

RESSALVA

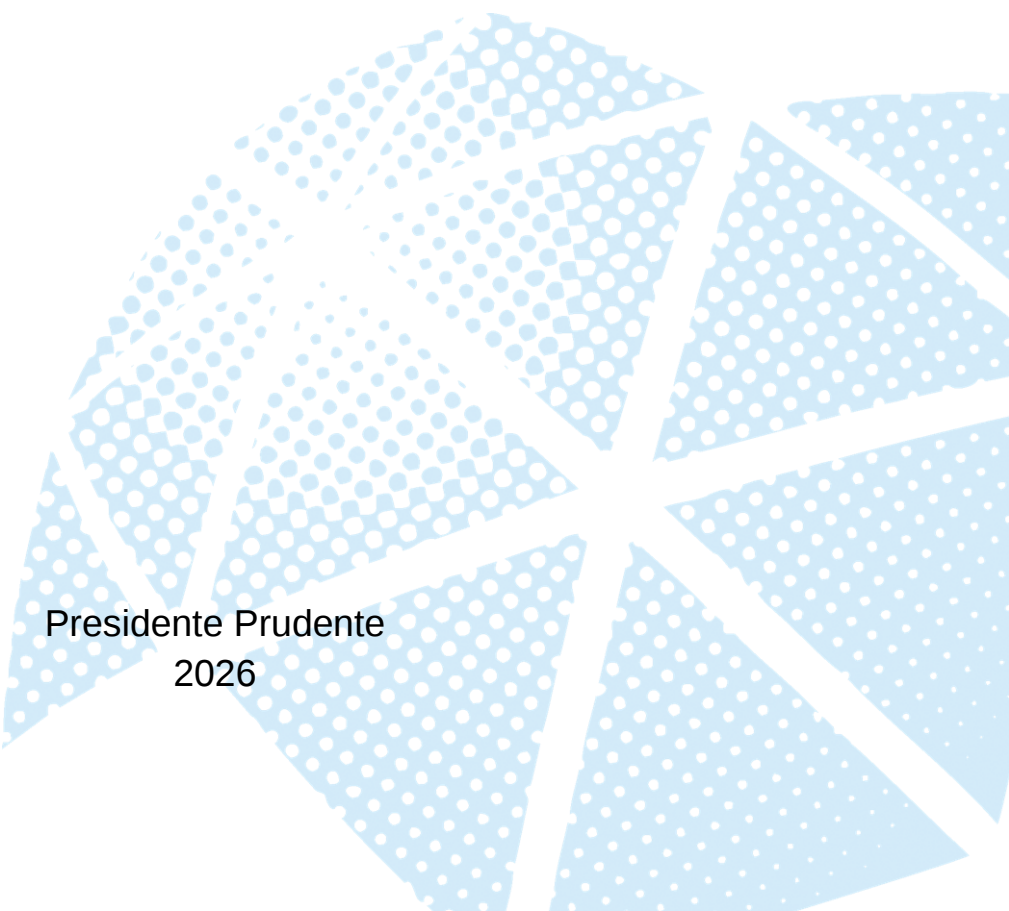
Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta tese
será disponibilizado somente a partir
de 12/02/2027.

**Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Faculdade de
Ciências e Tecnologia – UNESP/FCT
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais
(POSMAT)**

Douglas Henrique Vieira

**Desenvolvimento de transistores verticais de efeito de
campo com eletrólito no *gate* para fotodetectores UV**

Presidente Prudente
2026



Douglas Henrique Vieira

**Desenvolvimento de transistores verticais de
efeito de campo com eletrólito no *gate* para
fotodetectores UV**

Tese de doutorado apresentada
como requisito do Programa de
Pós-graduação em Ciência e
Tecnologia de Materiais
(POSMAT) para conclusão do
curso de doutorado em Ciência e
Tecnologia de Materiais pela
Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho” –
Faculdade de Ciências e
Tecnologia, sob a orientação do
Prof. Dr. Neri Alves.

Presidente Prudente
2026

V658d

Vieira, Douglas Henrique

Desenvolvimento de transistores verticais de efeito de campo com eletrólito no gate para fotodetectores UV / Douglas Henrique Vieira.

-- Presidente Prudente, 2026

181 p. : il., tabs., fotos

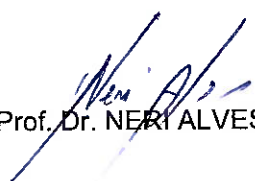
Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente

Orientador: Neri Alves

1. Fotodetectores. 2. Transistores Verticais. 3. Eletrônica impressa.
I. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE DOUGLAS HENRIQUE VIEIRA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CÂMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE.

Aos 12 de fevereiro de 2026, às 14h, no(a) Anfiteatro II, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de DOUGLAS HENRIQUE VIEIRA, intitulada "Desenvolvimento de transistores verticais de efeito de campo com eletrólito no gate para fotodetectores UV". A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. NERI ALVES (Orientador(a) - Participação Presencial) do(a) Pró-reitoria de Planejamento Estratégico e Gestão / UNESP / Reitoria - RUNESP, Prof. Dr. MARCELO MULATO (Participação Presencial) do(a) Departamento de Física / UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, Profa. Dra. CLARISSA DE ALMEIDA OLIVATI (Participação Presencial) do(a) Departamento de Física / UNESP / Câmpus de Presidente Prudente - FCT, Prof. Dr. GREGÓRIO COUTO FARIA (Participação Presencial) do(a) Instituto de Física de São Carlos / Universidade de São Paulo, Prof. Dr. CARLOS CÉSAR BOF BUFON (Participação Presencial) do(a) Departamento de Física / UNESP / Câmpus de Rio Claro - IGCE, Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. NERI ALVES

À minha amada esposa Maria Cecília Fonçatti
e à minha mãe Gracinda Gamboa Vieira,
dedico.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus.

Agradeço também a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para realização dessa tese, seja diretamente pela colaboração com os resultados de pesquisa, ou indiretamente com apoio, palavras de incentivo e motivação. Em especial:

- À minha família, expresso minha mais profunda gratidão. À minha amada esposa, Maria Cecília Fonçatti, agradeço pelo amor, compreensão e incentivo. Ao meu pai, Henrique Alves Vieira, e à minha mãe, Gracinda Gamboa Vieira, pelo exemplo de trabalhadores para me inspirar. Às minhas irmãs, Meire, Michelle e Daniela, agradeço pelo apoio e carinho;

- O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2020/12282-4, com período de Bolsa Estágio de Pesquisa no Exterior (BEPE). Processo nº 2023/06645-5. Portanto, agradeço à FAPESP pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa. As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade do autor e não necessariamente refletem a visão da FAPESP;

- Estendo também meus agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Instituto Nacional de Eletrônica Orgânica (INEO) pelo suporte à pesquisa científica ao LaDSOr, sem o qual este trabalho não teria encontrado o mesmo ambiente propício ao seu desenvolvimento;

- Ao meu orientador, amigo e padrinho de casamento, Prof. Dr. Neri Alves pela confiança depositada em meu trabalho, pelos bons conselhos e pelas inúmeras discussões que envolveram muita transmissão de conhecimento;

- Ao Prof. Dr. Rodrigo Martins por supervisionar meu período de BEPE e ao Prof. Dr. Emanuel Carlos pela colaboração nesse período. Ambos permitiram ampliar minha visão do mundo, juntamente com todos os amigos do CENIMAT:I3N;

- À banca examinadora de qualificação e de defesa, agradeço pelos pelo tempo dedicado à leitura e avaliação deste trabalho e os comentários construtivos, que contribuíram de forma significativa para o seu aprimoramento;

- À todos os amigos do LaDSOr pela boa convivência, colaboração e por tantos bons momentos que colecionamos nessa trajetória, como também com todos os professores e colegas de departamento;

- Aos colaboradores e colegas de pesquisa, deixo meu reconhecimento pelas contribuições científicas, pelo ambiente colaborativo e pelas oportunidades de aprendizado compartilhado. Em especial, agradeço pelas oportunidades de visitas técnicas e colaborações estabelecidas na UFPR, UEL e no LNNano (Proposal 20220935, 20220937, 20221087), que foram decisivas para o amadurecimento deste trabalho, seja pelo acesso a infraestrutura de ponta, seja pelas trocas científicas e humanas que ali ocorreram.

- Ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais (POSMAT) e a FCT/UNESP, pela oportunidade de realizar esse doutorado.

Resumo

VIEIRA, D. H. **Desenvolvimento de transistores verticais de efeito de campo com eletrólito no gate para fotodetectores UV**. 2026. 181p. Tese (Doutor em Ciência e Tecnologia de Materiais)- Unesp, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2026.

Os transistores constituem elementos fundamentais dos circuitos eletrônicos, desempenhando funções como amplificação de sinal e chaveamento de circuitos. No contexto da eletrônica alternativa, há demanda por transistores que combinem propriedades como impressão em larga escala, flexibilidade, transparência e integração funcional em aplicações não convencionais, incluindo embalagens inteligentes e peças de adornos. Nesse contexto, transistores de efeito de campo com eletrólito no *gate* (EGTs) têm se destacado pela elevada capacitância de dupla camada elétrica e operação em baixas tensões, enquanto arquiteturas verticais permitem reduzir o comprimento do canal a escalas nanométricas e aumentar a densidade de corrente. A combinação dessas estratégias resulta nos transistores verticais de efeito de campo com eletrólito no *gate* (EGVFETs), uma arquitetura promissora para fotodetecção UV eficiente. Esta pesquisa investigou EGVFETs por meio do estudo de suas camadas constituintes (eletrodo intermediário, semicondutor e eletrólito) a partir de dispositivos análogos (resistores, diodos, capacitores MES/MIS e EGTs planares) como plataformas de teste para elucidar mecanismos de transporte, efeitos interfaciais e respostas optoeletrônicas sob UV. Para garantir que esse dispositivo não cause um grande impacto ambiental, usou-se materiais preferencialmente amigáveis ao ambiente e abundantes, que apresentem propriedades como biodegradabilidade e reciclabilidade. Portanto, como semicondutor, utilizou-se o óxido de zinco (ZnO), um semicondutor biodegradável amplamente usado em fotodetectores de radiação UV, o qual foi obtido a partir de um precursor orgânico processado por solução e depositado por spray pirólise ou pela deposição de tintas de nanopartículas por *screen-printing*. Quanto ao eletrólito, foram usados tanto o mel de abelha quanto um eletrólito íon-gel à base de celulose, ambos amigáveis ao meio ambiente. Foram investigados efeitos de memória nos transistores que apresentaram um comportamento típico de memória de armadilha de carga, com um tempo de retenção adequado para aplicações que requerem memórias de curta duração. Em capacitores MES (ITO/eletrodo intermediário/ZnO), observaram-se regimes de depleção e acumulação análogos aos MIS, além de picos de perda compatíveis com estados interfaciais. Além disso, ao explorar a célula de diodo do EGVFET, revelou-se uma relação corrente-tensão predominantemente governada pela corrente limitada por carga espacial (SCLC), enquanto sua célula capacitiva forneceu informações sobre o papel do campo elétrico de *gate* na acumulação de portadores de carga nas perfurações da fonte do dispositivo (eletrodo intermediário). Nossas descobertas lançam luz sobre como o campo elétrico do *gate* orquestra um deslocamento progressivo nos regimes de SCLC, influenciando posteriormente a dinâmica de comutação do transistor. Além disso, EGVFETs com mel no *gate* apresentaram desempenho para emulação de sinapses optoeletrônicas. Ao avaliar as propriedades de transporte e as capacidades optoeletrônicas, foi possível avaliar o potencial dos EGVFETs para fotodetectores UV. De forma complementar, foram investigados transistores sustentáveis em substratos celulósicos (madeira e papel) com a finalidade de produzir dispositivos para aplicações em fotodetectores e simulação de sinapse. Nesta etapa, verificou-se que a nanoestrutura de ZnO é um parâmetro-chave para otimizar sensibilidade e tempos de resposta em fotodetectores UV, consolidando-a como uma plataforma promissora para futura integração em arquiteturas EGVFET de alto desempenho.

Palavras-chave: transistor, eletrólito, ZnO, eletrônica sustentável, fotodetectores.

Abstract

Transistors are fundamental elements of electronic circuits, performing functions such as signal amplification and circuit switching. In the field of alternative electronics, there is a demand for transistors that combine properties such as large-area printability, flexibility, transparency, and functional integration in unconventional applications, including smart packaging and adornment pieces. In this context, electrolyte-gated field-effect transistors (EGTs) have stood out due to their high electric double-layer capacitance and low-voltage operation, while vertical architectures enable the channel length to be reduced to nanometer scales and the current density to be increased. The combination of these strategies results in electrolyte-gated vertical field-effect transistors (EGVFETs), a promising architecture for efficient UV photodetection. This research investigated EGVFETs through the study of their composing layers (intermediate electrode, semiconductor, and electrolyte) using analogous devices (resistors, diodes, MES capacitors, and planar EGTs) as test platforms to elucidate transport mechanisms, interfacial effects, and optoelectronic responses. To ensure that this device does not cause a major environmental impact, materials that are preferably environmentally friendly and abundant, and that exhibit properties such as biodegradability and recyclability, were used. Therefore, zinc oxide (ZnO) was used, a biodegradable semiconductor highly promising for UV radiation photodetectors, obtained from an organic precursor processed in solution and deposited by spray pyrolysis or by depositing nanoparticle inks via screen-printing. As electrolytes, both honey and a cellulose-based ion-gel electrolyte were used, both environmentally friendly. Memory effects were investigated in transistors, that exhibited a typical charge-trap memory behavior, with a retention time suitable for applications requiring short-term memories. In MES capacitors (ITO/electrolyte/ZnO), depletion and accumulation regimes analogous to MIS devices were observed, as well as loss peaks compatible with interfacial states. In addition, by exploring the EGVFET diode cell, a current–voltage relationship predominantly governed by space-charge-limited current (SCLC) was revealed, while its capacitive cell provided valuable information about the role of the gate electric field in the accumulation of charge carriers in the source perforations of the device (intermediate electrode). Our findings shed light on how the gate electric field orchestrates a progressive shift in SCLC regimes, subsequently influencing the transistor switching dynamics. Furthermore, EGVFETs with honey gate showed performance suitable for emulating optoelectronic synapses. By evaluating transport properties and optoelectronic capabilities, it was assessed the potential of EGVFETs for UV photodetectors. Complementarily, sustainable transistors on cellulosic substrates (wood and paper) were investigated with the purpose of producing devices for applications in photodetectors and synapse simulation. At this stage, it was assessed that the ZnO nanostructure is a direct lever to optimize sensitivity and response times in UV photodetectors, consolidating this as a promising platform for future integration into high-performance EGVFET architectures.

Keywords: transistor, electrolyte, ZnO, sustainable electronics, photodetector

Lista de Figuras e Tabelas

Figuras

Figura 1: Eletrólito tipo ion-gel *sticker*, adaptado de ^[69] e d) EGTs fabricados usando mel como eletrólito e produtos alimentares como substrato, adaptado de ^[75].

Figura 2: a) Formação de bandas de energia permitidas e proibidas pela aproximação de $>10^{22}$ átomos. b) Classificação de materiais de acordo com a distância entre as camadas de valência e condução. Elaborada pelo autor.

Figura 3: Diagrama de bandas de energia para um metal e um semiconductor do tipo-*n* antes do contato, separados por vácuo (ausência de transferência de carga). Indicam-se os níveis de energia (E_o, E_F, E_C, E_V), as funções trabalho e a afinidade eletrônica do semiconductor. Elaborada pelo autor.

Figura 4: Diagrama de bandas da junção metal-semiconductor, destacando W , qV_{bi} e $q\phi_b$. Elaborada pelo autor.

Figura 5: a) Diagrama de bandas para uma junção metal-semiconductor em polarização direta e b) em polarização reversa, evidenciando a combinação entre o potencial externo e o potencial interno em cada caso. c) Metal e semiconductor do tipo-*n* separados por vácuo com $q\phi_s > q\phi_m$ e d) diagrama de bandas após o estabelecimento do contato, resultando na formação de um contato ôhmico. Elaborada pelo autor.

Figura 6: Função trabalho de diferentes metais comparados a função trabalho do ZnO. A linha vermelha destaca o nível de energia do ZnO.

Figura 7: a) Curva $I - V$ característica de um diodo Schottky, destacando-se $V_{Turn-on}$. b) Curva $I - V$ do diodo Schottky rerepresentada em escala semi-logarítmica, destacando-se RR . Elaborada pelo autor.

Figura 8: a) circuito equivalente que representa o diodo real como a associação de uma resistência em paralelo e outra em série com o diodo ideal. b) Curva $I - V$ de um diodo Schottky com dois diferentes valores de fator de idealidade. Adaptado de ^[106]. c) Curva $I - V$ em escala semi-logarítmica de um diodo Schottky (preto), e as influências da resistência em série (vermelho) e da resistência em paralelo (azul).

Figura 9: Mecanismos de fotogeração em uma junção metal-semiconductor: i) efeito fotoelétrico, ii) efeito fotovoltaico, iii) fotocondutividade. Elaborado com base na referência ^[113].

Figura 10: Ilustração de diodos Schottky nas arquiteturas: a) planar, b) vertical e c) vertical com eletrodo superior perfurado. Elaborado pelo autor.

Figura 11: Ilustração representando a arquitetura típica de um capacitor MIS em secção transversal. Adaptada de ^[124].

Figura 12: Tensão versus tempo, sendo a curva de rampa de tensão DC resolvida no tempo em vermelho e a curva de fonte da tensão AC, que acompanha a rampa de tensão, em azul. Adaptado de ^[126].

Figura 13: Curva de capacitância versus tensão característica de um capacitor MIS, identificando seus regimes de operação. *Inset:* circuito equivalente ilustrando que a capacitância total do capacitor MIS é a soma em série das capacitâncias do isolante e da depleção no semiconductor. Elaborado pelo autor.

Figura 14: a) circuitos equivalentes representando os regimes de acumulação e depleção em um capacitor MIS. Fonte: ^[130]. b) curva de tensão versus tempo, sendo a tensão DC constante em preto e a curva de fonte da tensão AC, que acompanha a tensão DC, em azul. Adaptado de ^[126].

Figura 15: Curva simulada por meio do software Mathcad apresentando a capacitância real e a perda dielétrica em função da frequência para um capacitor MIS em acumulação. Elaborada pelo autor.

Figura 16: a) Diagrama de bandas de um capacitor MIS utilizando um semiconductor tipo-*n* com estados interfaciais. b) Circuitos RC (série e paralelo). Adaptada de ^[124].

Figura 17: Ilustração das quatro estruturas possíveis para FETs planares: a) *bottom-contact, bottom-gate*, b) *bottom-contact, bottom-gate*, c) *top-contact, bottom-gate* e d) *top-contact, top-gate*. Elaborado pelo autor.

Figura 18: Curvas características de transistores: a) curva de saída e b) curva de transferência. Elaborada pelo autor com base em ^[136].

Figura 19: Ilustração dos regimes linear, não linear e de saturação, com as equações correspondentes, distribuição de carga no canal e a forma da curva de saída. Fonte: ^[139].

Figura 20: Comparação de arquiteturas de transistores. a) transistor planar, b) arquitetura vertical, c) transistor vertical com padrão de grade e d) transistor vertical com eletrodos de nanofios. Adaptado de ^[155] e ^[117].

