

Dispositivos optoeletrônicos estratégicos: fotodetectores de infravermelho, células fotovoltaicas e *lab-on-a-chip*



Seminário CEFET- RJ
Dezembro 2022

Patrícia Lustoza de Souza

Equipe

PUC-Rio, IEAv, IME,
UFRJ e CEFET- RJ



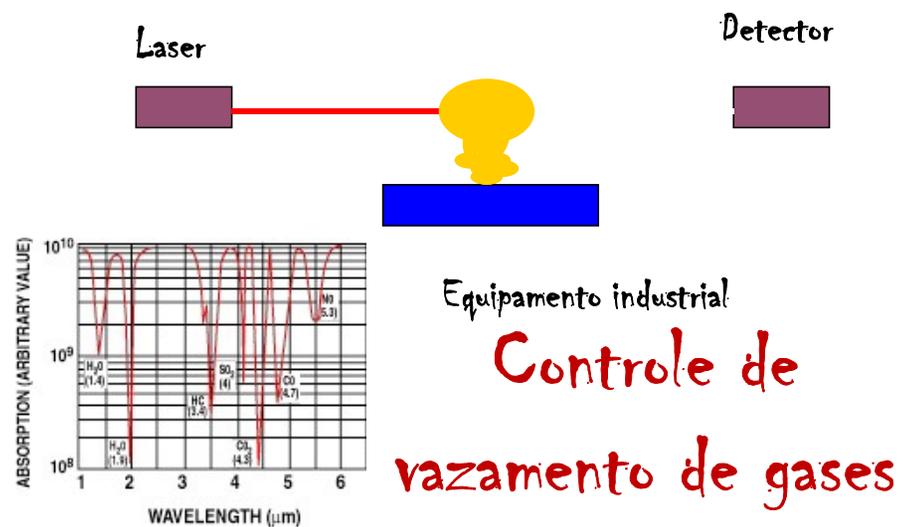
DISPOSITIVOS DE FOTODETECÇÃO: CÉLULAS FOTOVOLTAICAS E FOTODETECTORES DE INFRAVERMELHO

Dispositivos estratégicos:

- *Fotodetectores de infravermelho*

Os fotodetectores de infravermelho, em função de suas aplicações militares, são difíceis de serem adquiridos no mercado internacional apesar das inúmeras aplicações civis, daí a necessidade de se desenvolver essa tecnologia no país. Sensores de infravermelho possuem uma gama enorme de aplicações.

Aplicações de detecção no infravermelho



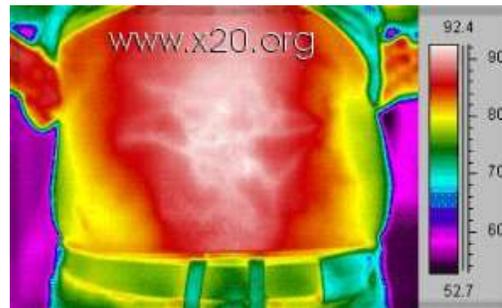
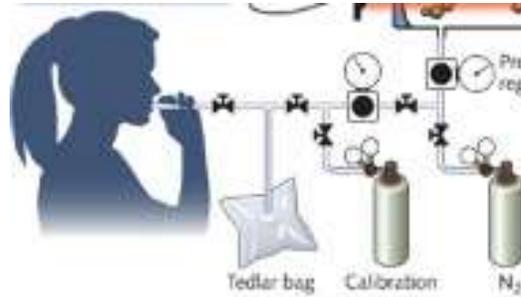
Aplicações de detecção no infravermelho



Imageamento



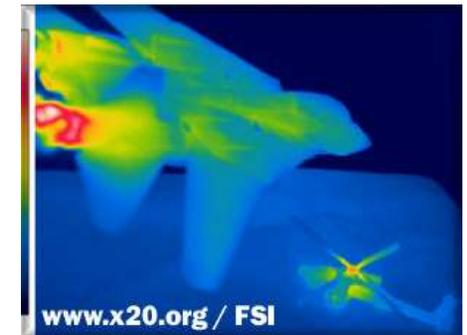
Medicina



Astronomia



Militar



DISPOSITIVOS DE FOTODETECÇÃO: CÉLULAS FOTOVOLTAICAS E FOTODETECTORES DE INFRAVERMELHO

Dispositivos estratégicos:

- *Fotodetectores de infravermelho*

Os fotodetectores de infravermelho, em função de suas aplicações militares, são difíceis de serem adquiridos no mercado internacional apesar das inúmeras aplicações civis, daí a necessidade de se desenvolver essa tecnologia no país. Sensores de infravermelho possuem uma gama enorme de aplicações.

- *Células fotovoltaicas*

A pesquisa científica e tecnológica na área de conversão de energia solar em energia elétrica é fundamental para melhorar a qualidade da matriz energética no mundo todo e, em particular, no Brasil e também para utilizá-la de forma mais eficiente em satélites espaciais, onde seu uso é mandatório.

DISPOSITIVOS DE FOTODETECÇÃO: CÉLULAS FOTOVOLTAICAS E FOTODETECTORES DE INFRAVERMELHO

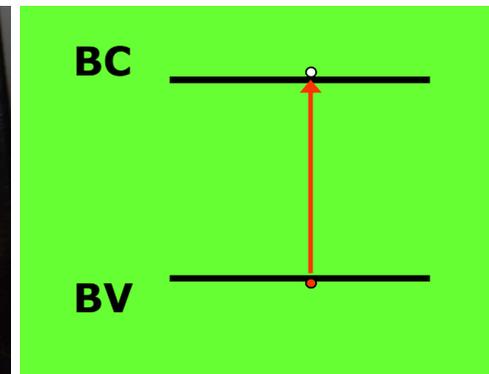
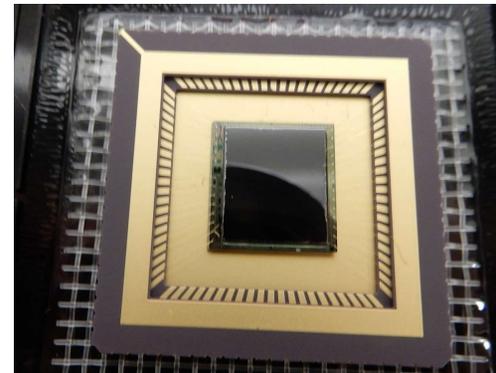
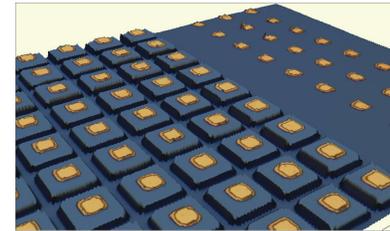
- A. Fotodiodos para o SWIR baseados em semicondutores III-V*
- B. QWIPs usando superredes assimétricas*
- C. Células fotovoltaicas de junção tripla*

FOTODETECTORES DE INFRAVERMELHO

Fotodiodos para o SWIR baseados em semicondutores III-V

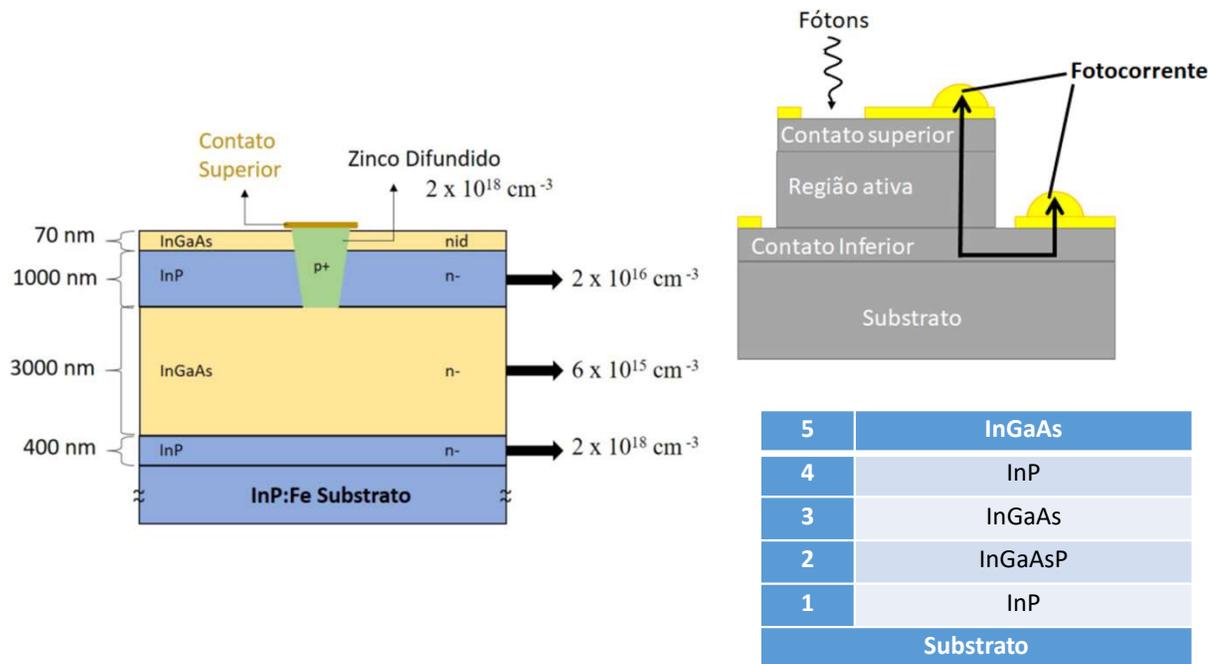
1 a 1,7 μm faixa do SWIR

- sensoriamento remoto, avaliação de coberturas vegetais e cursos d'água
- combate a incêndios florestais
- localização de pistas clandestinas
- visualização em missões noturnas
- segunda cor em sistemas de identificação e rastreamento de alvos aéreos
- designadores de alvos
- auxílio a diagnósticos e acompanhamento de tratamento médicos



FOTODETECTORES DE INFRAVERMELHO PARA O SWIR

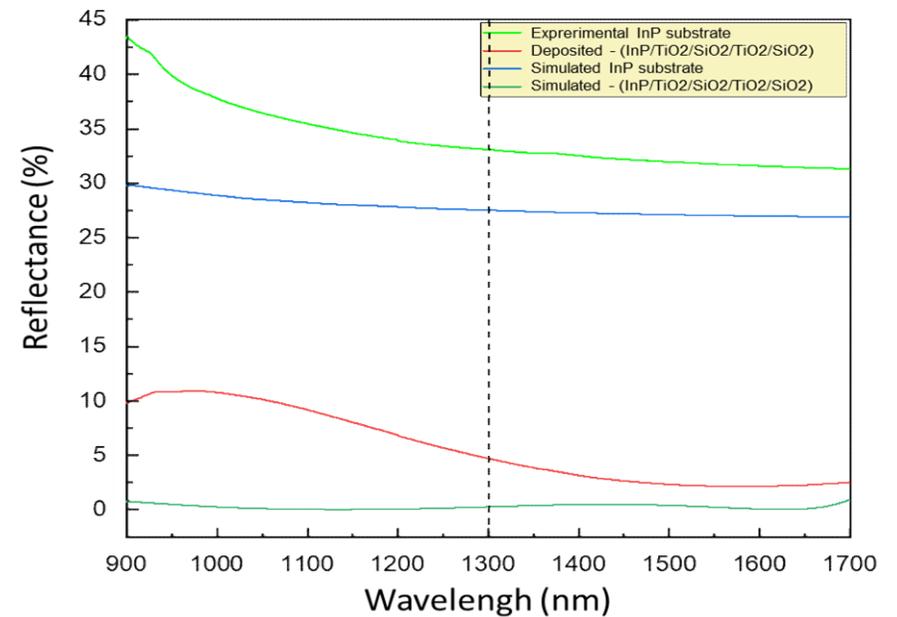
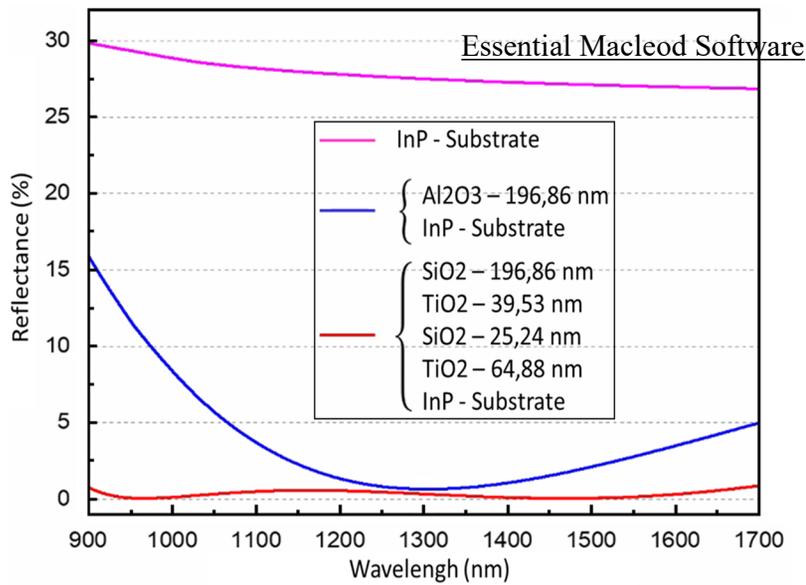
Fotodiodos para o SWIR baseados em semicondutores III-V



