



华中科技大学

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

光学与电子信息学院

2022 混合信号技术峰会 东莞·松山湖

光电融合芯片：概念、挑战及进展

谭旻

邮箱：mtan@hust.edu.cn

光电融合芯片实验室 ephic.net

光学与电子信息学院及武汉光电研究中心

华中科技大学

2022年8月06日

1. 引用说明：请采用以下格式引用本报告内容或者直接引文本报告中所提到的文献。
谭旻，“光电融合芯片：概念、挑战及进展”，2022 华为海思混合信号技术峰会，东莞松山湖，8月6日，2022
2. 如需本报告原始图片，请通过mtan@hust.edu.cn邮箱联系我。

华中科技大学

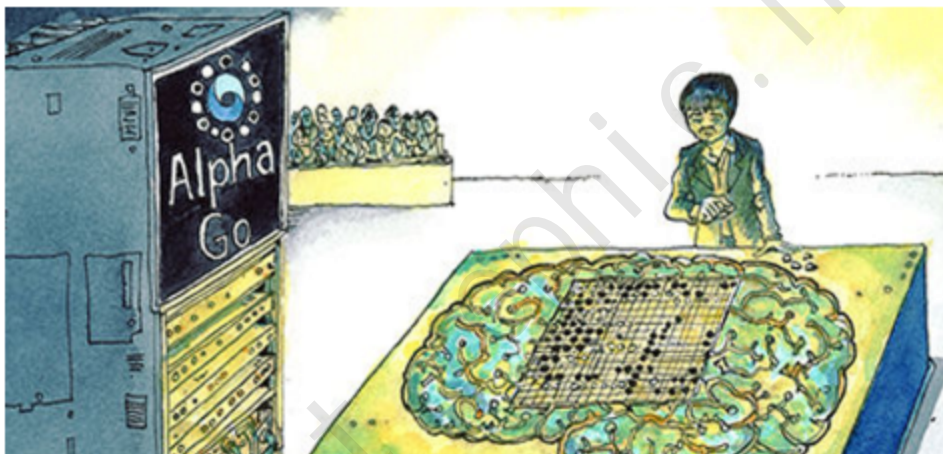
大纲

- 光电融合芯片发展历史
- 光电融合芯片基本概念
- 光电融合芯片关键挑战
- 光电融合芯片研究进展



新兴应用不断涌现

- 无人驾驶，虚拟现实等物质文化应用需求不断提升



Images: The economist



Images: wikipedia



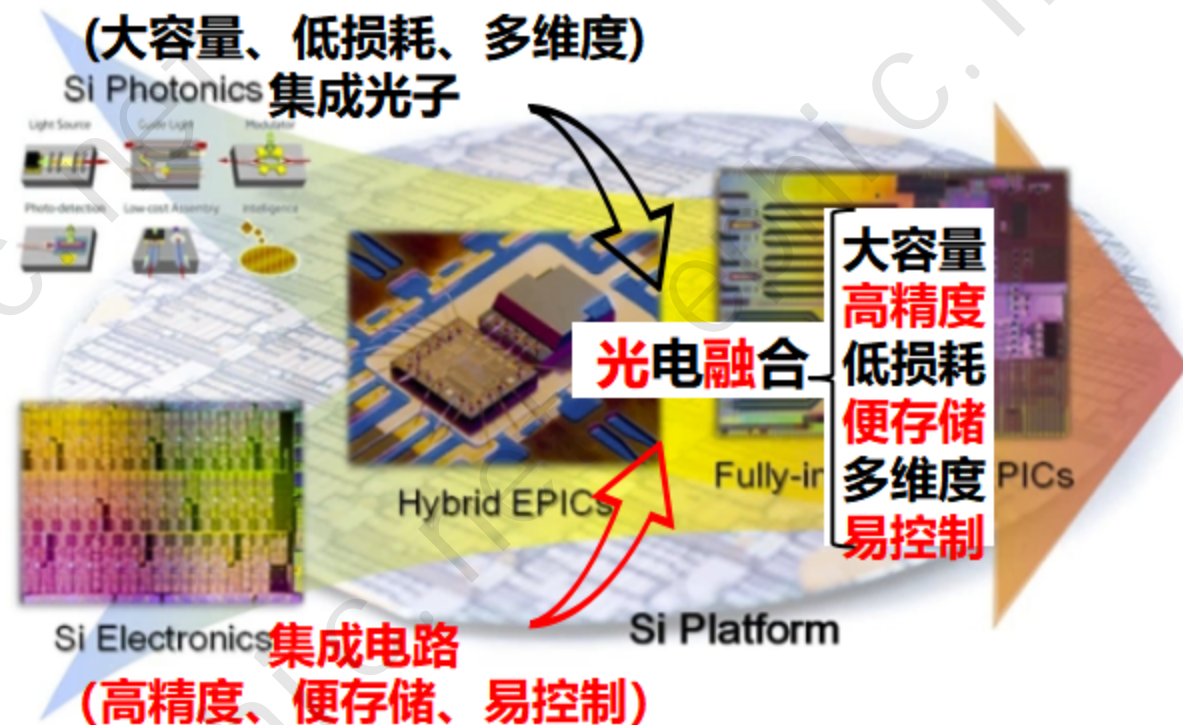
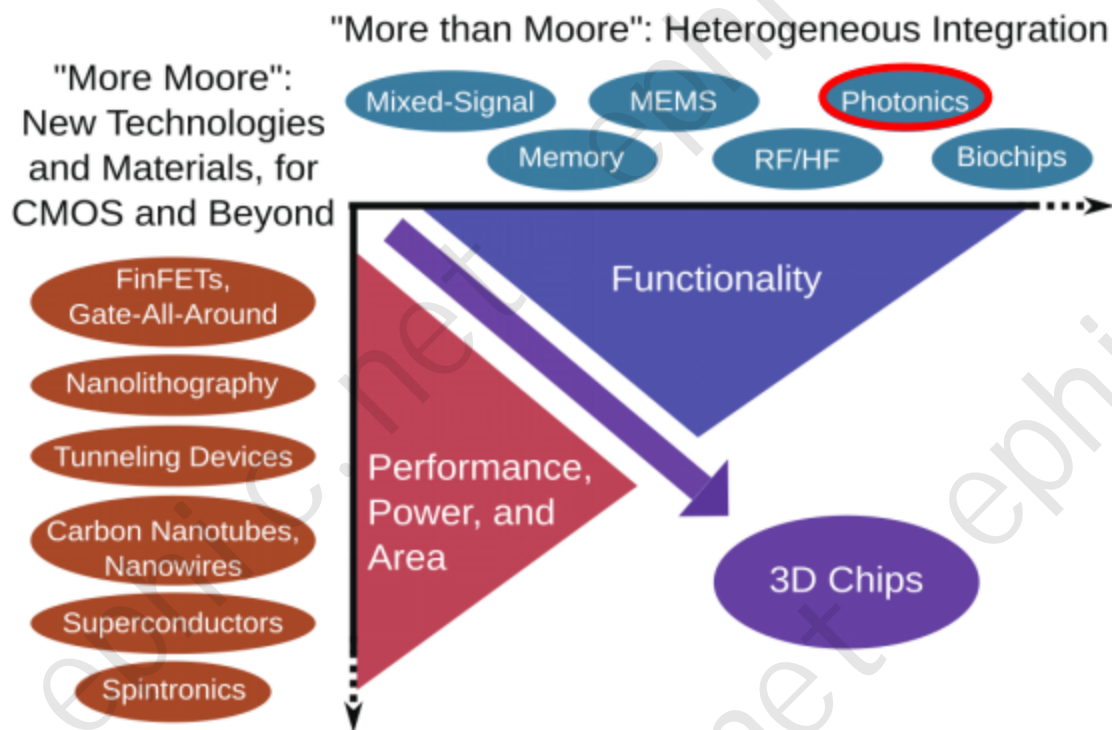
Images: Intel



Images: Forbes

光电融合发展趋势

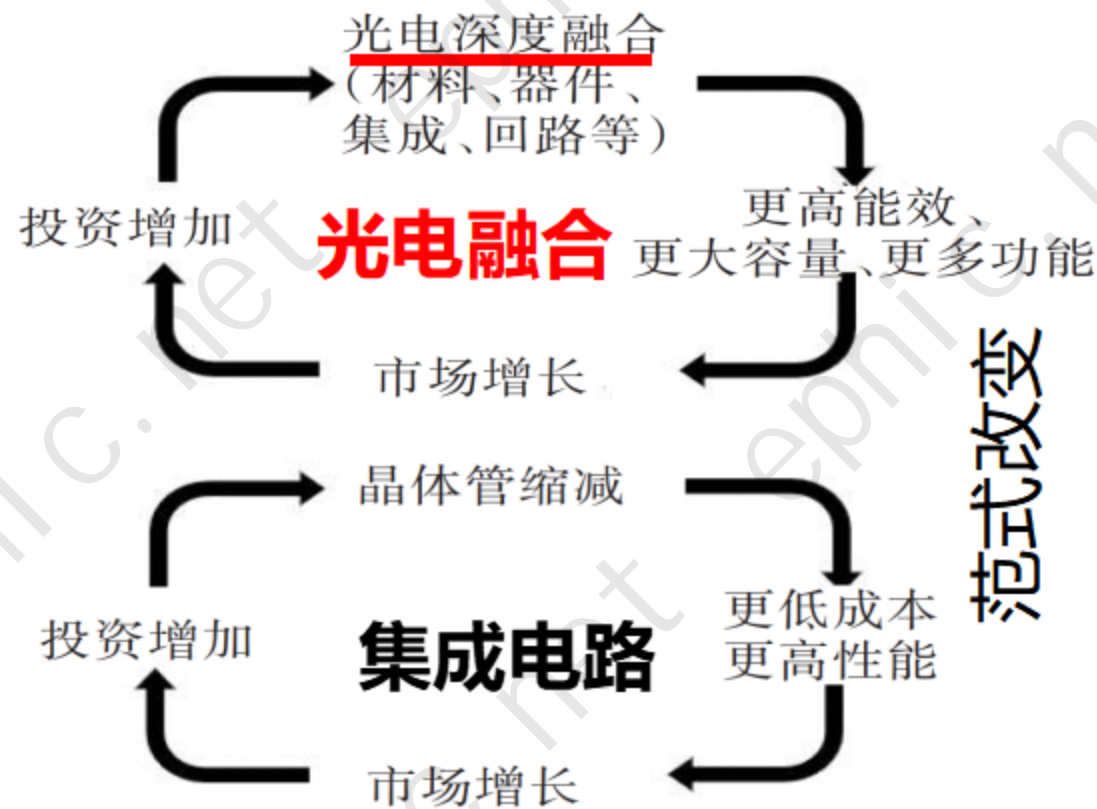
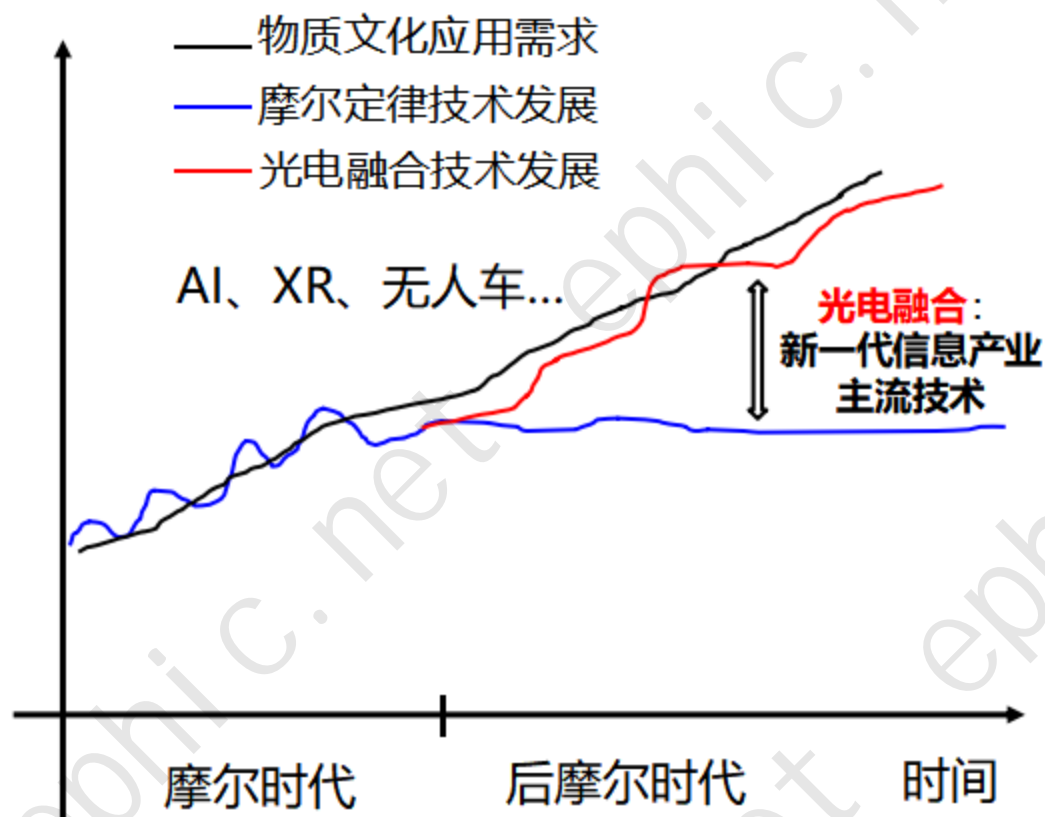
- 光电融合是后摩尔集成电路重要方向
- 光电融合是集成光子发展的必然趋势



光子融入集成电路的后摩尔选项

光子与电子终将融为一体

新闭环取代旧闭环



融合取代**缩减**成为信息产业新引擎

形成需求拉动、技术推动**新闭环**



华中科技大学
HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

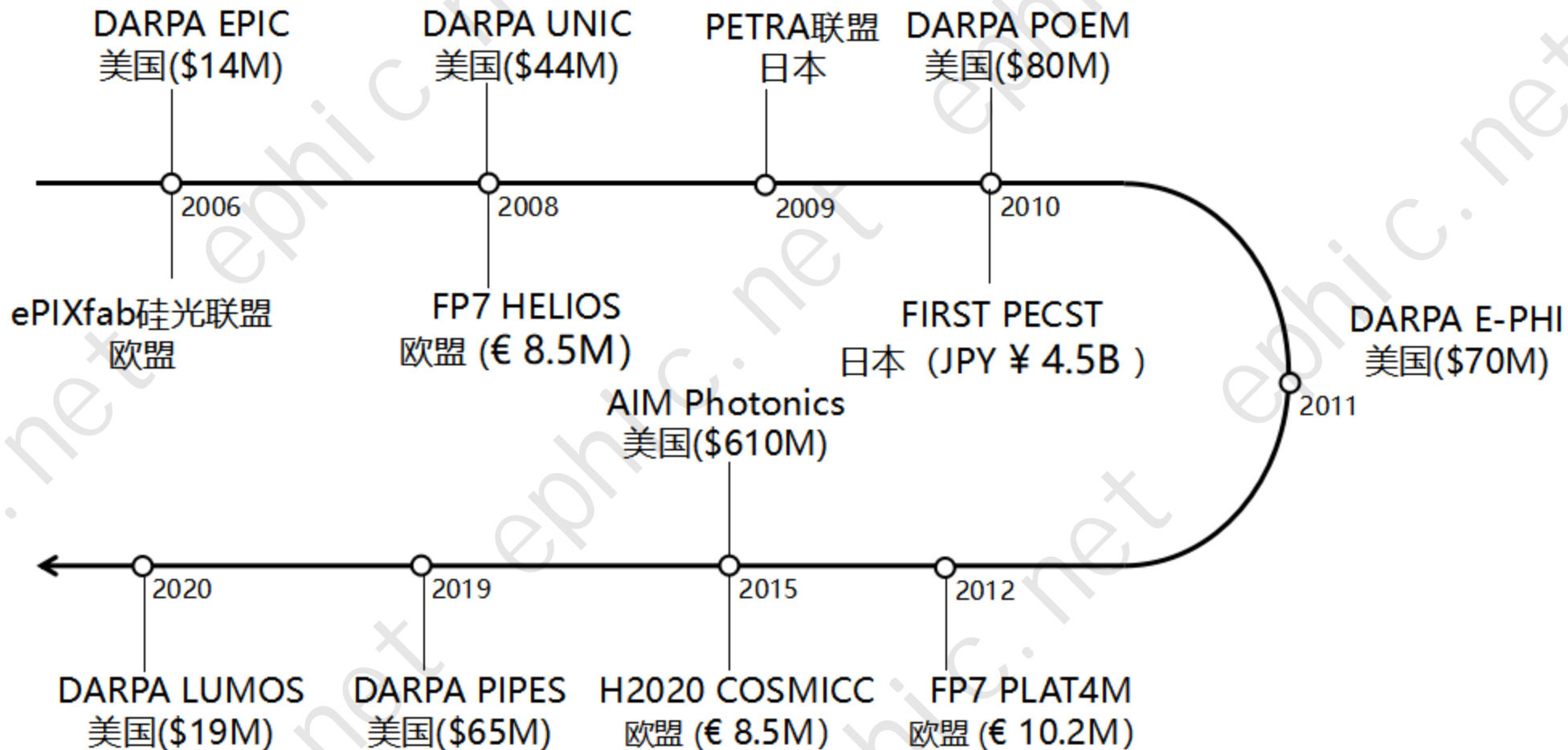
光学与电子信息学院



武汉光电国家研究中心
WUHAN NATIONAL LABORATORY FOR OPTOELECTRONICS

光电融合国外情况

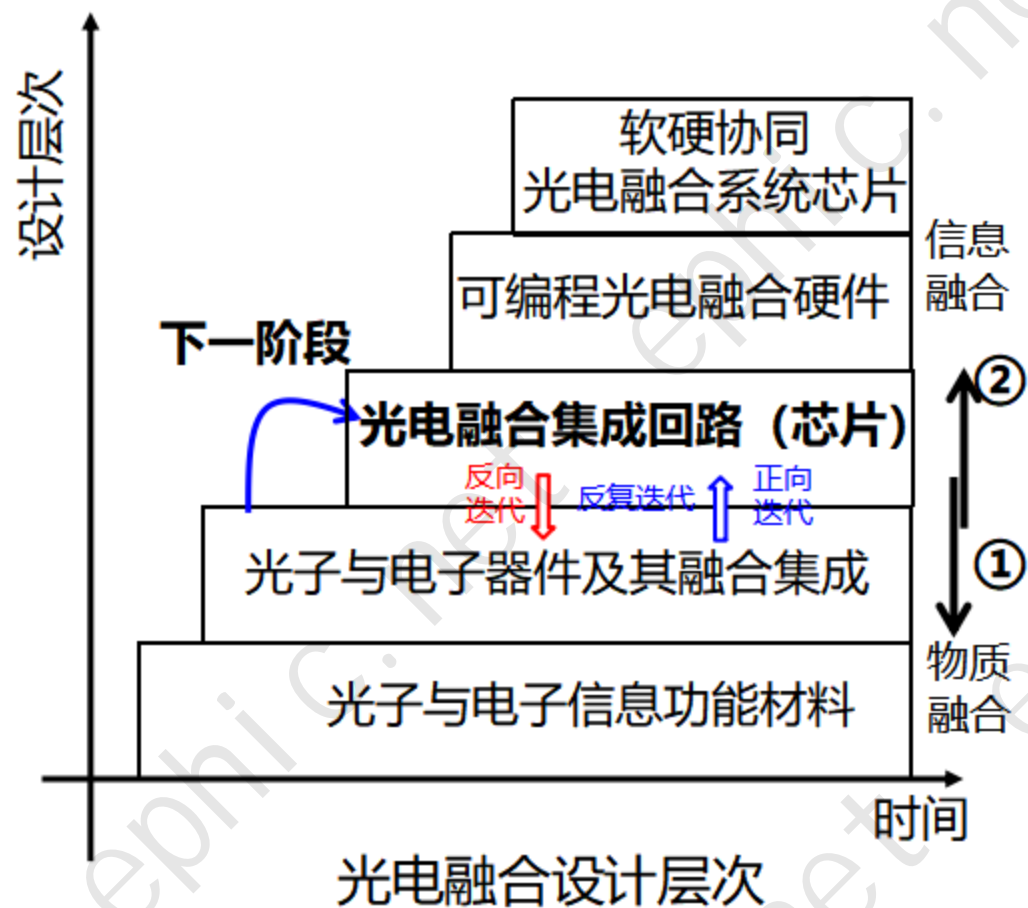
■美、欧、日重大光电融合相关项目及联盟组织



大规模制备逐步成熟，开始迈入系统级芯片阶段

光电融合国外情况

■ 欧美日均重金投入光电融合相关研究



Photonics-Electronics Convergence Laboratory
日本NTT实验室

In pursuit of the ultimate network performance (high capacity/high throughput, low power consumption, flexibility, and adaptability) and continual network innovation, we are engaged in research and development of advanced hardware (devices, circuits, implementations, and system architectures) that combines electronics and photonics technologies.

