

**PENGARUH PENAMBAHAN LAPISAN *REDUCED GRAPHENE OXIDE*
TERHADAP EFISIENSI SEL SURYA BERBASIS CZTS**

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi sebagian syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains

Program Studi Fisika Departemen Pendidikan Fisika

Kelompok bidang kajian Fisika Material



oleh:

**Xorell Ivanov Monov
1806405**

PROGRAM STUDI FISIKA

DEPARTEMEN PENDIDIKAN FISIKA

FAKULTAS PENDIDIKAN MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS PENDIDIKAN INDONESIA

2022

PENGARUH PENAMBAHAN LAPISAN *REDUCED GRAPHENE OXIDE*
TERHADAP EFISIENSI SEL SURYA BERBASIS CZTS

Oleh

Xorell Ivanov Monov

Diajukan untuk memenuhi sebagian syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Sains

Program Studi Fisika Departemen Pendidikan Fisika

Konsentrasi Fisika Material

FPMIPA UPI

© Xorell Ivanov Monov

Universitas Pendidikan Indonesia

Agustus 2022

Hak cipta dilindungi Undang-Undang

Skripsi ini tidak boleh diperbanyak seluruhnya atau sebagian, dengan dicetak ulang, difotokopi atau cara lainnya tanpa izin penulis.

LEMBAR PENGESAHAN

Xorell Ivanov Monov
NIM 1806405

**PENGARUH PENAMBAHAN LAPISAN *REDUCED GRAPHENE OXIDE*
TERHADAP EFISIENSI SEL SURYA BERBASIS CZTS**

Disetujui dan disahkan oleh:

Pembimbing I



Dr. Andhy Setjawan, M.Si.
NIP. 197310131998021001

Pembimbing II



Dr. Eka Cahya Prima, S.Pd., M.T
NIP. 199006262014041001

Mengetahui,
Ketua Program Studi Fisika



Dr. Endi Suhendi, M.Si.
NIP. 197905012003121001

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul “**PENGARUH PENAMBAHAN LAPISAN REDUCED GRAPHENE OXIDE TERHADAP EFISIENSI SEL SURYA BERBASIS CZTS**” 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, Agustus 2022

Yang membuat pernyataan



Xorell Ivanov Monov

NIM 1806405

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan Skripsi yang berjudul “Pengaruh Penambahan Lapisan Reduced Graphene Oxide Terhadap Efisiensi Sel Surya Berbasis CZTS”. Penyusunan Skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains di Program Studi Fisika, Departemen Pendidikan Fisika, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia. Penulis berharap bahwa dengan penulisan skripsi ini pembaca akan dapat bermanfaat sebagai informasi ilmu pengetahuan khusus. Namun penulis juga menyadari bahwa tulisan ini masih jauh dari kata sempurna. Kritik dan saran sangat dtunggu oleh penulis. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi pembaca. Akhir kata, saya ucapkan terimakasih,

Bandung, Agustus 2022



Penulis

UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan skripsi dari awal sampai dengan akhir. Dengan segala kerendahan hati, segala hormat penulis menyadari bahwa dalam menyelesaikan penelitian dan penulisan skripsi ini banyak memperoleh doa, bantuan, bimbingan, dorongan dan dukungan, serta motivasi dari berbagai pihak yang baik secara langsung maupun secara tidak langsung. Maka pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ang Aju Ratnawati yang telah mendukung penulis selama proses penelitian berlanjut, dukungan dan motivasi serta segalanya.
2. Bapak Dr. Andhy Setiawan, M.Si. selaku Dosen Pembimbing Akademik, Dosen Pembimbing 1, serta Penguji 3 yang telah membimbing penulis selama penelitian berlangsung sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian.
3. Bapak Dr. Eka Cahya Prima, S.Pd. M.T. selaku Dosen Pembimbing 2 yang telah membimbing, memberi kesempatan dan motivasi kepada penulis selama penelitian berlangsung.
4. Ibu Dr. Lilik Hasanah, M.Si. selaku Penguji 1 yang telah memberi saran dan motivasi kepada penulis selama menyelesaikan penulisan skripsi ini.
5. Ibu Dr. Selly Feranie, M.Si. selaku Penguji 2 yang telah memberi saran dan motivasi kepada penulis selama menyelesaikan penulisan skripsi ini.
6. Bapak, Dr. Endi Suhendi, M.Si. selaku ketua program studi fisika FPMIPA UPI yang telah sabar, memberi motivasi dan dukungan kepada penulis selama menyelesaikan penulisan skripsi ini.
7. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen beserta staff Tata Usaha Departemen Pendidikan Fisika, yang telah membantu penulis selama melakukan penelitian dan penulisan skripsi.
8. Untuk rekan-rekan MATFIZ CUIII: Abdan Itsarul Muflih J. Lallo, Tashya Anandita, Ghina Almira Salsabila, dan Husna Hanifa yang telah berjuang bersama dan memberi semangat selama perkuliahan di Fisika UPI.