- Desenvolver um fotodetector de InGaAs/InP de baixa corrente reversa para a faixa do SWIR em geometria planar.
- Obter filmes antirreflexo sobre substratos de InP depositados por *sputtering*.

FOTODETECTORES DE INFRAVERMELHO PARA O SWIR

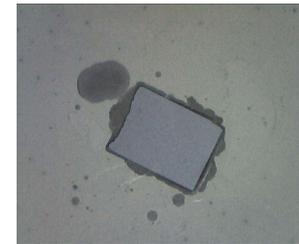
CAMADA ANTIREFLEXO SOBRE InP



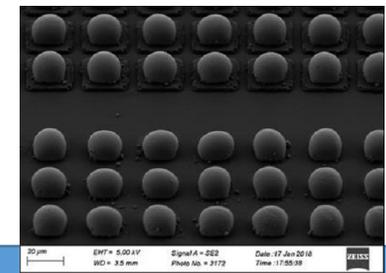
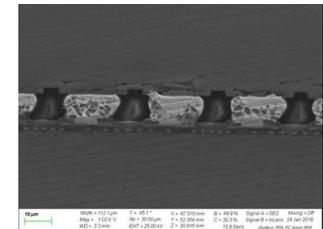
FOTODETECTORES DE INFRAVERMELHO PARA O SWIR

AFINAMENTO DE SUBSTRATO/EVAPORAÇÃO DE In

Processo de afinamento de substratos de InP por abrasão mecânica. Esse processo é particularmente desafiador devido à fragilidade mecânica do material. Espessuras próximas das desejáveis já foram obtidas, mas o desenvolvimento continuará visando espessuras ainda menores e garantia de reprodutibilidade do processo.



Deposição de filmes espessos de In. Esses filmes visam o acoplamento face a face entre matrizes de sensores e circuitos integrados de leitura. O In não pode ser evaporado em evaporadoras que depositam metais de ponto de fusão elevado devido ao risco.



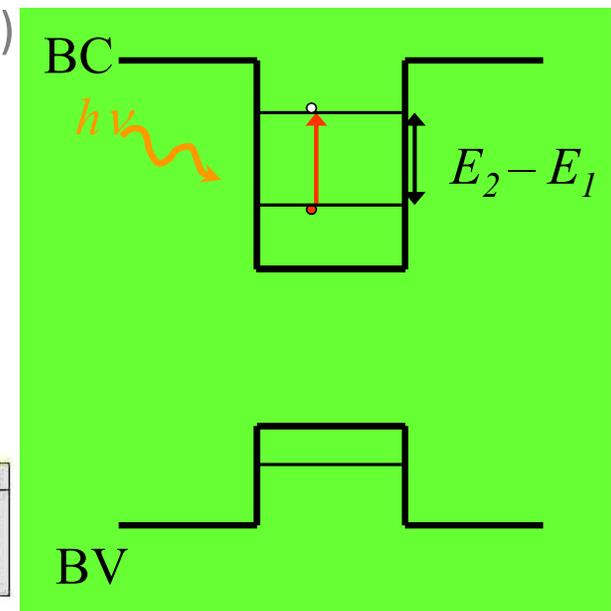
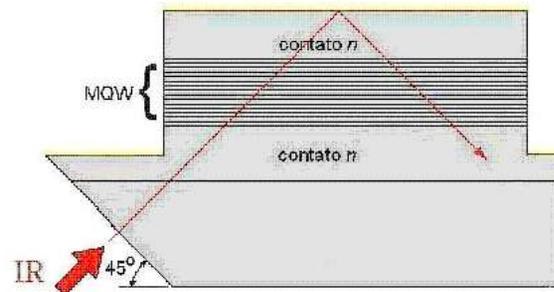
FOTODETECTORES DE INFRAVERMELHO: QWIPs

QWIPs usando superredes assimétricas

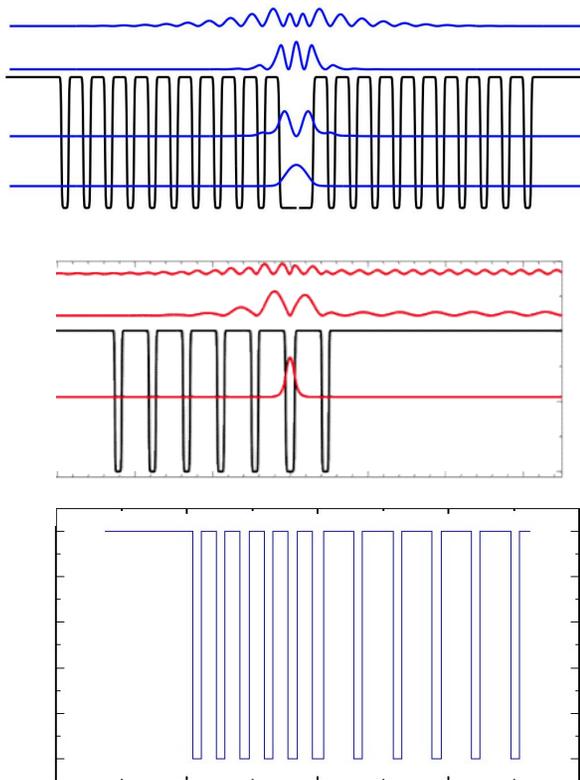
As faixas do MWIR (2 a 5 μm), LWIR (8 a 14 μm) e VLWIR ($>14 \mu\text{m}$)

- detecção de gases tóxicos
- imageamento noturno
- comunicações ópticas no espaço livre

Para tal QWIPs



FOTODETECTORES DE INFRAVERMELHO: QWIPs

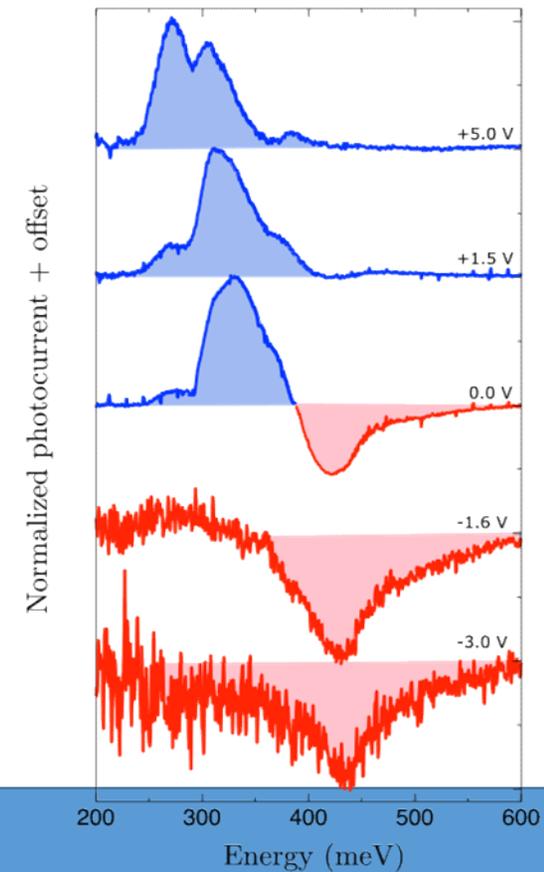
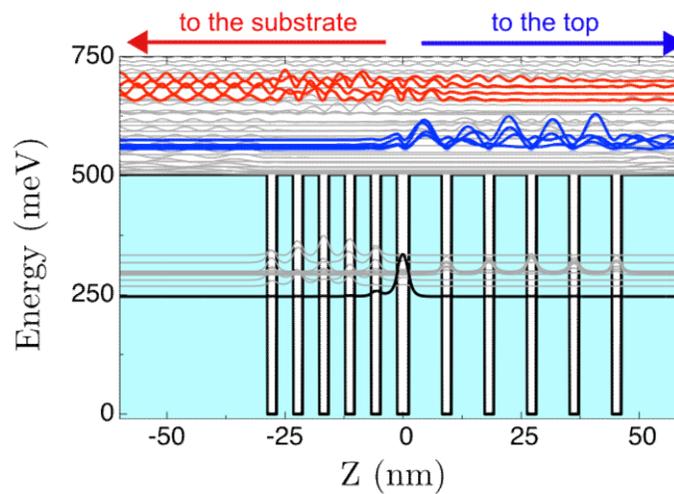


InGaAs:n	500nm [Si]		
InAlAs	30nm		
InGaAs	Well	} X10	} X20
InAlAs	Barrier		
InGaAs:n	Central Well [Si]	} X10	
InAlAs	Barrier		
InGaAs	Well		
InAlAs	30nm		
InGaAs:n	500nm [Si]		
InP:n Buffer	100nm		
InP	Substrate		

- Obter QWIPs com superrede assimétrica operando de forma dual, detectando dois comprimentos de onda.
- Demonstrar a sintonizabilidade de QWIPs com superrede.

