

Células de perovskita desenvolvidas no Laboratório de Nanotecnologia e Energia Solar do Instituto de Química da USP

LUZ

mais eficiente

Células solares de perovskita podem ser uma alternativa mais barata e eficaz aos módulos de silício que dominam o mercado mundial de painéis fotovoltaicos

Yuri Vasconcelos

Uma nova geração de células solares feitas a partir de um material sintético cristalino conhecido como perovskita foi escolhida como uma das 10 tecnologias emergentes de 2016 pelo Fórum Econômico Mundial, organização suíça que reúne anualmente líderes empresariais e políticos para discutir questões globais. O material tem provocado entusiasmo entre cientistas por causa de sua elevada capacidade de converter fótons em elétrons, gerando eletricidade. Em julho deste ano, o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Ulsan (Unist), na Coreia do Sul, anunciou a produção em escala laboratorial de células solares de perovskita com eficiência energética de 22,1%, um recorde. Esse índice, obtido em células de pequena dimensão, menores do que os modelos comerciais, supera o dos painéis de silício, que dominam o mercado, com 90% das vendas. A taxa de conversão deles situa-se entre 15% e

20%, dependendo do grau de pureza do silício usado na construção dos módulos.

Fabricantes de painéis solares e vários grupos de pesquisa no mundo, inclusive no Brasil, trabalham no aprimoramento dessa tecnologia, que ainda precisa superar alguns obstáculos, como a baixa durabilidade, para chegar ao mercado consumidor. No Reino Unido, a Oxford Photovoltaics, uma spin-off da Universidade de Oxford, montou células de perovskita com índice de eficiência de 20% e trabalha com a possibilidade de acoplá-las aos painéis de silício para elevar a conversão de energia. O fundador da empresa, o físico Henry Snaith, foi um dos primeiros cientistas a reconhecer o potencial do material como conversor de luz solar em eletricidade. A Oxford Photovoltaics espera lançar os primeiros modelos comerciais dessas células no fim de 2018, segundo revelou Frank Averdung, presidente da companhia, à agência de notícias Bloomberg em março deste ano.

Como a célula funciona

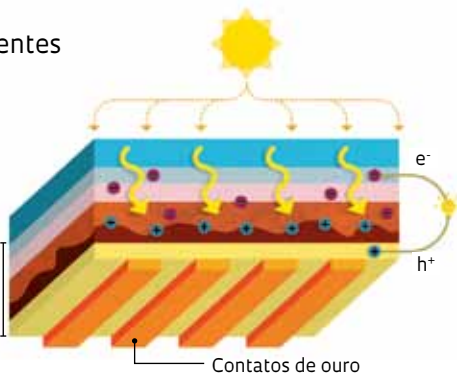
Ela é composta por um conjunto de filmes semicondutores transparentes que transformam a luz solar em corrente elétrica

1 ABSORÇÃO DA LUZ

A luz solar atravessa o substrato de vidro e é absorvida pelo filme de perovskita ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$)

- Vidro
- FTO
- TiO_2
- Perovskita
- Spiro-OMeTAD
- Ouro

1 micrômetro



2 SEPARAÇÃO DE CARGAS

A energia da luz absorvida (fótons) é suficiente para gerar elétrons (cargas negativas) e buracos (cargas positivas) na célula

3 TRANSPORTE DAS PARTÍCULAS

Os elétrons (e^-) migram para o filme de dióxido de titânio (TiO_2) e os buracos (h^+), para a camada de Spiro-OMeTAD. Uma vez separados, é difícil que se recombinem e se anulem

4 GERAÇÃO DE CORRENTE

Finalmente, os elétrons migram pela camada FTO (filme formado por óxido de estanho dopado com flúor) em direção aos contatos de ouro, gerando a corrente elétrica

“As células solares de perovskita são uma tecnologia recente e promissora”, atesta o químico Rodrigo Lopes Sauer, presidente-executivo da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (Absolar), entidade que reúne empresas do setor. “É positivo que existam inovações e projetos em desenvolvimento como esse no segmento fotovoltaico, ainda mais no Brasil, um país com enorme potencial de geração de energia solar”, diz (ver Pesquisa FAPESP nº 258). A produção nacional desse tipo de energia no país ainda é pequena, de 176 megawatts (MW), e corresponde a 0,1% da matriz elétrica, mas tem crescido em ritmo acelerado. “Até o fim do ano deve atingir 1 gigawatt (GW)”, informa Sauer. Em junho, começou a operar o Parque Solar da Lapa, no sertão baiano, o maior do país, com capacidade para produzir 158 MW, o suficiente para atender às necessidades de 166 mil famílias por ano.

