

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor,
o texto completo desta dissertação
será disponibilizado somente a partir
de 01/07/2023.



UNIVERSIDADE ESTADUAL
PAULISTA

**PROGRAMA DE
PÓS-
GRADUAÇÃO EM
FÍSICA**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM FÍSICA APLICADA

DANILO DOS SANTOS

**Estudo dos mecanismos de operação de dispositivos
eletroluminescentes produzidos com compósitos**

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS

Rio Claro
2021

Estudo dos Mecanismos de Operação de Dispositivos Eletroluminescentes Produzidos com Compósitos

Danilo dos Santos

Orientador: Prof. Dr. Giovani Gozzi

Rio Claro, SP
2021

DANILO DOS SANTOS

Estudo dos mecanismos de operação de dispositivos eletroluminescentes produzidos com compósitos.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Física Aplicada

Orientador: Prof.Dr.Giovani Gozzi
Co-orientador: Prof.Dr. Lucas Fugikawa Santos

Rio Claro, SP
2021

S237e Santos, Danilo
Estudo dos Mecanismos de Operação de Dispositivos
Eletroluminescentes Produzidos com Compósitos / Danilo Santos. --
Rio Claro, 2021
58 p. : il., tabs., fotos + 1 CD-ROM

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientador: Giovani Gozzi
Coorientador: Lucas Fugikawa Santos

1. Dispositivos Eletroluminescentes. 2. Mecanismos de Operação.
3. Compósitos. 4. Modelagem fenomenológico. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Danilo dos Santos

**Estudos dos Mecanismos de Operação de
Dispositivos Eletroluminescentes Produzidos
com Compósito**

Dissertação de mestrado apresentada
ao Instituto de Geociências e
Ciências Exatas do Campus de Rio
Claro, da Universidade Estadual
Paulista “Júlio de Mesquita Filho”,
como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em
Física Aplicada.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Giovani Fornereto Gozzi – Unesp/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. Alexandre Mesquita – Unesp/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. Rafael Henriques Longaresi - UFSCar

Conceito: Aprovado

Rio Claro, SP

01 de julho de 2021

RESUMO

Dispositivos eletroluminescentes produzidos com compósitos (LECEL, *Light-Emitting Composite Eletroluminescent Devices*) são promissores tecnologicamente devido a possibilidade de serem fabricados com a deposição de filmes espessos (da ordem de dezenas e centenas de micrometros) e por empregarem eletrodos pouco reativos aos componentes atmosféricos. Na literatura científica atual existem estudos sobre as propriedades de injeção e de transporte de cargas, bem como sobre os mecanismos de operação desta categoria de dispositivos. Contudo, estudos desta natureza ainda não foram realizados em dispositivos produzidos por impressão serigráfica. Adicionalmente, o modelo fenomenológico que descreve os mecanismos de operação de LECELS não permite a correlação direta entre as propriedades eletro-ópticas dos dispositivos com a composição do material ativo. Nesta pesquisa, apresentamos estudos sobre a influência dos metais empregados como eletrodos na injeção de portadores de cargas na camada ativa de LECELS produzidos por serigrafia. Apresentamos também um estudo sobre a influência da composição do material ativo nas propriedades elétricas e na eletroluminescência dos dispositivos estudados. Adicionalmente, apresentamos uma extensão do modelo fenomenológico para operação de dispositivos LECEL, na qual estabelecemos correspondência entre as propriedades eletro-ópticas dos dispositivos com a composição do material ativo.

Palavras-chave: Dispositivos eletroluminescentes. Mecanismos de Operação. Compósitos. Eletrônica impressa. Modelagem fenomenológica.

ABSTRACT

Since Light-Emitting Composite Electroluminescent Devices (LECEL) are produced using thick films (tens and hundreds of micrometers) and air stable electrodes, this technology is suitable for production in regular environment. In this research field, some studies regarding charge injection, charge transport and LECEL operating mechanisms have been reported. However, this type of study on screen-printed LECEL have not performed yet. As additional lack in this research field, the phenomenological model, which describes LECEL operational mechanisms, does not correlates device electro-optical properties with active material composition. Therefore, we have performed studies regarding the influence of electrodes and active material composition in electro-optical properties of screen-printed LECELs. Additionally, we have improved the phenomenological model to describe device electro-optical properties as function of active material composition.