FOTODETECTORES DE INFRAVERMELHO: *QWIPs usando superredes assimétricas - QBMD*

- Fotodetector fotovoltaico e fotocondutivo
- Detecção de duas cores a 0V
- Seleção de comprimento de onda por aplicação de tensão
- Figuras de mérito comparáveis com detectores da literatura



FOTODETECTORES DE INFRAVERMELHO: *QWIPs usando superredes assimétricas - QBMD*

Sistema de monitoramento de gás com um Quantum Bragg Mirror Detector QBMD assimétrico

Integração de tecnologia desenvolvida nacionalmente

- QBMD (LSDOpto – UFRJ + LabSem – PUC-Rio)
- CTIA-ROIC (OptMA Lab - UFMG)

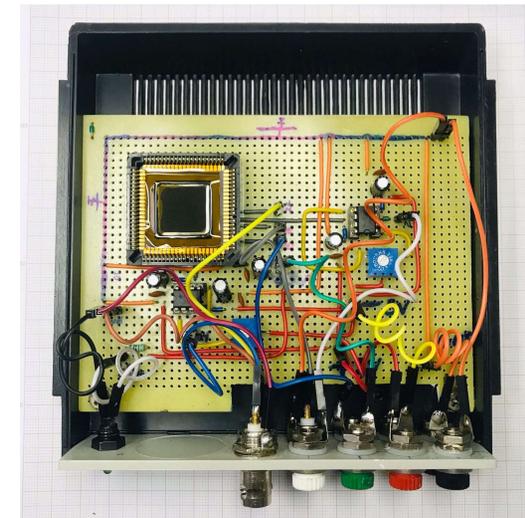
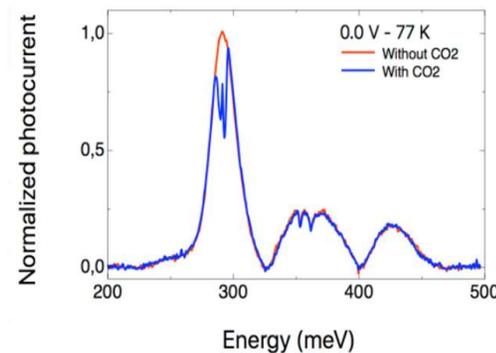
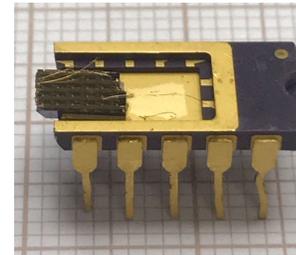
Detecção na faixa do infravermelho médio - MIR

Monitoramento de gás CO₂ - $\lambda = 4,2 \mu\text{m}$

Temperatura ambiente de trabalho - T = 300 K

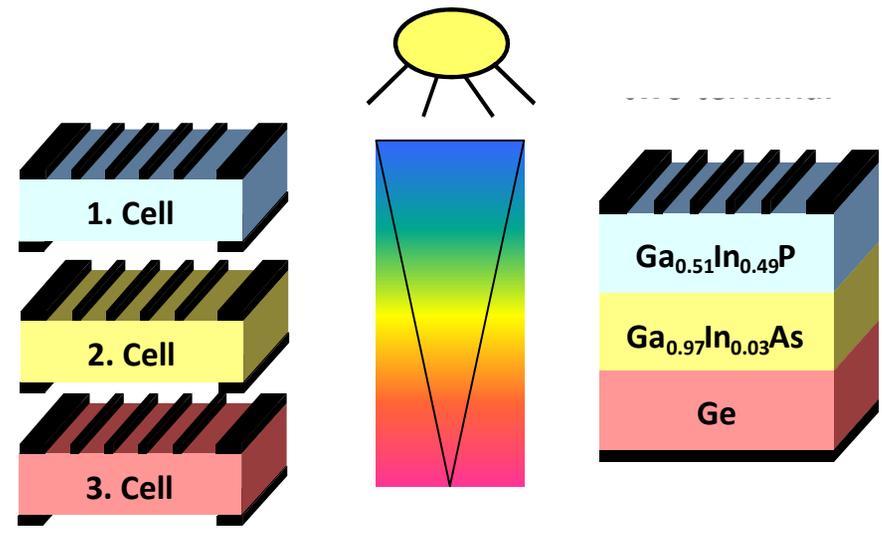
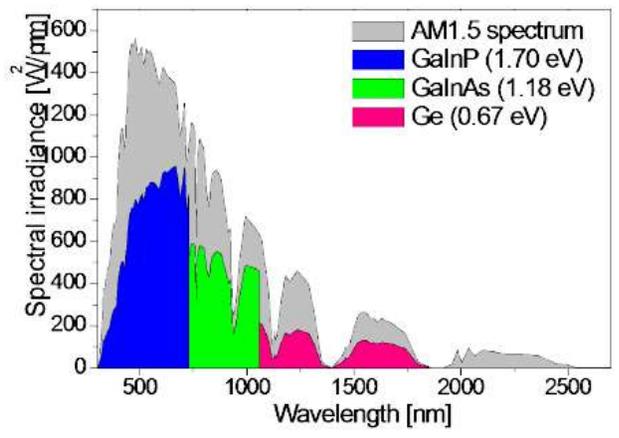
Modo fotovoltaico e fotocondutivo

Dispositivo Dual-color

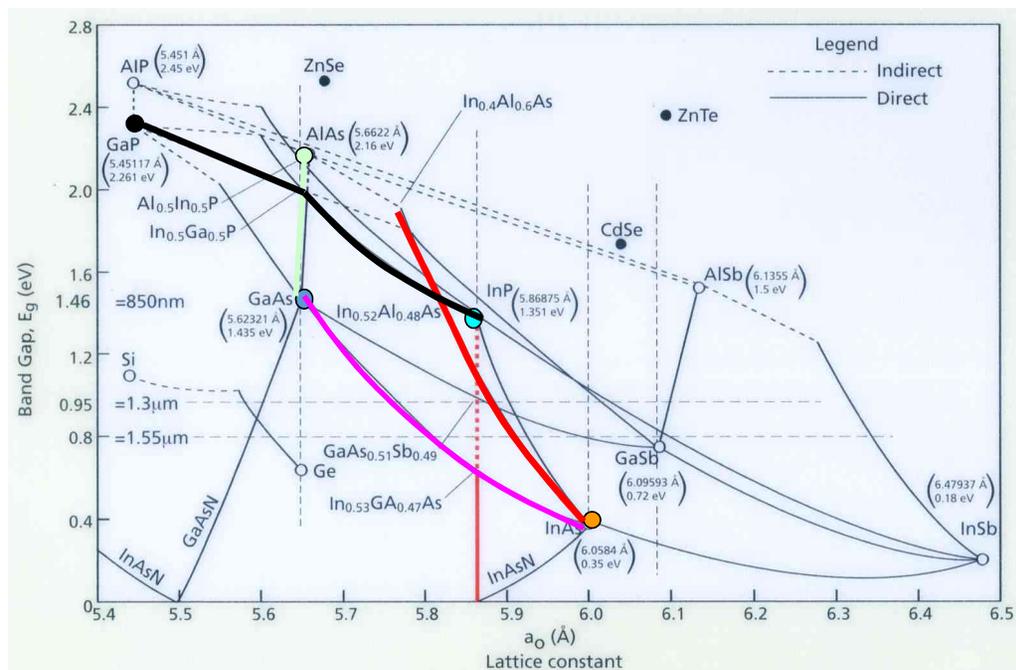


CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Células fotovoltaicas de junção tripla

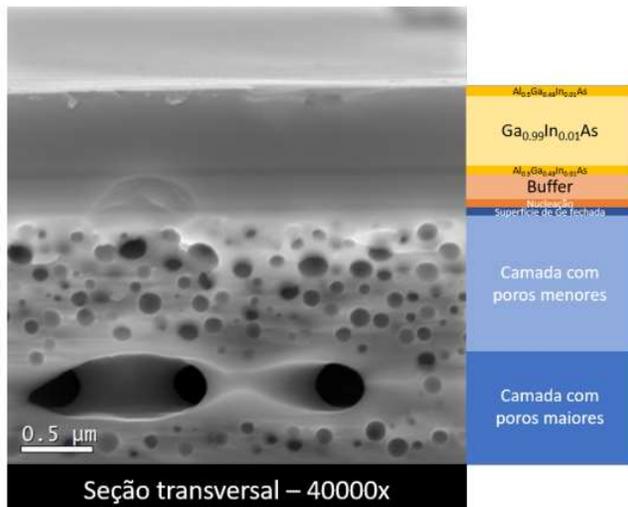


CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

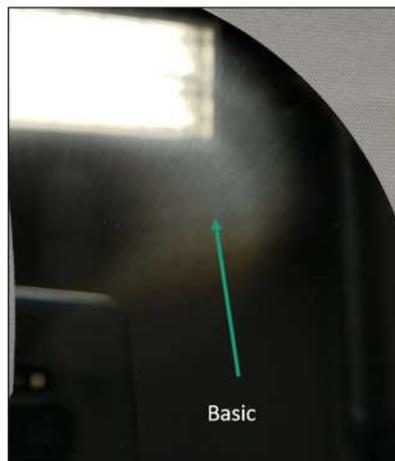


- Aprimorar o balanço de tensão de poços quânticos de InGaAs/InGaP casados com substrato de Ge e/ou GaAs para uso na célula intermediária de uma tripla junção.
- Fabricar a célula de poços quânticos múltiplos.

CÉLULAS FOTOVOLTAICAS: substratos alternativos de Ge



Ge poroso
Substrato reutilizado



Ge com menos etapas de
polimento

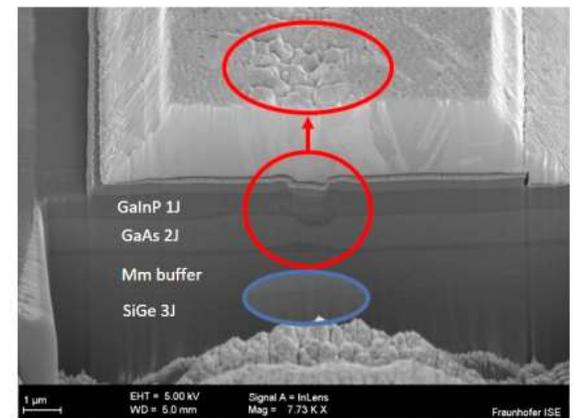


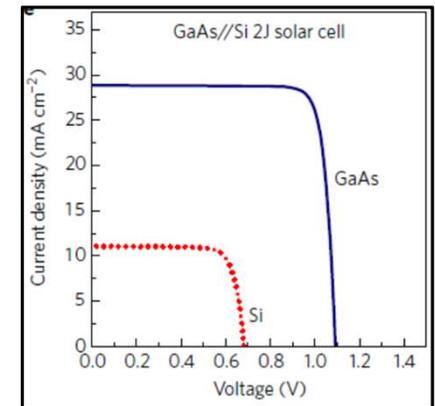
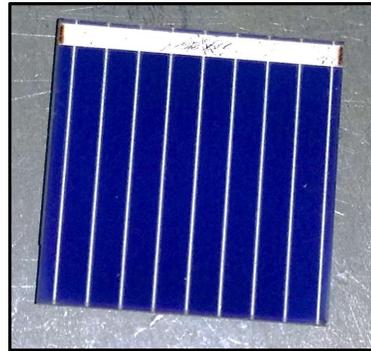
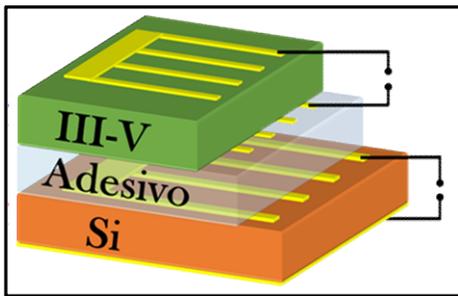
Imagem de MEV da célula solar de junção tripla após corte com FIB. Círculo azul indica a origem dos defeitos no substrato e os círculos vermelhos indicam os defeitos sendo amplificados no *buffer* metamórfico e se propagando até o metal de contato do topo da célula solar