A perovskita usada em células solares é um material semicondutor, de fórmula química $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, cuja estrutura se assemelha à do mineral titanato de cálcio (CaTiO_3) descoberto nos Montes Urais, na Rússia, em 1836. Esse mineral foi batizado de perovskita em homenagem ao mineralogista russo Lev Alexeievitch Perovski (1792-1856). A matéria-prima empregada na produção das células não

é retirada da natureza, mas sintetizada em laboratório. Elas são construídas em camadas, com diferentes filmes finos com composição química e funções diferentes (ver infográfico acima).

A evolução dessa tecnologia em curto espaço de tempo chama a atenção dos cientistas. Quando a perovskita foi aplicada pela primeira vez a uma célula solar, em 2009, o índice de conversão de luz em energia elétrica era inferior a

4%. Menos de uma década depois, esse percentual cresceu mais de cinco vezes (ver gráfico abaixo) e deve continuar evoluindo. Os professores Yang Yang, da Universidade da Califórnia, em Los Angeles, nos Estados Unidos, e Jingbi You, do Instituto de Semicondutores da Academia Chinesa de Ciências, estimam que essas células solares devem alcançar 25% de eficiência energética em dois anos, segundo artigo publicado na revista *Nature* de abril deste ano. As pastilhas de silício, por sua vez, já estão no mercado há mais de 50 anos e parecem ter atingido seu limite. Nos últimos 15 anos, não foram registrados grandes progressos em sua taxa de conversão.

GRAU DE PUREZA

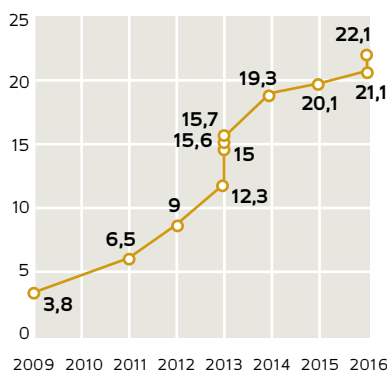
As células de perovskita também são mais baratas e fáceis de produzir do que as de silício. “Para que se obtenha alta eficiência energética, as células de silício precisam ter um grau de pureza muito elevado, o que aumenta o consumo de energia durante a fabricação e eleva seu custo”, explica a química Ana Flávia Nogueira, professora do Instituto de Química da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e líder de um dos grupos de pesquisa desse tipo de dispositivo no país, o Laboratório de Nanotecnologia e Energia Solar (LNES). A pureza do silício é necessária porque pequenas imperfeições no cristal interferem em sua capacidade de transformar a luz absorvida em eletricidade.

Já as células solares de perovskita não requerem elevada pureza, uma vez que defeitos em sua estrutura não reduzem sua eficiência. Elas são feitas com compostos químicos baratos e podem ser elaboradas com métodos simples que reduzem seu custo. Além disso, o processo produtivo não contribui para o aquecimento global. Durante a produção das lâminas de silício, o dióxido de silício (SiO_2), matéria-prima básica do dispositivo, precisa ser fundido a altas temperaturas, em torno de 1.500 °C, liberando dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera. “A fabricação das células de perovskita não emite CO_2 ”, diz a pesquisadora da Unicamp.

O grupo de Ana Flávia Nogueira foi o primeiro a fazer células solares de perovskita no Brasil, em 2016. “Esse estudo começou com a dissertação de mestrado do químico Rodrigo Szostak. Não foi difícil iniciar o desenvolvimento dessas células,

Alto rendimento

Confira a evolução da eficiência energética da perovskita em testes de laboratório (em %)



já que nosso laboratório pesquisa desde 2004 células solares orgânicas e células sensibilizadas por corantes, duas tecnologias que serviram de inspiração para as células de perovskita”, conta a pesquisadora. O dispositivo desenvolvido no LNES já atinge valores de eficiência próximos a 16% e deve alcançar 18% até o fim do ano.

Outra característica das células solares de perovskita é sua espessura, em torno de 1 micrômetro (a milionésima parte do metro), diante de cerca de 180 micrômetros das pastilhas de silício. “Elas são produzidas na forma de filmes ultrafinos e podem ser semitransparentes, o que poderá levar à fabricação de painéis leves e flexíveis, permitindo uma quantidade maior de aplicações”, afirma a química Silvia Letícia Fernandes, que fez seu doutorado sobre o tema. Um dos problemas das células fotovoltaicas de silício é que elas são pesadas e rígidas, o que dificulta e limita os lugares de instalação dos módulos solares.

