

Chips fotônicos em construção

Chip do CPQD, planejado para aumentar a velocidade da transmissão de dados pela internet

Universidades e centros nacionais de pesquisa desenvolvem protótipos de dispositivos à base de luz que prometem mais velocidade e gasto menor de energia

CARLOS FIORAVANTI

Em maio do ano passado, o engenheiro eletricista Hugo Hernandez-Figueroa apresentou em um congresso em Chengdu, sudoeste da China, o resultado de um trabalho de seu grupo de pesquisa na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Era um dispositivo chamado isolador óptico, feito em colaboração com o Instituto de Tecnologia de Tóquio, no Japão. Com 150 micrômetros quadrados (1 micrômetro é a milésima parte do milímetro), a peça recebe a luz de uma fonte, tipicamente um laser de alta potência, e a transmite para o circuito óptico sem refleti-la, evitando que a radiação luminosa enviada de volta prejudique o funcionamento da fonte.

Em novembro, houve outra razão para comemorar. Deram certo os experimentos do mesmo grupo para medir a atividade neuronal do coração de um camundongo, usando um sensor fotônico de 1 milímetro quadrado (mm²), dotado de nanoantenas, que capta a variação do campo elétrico produzido pelos neurônios. À medida que avançar, o dispositivo, dessa vez elaborado com pesquisadores do centro nanoGune, da Espanha, poderia ser útil no diagnóstico médico não invasivo de doenças neurodegenerativas e na preservação de órgãos para transplante.

Os protótipos da Unicamp e os de outros centros de pesquisa no país expressam o esforço nacional em acompanhar o desenvolvimento de uma nova geração de chips, os fotônicos. Dispositivos desse tipo geram, transmitem e captam informações por meio de fótons, as partículas associadas

a uma onda luminosa, controlando sua amplitude (distância vertical entre o eixo central e o ponto mais alto ou mais baixo da onda), frequência (número de repetições por unidade de tempo) e fase (deslocamento espacial ou temporal da onda). Tornaram-se um componente visado por empresas de telecomunicações em razão de sua eficiência na transmissão de dados, compactação e economia de energia. Em razão dos altos custos de produção, porém, seu emprego em larga escala ainda pode demorar alguns anos.

À medida que seu uso for ampliado, eles poderão aumentar o desempenho e a eficiência energética das redes 5G, de supercomputadores e de datacenters (*ver Pesquisa FAPESP nº 337*), aprimorar diagnósticos médicos e aumentar a segurança dos carros sem motorista, complementando as funcionalidades dos chips eletrônicos, já próximos dos limites de tamanho e velocidade de processamento. Em outros países, muitos centros de pesquisa, empresas e governos correm para ocupar seus espaços em um mercado global estimado em US\$ 9,4 bilhões (R\$ 56,4 bilhões) em 2032 (*ver box na página 66*).

Os também chamados processadores de luz ou circuitos integrados fotônicos já são realidade, mas a produção ainda é feita sob encomenda por poucas fábricas, principalmente na China, em Taiwan, em Singapura, na Bélgica, nos Estados Unidos e no Canadá. “Temos capacidade de fazer e caracterizar protótipos de chips fotônicos em universidades e centros de pesquisa de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais, mas nossa produção ainda é artesanal”, comenta Hernan-

dez-Figueroa. “Geralmente são os pesquisadores ou os estudantes que têm de lidar com os equipamentos.” Para contar com o apoio de equipes especializadas e assegurar a qualidade dos próximos protótipos, ele encomendará a fabricação do isolador e do sensor a uma empresa da Bélgica, a um custo próximo a R\$ 200 mil para 15 cópias do isolador e 15 do sensor.

Avantagem de os próprios estudantes – normalmente, de doutorado – operarem as máquinas de fabricação de protótipos é a possibilidade de formar especialistas com visão prática e aptos a resolver eventuais problemas ao longo do processo de produção, na visão do físico da Unicamp Gustavo Wiederhecker, coordenador do Programa FAPESP em Tecnologias Quânticas (QuTia). “A fotônica é o pilar do programa de tecnologias quânticas e a subárea com mais pesquisadores, em São Paulo e em outros estados.”