Parceria com ISE Fraunhofer

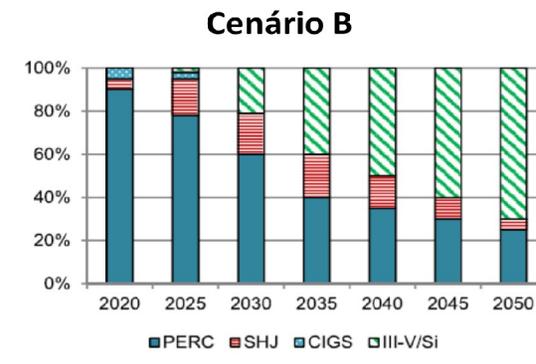
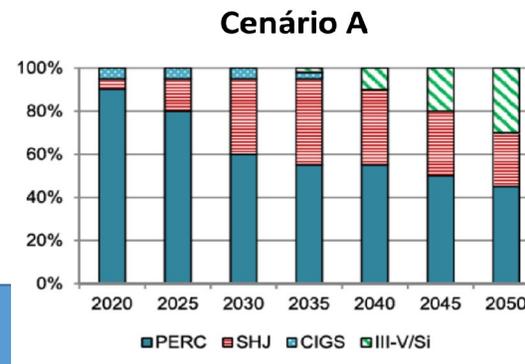
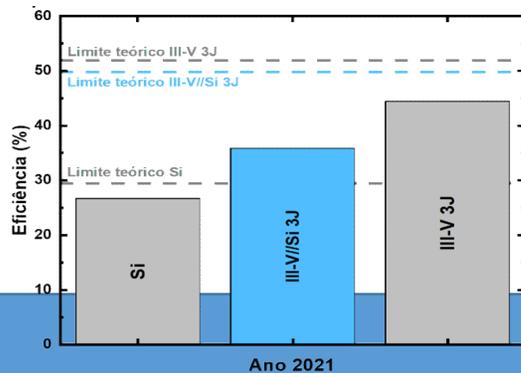
Perspectiva otimista

CÉLULAS FOTOVOLTAICAS: III-V/Si

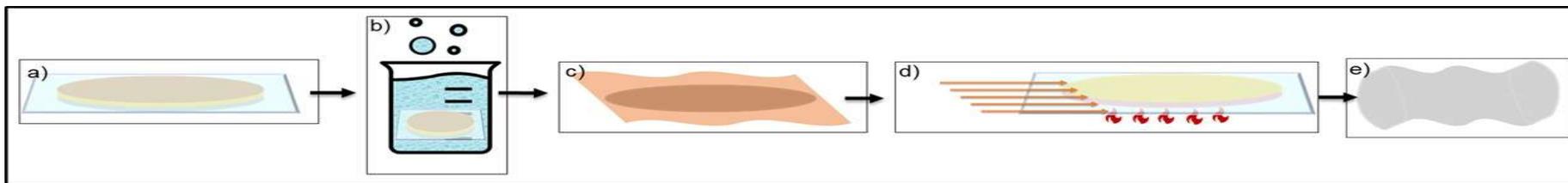
Célula solar multijunção III-V/Si: fótons mais energéticos absorvidos pelo material III-V, fótons menos energéticos absorvidos pelo silício



Perspectiva para aumento da eficiência das células solares atuais e participação futura no mercado



CÉLULAS FOTOVOLTAICAS: III-V sobre flexíveis



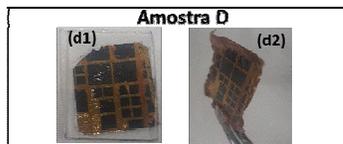
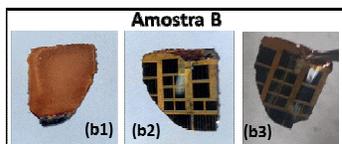
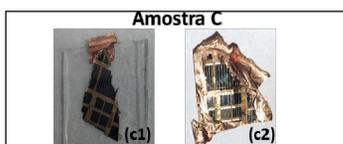
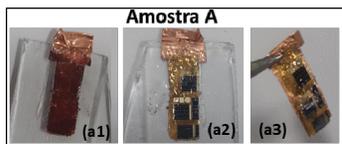
Substrato rígido



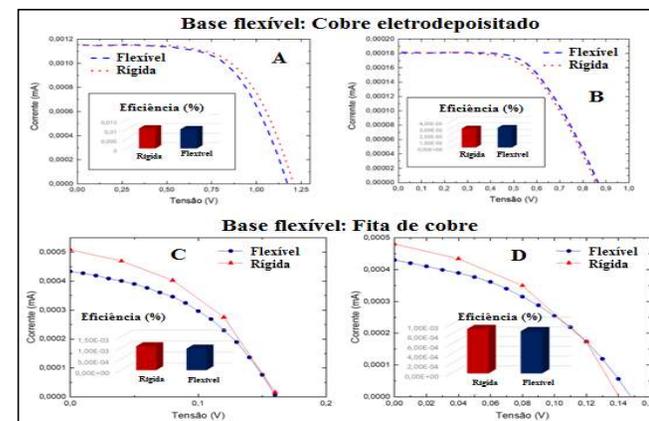
Cobre eletrodepositado



Fita de cobre



* sob a luz do simulador solar Sciencetech SF300A com filtro AM1.5G





Lab-on-a-chip na faixa do infravermelho médio para monitoramento de fluidos



Borislav Hinkov, Florian Pilat, Mauro David, Daniela Ristanić, Benedikt Schwarz, Aaron M. Andrews & Gottfried Strasser

TU Wien, Institute of Solid State Electronics & Center for Micro- & Nanostructures, Vienna, Austria



Hermann Detz

TU Wien, Center for Micro- & Nanostructures, Vienna, Austria & Brno University of Technology, CEITEC, Brno, Czech Republic



Laurin Lux, Andreas Schwaighofer, Bettina Baumgartner & Bernhard Lendl

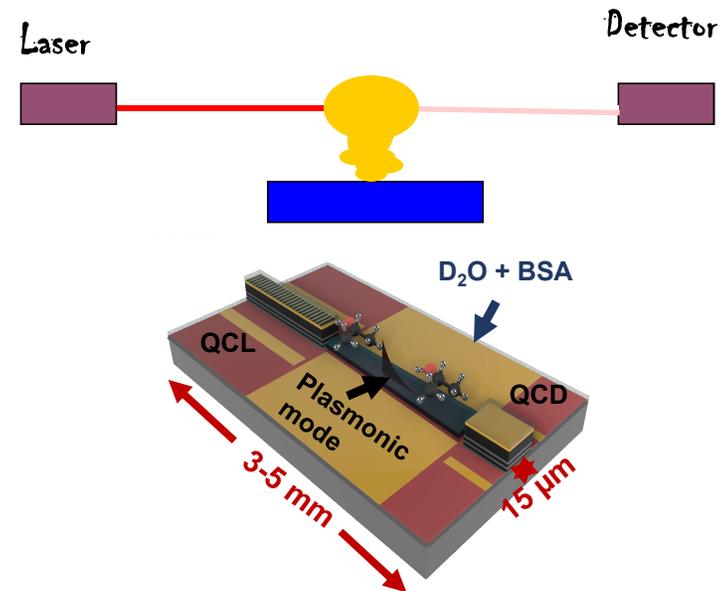
TU Wien, Institute of Chemical Technologies & Analytics, Vienna, Austria



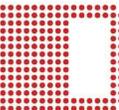


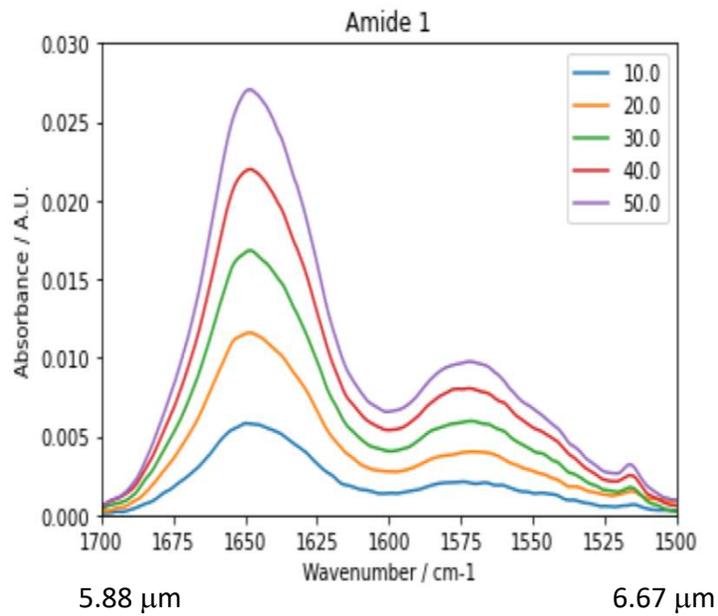
Lab-on-a-chip na faixa do infravermelho médio para monitoramento de fluidos

- Proteína BSA a ser monitorada
- Descrição dos elementos: QCL, QCD e WG
- Fabricação do dispositivo QCLD
- Experimento de medida de concentração de BSA em D₂O*
- Experimento de monitoramento de reação molecular