Figura 21: a) Acúmulo de cargas nas perfurações do eletrodo intermediário, adaptado de ^[155]; b) Canal 3D formado na célula ativa do VFET, adaptado de ^[10]; c) Princípios físicos do funcionamento do VFET, adaptado de ^[160]; d) Distribuição de densidade de carga sobreposta na estrutura VFET obtida via COMSOL, adaptado de ^[160].

Figura 22: a) Representação do efeito carga-imagem, adaptado de ^[157], b) curva de saída de um transistor vertical, adaptado de ^[162].

Figura 23: Corte transversal de um EGT e a diferença entre o EDLT e ECT. Elaborado pelo autor com base em ^[124].

Figura 24: Diagramas de energia representando os regimes de acumulação e de depleção nos EDLTs e ECTs. Adaptado de ^[29].

Figura 25: a) Fotografia do arranjo experimental usado para deposição por spray, com indicação de alguns de seus principais componentes. Fonte: ^[172]. b) Ilustração do processo de deposição por spray. Fonte: ^[173].

Figura 26: Ilustração da deposição por *screen-printing* usando duas telas distintas, a primeira para a impressão de eletrodos interdigitados e a segunda para a deposição da camada semicondutora. Fonte: ^[83].

Figura 27: a) Curva de calibração da irradiância do LED com 355 nm. b) espectro de emissão do LED.

Figura 28: Representação dos eletrodos interdigitados de ITO sobre o substrato de vidro. Adaptado de ^[173].

Figura 29: Ilustrações dos dispositivos que são contraparte dos transistores de efeito de campo em arquitetura planar e em arquitetura vertical. Elaborado pelo autor.

Figura 30: Etapas de fabricação do EGT. a) Eletrodos interdigitados de ITO (fonte e dreno) sobre vidro; b) Resistor ITO/ZnO/ITO fabricado utilizando ZnO depositado por spray pirólise; c) Eletrólito fixado sobre o resistor; d) Fixação do eletrodo de PET/ITO (*gate*) sobre o eletrólito. Adaptado de ^[190].

Figura 31: Ilustração da fabricação do EGVFET por spray coating e uma representação em corte transversal desse dispositivo de modo a facilitar a compreensão do empilhamento das camadas que o compõe. Adaptado de ^[191].

Figura 32: HGT e WGT fabricados sobre um mesmo substrato para análise pareada. Adaptado de ^[192].

Figura 33: Ilustração da deposição por *screen-printing* da camada de ZrO_2 sobre CNT-papel, com foto da amostra em destaque. b) Ilustração do transistor ITO/ZnO/ ZrO_2 /CNT-papel. Adaptado de ^[173].

Figura 34: Ilustração de um EGT fabricado em madeira usando mel como eletrólito. Adaptado de ^[83].

Figura 35: Imagens de MEV das camadas que compõe o resistor usado como dispositivo teste, sendo elas: a) eletrodos de ITO, e b) filme de ZnO. c) Medidas de espessura por perfilometria de seis diferentes amostras de ZnO. As linhas vermelhas tracejadas indicam as espessuras médias.

Figura 36: a) Difractograma de Raio X (XRD) identificando os principais picos de orientação cristalográfica.

Figura 37: a) Representação esquemática do resistor ITO/ZnO/ITO em secção transversal. b), c), d), e) e f) mostram curvas $I - V$ em varredura dupla e escala semi-logarítmica exibindo três ciclos para cada uma de cinco amostras fabricadas. *Inset*: curva de $I - V$ em escala linear.

Figura 38: Caracterização elétrica do dispositivo ITO/ZnO/ITO em diferentes atmosferas: ambiente, vácuo e nitrogênio. a) $I - V$ em escala semi-logarítmica, b) $I - V$ em escala linear, c) resistência média versus atmosfera.

Figura 39: Curvas $I - V$ para a amostra resistiva ITO/ZnO/ITO conforme preparada (sem a presença do eletrólito) e após o acoplamento do eletrólito sobre a camada de ZnO. *Inset*: visão transversal do resistor conforme preparado e após a aplicação do eletrólito, juntamente com a curva $I - V$ em escala linear.

Figura 40: a) Capacitância e perda dielétrica versus da frequência em $V_{DC} = 0$. As linhas contínuas representam a resposta ideal de um capacitor MIS clássico, modelado pelo circuito equivalente apresentado no detalhe do *inset*. Os pontos experimentais correspondem aos valores medidos de capacitância e perda em capacitores MES à base de ZnO. b) Ajuste utilizando CPE.

Figura 41: a) Curva de capacitância versus tensão ($C - V$) do capacitor MES medida a 1000 Hz. b) Curvas de $C - V$ em diferentes frequências. O *inset* ilustra esquematicamente a formação da dupla camada elétrica (EDL) na estrutura do dispositivo. c) Curvas de Mott-Schottky do capacitor MES em diferentes frequências. d) Concentração de portadores de carga (N_D) em função da frequência.

Figura 42: Dependência da perda com a frequência sob polarização direta crescente. Os picos observados em baixas frequências resultam da resposta dos estados interfaciais. O gráfico em *inset* ilustra como o valor máximo do pico de perda se desloca com o aumento da tensão direta.

Figura 43: Efeito da exposição à luz UV na capacitância e na perda do capacitor MES à base de ZnO. a) Diagrama de bandas ilustrando os diferentes caminhos para os portadores fotogerados. b) Comparação entre o espectro de capacitância no escuro e induzido pela luz. c) Efeitos da luz no espectro de perda. d) Efeitos induzidos pela luz representados em um gráfico de Cole-Cole.

Figura 44: a) Curvas de transferência no escuro e sob UV-355 nm com diferentes níveis de irradiância sobre o EGT fabricado utilizando a arquitetura MIS. b) As correntes de fuga correspondentes.

Figura 45: Efeito da irradiância UV na resposta de EGTs à base de ZnO. a) I_{DS} versus irradiância em $V_{GS} = 0,5$ V, para dispositivos iluminados com luz de 355 nm em diferentes níveis de irradiação. b) Deslocamento no V_{TH} do transistor sob irradiação. c) Gráfico de Mott-Schottky e deslocamento de VFB em capacitores MES à base de ZnO no escuro e sob iluminação (luz UV de 355 nm).

Figura 46: a) Capacitância versus tensão registrada no capacitor MES à base de ZnO sob níveis crescentes de irradiância. b) Dependência da capacitância de acumulação do capacitor MES e da corrente do transistor em relação ao logaritmo do nível de irradiância. c) $(C_{UV} - C_{escuro})/C_{escuro}$ em função da tensão para diferentes níveis de irradiância. d) Linearização de $(C_{UV} - C_{escuro})/C_{escuro}$ em função da irradiância.

Figura 47: a) Três curvas de transferência em varredura dupla do EGT baseado em ZnO e b) sua correspondente corrente de fuga.

Figura 48: a) Curvas de transferência em varredura dupla para os estados inicial, procedimento de escrita e três *runs* sequenciais; b) curvas de transferência de varredura dupla para os estados inicial, programado e apagado; c) suas respectivas correntes de fuga.

Figura 49: Curvas de saída mensuradas no estado inicial e no estado programado do EGT. Histerese horária.

Figura 50: Curvas de transferência em varredura dupla para o estado inicial, apagado, procedimento de escrita e três *runs* sequenciais de seis transistores de memória diferentes.

Figura 51: Deslocamento da tensão de *threshold* para a varredura direta e reversa em função do número de runs, considerando a *run* #0 como a curva de transferência inicial.

Figura 52: Curva de retenção do transistor de memória ITO/ZnO/eletrólito/ITO nos estados ligado e desligado, mantendo $V_{DS} = 1$ V fixo, em a) $V_{GS} = 0$ V, em b) $V_{GS} = +0,1$ V e c) uma estimativa do tempo necessário para que o estado programado alcance o valor do estado apagado.

Figura 53: a) Capacitância versus frequência do capacitor MIS nos estados programado e apagado. b) Capacitância versus frequência do canal no estado programado e apagado.

Figura 54: a) Topografia por imagem de AFM dos filmes de AgNW depositados por spray sobre o ZnO. b) Perfil de espessura da amostra AgNW/ZnO adquirido a partir do AFM.

Figura 55: a) Curvas $I - V$ do diodo Schottky ITO/ZnO/AgNW. b) Gráfico de $I - V$ em escala log-log. Três regiões de transporte de carga são identificadas (atribuídas aos diferentes valores de m). c) Esquema ilustrando o diodo no regime de SCLC. d) Esquema ilustrando o diodo no regime de TF-SCLC.

Figura 56: a) Corrente versus tensão ($I - V$) em escala semi-logarítmica, dependentes da temperatura, do dispositivo ITO/ZnO/ITO na faixa de 77 a 300 K. b) Curva da corrente em função da temperatura ($I - T$) em escala semi-logarítmica. c) Curvas de corrente versus tensão em escala linear, comparando as medidas em temperatura ambiente e em baixa temperatura, destacando o deslocamento da corrente em torno de zero.

Figura 57: Análise das propriedades do diodo Schottky ITO/ZnO/AgNW. a) Curvas $I - V$ em escala linear, dependentes de T , na faixa de 50 a 300 K. *Inset*: tensão $V_{Turn-on}$ versus $1000/T$. b) Curvas $I - V$ reapresentadas em escala semi-logarítmica e em ambas polarizações. c) Correntes direta e reversa em função da temperatura para $V = \pm 1$ V. d) Razão de retificação (RR) em função da temperatura. *Inset*: linearização em escala log-log.

Figura 58: Análise da inclinação diferencial (m) do diodo Schottky ITO/ZnO/AgNW. a) m em função da tensão para diferentes temperaturas, e b) m versus $1000/T$, juntamente com dois ajustes lineares utilizados para obter kT_T .

Figura 59: Fator de idealidade e altura da barreira Schottky em função da temperatura para o diodo Schottky ITO/ZnO/AgNW.

Figura 60: Altura da barreira Schottky aparente e fator de idealidade aparente devido à inhomogeneidade de altura de barreira em função de $q/2kT$ para o diodo Schottky ITO/ZnO/AgNW, juntamente com seus respectivos ajustes lineares.

Figura 61: a) Curvas de saída do EGVFET em diferentes V_{GS} de 0 a 2 V. b) Representação do dispositivo por um circuito equivalente, destacando suas células do diodo e capacitiva. c) Resistência diferencial versus V_{DS} . *Inset*: ampliação na faixa

de 1,0 a 1,5 V. d) Gráficos de $dV/d\ln I$ e $H(I)$ versus corrente analisados usando o método de Cheung. e) Gráfico de $F(V)$ versus tensão analisado usando o método de Norde.

Figura 62: a) Curva de transferência e de $I_{DS}^{1/2} - V_{GS}$ do EGVFET. b) Vista da seção transversal 2D de uma única perfuração de tamanho D , e a formação do I_{off} sobre o eletrodo de AgNW, c) a formação do canal em túnel quando D é nanométrico e d) a formação do canal impulsionado pela borda quando D é micrométrico.

Figura 63: a) Curvas de saída em escala log-log para diferentes V_{GS} . b) $m - V_{DS}$ para diferentes V_{GS} , destacando as regiões de comportamento ôhmico ($m = 1$) e SCLC ($m = 2$).

Figura 64: a) Ilustração da medida elétrica sob UV. Avaliação do mecanismo de transporte do EGVFET em termos de suas b) curvas de saída para diferentes irradiâncias UV e c) $m - V_{DS}$ para diferentes irradiâncias.

Figura 65: Ilustração esquemática da arquitetura do EGVFET e do diagrama de bandas do ZnO. Os mecanismos de transferência de carga são esboçados considerando a) $V_{GS} = 0$ no escuro, b) $V_{GS} > 0$ no escuro e c) $V_{GS} = 0$ sob radiação UV.

Figura 66: a) Curvas de saída, b) curvas de transferências e c) curva de corrente de fuga sob radiação UV com diferentes irradiâncias.

Figura 67: a) Razão de retificação (RR) e I_{luz}/I_{escuro} extraídas das curvas de saída sob diferentes irradiâncias UV. b) I_{on}/I_{off} e I_{luz}/I_{escuro} estimados das curvas de transferência sob diferentes irradiâncias UV.

Figura 68: a) Curva de I_{DS} versus tempo pulsando um LED de $\lambda = 355$ nm em ciclos de 30 segundos ligado, 30 segundos desligado, adquirida no EGVFET. b) destaque em um pulso de liga/desliga, exibindo os dados experimentais e as curvas resultantes de ajustes exponenciais de decaimento e de crescimento.

Figura 69: a) Curvas de saída em varredura dupla do WGT e b) curvas de saída de varredura dupla do HGT. Acima das curvas é apresentado uma vista lateral dos transistores e a polarização utilizada.

Figura 70: Curvas de transferência para seis WGTs e seis HGTs fabricados de forma pareada. A curva em vermelho destaca a corrente de fuga da transferência.

Figura 71: Curvas de $\sqrt{I_{DS}} - V_{GS}$ em varredura dupla do a) WGT e do b) HGT. c) Comparação entre as curvas de $H(\%)$ em varredura dupla para os transistores com *gate* de água e de mel. d) Comparação do desempenho dos EGTs com os *gate* de água e de mel: I_{on}/I_{off} , $H(\%)$, $\mu_s C_i$, g_m , SS e $\Delta|V_{TH}|$.

Figura 72: Transistores verticais usando mel. a) Arquitetura dos dispositivos junto com fotos. b) Imagens de AFM do AgNW e do CNT. c) Curvas de saída e d) curvas de transferência.

Figura 73: a) Curvas $I - V$ do diodo ITO/ZnO/AgNW (*drop-casting*) obtidas em 15 varreduras cíclicas consecutivas. b) Curvas $I - V$ após a deposição de mel sobre o dispositivo (sem conexão de *gate*), c) Corrente em função do tempo sob polarização constante em $V = 1$ V (direta) e $V = -1$ V (reversa).

Figura 74: Evolução dos parâmetros do diodo ITO/ZnO/AgNW (*drop-casting*) em função do número de ciclos. a) Fator de idealidade e altura de barreira Schottky. b) Resistência em série estimada pelas duas equações de Cheung. c) Razão de retificação, calculada em $V = \pm 0,5$ V.

Figura 75: a) Curvas de saída do HGVFET. b) curvas de corrente de fuga de saída do mesmo dispositivo. c) curva de transferência, d) curva de corrente de fuga, e) ilustração da tensão de *input* e da corrente de saída retificada na presença de um diodo Schottky, f) curva de I_{DS} versus tempo com $V_{GS} = 0$ e V_{DS} alternando entre +1 e -1 V ao longo de cinco ciclos de uma excitação sinusoidal.

Figura 76: a) Curva de saída do HGVFET fotodetector com célula diodo ITO/ZnO/AgNW (*drop-casting*), medidas com $V_{GS} = 0$ e sob diferentes irradiância UV. b) Corrente de fuga do mesmo dispositivo; no *inset*: dependência do PDCR com a irradiância incidente. c) $I_{DS} - t$ sobre pulsos pareados de luz UV com diferentes *dutys*. d) $I_{DS} - t$ sobre trem de 10 pulsos. Inset: percentual de PPF index versus *duty*.

Figura 77: a) Ilustração em seção transversal do transistor. Imagens de MEV de: b–c) eletrodo de CNT-papel; d–e) nanopartículas do dielétrico de ZrO_2 depositadas por *screen-printing*; e f) grãos da camada ativa de ZnO.

Figura 78: Caracterização elétrica das três configurações de transistores. a,d,g) Representações esquemáticas de cada configuração, indicando quais amostras foram colocadas em contato sob pressão mecânica; b,e,h) Curvas de saída; c,f,i) Curvas de transferência juntamente com as respectivas correntes de fuga (linhas tracejadas), medidas em $V_{DS} = 1$ V, para cada configuração.

Figura 79: Curva de capacitância em função da tensão ($C - V$) do capacitor MIS ZnO/ ZrO_2 /CNT-papel medida em $f = 1$ kHz (*inset*: conexões elétricas).

Figura 80: a) Ilustração do processo de realocação da estrutura ZrO_2/CNT -papel entre duas amostras. b) Curvas médias de transferência e de corrente de fuga, com barras de erro ponto a ponto, obtidas a partir de 12 amostras diferentes utilizando o mesmo dielétrico/gate. c) Parâmetros dos transistores extraídos das características de transferência, apresentados com seus respectivos desvios-padrão.

Figura 81: Curvas de transferência individuais dos 12 dispositivos medidos utilizando o mesmo dielétrico/gate de ZrO_2/CNT -papel, juntamente com o respectivo gráfico de $\sqrt{I_{DS}} - V_{GS}$.

Figura 82: $I - t$ sobre aplicação (contato mecânico) e a liberação de pressão (perda de contato).

Figura 83: Caracterização dinâmica e cíclica dos transistores $\text{ITO}/\text{ZnO}/\text{ZrO}_2/\text{CNT}$ -papel. a) $I - t$ sob pulsos de V_{GS} ; b) ampliação de um intervalo de 5 s da curva $I - t$; c) Pulso único em escala linear evidenciando os tempos de subida e decaimento; d) 50 curvas de transferência e de fuga em varredura dupla. Avaliação das principais métricas do transistor em função do número de ciclos: e) I_{on}/I_{off} e I_{on}/I_{GS} ; f) g_m e V_{TH} ; e g) μ_s e SS .

Figura 84: Caracterização estrutural da madeira: a) Difractogramas de raio X identificando as atribuições da rede cristalina encontradas para cada pico de difração e b) espectro de FTIR exibindo bandas de absorção características. c) Deposição de filmes de carbono por *screen-printing* sobre os substratos de madeira junto com fotos das amostras impressas. d) Deposição de filmes de ZnO (nanopartículas) sobre os eletrodos. e) Deposição do mel por *drop-casting* sobre o ZnO juntamente de fotos do dispositivo final e uma representação em vista lateral para identificar a sequência de deposição.

Figura 85: a) Fotografia de um eletrodo de carbono impresso por *screen-printing* sobre madeira, mostrando a geometria utilizada para a medida de efeito Hall. b) Resistência de folha e c) mobilidade Hall do eletrodo de carbono nas folhas de madeira de mukali e beech. As barras de erro foram determinadas utilizando cinco amostras. Imagens de MEV dos eletrodos de carbono impressos por *screen-printing* sobre d) mukali, e) beech.

Figura 86: a) Fotografia de uma folha de madeira ao lado de uma representação esquemática de uma árvore. Imagens de MEV de b) madeira de mukali, c) diâmetro das fibras tubulares, d) poros nos vasos da madeira, e) cobertura de ZnO-NP sobre a madeira (borda do filme), f) centro do filme de ZnO-NP, g) vista ampliada das nanopartículas, e h) secção transversal da madeira/ZnO-NP mostrando a espessura do semiconductor.

Figura 87: Capacitância do mel em função da frequência, com pontos pretos representando os dados experimentais e a linha contínua vermelha correspondendo ao ajuste. *Inset:* circuito equivalente utilizado para o ajuste, uma ilustração da amostra do capacitor usada na medição da impedância e o diagrama de Nyquist.

Figura 88: a) Curva de saída do transistor à base de madeira. b) Comparação da forma de saída sob duas condições: $V_G = 0$ e $V_G = 5,0$ V, incluindo um ajuste linear para determinar a resistência no estado ligado. c) Curvas de transferência e corrente de fuga do transistor à base de madeira.

Figura 89: Reprodução das curvas de transferência e corrente de fuga de transistores fabricados em madeira.

Figura 90: Curvas de transferência e corrente de fuga do transistor em madeira em diferentes a-b) taxas de varredura, d-e) intervalo de varredura e g-h) número de ciclos. *Inset:* transferência na escala linear. SS , largura de histerese e corrente ligada versus c) taxa de varredura, f) intervalo de varredura e g) número de ciclos.

