

复合信号重构微型光谱仪

杜新川, 王显福, 熊杰, 李言荣
xfwang87@uestc.edu.cn

电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室
集成电路科学与工程学院 (示范性微电子学院)

2024年11月1日星期五
中国微米纳米技术学会微纳光学创新论坛 (2024)
微纳集成光子学分论坛

中国微米纳米技术学会
CHINESE SOCIETY OF MICRO-NANO TECHNOLOGY

目录
CATALOGUE

集成电路科学与工程学院 (示范性微电子学院)
School of Integrated Circuit Science and Engineering (Exemplary School of Microelectronics)

- 1 微型化光谱仪背景
- 2 器件原理设计与实现
- 3 高通量自动化器件光电测试
- 4 复合信号采样与神经网络光谱重构
- 5 技术展望与后续工作

2

目录
CATALOGUE

集成电路科学与工程学院 (示范性微电子学院)
School of Integrated Circuit Science and Engineering (Exemplary School of Microelectronics)

- 1 微型化光谱仪背景
- 2 器件原理设计与实现
- 3 高通量自动化器件光电测试
- 4 复合信号采样与神经网络光谱重构
- 5 技术展望与后续工作

3

1 微型化光谱仪背景

◆ 光谱探测应用背景

- 传统光谱探测应用
- 化学分析
- 生物医学
- 天文观测
- 材料科学

◆ 前沿光谱探测需求

- 精准农业
- 深空探测
- 地质勘探
- 生物识别
- 精准医疗
- 塑料分选
- 嵌入式IoT
- 便携设备
- 产线

◆ 小型化、便携化、集成化

ICSE

4

1 微型化光谱仪背景

◆光谱探测器小型化发展历程

传统台式光谱探测器
特点优势：光谱分辨能力强，成熟的光学分光技术
存在问题：光学组件体积和重量大，仅支持推扫式成像

小型化集成光学结构光谱仪
特点优势：可实现快照式成像，光谱成像组件可小型化

免光学结构的微型光谱探测器
特点优势：无需额外微纳工艺，潜在的大尺寸面阵集成能力
存在问题：调制手段有限，光谱响应模式单一，重构算法误差控制难，探测精度低

ICSE 5

1 微型化光谱仪背景

◆光谱仪微型化的技术策略

色散光策略
Detector array, Reflection diffraction (in / out plane), Transmission diffraction (in / out plane)

可调窄带滤波策略
Tunable filter Δd , Tunable filter $\Delta \theta$, Filter array

傅里叶变换策略
Michelson interferometer, Mach-Zehnder interferometer, Michelson interferometer

光谱重构策略
 $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} p(\lambda, x) s(\lambda) d\lambda = I(x)$, $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D(\lambda) s(\lambda) d\lambda = I$, Reconstructed target pattern, Spectral transmissions, Patterns at different λ , Dispersive media, Broadband filter array

依赖阵列探测器, 依赖微纳光学结构
集成潜力受限，工艺繁杂复杂
单点重构光谱仪
免光学结构，直接入射，单探测器

* Xia FN. Nat. Photon. 15, 601–607 (2021)
* Sun ZP. Science. 378, 296–299 (2022)

ICSE 6

1 微型化光谱仪背景

◆单点重构光谱仪基本原理

离散过程
光谱探测过程: $[R_{1,1} \dots R_{1,n}] [S_1] = [I_1]$
光谱重构过程: $[I_1] R^{-1} = [\tilde{S}_1]$

过程示意
光谱响应度: State 1 (R_1), State 2 (R_2), ..., State m (R_m)
入射光谱: State 1 (I_{ph}), State 2 (I_{ph}), ..., State m (I_{ph})
响应光电流: State 1 (I_{ph}), State 2 (I_{ph}), ..., State m (I_{ph})
重构光谱: State 1 (S_1), State 2 (S_2), ..., State m (S_m)