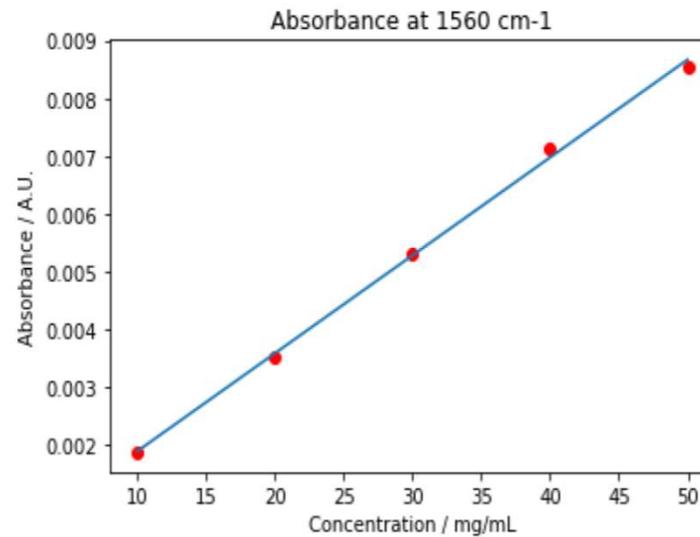


*evitar a absorção intensa da água, aumentando o comprimento de interação



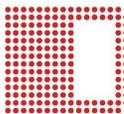


Concentração em mg/ml



Beer-Lambert law

$$A = \log_{10}(I_0/I_T) = edc$$

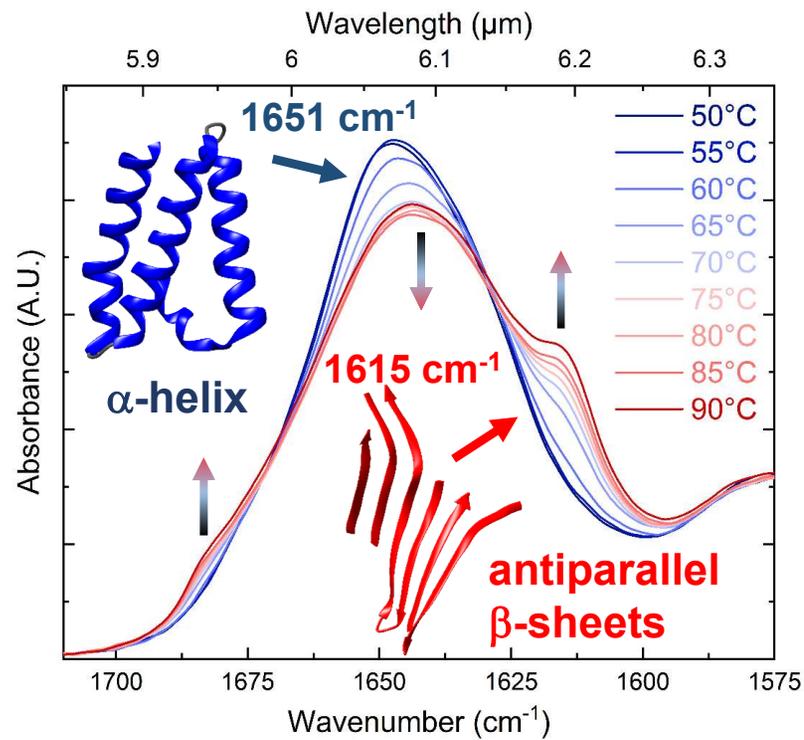




Reação termicamente induzida

Modifica a natureza da proteína

Experimentos de BSA em D₂O

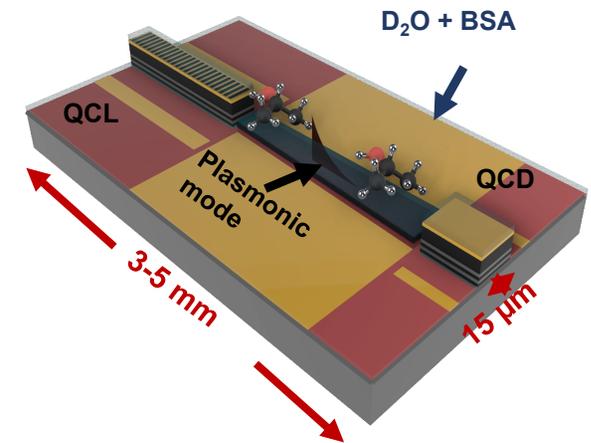
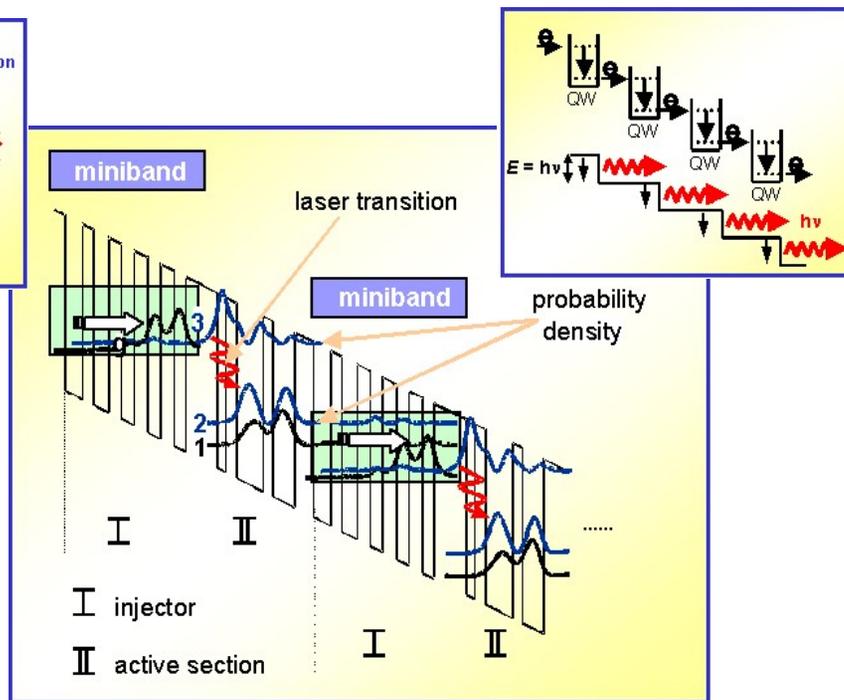
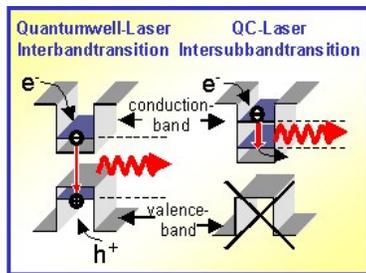


Estável até 40 graus
A partir de 60 graus
é totalmente irreversível



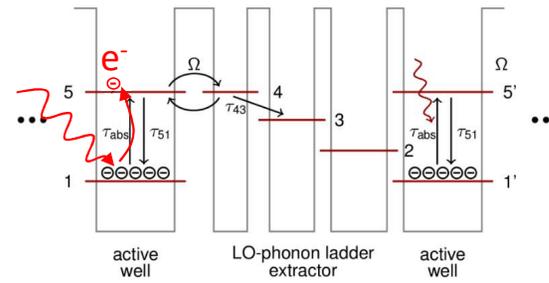
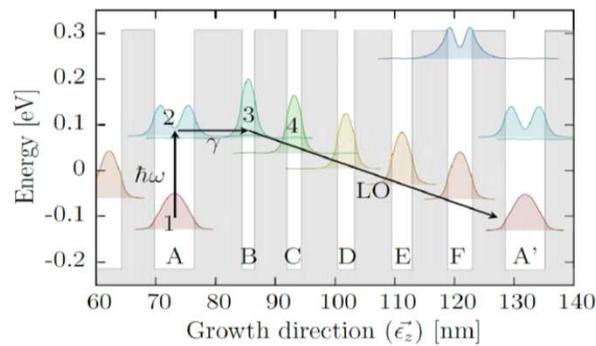


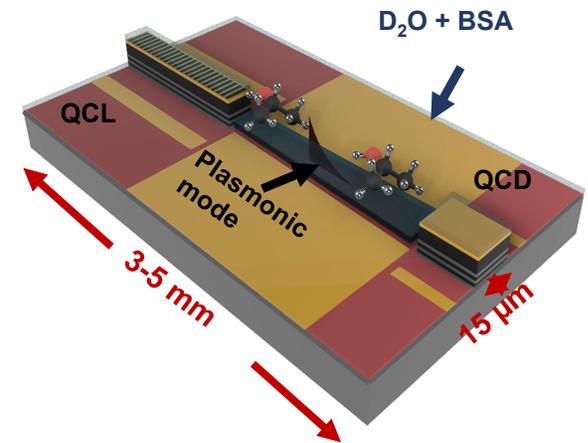
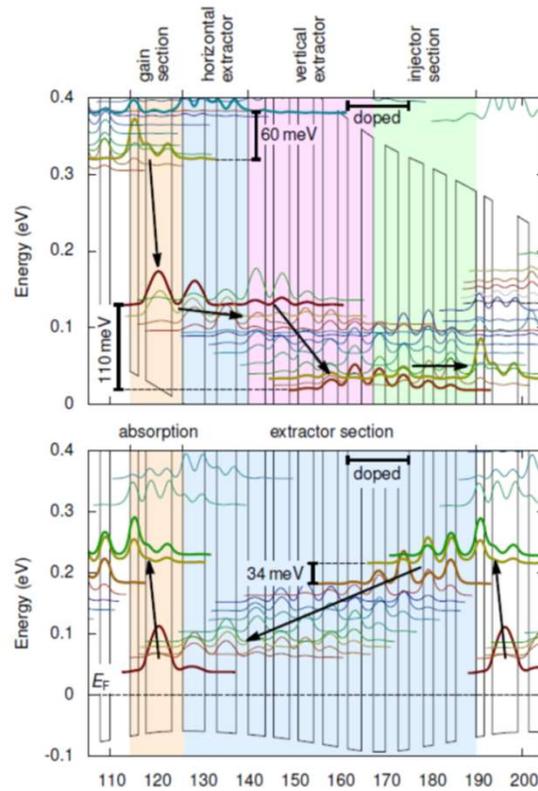
Operação com tensão aplicada





Operação no modo fotovoltaico



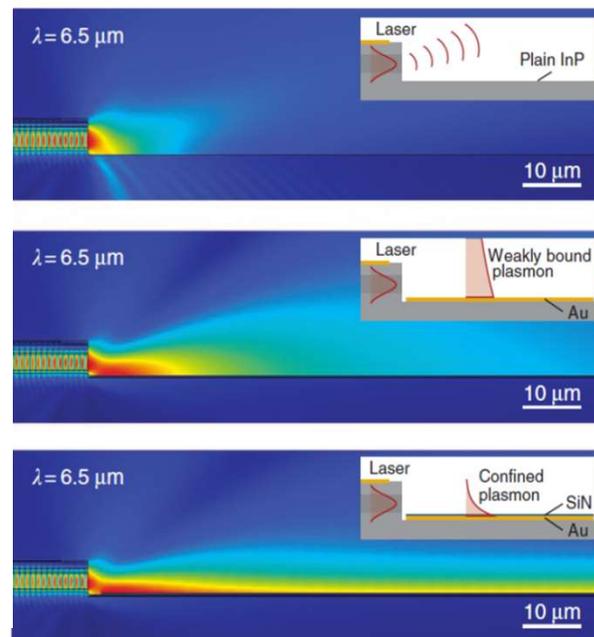
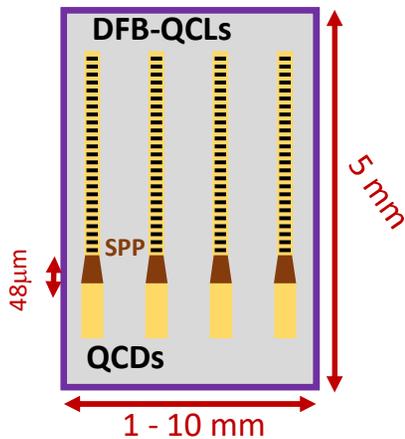
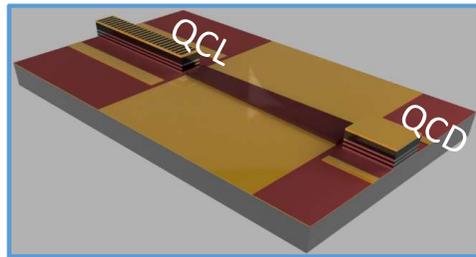


Schwarz et al., *Nat. Commun.* **5**, 4085, 2014
 Schwarz et al., *ACS Photonics* **4**(5), 1225, 2017





Guia de onda plasmônico



Simulação com COMSOL



$L_p \geq 1.7 \text{ mm}$
 Perda < 0.13dB para $L = 48 \mu\text{m}$
 > 96% do modo é guiado fora
 do guia de onda