Figura 91: Ilustração de uma sinapse biológica entre dois neurônios, destacando o mecanismo de geração da corrente pós-sináptica excitatória (EPSC).

Figura 92: a) I_{DS} e V_G versus tempo em $V_{DS} = 1$ V e $f = 1$ mHz, obtidos do transistor em madeira. b) Ajuste dos tempos de subida e decaimento no primeiro ciclo $I_{DS} - t$.

Figura 93: a) EPSC desencadeada por um único pulso com amplitude de 5 V e largura de pulso de 80 ms. b) Ilustração dos transistores impressos sobre o substrato de madeira, indicando a conexão utilizada para as medições com pulso no gate. c) EPSC desencadeada por diferentes trens de pulsos a 5 V, com largura de pulso de 800 ms e frequência de 1 Hz. *Inset:* linearização de A_N com o número de pulsos.

Figura 94: a) Medida de corrente pós-sináptica excitatória (EPSC) e da corrente pós-sináptica inibitória (IPSC) em um transistor sináptico à base de madeira durante a potenciação e depressão. b) EPSC em função do tempo, plotado sob pulsos com diferentes tensões de gate para ilustrar a transição de STP para LTP.

Figura 95: a) Ilustração dos pulsos de tensão com largura variável em uma frequência fixa, utilizados para medições da saída pós-sináptica. b) Gráfico de EPSC em função do tempo sob pulsos com larguras variando de 100 a 800 ms, com um período de tempo fixo, $f = 1$ Hz e $V_{DS} = 1$ V. c) Gráfico de A_N/A_I em função da largura do pulso, juntamente com um ajuste.

Figura 96: a) Representação de um filtro passa-alto. b) EPSC versus tempo sob pulsos com diferentes frequências, de 250 mHz a 1 Hz, com um período de tempo fixo e $V_{DS} = 1$ V. c) A_N/A_I e d) Ganho de EPSC (A_{20}/A_I) em função da frequência. e) Curva de aprendizado-esquecimento-reaprendizado-esquecimento.

Figura 97: a) Representação do transistor de ZnO fabricado por *screen-printing*. Imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do substrato de papel kraft. Imagens de MEV de diferentes filmes de nanoestruturas de ZnO impressos por *screen-printing* sobre substrato de papel: a) nanopartículas, b) nanofios, c) nanoplacas e d) nanoflores.

Figura 98: a) Corrente versus tensão do fotoresistor no escuro e em escala linear. Corrente versus tensão em escala semi-logarítmica no escuro e sob luz UV com diferentes densidades de potência óptica medidas em fotoresistores impressos com camada ativa de: a) nanopartículas, b) nanofios, c) nanoplacas e d) nanoflores. As linhas tracejadas pretas representam as correntes no escuro após recuperação da exposição ao UV.

Figura 99: Acoplamento a) de um dielétrico sólido a superfície de um semiconductor, b) de um eletrólito líquido a um semiconductor, c) de um eletrólito líquido a um semiconductor nanoestruturado. (a-c) Foram inspiradas na referência [374]. Curvas de saída de transistores fabricados com diferentes nanoestruturas de ZnO como camada ativa: d) nanopartículas, e) nanofios, f) nanoplacas e g) nanoflores.

Figura 100: Curvas de transferência e corrente de fuga de transistores fabricados com diferentes nanoestruturas de ZnO: a) nanopartículas, b) nanofios, c) nanoplacas e d) nanoflores. Parâmetros obtidos para os mesmos transistores, sendo em a) subthreshold swing, transcondutância, I_{on}/I_G , I_{on}/I_{off} , e em f) mobilidade, largura de histerese, tensão de threshold e tensão de acionamento.

Figura 101: Reprodução das curvas de transferência e corrente de fuga de transistores fabricados com diferentes nanoestruturas de ZnO.

Figura 102: Curvas de transferência dos transistores sob luz UV com diferentes densidades de potência, utilizando diferentes nanoestruturas de ZnO como camada ativa: a) nanopartículas, b) nanofios, c) nanoplacas e d) nanoflores.

Figura 103: Comparação entre as curvas de transferência iniciais no escuro e as curvas após a recuperação da exposição à luz UV, utilizando as respectivas nanoestruturas: a) nanopartículas, b) nanofios, c) nanoplacas e d) nanoflores.

Figura 104: Gráfico avaliando o impacto das nanoestruturas de ZnO em: a) curvas de fotoresponsividade e b) PDCR, avaliadas em função do potencial óptico.

Figura 105: $I_{DS} - t$ sob 5 pulsos de UV ($\lambda = 365$ nm, $P_d = 29,8$ mW cm⁻²) em fototransistores eletrolíticos polarizados em diferentes V_G (0, -1 e -2 V) fabricados usando ZnO em: nanopartículas, nanoflores, nanoplacas e nanofios.

Figura 106: Fotocorrente avaliada em curvas de I_{DS} versus tempo para fotoresistores e fototransistores fabricados usando ZnO em: nanopartículas, nanoflores, nanoplacas e nanofios.

Figura 107: Tempos de resposta (subida e decaimento) versus tensão de gate para fototransistores fabricados com diferentes nanoestruturas de ZnO: a) nanopartículas, b) nanofios, c) nanoplacas e d) nanoflores.

Figura 108: a) Capa principal da revista Advanced Electronic Materials, publicado em 06/2024 [376]. b) Capa principal da revista Advanced Intelligent Systems, publicado em 02/2025 [377]. Capa principal da revista IEEE Electron Device Letters publicada em 10/2021 [336].

Tabelas

Tabela I: Natureza do contato metal-semiconductor de acordo com suas funções trabalho.

Tabela II: diagrama de bandas de energia e de cargas para o capacitor MIS em diferentes regimes de operação. Elaborado pelo autor.

Tabela III: sumário de materiais com suas respectivas funções e métodos de deposição.

Tabela IV: sumário de dispositivos estudados mostrando suas respectivas configurações em termos de sequência de deposição de materiais.

Tabela V: Variação dos parâmetros do EGT de ZnO para diferentes irradiâncias.

Tabela VI: Comparação dos principais parâmetros do transistor com outros EGTs da literatura.

Tabela VII: Valores encontrados para I_{on}/I_{off} , tensão de *threshold*, *subthreshold swing* e mobilidade para as medidas nos estados inicial, programado e apagado, em varreduras direta e reversa

Tabela VIII: Parâmetros extraídos do diodo ITO/ZnO/AgNW usando os métodos de Cheung e de Norde.

Tabela IX: Resumo dos valores encontrados para os parâmetros extraídos das curvas de saída e de transferência do EGVFET sob radiação UV com diferentes intensidades de P_d .

Tabela X: Figuras de mérito dos fotodetectores obtidas para os fototransistores utilizando diferentes nanoestruturas de ZnO como camada ativa nas condições: $V_{GS} = -1$ V, $V_{DS} = 1$ V.

Tabela XI: Comparando figuras de mérito entre os HGVFETs e o HGT.

Tabela XII: Principais figuras de mérito estimadas da transferência do HGVFET.

Tabela XIII: Resumo dos parâmetros estimados a partir das curvas de transferência e de corrente de fuga dos transistores com diferentes configurações.

Tabela XIV: Comparação entre as figuras de mérito médias dos transistores de ITO/ZnO/ZrO₂/CNT-papel e os valores reportados para outros transistores à base de ZrO₂.

Tabela XV: Atribuições dos picos de FTIR e materiais relacionados na folha de madeira.

Tabela XVI: Valores dos elementos do circuito com seus respectivos percentuais de erro, obtidos a partir do ajuste dos dados de Nyquist utilizando o software ZView.

Tabela XVII: Estado da arte de transistores à base de ZnO, principalmente em substratos derivados de madeira (papel e celulose) e/ou utilizando eletrólito.

Tabela XVIII: Figuras de mérito dos fotodetectores obtidas para os fototransistores utilizando diferentes nanoestruturas de ZnO como camada ativa nas condições: $P_d = 29,8$ mW cm⁻², $V_G = -1$ V, $V_{DS} = 1$ V.

Tabela XIX: Valores das constantes de tempo de decaimento obtidos do ajuste biexponencial de $I_{DS} - t$ para diferentes nanoestruturas de ZnO, juntamente com seus respectivos erros padrões.

Lista de Símbolos e Siglas/Abreviações

LISTA DE SÍMBOLOS:

A – área efetiva;	g_m – transcondutância;
A_{FD} – área do fotodiodo;	g_j – número de estados com energia E_j ;
A_b – absorbância;	G – admitância;
A^* – constante efetiva de Richardson;	h – constante de Planck;
A_{20}/A_1 – ganho sináptico;	I – corrente elétrica;
c – velocidade da luz;	I_{ohm} – corrente elétrica no regime ôhmico;
C – capacitância;	I_s – corrente de saturação;
C_D – capacitância de depleção;	I_{FD} – corrente elétrica no fotodiodo;
C_{dep} – capacitância de depleção profunda;	$I_{reversa}$ – corrente em polarização reversa;
C_i – capacitância do isolante;	I^+ – corrente em polarização direta;
C_{is} – capacitância dos estados interfaciais;	I^- – corrente elétrica no escuro;
C_{DL} – capacitância da dupla camada elétrica;	I_{luz} – corrente elétrica sob iluminação;
C_{FB} – capacitância no regime de flat-band;	I_{escuro} – corrente elétrica medida no escuro;
C_{UV} – capacitância sob iluminação UV;	I_{DS} – corrente elétrica entre fonte e dreno;
CPE – impedância do elemento de fase constante;	$I_{DS,sat} - I_{DS}$ em saturação;
C_{escuro} – capacitância no escuro;	I_{GS} – corrente elétrica entre <i>gate</i> e fonte;
d – espessura do isolante;	I_{on}/I_{off} – razão on/off;
d_s – espessura do semicondutor;	I_{AC} – corrente alternada;
D^* – detectividade;	I_{EDT} – corrente no regime de Mark-Helfrich;
D – profundidade da região de absorção;	I_{SCLC} – corrente no regime de Mott-Gurney;
E – campo elétrico;	j – unidade imaginária;
E_o – energia do nível do vácuo;	J_{on} – densidade de corrente no estado on;
E_F – energia do nível de Fermi;	J_{ph} – densidade de fotocorrente;
E_j – energia de estados;	J_{dark} – densidade de corrente de escuro;
E_c – energia da banda de condução;	k – constante de Boltzmann;
E_V – energia da banda de valência;	L_{eff} – largura efetiva do canal;
E_g – energia de gap;	L_D – comprimento de Debye;
E_e – irradiância espectral;	m^* – massa efetiva;
EQE – eficiência quântica externa;	m – inclinação;
F – função de Fermi;	MW – largura da janela de memória;
$F(V)$ – função de Norde;	n – fator de idealidade;
FF – fator de preenchimento;	n_j – distribuição de Fermi-Dirac;
f – frequência;	V_{TFL} – tensão limite de preenchimento de armadilhas;
f_R – frequência de relaxação;	

n_0 – densidade de portadores livres em equilíbrio;
 n_{ap} – fator de idealidade aparente;
 N_{is} – densidade de estados interfaciais;
 N_a – densidade de aceitadores;
 N_d – densidade de doadores;
 N_{bulk} – densidade de armadilhas de volume;
 p – densidade de buracos livres;
 P_{in} – intensidade do potencial óptico;
 $PDCR$ – *Photo-to-Dark Current Ratio*;
 q – carga elementar do elétron;
 Q_{eff} – carga efetiva;
 Q – carga induzida;
 R – resistência elétrica;
 R_s – resistência em série;
 R_{SH} – resistência em paralelo;
 R_{sheet} – resistência de folha;
 R_{FD} – fotoresponsividade do fotodiodo;
 RR – razão de retificação;
 R_λ – fotoresponsividade;
 R_{dif} – resistência diferencial;
 $R_{contato}$ – resistência de contato;
 R_{canal} – resistência do canal;
 SS – *subthreshold swing*;
 t – tempo;
 t_w – largura de pulso;
 T – temperatura;
 V_{bi} – tensão de *built-in*;
 V – tensão;
 V_D – tensão no diodo;
 V_{FB} – tensão de *flat-band*;
 V_{AC} – tensão alternada;
 $V_{turn-on}$ – tensão de ligação do diodo;
 V_{on} – tensão de ligação do transistor;
 V_{GS} – tensão entre *gate* e fonte;
 V_{DS} – tensão entre dreno e fonte;

V_{TH} – tensão de *threshold*;
 W – largura da camada de depleção;
 W/L – razão comprimento/largura do canal;
 $Z(E,T)$ – função de partição;
 α – coeficiente de absorbância;
 ϵ_i – permissividade do isolante;
 ϵ_o – permissividade do vácuo;
 ϵ_s – permissividade do semiconductor;
 λ – comprimento de onda;
 μ_i – potencial químico;
 μ – mobilidade;
 μ_s – mobilidade de saturação;
 μ_{SCLC} – mobilidade no regime SCLC;
 μ_{Hall} – mobilidade Hall;
 σ – condutividade elétrica;
 σ_0^2 – variância;
 τ – tempo de relaxação dielétrica;
 τ_{rise} – tempo de subida;
 τ_{dec} – tempo de decaimento;
 χ – afinidade eletrônica;
 ρ – densidade espacial de carga elétrica;
 ϕ_{ap} – altura da barreira aparente;
 ϕ_b – altura da barreira Schottky;
 ϕ_m – função trabalho de um metal;
 ϕ_s – função trabalho de um semiconductor;
 ϕ – potencial elétrico;
 ϕ_{sup} – potencial de superfície;
 ∇^2 – operador Laplaciano;
 ω – frequência angular.

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS:

AC – Corrente Alternada;	MES – Metal-Eletrólito-Semicondutor;
AFM – Microscopia de Força Atômica;	MIM – Metal-Isolante-Metal;
AgNW – Nanofios de prata;	MOS – Metal-Óxido-Semicondutor;
CNT – Nanotubos de carbono;	MOSFET – Transistor de Efeito de Campo baseados na estrutura MOS;
CMC – Carboximetilcelulose;	NP – Nanopartículas;
CTM - Memória do tipo Armadilha de Carga;	NW – nanofios;
CSPE – Eletrólito Sólido de Polímero Composto;	NPt – nanoplacas;
DC – Corrente Contínua;	NF – nanoflores;
DI – Deionizada;	PET – Politereftalato de Etileno;
EGT – Transistor Eletrolítico de Efeito de Campo;	P3HT - Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl);
EGVFET – Transistor Eletrolítico Vertical de Efeito de Campo;	PMMA – Polimetilmetacrilato;
EDS – Espectroscopia por Dispersão de Energia;	PSSNa - poly(styrenesulfonic acid sodium salt);
EPSC – corrente pós-sináptica excitatória;	STP - potência de curto prazo;
EDL – Dupla camada elétrica;	STM - memória de curto prazo;
EDLT – Transistor de dupla camada elétrica;	SMJ – Salvo Maiores Juízo;
ECT – Transistor eletroquímico;	SCLC – Corrente Limitada por Carga Espacial;
EMI - 1-ethyl-3-methylimidazolium;	SiO ₂ – Dióxido de Silício;
FET – Transistor de Efeito de Campo;	TFT– Transistor de Filme Fino;
FTIR – Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier;	TFLC – Corrente Limitada por Preenchimento de Armadilhas;
FOM – Figura de Mérito;	TFSI – bis(trifluoromethyl sulfonyl)imide;
HGVFET – Transistor com mel no gate vertical de efeito de campo;	UV – Ultravioleta;
HGT – Transistor com mel no <i>gate</i> ;	VFET – Transistor Vertical de Efeito de Campo;
ITO – Óxido de Índio Dopado com Estanho;	XRD – Espectroscopia de Difração de Raio X;
IGZO – óxido de índio, gálio e zinco;	ZnO – Óxido de Zinco;
LTP – potência de longo prazo;	ZrO ₂ – Óxido de Zircônia;
LTM – memória de longo prazo;	WGT – Transistor com água no <i>gate</i> .
LGT – transistor de <i>gate</i> líquido;	
LED – Diodo Emissor de Luz;	
LiOH – Hidróxido de Lítio;	
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura;	
MIS – Metal-Isolante-Semicondutor;	

Sumário

Capítulo 1: Introdução e Justificativa	20
1.1 A eletrônica impressa e os EGVFETs	20
1.2 EGVFETs à base de ZnO para fotodetecção de radiação UV	22
1.3 Materiais amigos do ambiente para EGVFETs	23
1.4 Substratos Celulósicos e Aplicações Neuromórficas	26
Capítulo 2: Objetivos	28
Capítulo 3: Fundamentação Teórica	29
3.1 Noções Básicas de Teoria de Bandas	29
3.2 Diodo Schottky	30
3.2.1 Junção metal-semicondutor	30
3.2.2 Métodos analíticos de Cheung e Norde	36
3.2.3 Mecanismos de interação entre radiação e diodos Schottky	38
3.3 Capacitor MIS	40
3.4 Transistor de Efeito de Campo	47
3.4.1 Interação do Transistor com a Radiação	52
3.4.2 Transistores Verticais de Efeito de Campo	53
3.4.4 Transistores de Eletrólito no <i>Gate</i>	57
Capítulo 4: Materiais e Métodos	60
4.1. Métodos	60
4.1.1 Deposição por <i>Spray Coating</i>	60
4.1.2 Deposição por <i>screen-printing</i> (serigrafia)	61
4.1.3 Caracterização Elétrica	62
4.1.4 Caracterizações Morfológicas, Estruturais e Ópticas	63
4.2 Materiais	64
4.2.1 Eletrodos de Base	64
4.2.2 Eletrodos Intermediários	64
4.2.3 Eletrodos de Topo	65
4.2.4 Semicondutor	65
4.2.5 Dielétricos e Eletrólitos	66
4.3. Fabricação dos Dispositivos	67
4.3.1 EGT planar	68
4.3.2 EGVFETs	69
4.3.3 HGTs e WGTs planares	69
4.3.4 Transistores com <i>gate</i> reutilizável	70
4.3.5 EGTs em substratos celulósicos	70
Capítulo 5: Resultados e Discussão	72
5.1. Estudo das propriedades de filmes de ZnO e a caracterização elétrica do resistor ITO/ZnO/ITO	72
5.2. Caracterização do capacitor MIS ITO/ZnO/eletrolito e suas implicações para o EGT	77
5.3. Aprofundamento das Propriedades do EGT: Efeito de Memória	87
5.4 Estudo do diodo Schottky que compõe a célula ativa do EGVFET	95
5.5 Estudo das propriedades elétricas dependentes da temperatura	98
5.6 Estudo do mecanismo de transporte no EGVFET	103
5.7 Aplicação do EGVFET como fotodetector	108
5.8 Estudo pareado de EGTs com eletrólitos líquidos: água e mel	113
5.9 HGVFETs e sua aplicação como fotodetector	117
5.10 ZrO ₂ impresso em papel-CNT para transistores com <i>gate</i> reutilizável	124
5.11 Transistores impressos em madeira ecologicamente sustentáveis com potencial para emulação de sinapses artificiais	133
5.12 Fototransistores impressos em papel usando diferentes nanoestruturas de ZnO	147
Capítulo 6: Considerações Finais	159
Capítulo 7: Desempenho acadêmico	162
Referências	170

Capítulo 1: Introdução e Justificativa

1.1. A eletrônica impressa e os EGVFETs

Os transistores representam a espinha dorsal dos circuitos eletrônicos, atuando como componente principal no desempenho de diversas funções, tais como portas lógicas, inversores e amplificadores de sinal. Essas funcionalidades podem ser combinadas simultaneamente a outras, resultando em transistores sensores de gás ^[1,2], fototransistores ^[3–5], transistores emissores de luz ^[6,7], transistores de memória ^[8,9], entre outros. Devido aos avanços na miniaturização de dispositivos eletrônicos, o número de transistores que pode ser integrado em um único chip aumentou aproximadamente de forma exponencial ao longo das últimas décadas, em concordância com a tendência descrita pela Lei de Moore ^[10]. Nesse cenário, existe uma necessidade constante de encurtar o comprimento do canal dos transistores, a fim de compactar um maior número de dispositivos em espaços cada vez mais reduzidos, o que tem se tornado um gargalo, uma vez que as estratégias comumente empregadas para a produção de transistores de canais curtos envolvem técnicas complexas de alto custo, tais como fotolitografia por feixe de elétrons e implantação de íons de alta energia ^[11]. O declínio da Lei de Moore parece ser uma disputa de cabo de guerra entre a física quântica e as limitações impostas pela viabilidade econômica, na qual o transistor desempenha o papel de corda. Esse é o contexto intrínseco à eletrônica contemporânea, alicerçada nos transistores de silício, um material que, em escala nano, pode enfrentar problemas relacionados à eficiência energética e à dissipação de calor ^[12]. Além disso, apesar do silício ser relativamente inerte e não tóxico, determinados processos de fabricação e tratamento de resíduos podem gerar subprodutos que representam riscos ambientais. Por conseguinte, buscam-se materiais alternativos que possuam alto desempenho, capazes de contornar essas questões.