CAPE Centre for Advanced Photonics and Electronics
"Technology from Science"
英国剑桥大学

CAPE Mission
to research and develop, through multidisciplinary research, materials, processes, components and systems; define the future strategy and market implementation; and set the industry agendas for the convergence of photonic and electronic technology platforms

AyarLabs 美国

AIM photonics 美国

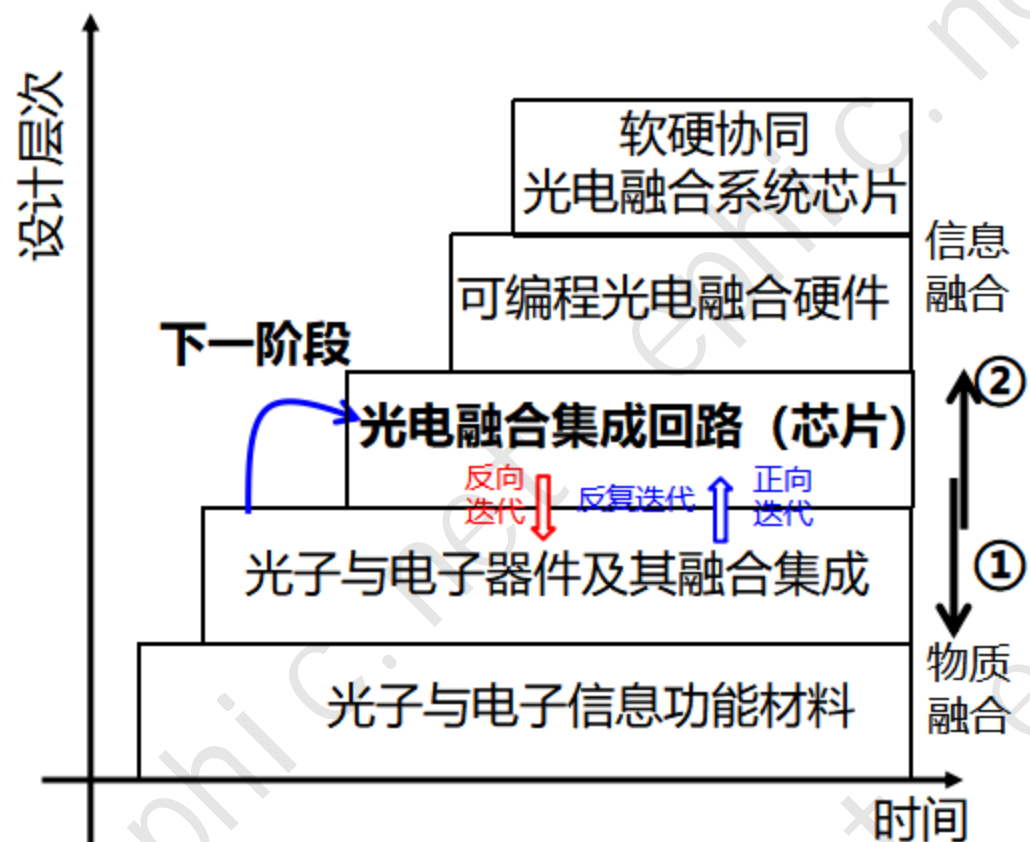
FECS 日本

UNIVERSITY OF Southampton
Optoelectronics Research Centre
英国

多项大规模光电融合系统芯片工作，逐步进入信息融合阶段

光电融合国内情况

■物质融合较国外晚起步，信息融合基本同一起跑线



光电融合设计层次

2017年6月	1. 华科研究组 首个光电融合芯片控制方法设计专利，目前总计申请及授权专利~30项。
2019年9月	2. 国家重点研发计划“ 纳光子器件及光电融合集成基础 ”，北大（牵头）、 华科（申报人参与） 、南大。
2019年9月	3. 华科研究组 [J1]指出光电融合处于器件集成到回路设计的转折，提出回路设计技术演进路线图。
2020年8月	4. 中国科协发布2020重大科学问题和工程技术难题“硅光技术能否促成微电子和光电子的融合”
2021年2月	5. 华科研究组 [J2]提出热调光电融合反馈控制的一般模型、挑战及最新进展。
2021年5月	6. 中科院院士大会黄如院士“在集成电路未来发展中，光电融合是一个很重要的趋势”
2021年12月	7. 阿里巴巴达摩院2022十大科技趋势预测之“光电融合兼具光子和电子优势，突破摩尔定律限制”
2022年4月	8. 华科研究组 [J3]再次阐明和完善光与电回路级融合的基本概念，并对最新进展进行综述。 ...中国工程院、邮科院、华为、上交等

[J1]. 谭旻*, 明达, 汪志城, “[从光子集成迈向光电融合集成回路:以微环波长锁定为例](#),” *微纳电子与智能制造* 2019(3).

[J2]. M. Tan* et al., “[Towards electronic-photonic-converged thermo-optic feedback tuning](#),” *J. Semicond.*, vol. 42, no. 2, p. 23104, 2021.

[J3]. M. Tan*, Y. Wang, K. X. Wang*, Y. Yu, and X. Zhang, “[Circuit-level convergence of electronics and photonics: basic concepts and recent advances](#),” *Front. Optoelectron.*, vol. 15, no. 1, pp. 1-17, 2022

大纲

- 光电融合芯片发展历史
- **光电融合芯片基本概念**
- 光电融合芯片关键挑战
- 光电融合芯片研究进展



科学结构的层次演化

4 August 1972, Volume 177, Number 4047

SCIENCE

More Is Different

Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science.

P. W. Anderson

The reductionist hypothesis may still be a topic for controversy among philosophers, but among the great majority of active scientists I think it is accepted without question. The workings of our minds and bodies, and of all the animate or inanimate matter of which we have any detailed knowledge, are assumed to be controlled by the same set of fundamental laws, which except under certain extreme conditions we feel we know pretty well.

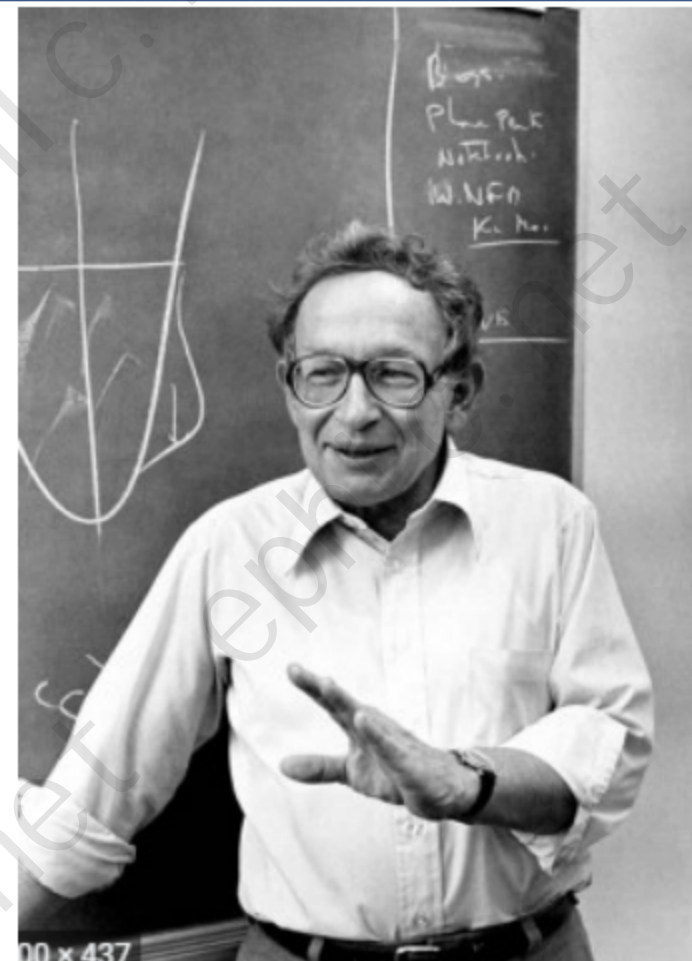
It seems inevitable to go on uncritically to what appears at first sight to

planation of phenomena in terms of known fundamental laws. As always, distinctions of this kind are not unambiguous, but they are clear in most cases. Solid state physics, plasma physics, and perhaps also biology are extensive. High energy physics and a good part of nuclear physics are intensive. There is always much less intensive research going on than extensive. Once new fundamental laws are discovered, a large and ever increasing activity begins in order to apply the discoveries to hitherto unexplained phenomena. Thus, there are two dimensions to basic research. The frontier of science extends all along a long line from the newest and most modern intensive research, over the ex-

less relevance they seem to have to the very real problems of the rest of science, much less to those of society.

The constructionist hypothesis breaks down when confronted with the twin difficulties of scale and complexity. The behavior of large and complex aggregates of elementary particles, it turns out, is not to be understood in terms of a simple extrapolation of the properties of a few particles. Instead, at each level of complexity entirely new properties appear, and the understanding of the new behaviors requires research which I think is as fundamental in its nature as any other. That is, it seems to me that one may array the sciences roughly linearly in a hierarchy, according to the idea: The elementary entities of science X obey the laws of science Y.

X	Y
solid state or many-body physics	elementary particle physics
chemistry	many-body physics
molecular biology	chemistry
cell biology	molecular biology
⋮	⋮
psychology	physiology
social sciences	psychology



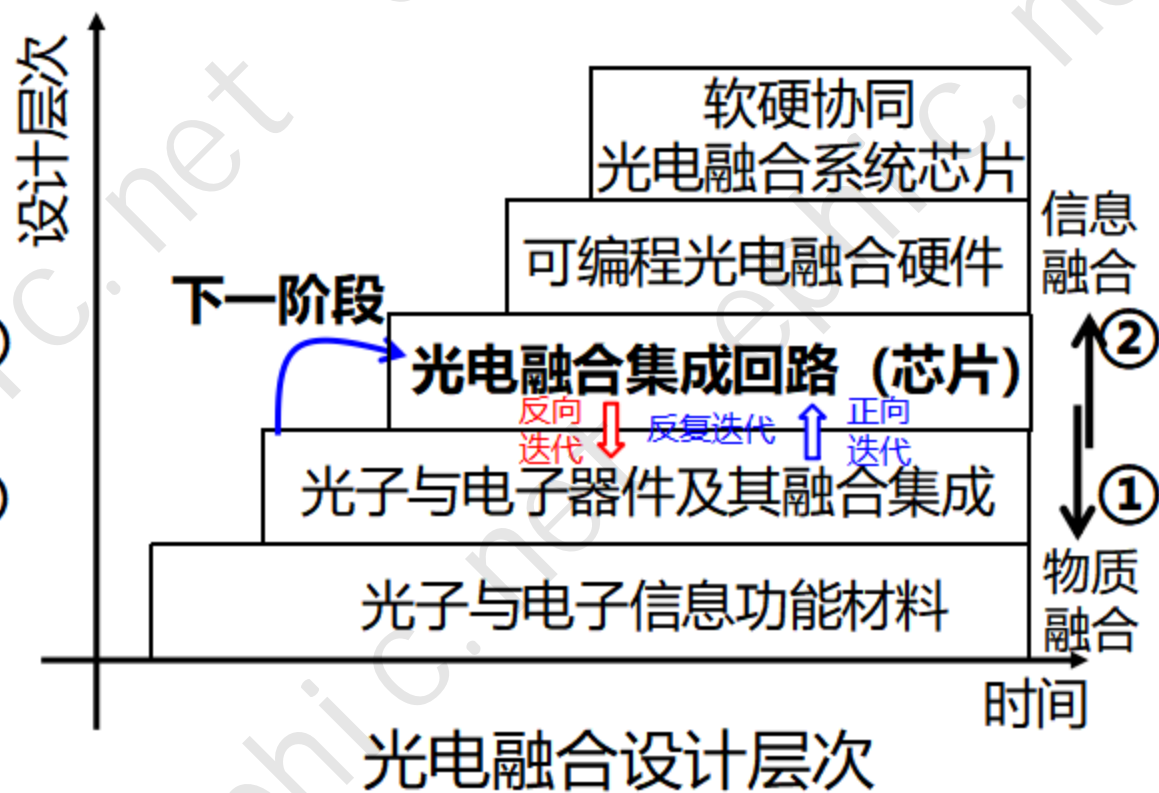
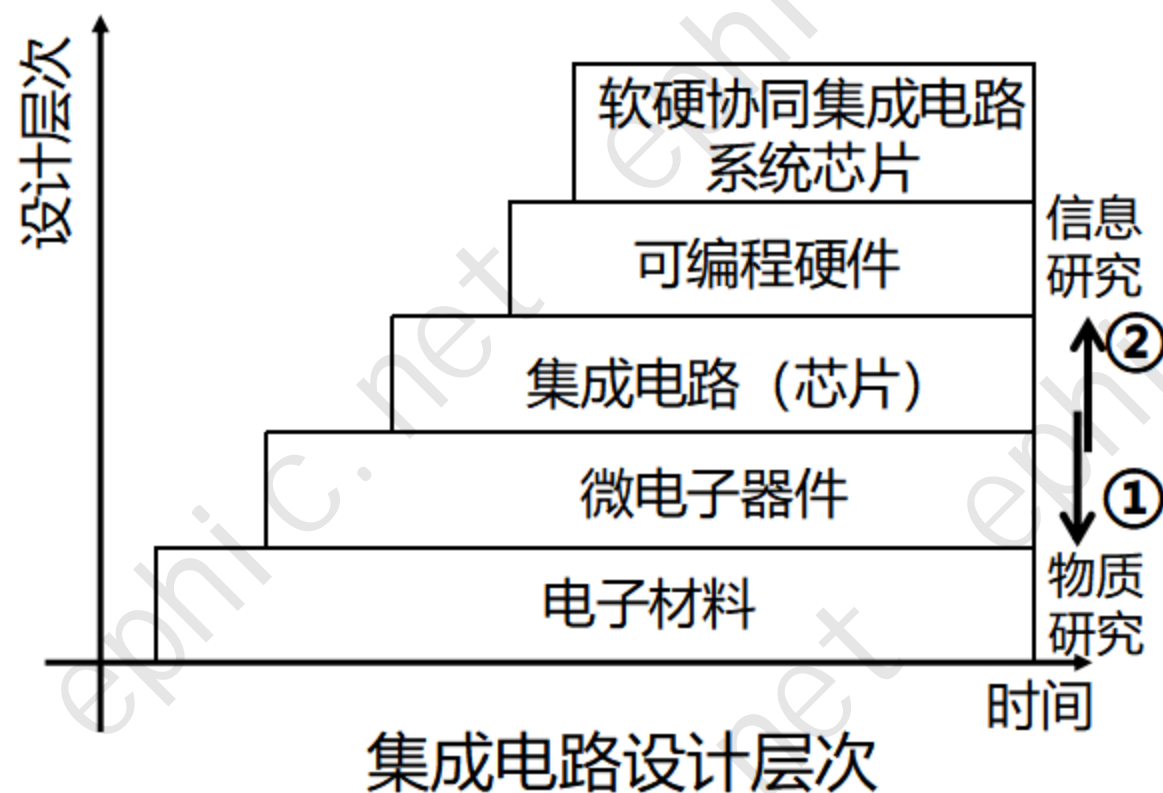
Philip Warren Anderson
1977 Nobel Prize in Physics