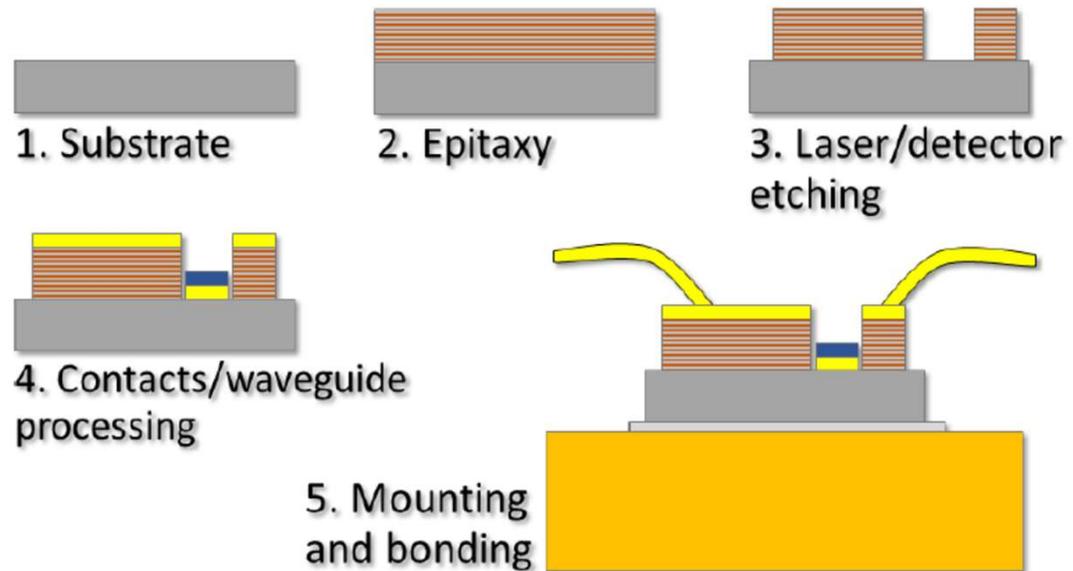




Projetado para operar em torno de $6.5 \mu\text{m}$

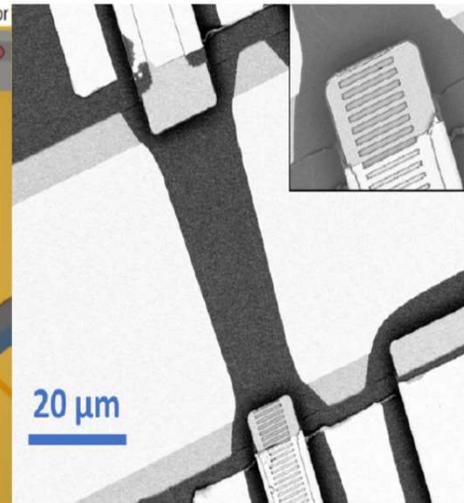
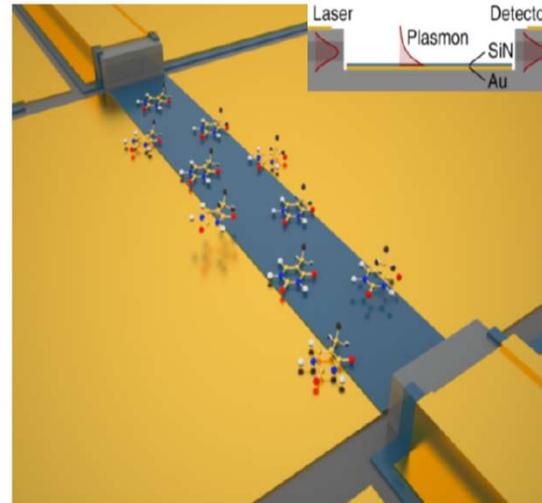
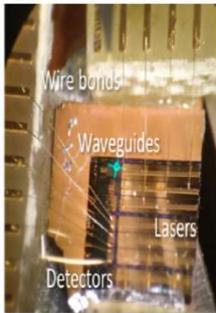
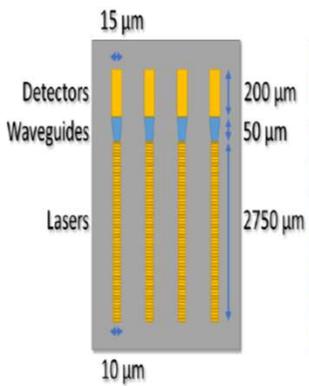
MBE

Material	x (%)	Thickness (nm)	Doping (cm^{-3})
InP (substrate)	-	$350 \mu\text{m}$	$2-4 \times 10^{17}$
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	53	500	5×10^{16}
37 x cascaded AR			
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	53	300	5×10^{16}
$\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$	52	$600 + 800$	$1 \times 10^{17} + 2 \times 10^{17}$
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	53	$350 + 10$	$8 \times 10^{18} + 1 \times 10^{19}$



Guias plasmônicos: 200 nm SiN e
60 nm de Au





Grade de difração para estreitar a emissão do laser (DFB)
 Δf na faixa de MHz



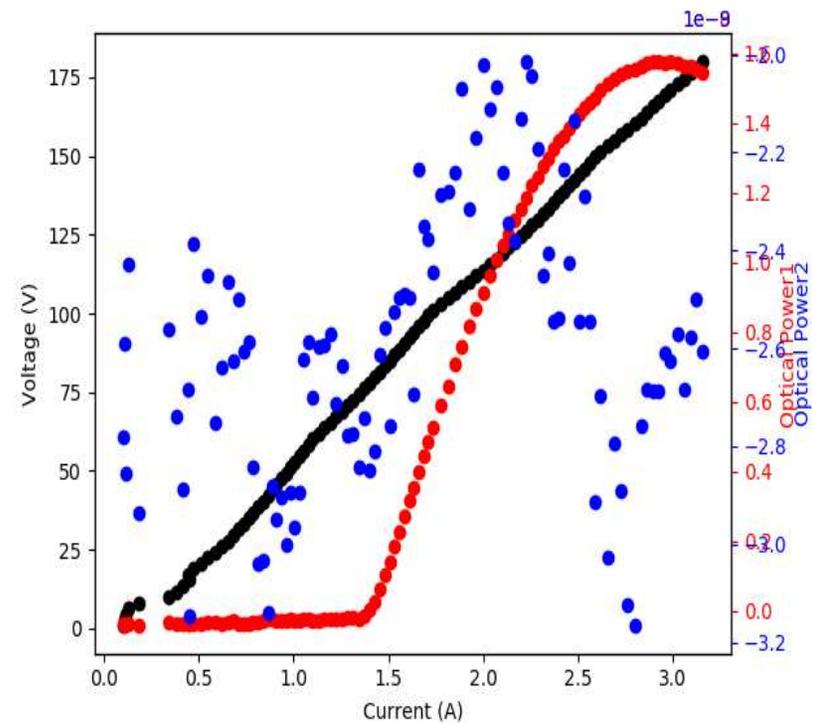


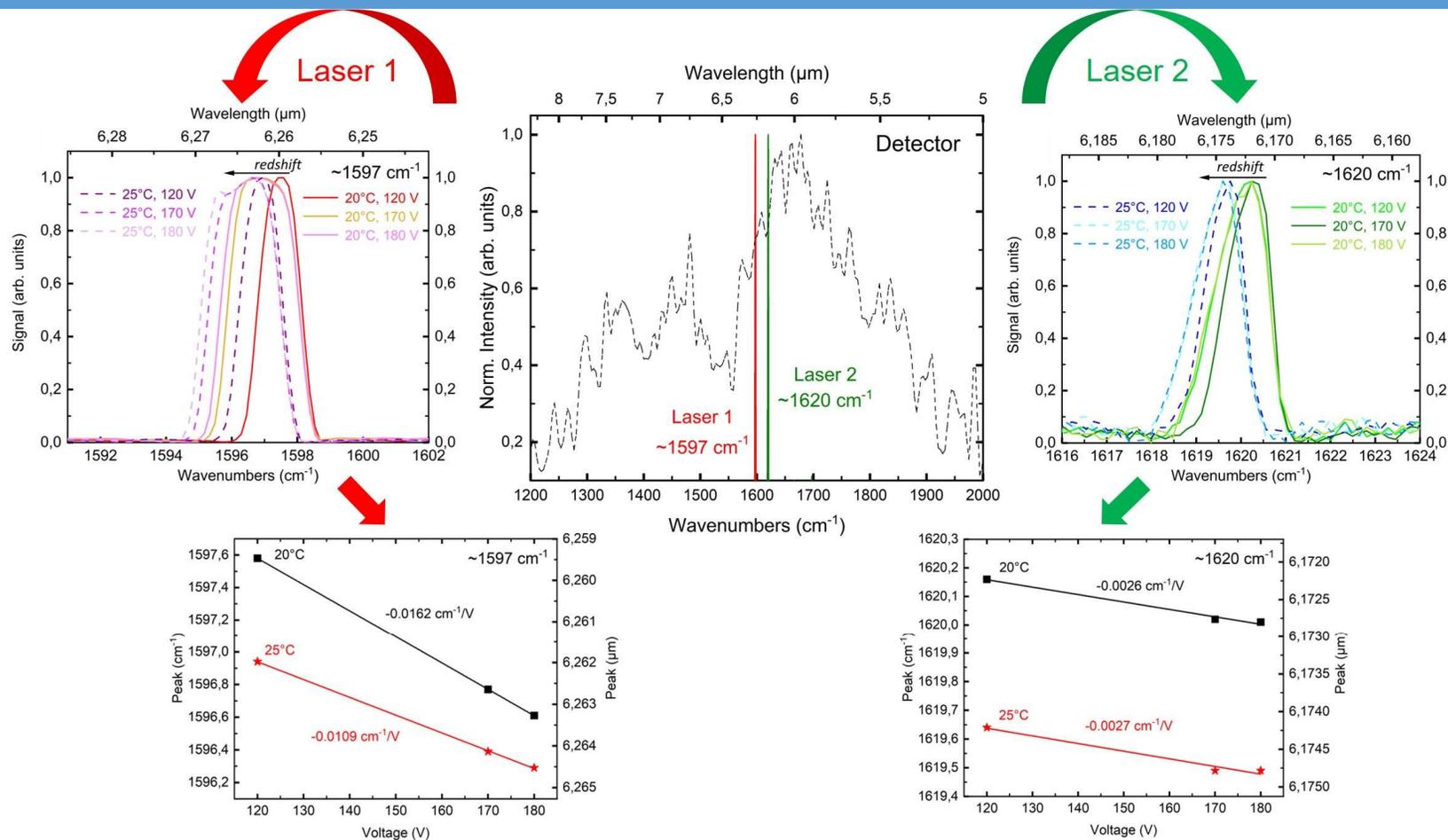
R detectores em torno de 3 kohms
 R lasers em torno de 200 ohms

Um gerador de pulso aplica pulsos entre 0 e 180 V. Pulsos de 100 ns, 5 KHz. Duty cycle de 0.05%, bem baixo.