9. Rekan-rekan Fisika Material: Abdan Itsarul Muflih J. Lallo, Tashya Anandita, Ghina Almira Salsabila, Husna Hanifa, Meilisyah Putri Utami, Maghfirani Aulia Rachman, Rahma Mutia, Prima Fitri R., dan Adryan Ashidiq
10. Untuk seluruh mahasiswa Fisika dan Pendidikan Fisika 2018 yang telah berjuang bersama selama perkuliahan di UPI.

ABSTRAK

PENGARUH PENAMBAHAN LAPISAN REDUCED GRAPHENE OXIDE TERHADAP EFISIENSI SEL SURYA BERBASIS CZTS

oleh

Xorell Ivanov Monov

NIM 1806405

(Program Studi Fisika)

Sel surya berbasis CZTS merupakan salah satu jenis sel surya yang sedang dalam perkembangan. CZTS merupakan zat yang memiliki sifat fisis yang mirip dengan CIGS dan menggunakan bahan yang lebih murah, sehingga material CZTS sedang banyak diteliti untuk menggantikan sel surya yang berbasis CIGS. Penelitian ini memfokuskan dalam penambahan lapisan rGO (*reduced graphene oxide*) dalam sel surya CZTS untuk membantu dengan laju perpindahan muatan. Sel surya CZTS memiliki defisit pada laju pemindahan muatan antar lapisan, sehingga ditambahkan lapisan rGO untuk mengatasi defisit tersebut. Lapisan tersebut kemudian difokuskan pada sifat optik dan pengaruh penambahan lapisan tersebut terhadap efisiensi sel surya CZTS yang telah dibuat. Karakterisasi sifat optik dari lapisan rGO menggunakan *UV-Vis Spectrophotometer*, hasil dari karakterisasi tersebut adalah absorbansi dan transmittansi dari lapisan tersebut. Sifat listrik dari sel surya CZTS meliputi J_{sc} , V_{oc} , FF dan efisiensi dari sel surya tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sample sel surya dengan efisiensi terbesar adalah sel surya dengan empat lapisan rGO, efisiensi yang diperoleh sebesar 2,88% dengan J_{sc} sebesar 2,93 mA/cm², V_{oc} sebesar 2,16 V dan FF sebesar 45,53%. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini menunjukkan bahwa ketebelan lapisan rGO tidak dipengaruhi oleh penambahan jumlah lapisan, sehingga tidak ada perbedaan yang signifikan pada efisiensi antar sample.

Kata Kunci: sel surya CZTS, *Reduced Graphene Oxide*, *spin-coating*.

ABSTRACT

EFFECT OF ADDING REDUCED GRAPHENE OXIDE LAYER ON THE EFFICIENCY OF CZTS TYPE SOLAR CELL

by

Xorell Ivanov Monov

NIM 1806405

(Physics Study Program)

CZTS-based solar cells are one type of solar cell that is currently under development. CZTS is a substance that has physical properties similar to CIGS and uses cheaper materials, so CZTS materials are being studied to replace CIGS-based solar cells. This research focuses on adding a layer of rGO (reduced graphene oxide) in CZTS solar cells to assist with the rate of charge transfer. CZTS solar cells have a deficit in the rate of charge transfer between layers, so an rGO layer is added to overcome this deficit. The layer is then focused on the optical properties and the effect of the addition of the layer on the efficiency of the CZTS solar cell that has been made. Characterization of the optical properties of the rGO layer using a UV-Vis Spectrophotometer, the results of this characterization are the absorbance and transmittance of the layer. The electrical properties of CZTS solar cells include J_{sc} , V_{oc} , FF and the efficiency of the solar cell. The research results show that the solar cell sample with the greatest efficiency is a solar cell with four layers of rGO, the efficiency obtained is 2.88% with J_{sc} of 2.93 mA/cm², V_{oc} of 2.16 V and FF of 45.53%. The results obtained from this study indicate that the thickness of the rGO layer is not affected by the addition of the number of layers, so there is no significant difference in efficiency between samples.