集成电路与光电融合均存在层次化的结构



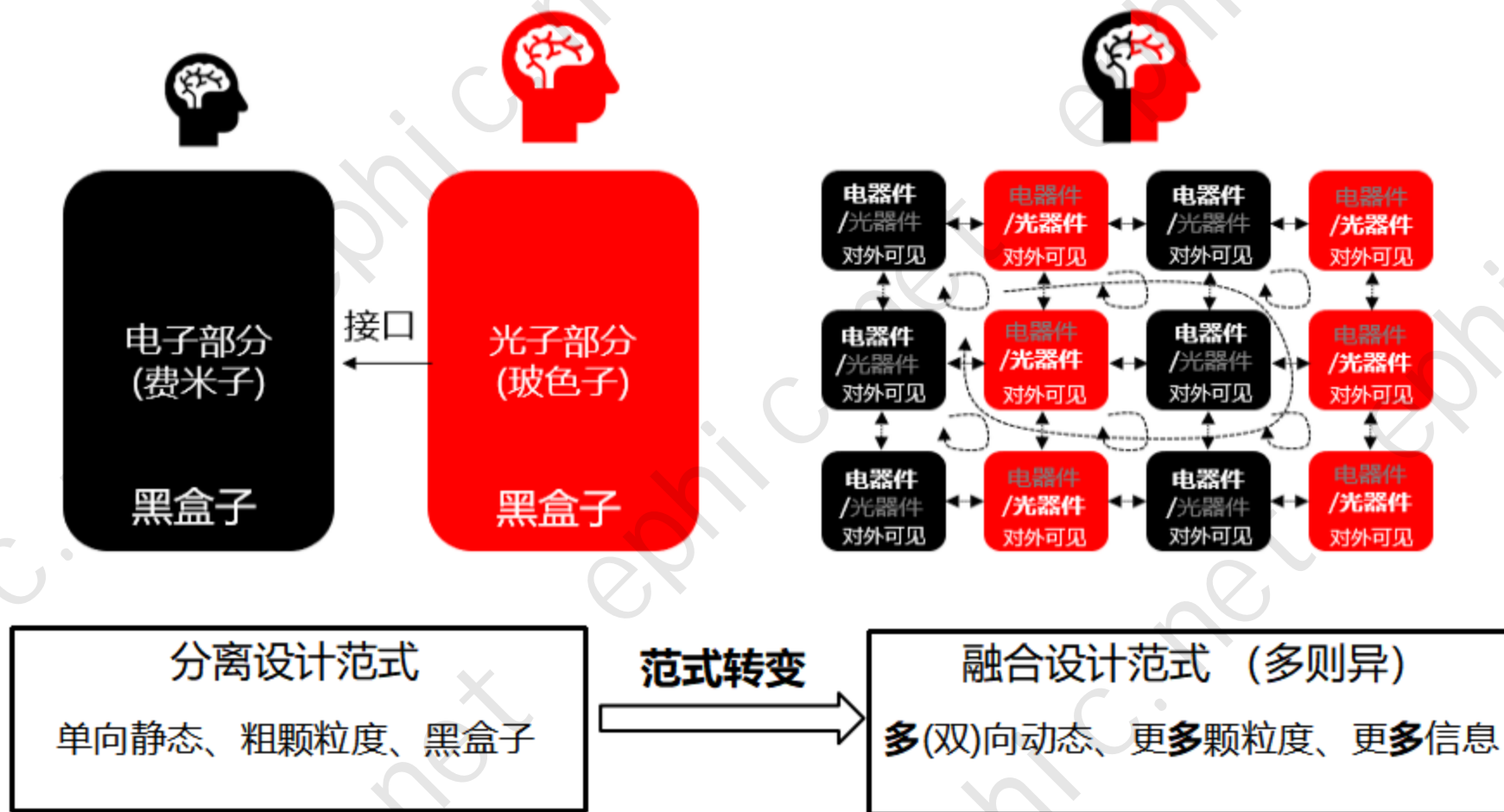
集成电路与光电融合的设计层次

- 光电融合集成两个层次①物质融合②信息融合
- 信息融合：信息的产生、使用、测度、处理 ...



分离到融合的范式转变

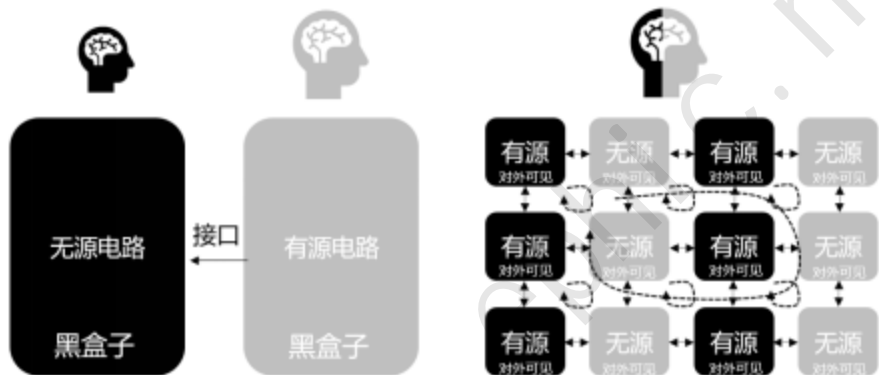
- 融合形式：物质融合（融合集成） v.s. 信息融合（融合调控）



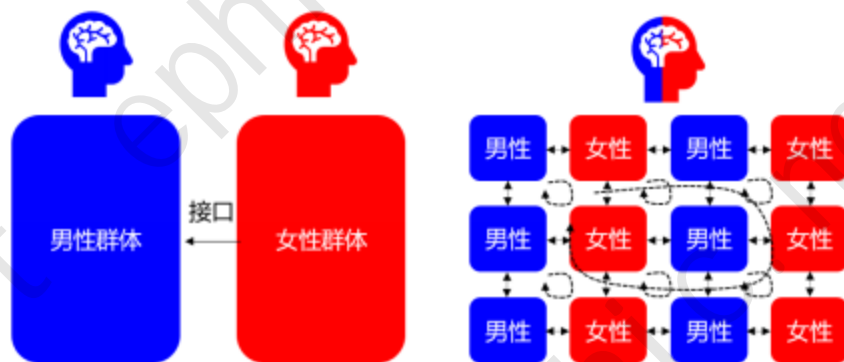
从分离到融合是质的飞跃

分离到融合是质的飞跃

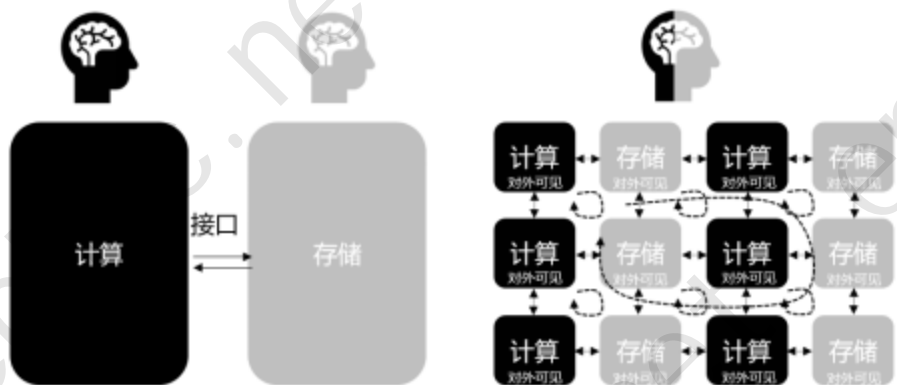
■ 多则异：更多交流、更多颗粒度、更多信息会很不一样



集成电路的融合发展



人类社会的融合发展



存储计算的融合发展



光子与电子的融合发展

社会和技术发展史就是一部从分离到融合的发展史

定义：集成电路 v.s. 光电融合芯片

- 集成电路(Integrated Circuits)或芯片是指通过一系列特定的①**加工工艺**，将晶体管、二极管等有源器件和电阻器、电容器等无源元件，按照一定的②**电路(circuits)互连**，①“**集成**”在半导体（如硅或砷化镓等化合物）晶片上，③**封装**在一个外壳内，执行特定功能的电路或系统。

国务院学位委员会第三十六次会议 关于设置“集成电路科学与工程”
一级学科的建议
审 批 文 件 之 二

- 光电融合芯片或光电融合集成回路是指通过一系列特定的①**加工工艺**，将晶体管、电光调制器等**电子和光子**有源器件和电阻器、波导等**电子和光子**无源元件，按照一定的②**回路(circuits)互连**，①“**集成**”在半导体（如硅或砷化镓等化合物）晶片上，③**封装**在一个外壳内，执行特定功能的回路或系统。

物质相关：工艺、集成、封装等。

信息相关：器件互连等。



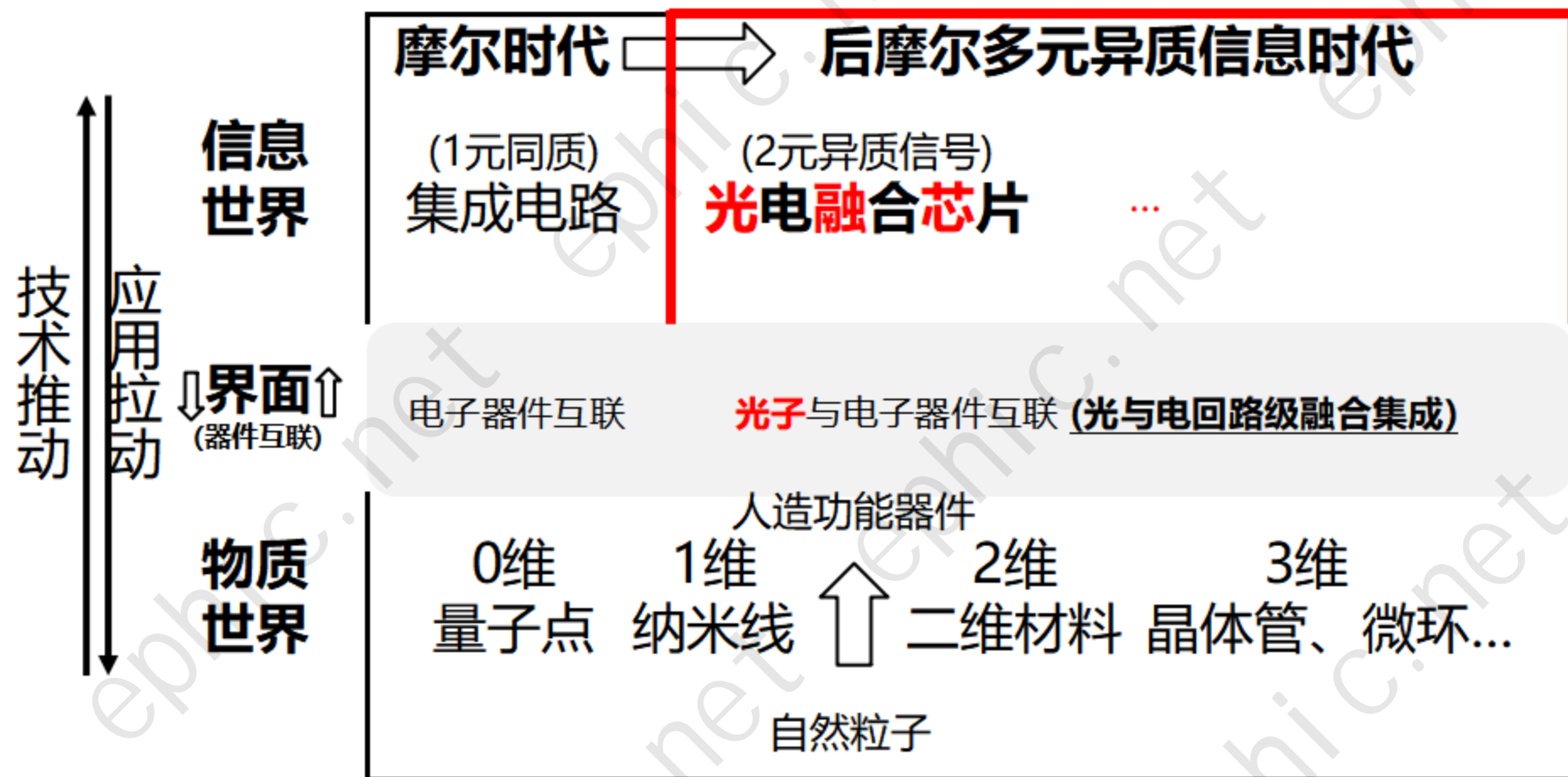
大纲

- 光电融合芯片发展历史
- 光电融合芯片基本概念
- 光电融合芯片关键挑战**
- 光电融合芯片研究进展



回路级融合挑战的两个视角

- 回路级挑战：信息世界与物理世界两个视角均指向**稳定性关键挑战**



不同层级如何借鉴电子经验

大规模信息均以电子信息为主

回路：如何借鉴电的经验？

带隙：电 v.s. 光

相变：电 v.s. 光

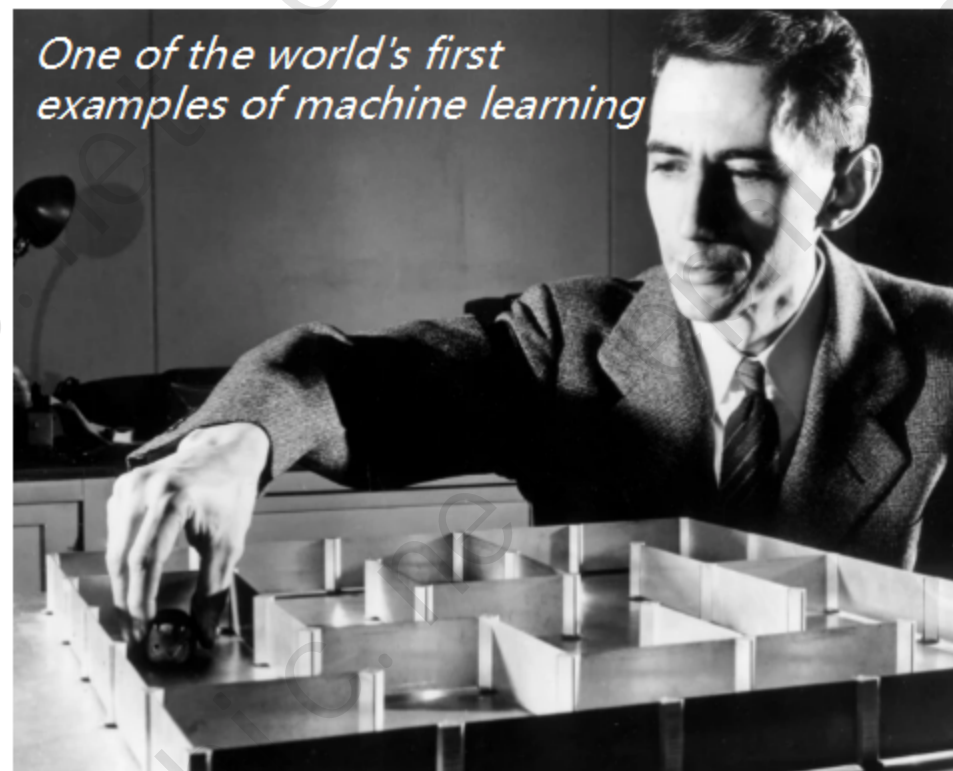
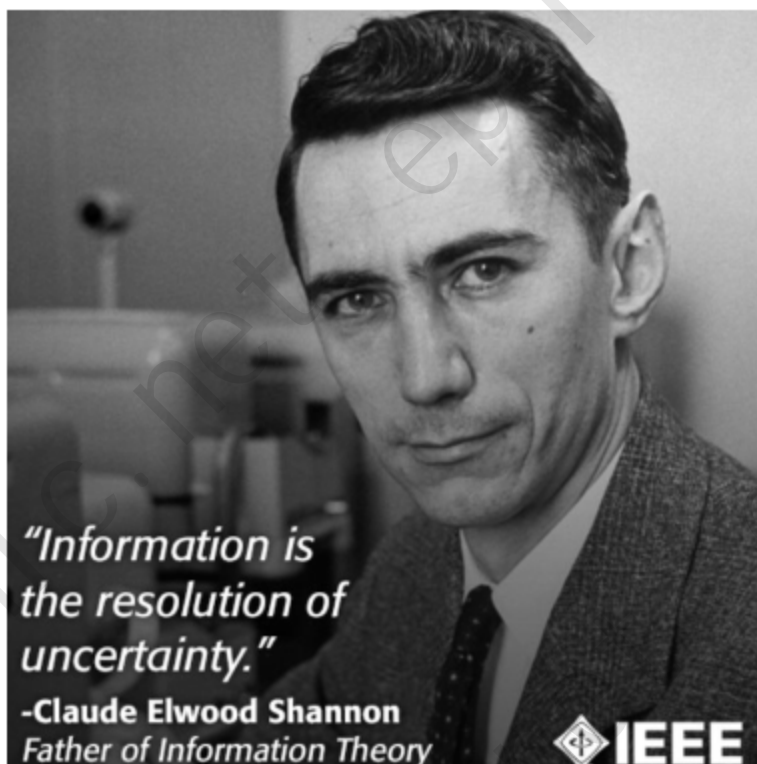
超材料：电 v.s. 光

解决方案：是否可以借鉴集成电路经验，如何借鉴？



根本挑战：光参数稳定性

- 香农信息第一性原理的视角
 - 香农信息的定义是**非确定性的消除**
 - **确定性建立**是非不确定性消除的手段



一个硬币的两面：非确定性的消除 v.s. 确定性的建立（稳定性）

根本挑战：光参数稳定性

■光器件物质制备的视角

- 光参数稳定性问题甚至无法在原子层得到解决

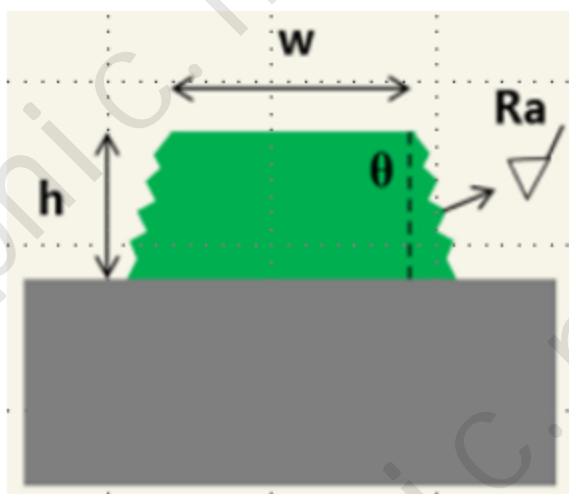


Michal Lipson在哥伦比亚大学担任Eugene Higgins讲席教授，是美国国家科学院和美国艺术与科学学院的双料院士。由于在硅基光电子学领域中的开拓性工作，Lipson教授将业内众多奖项收入囊中，其中包括被称为天才奖的麦克阿瑟奖。Lipson教授目前担任美国光学学会（OSA）副主席一职，2023将担任主席。

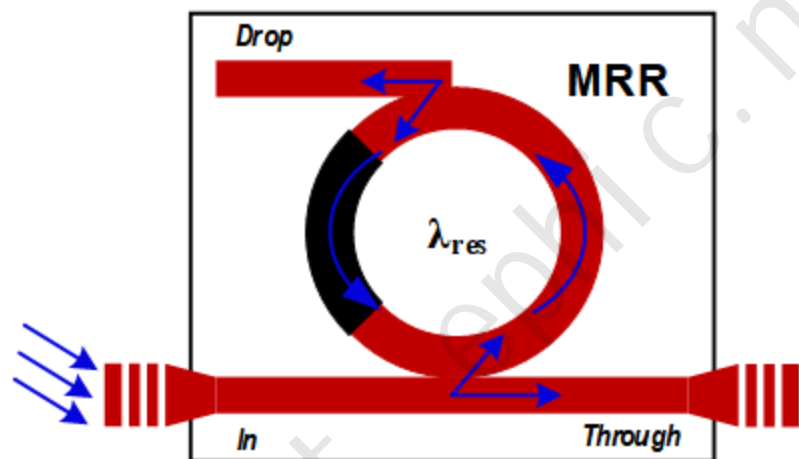
Q9: 硅基光电子学目前面临哪些挑战?