Keywords: Electroluminescent devices. Operation mechanisms. Composites. Printed electronics. Phenomenological Modeling.

Sumário

1	Introdução	1
2	Objetivos da dissertação	4
3	Revisão da Literatura	5
	3.1 Dispositivos eletroluminescentes produzidos com compósitos	5
4	Materiais e Métodos Experimentais.....	17
	4.1 Materiais.....	17
	4.2 Preparações de soluções	18
5	Resultados Experimentais.....	19
	5.1 Caracterização AC.....	19
	5.2 Caracterização DC.....	25
6	Modelagem do sistema e discussão dos resultados	33
7	Conclusões	40
8	Bibliografia	42
	Apêndices.....	49
	Apêndice A.....	49
	Apêndice B.....	54

1 Introdução

O grande desenvolvimento científico e tecnológico, sobretudo na área da eletrônica, vem sendo um significativo fator de transformação social desde a segunda metade do século XX. Consequentemente, as demandas da sociedade têm determinado os rumos das ciências aplicadas, como por exemplo, na área da eletrônica. Atualmente, a pesquisa científica e tecnológica neste campo tem foco na redução do custo de produção e na criação de dispositivos para aplicações emergentes, como por exemplo, embalagens inteligentes para IoT (Internet das coisas).

Neste sentido, no final do século XX foi demonstrado que o poliacetileno [1], por se comportar como um material semicondutor, apresenta alta condutividade elétrica quando dopado. Esta descoberta revelou que os polímeros conjugados, os que apresentam alternância entre as ligações duplas e simples entre os átomos de carbono da cadeia polimérica principal, apresentam estrutura eletrônica de um cristal unidimensional, semicondutor. Assim, moléculas desta classe se tornaram candidatas para a produção de componentes eletrônicos. Comparados aos materiais semicondutores inorgânicos, os orgânicos poliméricos apresentam mobilidade de portadores de cargas inferior, já que os materiais poliméricos formam estruturas desordenadas. Em contrapartida, a natureza desordenada dos materiais poliméricos possibilita sua dissolução e, assim, o processamento destes materiais semicondutores por técnicas de impressão gráfica que são técnicas de baixo custo de implantação e compatíveis com a produção em larga escala. Além disso, os dispositivos de eletrônica orgânica e impressa, podem ser flexíveis, ultrafinos, leves e transparentes, possibilitando novas aplicações, como em embalagens inteligentes e em displays flexíveis, por exemplo [3].

A possibilidade de processamento de componentes e circuitos eletrônicos utilizando técnicas de impressão gráfica apresenta-se como uma vantagem tecnológica tão significativa, que a eletrônica impressa se encontra em plena ascensão científica e tecnológica. Motivados pelas vantagens de processamento dos

materiais poliméricos, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos nas áreas de síntese química de novos polímeros conjugados, ciência e tecnologia de materiais semicondutores, condutores, blendas, compósitos e engenharia de dispositivos eletrônicos. No segmento dos dispositivos eletrônicos produzidos com materiais poliméricos, pode-se destacar os transistores e circuitos derivados (CMOS e memórias), dispositivos fotovoltaicos, antenas para RFID(Radiofrequency Identification Devices), sensores e bio-sensores e dispositivos eletroluminescentes (EL)[2,3]. Neste contexto, o presente projeto dedica-se especificamente à área dos dispositivos eletroluminescentes processados por técnicas de impressão gráfica.

Na área dos dispositivos eletroluminescentes especificamente, o primeiro grande marco científico foi a descoberta da eletroluminescência devido à aplicação de intensos campos elétricos a.c. em materiais inorgânicos, realizada por Destriau em 1936[2]. Em seu experimento, a emissão de luz foi observada em partículas de ZnS (Sulfeto de Zinco), dispersas em óleo de mamona e mantidas entre dois eletrodos metálicos. Embora o material desenvolvido por Destriau para demonstração do conceito da eletroluminescência pudesse ser processado por técnicas de impressão, os dispositivos desenvolvidos a partir de sua descoberta durante as décadas de 1960 e 1970 constituíam-se com uma camada ativa de ZnS:Mn^{2+} obtida pelo método de crescimento epitaxial do material[4].