Estima-se que o mercado para a eletrônica alternativa ao silício crescerá para expressivos 74 bilhões de dólares em 2030 ^[13]. Este fato motiva pesquisas visando o desenvolvimento de novos materiais, novas arquiteturas e novos métodos para produzir transistores que, para além de mitigar os problemas do silício, atendam demandas modernas tais como a compatibilidade com circuitos eletrônicos flexíveis, impressos, transparentes e que possam ser integrados em embalagens inteligentes, peças de adorno e vestuário. Destaca-se a eletrônica impressa como uma alternativa que usa técnicas de deposição tão acessíveis quanto a impressão *roll-to-roll* ^[14], amplamente utilizada na produção de jornais, o que lhe confere um forte apelo comercial. É comum se referir à eletrônica impressa como uma solução para a produção de dispositivos eletrônicos de baixo custo. No entanto, em termos de ciência nacional, o aspecto mais importante da eletrônica impressa reside no seu baixo custo de implementação e nas oportunidades de reaproveitamento de infraestrutura existente. Os e-

books e os jornais online conquistaram uma considerável parcela do público anteriormente adepto ao material impresso. Portanto, adaptar o maquinário de impressão usado na indústria gráfica para a produção de dispositivos eletrônicos representa uma estratégia eficaz para redirecionar uma parte dessa indústria, presente em praticamente todas as cidades de pequeno porte.

Ao se propor enfrentar o desafio de produzir transistores impressos, é importante considerar que a eletrônica impressa utiliza materiais semicondutores com baixa mobilidade, que são depositados por métodos de solução, resultando em filmes com morfologia irregular, que muitas vezes apresentam dopagem insatisfatória e, ainda, são depositados sobre superfícies rugosas. Essas condições, frequentemente, levam a dispositivos que operam com altas tensões e com correntes de saída muito baixas, o que se traduz em um desempenho insatisfatório. Em resposta a esses desafios, a família de transistores inclui diferentes arquiteturas e configurações, dentre os quais o transistor vertical de efeito de campo (VFET, *Vertical Field-Effect Transistor*) figura como uma das melhores alternativas de produção de canais curtos por meio de processos bastante econômicos, de modo a compensar questões como baixa mobilidade. Os VFETs são fabricados mediante o empilhamento vertical de camadas condutoras, isolantes e semicondutoras, similar ao empilhamento de um diodo Schottky e um capacitor que compartilham um eletrodo intermediário. Esse design oferece a capacidade de ajustar o comprimento do canal com base na espessura da camada ativa ^[15,16], o que possibilita alcançar elevados valores de densidade de corrente ^[17–19] e alta frequência de operação ^[20–22]. Dispositivos como células solares e LEDs são fabricados com base em uma estrutura vertical, de modo que é natural estender essa configuração para os transistores, pois facilita a integração dos dispositivos durante a fabricação de um circuito totalmente impresso. Ao oferecer escalabilidade e facilidade de integração, o VFET vem sendo reportado em dispositivos emissores de luz ^[23], memórias não voláteis ^[24] e etiquetas de identificação por radiofrequência ^[25].

A permeabilidade do eletrodo intermediário do VFET ao campo elétrico do *gate* constitui uma propriedade importantíssima na fabricação desse dispositivo, pois viabiliza o efeito de campo, fenômeno que regula a condução de corrente elétrica pelo canal. Dentre os materiais mais adequados para desempenhar o papel desse eletrodo, destacam-se os nanofios ^[26], nanotubos ^[27] e materiais bidimensionais (2D) ^[28]. A escolha do material isolante utilizado no *gate* também desempenha um papel importante na operação do dispositivo. Isolantes nanoestruturados eventualmente resultam em baixas capacitâncias, enquanto requerem altas tensões de operação. Outra recente adição à família de transistores, os transistores com eletrólito no *gate* (EGT, *electrolyte-gated transistors*), surgiram com a proposta de justamente enfrentar o desafio de produzir transistores com altas capacitâncias e baixa tensão. A capacitância do eletrólito, geralmente, situa-se na faixa de $1 - 10 \mu\text{F cm}^{-2}$ ^[29]. Essa alta capacitância permite a operação de transistores com tensões tão baixas quanto $V < 0,5 \text{ V}$ ^[30]. Além

disso, os EGTs são mais versáteis em termos de conformação e facilidade de manufatura. É muito mais fácil depositar um eletrólito gel sobre o semiconductor do que obter um filme isolante de alguns nanômetros. Estes aspectos tornam os EGTs compatíveis com a eletrônica impressa e também com a eletrônica vestível, permitindo produzir dispositivos em fios e tecidos ^[31].

Embora os VFETs e os EGTs tenham sido inicialmente projetados separadamente, tem havido um aumento significativo no número de publicações que destacam os benefícios do uso de eletrólitos para melhorar o desempenho dos VFETs. Essa abordagem foi introduzida pela primeira vez (SMJ) em novembro de 2016 por Baby *et al.* ^[15], que desenvolveram o primeiro transistor vertical utilizando impressão a jato de tinta para obter um canal semiconductor de 50 nm e um eletrólito sólido como isolante no *gate*. O dispositivo que combina a arquitetura vertical com o uso de eletrólito é denominado transistor vertical de efeito de campo com eletrólito no *gate* (EGVFET, *Electrolyte-Gated Vertical Field-Effect Transistor*). Embora o EGVFET seja uma proposta recente, já foi capaz de demonstrar operação contínua com densidade de corrente da ordem de MA cm^{-2} ^[32], bem como aplicações em sinapses artificiais multissensoriais ^[33] e uma notável estabilidade em circuitos complementares, com retenção extremamente alta por mais de 50000 ciclos ^[34]. Foi veiculado em janeiro de 2023 um editorial na prestigiada revista *Nature*, ressaltando o uso da arquitetura vertical em transistores com eletrólito no *gate* como alternativa de vanguarda para aprimorar o desempenho da família dos transistores ^[35].

1.2. EGVFETs à base de ZnO para fotodetecção de radiação UV

A aplicação do EGVFET como fototransistor para a detecção de radiação ultravioleta (UV) é justificada não tão somente pela aderência ao estudo visando transistores com boa performance, mas também por duas outras razões: i) os transistores, quando empregados como sensores, oferecem uma gama de parâmetros para múltiplas análises de variáveis que são influenciadas pela radiação UV, como a razão on/off, mobilidade de efeito de campo, transcondutância, tensão de *threshold* e *subthreshold swing*, bem como as figuras de mérito tradicionais para fotodetectores, como fotoresponsividade, eficiência quântica externa (EQE), tempo de resposta e detectividade; e ii) Existe uma importante demanda social em termos de saúde pública para sensores de radiação UV, o que advém do fato de que 95% da radiação ultravioleta proveniente do Sol ter comprimentos de ondas situados na faixa UVA (320 - 420 nm) ^[36] a qual tem capacidade de penetrar profundamente na pele humana, atingindo a derme ^[37]. O interesse por esses sensores é reforçado em países tropicais e subtropicais, pois possuem elevados índices dessa radiação ^[38], como é o caso do Brasil, sendo latitude, altitude, sazonalidade e condições atmosféricas fatores determinantes para intensidade UV. A superexposição em excesso de UVA pode causar uma série de problemas de saúde, incluindo

queimaduras, alterações imunológicas, neoplasias, envelhecimento precoce da pele, danos oculares (incluindo envelhecimento do cristalino) e câncer de pele [37,39–41].

O óxido de zinco (ZnO) é um semicondutor do tipo-*n* (i.e., elétrons como portadores majoritários) transparente que tem mostrado excelentes resultados em aplicações baseadas em transistores e sensores. Devido ao seu largo *bandgap* de 3,35 eV [42], correspondente à um valor de energia no espectro de UVA, o ZnO tem sido amplamente utilizado como fotodetector de radiação UV [43–45], apresentando vantagens como a possibilidade de ser empregado em sensores ecologicamente descartáveis de baixo custo, além de oferecer alta estabilidade [46], e ser usado em aplicações fotocatalíticas [47]. O ZnO pode ser obtido por técnicas de impressão, com destaque para a possibilidade de ser obtido a partir de precursores orgânicos que podem ser processados por solução e depositado por *spray coating* [48]. Um estudo conduzido por Kumar *et al.* [49] evidenciou que transistores com ZnO depositado por *spray coating* são consideravelmente mais sensíveis à radiação UV quando comparados aos que utilizam ZnO depositado por *sputtering*, sob as mesmas condições experimentais. Esse resultado é respaldado por uma alta fotoresponsividade de $3,5 \times 10^4 \text{ A W}^{-1}$ e EQE de $1,27 \times 10^5 \text{ el ph}^{-1}$ [49], indicando que a rota de deposição por *spray* é muito promissora para fototransistores impressos. Ademais, Fortunato *et al.* relataram o primeiro transistor baseado em ZnO produzido completamente em temperatura ambiente, usando oxinitreto de silício como dielétrico, alcançando alta transparência de 84% no espectro visível [50]. O ZnO também se destacou em EGTs [51–53]. Recentemente, os transistores de baixa tensão baseados em ZnO têm atraído muita atenção [54], e um de seus destaques é a capacidade de integração com a tecnologia de silício [55,56], bem como a compatibilidade com técnicas de impressão. Apesar dos avanços reportados na literatura, ainda há uma clara escassez de estudos que explorem a adaptação de EGTs à base de ZnO para arquiteturas verticais voltadas à detecção de radiação UV. Essa configuração é particularmente promissora e tende a viabilizar melhorias significativas nos parâmetros característicos do transistor.

1.3. Materiais amigos do ambiente para EGVFETs

Uma vez que se pretende produzir transistores impressos, é importante que essa proposta seja compatível com uma eletrônica de baixo impacto ambiental, de modo a não repetir e nem agravar as estatísticas de impacto ambiental da tecnologia convencional a base de silício. De acordo com as estatísticas da *Global E-waste Monitor 2024* [57], em 2022 foram produzidas cerca 62 milhões de toneladas de lixo eletrônico, das quais apenas 22,3% foram documentadas como devidamente coletadas e recicladas. As projeções indicam que até 2030 o volume de lixo eletrônico alcançará a marca de 82 milhões de toneladas [57]. O agravante é que grande parte desse lixo contém metais

pesados, como chumbo, cádmio, mercúrio e arsênio, além de materiais plásticos não biodegradáveis à base de petróleo ^[58].

O termo “eletrônica sustentável” refere-se ao desenvolvimento de dispositivos eletrônicos nos quais os danos ambientais sejam mínimos ou desprezíveis. Para alcançar tal condição, exige-se que o processo de fabricação não gere grandes quantidades de lixo, bem como o uso de materiais provenientes de fontes naturais abundantes, materiais de baixa toxicidade e processamento que também não causem danos ao ambiente. Ainda, é importante viabilizar a reciclagem, a reutilização, biodegradação, e/ou descarte ecológico do produto final, reduzindo assim o impacto ambiental ao longo de toda a cadeia de produção. Neste estudo investigamos principalmente, mas não exclusivamente, materiais que sejam biodegradáveis. Isto inclui materiais que, se descartados no ambiente, sofram processos de degradação sem causar danos ou gerar toxidade. Esta concepção de circuitos eletrônicos com um fim de vida pré-determinado e que não requer nenhuma complexidade no tratamento dos resíduos é muito interessante para a gestão do lixo eletrônico.

A busca por transistores sustentáveis catalisou uma reavaliação fundamental dos paradigmas tradicionais de fabricação, revelando uma miríade de novas aplicações e metodologias. Uma das propostas de vanguarda é a eletrônica impressa, que produz dispositivos por meio de processamento aditivo de soluções, reduzindo significativamente o uso de matéria prima e minimizando o consumo de energia durante sua fabricação ^[59–61]. Devido sua reconhecida biodegradabilidade ^[62] e abundância na natureza ^[63], o supracitado ZnO destaca-se como um material para camada semicondutora em um EGVFET que seja compatível com a eletrônica impressa, sustentável e apto para a detecção de radiação UV. No que concerne à camada eletrolítica, destaca-se a viabilidade do uso de materiais à base de papel ou celulose, devido à capacidade do papel de ser 100% reciclável ^[64] e de servir como material para produção de dispositivos leves e flexíveis ^[65–68]. Nessa rota, merecem destaque os eletrólitos à base de hidróxido de lítio (LiOH) incorporados em uma matriz de celulose por serem *eco-friendly* e do tipo *sticker* que têm como característica uma consistência gelatinosa que pode ser cortada em faixas e colocada manualmente na posição de interesse, mantendo boa estabilidade química e térmica ^[69], como ilustrado na **Figura 1a**. Além disso, é interessante explorar materiais de origem alimentar, muitos dos quais são, por natureza, biodegradáveis. O mel, por exemplo, é uma substância natural produzida por abelhas que é facilmente degradável por processos biológicos ^[70], é não tóxico e biocompatível ^[70], e apresenta propriedades antimicrobianas, anti-inflamatórias e antioxidantes ^[71,72]. Possui também excelentes propriedades dielétricas, como uma constante dielétrica tão alta quanto $\epsilon = 40$ ^[73] e a formação de duplas camadas elétricas quando polarizado. Ordonez *et al.* mostraram que o uso do mel como isolante em EGTs de grafeno é uma excelente alternativa para uma rápida determinação da qualidade do grafeno ^[74]. Sharova *et al.* mostraram que

a natureza comestível do mel possibilita a fabricação de transistores comestíveis que podem ser transferidos, tão facilmente quanto um papel de tatuagem, sobre alguns alimentos (maçã e tomate são dados como exemplos) ^[75], como ilustrado na **Figura 1b**. Vale ressaltar que a interface ZnO/mel é muito promissora para dispositivos comestíveis, uma vez que o ZnO é comestível e já foi usado para fazer sensores de PH comestíveis ^[76]. Quanto aos eletrodos permeáveis ao campo elétrico, é relevante mencionar os nanotubos de carbono (CNT, *Carbon NanoTubes*), um composto derivado do carbono que pode ser biocompatível e biodegradável ^[77] e cuja síntese pode seguir por uma rota amiga do ambiente ^[78].

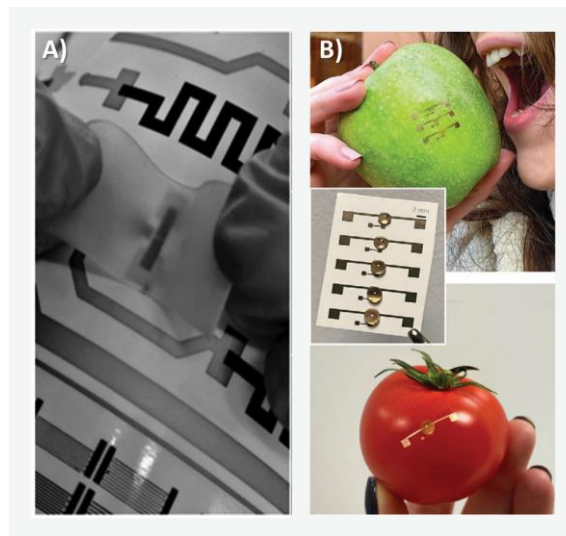


Figura 1: Eletrólito tipo ion-gel *sticker*, adaptado de ^[69] e d) EGTs fabricados usando mel como eletrólito e produtos alimentares como substrato, adaptado de ^[75].

Nessa perspectiva, essa pesquisa teve como proposta produzir e estudar a versão impressa de transistores verticais de efeito de campo com eletrólito no *gate* destinados a aplicações que envolvam exposição à radiação UV. Além dos estudos de um transistor em uma nova configuração e a busca por sua otimização de desempenho, propõe-se compreender a física de suas interfaces e materiais através do estudo das células que os compõe, sendo o transistor vertical composto por uma célula ativa (diodo Schottky) e outra capacitiva (capacitor MIS). Também, integra-se à proposta fabricar transistores planares como critério de comparação e como primeira etapa para avançar para arquiteturas mais sofisticadas. A nossa abordagem visa conciliar a proposta desta pesquisa com os princípios da eletrônica sustentável, priorizando o uso de materiais biodegradáveis e ecologicamente amigáveis. Isso torna parte da nossa pesquisa coerente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 9 e 12, propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU), que versa sobre, respectivamente, à Indústria, Inovação e Infraestrutura e ao Consumo e Produção Responsáveis, tendo como meta a promoção de uma industrialização sustentável e o consumo responsável dos produtos da indústria.

1.4. Substratos Celulósicos e Aplicações Neuromórficas

Durante o período de bolsa BEPE, foi desenvolvido o projeto intitulado “Transistores eletrolíticos produzidos sobre substratos à base de celulose para uma eletrônica sustentável” no Centro de Investigação de Materiais – CENIMAT: i3N da Universidade Nova de Lisboa, sob supervisão do Prof. Dr. Rodrigo Martins, dando destaque a eletrônica sustentável ao produzir transistores usando *screen-printing* em baixas temperaturas, com solventes amigáveis e o uso de substratos celulósicos (diferentes papéis e madeira). Nessa etapa de pesquisa no exterior, também foram desenvolvidas aplicações em fotodetectores e em dispositivos neuromórficos. Este subitem “1.4” trata-se da motivação para o referido projeto, no qual buscamos ampliar o impacto dos transistores estudados, propondo rotas de processamento ainda mais sustentáveis e explorando aplicações em tecnologias emergentes.