Para reforçar a infraestrutura, o Centro de Componentes Semicondutores e Nanotecnologias (CCSNano) da Unicamp deverá receber em outubro uma máquina de litografia de feixe de elétrons, capaz de gravar o molde que permite escavar nas placas de silício as trilhas por onde correrá a luz. Comprado por meio do programa Multiusuários da FAPESP a um custo próximo a US\$ 2,8 milhões (R\$ 17 milhões), o equipamento

vai se somar a outro, com as mesmas funções, em operação desde 2011.

“Todos os equipamentos de prototipagem necessitam de manutenção constante”, diz Wiederhecker. “Se tem apenas um e quebra, o trabalho pode ficar parado durante meses.” Por causa disso, os pesquisadores às vezes têm de fazer o que ele chama de peregrinação entre universidades de Minas, Rio e São Paulo em busca de máquinas que possam usar.

Os chips fotônicos contêm dois ou mais componentes ópticos que se somam aos eletrônicos, substituindo parcialmente suas funções. “O chip não é só fotônico, e provavelmente nunca será, porque o laser, um componente indispensável, precisa da corrente elétrica para emitir energia na forma de fótons”, elucida o engenheiro eletricitista Marcelo Segatto, da Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes). “Uma das funções dos elétrons é aquecer partes do chip, mudar o índice de refração e alterar a quantidade de luz transmitida.”

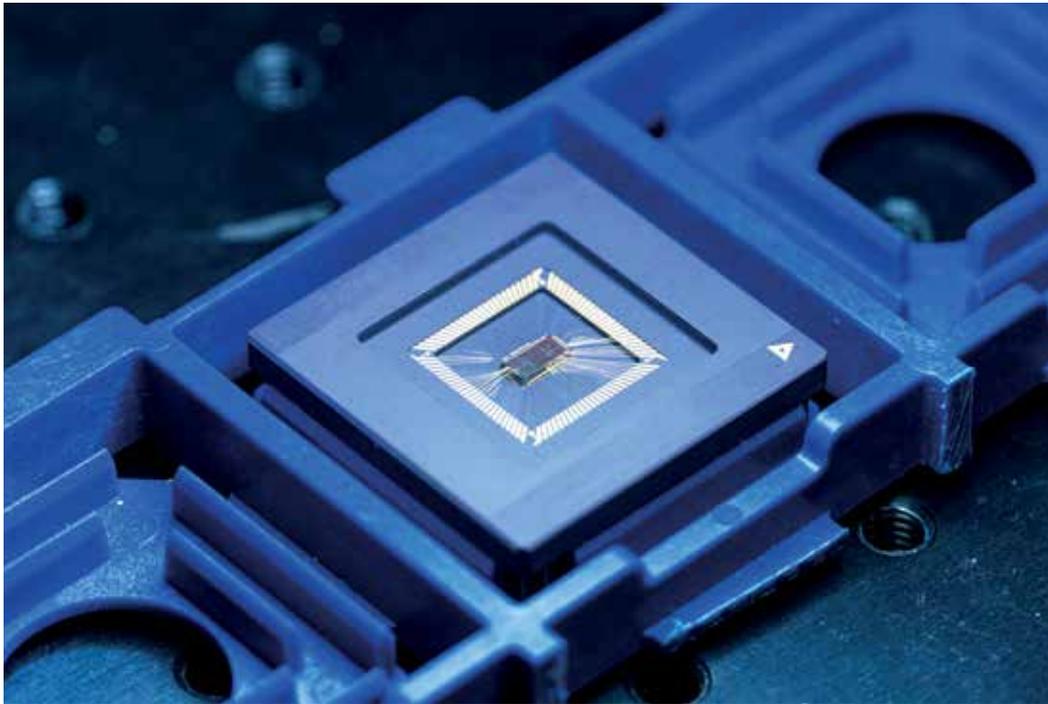
Nos chips desse tipo, os fótons percorrem um tipo de trilha e os elétrons outro, rumo aos dispositivos, os transistores, feitos com fosfeto de índio ou silício, o material dominante nos circuitos já usados em computadores e celulares. “A diferença com os chips de hoje é que a fotônica faz bem o que a eletrônica faz e o que a eletrônica não consegue, em razão das propriedades da luz”, conta ele. “Um exemplo? Dois fótons