Keywords: CZTS Solar Cell, Reduced Graphene Oxide, Spin Coating Method.

DAFTAR ISI

PENGARUH PENAMBAHAN LAPISAN <i>REDUCED GRAPHENE OXIDE</i> TERHADAP EFISIENSI SEL SURYA BERBASIS CZTS	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
UCAPAN TERIMA KASIH.....	v
ABSTRAK	vii
<i>ABSTRACT</i>	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Penelitian	1
1.2 Rumusan Masalah Penelitian	3
1.3 Batas Penelitian	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Penyusunan Laporan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Sel Surya.....	5
2.2 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS)	6
2.2.1 Struktur Kristal CZTS.....	6

2.2.2 Struktur Devais Sel Surya CZTS	7
2.3 <i>Reduced Graphene Oxide</i> (rGO)	8
2.3.1 Struktur rGO	8
2.3.2 Manfaat rGO	9
BAB III METODE PENELITIAN	10
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	10
3.2 Desain Penelitian	10
3.3 Instrumen Penelitian.....	10
3.3.1 UV-VIS	11
3.3.2 Solar Simulator I-V.....	11
3.4 Alat dan Bahan	12
3.5 Prosedur Penelitian.....	14
3.5.1 Pembuatan Prekursor CZTS	15
3.5.2 Deposisi Lapisan CZTS	17
3.5.3 Pembuatan Larutan rGO	18
3.5.4 Deposisi rGO	18
3.5.5 Fabrikasi Sel Surya CZTS	19
3.6 Karakterisasi	20
3.6.1 Karakterasi UV-VIS	20
3.6.2 Karakterisasi I-V	20
BAB IV TEMUAN DAN PEMBAHASAN	22
4.1 Sifat optik lapisan rGO	23
4.1.1 Absorbansi	23
4.1.2 Transimitansi	24
4.2 Pengaruh lapisan rGO pada efisiensi sel surya CZTS.....	25

BAB V SIMPULAN, IMPLIKASI DAN REKOMENDASI	28
5.2 Implikasi	28
5.3 Rekomendasi	28
DAFTAR PUSTAKA	29
LAMPIRAN	37

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Kinerja solar cell CZTS	26
---	----

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sel surya sederhana (Gray 2011)	5
Gambar 2. 2 Representasi skematis dari kalkopirit, stannit dan kesterit (Suryawanshi 2013)	7
Gambar 2.3 Struktur Solar Cell CZTS dengan window/transparent conducting layer ITO (Prima 2019).....	7
Gambar 2.4 Pembuatan rGO dari prekursor Graphene (Gabor 2017)	8
Gambar 2.5 Struktur devais sel surya dengan lapisan Graphene (Kim 2020) Error! Bookmark not defined.	
Gambar 3.1 Struktur Lapisan Sel Surya.....	10
Gambar 3.2 Alat UV-VIS	11
Gambar 3.3 Alat pengukuran I-V	11
Gambar 3.4 Prosedur Penelitian.....	14
Gambar 3.5 Penimbangan dan dismpnan bahan prekrursor CZTS dalam botol kaca dengan pelarut 2-metoksietanol	15
Gambar 3.6 Penambahan bahan prekrusor, TEA dan MEA	16
Gambar 3.7 Filtrasi Larutan CZTS	17
Gambar 3.8 Proses Sulfurisasi CZTS	18
Gambar 3.9 Proses Sonfikasi rGO	18
Gambar 3.10 Proses deposisi rGO	19
Gambar 3.11 Proses fabrikasi sel surya CZTS.....	19
Gambar 4.1 Solar Cell CZTS yang telah terfabrikasi a) menunjukkan sisi dengan CZTS b) menunjukkan sisi rGO, sample 1, 2, 3 dan 4 menunjukkan jumlah lapisan rGO yang telah terdeposisikan	22