Dispositivos impressos são frequentemente desenvolvidos para aplicações de curta duração e, muitas vezes, são descartados logo após o uso, contribuindo para a geração de lixo eletrônico ^[79]. Entre os substratos mais comumente empregados em eletrônica flexível destacam-se a poliimida (Kapton) e o politereftalato de etileno (PET), os quais apresentam desafios de sustentabilidade em razão de seu caráter não biodegradável e da sua origem em combustíveis fósseis, resultando em longa persistência no meio ambiente. Uma alternativa promissora nesse contexto é o uso de substratos derivados de madeira, tais como nanocompósitos de celulose ^[80] ou diferentes tipos de papel ^[81], que não apenas reduzem a dependência de recursos não renováveis, como também favorecem a reciclabilidade dos dispositivos eletrônicos, atenuando, assim, sua pegada ambiental. Esse conceito deu origem a um novo nicho em eletrônica, denominado eletrônica em papel ^[68], que viabiliza a fabricação de dispositivos leves, conformáveis e flexíveis, a baixo custo e com maior facilidade de gerenciamento ao término da vida útil. Cada substrato celulósico exibe um conjunto particular de propriedades, decorrentes tanto de sua composição (proporções relativas de celulose, hemicelulose e lignina) quanto dos tratamentos de superfície empregados (por exemplo, revestimentos à base de cálcio ou revestimentos poliméricos). Essa variabilidade dificulta a obtenção de desempenho consistente entre diferentes substratos, uma vez que influi em parâmetros como rugosidade superficial, capacidade de penetração da tinta e hidrofobicidade. Nesse contexto, o uso direto da madeira como substrato para eletrônica simplifica ainda mais a cadeia de valor, ao eliminar diversas etapas de processamento da celulose, com potencial redução do consumo de energia e dos impactos ambientais associados, enquanto cria oportunidades para integrar funcionalidades inteligentes diretamente em mobiliário de madeira. No que concerne ao uso de madeira como substrato para transistores, o primeiro relato na literatura é atribuído a Tran *et al.* ^[82] publicado em 2023 (SMJ). Na

configuração do dispositivo proposto por esses autores, a modulação de corrente é governada por reações de óxido-redução, resultando em uma razão on/off relativamente baixa, da ordem de 50. Na presente tese, investigamos o desenvolvimento de transistores em madeira que operem por meio de mecanismo de efeito de campo, no qual a acumulação de portadores de carga no canal é controlada por campos elétricos externos, o que pode viabilizar dispositivos com razões on/off significativamente mais altas ^[83].

Uma das aplicações emergentes para os EGTs sustentáveis é a emulação de sinapses artificiais. Por meio de uma vasta rede composta por neurônios (10^{11}) que realizam grandes quantidades de sinapses (10^{15}) ^[84], o cérebro humano opera como um computador biológico altamente eficiente, servindo de inspiração para a computação neuromórfica ^[85]. Transistores sinápticos são capazes de armazenar, transmitir e processar informações simultaneamente ^[84,86] com consumo de energia muito baixo, tornando-se fortes candidatos para superar as limitações da arquitetura de computação do tipo von Neumann, especialmente no que tange ao consumo de potência, latência, eficiência e escalabilidade ^[87]. A principal característica das sinapses é a sua plasticidade, isto é, a capacidade de responder de forma diferenciada a distintos estímulos, como largura de pulso ^[88], frequência ^[89], número de pulsos ^[90] e amplitude do potencial de ação ^[91], entre outros. Essa plasticidade manifesta-se em mudanças transitórias (curto prazo) ou persistentes (longo prazo) no peso sináptico. Nesse contexto, destaca-se o potencial do mel como material funcional para sinapses artificiais, conforme demonstrado por Sueoka *et al.* ^[92] e Tanim *et al.* ^[93]. Esses estudos reportam memristores à base de mel que exibem facilitação neural, plasticidade de curto prazo e capacidades de aprendizado, apontando, assim, para uma possível mudança de paradigma em direção à computação neuromórfica energeticamente eficiente e ambientalmente mais amigável.

Capítulo 6: Considerações Finais

Nesta pesquisa, transistores impressos à base de ZnO foram analisados à luz de dispositivos análogos, de modo a elucidar mecanismos de transporte, efeitos interfaciais e respostas optoeletrônicas para aplicações em arquitetura vertical. Os filmes de ZnO obtidos por spray apresentaram boa qualidade morfológica e estrutural. Sob eletrodos de ITO, observaram-se contatos essencialmente ôhmicos, com o dispositivo resistivo exibindo condutividade da ordem de 10^{-4} S m^{-1} . Verificou-se ainda elevada sensibilidade do transporte à atmosfera (O_2 , N_2 , vácuo), atribuída à adsorção/dessorção de oxigênio, a qual modulou a resistência sem induzir retificação. A deposição de eletrólito sobre o resistor introduziu não linearidades na condutância, associadas à polarização interfacial, e ao acoplamento eletrostático não uniforme.

O capacitor MES impresso com base de ITO/ZnO exibiu comportamento semelhante ao de seu análogo MIS, com regimes de depleção e acumulação. A resposta capacitiva revelou picos de perda compatíveis com a presença de estados interfaciais. Sob iluminação UV, constatou-se deslocamento de V_{FB} , indicando a população de estados profundos por portadores fotogerados, consistente com as variações observadas em V_{TH} nos EGTs de ZnO. Além disso, a corrente de saída do transistor e a capacitância do MES apresentaram dependências semelhantes com a irradiância, evidenciando que o capacitor MES atua simultaneamente como plataforma de caracterização de estados e como transdutor capacitivo para detecção de UV.

Nos EGTs ITO/ZnO/eletrólito/ITO, verificou-se operação em baixas tensões e efeito de memória associado a armadilhas de carga. Procedimentos de escrita/apagamento promoveram armadilhamento/desarmadilhamento, com modulação de I_{on}/I_{off} e de V_{TH} . Em seguida, diodos Schottky ITO/ZnO/AgNW foram empregados como célula ativa na arquitetura EGVFET. A caracterização elétrica indicou transporte termicamente ativado e barreira Schottky levemente inomogênea, com corrente seguindo uma lei de potência com a tensão e transição entre condução ôhmica, TFLC e SCLC livre de armadilhas, os quais são gradualmente suprimidos para condução ôhmica pela tensão de *gate* na arquitetura de EGVFET. Comutação semelhante foi observada sob iluminação UV, atribuída à redução da altura de barreira, embora decorrente de mecanismos físicos distintos. Os parâmetros extraídos para o dispositivo vertical indicaram operação adequada para eletrônica e potencial para fotodetecção, em razão da alta responsividade e de tempos de resposta satisfatórios.

No estudo pareado entre mel e água como eletrólitos em EGTs, apresentou-se uma rota mais sustentável para eletrônica impressa. Ambos os dispositivos exibiram histerese não nula: com água,

histerese horária, atribuída ao aprisionamento de portadores no ZnO e com mel, histerese anti-horária, associada à baixa mobilidade de difusão iônica e/ou à orientação de dipolos elétricos. O transistor com mel, HGT, apresentou influência desprezível de corrente de fuga no estado desligado ($H(\%) \ll 1\%$), sendo selecionado para prosseguir com a fabricação do dispositivo em arquitetura vertical (HGVFET). Foram fabricados HGVFETs com eletrodos de CNT e de AgNW (spray e *drop-casting*), destacando-se o dispositivo com AgNW obtido por *drop-casting*. Nas curvas de saída/transferência, observou-se supressão do caráter retificador em direção a um comportamento mais ôhmico com o aumento de V_{GS} , efeito que é analogamente reproduzido ao se variar a irradiância UV sobre o dispositivo. A resposta à excitação com função senoidal indicou potencial para aplicações em circuitos e pulsos UV geraram transientes de fotocorrente com facilitação por pulsos pareados (PPF), sugerindo aplicabilidade em optoeletrônica neuromórfica, atribuída à dinâmica de armadilhas, à fotocondutividade e à polarização lenta do *gate* eletrolítico.

Durante o período BEPE, foram fabricados transistores ITO/ZnO/ZrO₂/CNT-papel, cuja estrutura ZrO₂/CNT-papel mostrou-se reutilizável, com bom desempenho e excelente reprodutibilidade após múltiplos ciclos, além de flexibilidade mecânica e potencial de adaptação a outras arquiteturas, favorecendo aplicações em eletrônica flexível e conformável. Sob estresse elétrico (medidas repetidas de transferência e ciclos de pulsos no *gate*), a operação permaneceu estável, sem degradação significativa das figuras de mérito. Também foi explorado o uso de madeira como substrato para EGTs na configuração C/ZnO/mel/Au. As curvas de transferência indicaram que é possível ajustar a janela de memória e a amplitude da corrente via taxa de varredura e janela de operação. O dispositivo emulou com eficiência comportamentos sinápticos (transição de STM para LTM) associados à formação/dissipação de EDL, apresentou EPSC modulável por parâmetros dos pulsos (tensão, número, largura e frequência), exibiu resposta do tipo filtro passa-alto e reproduziu o processo aprender–esquecer–reaprender–esquecer, com materiais ambientalmente amigáveis e técnicas de impressão.

Por fim, realizou-se um estudo comparativo de fototransistores eletrolíticos impressos em papel kraft empregando diferentes nanoestruturas de ZnO (nanopartículas, nanofios, nanoplacas e nanoflores). Imagens de MEV evidenciaram morfologias e empacotamentos distintos, com impacto direto na área superficial, contornos de grão e ordenamento. Os fototransistores exibiram modulação eficiente para todas as nanoestruturas, com histerese anti-horária cuja largura dependeu fortemente da morfologia. Sob UV, nanopartículas e nanoplacas produziram maiores fotocorrentes em depleção, nanoflores, apesar da alta mobilidade, mostraram menor incremento de I_{DS} com irradiância, sugerindo recombinação em contornos de grão. Após recuperação no escuro, nanoplacas e nanoflores retornaram melhor às características iniciais, enquanto nanopartículas e nanofios mantiveram I_{off}

elevado por fotocondutividade persistente associada a armadilhas. A comparação entre fotoresistor e fototransistor indicou que os fototransistores fornecem maiores correntes e acrescentam controle por *gate* sobre amplitude e tempos de resposta (subida/decaimento), permitindo ajustar recombinação e dissipação de cargas. Nanofios tenderam aos menores tempos de resposta e nanoflores aos maiores, reforçando que o “design” nanoestrutural do ZnO é uma alavanca direta para otimizar sensibilidade, estabilidade e dinâmica em fotodetectores UV impressos em papel. Os resultados obtidos com os EGTs em substratos celulósicos indicam que esses dispositivos constituem uma plataforma promissora para futura integração em arquiteturas verticais, com potencial de operação como EGVFETs fotodetectores.

Do ponto de vista do estágio em que esta pesquisa se encerra, identificam-se oportunidades para o desdobramento de novas investigações no grupo, que deem continuidade à linha de pesquisa. Entre elas, a que mais se destaca é a produção de transistores verticais em papel, por representar uma evolução natural da arquitetura proposta voltada à sustentabilidade. Esse avanço, contudo, pode ser desafiador, uma vez que requer a deposição contínua e reproduzível de múltiplas camadas sobrepostas em substratos porosos, podendo acarretar problemas de inomogeneidade de barreira dentre outros, necessitando de engenharia adequada das interfaces e dos contatos para reduzir resistências parasitas e minimizar correntes de fuga. Outro tema interessante para ser explorado é o efeito de tratamentos interfaciais, voltados à passivação e à uniformização das interfaces, sobre o desempenho dos transistores, com o objetivo de melhorar o acoplamento elétrico entre as camadas e mitigar a influência de estados interfaciais e de oxigênio adsorvido, que podem afetar os processos de injeção e extração de carga (exemplos: tratamento de UV-ozônio e plasma, tratamentos térmicos, adição de monocamadas auto-organizadas). Também se vê oportunidade para produção de mel sintético, uma vez que essa estratégia pode oferecer vantagens significativas em relação ao mel natural, especialmente quanto ao controle da composição e à reprodutibilidade experimental, possibilitando identificar com maior precisão quais espécies iônicas e moleculares são responsáveis pelos comportamentos observados e, assim, estabelecer relações mais precisas entre composição química e desempenho elétrico.

Referências

- [1] A. Zulkefli, B. Mukherjee, R. Hayakawa, T. Iwasaki, S. Nakaharai, Y. Wakayama, *Phys. Status Solidi - Rapid Res. Lett.* **2020**, 14, 1.
- [2] M. Jang, J. Lee, S. Y. Park, J. Lee, K. M. Lee, W. Song, S. Myung, S. S. Lee, H. K. Jung, Y. C. Kang, S. K. Kwak, K. S. An, *Appl. Surf. Sci.* **2021**, 542, 148704.
- [3] H. Y. Liu, W. L. Yang, S. C. Shih, Y. X. Zheng, *Mater. Sci. Semicond. Process.* **2021**, 123, 105496.
- [4] A. Kadri, H. Ferhati, F. Djeflal, *Sensors Actuators, A Phys.* **2021**, 325, 112701.
- [5] D. H. Vieira, G. L. Nogueira, R. M. Morais, L. Fugikawa-santos, K. F. Seidel, N. Alves, *Sensors Actuators A Phys.* **2022**, 347, 113989.
- [6] R. Capelli, S. Toffanin, G. Generali, H. Usta, A. Facchetti, M. Muccini, *Nat. Mater.* **2010**, 9, 496.
- [7] H. Yu, S. Ho, N. Barange, R. Larrabee, F. So, *Org. Electron.* **2018**, 55, 126.
- [8] D. Hu, G. Zhang, H. Yang, J. Zhang, C. Chen, S. Lan, H. Chen, T. Guo, *IEEE Trans. Electron Devices* **2017**, 64, 3816.
- [9] Y. Ni, Y. Wang, W. Xu, *Small* **2021**, 17, 1.
- [10] H. Kleemann, K. Krechan, A. Fischer, K. Leo, *Adv. Funct. Mater.* **2020**, 30.
- [11] Y. Zou, Y. Shi, B. Wang, M. Liu, J. An, N. Zhang, L. Qi, W. Yu, D. Li, S. Li, *ACS Photonics* **2022**.
- [12] E. Pop, *Nano Res.* **2010**, 3, 147.
- [13] R. Das, X. He, K. Ghaffarzadeh, *IDTechEx Res.* **2020**.
- [14] Y. Gao, M. Asadirad, Y. Yao, P. Dutta, E. Galstyan, S. Shervin, K. Lee, S. Pouladi, S. Sun, Y. Li, M. Rathi, J. Ryou, V. Selvamanickam, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2016**, 8, 29565.
- [15] T. T. Baby, M. Rommel, F. Von Seggern, P. Friederich, C. Reitz, S. Dehm, C. Kübel, W. Wenzel, H. Hahn, S. Dasgupta, *Adv. Mater.* **2017**, 29, 1.
- [16] K. T. Lam, G. Seol, J. Guo, *Appl. Phys. Lett.* **2014**, 105.
- [17] A. Nawaz, L. Mercedes, D. M. de Andrade, D. H. S. de Camargo, C. C. Bof Bufon, *Nat. Commun.* **2020**, 11, 1.
- [18] P. Wang, B. Liu, Y. Shen, Y. Zheng, M. A. McCarthy, P. Holloway, A. G. Rinzler, P. Wang, B. Liu, Y. Shen, Y. Zheng, M. A. McCarthy, P. Holloway, A. G. Rinzler, *Appl. Phys. Lett.* **2012**, 100.
- [19] A. Nawaz, L. Mercedes, L. M. M. Ferro, P. Sonar, C. C. B. Bufon, *Adv. Mater.* **2023**, 2204804.
- [20] J. W. Borchert, B. Peng, F. Letzkus, J. N. Burghartz, P. K. L. Chan, K. Zojer, S. Ludwigs, H. Klauk, *Nat. Commun.* **2019**, 10, 1.
- [21] A. Fischer, R. Scholz, K. Leo, B. Lüssem, *Appl. Phys. Lett.* **2012**, 101.
- [22] F. Giannazzo, G. Fisichella, G. Greco, E. Schilirò, I. Deretzis, R. Lo Nigro, A. La Magna, F. Roccaforte, F. Iucolano, S. Lo Verso, S. Ravesi, P. Prystawko, P. Kruszewski, M. Leszczyński, R. Dagher, E. Frayssinet, A. Michon, Y. Cordier, *Phys. Status Solidi Appl. Mater. Sci.* **2018**, 215, 1.
- [23] Z. Wu, Y. Liu, E. Guo, G. Darbandy, S. J. Wang, R. Hübner, A. Kloes, H. Kleemann, K. Leo, *Nat. Mater.* **2021**, 20, 1007.
- [24] D. Hu, X. Wang, H. Chen, T. Guo, *Adv. Funct. Mater.* **2017**, 27.
- [25] K. Kudo, D. Tsutsumi, H. Yamauchi, S. Kuniyoshi, M. Sakai, *Trans. Mater. Res. Soc. Japan* **2013**, 38, 369.
- [26] L. G. S. Albano, M. H. Boratto, O. Nunes-Neto, C. F. O. Graeff, *Org. Electron.* **2017**, 50, 311.
- [27] B. Liu, M. A. McCarthy, Y. Woon, D. Y. Kim, Z. Wu, F. So, P. H. Holloway, J. R. Reynolds, J. Guo, A. G. Rinzler, *Adv. Mater.* **2008**, 20, 3605.
- [28] Y. Liu, H. Zhou, N. O. Weiss, Y. Huang, X. Duan, *ACS Nano* **2015**, 9, 11102.
- [29] S. H. Kim, K. Hong, W. Xie, K. H. Lee, S. Zhang, T. P. Lodge, C. D. Frisbie, *Adv. Mater.* **2013**, 25, 1822.
- [30] K. F. Seidel, *arXiv* **2019**, 1907.09515.
- [31] M. Hamedi, L. Herlogsson, X. Crispin, R. Marcilla, M. Berggren, O. Inganäs, *Adv.*