Tecnologias complementares

Os chips eletrônicos são mais fáceis de manipular e mais compactos, enquanto os fotônicos ganham em eficiência energética e precisão

| | CHIP ELETRÔNICO | CHIP FOTÔNICO |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------|
|  Forma de transmissão de informação | Elétrons (eletricidade) | Fótons (luz) |
|  Frequência de transmissão de dados | Baixa (giga-hertz) | Alta (tera-hertz) |
|  Eficiência energética | Baixa, com alta liberação de calor | Alta, com liberação de calor quase nula |
|  Precisão e sensibilidade dos sensores | Média | Altíssima |
|  Controle das propriedades | Fácil | Complexa |
|  Tamanho dos componentes | Muito pequenos (3 nm) | Pequenos (200 nm) |
|  Número de componentes (transistores etc.) | Milhões a bilhões | Centenas a milhares |
|  Dispositivo principal | Transistor | Não tem (vários elementos para funções diferentes) |

FONTES MATEUS S. COELHO, ENZO G. P. P. DA CRUZ, FELIPE A. M. SILVA, PABLO R. N. MARCIANO/UFES



Chip da Ufes, parte de uma rede neural óptica, com baixo uso de energia

conseguem passar um pelo outro sem interagir, como dois fantasmas, mas dois elétrons não.”

Por meio de um edital do Conselho Nacional das Fundações Estaduais de Amparo à Pesquisa (Confap) e da Comunidade Europeia, lançado em 2022, Segatto construiu o protótipo de um chip fotônico com 1 mm² que simula o funcionamento de um neurônio do cérebro. “Um chip fotônico que funciona como um neurônio gasta mil vezes menos energia do que um equivalente eletrônico, por ter uma estrutura mais simples”, descreve Segatto, que integra um dos Centros de Pesquisa em Engenharia (CPE) em inteligência artificial apoiados pela FAPESP.

COMO UM NEURÔNIO

A equipe da Ufes desenhou os dispositivos e as funções do chip em um programa de computador e enviou o layout para uma empresa do Reino Unido, que o construiu. O chip que reproduz o funcionamento de um neurônio foi então testado na Universidade de Trento, na Itália, com a participação da equipe brasileira. Um artigo publicado em dezembro na *Journal of Lightwave Technology* descreve um mecanismo para regular a chegada da informação na outra ponta do chip. O feixe de luz é dividido em vários subfeixes e cada um deles passa por um a sete dispositivos em forma de espiral. Os que têm de percorrer mais espirais ficam mais atrasados em relação aos que percorrem menos. Cada espiral atrasa o subfeixe em 25 picossegundos (10⁻¹² segundos).

Como o protótipo do chip da Ufes é feito com silício, Segatto pensou que a fabricante estatal

de semicondutores, o Centro Nacional de Tecnologia Eletrônica Avançada (Ceitec), de Porto Alegre, poderia continuar o desenvolvimento, por já trabalhar com esse material. Com esse objetivo, o grupo da Ufes e outros especialistas dessa área da Unicamp e do Sistema Nacional de Laboratórios de Fotônica (Sisfóton) mandaram em janeiro de 2023 uma carta ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) propondo o fortalecimento do Ceitec, que tem passado por maus bocados.

Criada em 2002, a companhia sofreu um duro golpe em 2021, quando o governo federal decretou sua extinção. O Tribunal de Contas da União travou a operação e o governo atual anulou o decreto, mas nesse período 100 dos 170 funcionários deixaram o Ceitec. Um plano de reestruturação aprovado em dezembro de 2023 prioriza a implantação, a partir deste ano, de equipamentos para a produção dos chamados semicondutores de potência, usados para conversão de energia em usinas eólicas ou solares.

