah memberikan dukungan dan doa agar penulis dapat menyelesaikan studi dengan baik.
8. Syabila Nurdias dan Ibu Sutini yang telah memberikan dukungan, motivasi dan membantu selama penulis menjadi mahasiswa.

9. Agustina, Ila dan Cahyanisa yang telah memberikan dukungan, menjadi tempat untuk berkeluh kesah penulis dalam perkuliahan.
 10. Taufik Syah yang telah membantu penulis dalam perkuliahan dan menjadi teman untuk berdiskusi selama perkuliahan.
 11. Bintang, Silva dan teman – teman penelitian, yang selalu memberikan dukungan dan bantuan selama penelitian.
 12. Teman–teman Fisika C 2019;
- serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, yang dengan tulus membantu dan memberikan dukungan sehingga skripsi ini dapat terselesaikan. Penulis mengetahui serta menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna serta masih banyak kesalahan di dalamnya. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun akan senantiasa penulis nantikan demi terciptanya skripsi yang sempurna.

Bandung, 22 Desember 2022

Penulis

ABSTRAK

Peningkatan absorpsi dan efisiensi konversi energi (PCE) menjadi salah satu tantangan bagi performa sel surya. Sehingga, sel surya terus dikembangkan untuk meningkatkan performanya. Pada perkembangannya sel surya terdiri dari beberapa jenis tetapi salah satu sel surya yang paling banyak digunakan adalah sel surya silikon. Dalam struktur sel surya silikon, diperkenalkan kristal fotonik sebagai *light trapping*, karena kristal fotonik ini memiliki sifat optik yang sangat baik seperti dapat mengatur penjalaran cahaya dan penyerapan foton yang sangat baik. Hal tersebut yang menyebabkan terjadinya peningkatan absorpsi, ketika performa optik meningkat maka performa listrik sel surya juga meningkat. Dalam penelitian ini, digunakan kristal fotonik dua dimensi dengan material TiO₂ dan silikon digunakan sebagai lapisan penyerap. Dengan menggunakan simulasi FDTD, karya ini menunjukkan keberhasilan peningkatan performa dengan mengoptimasi bentuk, rasio, diameter, konstanta kisi, dan ketebalan dari kristal fotonik. Hasil menunjukkan bahwa kristal fotonik yang optimal yaitu kristal fotonik berbentuk nanodisk dengan rasio antara diameter dan konstanta kisi yaitu 1:2. Kemudian, ukuran yang optimal pada kristal fotonik nanodisk yaitu pada diameter 300 nm, konstanta kisi 600 nm dan ketebalan 187,5 nm. Peningkatan performa tersebut ditunjukkan dengan absorpsi sel surya sebesar 97 %, J_{sc} 49,77 mA/cm², dan PCE 26,14%.

Kata Kunci: Kristal fotonik, Peningkatan absorpsi, PCE, Sel surya silikon, Simulasi FDTD

ABSTRACT

Increasing absorption and efficiency of energy conversion (PCE) is one of the challenges for solar cell performance. Thus, solar cells continue to be developed to improve their performance. Its development, solar cells consist of several types, but one of the most widely used solar cells is silicon solar cells. In the structure of silicon solar cells, photonic crystals are introduced as light trapping, because these photonic crystals have very good optical properties such as being able to regulate light propagation and very good absorption of photons. This causes an increase in absorption power, when the optical performance increases, the electrical performance of solar cells also increases. In this study, two-dimensional photonic crystals with TiO_2 material and silicon were used as absorbent layers. Using FDTD simulations, this work demonstrates the success of increasing performance by optimizing the shape, ratio, diameter, lattice constant, and thickness of photonic crystals. The results show that the optimal photonic crystal is a photonic crystal in the form of a nanodisc with a ratio between the diameter and the lattice constant of 1:2. Then, the optimal size of the nanodisc photonic crystal is 300 nm in diameter, 600 nm in lattice constant and 187,5 nm in thickness. The increased performance is shown by the absorption of solar cells by 97%, J_{sc} 49,77 mA/cm^2 , and PCE of 26,14%.