Gambar 4.2 rGO yang telah terdeposisi pada substrat SLG	23
Gambar 4.3 Grafik Absorbansi lapisan rGO	23
Gambar 4.4 Grafik Transmittansi.....	25
Gambar 4.5 Grafik J-V untuk setiap sample	25

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran. 1 Hasil UV-VIS CZTS yang telah disintesis	37
Lampiran. 2 Hasil TEM rGO dari pabrik.....	37

DAFTAR PUSTAKA

- O. Ellabban, H. Abu-Rub, and F. Blaabjerg, “Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 39, pp. 748–764, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.07.113.
- B. V. Mathiesen *et al.*, “Smart Energy Systems for coherent 100% renewable energy and transport solutions,” *Appl. Energy*, vol. 145, pp. 139–154, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.075.
- N. L. Panwar, S. C. Kaushik, and S. Kothari, “Role of renewable energy sources in environmental protection: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 3, pp. 1513–1524, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.11.037.
- K. Branker, M. J. M. Pathak, and J. M. Pearce, “A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 9, pp. 4470–4482, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.07.104.
- J. Yan and B. R. Saunders, “Third-generation solar cells: A review and comparison of polymer:fullerene, hybrid polymer and perovskite solar cells,” *RSC Adv.*, vol. 4, no. 82, pp. 43286–43314, 2014, doi: 10.1039/c4ra07064j.
- M. Yamaguchi, K. H. Lee, K. Araki, and N. Kojima, “A review of recent progress in heterogeneous silicon tandem solar cells,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 51, no. 13, 2018, doi: 10.1088/1361-6463/aaaf08.
- K. L. Chopra, P. D. Paulson, and V. Dutta, “Thin-film solar cells: An overview,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 12, no. 2–3, pp. 69–92, 2004, doi: 10.1002/pip.541.
- S. Sahoo, S. K. Tiwari, and G. C. Nayak, *Surface Engineering of Graphene*. 2019.
- E. C. Prima, L. H. Wong, A. Ibrahim, Nugraha, and B. Yulianto, “Solution-processed pure Cu₂ZnSnS₄/CdS thin film solar cell with 7.5% efficiency,” *Opt. Mater. (Amst.)*, vol. 114, no. February, p. 110947, 2021, doi: 10.1016/j.optmat.2021.110947.
- K. N. Nikita, M. A. Gaffar, and M. I. B. Chowdhury, “Exploring the opportunity of using graphene as the transparent conducting layer in CZTS-based thin film solar cells,” *2016 3rd Int. Conf. Electr. Eng. Inf. Commun. Technol. iCEEICT 2016*, 2017, doi: 10.1109/CEEICT.2016.7873130.

- S. Das, K. Sa, I. Alam, J. Raiguru, B. V. R. S. Subramanyam, and P. Mahanandia, “*Structural and optical study of CZTS-reduced graphene oxide composite towards photovoltaic device application,*” *Mater. Today Proc.*, vol. 17, pp. 131–137, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.06.410.
- A. M. Gabor *et al.*, “*Dependence of solar cell contact resistivity measurements on sample preparation methods,*” *2017 IEEE 44th Photovolt. Spec. Conf. PVSC 2017*, pp. 777–780, 2017, doi: 10.1109/PVSC.2017.8366718.
- Jeong, W.-L., Min, J.-H., Kim, I.-Y., Kim, H.-S., Kim, J.-H., & Lee, D.-S. (2017). Effects of graphene oxide barrier on Cu₂ZnSnS_xSe_{4-x} thin film solar cells. 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). doi:10.1109/pvsc.2017.8366718
- Konios, Dimitrios; Stylianakis, Minas M.; Stratakis, Emmanuel; Kymakis, Emmanuel (2014). *Dispersion behaviour of graphene oxide and reduced graphene oxide.* Journal of Colloid and Interface Science, 430(), 108–112. doi:10.1016/j.jcis.2014.05.033
- Ayán-Varela, M.; Paredes, J.I.; Villar-Rodil, S.; Rozada, R.; Martínez-Alonso, A.; Tascón, J.M.D. (2014). *A quantitative analysis of the dispersion behavior of reduced graphene oxide in solvents.* Carbon, 75(), 390–400. doi:10.1016/j.carbon.2014.04.018
- Suryawanshi, M P; Agawane, G L; Bhosale, S M; Shin, S W; Patil, P S; Kim, J H; Moholkar, A V (2013). *CZTS based thin film solar cells: a status review.* Materials Technology, 28(1/2), 98–109. doi:10.1179/1753555712Y.00000000038
- Hironori Katagiri; Kazuo Jimbo; Win Shwe Maw; Koichiro Oishi; Makoto Yamazaki; Hideaki Araki; Akiko Takeuchi (2009). *Development of CZTS-based thin film solar cells.* , 517(7), 2455–2460. doi:10.1016/j.tsf.2008.11.002
- Singh, R., Singh, P. K., Bhattacharya, B., & Rhee, H.-W. (2019). Review of current progress in inorganic hole-transport materials for perovskite solar cells. *Applied Materials Today*, 14, 175–200. doi:10.1016/j.apmt.2018.12.011
- Ayán-Varela, M., Paredes, J. I., Villar-Rodil, S., Rozada, R., Martínez-Alonso, A., & Tascón, J. M. D. (2014). A quantitative analysis of the dispersion behavior of reduced graphene oxide in solvents. *Carbon*, 75, 390–400. doi:10.1016/j.carbon.2014.04.018