A9: 在我看来，硅基光电子学最大的挑战来自于微纳器件对制造过程的精度要求非常高。许多硅基光电子器件是高度精密和高度局域化的，微纳器件的宽度或高度即使只改变0.1 nm，也就是相当于一个或两个原子的尺度，但却对器件性能的影响很大。我相信在将来通过巧妙的结构设计可能会解决这个问题。必须找到降低这种敏感性的办法，否则这项技术很难大规模扩展。

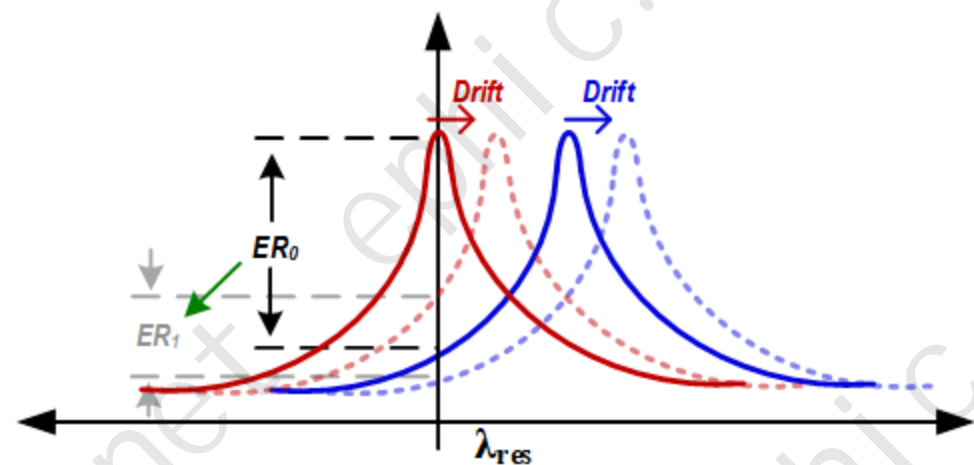
制造随机性影响参数确定性的建立（参数稳定性）。



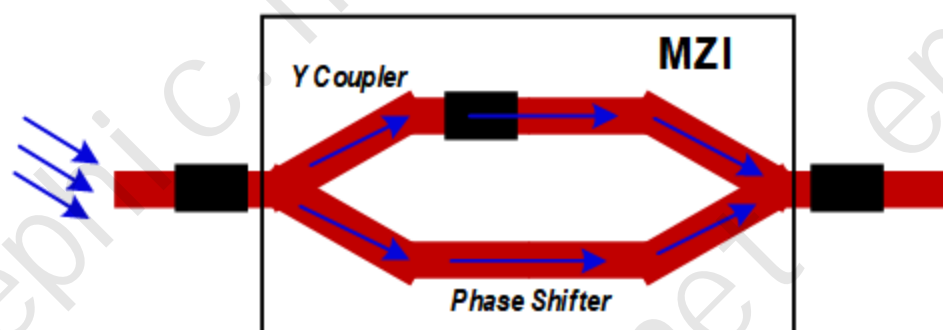
重要光器件参数稳定性



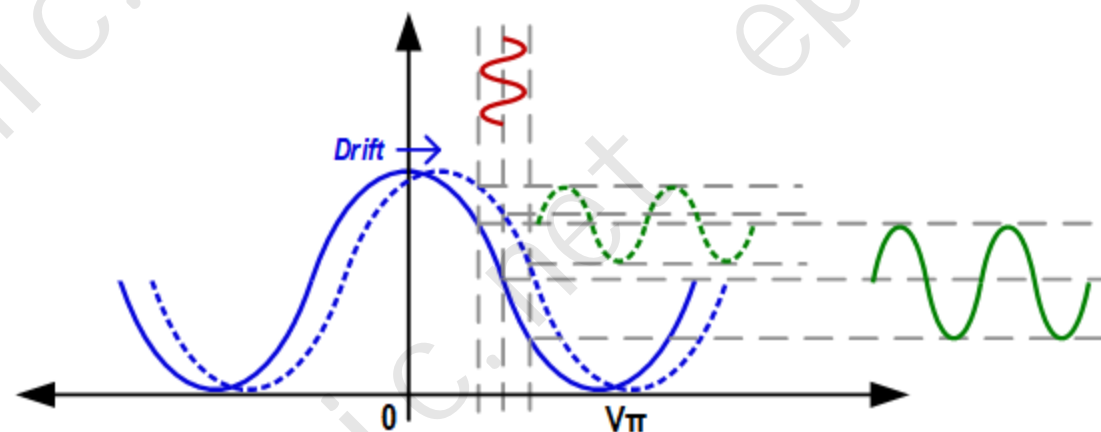
微环谐振器



谐振波长易因工艺偏差，环境温度漂移



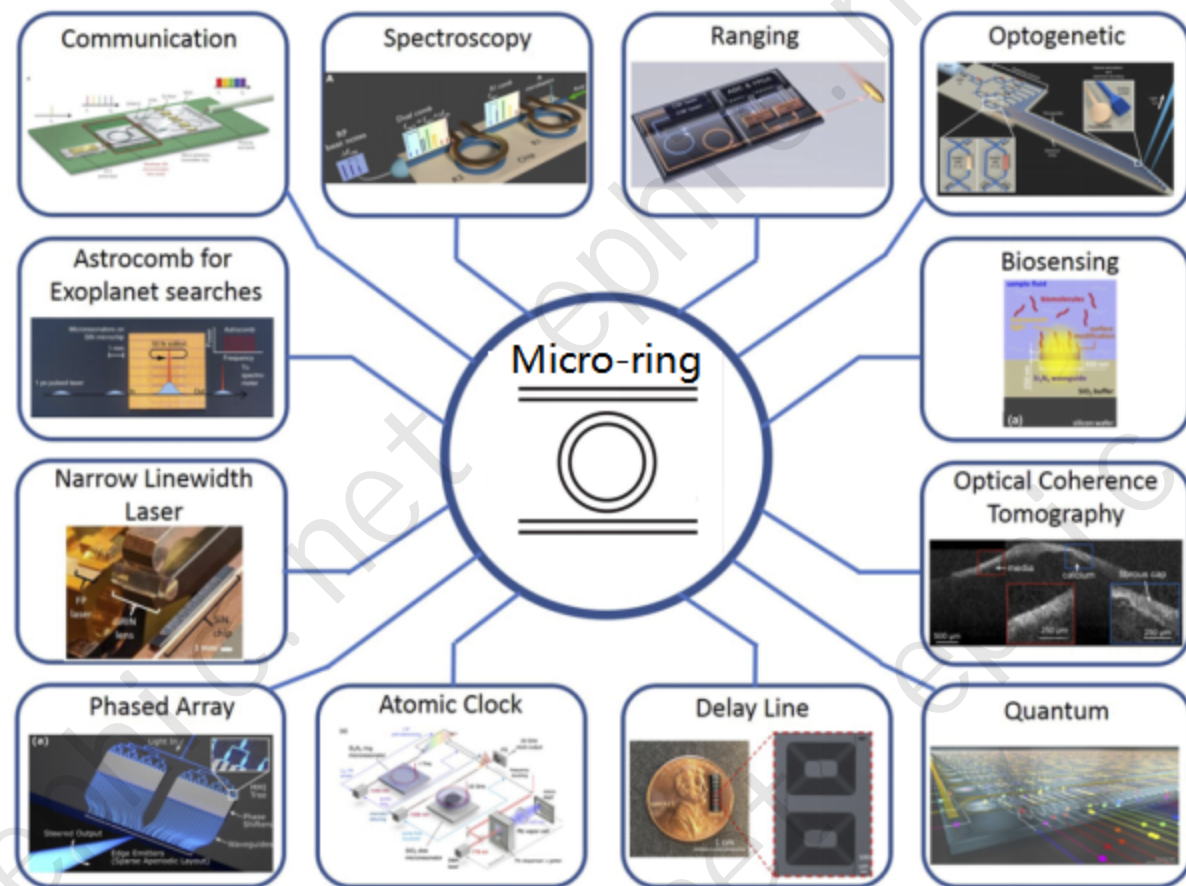
马赫-曾德尔干涉仪



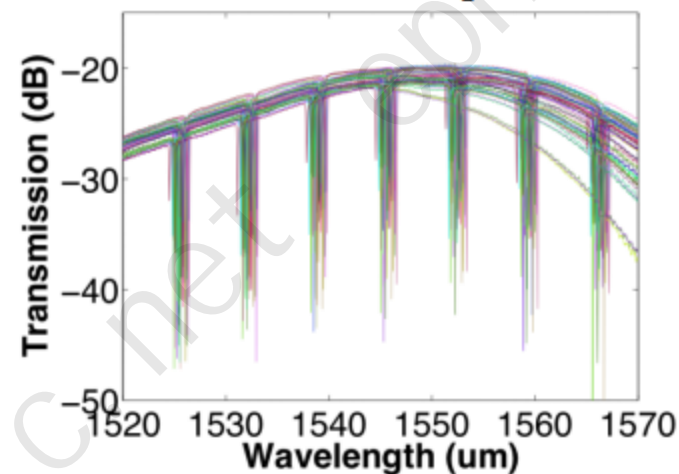
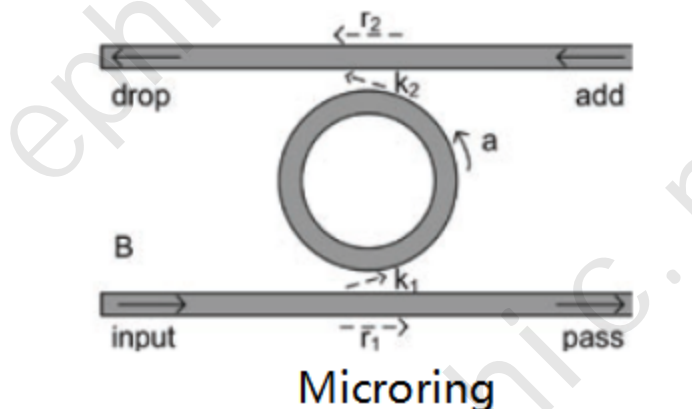
工作点易因工艺偏差，环境温度，静电荷积累，光折射等干扰漂移

微环谐振器波长稳定性

- 重要性类似集成电路晶体管，但是对工艺制备非常敏感



APL Photon. 6, 071101 (2021)



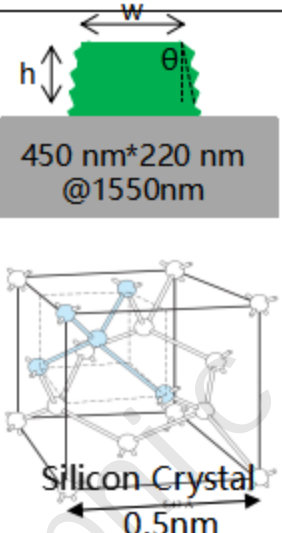
Microring transmission curve

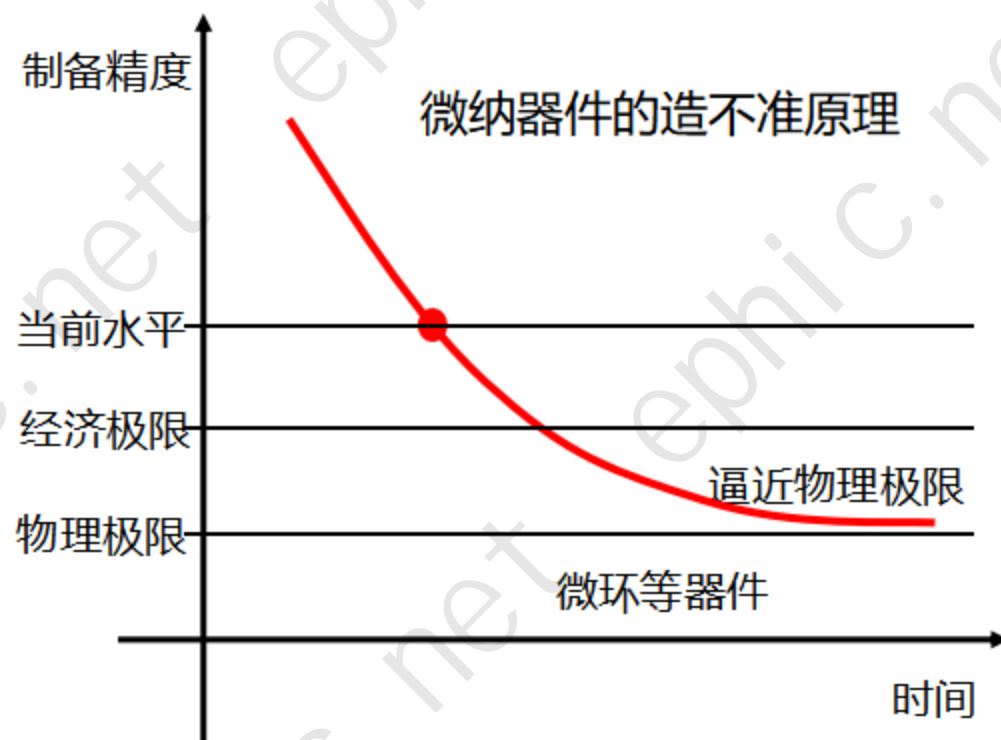
微环存在海量应用，但是无法稳定工作

光参数稳定性示例：波长稳定性

■ 光参数稳定性原因：物理、经济极限，动态环境变化等

实用精度要求 < 10 pm

参数 Parameters		λ Sensitivity 敏感性
 <p>厚度 h Thickness</p> <p>宽度 w Width</p> <p>侧壁角度 θ Angle</p> <p>温度 T Temp.</p>	$d\lambda/dh = \sim 2\text{nm/nm}$	
	$d\lambda/dw = \sim 1\text{nm/nm}$	
	$d\lambda/d\theta = \sim 0.3\text{nm/degree}$	
	$d\lambda/dT = 0.08\text{nm/}^\circ\text{C}$	



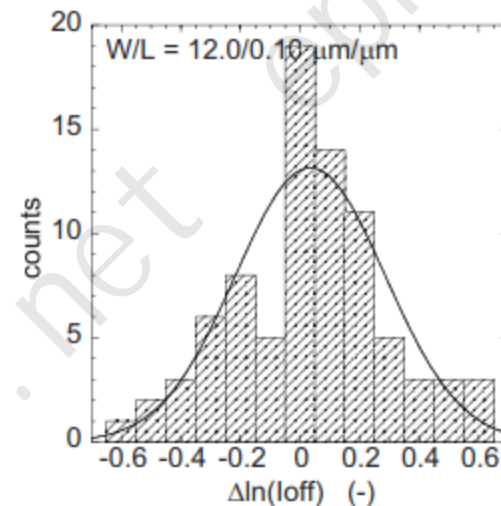
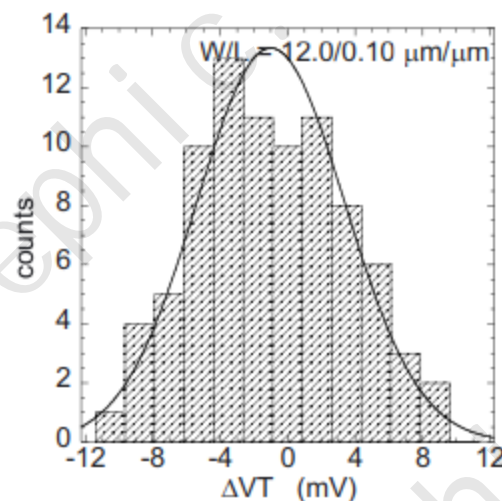
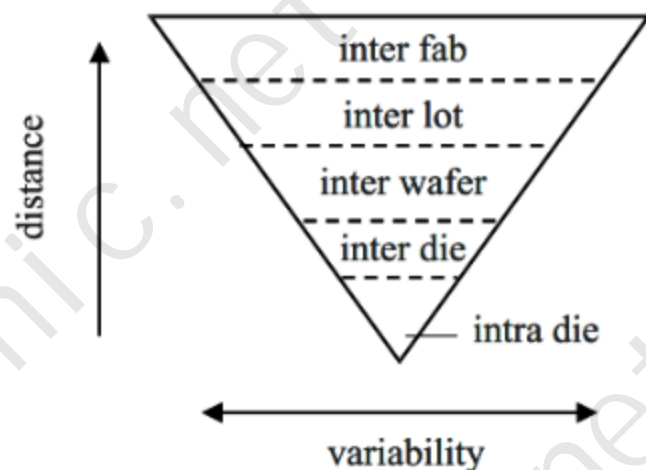
解决方案：钱学森《系统工程论》，“不可靠零件可以组成优秀系统”