- Mater.* **2009**, *21*, 573.
- [32] J. Lenz, F. Giudice, F. R. Geisenhof, F. Winterer, R. T. Weitz, *Nat. Nanotechnol.* **2019**, *14*, 579.
 - [33] G. Liu, Q. Li, W. Shi, Y. Liu, K. Liu, X. Yang, M. Shao, A. Guo, X. Huang, F. Zhang, Z. Zhao, Y. Guo, Y. Liu, *Adv. Funct. Mater.* **2022**, 2200959.
 - [34] W. Huang, J. Chen, Y. Yao, D. Zheng, X. Ji, L. W. Feng, D. Moore, N. R. Glavin, M. Xie, Y. Chen, R. M. Pankow, A. Surendran, Z. Wang, Y. Xia, L. Bai, J. Rivnay, J. Ping, X. Guo, Y. Cheng, T. J. Marks, A. Facchetti, *Nature* **2023**, *613*, 496.
 - [35] C. Cunin, A. Gumyusenge, *Nature* **2023**, *613*, 444.
 - [36] T. ting Wong, K. tak Lau, W. yin Tam, J. Leng, W. Wang, W. Li, H. Wei, *Compos. Struct.* **2015**, *132*, 1056.
 - [37] M. Watson, D. M. Holman, M. Maguire-Eisen, *Semin. Oncol. Nurs.* **2016**, *32*, 241.
 - [38] M. P. Corrêa, P. Dubuisson, A. Plana-Fattori, *Photochem. Photobiol.* **2003**, *78*, 49.
 - [39] Y. Bin Kim, H. J. Ha, J. M. Yun, M. J. Choi, K. Han, S. Kim, S. Park, M. Park, H. Oh, J.-Y. Yoo, S. J. Kang, *Sci. Adv.* **2025**, *11*, eaea7218.
 - [40] P. Juchem, J. Hochrg, A. Winogron, M. Ardenghy, R. English, *Rev. Bras. Cir. Plástica* **1998**, *13*, 31.
 - [41] I. Kim, Y.-Y. He, *Genes Dis.* **2014**, *1*, 188.
 - [42] T. Y. Tiong, C. F. Dee, A. A. Hamzah, B. Y. Majlis, S. Abdul Rahman, *Sensors Actuators, B Chem.* **2014**, *202*, 1322.
 - [43] K. Tantisantisom, K. Jiramitmonkon, T. Jiemsakul, T. Chodjarusawad, U. Asawapirom, *Adv. Mater. Res.* **2015**, *1131*, 157.
 - [44] M. Kumar, Y. Noh, K. Polat, A. Kemal Okyay, D. Lee, *Solid State Commun.* **2015**, *224*, 37.
 - [45] N. Hernandez-Como, G. Rivas-Montes, F. J. Hernandez-Cuevas, I. Mejia, J. E. Molinar-Solis, M. Aleman, *Mater. Sci. Semicond. Process.* **2015**, *37*, 14.
 - [46] A. Pimentel, A. Samouco, D. Nunes, A. Araújo, R. Martins, E. Fortunato, *Materials (Basel)*. **2017**, *10*, 4.
 - [47] S. H. Ferreira, M. Morais, D. Nunes, M. J. Oliveira, A. Rovisco, A. Pimentel, H. Águas, E. Fortunato, R. Martins, *Materials (Basel)*. **2021**, *14*.
 - [48] M. C. Chu, H. C. You, J. S. Meena, S. H. Shieh, C. Y. Shao, F. C. Chang, F. H. Ko, *Int. J. Electrochem. Sci.* **2012**, *7*, 5977.
 - [49] D. Kumar, T. C. Gomes, N. Alves, L. Fugikawa-Santos, G. C. Smith, J. Kettle, *IEEE Sens. J.* **2020**, *20*, 7532.
 - [50] E. Fortunato, A. Pimentel, L. Pereira, A. Gonçalves, G. Lavareda, H. Águas, I. Ferreira, C. N. Carvalho, R. Martins, *J. Non. Cryst. Solids* **2004**, *338–340*, 806.
 - [51] K. Hong, S. H. Kim, K. H. Lee, C. D. Frisbie, *Adv. Mater.* **2013**, *25*, 3413.
 - [52] M. Singh, K. Manoli, A. Tiwari, T. Ligonzo, C. Di Franco, N. Cioffi, G. Palazzo, G. Scamarcio, L. Torsi, *J. Mater. Chem. C* **2017**, *5*, 3509.
 - [53] R. Morais, D. H. Vieira, M. dos S. Klem, C. Gaspar, L. Pereira, R. Martins, N. Alves, *Semicond. Sci. Technol.* **2022**, *37*, 035007.
 - [54] S. Mansouri, R. Bourguiga, F. Yakuphanoglu, *Curr. Appl. Phys.* **2012**, *12*, 1619.
 - [55] T. Varma, C. Periasamy, D. Boolchandani, *Superlattices Microstruct.* **2018**, *114*, 284.
 - [56] W. Wang, K. Li, J. Lan, M. Shen, Z. Wang, X. Feng, H. Yu, K. Chen, J. Li, F. Zhou, L. Lin, P. Zhang, Y. Li, *Nat. Commun.* **2023**, *14*, 1.
 - [57] C. P. Baldé, R. Kuehr, T. Yamamoto, R. Mcdonald, E. D'Angelo, S. Althaf, G. Bel, O. Deubzer, E. Fernandez-Cubillo, V. Forti, V. Gray, S. Herat, S. Honda, G. Iattoni, D. S. Khetriwal, V. L. di Cortemiglia, Y. Lobuntsova, I. Nnorom, N. Pralat, M. Wagner, *The Global E-waste Monitor 2024*, **2024**.
 - [58] R. Nithya, C. Sivasankari, A. Thirunavukkarasu, *Environ. Chem. Lett.* **2021**, *19*, 1347.
 - [59] A. Sudheshwar, V. Beni, N. Malinverno, R. Hischier, Y. Nevo, B. Dhuiège, M. Borrás, A. Chbani, C. Aucher, S. Martinez-Crespiera, F. Eibensteiner, S. Kurzhals, L. Giebelhauser, E. Melnik, G. C Mutinati, A. Fall, C. Aulin, T. Abitbol, C. Som, *Flex. Print. Electron.* **2023**, *8*, 015002.
 - [60] D. Batet, F. Vilaseca, E. Ramon, J. P. Esquivel, G. Gabriel, *Flex. Print. Electron.* **2023**,

8.

- [61] I. Cunha, J. Martins, P. G. Bahubalindrani, J. T. Carvalho, J. Rodrigues, S. Rubin, E. Fortunato, R. Martins, L. Pereira, *Adv. Mater. Technol.* **2021**, 6, 1.
- [62] S. S. K., M. P. Indumathi, G. R. Rajarajeswari, *Int. J. Biol. Macromol.* **2019**, 124, 163.
- [63] N. Lu, C. Zhou, Y. Wang, A. M. Elquist, A. Ghods, I. T. Ferguson, V. G. Saravade, *Proc. SPIE* **2018**, 53.
- [64] P. Barquinha, R. Martins, L. Pereira, E. Fortunato, In *Transparent Oxide Electronics: From Materials to Devices*, John Wiley & Sons, **2012**, pp. 211–266.
- [65] H. E. Nilsson, T. Unander, J. Siden, H. Andersson, A. Manuilskiy, M. Hummelgard, M. Gulliksson, *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.* **2012**, 2, 1723.
- [66] L. Jiang, Z. Tang, R. M. Clinton, D. W. Hess, V. Breedveld, *Cellulose* **2016**, 23, 3885.
- [67] S. K. Mahadeva, K. Walus, B. Stoeber, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2015**, 7, 8345.
- [68] R. Martins, I. Ferreira, E. Fortunato, *Phys. Status Solidi - Rapid Res. Lett.* **2011**, 5, 332.
- [69] I. Cunha, R. Barras, P. Grey, D. Gaspar, E. Fortunato, R. Martins, L. Pereira, *Adv. Funct. Mater.* **2018**, 27, 1606755.
- [70] A. Pourjavadi, E. Tavakoli, A. Motamedi, H. Salimi, *J. Appl. Polym. Sci.* **2018**, 135, 45752.
- [71] W. A. Sarhan, H. M. E. Azzazy, *Carbohydr. Polym.* **2015**, 122, 135.
- [72] R. Sarkar, A. Ghosh, A. Barui, P. Datta, *J. Mater. Sci. Mater. Med.* **2018**, 29.
- [73] W. Guo, Y. Liu, X. Zhu, S. Wang, *J. Food Eng.* **2011**, 102, 209.
- [74] R. C. Ordonez, C. K. Hayashi, C. M. Torres, J. L. Melcher, N. Kamin, G. Severa, D. Garmire, *Sci. Rep.* **2017**, 7, 1.
- [75] A. S. Sharova, M. Caironi, *Adv. Mater.* **2021**, 33, 2103183.
- [76] W. Xu, H. Yang, W. Zeng, T. Houghton, X. Wang, R. Murthy, H. Kim, Y. Lin, M. Mignolet, H. Duan, H. Yu, M. Slepian, H. Jiang, *Adv. Mater. Technol.* **2017**, 2, 1.
- [77] A. Bianco, K. Kostarelos, M. Prato, *Chem. Commun.* **2011**, 47, 10182.
- [78] E. Mostafavi, S. Irvani, R. S. Varma, M. Khatami, F. Rahbarizadeh, *Mater. Adv.* **2022**, 3, 4765.
- [79] M. Shahabuddin, M. N. Uddin, J. I. Chowdhury, S. F. Ahmed, M. N. Uddin, M. Mofijur, M. A. Uddin, *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **2023**, 20, 4513.
- [80] Y. Okahisa, A. Yoshida, S. Miyaguchi, H. Yano, *Compos. Sci. Technol.* **2009**, 69, 1958.
- [81] R. Morais, D. H. Vieira, C. Gaspar, L. Pereira, R. Martins, N. Alves, *Semicond. Sci. an* **2021**, 1.
- [82] V. C. Tran, G. G. Mastantuoni, M. Zabihpour, L. Li, L. Berglund, M. Berggren, Q. Zhou, I. Engquist, *Proc. Natl. Acad. Sci.* **2023**, 120, e2218380120.
- [83] D. H. Vieira, E. Carlos, M. S. Ozório, M. Morais, E. Fortunato, N. Alves, R. Martins, *Adv. Intell. Syst.* **2024**, 7, 2400760.
- [84] S. Dai, Y. Zhao, Y. Wang, J. Zhang, L. Fang, S. Jin, Y. Shao, J. Huang, *Adv. Funct. Mater.* **2019**, 29, 1903700.
- [85] L. Yu, X. Li, C. Luo, Z. Lei, Y. Wang, Y. Hou, M. Wang, X. Hou, *Nano Res.* **2024**, 17, 503.
- [86] H. Huang, C. Ge, Z. Liu, H. Zhong, E. Guo, M. He, C. Wang, G. Yang, K. Jin, *J. Semicond.* **2021**, 42.
- [87] F. Nie, J. Wang, H. Fang, S. Ma, F. Wu, W. Zhao, S. Wei, Y. Wang, L. Zhao, S. Yan, C. Ge, L. Zheng, *Mater. Futur.* **2023**, 2, 1.
- [88] Y. Li, J. Lu, D. Shang, Q. Liu, S. Wu, Z. Wu, X. Zhang, J. Yang, Z. Wang, H. Lv, M. Liu, *Adv. Mater.* **2020**, 32, 2003018.
- [89] W. Cheng, R. Liang, H. Tian, C. Sun, C. Jiang, X. Wang, J. Wang, T. L. Ren, J. Xu, *IEEE J. Electron Devices Soc.* **2019**, 7, 38.
- [90] X. Liu, C. Sun, Z. Guo, Y. Zhang, Z. Zhang, J. Shang, Z. Zhong, X. Zhu, X. Yu, R. W. Li, *Nanoscale Adv.* **2022**, 4, 2412.
- [91] Y. Li, H. Xu, J. Lu, Z. Wu, S. Wu, X. Zhang, Q. Liu, D. Shang, *Appl. Phys. Lett.* **2022**, 120.
- [92] B. Sueoka, M. M. Hasan Tanim, L. Williams, Z. Xiao, Y. Z. Seah, K. Y. Cheong, F. Zhao, *Org. Electron.* **2022**, 109, 106622.

- [93] M. M. H. Tanim, Z. Templin, K. Hood, J. Jiao, F. Zhao, *Adv. Mater. Technol.* **2023**, 8, 1.
- [94] Jean-Pierre Colinge, C. A. Colinge, *Physics of semiconductor devices*, Kluwer Academic Publishers, **2007**.
- [95] F. Braun, *Ann. der Phys. Chemie* **1874**, 153, 556.
- [96] S. M. Sze, K. K. NG, *Physics of semiconductor devices*, **2007**.
- [97] Gabriel Leonardo Nogueira, Preparação e caracterização de um transistor orgânico de efeito de campo com arquitetura vertical, **2016**.
- [98] C. Weichsel, O. Pagni, A. W. R. Leitch, *Semicond. Sci. Technol.* **2005**, 20, 840.
- [99] D. H. Vieira, M. da S. Ozório, G. L. Nogueira, L. Fugikawa-Santos, N. Alves, *Mater. Sci. Semicond. Process.* **2021**, 121, 105339.
- [100] D. H. Vieira, A. H. Lima, M. da S. Ozório, G. L. Nogueira, W. G. Quirino, N. Alves, *J. Electron. Mater.* **2019**, 48, 7991.
- [101] R. Enderlein, N. J. M. Horing, *Fundamentals of Semiconductor Physics and Devices*, **1999**.
- [102] U. K. Mishra, J. Singh, *Springer* **2008**, 1.
- [103] R. F. Pierret, *Semiconductor device fundamentals*, **1996**.
- [104] M. Biber, Ö. Güllü, S. Forment, R. L. Van Meirhaeghe, A. Türit, *Semicond. Sci. Technol.* **2006**, 21, 1.
- [105] A. Tataroglu, S. Altındal, U. Aydemir, H. Uslu, *Optoelectron. Adv. Mater.* **2010**, 4, 2.
- [106] J. M. Shah, Y. L. Li, T. Gessmann, E. F. Schubert, *J. Appl. Phys.* **2003**, 94, 2627.
- [107] A. Barkhordari, H. R. Mashayekhi, P. Amiri, S. Özçelik, Ş. Altındal, Y. A. Kalandaragh, *Sci. Rep.* **2023**, 1.
- [108] D. Gromov, V. Pugachevich, *Appl. Phys. A Solids Surfaces* **1994**, 59, 331.
- [109] W. Jung, M. Guziewicz, *Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol.* **2009**, 165, 57.
- [110] S. K. Cheung, N. W. Cheung, *Appl. Phys. Lett.* **1986**, 49, 85.
- [111] H. Norde, *J. Appl. Phys.* **1979**, 50, 7.
- [112] K. E. Bohlin, *J. Appl. Phys.* **1986**, 60, 1223.
- [113] K. C. K. Kao, *Dielectric Phenomena in Solids*, **2004**.
- [114] J. Chang, Y. Lin, Y. Li, **2024**.
- [115] T. Tomašević-Ilić, Đ. Jovanović, I. Popov, R. Fandan, J. Pedrós, M. Spasenović, R. Gajić, *Appl. Surf. Sci.* **2018**, 458, 446.
- [116] F. Zabihi, Y. Xie, S. Gao, M. Eslamian, *Appl. Surf. Sci.* **2015**, 338, 163.
- [117] A. J. Ben-Sasson, D. Azulai, H. Gilon, A. Facchetti, G. Markovich, N. Tessler, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2015**, 7, 2149.
- [118] N. Hirashima, N. Ohashi, M. Nakamura, K. Kudo, *IPAP Conf. Ser.* **2004**, 158.
- [119] I. M. T. Rodríguez, A. J. Borrill, K. J. Schaffer, J. B. Hernandez, G. D. O'Neil, *Anal. Chem.* **2020**, 92, 11444.
- [120] S.-M. Yoon, S.-H. K. Park, C.-W. Byun, S.-H. Yang, C.-S. Hwang, *J. Electrochem. Soc.* **2010**, 157, H727.
- [121] L. F. Aval, S. M. Elahi, *Electron. Mater. Lett.* **2017**, 13, 77.
- [122] C. H. Lin, C. W. Liu, *Sensors* **2010**, 10, 8797.
- [123] A. Sleiman, M. C. Rosamond, M. Alba Martin, A. Ayesh, A. Al Ghaferi, A. J. Gallant, M. F. Mabrook, D. A. Zeze, *Appl. Phys. Lett.* **2012**, 100, 1.
- [124] D. H. Vieira, G. L. Nogueira, R. F. De Oliveira, H. L. Gomes, N. Alves, *ACS Appl. Electron. Mater.* **2025**, 7, 8180.
- [125] D. Messaoud, B. Djezzar, A. Zitouni, *Russ. Microelectron.* **2023**, 52, 439.
- [126] Keithley Instruments, *Tektronix* **2016**, 16.
- [127] J. A. Martino, M. A. Pavanello, P. B. Verdonck, *Caracterização elétrica de tecnologia e dispositivos MOS*, Cengage Learning Editores, **2004**.
- [128] S. Das, C. Kumar, R. Kumar, A. Srivastava, S. Jit, *IEEE Photonics Technol. Lett.* **2020**, 32, 2019.
- [129] E. H. Nicollian, J. R. Brews, *MOS (Metal Oxide Semiconductor) physics and technology*, Wiley Classics Library, **2003**.
- [130] N. Alves, *Capacitores MIS baseados no poli(3-hexiltiofeno)*, Livre Docência, **2010**.

- [131] P. Stallinga, H. L. Gomes, M. Murgia, K. Müllen, *Org. Electron.* **2002**, 3, 43.
- [132] R. Nezasa, K. Gotoh, S. Kato, S. Miyamoto, N. Usami, Y. Kurokawa, *Energies* **2021**, 14, 1.
- [133] W. F. Brinkman, D. E. Haggan, W. W. Troutman, *IEEE J. Solid-State Circuits* **1997**, 32.
- [134] R. G. Arns, *Eng. Sci. Educ. J.* **1998**, 7, 233.
- [135] M. R. Betker, J. S. Fernando, S. P. Whalen, *Bell Labs Tech. J.* **1997**, 2, 29.
- [136] E. Fortunato, P. Barquinha, R. Martins, *Adv. Mater.* **2012**, 24, 2945.
- [137] K. K. N. S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, third., San Jose, California, **2006**.
- [138] J. Zaumseil, H. Sirringhaus, *Chem. Rev.* **2007**, 107, 1296.
- [139] D. H. Vieira, Desenvolvimento de um fotodetector UV usando um diodo Schottky e um transistor à base de ZnO por spray pyrolysis, **2020**.
- [140] M. da S. Ozório, Estudo De Compósitos De Tips-Pentaceno Para Aplicações em transistores, **2016**.
- [141] W. Song, Y. Li, K. Zhang, X. Zou, J. Wang, Y. Kong, T. Chen, C. Jiang, C. Liu, L. Liao, X. Liu, *IEEE Trans. Electron Devices* **2019**, 66, 4148.
- [142] X. Wang, H. Li, *Appl. Phys. Lett.* **2022**, 120.
- [143] W. L. Kalb, B. Batlogg, *Phys. Rev. B* **2010**, 81, 035327.
- [144] M. S. Ozório, D. H. Vieira, G. L. Nogueira, C. S. Martin, N. Alves, C. J. L. Constantino, *Mater. Sci. Semicond. Process.* **2022**, 151, 107045.
- [145] G. Horowitz, *Adv. Mater.* **1998**, 10, 365.
- [146] J. Guo, J. Jiang, B. Yang, *Solid. State. Electron.* **2018**, 150, 8.
- [147] Y. H. Lee, M. Jang, M. Y. Lee, O. Y. Kweon, J. H. Oh, *Chem* **2017**, 3, 724.
- [148] C. S. Choi, H. S. Kang, W. Y. Choi, H. J. Kim, W. J. Choi, D. H. Kim, K. C. Jang, K. S. Seo, *IEEE Photonics Technol. Lett.* **2003**, 15, 846.
- [149] L. Ma, Y. Yang, *Appl. Phys. Lett.* **2004**, 85, 5084.
- [150] Y. Che, X. Cao, Y. Zhang, J. Yao, *Opt. Mater. (Amst).* **2020**, 100, 109664.
- [151] G. L. Nogueira, M. da Silva Ozório, M. M. da Silva, R. M. Morais, N. Alves, *Electron. Mater. Lett.* **2018**, 14, 319.
- [152] Y. Yao, Q. Ou, K. Wang, H. Peng, F. Fang, Y. Shi, Y. Wang, D. I. Asperilla, Z. Shuai, P. Samorì, *Nat. Commun.* **2021**, 12, 1.
- [153] M. a McCarthy, B. Liu, A. G. Rinzler, *Nano Lett.* **2010**, 10, 3467.
- [154] X. Wang, E. Li, Y. Liu, S. Lan, H. Yang, Y. Yan, L. Shan, Z. Lin, H. Chen, T. Guo, *Nano Energy* **2021**, 90, 106497.
- [155] A. J. Ben-Sasson, M. Greenman, Y. Roichman, N. Tessler, *Isr. J. Chem.* **2014**, 54, 568.
- [156] A. J. Ben-Sasson, N. Tessler, *Org. Field-Effect Transistors X* **2011**, 8117, 81170Z.
- [157] G. Sheleg, M. Greenman, B. Lussem, N. Tessler, *J. Appl. Phys.* **2017**, 122.
- [158] A. J. Ben-Sasson, N. Tessler, *J. Appl. Phys.* **2011**, 110.
- [159] W. Chen, A. Rinzler, J. Guo, *J. Appl. Phys.* **2013**, 113, 0.
- [160] B. Lüssem, C. Keum, G. Sheleg, N. Tessler, *Handb. Org. Mater. Electron. Photonic Devices, Second Ed.* **2018**, 759.
- [161] A. J. Ben-Sasson, N. Tessler, *Nano Lett.* **2012**, 12, 4729.
- [162] J. Liu, Z. Qin, H. Gao, H. Dong, J. Zhu, W. Hu, *Adv. Funct. Mater.* **2019**, 29, 1.
- [163] W. Huang, J. Chen, G. Wang, Y. Yao, X. Zhuang, R. M. Pankow, Y. Cheng, T. J. Marks, A. Facchetti, *J. Mater. Chem. C* **2021**, 9, 9348.
- [164] Y. Ohno, K. Maehashi, Y. Yamashiro, K. Matsumoto, *Nano Lett.* **2009**, 9, 3318.
- [165] J. Fan, S. S. Rezaie, M. Facchini-rakovich, D. Gudi, C. Montemagno, M. Gupta, *Org. Electron.* **2019**, 66, 148.
- [166] W. Xu, S. Min, H. Hwang, T. Lee, *Sci. Adv.* **2016**, 2, 1.
- [167] G. Schweicher, G. Garbay, R. Jouclas, F. Vibert, F. Devaux, Y. H. Geerts, *Adv. Mater.* **2020**, 32.
- [168] J. T. Friedlein, R. R. Mcleod, J. Rivnay, *Org. Electron.* **2018**, 63, 398.
- [169] G. Y. Wang, K. Lian, T. Chu, *IEEE J. Electron Devices Soc.* **2021**, 9, 939.
- [170] D. S. Jung, Y. N. Ko, Y. C. Kang, S. Bin Park, *Adv. Powder Technol.* **2014**, 25, 18.
- [171] D. Perednis, L. J. Gauckler, *J. Electroceramics* **2005**, 14, 103.
- [172] E. A. de Moura, Transistores orgânicos eletrolíticos em arquitetura planar e vertical,

2020.