O primeiro dispositivo eletroluminescente produzido por técnicas de deposição foi desenvolvido na universidade de Cambridge no final da década de 1980, onde foi utilizado como material ativo um polímero semicondutor eletroluminescente [4]. A partir da introdução destes dispositivos, os diodos poliméricos emissores de luz (PLED – *Polymer Light Emitting Diode*), diversos estudos foram conduzidos visando compreender os princípios de operação e o aumento de desempenho dos mesmos. Apesar dos esforços acadêmicos para o desenvolvimento dos PLEDs, a produção de dispositivos com alto desempenho continua condicionada à deposição de filmes ultrafinos (~ 200 nm), ao uso de eletrodos altamente reativos aos componentes atmosféricos (Ca e Mg) e a estruturas de multicamadas. Estas características da tecnologia PLED demandam sofisticadas condições de processamento, como ambientes de sala limpa e processamento em atmosfera inerte, o que limita a aplicação comercial desta tecnologia [8].

Alternativamente aos PLEDs, foram desenvolvidas novas tecnologias, como o uso de nano-partículas eletroluminescentes, dispersas em uma matriz polimérica isolante, como materiais eletroluminescentes [9]. Contudo, esta categoria de dispositivos demanda condições de processamento análogas às dos PLEDs. Entretanto, no final da década de 1990, foi desenvolvido um dispositivo chamado de célula eletroquímica emissora de luz (PLEC – *Polymer Light-emitting Electrochemical Cell*) [10], utilizando como material eletroluminescente uma blenda de polímero semicondutor com um eletrólito polimérico. Com o desenvolvimento deste novo material ativo, foi possível produzir dispositivos eletrônicos impressos sem a necessidade de utilização de filmes ultrafinos, eletrodos reativos e estruturas de multicamadas. Contudo, para a produção de dispositivos com alto desempenho (com luminância da ordem de 10^3 cd/m²) o uso de ambientes de atmosfera inerte e a produção de filmes ultrafinos ainda é indispensável.

Alternativamente, no final da década de 2000 foi introduzida uma nova tecnologia (LECEL – *Light-Emitting Composite Eletroluminescent Device*) [11], em que se emprega como material ativo um compósito de micropartículas eletroluminescente dispersas em uma blenda de polímero condutor. Nesta categoria de dispositivos a injeção de portadores de cargas a partir dos eletrodos se dá para a fase condutora do compósito, que em geral, é constituída por um polímero condutor de buracos, com energia de ionização da ordem de 5 eV. Por esta razão, materiais pouco reativos aos componentes atmosféricos, como ouro, prata, cobre, óxido de estanho e índio, são os materiais mais indicados para a produção de eletrodos. Nestes dispositivos, os portadores de carga injetados fluem pela camada ativa via hopping e se acumulam nas superfícies das micropartículas eletroluminescentes. Como consequência deste acúmulo de cargas, ocorre a intensificação do campo elétrico local (na imediação das micropartículas luminescentes), o qual atinge valores da ordem de $10^5 - 10^6$ V/cm, promovendo a injeção de cargas nas micropartículas e, consequentemente, a excitação eletrônica nos átomos emissores de luz. Contudo, estes intensos valores de campo elétrico efetivo podem ser alcançados mesmo quando a camada ativa do dispositivo LECEL é produzida com espessura da ordem de dezenas de micrometros e excitada com tensões da ordem de dezenas de volts.