不可靠零件组成优秀系统



J. Von Neumann, Probabilistic Logics and the Synthesis of Reliable Organisms from Unreliable Components

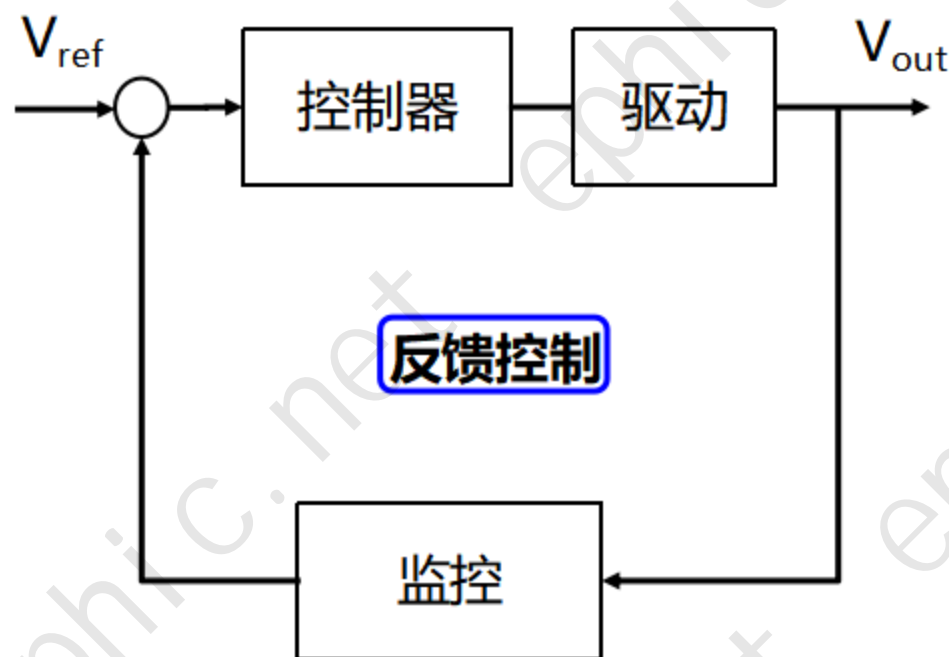
Princeton University Press (1956)



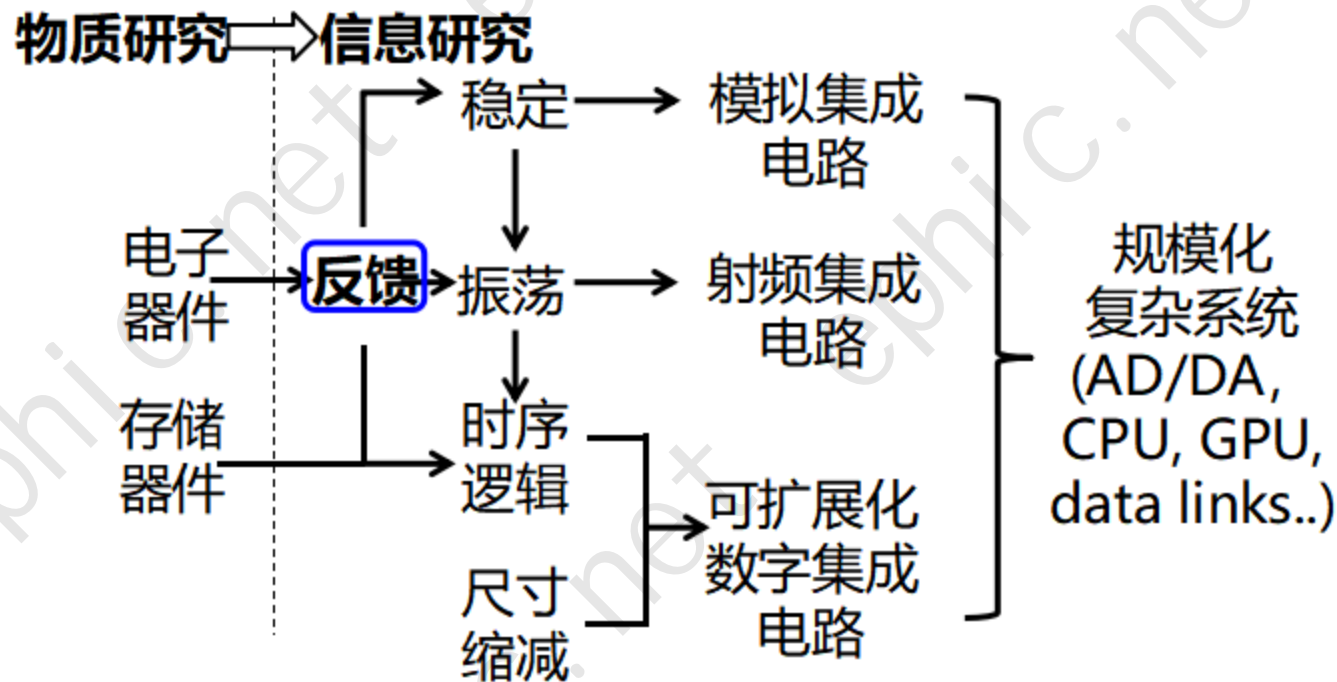
集成电路亦是不可靠低层器件构成的优秀系统

集成电路技术演进路线图

集成电路系统性方案：“非理想电子器件组成优秀系统”



反馈控制实现电参数稳定性



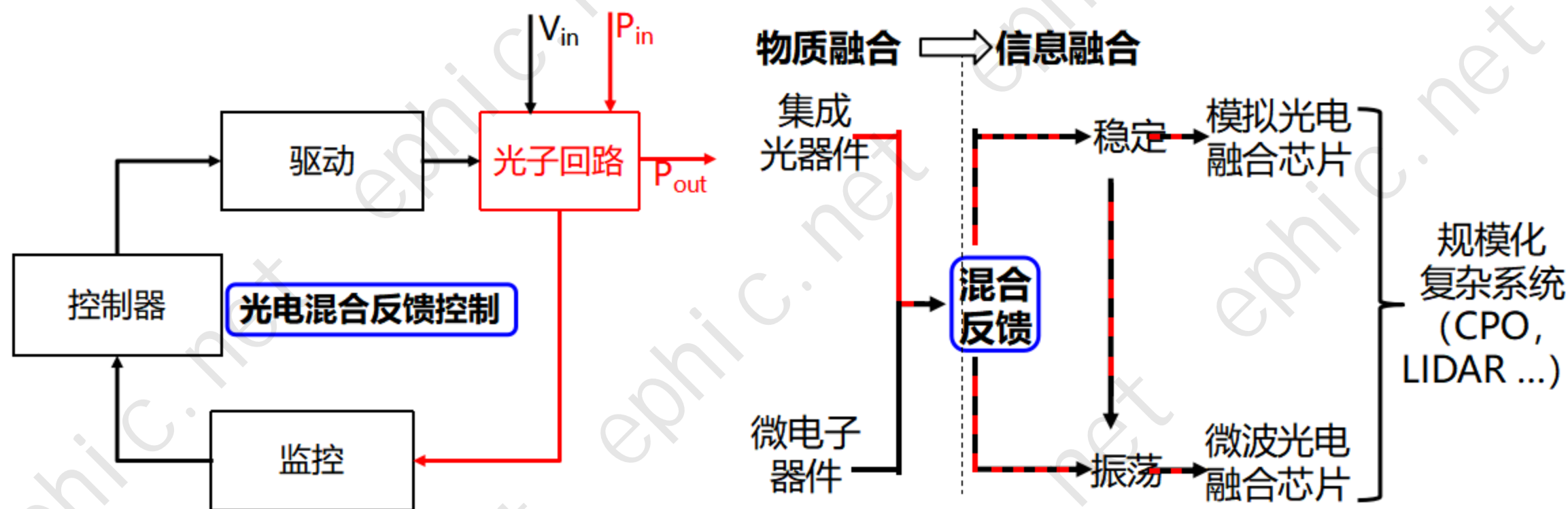
反馈为中心的系统性方案：集成电路技术演进路线图

Ref: 谭旻*, 明达, 汪志城, “从光子集成迈向光电融合集成回路:以微环波长锁定为例,” 微纳电子与智能制造, 2019(3).

M. Tan* et al., “Circuit-level convergence of electronics and photonics,” *Front. Optoelectron.*, vol. 15, no. 1, pp. 1-17, 2022.

光与电回路级融合技术路线图

光与电回路级融合系统性方案：“非理想电子和光子器件组成优秀系统”



光电混合反馈控制实现光参数稳定性

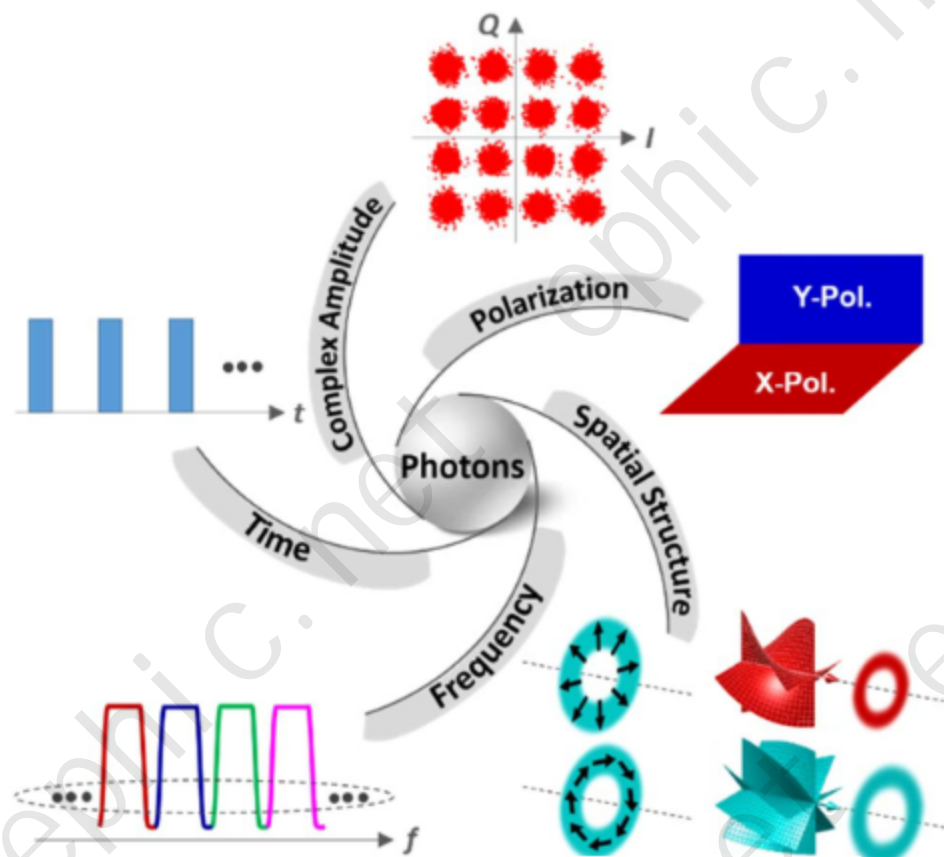
反馈为中心的系统性方案：光与电回路级融合技术演进路线图

Ref: 谭旻*, 明达, 汪志城, “从光子集成迈向光电融合集成回路:以微环波长锁定为例,” 微纳电子与智能制造, 2019(3).

M. Tan* et al., “Circuit-level convergence of electronics and photonics,” *Front. Optoelectron.*, vol. 15, no. 1, pp. 1-17, 2022.

回路级融合新挑战：多维光参数稳定性

- 通过光电融合减小面积功耗代价满足实用化需求



Ref: J. Wang, *Photon. Res.*, 2016

现在：多维光子机理、制备与集成

光电融合
减小代价
(面积、功耗..)



未来：多维光电融合集成回路与系统
进展：尚未实现短距硅光的波分复用



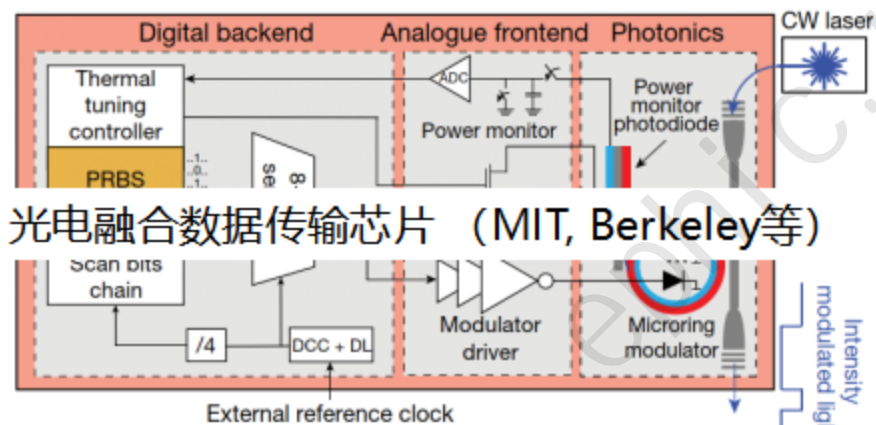
大纲

- 光电融合芯片发展历史
- 光电融合芯片基本概念
- 光电融合芯片关键挑战
- 光电融合芯片研究进展



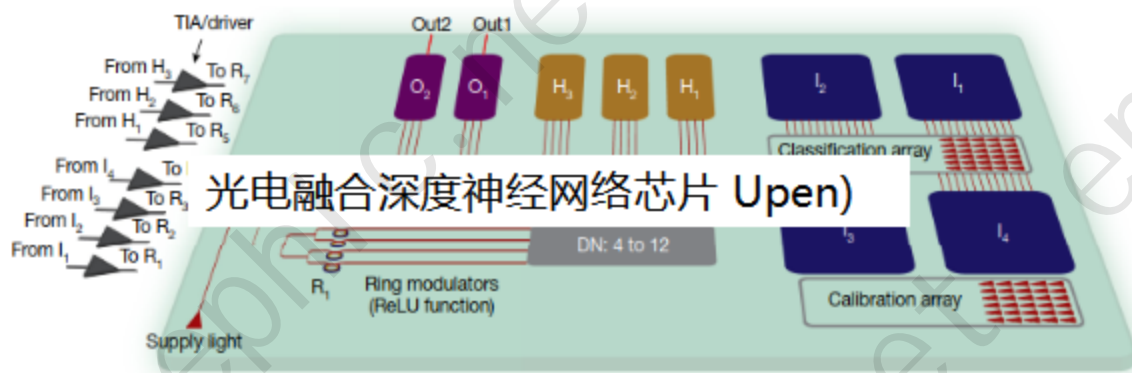
光电融合集成进展示例

■ 集成度不断提升，但是离大规模应用尚有差距



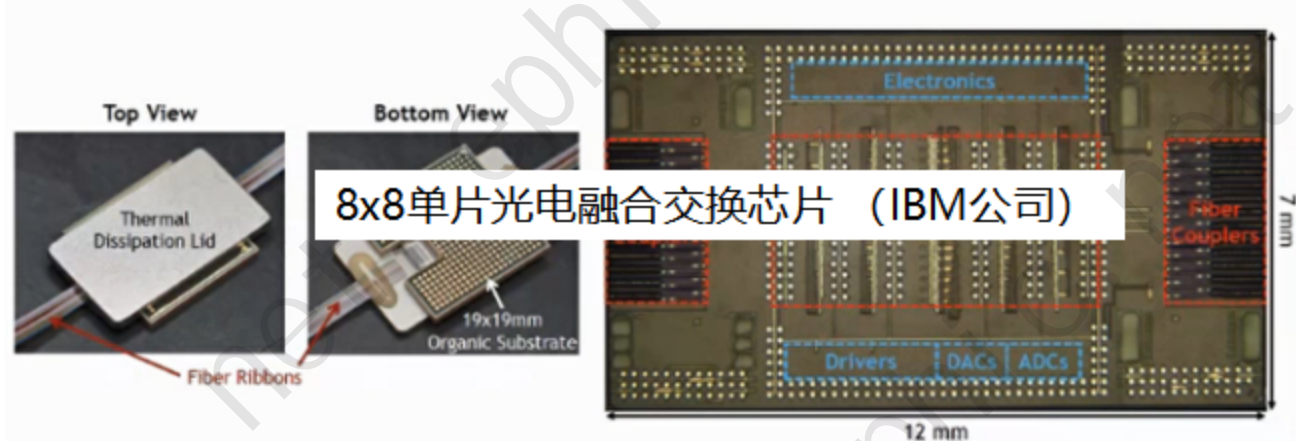
光电融合数据传输芯片 (MIT, Berkeley等)

AH Atabaki *et al.*, *Nature*, 2018, 556(7701): 349-354.



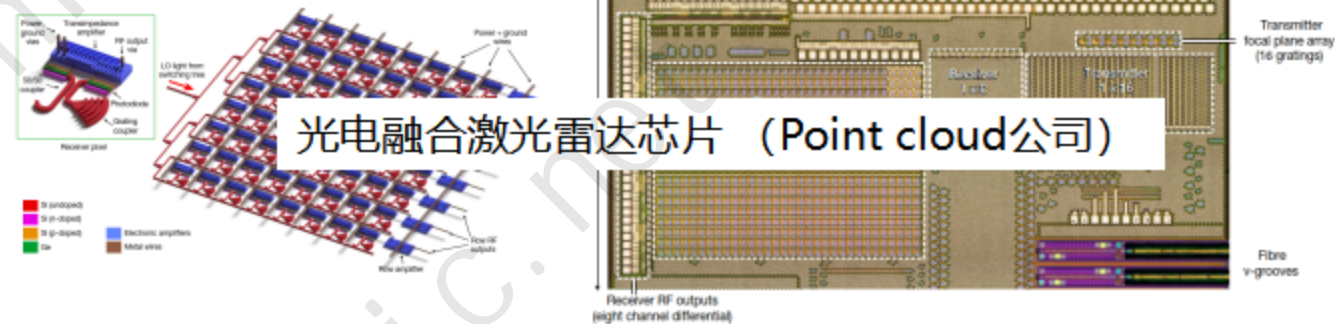
光电融合深度神经网络芯片 Upen)

Ashtiani *et al.*, *Nature*, 2022.



8x8单片光电融合交换芯片 (IBM公司)

JE Proesel *et al.*, *VLSIc*, 2020.