- Konios, D., Stylianakis, M. M., Stratakis, E., & Kymakis, E. (2014). Dispersion behaviour of graphene oxide and reduced graphene oxide. *Journal of Colloid and Interface Science*, 430, 108–112. doi:10.1016/j.jcis.2014.05.033
- Rosli, N. N., Ibrahim, M. A., Ahmad Ludin, N., Mat Teridi, M. A., & Sopian, K. (2019). A review of graphene based transparent conducting films for use in solar photovoltaic applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 99, 83–99. doi:10.1016/j.rser.2018.09.011
- LEE, Y., & AHN, J.-H. (2013). GRAPHENE-BASED TRANSPARENT CONDUCTIVE FILMS. *Nano*, 08(03), 1330001. doi:10.1142/s1793292013300016
- Woo, Y. (2018). Transparent Conductive Electrodes Based on Graphene-Related Materials. *Micromachines*, 10(1), 13. doi:10.3390/mi10010013
- S. Giraldo, T. Thersleff, G. Larramona, M. Neuschitzer, P. Pistor, K. Leifer, A. Pérez-Rodríguez, C. Moisan, G. Dennler, E. Saucedo, “Cu₂ZnSnSe₄ solar cells with 10.6% efficiency through innovative absorber engineering with Ge superficial nanolayer”, *Progress in Photovoltaics*, vol. 24, pp. 1359-1367, 2016.
- E. Ha, W. Liu, L. Wang, H.W. Man, L. Hu, S.C. Tsang, C.T. Chan, W.M. Kwok, L.Y. Lee, K.Y. Wong, “Cu₂ZnSnS₄/MoS₂- Reduced Graphene Oxide Heterostructure: Nanoscale Interfacial Contact and Enhanced Photocatalytic Hydrogen Generation”, *Scientific Reports*, vol. 7, pp. 39411, 2017.
- J. Kim, S. Park, S. Ryu, J. Oh, B. Shin “Improving the opencircuit voltage of Cu₂ZnSnSe₄ thin film solar cells via interface passivation”, *Progress in Photovoltaics*, vol. 25, pp. 308-317, 2017
- Panwar, N.L., Kaushik, S.C., Kothari, S.: Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 1513 (2011)
- Branker, K., Pathak, M.J.M., Pearce, J.M.: A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 4470 (2011)
- Yan, J., Saunders, B.R.: Third-generation solar cells: A review and comparison of polymer: fullerene, hybrid polymer and perovskite solar cells. *RSC Adv.* 4, 43286 (2014)