关键问题
如何实现高精度的单点探测器光谱探测？

ICSE 7

研究内容框架

科学问题：如何实现高精度的单点探测器光谱探测？

实现内化且原位可控的光谱感知能力
二维材料带隙原位调控

需要丰富完整且系统的光电特征表征
高通量自动化光电测试与分析

针对性设计的信号采集与重构算法
复合信号读出与神经网络重构

理论基础
密度泛函理论 (DFT)
高斯波函数 (TB)
格林函数方法 (GF)
动力学方法研究

器件基础
高质量VBM带隙二维半导体制备
窄带隙二维材料能带工程研究
光电子发射微光谱
光谱瞬态响应测试
构筑器件红外光电响应的物理模型
厘清电场调控红外光谱探测器设计理论

方法论指导
Tikhonov正则化或分段回归光谱重构算法优化
深度神经网络训练结合高精度数据重构
复信号高精度光谱重构算法研究
高精度近红外-短波红外光谱探测器元器件评估

基于二维材料的微型复合信号重构光谱仪研究

ICSE 8

目录
CATALOGUE

1 微型化光谱仪背景

2 器件原理设计与实现

3 高通量自动化器件光电测试

4 复合信号采样与神经网络光谱重构

5 技术展望与后续工作

9

2 器件原理设计与实现

◆ 半悬空二维 MoS₂ 器件设计

※ Wang ZL. *Nature* 514, 470–474 (2014).
※ Zhang X. *Nature Nanotech* 10, 151–155 (2015).

发展了面内压电调控技术，基于单层结构的对称性破缺 → 应变引起能带结构变化：带隙压缩且向间接带隙演化

ICSE 10

2 器件原理设计与实现

◆ 面内栅压控制光电响应截止波长

※ Liu Y. *Nat Commun.* 11, 1151 (2020)

面内栅压诱导晶格畸变(拉曼特征峰位移) → 晶体结构变化导致带隙压缩 → 沟道材料能带压缩延长了光响应截止波长

ICSE 11

2 器件原理设计与实现

◆ 实现波分解复用

- 用探测器示意图
- 波分解复用探测数学过程

面内栅压梯度增加 → 得到随栅压变化的光电响应 $I(V_g)$
微分 $I(V_g)$ → 光谱结果

ICSE 12

2 器件原理设计与实现

集成电路科学与工程学院
(示范性微电子学院)
School of Integrated Circuit Science and Engineering
(Exemplary School of Microelectronics)

◆ 实现波分解复用探测结果展示

- 光电流-时间信号
- 解复用光谱-时间信号

在600-800 nm波长范围内实现了五个波段光信号的解复用 → 精度不足

关键问题 如何实现高精度的单点探测器光谱探测?

光谱被编码入光电响应中, 分析 尚未充分挖掘光电响应特征信息
光谱精度由采样精度和算法精度协同影响, 分析 需要优化信号采样、设计重构算法

ICSE 13

目录 CATALOGUE

集成电路科学与工程学院
(示范性微电子学院)
School of Integrated Circuit Science and Engineering
(Exemplary School of Microelectronics)

- 1 微型化光谱仪背景
- 2 器件原理设计与实现
- 3 高通量自动化器件光电测试
- 4 复合信号采样与神经网络光谱重构
- 5 技术展望与后续工作

14

3 高通量自动化器件光电测试

集成电路科学与工程学院
(示范性微电子学院)
School of Integrated Circuit Science and Engineering
(Exemplary School of Microelectronics)

高通量人工智能实验平台

- 智能设计算法
- 高通量实验
- 机器学习

高通量制备 高通量蒸镀 高通量表征

参数输入 生成列表

① 八孔载架 ④ 定角腔涂仪 ⑦ 机械臂 ⑩ 光学表征
② 照相系统 ⑤ 舱式热台 ⑧ 送带仪 ⑪ 机械臂
③ 八道移液器 ⑥ 多功能抓手 ⑨ 多孔载架 ⑫ 多孔表征

机器学习 材料基因库

ICSE 15

3 高通量自动化器件光电测试

集成电路科学与工程学院
(示范性微电子学院)
School of Integrated Circuit Science and Engineering
(Exemplary School of Microelectronics)

#3 高通量表征
High-throughput charact.