- [173] D. H. Vieira, E. Carlos, M. Morais, M. R. Nascimento, R. M. Morais, E. Fortunato, N. Alves, R. Martins, *Mater. Today Electron.* **2026**, 15, 100191.
- [174] J. Guérineau, J. Ton, M. Zhuldybina, *Sensors* **2025**, 25, 4240.
- [175] N. Castro, N. Pereira, V. F. Cardoso, C. Ribeiro, S. Lanceros-Mendez, In *Nanostructured Thin Films*, **2019**, pp. 35–65.
- [176] F. Ynineb, N. Attaf, M. S. Aida, J. Bougdira, Y. Bouznit, H. Rinnert, *Thin Solid Films* **2017**, 628, 36.
- [177] Y. Li, Y. Li, J. Zhang, T. Tong, W. Ye, *J. Phys. D. Appl. Phys.* **2018**, 51.
- [178] G. R. Lima, J. P. Braga, G. Gozzi, L. Fugikawa-Santos, *MRS Adv.* **2020**, 5, 1859.
- [179] S. Oertel, M. P. M. Jank, E. Teuber, A. J. Bauer, L. Frey, *Thin Solid Films* **2014**, 553, 114.
- [180] S. J. Ikhmayies, M. B. Zbib, *J. Electron. Mater.* **2017**, 46, 5629.
- [181] T. V. Richter, F. Stelzl, J. Schulz-Gericke, B. Kersch, U. Würfel, M. Niggemann, S. Ludwigs, *J. Mater. Chem.* **2010**, 20, 874.
- [182] S. Zhou, Z. Fang, H. Ning, W. Cai, Z. Zhu, J. Wei, X. Lu, W. Yuan, R. Yao, J. Peng, *Appl. Sci.* **2018**, 8.
- [183] J. U. Bhanu, A. Amutha, G. R. Babu, B. Sundaravel, P. Thangadurai, *Mater. Sci. Semicond. Process.* **2018**, 81, 7.
- [184] N. Shimosako, H. Sakama, *Thin Solid Films* **2021**, 732, 138786.
- [185] K. L. Abel, S. Weber, D. Poppitz, J. Titus, T. L. Sheppard, R. Gläser, *RSC Adv.* **2022**, 12, 16875.
- [186] E. Matei, A. A. Şăulean, M. Petriceanu, M. Răpă, R. R. Piticescu, R. Ştefănoiu, C. Predescu, *Environments* **2024**, 11.
- [187] A. Mittal, G. Kumar, B. Saroha, T. Peppel, V. Kumar, S. Kumar, N. Kumar, *J. Mol. Liq.* **2024**, 398, 124223.
- [188] T. Van Tran, D. T. C. Nguyen, P. S. Kumar, A. T. M. Din, A. A. Jalil, D. V. N. Vo, *Environ. Chem. Lett.* **2022**, 20, 1309.
- [189] M. L. Matias, E. Carlos, R. Branquinho, H. do Valle, J. Marcelino, M. Morais, A. Pimentel, J. Rodrigues, T. Monteiro, E. Fortunato, R. Martins, D. Nunes, *Energies* **2022**, 15.
- [190] D. H. Vieira, G. L. Nogueira, M. R. Nascimento, L. Fugikawa-Santos, N. Alves, *Curr. Appl. Phys.* **2023**, 53, 118.
- [191] D. H. Vieira, G. L. Nogueira, L. Mercês, C. C. B. Bufon, N. Alves, *Adv. Electron. Mater.* **2024**, 2300562.
- [192] D. H. Vieira, G. L. Nogueira, M. S. Ozório, J. D. Fernandes, K. F. Seidel, J. P. M. Serbena, N. Alves, *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* **2023**, 129.
- [193] J. J. Kwiatkowski, J. M. Frost, J. Nelson, *Nano Lett.* **2009**, 9, 1085.
- [194] J. K. Saha, J. Jang, M. M. Billah, R. N. Bukke, Y. G. Kim, N. N. Mude, A. B. Siddik, M. M. Islam, Y. Do, M. Choi, *IEEE Trans. Electron Devices* **2020**, 67, 1021.
- [195] W. Olthuis, W. Streekstra, P. Bergveld, *Sensors Actuators B. Chem.* **1995**, 24–25, 252.
- [196] X. Huang, H. Yu, S. Shi, C. Huang, *Org. Electron.* **2019**, 65, 311.
- [197] T. Belagodu, E. A. Azhar, H. Yu, *Nanoscale* **2012**, 4, 7330.
- [198] J. Wang, N. C. Greenham, *Appl. Phys. Lett.* **2014**, 104.
- [199] P. Chu, G. Wang, B. Fu, D. Choi, J. O. Park, M. Srinivasarao, E. Reichmanis, *Adv. Electron. Mater.* **2016**, 2, 1500384.
- [200] E. A. de Moura, M. Luginieski, J. P. M. Serbena, K. F. Seidel, *J. Appl. Phys.* **2021**, 129, 154502.
- [201] C. P. Watson, M. Devynck, D. M. Taylor, *Org. Electron.* **2013**, 14, 1728.
- [202] H. L. Gomes, A. R. V. Benvenho, D. M. de Leeuw, M. Cölle, P. Stallinga, F. Verbakel, D. M. Taylor, *Org. Electron.* **2008**, 9, 119.
- [203] Ł. Drewniak, S. Kochowski, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* **2020**, 31, 19106.
- [204] H. J. Yang, D. Han, J. Kim, Y. H. Kim, J. H. Bae, *J. Electroanal. Chem.* **2022**, 922, 116766.
- [205] M. dos S. Klem, R. M. Morais, R. J. G. Rubira, N. Alves, *Thin Solid Films* **2019**, 669,

- [206] T. C. Gomes, R. F. De Oliveira, C. J. L. Constantino, M. M. Da Silva, É. M. Lopes, N. Alves, *Mater. Res.* **2014**, *17*, 1466.
- [207] R. N. Gayen, S. R. Bhattacharyya, *J. Phys. D. Appl. Phys.* **2016**, *49*, 115102.
- [208] J. J. Siddiqui, J. D. Phillips, K. Leedy, B. Bayraktaroglu, *IEEE Electron Device Lett.* **2011**, *32*, 1713.
- [209] J. C. Simpson, J. F. Cordaro, *J. Appl. Phys.* **1991**, *69*, 4011.
- [210] H. F. Haneef, A. M. Zeidell, O. D. Jurchescu, *J. Mater. Chem. C* **2020**, *8*, 759.
- [211] M. Ding, Z. Guo, X. Chen, X. Ma, L. Zhou, *Nanomaterials* **2020**, *10*.
- [212] M. Singh, G. Palazzo, G. Romanazzi, G. P. Suranna, N. Ditaranto, C. Di Franco, M. V. Santacroce, M. Y. Mulla, M. Magliulo, K. Manoli, L. Torsi, *Faraday Discuss.* **2014**, *174*, 383.
- [213] M. Singh, K. Manoli, A. Tiwari, T. Ligonzo, C. Di Franco, N. Cioffi, G. Palazzo, G. Scamarcio, L. Torsi, *J. Mater. Chem. C* **2017**, *5*, 3509.
- [214] L. Du, D. He, Y. Liu, M. Xu, Q. Wang, Q. Xin, A. Song, *IEEE Electron Device Lett.* **2018**, *39*, 1334.
- [215] E. Bandiello, M. Sessolo, H. J. Bolink, *J. Mater. Chem. C* **2014**, *2*, 10277.
- [216] L. Santos, D. Nunes, T. Calmeiro, R. Branquinho, D. Salgueiro, P. Barquinha, L. Pereira, R. Martins, E. Fortunato, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2015**, *7*, 638.
- [217] K. G. Cho, H. J. Kim, H. M. Yang, K. H. Seol, S. J. Lee, K. H. Lee, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2018**, *10*, 40672.
- [218] F. Zare Bidoky, B. Tang, R. Ma, K. S. Jochem, W. J. Hyun, D. Song, S. J. Koester, T. P. Lodge, C. D. Frisbie, *Adv. Funct. Mater.* **2020**, *30*, 1902028.
- [219] Y. Li, L. Li, S. Li, J. Sun, Y. Fang, T. Deng, *ACS Omega* **2022**, *7*, 13615.
- [220] T. Y. Tiong, C. F. Dee, A. A. Hamzah, B. T. Goh, Y. Y. Wong, L. Ooi, B. Y. Majlis, M. M. Salleh, I. Ahmad, *Sensors Actuators, A Phys.* **2017**, *260*, 139.
- [221] B. Wang, L. Wang, Y. Zhang, M. Yang, D. Lin, N. Zhang, Z. Jiang, M. Liu, Z. Zhu, H. Hu, *Adv. Funct. Mater.* **2022**, *32*, 2110181.
- [222] Y. Cao, X. Sha, X. Bai, Y. Shao, Y. Gao, Y.-M. Wei, L. Meng, N. Zhou, J. Liu, B. Li, X.-F. Yu, J. Li, *Adv. Electron. Mater.* **2022**, *8*, 2100902.
- [223] H. Yoo, W. G. Kim, B. H. Kang, H. T. Kim, J. W. Park, D. H. Choi, T. S. Kim, J. H. Lim, H. J. Kim, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2020**, *12*, 10673.
- [224] P. Prasad, M. Garg, U. Chandni, *Nanoscale* **2020**, *12*, 23817.
- [225] D. Bhatia, S. Roy, S. Nawaz, R. S. Meena, V. R. Palkar, *Microelectron. Eng.* **2017**, *168*, 55.
- [226] S. Cho, K. D. Kim, J. Heo, J. Y. Lee, G. Cha, B. Y. Seo, Y. D. Kim, Y. S. Kim, S. Y. Choi, D. C. Lim, *Sci. Rep.* **2014**, *4*, 1.
- [227] Y. M. Sung, A. K. Akbar, S. Biring, C. F. Li, Y. C. Huang, S. W. Liu, *J. Mater. Chem. C* **2021**, *9*, 1196.
- [228] O. Almora, C. Aranda, G. Garcia-Belmonte, *J. Phys. Chem. C* **2018**, *122*, 13450.
- [229] K.-J. Baeg, Ki. Myung-Gil, C. K. Song, X. Yu, A. Facchetti, T. J. Marks, *Adv. Mater.* **2014**, *26*, 7170.
- [230] E. S. Hwang, J. S. Kim, S. M. Jeon, S. J. Lee, Y. Jang, D.-Y. Cho, C. S. Hwang, *Nanotechnology* **2018**, *29*, 155203.
- [231] H. Yin, S. Kim, C. J. Kim, I. Song, J. Park, S. Kim, Y. Park, *Appl. Phys. Lett.* **2008**, *93*.
- [232] P. Zhang, Y. Guo, K. Cao, M. Yi, L. Huang, W. Shi, J. Zhu, W. Huang, *J. Phys. D. Appl. Phys.* **2021**, *54*.
- [233] C. C. Shih, W. Y. Lee, Y. C. Chiu, H. W. Hsu, H. C. Chang, C. L. Liu, W. C. Chen, *Sci. Rep.* **2016**, *6*, 1.
- [234] H. R. Kim, C. S. Kang, S. K. Kim, C. W. Byun, S. M. Yoon, *J. Phys. D. Appl. Phys.* **2019**, *52*.
- [235] M. Kumar, S. Otari, H. Jeong, D. Lee, *J. Alloys Compd.* **2017**, *725*, 1115.
- [236] D. J. Yun, J. Y. Bak, C. W. Byun, S. M. Yoon, *IEEE Electron Device Lett.* **2017**, *38*, 1263.
- [237] M. Kumar, H. Jeong, D. Lee, *Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol.* **2018**,

- 236–237, 225.
- [238] C. H. Yeh, K. C. Chang, Y. H. Lin, T. C. Chang, Y. C. Chang, W. C. Chen, F. Y. Jin, F. M. Ciou, Y. S. Lin, W. C. Hung, J. W. Huang, T. M. Tsai, S. M. Sze, *IEEE Electron Device Lett.* **2021**, 42, 315.
 - [239] D. D. Liu, J. Pei, L. Li, J. Huo, X. Wu, W. J. Liu, S. J. Ding, *J. Mater. Res.* **2020**, 35, 732.
 - [240] C. Wu, W. Wang, J. Song, *IEEE Electron Device Lett.* **2017**, 38, 641.
 - [241] D. H. Min, S. Y. Kang, S. E. Moon, S. M. Yoon, *IEEE Electron Device Lett.* **2019**, 40, 1032.
 - [242] D. Das, P. V. Ravindran, C. Park, N. Tasneem, Z. Wang, H. Chen, W. Chern, S. Yu, S. Datta, A. Khan, *IEEE Electron Device Lett.* **2023**, 44, 257.
 - [243] K. Pak, J. Choi, C. Lee, S. G. Im, *Adv. Electron. Mater.* **2019**, 5, 1.
 - [244] R. R. Ghimire, Y. P. Dahal, K. B. Rai, *Bibechana* **2023**, 20, 46.
 - [245] A. H. Mohamed, N. A. B. Ghazali, H. M. H. Chong, R. J. Cobley, L. Li, K. Kalna, *Solid. State. Electron.* **2020**, 172.
 - [246] M. M. Hasan, Mohit, J. Bae, E. Tokumitsu, H. Y. Chu, S. C. Kim, J. Jang, *Appl. Phys. Lett.* **2021**, 119.
 - [247] J. Cho, S. Hwang, D.-H. Ko, S. Chung, *Materials (Basel)*. **2019**, 12, 3423.
 - [248] M. Yi, J. Shu, Y. Wang, H. Ling, C. Song, W. Li, L. Xie, W. Huang, *Org. Electron.* **2016**, 33, 95.
 - [249] A. Mallick, D. Basak, *Prog. Mater. Sci.* **2018**, 96, 86.
 - [250] Y. S. Shin, K. Lee, Y. R. Kim, H. Lee, I. M. Lee, W. T. Kang, B. H. Lee, K. Kim, J. Heo, S. Park, Y. H. Lee, W. J. Yu, *Adv. Mater.* **2018**, 30, 1.
 - [251] M.-T. Wang, S.-Y. Deng, T.-H. Wang, B. Y.-Y. Cheng, J. Y. Lee, *J. Electrochem. Soc.* **2005**, 152, G542.
 - [252] P. Mark, W. Helfrich, *J. Appl. Phys.* **1962**, 33, 205.
 - [253] A. Dey, A. Layek, A. Roychowdhury, M. Das, J. Datta, S. Middya, D. Das, P. P. Ray, *RSC Adv.* **2015**, 5, 36560.
 - [254] J. Zhou, L. Xie, X. Song, Z. Wang, C. Huo, Y. Xiong, Z. Cheng, Y. Wang, S. Zhang, X. Chen, H. Zeng, *J. Mater. Chem. C* **2020**, 8, 12632.
 - [255] M. A. McCarthy, B. Liu, R. JayaRaman, S. M. Gilbert, D. Y. Kim, F. So, A. G. Rinzler, *ACS Nano* **2011**, 5, 291.
 - [256] T. Hu, L. Chen, K. Yuan, Y. Chen, *Chem. a Eur. J.* **2014**, 20, 17178.
 - [257] W. Chu, J. Yang, Q. Jiang, X. Li, J. Xin, *Appl. Surf. Sci.* **2018**, 440, 1116.
 - [258] T. Hu, F. Li, K. Yuan, Y. Chen, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2013**, 5, 5763.
 - [259] Y. H. Kim, D. G. Kim, R. D. Maduwu, H. C. Jin, D. K. Moon, J. H. Kim, *Sol. RRL* **2018**, 2, 2.
 - [260] D. G. Kim, Y. H. Kim, R. D. Maduwu, H. C. Jin, D. K. Moon, J. H. Kim, *J. Ind. Eng. Chem.* **2018**, 65, 175.
 - [261] H. Y. Park, D. Lim, K. D. Kim, S. Y. Jang, *J. Mater. Chem. A* **2013**, 1, 6327.
 - [262] K. Yuan, L. Chen, F. Li, Y. Chen, *J. Mater. Chem. C* **2014**, 2, 1018.
 - [263] H. Yang, T. Wu, T. Hu, X. Hu, L. Chen, Y. Chen, *J. Mater. Chem. C* **2016**, 4, 8738.
 - [264] G. Amin, I. Hussain, S. Zaman, N. Bano, O. Nur, M. Willander, *Phys. Status Solidi Appl. Mater. Sci.* **2010**, 207, 748.
 - [265] H. Wang, S. Cao, B. Yang, H. Li, M. Wang, X. Hu, K. Sun, Z. Zang, *RRL Sol.* **2020**, 4, 1900363.
 - [266] V. Mikhelashvili, G. Eisenstein, R. Uzdin, *Solid. State. Electron.* **2001**, 45, 143.
 - [267] H. Kim, H. Y. Lee, B. J. Choi, *Appl. Phys. A* **2021**, 127, 1.
 - [268] C. P. Gupta, A. K. Singh, P. K. Jain, S. K. Sharma, S. Birla, S. Sancheti, *Mater. Sci. Semicond. Process.* **2021**, 128, 105734.
 - [269] J. H. Werner, H. H. Güttler, *J. Appl. Phys.* **1991**, 69, 1522.
 - [270] M. A. Mayimele, J. P. J. Van Rensburg, F. D. Aurret, M. Diale, *Phys. B Condens. Matter* **2016**, 480, 58.
 - [271] A. Jayawardena, A. C. Ahyi, S. Dhar, *Semicond. Sci. Technol.* **2016**, 31.
 - [272] G. L. Nogueira, D. H. Vieira, R. M. Morais, J. P. M. Serbena, K. F. Seidel, N. Alves,