- Yamaguchi, M., Lee, K., Araki, K.: A review of recent progress in heterogeneous silicon tandem solar cells. *J. Phys. D Appl. Phys.* 51, 133002 (2018)
- Chopra, K.L., Paulson, P.D., Dutta, V.: Thin-film solar cells: an overview. *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 12, 69 (2004)
- Matthew, R.B.K., Allen, J., Tung, V.C.: Honeycomb carbon: a review of graphene. *Chem. Rev.* 110, 132 (2010)
- Soldano, C., Mahmood, A., Dujardin, E.: Production, properties and potential of graphene. *Carbon* 48, 2127 (2010)
- Sun, Y., Zhang, W., Chi, H., Liu, Y., Hou, C.L., Fang, D.: Recent development of graphene materials applied in polymer solar cell. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 43, 973 (2015)
- De, S., Coleman, J.N.: Are there fundamental limitations on the sheet resistance and transmittance of thin graphene films? *ACS Nano* 4, 2713 (2010)
- Ubani, C.A., Ibrahim, M.A., Teridi, M.A.M., Sopian, K., Ali, J., Chaudhary, K.T.: Application of graphene in dye and quantum dots sensitized solar cell. *Sol. Energy* 137, 531 (2016)
- Sim, J.K., Kang, S., Nandi, R., Jo, J.Y., Jeong, K.U., Lee, C.R.: Implementation of graphene as hole transport electrode in flexible CIGS solar cells fabricated on Cu foil. *Sol. Energy* 162, 357 (2018)
- Li, X., Zhu, H., Wang, K., Cao, A., Wei, J., Li, C., Jia, Y., Li, Z., Li, X., Wu, D.: Graphene on-silicon schottky junction solar cells. *Adv. Mater.* 22, 2743 (2010)
- Bouclé, J., Herlin-Boime, N.: The benefits of graphene for hybrid perovskite solar cells. *Synth. Met.* 222, 3 (2016)
- Mahmoudi, T., Wang, Y., Hahn, Y.B.: Graphene and its derivatives for solar cells application. *Nano Energy* 47, 51 (2018)
- Acik, M., Darling, S.B.: Graphene in perovskite solar cells: Device design, characterization and implementation. *J. Mater. Chem. A* 4, 6185 (2016)
- Iwan, A., Chuchmała, A.: Perspectives of applied graphene: *Prog. Polym. Sci.* 37, 1805 (2012)
- Steim, R., Kogler, F.R., Brabec, C.J.: Interface materials for organic solar cells. *J. Mater. Chem.* 20, 2499 (2010)

- Wang, F., Xu, Q., Tan, Z., Li, L., Li, S., Hou, X., Sun, G., Tu, X., Hou, J., Li, Y.: Efficient polymer solar cells with a solution-processed and thermal annealing-free RuO₂ anode buffer layer. *J. Mater. Chem. A* 2, 1318 (2014)
- Wang, J., Wang, Y., He, D., Liu, Z., Wu, H., Wang, H., Zhou, P., Fu, M.: Polymer bulk heterojunction photovoltaic devices based on complex donors and solution-processable functionalized graphene oxide. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 96, 58 (2012)
- Yu, D., Park, K., Durstock, M., Dai, L.: Fullerene-grafted graphene for efficient bulk heterojunction polymer photovoltaic devices. *J. Phys. Chem. Lett.* 2, 1113 (2011)
- Wang, S., Goh, B.M., Manga, K.K., Bao, Q., Yang, P., Loh, K.P.: Graphene as atomic template and structural scaffold in the synthesis of graphene-organic hybrid wire with photovoltaic properties. *ACS Nano* 4, 6180 (2010)
- Liu, Z., He, D., Wang, Y., Wu, H., Wang, J.: Solution-processable functionalized graphene in donor/acceptor-type organic photovoltaic cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 94, 1196 (2010)
- Gupta, V., Chaudhary, N., Srivastava, R., Sharma, G.D., Bhardwaj, R., Chand, S.: Luminescent graphene quantum dots for organic photovoltaic devices. *J. Am. Chem. Soc.* 133, 9960 (2011)
- Wang, X., Zhi, L., Tsao, N., Tomović, Ž., Li, J., Müllen, K.: Transparent carbon films as electrodes in organic solar cells. *Angew. Chemie-Int. Ed.* 47, 2990 (2008)
- Shin, D.H., Jang, C.W., Lee, H.S., Seo, S.W., Choi, S.H.: Semitransparent flexible organic solar cells employing doped-graphene layers as anode and cathode electrodes. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 10, 3596 (2018)
- Valentini, L., Cardinali, M., Bittolo Bon, S., Bagnis, D., Verdejo, R., Lopez-Manchado, M.A., Kenny, J.M.: Use of butylamine modified graphene sheets in polymer solar cells. *J. Mater. Chem.* 20, 995 (2010)
- Yu, D., Yang, Y., Durstock, M., Baek, J., Dai, L.: Soluble P3HT-grafted graphene for efficient bilayer-heterojunction photovoltaic devices. *ACS Nano* 4, 5633 (2010)