A corrente é medida entre 0 e 3.5 A

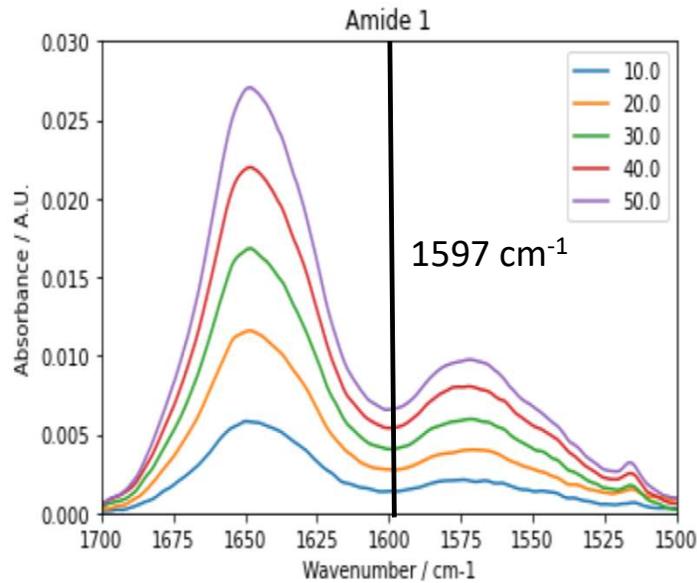
Corrente de limiar em torno de 1.5 A



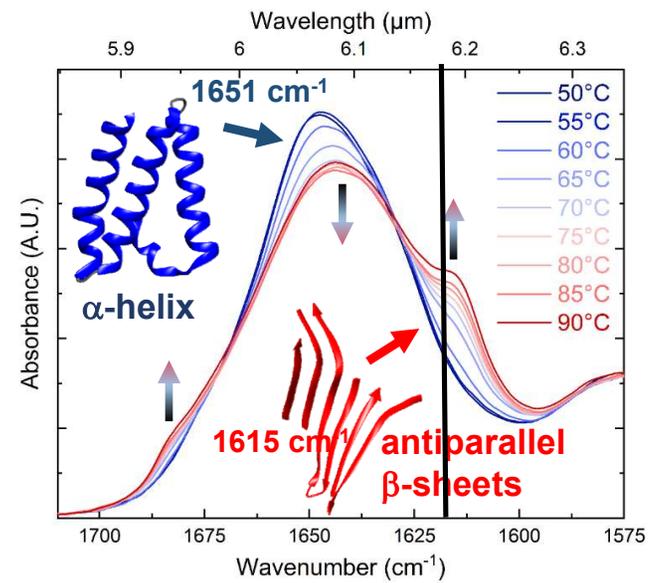




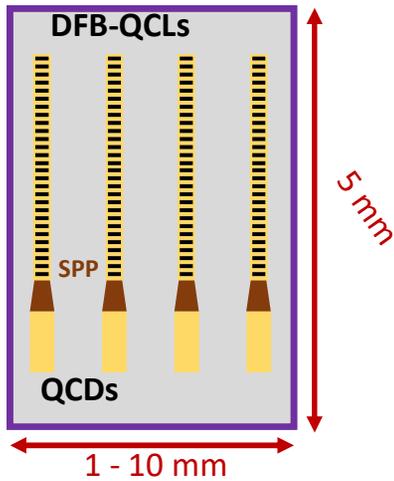
Medida de concentração



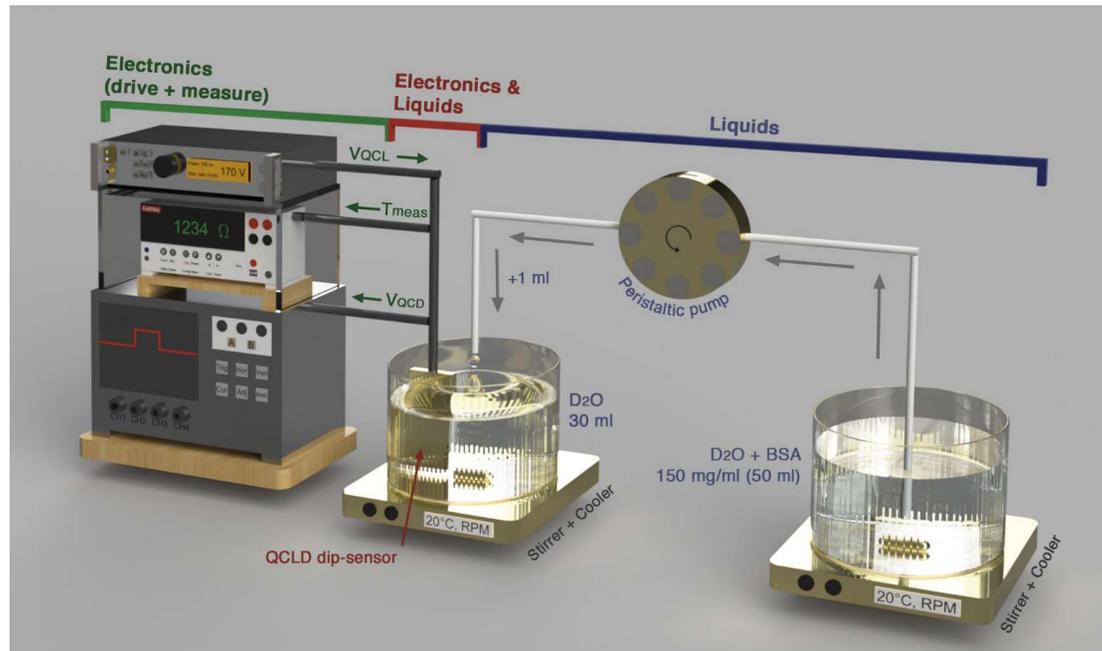
Medida de denaturação da proteína

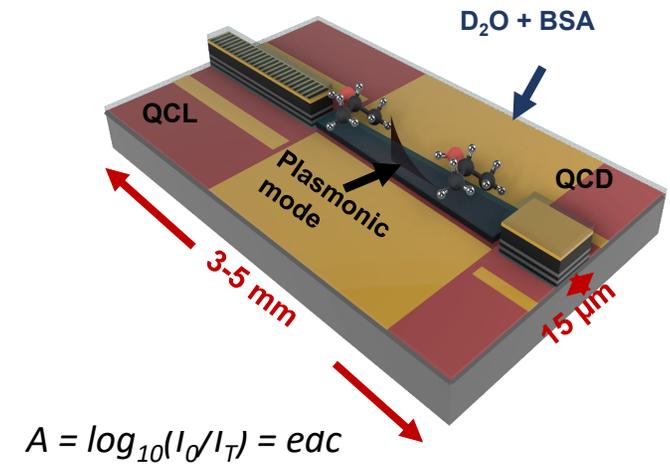
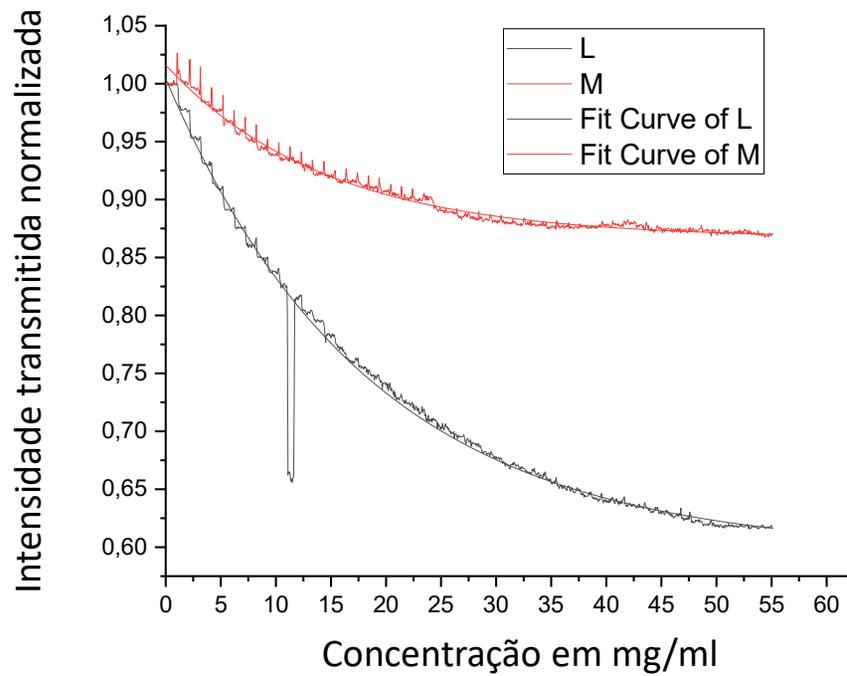


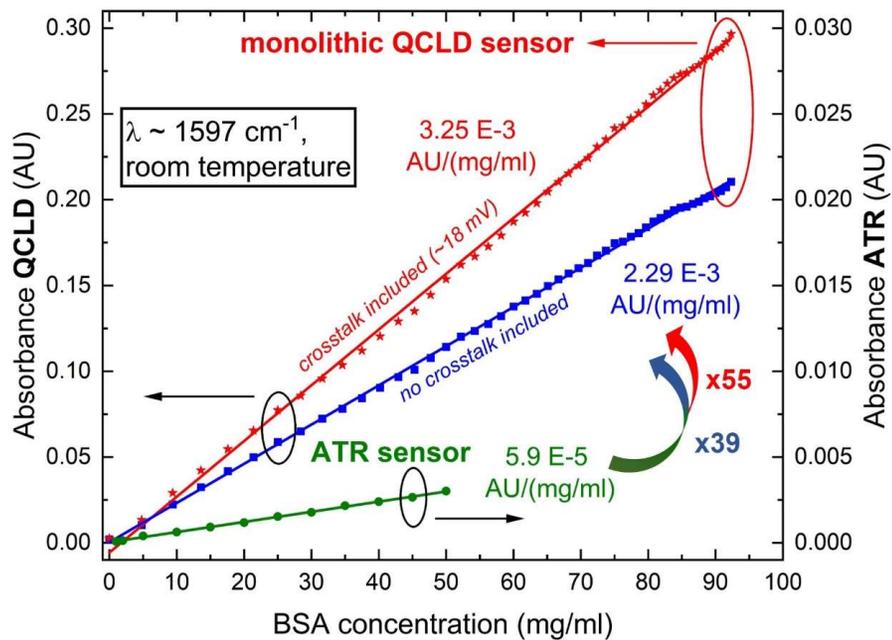
Experimento para determinar a concentração



Um laser como sensor de temperatura





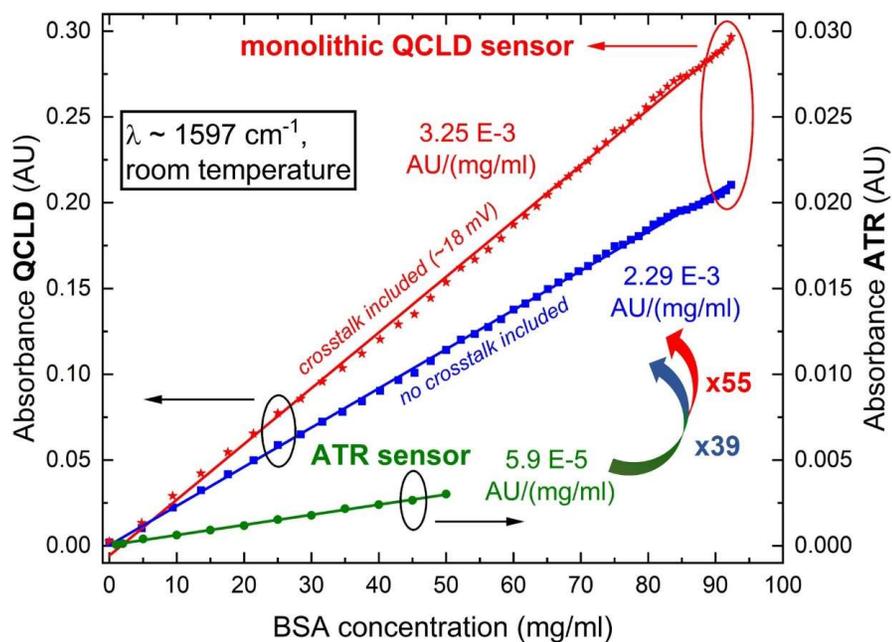


$$A = d_{eff} \cdot e \cdot c$$

d_{eff} profundidade de penetração efetiva
 e coeficiente de absorção molar
 c concentração

$d_{eff} = 43.1 \mu\text{m}$ (cálculo) vs $48 \mu\text{m}$ (geometria *on-chip*)





Cobertura de >3 ordens de concentração:
(75 $\mu\text{g/ml}$ – 92 mg/ml)

Beer-Lambert para absorbância

$$A = d_{eff} \cdot e \cdot c$$

d_{eff} profundidade de penetração efetiva
 e coeficiente de absorção molar
 c concentração

$$d_{eff} = 43.1 \mu\text{m} \text{ (cálculo)} \text{ vs } 48 \mu\text{m} \text{ (geometria on-chip)}$$

Limite de detecção (LOD)