Key words: Photonic crystals, Absorption enhancement, PCE, Silicon solar cells, FDTD Simulation

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
PERNYATAAN.....	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Sistematika Penulisan	4
BAB II KAJIAN PUSTAKA	5
2.1 Sel Surya.....	5
2.1.1 Prinsip Kerja Sel Surya.....	6
2.1.2 Parameter Sel Surya.....	8
2.2 Sel Surya Film Tipis.....	8
2.2.1 Sel Surya Silikon Amorf.....	9
2.2.2 Sel Surya CdTe	9
2.2.3 Sel Surya GaAs	10
2.2.4 Sel Surya CIGS	10

2.2.5 Sel Surya Organik	11
2.3 Perkembangan Sel Surya Silikon	11
2.3.1 Struktur Sel Surya Silikon	12
2.4 Teknologi Perangkat Cahaya Pada Sel Surya Silikon	15
2.5 Perangkat Lunak	20
BAB III METODE PENELITIAN.....	23
3.1 Metode FDTD	23
3.2 Metode CHARGE	24
3.3 Lumerical FDTD	25
3.4 Lumerical CHARGE	27
3.5 Desain dan Simulasi	28
3.6 Alur Penelitian.....	29
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	33
4.1. Pengaruh Bentuk Kristal Fotonik Terhadap Performa Optik dan Listrik Sel Surya.....	33
4.2 Pengaruh Rasio Kristal Fotonik Terhadap Optik dan Listrik Sel Surya	34
4.3 Pengaruh Variasi Diameter dan Konstanta Kisi Kristal Fotonik Terhadap Performa Optik dan Listrik Sel Surya	36
4.4 Pengaruh Ketebalan Kristal Fotonik Terhadap Performa Optik dan Listrik Sel Surya.....	38
4.5 Performa Optik dan Listrik Sel Surya Silikon dengan Kristal Fotonik dan Tanpa Kristal Fotonik.....	39
BAB V PENUTUP.....	42
5.1 Kesimpulan.....	42
5.2 Implikasi	43
5.3 Saran dan Rekomendasi.....	43

DAFTAR PUSTAKA	44
LAMPIRAN	51

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian terkini dari sel surya silikon dengan berbagai jenis kristal fotonik	20
Tabel 4.1 Perbandingan performa sel surya dengan berbagai bentuk kristal fotonik	34
Tabel 4.2 Perbandingan performa sel surya dengan berbagai rasio kristal fotonik	36
Tabel 4.3 Perbandingan performa sel surya dengan diameter dan konstanta kisi kristal fotonik yang berbeda	37
Tabel 4.4 Perbandingan performa sel surya dengan ketebalan kristal fotonik yang berbeda	37
Tabel 4.5 Perbandingan performa sel surya dengan kristal fotonik dan tanpa kristal fotonik	40

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Tren PCE sel surya selama 29 tahun terakhir.....	2
Gambar 2.1 Fotogenerasi sel surya	6
Gambar 2.2 Prinsip kerja sel surya.....	7
Gambar 2.3 Struktur sel surya silikon.....	15
Gambar 2.4 Skema dari tiga cara berbeda di mana piramida mengacak cahaya. .	16
Gambar 2.5 Dimensi kristal fotonik.....	19
Gambar 2.6 Tampilan Ansys Lumerical	21
Gambar 3.1 Vektor komponen medan listrik dan medan magnet dalam koordinat tiga dimensi	24
Gambar 3.2 Spektrum sinar matahari	27
Gambar 3.3 Struktur sel surya silikon dengan kristal fotonik.....	28
Gambar 3.4 Diagram alir penelitian	30
Gambar 4.1 Perbandingan performa sel surya dengan struktur yang berbeda.....	34
Gambar 4.2 Perbandingan performa sel surya dengan rasio yang berbeda	35
Gambar 4.3 Perbandingan performa sel surya silikon dengan diameter dan konstanta kisi yang berbeda	37
Gambar 4.4 Perbandingan performa sel surya dengan ketebalan kristal fotonik yang berbeda	39
Gambar 4.5 Performa sel surya dengan kristal fotonik dan tanpa kristal fotonik .	40
Gambar 4.6 Distribusi medan gelombang elektromagnetik.....	41