Em função de suas propriedades físicas, os dispositivos LECEL são vantajosos em relação às demais tecnologias por não demandarem a produção de filmes ultrafinos e uso de materiais reativos aos componentes atmosférico, podendo ser processados por técnicas de impressão gráfica em condições ambientais regulares. Estudos anteriores reportaram os mecanismos de injeção e de transporte de carga nos compósitos eletroluminescentes, assim como os mecanismos de eletroluminescência e um modelo fenomenológico para descrever as propriedades eletro-ópticas dos dispositivos. Adicionalmente, foram desenvolvidas pastas eletroluminescentes para deposição serigráfica com as quais foram obtidos dispositivos com luminância da ordem de 10^3 cd/m^2 e dispositivos totalmente impressos por serigrafia. Contudo, em estudos anteriores as os fenômenos de injeção e de transporte de cargas em dispositivos produzidos por serigrafia ainda não foram estudados. Além disto, os modelos para representação das propriedades eletro-ópticas de dispositivos LECEL ainda não permitem correlacionar as propriedades de dispositivos com a composição do material eletroluminescente.

2 Objetivos da dissertação

Este estudo teve como objetivo o estudo da influência dos metais empregados para a produção de eletrodos e da composição do material ativo nas propriedades eletro-ópticas de dispositivos LECEL produzidos por serigrafia. depara isso, foram desenvolvidos compósitos eletroluminescentes para deposição serigráfica e, a partir destes dispositivos, foram realizados estudos de injeção e transporte de cargas.

7 Conclusões

Nesta pesquisa realizamos estudos sobre a injeção de cargas em dispositivos eletroluminescentes produzidos com compósitos (LECEL, *Light-Emitting Composite Eletroluminescent Devices*), estudos da influência da composição do material ativo nas propriedades elétricas e na eletroluminescência destes dispositivos e, com base nestes dados experimentais, estendemos o modelo fenomenológico para a operação de LECEL.

Assim como já reportado na literatura, verificamos que materiais com elevada função trabalho, formam contatos quase-ôhmicos com a camada ativa dos dispositivos, enquanto eletrodos com baixa função trabalho, formam contatos não ôhmicos. Contudo, verificamos que as propriedades eletro-óptica dos dispositivos foram pouco afetadas pelos eletrodos não ôhmicos nas condições operacionais dos dispositivos.

Os estudos sobre a influência da composição do material ativo nas propriedades eletro-ópticas dos dispositivos demonstraram que dispositivos com desempenho médio ou alto, isto é, com luminâncias superiores a 10 cd/m^2 , são obtidos a partir de compósitos com concentrações específicas de material condutor e de cerâmica eletroluminescente. Para interpretação destes resultados, desenvolvemos uma rotina computacional para simulação da ocupação volumétrica da camada ativa dos dispositivos pelas fases condutora e eletroluminescente. A partir desta simulação, obtivemos a dependência da distribuição de espessura efetiva da camada isolante em canais não percolados e a fração da área ativa ocupada por canais percolados. Estes parâmetros foram empregados para simulações utilizando o modelo fenomenológico, a partir das quais pudemos determinar a dependência das propriedades eletro-ópticas dos dispositivos em função das concentrações de material condutor e eletroluminescente.

Os resultados de simulação indicaram que os dispositivos com médio e alto desempenho são obtidos com materiais ativos onde a resistência elétrica dos canais percolados e não percolados apresentam magnitudes próximas no regime de operação. Esta condição é obtida apenas para concentrações de cerâmica

eletroluminescente e de material condutor específicas, em conformidade com aquelas obtidas experimentalmente.

8 Bibliografia

[1] DESTRIAU, M. M. G.; PERRIN, M. J.. Electroluminescence. – Luminescence dans les champs electriques et phenomenes electroniques dans les semi-conducteurs. Comptes Rendus des Seances de L`academie des Sciences, v. 208, p. 36-37, 1939.

[2] DESTRIAU, M. M. G.; LOUDETTE, G. Phosphorescence. – Influence du champ eletrique sur la forme des bandes d`emission en electroluminescence. Comptes Rendus des Seances de L`academie des Sciences, v. 208, n. 20, p. 5169-1571, 1939

[3] RACK, P.D.; HOLLOWAY, P.H. The structure, device physics, and material properties of thin film electroluminescent displays, Material Science and Engeneering R, v. 21, p. 171, 1998

[4] BURROUGHES, J.; JONES, C.; FRIEND, R. New semiconductor device physics in polymer diodes and transistors. Nature, v.335, n. 8, p. 137–141, 1988