光电融合激光雷达芯片 (Point cloud公司)

C. Rogers *et al.*, *Nature*, 2021, 590(7845), 256-261.

芯片仅展示部分功能，最低层多维光参数稳定性亟待解决



华中科技大学
HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

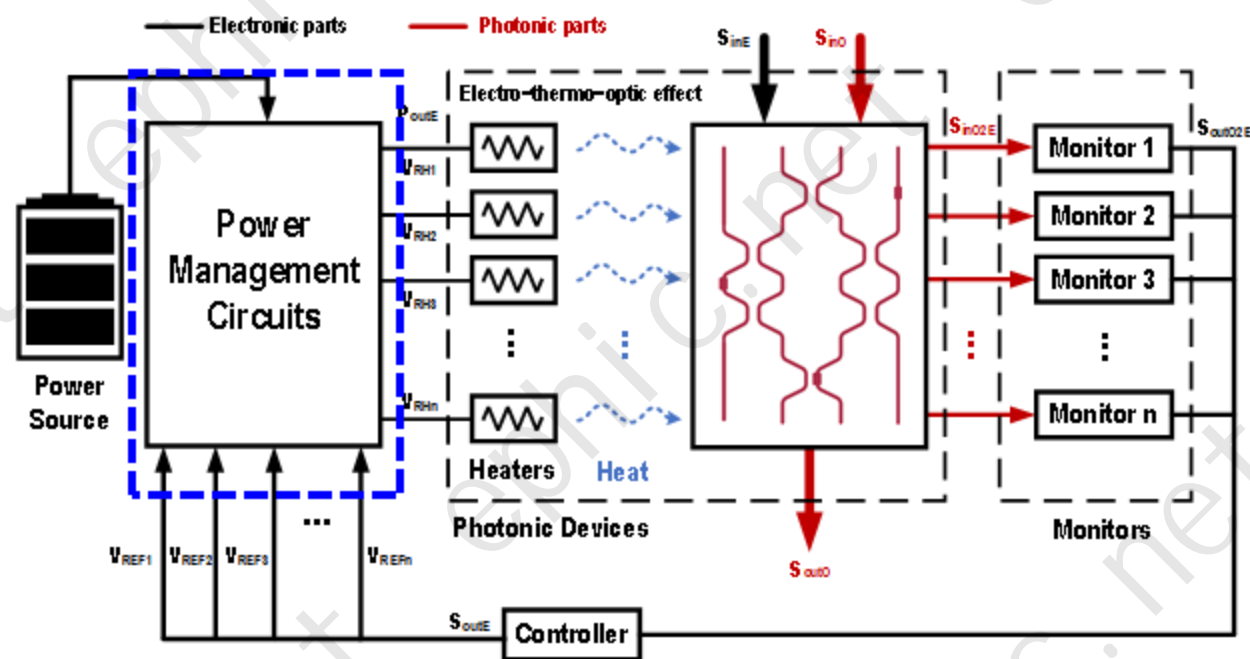
光学与电子信息学院



武汉光电国家研究中心
WUHAN NATIONAL LABORATORY FOR OPTOELECTRONICS

硅光热调反馈控制一般框架

- 电源管理芯片是热调反馈的重要环节
- 减小电芯片面积是规模化重要前提



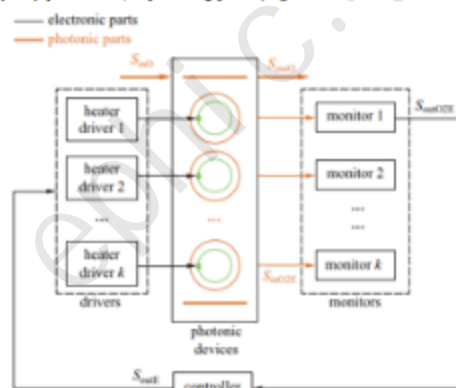
该一般框架可以应用到波长、偏振、模式、相位等各种光电融合热调反馈系统

M. Tan* et al., "Towards electronic-photonic-converged thermo-optic feedback tuning," *J. Semicond.*, vol. 42, no. 2, p. 23104, 2021.

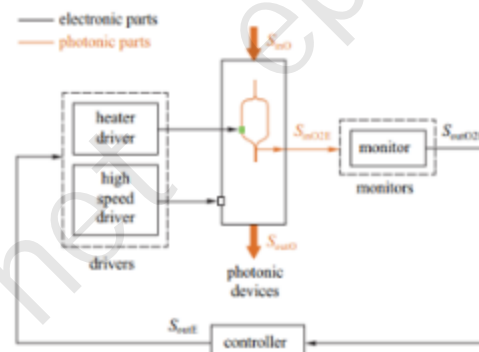


硅光热调反馈控制一般框架

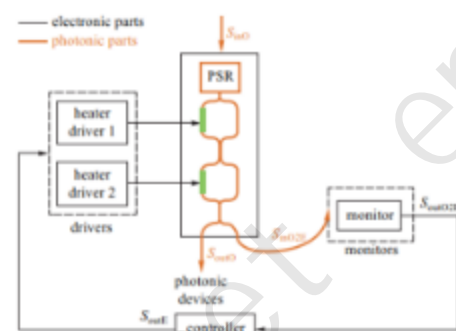
- 电源管理芯片是热调反馈的重要环节
- 减小电芯片面积是规模化重要前提



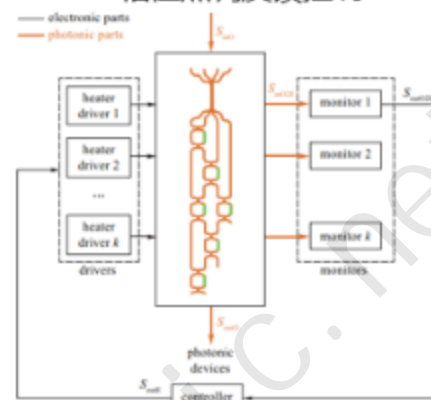
波长热调反馈控制



相位热调反馈控制



偏振热调反馈控制



模式热调反馈控制

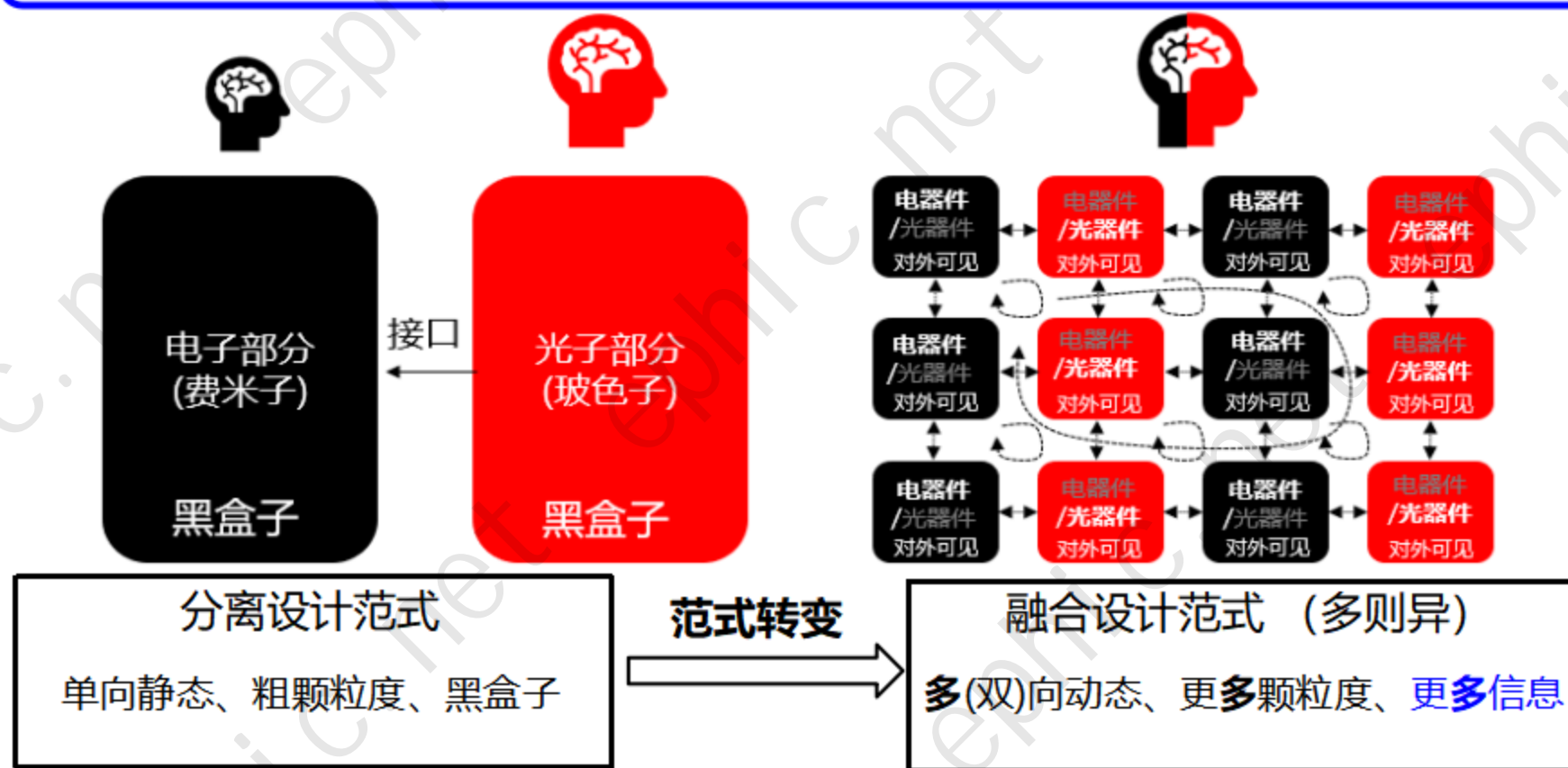
该一般框架可以应用到波长、偏振、模式、相位等各种光电融合热调反馈系统

M. Tan* et al., "Towards electronic-photonics-converged thermo-optic feedback tuning," *J. Semicond.*, vol. 42, no. 2, p. 23104, 2021.

通过融合设计提升性能

- **更多信息**: A. 热调缓慢 (光)、B. 热调功率小 (光)、C. 控制时分复用 (电)、D. 高效动态电源 (电)

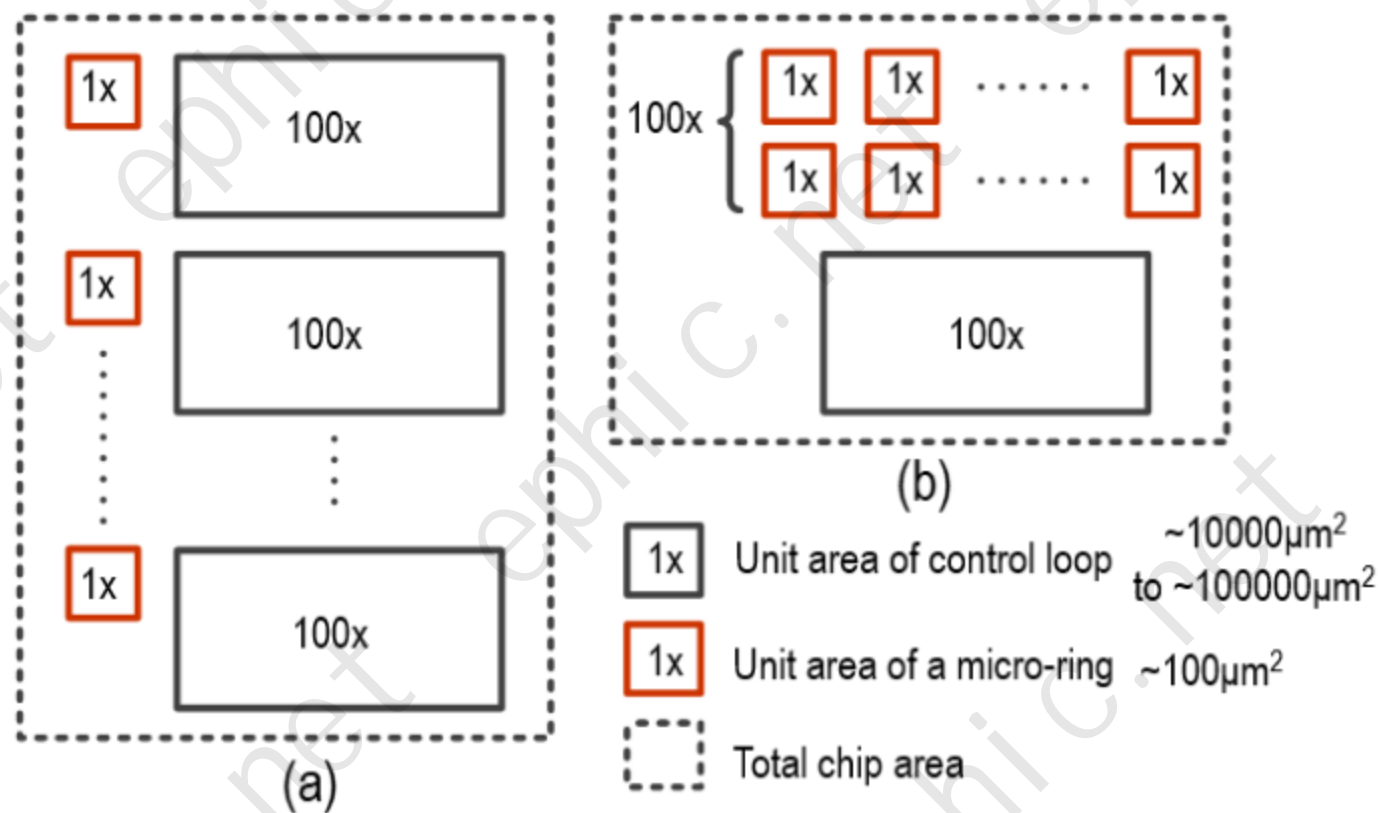
四个工作: A+C (工作1,2), B+C(工作3), A+D(工作4)



工作1：时分复用微环波长锁定

- 挑战：控制芯片远大于微环，限制了可扩展性
- 方案：实现控制器复用，同时不减小环路速度

A+C (工作1,2)



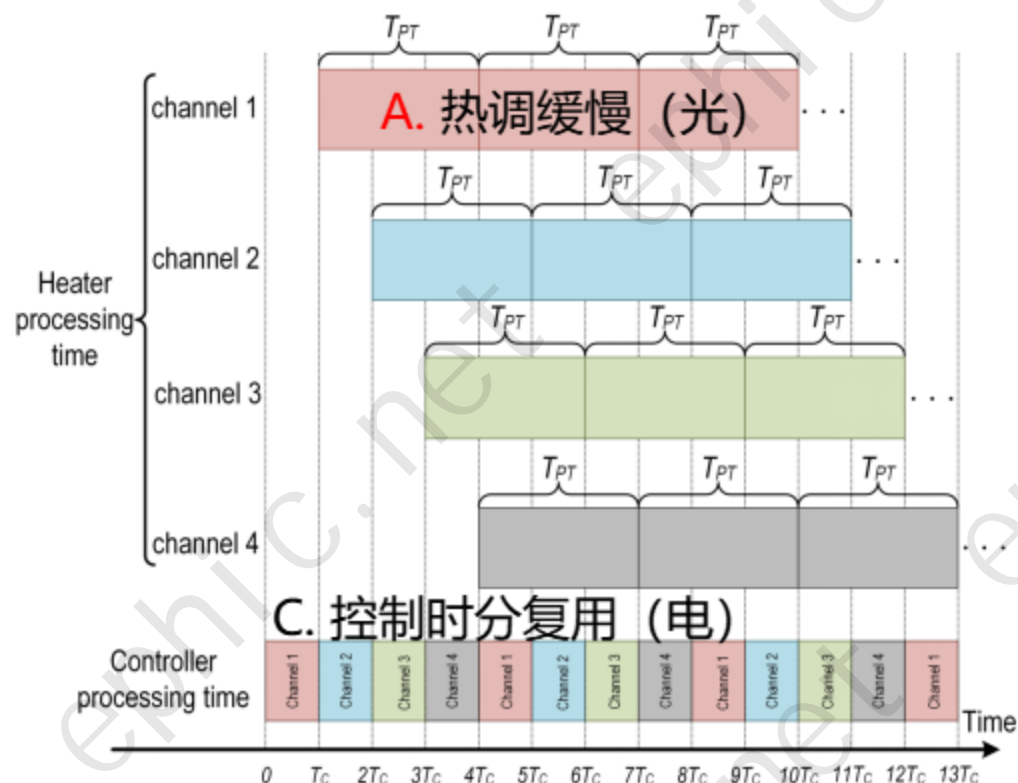
Ref: Z. Wang... M. Tan* *et al.*, "Resolving the scalability challenge of wavelength locking for multiple micro-rings via pipelined time-division-multiplexing control," *Opt. Express (OE)*, 2022



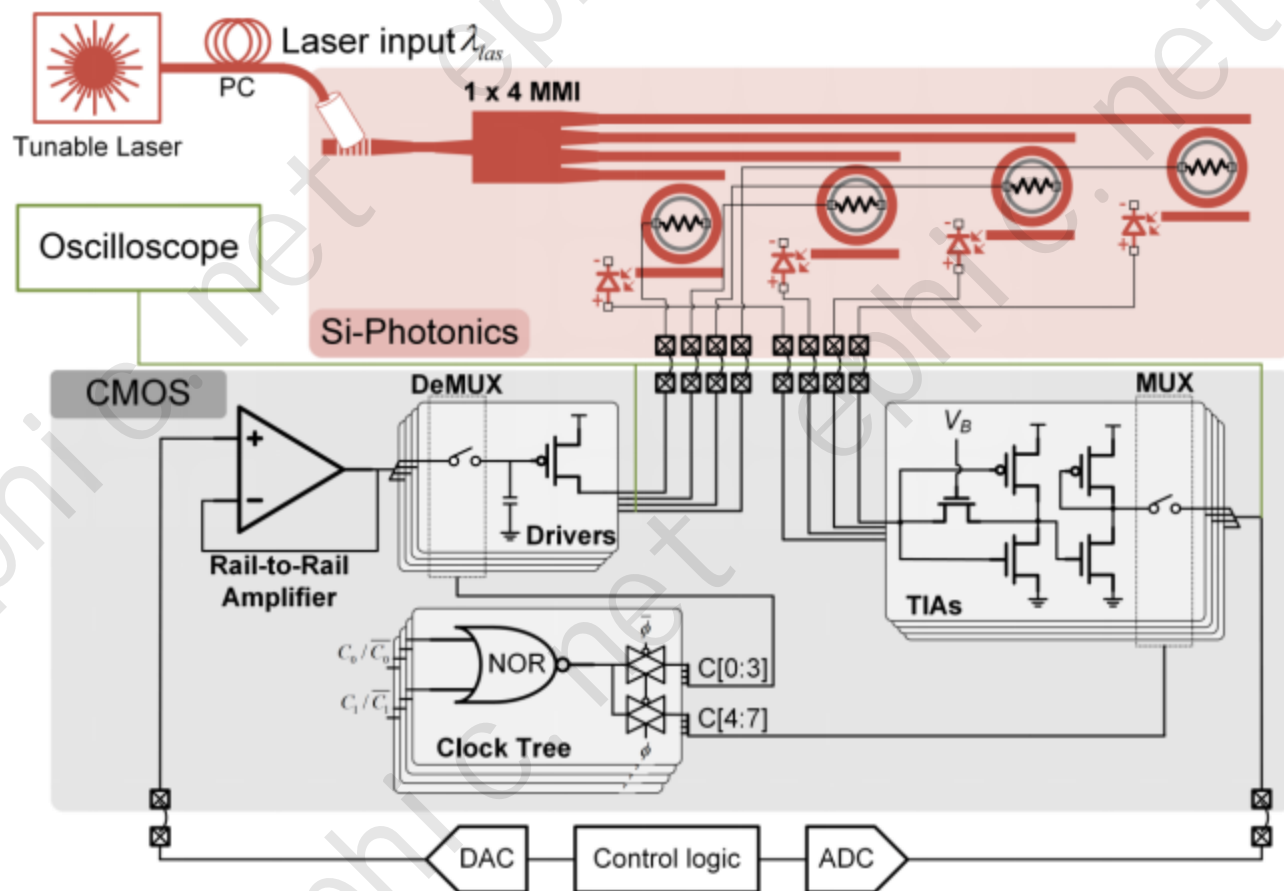
工作1：时分复用微环波长锁定

- 方案原理：利用热调和控制速度差，采用流水线时分复用方式实现一个控制器控制多维微环

A+C (工作1,2)