ICSE 16

3 高通量自动化器件光电测试

◆ 仪器自动化控制

- 自动化控制系统

● 测试平台

高通量平台的光电测试仪器通过上位机程序自动控制，实现器件**电学运输**（源表控制）、**光电响应**（光源及斩波控制）、**瞬态响应特征**（示波器及光子计数器）**无人值守自动化测试**，相关程序**开源获取**

ICSE

17

3 高通量自动化器件光电测试

◆ 瞬态光响应测试与数据分析

分析 尚未充分挖掘光电响应特征信息

ICSE

18

3 高通量自动化器件光电测试

◆ 弛豫特征的载流子动力学解释

$\frac{dn_{\text{trap}}}{dt} = k_{\text{dc-trap}} n_{\text{trap}} - k_{\text{trap}} n_{\text{free}} \left(1 - \frac{n_{\text{trap}}}{N_{\text{trap}}}\right)$ $\frac{dn_{\text{trap}}}{dt} = -k_{\text{non-rad}} n_{\text{trap}} - k_{\text{dc-trap}} n_{\text{trap}} + k_{\text{trap}} n_{\text{free}} \left(1 - \frac{n_{\text{trap}}}{N_{\text{trap}}}\right)$

ICSE

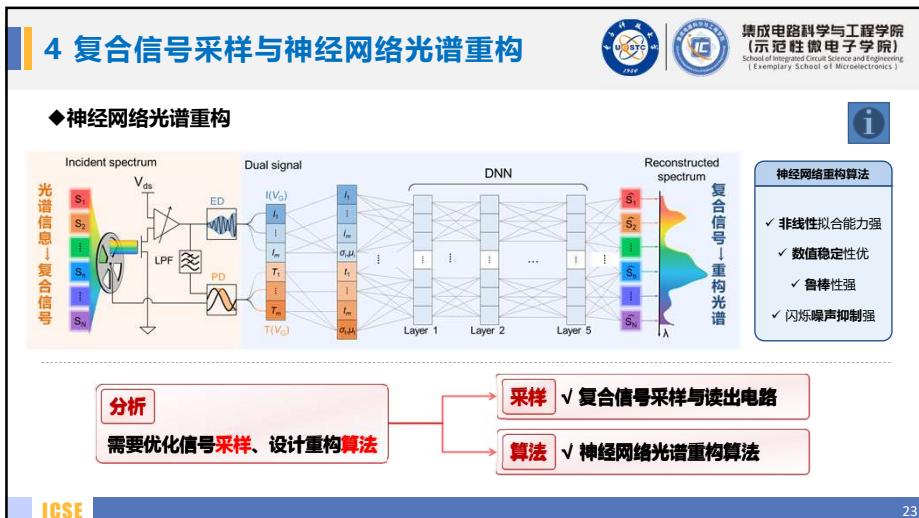
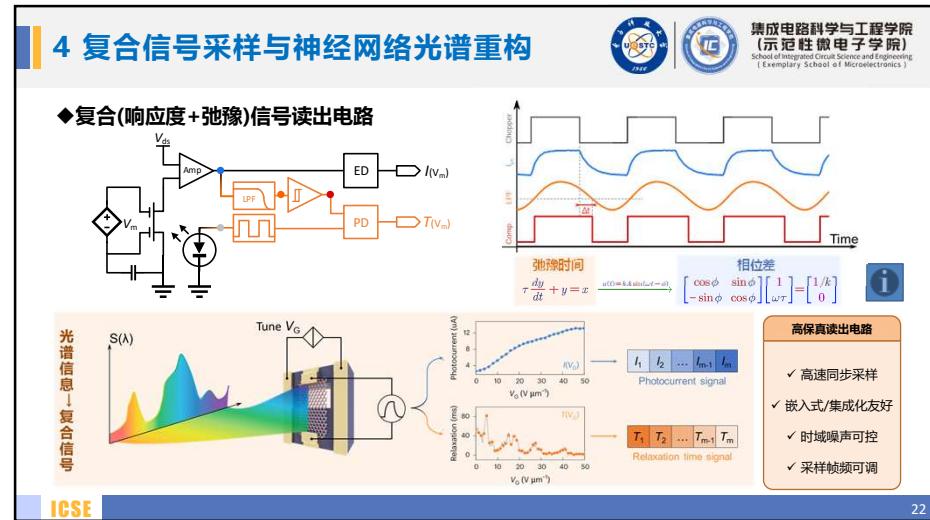
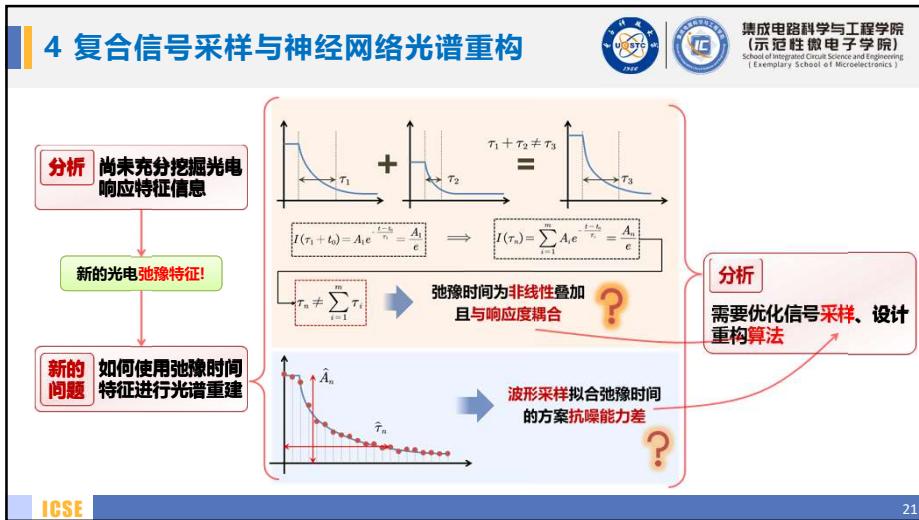
19