[5] AYDOGAN, S.; SAGLAM, M; TURUT, A. The temperature dependence of current-voltage characteristics of the Au/Polypyrrole/p-Si/Al heterojunctions. Journal of Condensated Matter, v. 18, p. 2665-2676, 2006

[6] ASSADI, A.; SVENSSON, C.; WILLANDER, M.; INGANAS, O. Properties of the planar poly(3octylthiophene)/aluminium Schottky barrier diode. Journal of Applied Physics. V. 72, p. 2900-2906, 1992

[7] GUPTA, R. K.; SINGH, R. A. Junction properties of Schottky diodes based on composite organic semiconductors: polyaniline-polystyrene system. Journal of Polymer Research, v. 11, p. 269-²⁷³, 2004

[8] BADE, S.G.R.; *et al.*, Stretchable light-emitting diodes with organometal-Halide-perovskite–Polymer composite emitters, Adv. Mater., v. 29, p. 1607053, 2017

[9] HUANG, C.; HUANG, S.; LIU, M.M. Hybridization of CsPbBr_{1.5}I_{1.5} perovskite quantum dots with 9,9-dihexylfluorene co-oligomer for white electroluminescence, Org. Electron., v. 44, p. 6–10, 2017

[10] PEI, Q. *et al.* Polymer light-emitting electrochemical cells. Science, v.269, p. 1086–1088, 1995

- [11] GOZZI, G.; CHINAGLIA, D. L.; T.F. Schmidt ; OLIVEIRA JR, O. N. . Charge Injection in an LED with a Hybrid Composite as the Emissive Layer. *Materials Science & Engineering. C, Biomimetic Materials, Sensors and Systems*, v. C 31, p. 969-974, 2011
- [12] GOZZI, G. A study of the electroluminescence mechanism in a light-emitting composite produced with PEDOT:PSS, PVA and $\text{Zn}_2\text{SiO}_4\text{:Mn}$. *Optical Materials*, v. 84, p. 843-851, 2018
- [13] MYERS, R.; WAGER, J.F. Transferred charge analysis of evaporated ZnS:Mn alternating-current thin-film electroluminescent devices. *J. Appl. Phys.*, v. 81 p. 506-510, 1997
- [14] OUYANG, X.; KITAI, A.H.; XIAO, T. Electroluminescence of the oxide thin film phosphors Zn_2SiO_4 and Y_2SiO_5 . *J. Appl. Phys.* v. 79, p. 3229-3234, 1996
- [15] COLUCCI, R; et. al. Cross-linked PEDOT: PSS as an alternative for low-cost solution-processed electronic devices, *Synthetic Metals*, v. 241, p. 47–53, 2018
- [16] FERES, F.H.; SANTOS, L.F.; GOZZI, G. Temperature and Electric Field Influence on the Electrical Properties of Light-Emitting Devices Comprising PEDOT:PSS/GPTMS/ $\text{Zn}_2\text{SiO}_4\text{:Mn}$ Composites. *MRS Advances*, v. 3, n. 33, p. 1883-1889, 2018
- [17] CHAKRADHAR, R.P.S., NAGABHUSHANA, B.M., CHANDRAPPA, G.T., RAMESH, K.P. & RAO, J.L. Solution combustion derived nanocrystalline $\text{Zn}_2\text{SiO}_4\text{:Mn}$ phosphors:A spectroscopic view *J. Chem. Phys.* 121, 10250-10259, 2005
- [18] BENFENATI, V.; TOFFANIN, S.; BONETTI, S.; TURATTI, G.; PISTONE, A.; CHIAPPALONE, M.; SAGNELLA, A.; STEFANI, A.; GENERALI, G.; RUANI, G. A transparent organic transistor structure for bidirectional stimulation and recording of primary neurons. *Nature Materials*, Nature Publishing Group, v. 12, n. 7, p. 672–680, 2013
- [19] DIAO, Y.; TEE, B. C.; GIRI, G.; XU, J.; KIM, D. H.; BECERRIL, H. A.; STOLTENBERG, R. M.; LEE, T. H.; XUE, G.; MANNSFELD, S. C. Solution coating of large-area organic semiconductor thin films with aligned single-crystalline domains. *Nature Materials*, Nature Publishing Group, v. 12, n. 7, p. 665–671, 2013
- [20] KIM, B.-G.; JEONG, E. J.; CHUNG, J. W.; SEO, S.; KOO, B.; KIM, J. A molecular design principle of lyotropic liquid-crystalline conjugated polymers with

directed alignment capability for plastic electronics. *Nature Materials*, Nature Publishing Group, v. 12, n. 7, p. 659–664, 2013