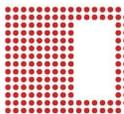
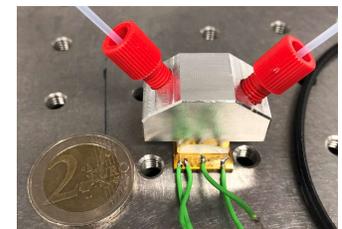
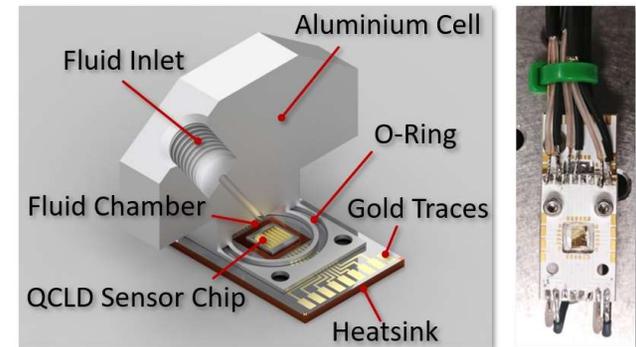
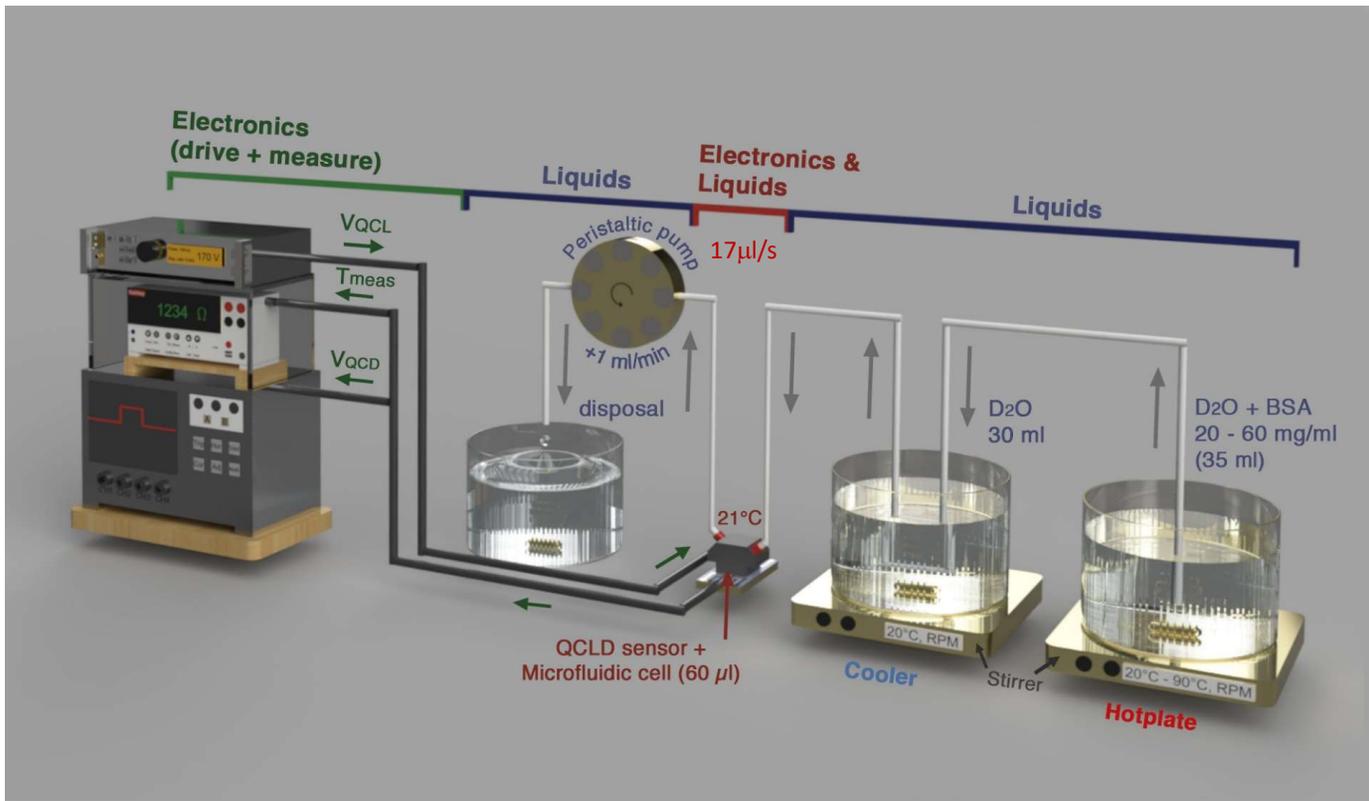
$$LOD = \frac{3 * RMS \text{ noise}}{\text{slope}}$$

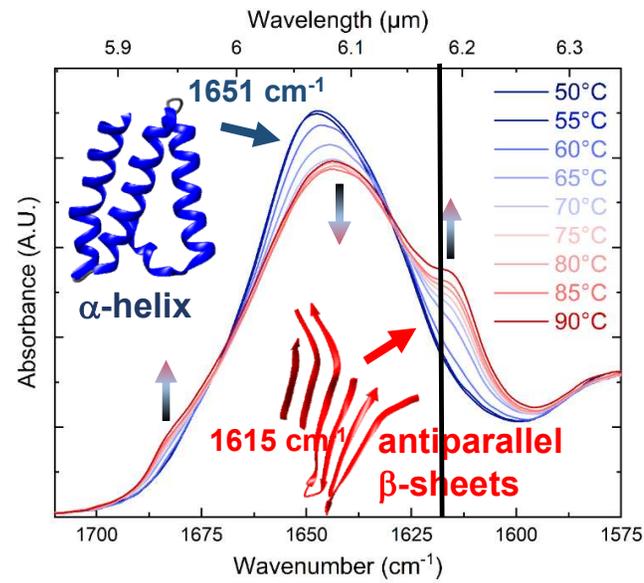
Sensor	Tempo	LOD
FTIR_ATR	11 s	~9000 ppm
QCLD	11 s	75 ppm

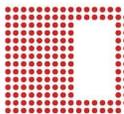
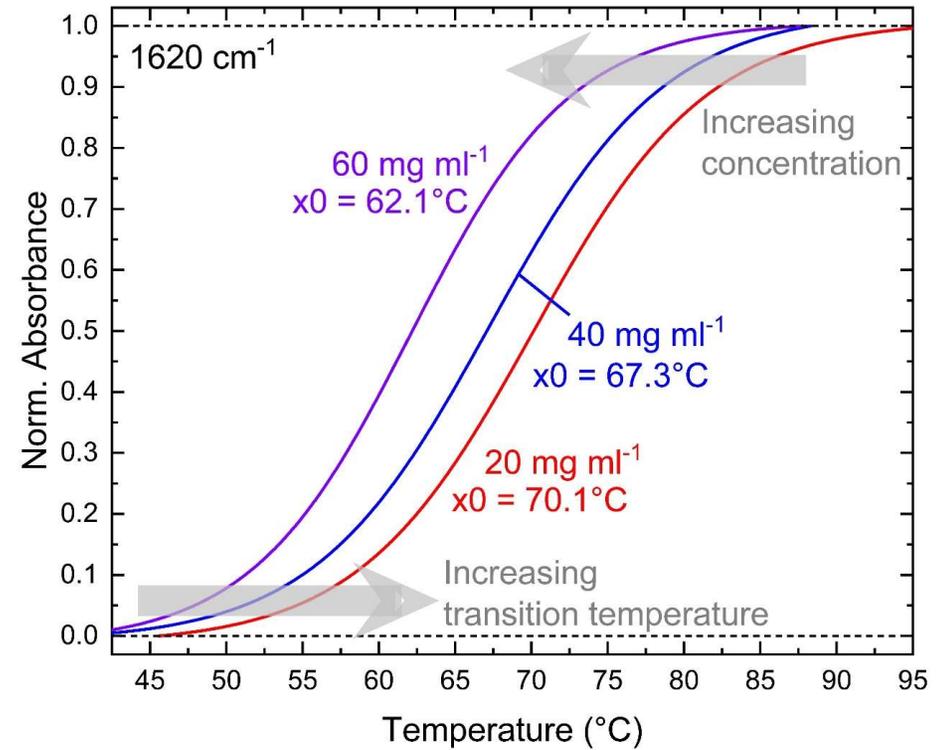
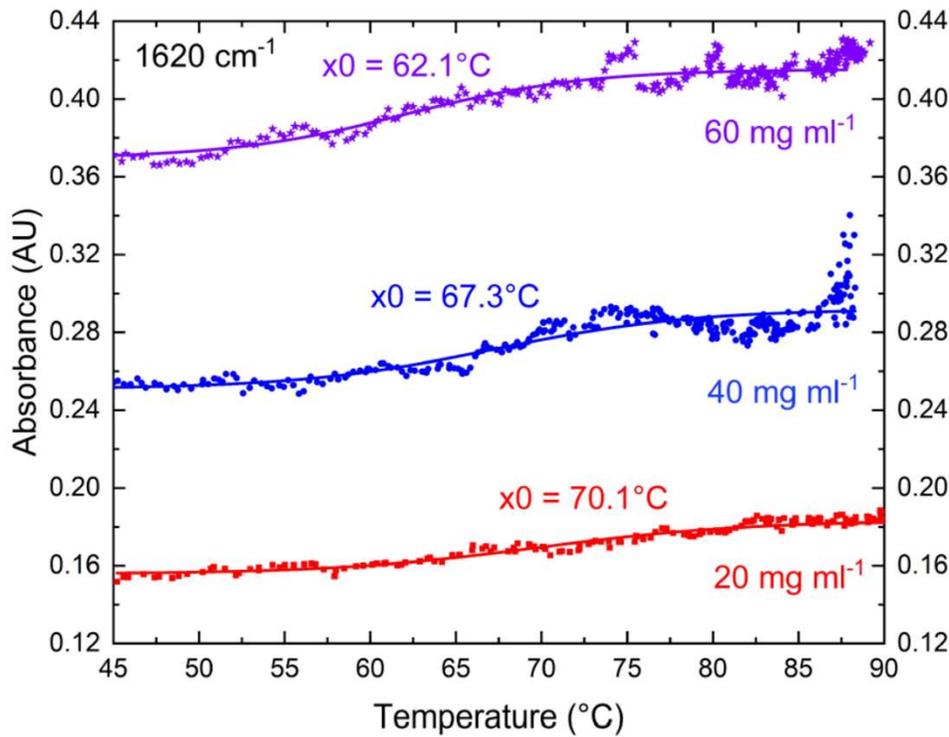
Literatura:
LOD~2 – 18 vezes
menor^{1,2}

¹Bibikova et al., *Anal. Chem. Acta* **990**, 141 – 149, 2017.

²López-Lorente et al., *Microchem. Acta* **184**, 453-462, 2017.





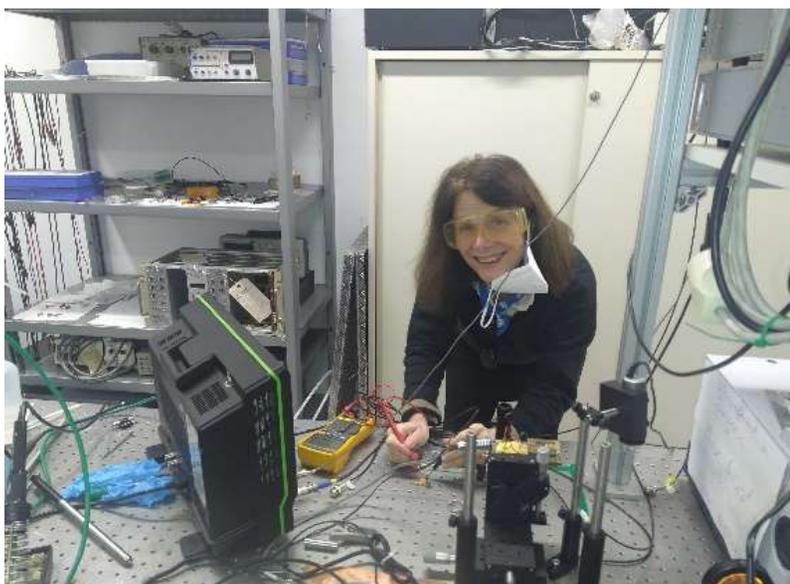


Conclusões

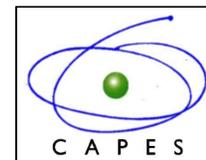
Demonstração de um *Lab-on-a-chip* para líquidos seletivo, preciso, robusto, de elevada sensibilidade e trabalhando em tempo real:

Volume	→	μl
LOD	→	75 ppm
Intervalo	→	3 ordens de grandeza

Desafio de fazer medida em água



Muito obrigada





RIO DE JANEIRO 2023
chipinrio@puc-rio.br
dippg.cefet-rj.br/chipinrio



August 28th to September 1st 2023



Schwaighofer et. al, *Sci. Rep.* 6, 33556, 2016.