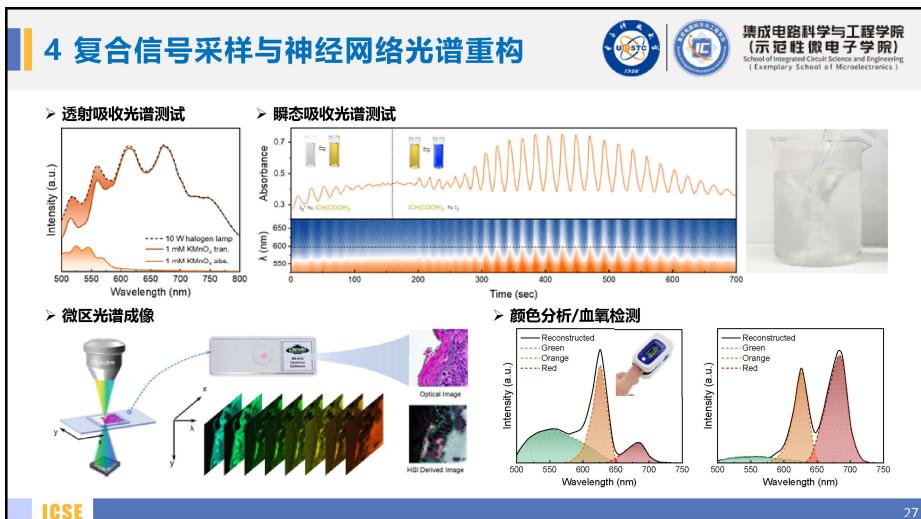
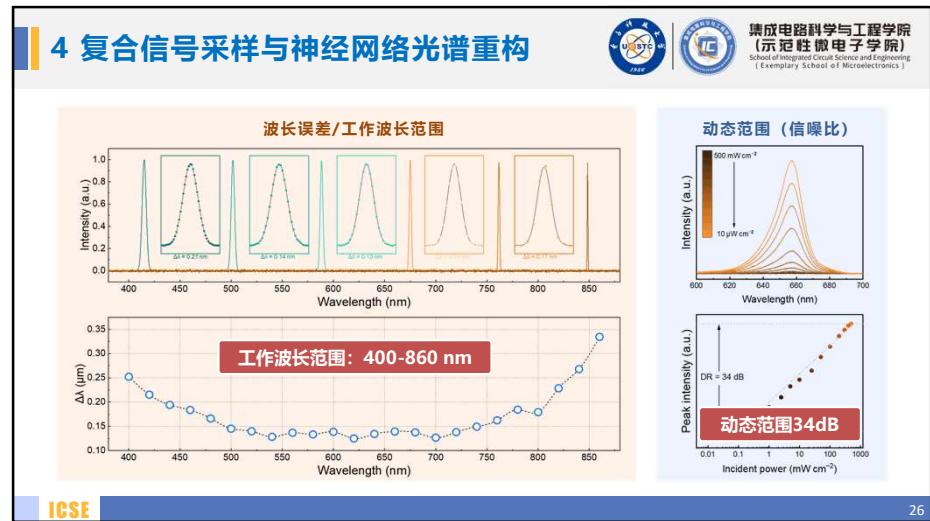
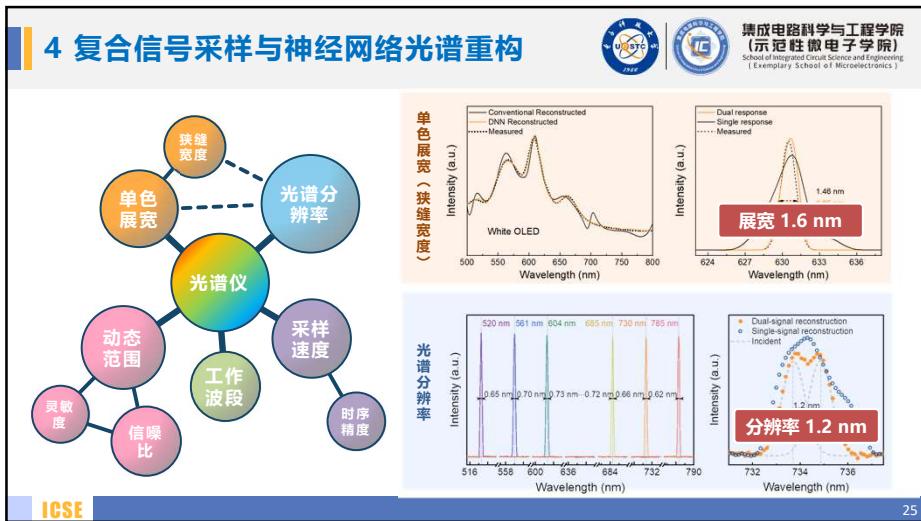
目录 CATALOGUE