[21] MESTA, M.; CARVELLI, M.; VRIES, R. J. D.; EERSEL, H. V.; HOLST, J. J. V. D.; SCHÖBER, M.; FURNO, M.; LÜSSEM, B.; LEO, K.; LOEBL, P. Molecular-scale simulation of electroluminescence in a multilayer white organic light-emitting diode. *Nature Materials*, Nature Publishing Group, v. 12, n. 7, p. 652–658, 2013

[22] DUONG, D. T.; TUCHMAN, Y.; CHAKTHANONT, P.; CAVASSIN, P.; COLUCCI, R.; JARAMILLO, T. F.; SALLEO, A.; FARIA, G. C. A universal platform for fabricating organic electrochemical devices. *Advanced Electronic Materials*, Wiley Online Library, v. 4, n. 7, p. 1800090, 2018

[23] FARIA, G. C.; DUONG, D. T.; SALLEO, A.; POLYZOIDIS, C. A.; LOGOTHETIDIS, S.; RIVNAY, J.; OWENS, R.; MALLIARAS, G. G. Organic electrochemical transistors as impedance biosensors. *Mrs Communications*, Cambridge University Press, v. 4, n. 4, p.189–194, 2014

[24] SACCARDO, MATHEUS COLOVATI. Desenvolvimento de filmes transparentes condutores baseados em PEDOT. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2017

[25] NARDES, A. M. On the conductivity of PEDOT:PSS thin films. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2007

[26] LATESSA, G., BRUNETTI, F., REALE, A., SAGGIO, G., & DI CARLO, A. Piezoresistive behaviour of flexible PEDOT:PSS based sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 139(2), 304–309, 2009

[27] OKUZAKI, H., SUZUKI, H., & ITO, T. Electrically driven PEDOT/PSS actuators. *Synthetic Metals*, 159(21-22), 2233–2236, 2009

[28] OKUZAKI, H., TAKAGI, S., HISHIKI, F., & TANIGAWA, R. Ionic liquid/polyurethane/PEDOT:PSS composites for electro-active polymer actuators. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 194, 59–63, 2014

[29] KWON, I. W., SON, H. J., KIM, W. Y., LEE, Y. S., & LEE, H. C. Thermistor behavior of PEDOT:PSS thin film. *Synthetic Metals*, 159(12), 1174–1177, 2009

[30] SCHMIDT V H, LEDIAEV L, POLASIK J AND HALLENBERG J. Piezoelectric actuators employing PVDF coated with flexible PEDOT-PSS polymer electrodes *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 13 1140–8, 2006

[31] LANG, U., RUST, P., & DUAL, J. Towards fully polymeric MEMS: Fabrication and testing of PEDOT/PSS strain gauges. *Microelectronic Engineering*, 85(5-6), 1050–1053, 2008

[32] RANJUSHA, R., SAJESH, K. M., ROSHNY, S., LAKSHMI, V., ANJALI, P., SONIA, T. S., BALAKRISHNAN, A. Supercapacitors based on freeze dried MnO₂ embedded PEDOT: PSS hybrid sponges. *Microporous and Mesoporous Materials*, 186, 30–36, 2014

[33] ÁVILA-NIÑO J A et al. Organic low voltage rewritable memory device based on PEDOT:PSS/f-MWCNTs thin film *Org. Electron.* 13 2582–8, 2012

[34] LEVERMORE P A et al. High efficiency organic light-emitting diodes with PEDOT-based conducting polymer anodes *J. Mater. Chem.* 18 4414–20, 2008