“Poderemos usar parte da infraestrutura para desenvolver protótipos na área de fotônica, mas essa não é uma prioridade”, comenta o engenheiro electricista Eric Fabris, superintendente de Produto, Pesquisa e Desenvolvimento da empresa. “Por enquanto, as chances de o Ceitec entrar intensamente em fotônica são remotas.”

Em 2018, ao iniciar com sua equipe a construção de um chip fotônico, o tecnólogo em te-

lecomunicações Rafael Carvalho Figueiredo, do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPQD), também de Campinas, já sabia que seria muito difícil ir além do estágio de protótipo laboratorial. “O mercado nacional é, em grande parte, focado na integração de componentes importados, mas projetos como esse são passos importantes para impulsionar o desenvolvimento local e abrir novas oportunidades para a indústria”, comenta. O trabalho era parte do projeto Teranet – Sistemas Ópticos em 1 Tb/s (terabite por segundo) para Internet do Futuro, apoiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) com recursos do Fundo para o Desenvolvimento Tecnológico das Telecomunicações (Funttel).

O chip foi desenhado no CPQD, fabricado na Bélgica, e finalizado no centro de Campinas. Com aplicações potenciais em telecomunicações, o dispositivo de 25 mm² tem um transceptor, que combina transmissor e receptor em um único dispositivo, convertendo sinais elétricos em luminosos ou vice-versa.

Sua capacidade de transmissão é de 1,2 Tb/s, acima dos 800 gigabites por segundo (Gbp/s) dos equivalentes comerciais mais avançados. Em março, os testes do chip, usado em uma das pontas de um feixe com 500 quilômetros (km) de fibras ópticas, terminaram com resultados satisfatórios. “Podemos melhorar tendo um parceiro para prosseguir o desenvolvimento”, diz Figueiredo.

Seu colega, o também engenheiro elétrico Tiago Sutili, intervém: “Mesmo que o trabalho não prossiga, o conhecimento não se perde”. Segundo ele, a experiência embasou novas pesquisas, como o desenvolvimento de um modulador eletro-óptico, um dos principais componentes do transmissor, descrito em setembro de 2023 na *Scientific Reports*, em colaboração com pesquisadores da Universidade Estadual Paulista (Unesp). “Também aproveitamos o que aprendemos para melhorar outros processos de micro-

O mundo dos fótons se move

Governos, empresas e institutos de pesquisa anunciam inovações e lutam por pioneirismo na área

Centros de pesquisa da China e dos Estados Unidos apresentaram avanços recentes que poderiam acelerar o desenvolvimento dos chips fotônicos. Em maio do ano passado, pesquisadores do Instituto de Tecnologia da Informação e Microssistemas de Xangai, em colaboração com o Instituto de Tecnologia de Lausanne, na Suíça, anunciaram uma inovação capaz de ampliar e baratear a produção dos chips fotônicos: a substituição de um material semicondutor de alto custo usado em sua produção, o niobato de lítio, pelo tantalato de lítio, que também converte eletricidade em luz, com custos menores.

Por sua vez, em dezembro, na *Nature Photonics*, um grupo do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), nos Estados Unidos, e da empresa finlandesa Nokia descreveu um chip fotônico construído por meio de processos de fundição comerciais, o que poderia reduzir os custos de produção. Com módulos interconectados que simulam uma rede neural, o dispositivo concluiu

os cálculos-chave para uma tarefa de classificação de aprendizado de máquina em menos de meio nanossegundo, com 92% de precisão, um desempenho equivalente ao do dispositivo eletrônico tradicional.

Governos e empresas também se mobilizam. Em outubro, o Departamento de Comércio dos Estados Unidos anunciou que poderá fornecer até US\$ 93 milhões (R\$ 558 milhões) de financiamento para a empresa de semicondutores ópticos Infinera aumentar em 10 vezes a produção de chips fotônicos na cidade de San Jose, na Califórnia. As gigantes da tecnologia dos Estados Unidos – Intel, Cisco, Agilent, Ciena, Hewlett Packard e IBM – e ao menos uma da China, a Huawei, correm para concluir o desenvolvimento de seus produtos, integrando componentes eletrônicos e fotônicos.