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Indeks Refraktif dan Sifat Listrik Material	51
Lampiran 2 Skript Ansys Lumerical	53

DAFTAR PUSTAKA

- Aberle, A. G. (2009). Thin-film solar cells. *Thin Solid Films*, 517(17), 4706–4710. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.03.056>
- Aldhshan, S. R. S., Abdul Maulud, K. N., Wan Mohd Jaafar, W. S., Karim, O. A., & Pradhan, B. (2021). Energy consumption and spatial assessment of renewable energy penetration and building energy efficiency in malaysia: A review. *Sustainability (Switzerland)*, 13(16). <https://doi.org/10.3390/su13169244>
- Aly, A. H., & Sayed, H. (2017). Enhancement of the solar cell based on nanophotonic crystals. *Journal of Nanophotonics*, 11(04), 1. <https://doi.org/10.1117/1.jnp.11.046020>
- Amalathas, A. P., & Alkaisi, M. M. (2019). Nanostructures for light trapping in thin film solar cells. *Micromachines*, 10(9), 1–18. <https://doi.org/10.3390/mi10090619>
- Augusto, A., Karas, J., Balaji, P., Bowden, S. G., & King, R. R. (2020). Exploring the practical efficiency limit of silicon solar cells using thin solar-grade substrates. *Journal of Materials Chemistry A*, 8(32), 16599–16608. <https://doi.org/10.1039/d0ta04575f>
- Bai, Y., Mora-Seró, I., De Angelis, F., Bisquert, J., & Wang, P. (2014). Titanium dioxide nanomaterials for photovoltaic applications. *Chemical Reviews*, 114(19), 10095–10130. <https://doi.org/10.1021/cr400606n>
- Battaglia, C., Cuevas, A., & De Wolf, S. (2016). High-efficiency crystalline silicon solar cells: Status and perspectives. *Energy and Environmental Science*, 9(5), 1552–1576. <https://doi.org/10.1039/c5ee03380b>
- Battaglia, C., Hsu, C. M., Söderström, K., Escarré, J., Haug, F. J., Charrière, M., Boccard, M., Despeisse, M., Alexander, D. T. L., Cantoni, M., Cui, Y., & Ballif, C. (2012). Light trapping in solar cells: Can periodic beat random? *ACS Nano*, 6(3), 2790–2797. <https://doi.org/10.1021/nn300287j>
- Bhattacharya, S., & John, S. (2018). Designing High-Efficiency Thin Silicon Solar Cells Using Parabolic-Pore Photonic Crystals. *Physical Review Applied*, 9(4), 44009. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.9.044009>