[35] MATYBA, P., YAMAGUCHI, H., CHHOWALLA, M., ROBINSON, N. D., & EDMAN, L. Flexible and Metal-Free Light-Emitting Electrochemical Cells Based on Graphene and PEDOT-PSS as the Electrode Materials. *ACS Nano*, 5(1), 574–580, 2010

[36] TAIT J G et al Spray coated high-conductivity PEDOT:PSS transparent electrodes for stretchable and mechanically-robust organic solar cells *Solar Energy Mater. Solar Cells* 110 98–106, 2013

[37] GUO F et al 2015 Fully printed organic tandem solar cells using solution-processed silver nanowires and opaque silver as charge collecting electrodes *Energy Environ. Sci*, 2015

[38] K. SUN, S. ZHANG, P. LI, Y. XIA, X. ZHANG, D. DU, F.H. ISIKGOR, J. OUYANG, *J. Mater. Sci.* 26, 4438, 2015

[39] CHAUHAN, R. N., ANAND, R. S., & KUMAR, J. Structural, electrical and optical properties of radio frequency sputtered indium tin oxide thin films modified by annealing in silicon oil and vacuum. *Thin Solid Films*, 556, 253–259, 2014

[40] CRACIUN, V., MARTIN, C., SOCOL, G., TANNER, D., SWART, H. C., BECHERESCU, N., & CRACIUN, D. Optical properties of amorphous indium zinc oxide thin films synthesized by pulsed laser deposition. *Applied Surface Science*, 306, 52–55, 2014

[41] DE JONG, M. P., VAN IJZENDOORN, L. J., & DE VOIGT, M. J. A. Stability of the interface between indium-tin-oxide and poly(3,4-

ethylenedioxythiophene)/poly(styrenesulfonate) in polymer light-emitting diodes. *Applied Physics Letters*, 77(14), 2255–2257, 2000

[42] CARR, O., GOZZI, G., SANTOS, L. F., FARIA, R. M., & CHINAGLIA, D. L. Analysis of the electrical and optical properties of PEDOT:PSS/PVA blends for low-cost and high-performance organic electronic and optoelectronic devices. *Translational Materials Research*, 2(1), 015002, 2015

[43] COLUCCI, R., QUADROS, M. H., FERES, F. H., MAIA, F. B., DE VICENTE, F. S., FARIA, G. C., FUGIKAWA-SANTOS, L., GOZZI, G. Cross-linked PEDOT: PSS as an alternative for low-cost solution-processed electronic devices. *Synthetic Metals*, 241, 47–53, 2018

[44] IKUSHIMA, K., JOHN, S., ONO, A., & NAGAMITSU, S. PEDOT/PSS bending actuators for autofocus micro lens applications. *Synthetic Metals*, 160(17-18), 1877–1883, 2010

[45] OUYANG, J., XU, Q., CHU, C.-W., YANG, Y., LI, G., & SHINAR, J. On the mechanism of conductivity enhancement in poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate) film through solvent treatment. *Polymer*, 45(25), 8443–8450, 2004

[46] KIM, J. Y., JUNG, J. H., LEE, D. E., & JOO, J. Enhancement of electrical conductivity of poly(3,4-ethylenedioxythiophene)/poly(4-styrenesulfonate) by a change of solvents. *Synthetic Metals*, 126(2-3), 311–316, 2002

[47] PETTERSSON, L. A. ., GHOSH, S., & INGANÄS, O. Optical anisotropy in thin films of poly(3,4-ethylenedioxythiophene)–poly(4-styrenesulfonate). *Organic Electronics*, 3(3-4), 143–148, 2002

[48] N. MOTT, E. A. DAVIS, *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials*, Clarendon Press, Oxford, 1979

[49] J P. THIYAGARAJAN et al, *J. Electrochem. Soc.* 154 H297-H303, 2007

[50] KÜMMEL, U., KRAUTZ, E., & KNÜTTER, R. Thermoluminescence of Zn₂SiO₄: Mn. *Physica Status Solidi (a)*, 11(1), 181–187, 1972

[51] JIANG, Y., CHEN, J., XIE, Z., & ZHENG, L. Syntheses and optical properties of α - and β -Zn₂SiO₄: Mn nanoparticles by solvothermal method in ethylene glycol–water system. *Materials Chemistry and Physics*, 120(2-3), 313–318, 2010