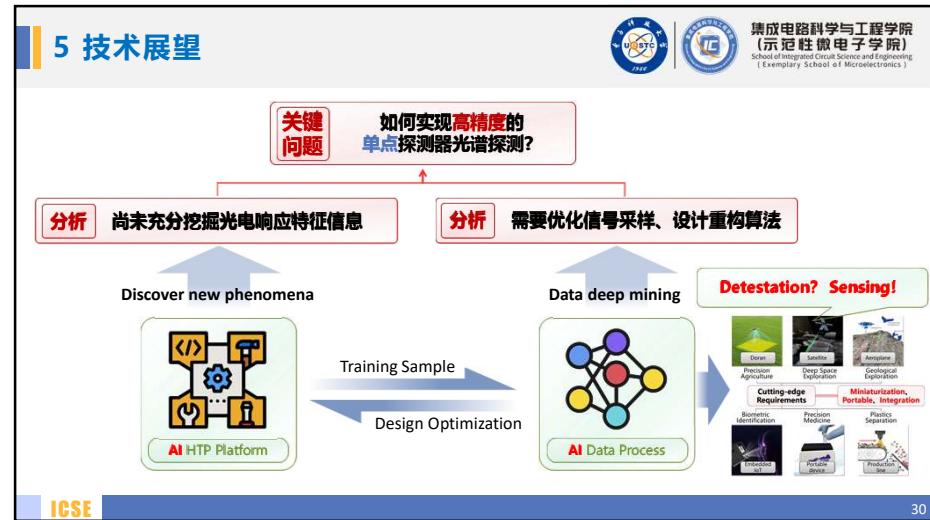
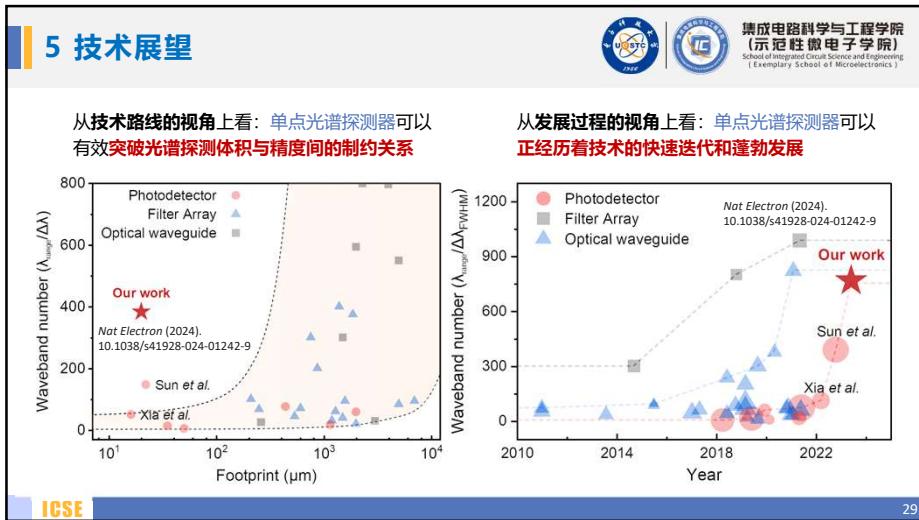
- 1 微型化光谱仪背景
- 2 器件原理设计与实现
- 3 高通量自动化器件光电测试
- 4 复合信号采样与神经网络光谱重构
- 5 技术展望与后续工作