时序图



混合集成实现

Ref: Z. Wang... M. Tan* et al., "Resolving the scalability challenge of wavelength locking for multiple micro-rings via pipelined time-division-multiplexing control," *Opt. Express (OE)*, 2022

工作1：时分复用微环波长锁定性能对比

■性能对比：满足全方面稳定性情况下最快速度、最多通道

	JSSC16 [13]	JSSC16 [11]	OE17 [20]	ISSCC18 [26]	JLT17 [27]	OE19 [28]	This work
Controller scalability	11 MRM / 11 controller	1 MRM / 1 controller	3 MRM / 1 controller	4 MRM / 4 controller	4 MRR / 4 controller	1 MRR / 1 controller	4 MRR / 1 controller
Method	Digital/Lock to Ref. + LTM	Digital/LTM	Digital/LTM	Analog/Lock to Ref.	Digital/Lock to Ref.	Digital/Self-homodyne	Digital/PTDM LTM
Integration method	Monolithic	Hybrid	PCB	Hybrid	PCB	PCB	Hybrid
Heater efficiency (nm/mW)	1.25	0.15	N/R	0.04	0.04	0.21	0.135
Q factor	11600	5000	N/R	~ 30000	20766*	19000	~ 3200
Heater res. (Ω)	500	100	N/R	N/R	N/R	1210	~ 750
Tuning range (nm)	2.5	5	3.8	N/R	1.05	6	~ 9 (FSR)
Step tracking speed (nm/s)	N/R	5	N/R	N/R	0.5*	N/R	~ 30**
Sine tracking speed	~10 pm/s*	5 nm/s*	~54 pm/s*	54 nm/s*	1 nm/s*	~8.1 nm/s*	15 nm/s**
Locking accuracy (pm)	N/R	10	N/R	0.5	4	7.5	~ 7
Immune to laser power fluctuations	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes
Stabilize laser λ fluctuations	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Stabilize process variation	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Stabilize thermal variations	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

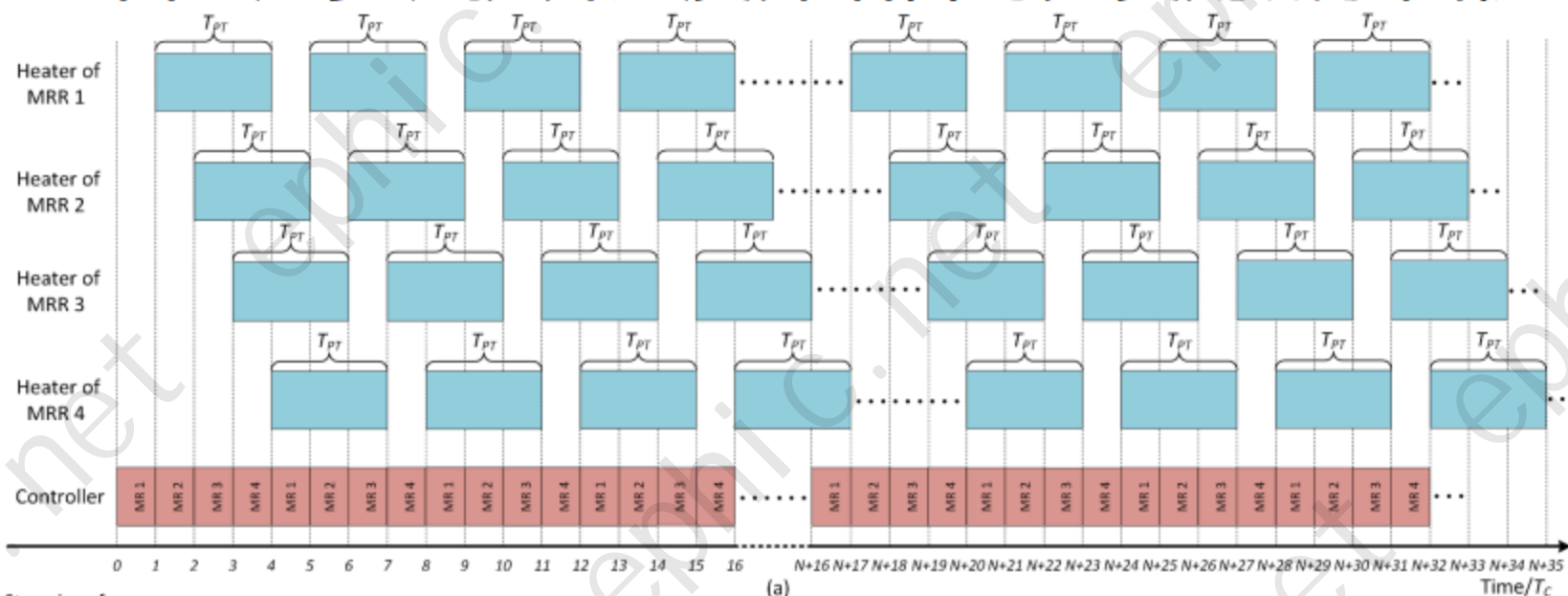
A+C (工作1,2)

Ref: Z. Wang... M. Tan* *et al.*, "Resolving the scalability challenge of wavelength locking for multiple micro-rings via pipelined time-division-multiplexing control," *Opt. Express (OE)*, 2022

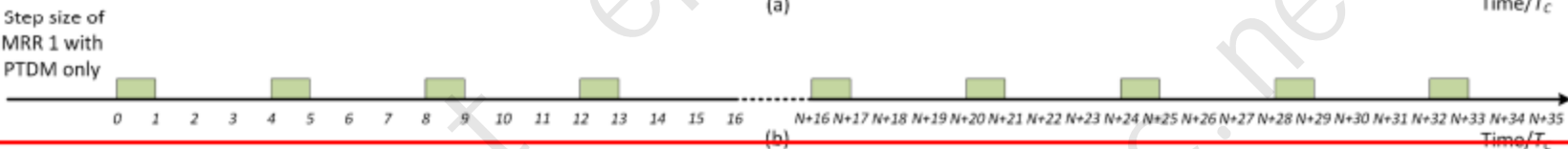
工作2：自适应步长时分复用微环波长锁定

- 挑战：如何进一步提升波长锁定环路速度并减小芯片面积
- 方案：通过自适应步长提升速度并结合时分复用减小面积

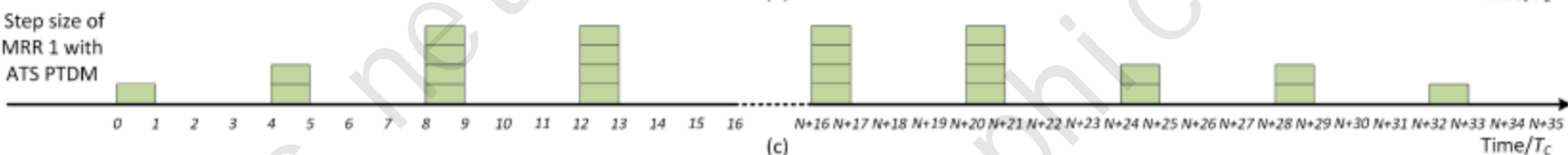
A+C (工作1,2)



时分复用



时分复用
+
自适应步长



Ref: Z. Wang, D. Ming... M. Tan* *et al.*, "An electronic-photonics converged adaptive-tuning-step pipelined time-division-multiplexing control scheme for fast and scalable wavelength locking of micro-rings," *J. Light. Technol. (JLT)*, 2022



工作2: 自适应步长时分复用微环波长锁定

性能对比: 全方面稳定性下大幅超越现有波长锁定记录

A+C (工作1,2)

	JSSC16 [23]	OE17 [13]	ISSCC18 [24]	JLT17 [11]	OE19 [25]	OE21 [26]	This work
Controller scalability	1 MRM / 1 controller	3 MRM / 1 controller	4 MRM + 2 MRR / 6 controller	4 MRR / 4 controller	1 MRR / 1 controller	1 MRR / 1 controller	4 MRR / 1 controller
Method	Digital/LTM	Digital/LTM	Analog/Lock to Ref.	Digital/Lock to Ref.	Digital/Self-homodyne	Digital/LTM	Digital/ATS PTDM
Integration method	Hybrid	PCB	Hybrid	PCB	PCB	Monolithic	Hybrid
Heater efficiency (nm/mW)	0.15	N/R	0.04	0.04	0.21	N/R	0.135
Q factor	5000	N/R	30000	20766*	19000	2590	3200
Heater res. (Ω)	100	N/R	N/R	N/R	1210	N/R	750
Tuning range (nm)	5	3.8	N/R	1.05	6	6	9 (FSR)
Step tracking speed	5 nm/s	N/R	N/R	0.5 nm/s*	N/R	10 nm/s*	180 nm/s**
Sine tracking speed	5 nm/s	~54 pm/s*	54 nm/s*	1 nm/s*	~8.1 nm/s*	~6.2 pm/s*	36 nm/s**
Locking accuracy (pm)	10	N/R	0.5	4	7.5	N/R	7
Immune to laser power fluctuations	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓
Stabilize λ_{as}	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Stabilize process variation	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Stabilize thermal variations	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

*: Calculated value from the figures. N/R: Not reported.

** : Simultaneous wavelength locking of four MRRs.

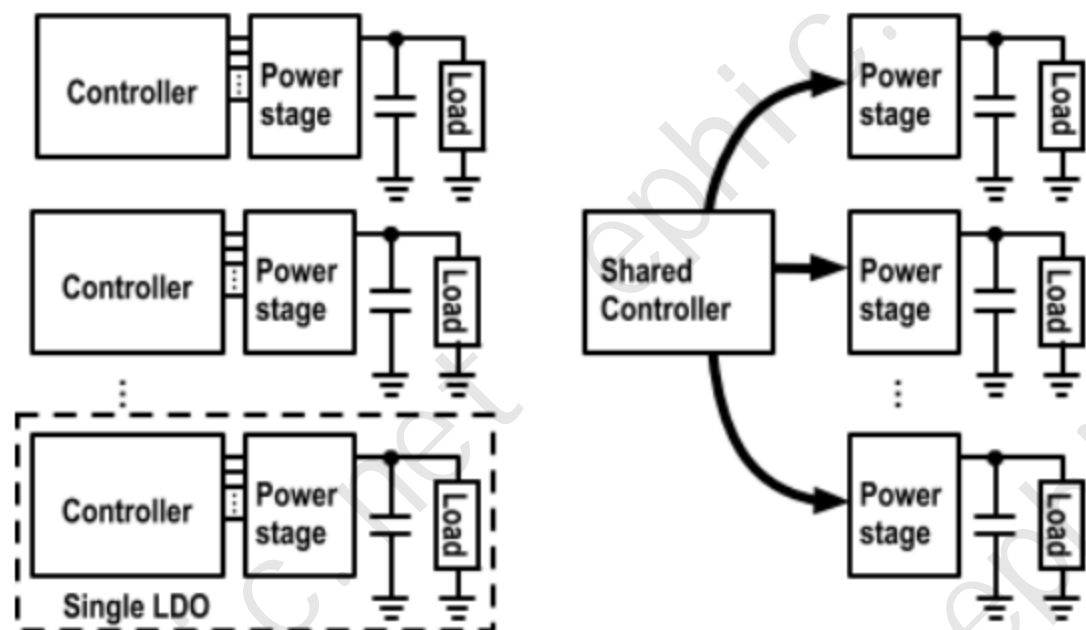
Ref: Z. Wang, D. Ming... M. Tan* *et al.*, "An electronic-photonics converged adaptive-tuning-step pipelined time-division-multiplexing control scheme for fast and scalable wavelength locking of micro-rings," *J. Light. Technol. (JLT)*, 2022



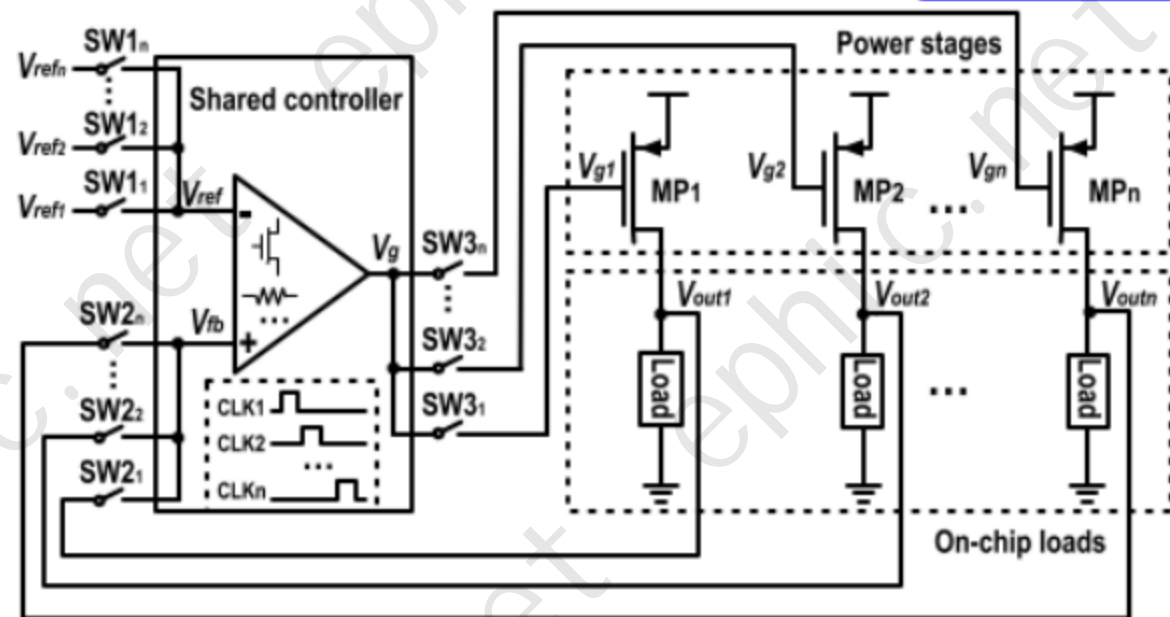
工作3：多通道时分复用热调供电芯片

■挑战：针对热调应用，控制器面积大于功率级，如何减小整体面积？

B+C(工作3)



控制器时分复用示意图



两通道时分复用LDO示意图

■创新方案：实现一个控制器同时控制多个输出，显著减小芯片面积

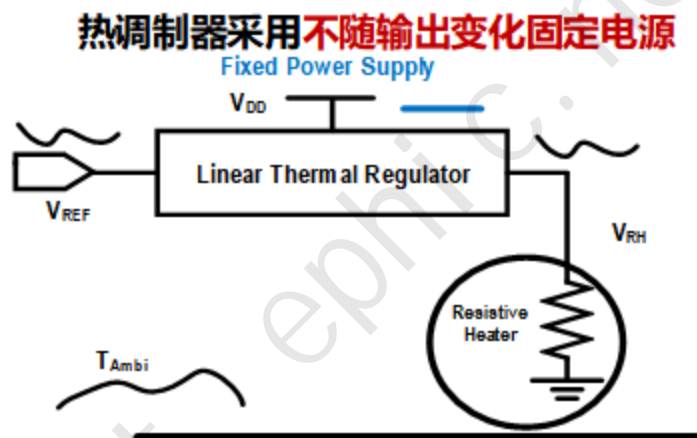
Ref: Z. Xie ... M. Tan* *et al.*, "A time-division-multiplexed clocked-analog low-dropout regulator," *TCAS-I*, 1366–1376, Jan. 2021.