- Blakers, A. (2019). Development of the PERC Solar Cell. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9(3), 629–635.
<https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2899460>
- Boukourt, N. E. I., Patanè, S., & Bouhjar, F. (2020). Design, Optimization and Characterisation of IBC c-Si (n) Solar Cell. *Silicon*, 12(2), 365–372.
<https://doi.org/10.1007/s12633-019-00136-2>
- Bucher, E. (1978). Solar cell materials and their basic parameters. *Applied Physics*, 17(1), 1–26. <https://doi.org/10.1007/BF00885025>
- Chowdhury, S., Kumar, M., Dutta, S., Park, J., Kim, J., Kim, S., Ju, M., Kim, Y., Cho, Y., Cho, E.-C., & Yi, J. (2019). High-efficiency Crystalline Silicon Solar Cells: A Review. *New & Renewable Energy*, 15(3), 36–45.
<https://doi.org/10.7849/ksnre.2019.9.15.3.036>
- Chutinan, A., Kherani, N. P., & Zukotynski, S. (2009). High-efficiency photonic crystal solar cell architecture. *Optics Express*, 17(11), 8871.
<https://doi.org/10.1364/oe.17.008871>
- Daif, O. El, Drouard, E., Gomard, G., Meng, X., Kaminski, A., Fave, A., Lyon, U. De, Lyon-inl, I. N. De, Cnrs, U. M. R., Lyon, E. C. De, Ecully, F.-, Lyon, U. De, Lyon-inl, I. N. De, Cnrs, U. M. R., Lyon, I., & Villeurbanne, F.-. (n.d.). *Absorbing photonic crystals for thin film photovoltaics*.
- Dey, B. K., Khan, I., Abhinav, M. N., & Bhattacharjee, A. (2016). Mathematical modelling and characteristic analysis of Solar PV Cell. *7th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference, IEEE IEMCON 2016, April 2020*, 1–5.
<https://doi.org/10.1109/IEMCON.2016.7746318>
- Enhancement, A., Organic, O. F., Cell, S., Aluminum, U., As, O., Hasan, M., Rahman, S. A., Prodhan, M. H., & Talukder, H. (2018). *ABSORPTION ENHANCEMENT OF ORGANIC SOLAR CELL USING*. 42(1), 87–97.
- Eyderman, S., John, S., Hafez, M., Al-Ameer, S. S., Al-Harby, T. S., Al-Hadeethi, Y., & Bouwes, D. M. (2015). Light-trapping optimization in wet-etched silicon photonic crystal solar cells. *Journal of Applied Physics*, 118(2), 1–8.
<https://doi.org/10.1063/1.4926548>

- Fan, Q., Wang, Z., & Cui, Y. (2018). Optimal design of an antireflection coating structure for enhancing the energy-conversion efficiency of a silicon nanostructure solar cell. *RSC Advances*, 8(61), 34793–34807. <https://doi.org/10.1039/c8ra03730b>
- Ferekides, C. S., Balasubramanian, U., Mamazza, R., Viswanathan, V., Zhao, H., & Morel, D. L. (2004). CdTe thin film solar cells: Device and technology issues. *Solar Energy*, 77(6), 823–830. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.05.023>
- Gatto, A., & Drago, C. (2021). When renewable energy, empowerment, and entrepreneurship connect: Measuring energy policy effectiveness in 230 countries. *Energy Research and Social Science*, 78(February), 101977. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.101977>
- Goetzberger, A., Luther, J., & Willeke, G. (2002). Solar cells: Past, present, future. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 74(1–4), 1–11. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(02\)00042-9](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(02)00042-9)
- Green, M. A. (2020). Tracking solar cell conversion efficiency. *Nature Reviews Physics*, 2(4), 172–173. <https://doi.org/10.1038/s42254-020-0163-y>
- Guldin, S., Hüttner, S., Kolle, M., Welland, M. E., Müller-Buschbaum, P., Friend, R. H., Steiner, U., & Tétreault, N. (2010). Dye-sensitized solar cell based on a three-dimensional photonic crystal. *Nano Letters*, 10(7), 2303–2309. <https://doi.org/10.1021/nl904017t>
- Hasanah, L., Ashidiq, A., Pawinanto, R. E., Mulyanti, B., Wulandari, C., Wiendartun, & Ahmad, A. R. (2022). Dimensional optimization of tio2 nanodisk photonic crystals on lead iodide (Mapbi3) perovskite solar cells by using ftd simulations. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/app12010351>
- Holleman, C., Haase, F., Rienäcker, M., Barnscheidt, V., Krügener, J., Folchert, N., Brendel, R., Richter, S., Großer, S., Sauter, E., Hübner, J., Oestreich, M., & Peibst, R. (2020). Separating the two polarities of the POLO contacts of an 26.1%-efficient IBC solar cell. *Scientific Reports*, 10(1), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57310-0>