- Yin, Z., Sun, S., Salim, T., Wu, S., Huang, X., He, Q., Lam, Y.M., Zhang, H.: Organic photovoltaic devices using highly flexible reduced graphene oxide films as transparent electrodes. *ACS Nano* 4, 5263 (2010)
- Un Jung, Y., Na, S.-I., Kim, H.-K., Jun Kang, S.: Organic photovoltaic devices with low resistance multilayer graphene transparent electrodes. *J. Vac. Sci. Technol. A* 30, 050604 (2012)
- Huang, J.H., Fang, J.H., Liu, C.C., Chu, C.W.: Effective work function modulation of graphene/carbon nanotube composite films as transparent cathodes for organic optoelectronics. *ACS Nano* 5, 6262 (2011)
- Lee, Y.Y., Tu, K.H., Yu, C.C., Li, S.S., Hwang, J.Y., Lin, C.C., Chen, K.H., Chen, L.C., Chen, H.L., Chen, C.W.: Top laminated graphene electrode in a semitransparent polymer solar cell by simultaneous thermal annealing/releasing method. *ACS Nano* 5, 6564 (2011)
- Jo, G., Na, S.I., Oh, S.H., Lee, S., Kim, T.S., Wang, G., Choe, M., Park, W., Yoon, J., Kim, D.Y., Kahng, Y.H., Lee, T.: Tuning of a graphene-electrode work function to enhance the efficiency of organic bulk heterojunction photovoltaic cells with an inverted structure. *Appl. Phys. Lett.* 97, 213301 (2010)
- Liu, Z., Li, J., Sun, Z.-H., Tai, G., Lau, S.-P., Yan, F.: Direct measurement of the exciton binding energy and effective masses for charge carriers in organic-inorganic tri-halide perovskites. *ACS Nano* 6, 810 (2012)
- Miyata, A., Mitioglu, A., Plochocka, P., Portugall, O., Wang, J.T.W., Stranks, S.D., Snaith, H.J., Nicholas, R.J.: Direct measurement of the exciton binding energy and effective masses for charge carriers in organic-inorganic tri-halide perovskites. *Nat. Phys.* 11, 582 (2015)
- Heo, J.H., Shin, D.H., Kim, S., Jang, M.H., Lee, M.H., Seo, S.W., Choi, S.H., Im, S.H.: Highly efficient CH₃NH₃PbI₃ perovskite solar cells prepared by AuCl₃-doped graphene transparent conducting electrodes. *Chem. Eng. J.* 323, 153 (2017)
- Yoon, J., Sung, H., Lee, G., Cho, W., Ahn, N., Jung, H.S., Choi, M.: Superflexible, highefficiency perovskite solar cells utilizing graphene electrodes: Towards future foldable power sources. *Energy Environ. Sci.* 10, 337 (2017)