Silvia defendeu no ano passado pela Universidade Estadual Paulista (Unesp) a tese de doutorado “Desenvolvimento de células solares de perovskita baseadas em filmes de óxidos nanoestruturados”, sob orientação da professora Maria Aparecida Zaghete, do Instituto de Química da Unesp de Araraquara. O trabalho teve apoio do professor Carlos Frederico de Oliveira Graeff, da Faculdade de Ciências da Unesp de Bauru, para preparação das células solares. Maria Aparecida e Graeff



O Parque Solar da Lapa (BA), o maior do país, gera energia suficiente para atender 166 mil famílias por ano

são pesquisadores do Centro de Desenvolvimento de Materiais Funcionais (CDMF), um dos Centros de Pesquisa, Inovação e Difusão (Cepid) apoiados pela FAPESP.

CALCANHAR DE AQUILES

Mesmo com tantas vantagens, as células de perovskita ainda precisam vencer desafios para se tornar um produto co-

mercial e disputar espaço no mercado de energia solar fotovoltaica. O principal deles é a baixa durabilidade do material. “Esse é o calcanhar de aquiles”, admite o químico Rodrigo Szostak, do grupo de pesquisa da Unicamp. “Outro grande problema em relação ao silício é a estabilidade. A perovskita é sensível à água e à umidade, que causam sua degradação”, afirma. As primeiras células feitas no mundo com o material permaneciam estáveis por apenas alguns minutos, mas alterações em sua estrutura elevaram a durabilidade para pouco mais de um ano.

Recentemente, o grupo do professor Michael Gratzel, da Escola Politécnica

Maior poder de absorção

Equipe do MIT usa nanotubos de carbono e cristais nanofotônicos para criar dispositivo solar mais eficiente

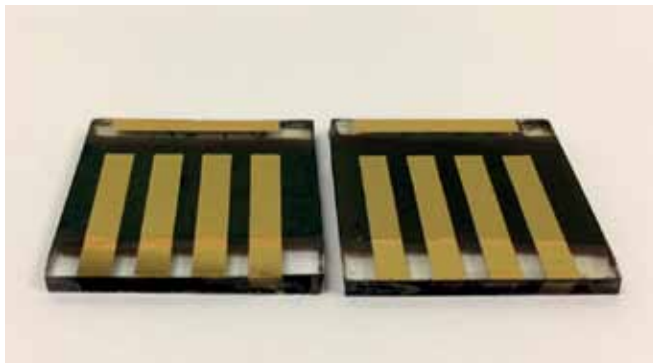
Um grupo de pesquisadores do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), liderado pela engenheira mecânica Evelyn Wang, o físico Marin Soljačić e o aluno de doutorado David Bierman, está trabalhando em um novo tipo de célula solar, capaz, segundo eles, de gerar o dobro de energia do que os painéis de silício existentes. O segredo da nova tecnologia é sua elevada capacidade de absorção da radiação solar, de acordo com a publicação *MIT Tech Review*. As células fotovoltaicas modernas absorvem apenas comprimentos de

ondas da luz na faixa do visível, do violeta ao vermelho; o restante é perdido. O dispositivo é capaz de absorver a energia de todo espectro solar para gerar eletricidade.

Outra vantagem é que esse tipo de célula poderia ser eficiente também em dias sem sol. Embora dependa da radiação solar para gerar eletricidade, uma vez que o material absorvedor tenha captado essa luz, ele gera calor. Esse calor pode ser armazenado para produzir energia em dias nublados ou mesmo durante a noite. Em laboratório,

o protótipo apresentou um índice de eficiência relativamente baixo, de 6,8%, mas seus inventores acreditam que ele tem potencial para evoluir.

Alguns obstáculos precisam ainda ser ultrapassados, como o elevado custo de fabricação do novo sistema. Outro é que a tecnologia se mostre viável em condições ambientais normais, já que, até o momento, os testes foram realizados apenas no vácuo e não no ambiente. O novo dispositivo foi avaliado pela *MIT Tech Review* como uma tecnologia promissora.



Material criado pelo grupo da Unesp de Araraquara alcançou 15% de eficiência

mento das células solares de perovskita. A inovação foi acrescentar um aerogel de dióxido de titânio (ou titânia) na arquitetura do dispositivo a fim de elevar sua taxa de conversão. A pesquisa foi liderada pela equipe do físico Carlos Rambo, coordenador do Laboratório de Materiais Elétricos (Lamate) do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, e teve a parceria das físicas Maria Luísa Sartorelli e Françoise Toledo Reis, do Laboratório de Sistemas Nanoestruturados (LabSiN) do Departamento de Física.

“O aerogel é um material conhecido como fumaça sólida por apresentar uma elevada área superficial e ser muito leve. Desenvolvemos pela primeira vez no mundo células solares de perovskita à base de aerogel”, afirma Rambo. “Adicionamos o aerogel de dióxido de titânio na arquitetura do dispositivo e duplicamos sua eficiência em relação ao de uma célula com camada compacta de titânia.”