ICSE

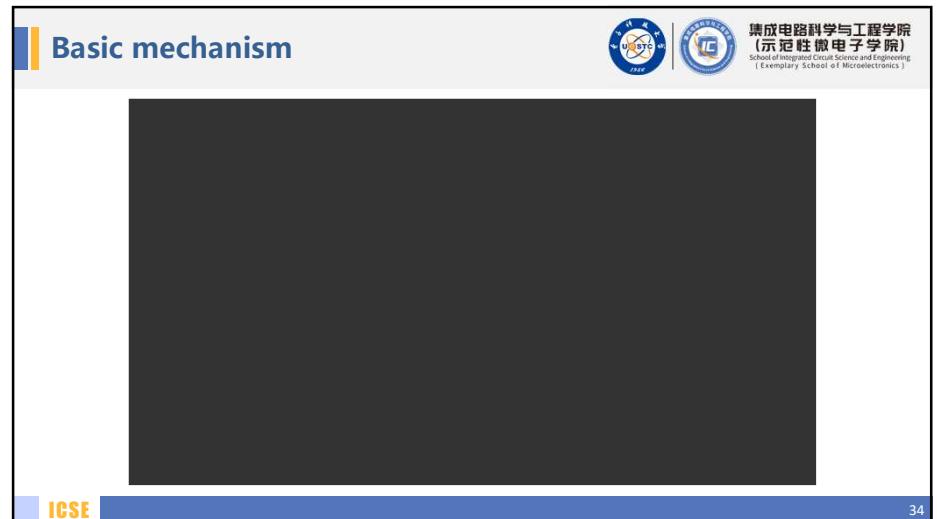
20







- ## 参考文献
- 集成电路科学与工程学院
School of Integrated Circuit Science and Engineering
(Exemplary School of Microelectronics)
- Yang, Z., Albrow-Owen, T., Cai, W. & Hasan, T. **Miniaturization of optical spectrometers.** *Science* 371, eabe0722 (2021).
 - Grotevent, M. et al. Integrated photodetectors for compact Fourier-transform waveguide spectrometers. *Nat. Photonics* 17, 59–64 (2023).
 - Tittl, A. et al. Imaging-based molecular barcoding with pixelated dielectric metasurface. *Science* 360, 1105–1109 (2018).
 - Zhou, J., Chizhik, A. I., Chu, S. & Jin, D. Single-particle spectroscopy for functional nanomaterials. *Nature* 579, 41–50 (2020).
 - Li, A. & Fainman, Y. On-chip spectrometers using stratified waveguide filters. *Nat. Commun.* 12, 2704 (2021).
 - Cai, G. et al. Compact angle-resolved metasurface spectrometer. *Nat. Mater.* <https://doi.org/10.1038/s41563-023-01710-1> (2023).
 - Cheng, R. et al. Broadband on-chip single-photon spectrometer. *Nat. Commun.* 10, 4104 (2019).
 - Deng, W. et al. Electrically tunable two-dimensional heterojunctions for miniaturized near-infrared spectrometers. *Nat. Commun.* 13, 4627 (2022).
 - Martinez, A. Tiny spectrometers. *Nat. Mater.* 22, 947 (2023).
 - Pohl, D. et al. An integrated broadband spectrometer on thin-film lithium niobate. *Nat. Photonics* 14, 24–29 (2020).
 - Bao, J. & Bawendi, M. G. A colloidal quantum dot spectrometer. *Nature* 523, 67–70 (2015).
 - Huang, E., Ma, Q. & Liu, Z. Etalon array reconstructive spectrometry. *Sci. Rep.* 7, 40693 (2017).
 - Wang, Z. et al. Single-shot on-chip spectral sensors based on photonic crystal slabs. *Nat. Commun.* 10, 1020 (2019).
 - Yang, Z. et al. Single-nanowire spectrometers. *Science* 365, 1017–1020 (2019).
 - Yuan, S., Naveh, D., Watanabe, K., Taniguchi, T. & Xia, F. A wavelength-scale black phosphorus spectrometer. *Nat. Photonics* 15, 601–607 (2021).
 - Yoon, H. H. et al. Miniaturized spectrometers with a tunable van der Waals junction. *Science* 378, 296–299 (2022).
 - Li, F. et al. Recent advances in strain-induced piezoelectric and piezoresistive effect-engineered 2D semiconductors for adaptive electronics and optoelectronics. *Nanomicro. Lett.* 12, 106 (2020).
 - Wu, W. et al. Piezoelectricity of single-atomic-layer MoS₂ for energy conversion and piezotronics. *Nature* 514, 470–474 (2014).
- ICSE** 32



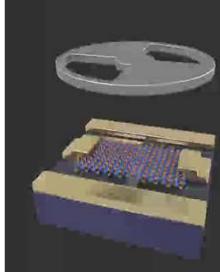
复合(响应度+弛豫)信号采样



集成电路科学与工程学院
(示范性微电子学院)
School of Integrated Circuit Science and Engineering
(Exemplary School of Microelectronics)

Relaxation Time Sampling

Chopping Schematic



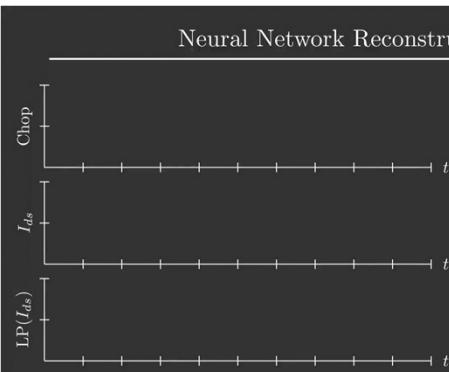
37

神经网络光谱重构



集成电路科学与工程学院
(示范性微电子学院)
School of Integrated Circuit Science and Engineering
(Exemplary School of Microelectronics)

Neural Network Reconstruction



ICSE