[52] SIVAKUMAR, V., LAKSHMANAN, A., KALPANA, S., SANGEETHA RANI, R., SATHEESH KUMAR, R., & JOSE, M. T. Low-temperature synthesis of $\text{Zn}_2\text{SiO}_4\text{:Mn}$ green photoluminescence phosphor. *Journal of Luminescence*, 132(8), 1917–1920, 2012

[53] AN, J.-S., NOH, J. H., CHO, I.-S., ROH, H.-S., KIM, J. Y., HAN, H. S., & HONG, K. S. Tailoring the Morphology and Structure of Nanosized $\text{Zn}_2\text{SiO}_4\text{:Mn}^{2+}$ Phosphors Using the Hydrothermal Method and Their Luminescence Properties. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(23), 10330–10335, 2010

[54] BERTAIL, C., MARON, S., BUISSETTE, V., LE MERCIER, T., GACON, T., & BOILOT, J.P. Structural and Photoluminescent Properties of $\text{Zn}_2\text{SiO}_4\text{:Mn}^{2+}$ Nanoparticles Prepared by a Protected Annealing Process. *Chemistry of Materials*, 23(11), 2961–2967, 2011

[55] NAEIMI, A., ARABI, A. M., & MERAJIFAR, V. A novel approach to the synthesis of $\text{Zn}_2\text{SiO}_4\text{:Mn}$ luminescent nanoparticles. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019

[56] KWON, M. S., KIM, C. J., PARK, H. L., KIM, T. W., & LEE, H. S. Sol–gel synthesis and green luminescence of nanocrystalline $\text{Zn}_2\text{SiO}_4\text{:Mn}$ phosphor. *Journal of Materials Science*, 40(15), 4089–4091, 2005

[57] RAMAKRISHNA, P. V., MURTHY, D. B. R. K., SASTRY, D. L., & SAMATHA, K. Synthesis, structural and luminescence properties of Mn doped $\text{ZnO/Zn}_2\text{SiO}_4$ composite microphosphor. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 129, 274–279, 2014

[58] MIYATA, T., MINAMI, T., SAIKAI, K., & TAKATA, S. Zn_2SiO_4 as a host material for phosphor-emitting layers of TFEL devices. *Journal of Luminescence*, 60-61, 926–929, 1994

[59] BARTHOLOMEW, C. Mn^{2+} Concentration Effect on the Optical Properties of $\text{Zn}_2\text{SiO}_4\text{:Mn}$ Phosphors. *Journal of The Electrochemical Society*, 141(2), 524, 1994

[60] CHANG, I. F. Refinement of Zinc Silicate Phosphor Synthesis. *Journal of The Electrochemical Society*, 136(11), 3532, 1989

[61] KLASKA, K.-H., ECK, J. C., & POHL, D. New investigation of willemite. *Acta Crystallographica Section B Structural Crystallography and Crystal Chemistry*, 34(11), 3324–3325, 1978

[62] ZHANG, Q. , PITA, K., & KAM, C. Sol–gel derived zinc silicate phosphor films for full-color display applications. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 64(2), 333–338, 2003

[63] G. GOZZI et al., “Electric characterization of a hybrid composite based on POMA/P(VDF-TrFE)/Zn₂SiO₄:Mn using impedance spectroscopy,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 39, no. 17, pp. 3888–3894, 2006

[64] GALINDO, L. A., GOZZI, G., FUGIKAWA-SANTOS, L., FARIA, R. M., LAVARDA, F. C., & BATAGIN-NETO, A. *Investigation of the polymer-salt interactions in polymeric light emitting electrochemical cells: Electronic structure calculations and experimental studies. Organic Electronics*, 105629, 2020

[65] FERES, FLÁVIO HENRIQUE. *Fabricação e caracterização de dispositivos eletroluminescentes produzidos com compósitos*. 2017. 47 f. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Física) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2017

[66] COLUCCI, R., FARIA, G. C., SANTOS, L. F., & GOZZI, G. On the charge transport mechanism of cross-linked PEDOT:PSS films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019.