Para Rodrigo Sauer, da Absolar, os esforços de pesquisa no Brasil e no mundo são fundamentais para melhorar as características físicas e químicas das células de perovskita e aperfeiçoar o processo produtivo. “O desafio atual é transformar células de pequeno porte, que apresentam bons resultados em bancada de laboratório, em produtos comerciais, produzidos em larga escala”, aponta Sauer. De acordo com ele, o sucesso dessa nova tecnologia vai depender da existência de um módulo solar competitivo que atenda às exigências do mercado. ■

Federal de Lausanne (EPFL), na Suíça, um dos mais avançados no estudo de células de perovskita, conseguiu fabricar módulos solares de 10 por 10 centímetros quadrados (cm²) por meio de um processo adaptado para produção industrial. Os dispositivos apresentaram eficiência de 11,2% e mostraram-se estáveis por mais de 10 mil horas (415 dias). Apesar do avanço, a durabilidade ainda é muito inferior à dos painéis de silício, que operam sem sofrer degradação por até 25 anos.

Outro problema a ser superado é o uso de chumbo na montagem da célula, um elemento químico que traz riscos à saúde e ao ambiente. “O chumbo é sempre uma preocupação ambiental grande, mas a quantidade utilizada é muito pequena. Seu uso em células solares na forma de filmes finos seria muito menos impactante para o ambiente do que as baterias de chumbo-ácido usadas pela indústria automobilística”, frisa Silvia Fernandes. O problema poderia ser contornado com o descarte adequado e a utilização das células em locais seguros. “O uso do dispositivo em parques solares, com terreno preparado, tem baixo risco de causar dano ambiental”, afirma Ana Flávia.

MAIS ESTÁVEL

Para ajudar a contornar a baixa estabilidade das células de perovskita, o grupo da Unesp inseriu na composição da célula filmes de pentóxido de nióbio (Nb₂O₅), o que a tornou mais estável. “A célula solar é formada basicamente por um filme de perovskita e outros dois filmes, um responsável pelo transporte dos elétrons e outro pelo de buracos [um buraco é uma partícula caracterizada pela ausência de um elétron, tendo carga de mesmo valor, mas de sinal oposto à do elétron]. Esses elétrons e buracos gerados pela luz migram para lados opostos do material, criando uma tensão que pode ser usada

O uso de chumbo na célula e sua reduzida durabilidade são problemas que ainda precisam ser superados

para alimentar dispositivos elétricos”, explica Silvia. “A maioria das células usa como transportador de elétrons o dióxido de titânio [TiO₂]. Nós introduzimos o pentóxido de nióbio, que se mostrou muito eficiente e ainda melhorou a estabilidade.”

O dispositivo montado na Unesp apresentou eficiência de até 15%. Parte do estudo foi feita no Laboratório Federal Suíço de Ciência e Tecnologia de Materiais (Empa), sob orientação do professor Frank Nüesch. “Em 2015, passei cinco meses no laboratório do professor Nüesch. Ele nos cedeu o espaço físico e a experiência na montagem das células. Nós utilizamos os filmes de pentóxido de nióbio preparados no Brasil e montamos as células lá. Hoje conseguimos fazer toda a montagem e caracterização dos dispositivos no Laboratório de Novos Materiais e Dispositivos (LNMD), com a mesma qualidade”, diz Silvia.

Um terceiro grupo de pesquisa brasileiro, da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), trabalha no aprimora-

Projetos

1. Nanoestruturas híbridas em células solares de terceira geração (3G) (nº 14/21928-4); **Modalidade** Auxílio à Pesquisa – Regular; **Pesquisadora responsável** Ana Flávia Nogueira (Unicamp); **Investimento** R\$ 291.986,83.
2. Desenvolvimento de células solares híbridas baseadas em filmes nanoestruturados de ZnO e Nb₂O₅ (nº 12/07745-9); **Modalidade** Bolsa de Doutorado – Brasil; **Pesquisadora responsável** Maria Aparecida Zaghete Bertochi (Unesp); **Bolsista** Silvia Letícia Fernandes (Unesp); **Investimento** R\$ 106.393,98 e R\$ 45.284,17 (Bolsa Estágio de Pesquisa no Exterior, nº 14/23336-7).

Artigos científicos

- SZOSTAK, R. *et al.* Understanding perovskite formation through the intramolecular exchange method in ambient conditions. **Journal of Photonics for Energy**. v. 7, n. 24. mai. 2017.
- FERNANDES, S. L. *et al.* Nb₂O₅ hole blocking layer for hysteresis-free perovskite solar cells. **Materials Letters**. v. 181. 15. out. 2016.
- PINHEIRO, G. K. *et al.* Increasing incident photon to current efficiency of perovskite solar cells through TiO₂ aerogel-based nanostructured layers. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. v. 527, p. 89-94. 20. ago. 2017.