- IEEE Electron Device Lett.* **2021**, 3106, 1.
- [273] M. Uma, V. Rajagopal Reddy, V. Janardhanam, C. J. Choi, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* **2019**, 30, 18710.
- [274] D. H. Vieira, N. Badiei, J. E. Evans, N. Alves, J. Kettle, L. Li, *Proc. IEEE Sensors* **2020**, 2020-Octob.
- [275] X. Song, Y. Zhang, H. Zhang, Y. Yu, M. Cao, Y. Che, H. Dai, J. Yang, X. Ding, J. Yao, *Nanotechnology* **2017**, 28.
- [276] G. Zhang, J. Zhong, Q. Chen, Y. Yan, H. Chen, T. Guo, *IEEE Trans. Electron Devices* **2019**, 66, 1815.
- [277] M. Sulaman, Y. Song, S. Yang, M. Li, M. I. Saleem, P. V. Chandrasekar, Y. Jiang, Y. Tang, B. Zou, *Nanotechnology* **2019**, 31, 105203.
- [278] J. Liu, K. Zhou, J. Liu, J. Zhu, Y. Zhen, H. Dong, W. Hu, *Adv. Mater.* **2018**, 30, 1803655.
- [279] J. P. Long, V. M. Bermudez, *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.* **2002**, 66, 1.
- [280] S. N. Das, J. P. Kar, J.-M. Myoung, In *Nanowires - Fundamental Research*, **2011**, pp. 161–182.
- [281] A. K. Singh, N. K. Chourasia, B. N. Pal, A. Pandey, P. Chakrabarti, *IEEE Trans. Electron Devices* **2020**, 67, 2028.
- [282] D. H. Vieira, N. Badiei, J. E. Evans, N. Alves, J. Kettle, L. Li, *IEEE Trans. Electron Devices* **2020**, 67, 4947.
- [283] S. Dhar, T. Majumder, S. P. Mondal, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2016**, 8, 31822.
- [284] M. Hasan, E. Moyen, J. K. Saha, M. Islam, A. Ali, J. Jang, *Nano Res.* **2022**, 15, 3660.
- [285] I. P. Mahendra Wijaya, T. J. Nie, S. Gandhi, R. Boro, A. Palaniappan, G. W. Hau, I. Rodriguez, C. R. Suri, S. G. Mhaisalkar, *Lab Chip* **2010**, 10, 634.
- [286] S. Y. Yang, F. Cicoira, R. Byrne, F. Benito-Lopez, D. Diamond, R. M. Owens, G. G. Malliaras, *Chem. Commun.* **2010**, 46, 7972.
- [287] M. H. Lee, B. J. Kim, K. H. Lee, I. S. Shin, W. Huh, J. H. Cho, M. S. Kang, *Nanoscale* **2015**, 7, 7540.
- [288] L. Kergoat, N. Battaglini, L. Miozzo, B. Piro, M. C. Pham, A. Yassar, G. Horowitz, *Org. Electron.* **2011**, 12, 1253.
- [289] B. Wang, K. Y. Cheong, C. F. Huang, F. Zhao, *Microsyst. Technol.* **2020**, 26, 1717.
- [290] P. M. Da Silva, C. Gauche, L. V. Gonzaga, A. C. O. Costa, R. Fett, *Food Chem.* **2016**, 196, 309.
- [291] H. Du, X. Lin, Z. Xu, D. Chu, *Electric double-layer transistors: a review of recent progress*, Vol. 50, Springer US, **2015**.
- [292] F. Torricelli, D. Z. Adrahtas, Z. Bao, M. Berggren, F. Biscarini, A. Bonfiglio, C. A. Bortolotti, C. D. Frisbie, E. Macchia, G. G. Malliaras, I. McCulloch, M. Moser, T.-Q. Nguyen, R. M. Owens, A. Salleo, A. Spanu, L. Torsi, *Nat. Rev. Methods Prim.* **2021**, 1.
- [293] C. J. Wan, Y. H. Liu, L. Q. Zhu, P. Feng, Y. Shi, Q. Wan, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2016**, 8, 9762.
- [294] Z. Ye, Y. Yuan, H. Xu, Y. Liu, J. Luo, M. Wong, *IEEE Trans. Electron Devices* **2017**, 64, 438.
- [295] R. F. De Oliveira, L. Mercés, T. P. Vello, C. C. Bof Bufon, *Org. Electron.* **2016**, 31, 217.
- [296] R. Porrazzo, S. Bellani, A. Luzio, C. Bertarelli, G. Lanzani, M. Caironi, M. R. Antognazza, *APL Mater.* **2015**, 3.
- [297] R. Porrazzo, A. Luzio, S. Bellani, G. E. Bonacchini, Y. Y. Noh, Y. H. Kim, G. Lanzani, M. R. Antognazza, M. Caironi, *ACS Omega* **2017**, 2, 1.
- [298] H. Alqahtani, A. Alswieleh, I. Al-Khurayyif, S. Algarni, M. Grell, *Sensors* **2021**, 21.
- [299] M. Lee, D. Kim, *Mater. Lett.* **2020**, 268, 127571.
- [300] H. Lee, K. Beom, M. Kim, T.-S. Yoon, *Semicond. Sci. Technol. Accept.* **2020**, 35, 075013.
- [301] T. Serghiou, J. D. Fernandes, V. Karthikeyan, D. S. Assi, D. H. Vieira, N. Alves, J. Kettle, *Adv. Funct. Mater.* **2025**, 35, 2417355.
- [302] W. Zhang, J. Luo, S. Liu, J. Ma, X. Zhang, S. Yang, *J. Inorg. Mater.* **2023**, 38, 213.

- [303] F. Shan, A. Liu, G. Liu, Y. Meng, E. Fortunato, R. Martins, *J. Disp. Technol.* **2015**, *11*, 541.
- [304] J. Zhang, M. Jia, M. G. Sales, Y. Zhao, G. Lin, P. Cui, C. Santiwipharat, C. Ni, S. McDonnell, Y. Zeng, *ACS Appl. Electron. Mater.* **2021**, *3*, 5483.
- [305] J. C. Lin, Y. C. Liu, S. H. Lu, H. N. Yen, K. Settu, *Electrochem. commun.* **2023**, *154*, 107555.
- [306] A. T. Oluwabi, A. Katerski, E. Carlos, R. Branquinho, A. Mere, M. Krunks, E. Fortunato, L. Pereira, I. Oja Acik, *J. Mater. Chem. C* **2020**, *8*, 3730.
- [307] A. Kumar, S. Mondal, K. S. R. Koteswara Rao, *Appl. Phys. Lett.* **2017**, *110*, 1.
- [308] J. Yang, Y. Zhang, Q. Wu, C. Dussarrat, J. Qi, W. Zhu, X. Ding, J. Zhang, *IEEE Trans. Electron Devices* **2019**, *66*, 3382.
- [309] Q. Huang, Y. Guo, A. Wang, Z. Bai, L. Gu, Z. Wang, C. Ding, Y. Shen, H. Ma, Q. Zhang, *Materials (Basel)*. **2025**, *18*.
- [310] L. Qin, H. Tian, C. Li, Z. Xie, Y. Wei, Y. Li, J. He, Y. Yue, T. L. Ren, *Adv. Electron. Mater.* **2024**, *10*, 1.
- [311] J. H. Park, Y. B. Yoo, K. H. Lee, W. S. Jang, J. Y. Oh, S. S. Chae, H. K. Baik, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2013**, *5*, 410.
- [312] X. Dong, G. Xia, Q. Zhang, L. Li, H. Gong, J. Bi, S. Wang, *Ceram. Int.* **2017**, *43*, 15205.
- [313] Y. Gong, K. Zhao, H. He, W. Cai, N. Tang, H. Ning, S. Wu, J. Gao, G. Zhou, X. Lu, J. M. Liu, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **2018**, *51*.
- [314] K. Kandpal, N. Gupta, J. Singh, C. Shekhar, *J. Electron. Mater.* **2020**, *49*, 3156.
- [315] C. Luo, T. Huang, C. Li, Y. Zhang, Z. Zou, Y. Li, R. Tao, J. Gao, G. Zhou, X. Lu, J. M. Liu, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **2021**, *54*.
- [316] M. M. Hasan, S. Roy, Mohit, E. Tokumitsu, H. Y. Chu, S. C. Kim, J. Jang, *Appl. Surf. Sci.* **2023**, *611*, 155533.
- [317] F. Wang, G. Q. Chen, W. Wang, M. H. Zhang, S. He, G. Shao, Y. F. Wang, W. Hu, H. Wang, *Diam. Relat. Mater.* **2023**, *134*, 109774.
- [318] G. Su, Z. Liang, J. Zhong, H. Ning, K. Lu, T. Qiu, D. Luo, X. Liu, R. Yao, J. Peng, *Org. Electron.* **2023**, *116*, 106759.
- [319] I. Cunha, S. H. Ferreira, J. Martins, E. Fortunato, D. Gaspar, R. Martins, L. Pereira, *Adv. Sustain. Syst.* **2022**, *6*, 2200177.
- [320] S. Zhang, N. Nguyen, B. Leonhardt, C. Jolowsky, A. Hao, J. G. Park, R. Liang, *Adv. Electron. Mater.* **2019**, *5*, 1.
- [321] C. H. Dreimol, H. Guo, M. Ritter, T. Keplinger, Y. Ding, R. Günther, E. Poloni, I. Burgert, G. Panzarasa, *Nat. Commun.* **2022**, *13*, 1.
- [322] Z. Börösök, Z. Pásztor, *Eur. J. Wood Wood Prod.* **2021**, *79*, 511.
- [323] Y. Dong, K. Wang, Y. Tan, Q. Wang, J. Li, H. Mark, S. Zhang, *Nanoscale Res. Lett.* **2018**, *13*, 1.
- [324] J. Li, R. Wang, H. Tian, Y. Wang, D. Qi, *Symmetry (Basel)*. **2018**, *10*.
- [325] V. Emmanuel, B. Odile, R. Céline, *Spectrochim. Acta - Part A Mol. Biomol. Spectrosc.* **2015**, *136*, 1255.
- [326] R. Javier-Astete, J. Melo, J. Jimenez-Davalos, G. Zolla, *Sci. Rep.* **2023**, *13*, 1.
- [327] M. Báder, R. Németh, J. Sandak, A. Sandak, *Cellulose* **2020**, *27*, 6811.
- [328] M. Girolami, A. Bellucci, M. Mastellone, V. Serpente, S. Orlando, V. Valentini, A. L. Palma, A. Di Carlo, D. M. Trucchi, *C — J. Carbon Res.* **2020**, *6*, 48.
- [329] Y. Tang, K. Petropoulos, F. Kurth, H. Gao, D. Migliorelli, O. Guenat, S. Generelli, *Biosensors* **2020**, *10*, 1.
- [330] C. Chen, Y. Zhang, Y. Li, J. Dai, J. Song, Y. Yao, Y. Gong, I. Kierzewski, J. Xie, L. Hu, *Energy Environ. Sci.* **2017**, *10*, 538.
- [331] S. Lee, F. M. Li, A. Nathan, *IEEE J. Electron Devices Soc.* **2018**, *6*, 653.
- [332] S. M. Goodman, R. Bura, A. B. Dichiaro, *ACS Appl. Nano Mater.* **2018**, *1*, 5682.
- [333] Q. Fu, Y. Chen, M. Sorieul, *ACS Nano* **2020**, *14*, 3528.
- [334] M. Dos Santos Klem, G. L. Nogueira, N. Alves, *Mater. Res.* **2021**, *24*, 1.
- [335] M. dos Santos Klem, G. Leonardo Nogueira, N. Alves, *Int. J. Energy Res.* **2021**, *45*, 9021.

- [336] M. R. Nascimento, D. H. Vieira, G. L. Nogueira, N. Alves, *IEEE Electron Device Lett.* **2021**, 42, 1468.
- [337] P. Monalisha, A. P. S. Kumar, X. R. Wang, S. N. Piramanayagam, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2022**, 14, 11864.
- [338] S. Bolat, G. Torres Sevilla, A. Mancinelli, E. Gilshtein, J. Sastre, A. Cabas Vidani, D. Bachmann, I. Shorubalko, D. Briand, A. N. Tiwari, Y. E. Romanyuk, *Sci. Rep.* **2020**, 10, 1.
- [339] C. Samanta, R. R. Ghimire, B. Ghosh, *IEEE Trans. Electron Devices* **2018**, 65, 2827.
- [340] N. Lago, M. Buonomo, S. Ruiz-Molina, A. Pollesel, R. C. Hensel, F. Sedona, M. Sambì, M. Mas-Torrent, S. Casalini, A. Cester, *Org. Electron.* **2022**, 106.
- [341] S. Thiemann, S. J. Sachnov, F. Pettersson, R. Bollström, R. Österbacka, P. Wasserscheid, J. Zaumseil, *Adv. Funct. Mater.* **2014**, 24, 625.
- [342] P. Grey, D. Gaspar, I. Cunha, R. Barras, J. T. Carvalho, J. R. Ribas, E. Fortunato, R. Martins, L. Pereira, *Adv. Mater. Technol.* **2017**, 2.
- [343] J. T. Carvalho, V. Dubceac, P. Grey, I. Cunha, E. Fortunato, R. Martins, A. Clausner, E. Zschech, L. Pereira, *Nanomaterials* **2019**, 9, 169.
- [344] X. Wang, C. Yu, *J. Mater. Res.* **2020**, 35, 940.
- [345] I. Cunha, J. Martins, D. Gaspar, P. G. Bahubalindrani, E. Fortunato, R. Martins, L. Pereira, *Adv. Electron. Mater.* **2021**, 7.
- [346] P. I. C. Claro, I. Cunha, R. T. Paschoalin, D. Gaspar, K. Miranda, O. N. Oliveira, R. Martins, L. Pereira, J. M. Marconcini, E. Fortunato, L. H. C. Mattoso, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2021**, 13, 26237.
- [347] F. Gherendi, D. Dobrin, M. Nistor, *Micromachines* **2024**, 15.
- [348] T. C. Südhof, *J. Cell Biol.* **2021**, 220, 1.
- [349] H. Shim, K. Sim, F. Ershad, P. Yang, A. Thukral, Z. Rao, H. J. Kim, Y. Liu, X. Wang, G. Gu, L. Gao, X. Wang, Y. Chai, C. Yu, *Sci. Adv.* **2019**, 5, 1.
- [350] Y. X. Ding, K. W. Huang, J. W. Chen, H. H. Hsu, L. Y. Ying, B. P. Zhang, Z. W. Zheng, *J. Mater. Sci.* **2023**, 58, 11740.
- [351] Y. H. Yang, J. Li, Q. Chen, Y. H. Zhou, W. Q. Zhu, J. H. Zhang, *Org. Electron.* **2020**, 77, 105518.
- [352] W. A. Mo, G. Ding, Z. Nie, Z. Feng, K. Zhou, R. S. Chen, P. Xie, G. Shang, S. T. Han, Y. Zhou, *Adv. Electron. Mater.* **2023**, 9.
- [353] P. Feng, W. Xu, Y. Yang, X. Wan, Y. Shi, Q. Wan, J. Zhao, Z. Cui, *Adv Funct Mater.* **2017**, 27, 1604447.
- [354] C. Mahata, J. Park, M. Ismail, D. H. Kim, S. Kim, *Materials (Basel)*. **2022**, 15, 1.
- [355] X. He, K. Wang, D. Wei, H. Yong, M. Xu, B. Cao, R. Lan, X. Xin, *Carbon N. Y.* **2024**, 226, 119161.
- [356] C. Jin, W. Liu, Y. Huang, Y. Xu, Y. Nie, G. Zhang, P. He, J. Sun, J. Yang, *Appl. Phys. Lett.* **2022**, 120.
- [357] R. Liu, L. Q. Zhu, W. Wang, X. Hui, Z. P. Liu, Q. Wan, *J. Mater. Chem. C* **2016**, 4, 7744.
- [358] H. Beitollahi, S. Tajik, F. Garkani Nejad, M. Safaei, *J. Mater. Chem. B* **2020**, 8, 5826.
- [359] L. Chu, C. Xu, W. Zeng, C. Nie, Y. Hu, *IEEE Sens. J.* **2022**, 22, 7451.
- [360] L. Schmidt-Mende, J. L. MacManus-Driscoll, *Mater. Today* **2007**, 10, 40.
- [361] A. B. Djurisić, Y. H. Leung, *Small* **2006**, 2, 944.
- [362] J. Theerthagiri, S. Salla, R. A. Senthil, P. Nithyadharseni, A. Madankumar, P. Arunachalam, T. Maiyalagan, H. S. Kim, *Nanotechnology* **2019**, 30.
- [363] L. H. T. Bertoldo, G. L. Nogueira, D. H. Vieira, M. S. Klem, M. S. Ozório, N. Alves, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* **2022**, 33, 14508.
- [364] M. H. Jung, H. G. Yun, S. Kim, M. G. Kang, *Electrochim. Acta* **2010**, 55, 6563.
- [365] X. Y. Kong, Y. Ding, R. Yang, Z. L. Wang, *Science (80-.)*. **2004**, 303, 1348.
- [366] R. Bao, C. Wang, Z. Peng, C. Ma, L. Dong, C. Pan, *ACS Photonics* **2017**, 4, 1344.
- [367] L. Zhang, J. Zhang, Y. Huang, H. Xu, X. Zhang, H. Lu, K. Xu, P. K. Chu, F. Ma, *Appl. Surf. Sci.* **2021**, 537, 147785.
- [368] J. W. Kim, Y. Porte, K. Y. Ko, H. Kim, J. M. Myoung, *ACS Appl. Mater. Interfaces*

- 2017**, 9, 32876.
- [369] M. Khan, V. Nagal, S. Masrat, T. Tuba, S. Alam, K. S. Bhat, I. Wahid, R. Ahmad, *Anal. Chem.* **2022**, 94, 8867.
 - [370] A. Rajan, V. Gupta, K. Arora, *Mater. Today Commun.* **2023**, 35.
 - [371] Q. Shang, W. Peng, T. Song, Z. Li, F. Li, Y. He, *Mater. Sci. Semicond. Process.* **2023**, 162, 107489.
 - [372] M. Stephen, A. Nawaz, S. Y. Lee, P. Sonar, W. L. Leong, *Adv. Funct. Mater.* **2023**, 33.
 - [373] M. R. Radovanovic, G. M. Stojanovic, M. Simic, D. Suvara, L. Milic, S. Kojic, B. D. Škrbic, *Adv. Electron. Mater.* **2024**, 10, 2300905.
 - [374] S. K. Garlapati, M. Divya, B. Breitung, R. Kruk, H. Hahn, S. Dasgupta, *Adv. Mater.* **2018**, 30, 1.
 - [375] Y. Shi, J. Liu, Y. Hu, W. Hu, L. Jiang, *Nano Sel.* **2021**, 2, 1661.
 - [376] D. H. Vieira, G. L. Nogueira, L. Mercês, C. C. B. Bufon, N. Alves, *Adv. Electron. Mater.* **2024**, 10, 2024.
 - [377] D. H. Vieira, E. Carlos, M. S. Ozório, M. Morais, E. Fortunato, N. Alves, R. Martins, *Adv. Intell. Syst.* **2025**, 7, 2025.