- ISE, P. R. I. F. O. R. S. E. S. (2012). *Photovoltaics Report. December.*
- Jung, H. S., & Park, N. G. (2015). Perovskite solar cells: From materials to devices. *Small*, *11*(1), 10–25. <https://doi.org/10.1002/sml.201402767>
- Kaelin, M., Rudmann, D., & Tiwari, A. N. (2004). Low cost processing of CIGS thin film solar cells. *Solar Energy*, *77*(6), 749–756. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.08.015>
- Kashyap, S., Madan, J., Pandey, R., & Sharma, R. (2020). Comprehensive Study on the Recent Development of PERC Solar Cell. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2020-June*, 2542–2546. <https://doi.org/10.1109/PVSC45281.2020.9300985>
- Kirikkaleli, D., & Adebayo, T. S. (2021). Do renewable energy consumption and financial development matter for environmental sustainability? New global evidence. *Sustainable Development*, *29*(4), 583–594. <https://doi.org/10.1002/sd.2159>
- Li, Z., Zhao, X., Li, X., Gao, Z., Mi, B., & Huang, W. (2012). Organic thin-film solar cells: Devices and materials. *Science China Chemistry*, *55*(4), 553–578. <https://doi.org/10.1007/s11426-011-4400-1>
- Liu, J., Yao, Y., Xiao, S., & Gu, X. (2018). Review of status developments of high-efficiency crystalline silicon solar cells. *Journal of Physics D: Applied Physics*, *51*(12). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aaac6d>
- Liu, W., Ma, H., & Walsh, A. (2019). Advance in photonic crystal solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *116*(September), 109436. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109436>
- Lockau, D. (2012). Optical modeling of thin film silicon solar cells with random and periodic light management textures. <Http://Opus.Kobv.De/Tuberlin/Volltexte/2013/3875/>, 179. <https://doi.org/urn:nbn:de:kobv:83-opus-38759>
- Loubani, A., Harid, N., & Griffiths, H. (2019). Analysis of UHF sensor response to em waves excited by surface discharge in air using FDTD simulation. *ICHVE 2018 - 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application*. <https://doi.org/10.1109/ICHVE.2018.8642074>

- Lv, Y., Zhuang, Y. F., Wang, W. J., Wei, W. W., Sheng, J., Zhang, S., & Shen, W. Z. (2020). Towards high-efficiency industrial p-type mono-like Si PERC solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 204(September 2019). <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110202>
- Maradin, D. (2021). Advantages and disadvantages of renewable energy sources utilization. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 11(3), 176–183. <https://doi.org/10.32479/ijeep.11027>
- Maruyama, T., & Minami, H. (2003). Light trapping in spherical silicon solar cell module. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 79(2), 113–124. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(02\)00375-6](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(02)00375-6)
- Massiot, I., Cattoni, A., Collin, S., Massiot, I., Cattoni, A., & Progress, S. C. (2020). *Progress and prospects for ultrathin solar cells To cite this version : HAL Id : hal-02999759 Progress and prospects for ultrathin solar cells. 959–972.*
- Merkel, M., Imbrock, J., & Denz, C. (2022). Diffraction-optimized aperiodic surface structures for enhanced current density in organic solar cells. *Optics Express*, 30(20), 36678. <https://doi.org/10.1364/oe.465177>
- Mishima, T., Taguchi, M., Sakata, H., & Maruyama, E. (2011). Development status of high-efficiency HIT solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(1), 18–21. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.04.030>
- Mohammad Bagher, A. (2015). Types of Solar Cells and Application. *American Journal of Optics and Photonics*, 3(5), 94. <https://doi.org/10.11648/j.ajop.20150305.17>
- Mohsin, A. S. M., Mobashera, M., Malik, A., Rubaiat, M., & Islam, M. (2020). Light trapping in thin-film solar cell to enhance the absorption efficiency using FDTD simulation. *Journal of Optics (India)*, 49(4), 523–532. <https://doi.org/10.1007/s12596-020-00656-w>
- Mokkapat, S., & Catchpole, K. R. (2012). Nanophotonic light trapping in solar cells. *Journal of Applied Physics*, 112(10). <https://doi.org/10.1063/1.4747795>
- Nakamura, J., Asano, N., Hieda, T., Okamoto, C., Katayama, H., & Nakamura, K. (2014). Development of heterojunction back contact Si solar cells. *IEEE*

Journal of Photovoltaics, 4(6), 1491–1495.
<https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2358377>