- Sung, H., Ahn, N., Jang, M.S., Lee, J.K., Yoon, H., Park, N.G., Choi, M.: Transparent conductive oxide-free graphene-based perovskite solar cells with over 17% efficiency. *Adv. Energy Mater.* 6, 2 (2016)
- You, P., Liu, Z., Tai, Q., Liu, S., Yan, F.: Efficient semitransparent perovskite solar cells with graphene electrodes. *Adv. Mater.* 27, 3632 (2015)
- Lang, F., Gluba, M.A., Albrecht, S., Rappich, J., Korte, L., Rech, B., Nickel, N.H.: Perovskite solar cells with large-area CVD-graphene for tandem solar cells. *J. Phys. Chem. Lett.* 6, 2745 (2015)
- Guo, F., Azimi, H., Hou, Y., Przybilla, T., Hu, M., Bronnbauer, C., Langner, S., Spiecker, E., Forberich, K., Brabec, C.J.: High-performance semitransparent perovskite solar cells with solution-processed silver nanowires as top electrodes. *Nanoscale* 7, 1642 (2015)
- Li, Z., Kulkarni, S.A., Boix, P.P., Shi, E., Cao, A., Fu, K., Batabyal, S.K., Zhang, J., Xiong, Q., Wong, L.H., Mathews, N., Mhaisalkar, S.G.: Laminated carbon nanotube networks for metal electrode-free efficient perovskite solar cells. *ACS Nano* 8, 6797 (2014)
- Lang, F., Gluba, M.A., Albrecht, S., Shargaieva, O., Rappich, J., Korte, L., Rech, B., Nickel, N.H.: In situ graphene doping as a route toward efficient perovskite tandem solar cells. *Phys. Status Solidi Appl. Mater. Sci.* 213, 1989 (2016)
- Kim, H., Lim, K.-G., Lee, T.-W.: Planar heterojunction organometal halide perovskite solar cells: roles of interfacial layers. *Energy Environ. Sci.* 9, 12 (2016)
- Kim, B.J., Kim, D.H., Lee, Y.Y., Shin, H.W., Han, G.S., Hong, J.S., Mahmood, K., Ahn, T.K., Joo, Y.C., Hong, K.S., Park, N.G., Lee, S., Jung, H.S.: Highly efficient and bending durable perovskite solar cells: Toward a wearable power source. *Energy Environ. Sci.* 8, 916 (2015)
- Heo, J.H., Lee, M.H., Han, H.J., Patil, B.R., Yu, J.S., Im, S.H.: Highly efficient low temperature solution processable planar type CH₃NH₃PbI₃ perovskite flexible solar cells. *J. Mater. Chem. A* 4, 1572 (2016)
- Yeo, J.S., Kang, R., Lee, S., Jeon, Y.J., Myoung, N.S., Lee, C.L., Kim, D.Y., Yun, J.M., Seo, Y.H., Kim, S.S., Na, S.I.: Highly efficient and stable planar perovskite solar cells with reduced graphene oxide nanosheets as electrode interlayer. *Nano Energy* 12, 96 (2015)

- Wu, Z., Bai, S., Xiang, J., Yuan, Z., Yang, Y., Cui, W., Gao, X., Liu, Z., Jin, Y., Sun, B.: Efficient planar heterojunction perovskite solar cells employing graphene oxide as hole conductor. *Nanoscale* 6, 10505 (2014)
- Liu, T., Kim, D., Han, H., Bin Mohd Yusoff, A.R., Jang, J.: Fine-tuning optical and electronic properties of graphene oxide for highly efficient perovskite solar cells. *Nanoscale* 7, 10708 (2015)
- Luo, Q., Zhang, Y., Liu, C., Li, J., Wang, N., Lin, H.: Iodide-reduced graphene oxide with dopant-free spiro-OMeTAD for ambient stable and high-efficiency perovskite solar cells. *J. Mater. Chem. A* 3, 15996 (2015)
- Umeyama, T., Matano, D., Baek, J., Gupta, S., Ito, S., (Ravi) Subramanian, V., Imahori, H.: Boosting of the performance of perovskite solar cells through systematic introduction of reduced graphene oxide in TiO₂ layers. *Chem. Lett.* 44, 1410 (2015)
- Han, G.S., Song, Y.H., Jin, Y.U., Lee, J.-W., Park, N.-G., Kang, B.K., Lee, J.-K., Cho, I.S., Yoon, D.H., Jung, H.S.: Reduced graphene oxide/mesoporous TiO₂ nanocomposite based perovskite solar cells. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 7, 23521 (2015)
- Wang, J.T.W., Ball, J.M., Barea, E.M., Abate, A., Alexander-Webber, J.A., Huang, J., Saliba, M., Mora-Sero, I., Bisquert, J., Snaith, H.J., Nicholas, R.J.: Low-temperature processed electron collection layers of graphene/TiO₂ nanocomposites in thin film perovskite solar cells. *Nano Lett.* 14, 724 (2014)
- Zhao, C., Xing, L., Xiang, J., Cui, L., Jiao, J., Sai, H., ... Li, F. (2014). Formation of uniform reduced graphene oxide films on modified PET substrates using drop-casting method. *Particuology*, 17, 66–73. doi:10.1016/j.partic.2014.02.005