Na Europa ocorre o mesmo. Em maio de 2024, a empresa de computação fotônica iPronics, uma spin-off da Universidade Politécnica de Valência, na Espa-



Produção de chip fotônico que simula o funcionamento de um neurônio em um laboratório da Universidade Técnica Estatal Bauman de Moscou

nha, anunciou investimentos de € 3,7 milhões (R\$ 22 milhões) para ampliar a escala de produção e fazer chegar aos usuários um chip fotônico multifuncional e programável, apresentado três meses antes na *Nature Communications*.

Em setembro, a Epos anunciou a abertura de uma fábrica em Milão, na Itália, para produzir chips fotônicos de

fabricação e integração eletro-óptica de chips fotônicos”, acrescenta.

O engenheiro electricista Arismar Cerqueira Sodré Junior, com sua equipe do Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel), uma instituição de ensino superior privada em Santa Rita do Sapucaí, Minas Gerais, encontrou outros caminhos. De 2019 a 2023, um dos pesquisadores de seu grupo, o engenheiro de telecomunicações Eduardo Saia Lima, como parte do doutorado, trabalhou na caracterização e na aplicação de um chip fotônico projetado por pesquisadores de duas universidades da Itália, com quem os brasileiros colaboravam, e fabricado no Reino Unido.

APARELHO TURBINADO

Lima usou o chip para multiplicar a frequência da luz de 2,6 giga-hertz (GHz) para 26 GHz, como detalhado em um artigo publicado em setembro de 2022 na *Scientific Reports*. “Conseguimos gerar um sinal 5G utilizando luz com um aparelho de custo relativamente baixo e com o mesmo



Equipamento de litografia da Unicamp para modelagem de chips: capaz de escrever em resoluções menores que 10 nanômetros

vidro, para computação quântica, como resultado de investimentos de US\$ 8,5 milhões (R\$ 51 milhões), parte vinda de empresas dos Estados Unidos e parte do Conselho de Inovação Europeu (EIC). Em um consórcio de 11 países, a União Europeia anunciou em novembro investimentos de € 380 milhões (R\$ 2,3 bilhões) para construir uma planta-piloto de chips fotônicos.

A Rockley Photonics, de Oxford, no Reino Unido, comunicou em setembro de 2023 que continuava a “fazer rápido progresso em direção à detecção não invasiva de glicose usando sua plataforma proprietária de fotônica de silício”. O objetivo é monitorar os componentes do sangue com um dispositivo vestível dotado de sensores que possam monitorar o sangue de modo não invasivo, por meio da espectroscopia de infravermelho de onda curta, em tempo real. Um dispositivo semelhante, para medir a pressão arterial, passou com resultados considerados satisfatórios pela primeira etapa de testes em seres humanos.

desempenho que um gerador de radiofrequência comercial, que é muito caro”, conta. Segundo ele, esse ganho pode ser muito útil nas redes de internet 5G.

“O trabalho não parou”, comenta Sodré Junior. Com base nos resultados, ele começou a trabalhar com um grupo da Unicamp coordenado pelo engenheiro eletrônico Evandro Conforti no desenvolvimento de um amplificador óptico semiconductor, também para multiplicação de frequência para internet de alta velocidade. Projetado por uma empresa dos Países Baixos, o chip será feito em Berlim, na Alemanha, a um custo aproximado de € 20 mil (R\$ 120 mil). “O chip tem 2 mm por 5 mm e deve conter uma chave fotônica de alta velocidade, com várias saídas para a luz”, comenta Conforti.

Com esse e outros trabalhos, os pesquisadores ganham experiência em projetar e testar chips fotônicos, além de construir protótipos, ainda que a produção nacional tão cedo não seja viável, em vista dos altos investimentos e da concorrência internacional. “Não compensa investir em uma fábrica no Brasil”, comenta Wiederhecker, da Unicamp. “O que precisamos é de uma sala limpa [ambiente esterilizado], que permita a qualquer pesquisador concluir seus trabalhos sem interrupções e aos tecnólogos desenvolver novas aplicações. Esse é o modelo de sucesso que tenho visto em outros países.” ●

Os projetos e os artigos científicos consultados para esta reportagem estão listados na versão on-line.