- Ouanoughi, A., Hocini, A., & Khedrouche, D. (2015). Study of the absorption in solar cells with 2D photonic crystals. *Acta Physica Polonica A*, 127(4), 1205–1207. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.127.1205>
- Pala, R. A., Liu, J. S. Q., Barnard, E. S., Askarov, D., Garnett, E. C., Fan, S., & Brongersma, M. L. (2013). Optimization of non-periodic plasmonic light-trapping layers for thin-film solar cells. *Nature Communications*, 4, 1–7. <https://doi.org/10.1038/ncomms3095>
- Prieto, I., Galiana, B., Postigo, P. A., Algora, C., Martínez, L. J., & Rey-Stolle, I. (2009). Enhanced quantum efficiency of Ge solar cells by a two-dimensional photonic crystal nanostructured surface. *Applied Physics Letters*, 94(19), 25–27. <https://doi.org/10.1063/1.3133348>
- Sahin, A., & Kaya, H. (2010). Thin-film solar cells. *Thin-Film Solar Cells, I*, 1–215. <https://doi.org/10.4324/9781315152318-18>
- Saint-Cast, P., Werner, S., Greulich, J., Jäger, U., Lohmüller, E., Höffler, H., & Preu, R. (2017). Analysis of the losses of industrial-type PERC solar cells. *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*, 214(3), 1–7. <https://doi.org/10.1002/pssa.201600708>
- Saive, R. (2021). Light trapping in thin silicon solar cells: A review on fundamentals and technologies. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 29(10), 1125–1137. <https://doi.org/10.1002/pip.3440>
- Shahbaz, M., Raghutla, C., Chittedi, K. R., Jiao, Z., & Vo, X. V. (2020). The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from the renewable energy country attractive index. *Energy*, 207(101168). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118162>
- Sprafke, A. N., & Wehrspohn, R. B. (2012). Light trapping concepts for photon management in solar cells. *Green*, 2(4), 177–187. <https://doi.org/10.1515/green-2012-0018>
- Sun, T., Shi, H., Cao, L., Liu, Y., Tu, J., Lu, M., Li, H., Zhao, W., Li, Q., Fu, T., & Zhang, F. (2020). Double grating high efficiency nanostructured silicon-

- based ultra-thin solar cells. *Results in Physics*, 19(September).
<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103442>
- Taguchi, M., Yano, A., Tohoda, S., Matsuyama, K., Nakamura, Y., Nishiwaki, T., Fujita, K., & Maruyama, E. (2014). 24.7% Record efficiency HIT solar cell on thin silicon wafer. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4(1), 96–99.
<https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2013.2282737>
- Tang, Z., Tress, W., & Inganäs, O. (2014). Light trapping in thin film organic solar cells. *Materials Today*, 17(8), 389–396.
<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.05.008>
- Tavakoli, N., Spalding, R., Lambertz, A., Koppejan, P., Gkantzounis, G., Wan, C., Röhrich, R., Kontoleta, E., Koenderink, A. F., Sapienza, R., Florescu, M., & Alarcon-Llado, E. (2022). Over 65% Sunlight Absorption in a 1 μm Si Slab with Hyperuniform Texture. *ACS Photonics*, 9(4), 1206–1217.
<https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.1c01668>
- Tsunomura, Y., Yoshimine, Y., Taguchi, M., Baba, T., Kinoshita, T., Kanno, H., Sakata, H., Maruyama, E., & Tanaka, M. (2009). Twenty-two percent efficiency HIT solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(6–7), 670–673. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.02.037>
- Voudoukis, N. F. (2018). Photovoltaic Technology and Innovative Solar Cells. *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2(1), 1–7. <https://doi.org/10.24018/ejece.2018.2.1.13>
- Zou, J., Liu, M., Tan, S., Bi, Z., Wan, Y., & Guo, X. (2021). Rational design and simulation of two-dimensional perovskite photonic crystal absorption layers enabling improved light absorption efficiency for solar cells. *Energies*, 14(9).
<https://doi.org/10.3390/en14092460>