工作4：高效动态热调电源

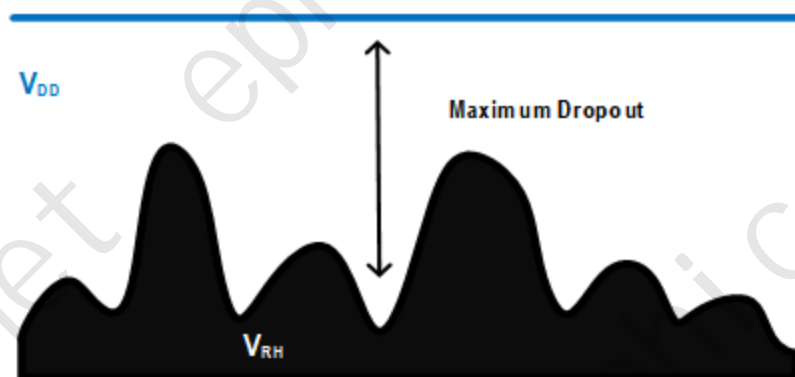
■原理：减小线性稳压器压差，提升效率，减小热串扰

A+D(工作4)

常规方案

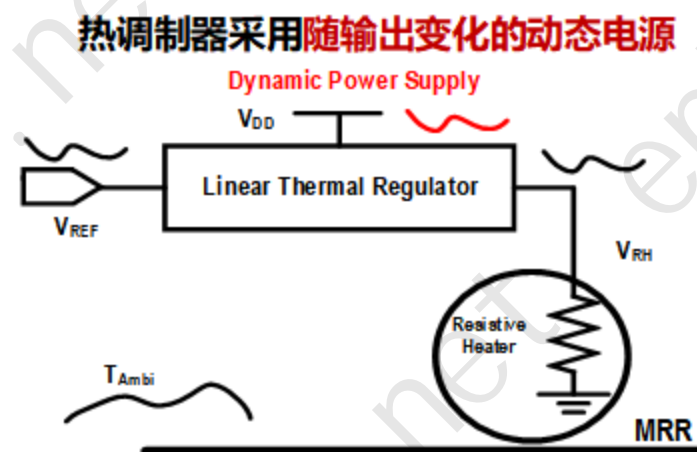


压差较大，无法始终保持高转换效率

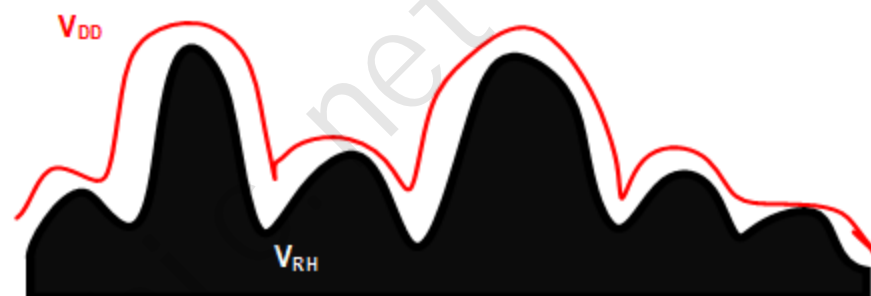


固定电源电压示意图

所提方案



始终保持小压差，
进而最大程度提高转换效率



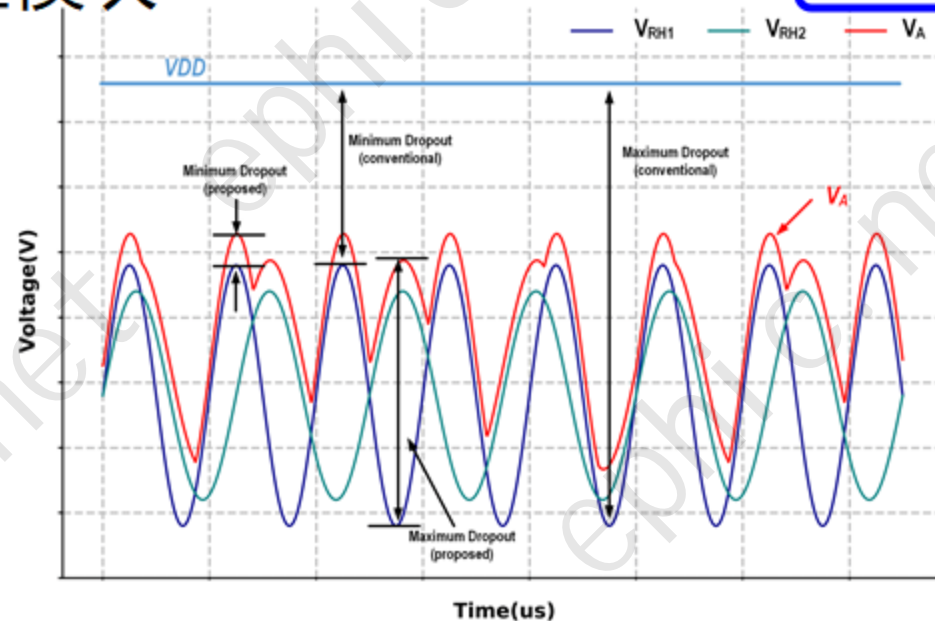
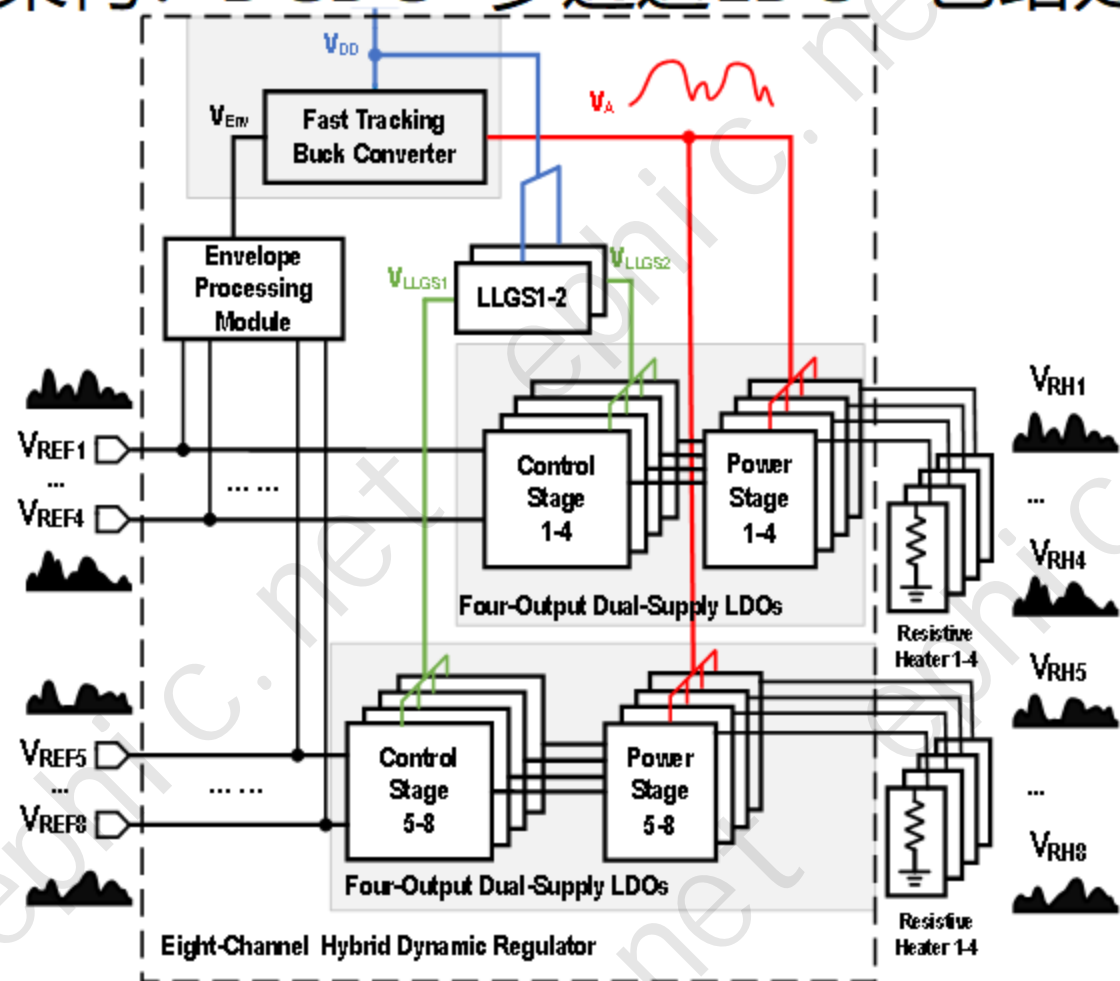
动态电源电压示意图

Ref: S. Zhang ... M. Tan*, "An eight-channel switching-linear hybrid dynamic regulator with dual-supply LDOs for thermo-optic tuning," *TCAS-I*, May 2022.

工作4：八通道高效动态电源芯片架构

■架构：DCDC+多通道LDO+包络处理模块

A+D(工作4)



采用相同架构的两通道设计瞬态图像

- 架构天然具有双电源：全局电压 V_{DD} 和可动态变化电压 V_A ；
- 利用可动态变化电压 V_A 为 LDO 功率级供电，尽可能减小 LDO 的压差，进而提高转换效率。

所提议多通道开关-线性混合动态热调制器架构 (以八通道设计为例)

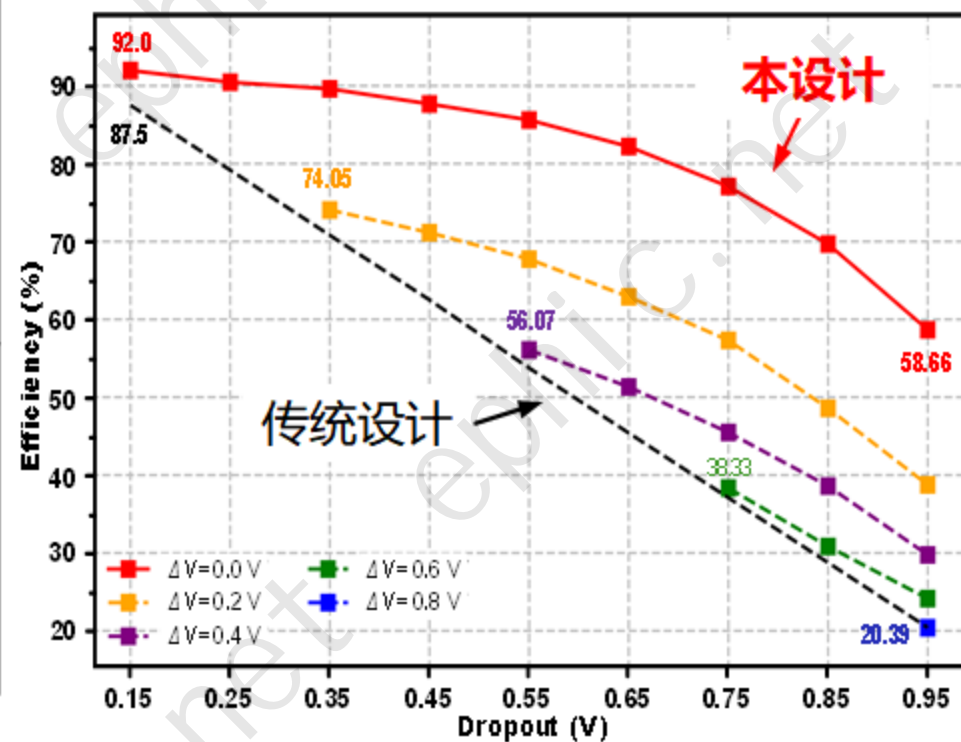
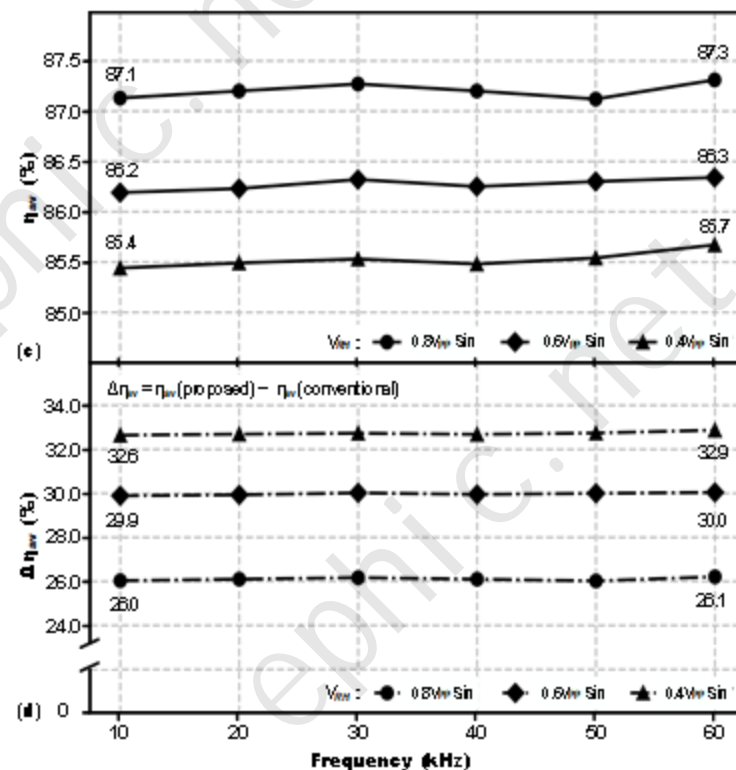
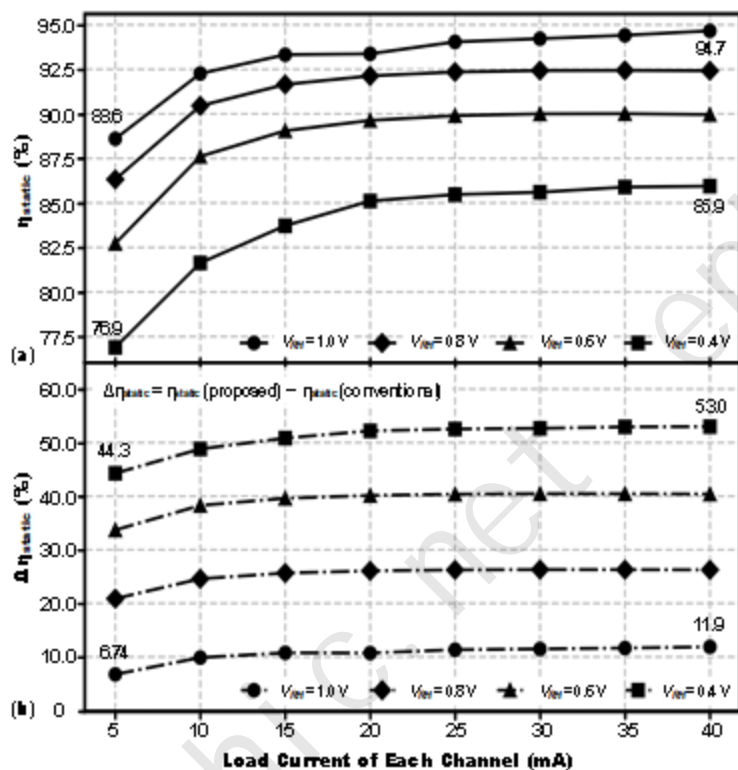
Ref: S. Zhang ... M. Tan*, "An eight-channel switching-linear hybrid dynamic regulator with dual-supply LDOs for thermo-optic tuning," TCAS-I, May 2022.



工作4：八通道高效动态电源芯片性能对比

■性能对比：最差效率优于传统方案，最多50%以上效率提升

A+D(工作4)



静态效率：

本设计效率 94.7% ~ 76.9% ；

效率提升：53%~6.7%

动态效率：

本设计效率 87.3% ~ 85.4% ；

效率提升：33%~26%

Worst-case 效率：

最差工作状态时效率始终高于传统设计

Ref: S. Zhang ... M. Tan*, "An eight-channel switching-linear hybrid dynamic regulator with dual-supply LDOs for thermo-optic tuning," *TCAS-I*, May 2022.



华中科技大学

光学与电子信息学院



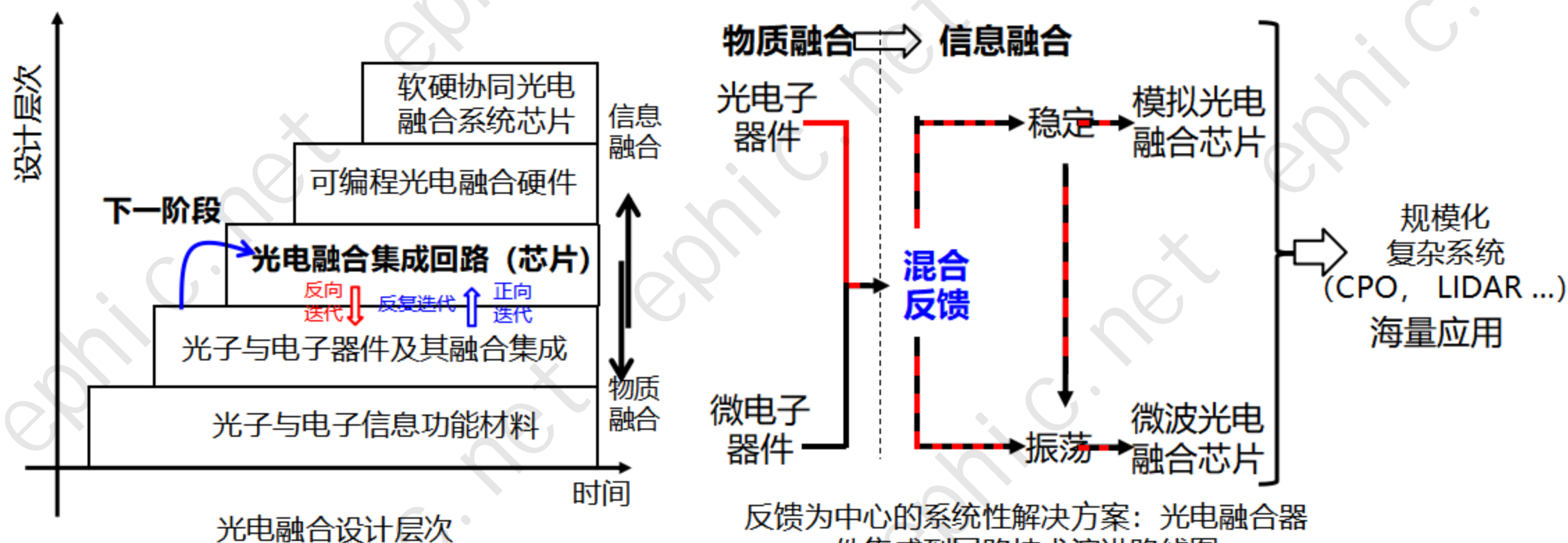
武汉光电国家研究中心

WUHAN NATIONAL LABORATORY FOR OPTOELECTRONICS

总结

- 发展趋势：从物质光电融合集成迈向信息光电融合
- 回路融合：信息光电融合**最底层最基础**的研究工作

信息光电融合挑战：“非确定电子和光子器件组成优秀系统”



光电子**信息产业**，特别是与国外处于同一起跑线的**光电融合芯片**，有条件率先实现突破的高技术产业。

谢谢！
敬请各位专家批评指正！

光电融合芯片相关概念与术语

谭旻

mtan@hust.edu.cn

光电融合芯片实验室 ephic.net
集成电路学院及武汉光电研究中心
华中科技大学

2022年8月13日 V1.1, 2022年9月12日 V1.2,
2022年9月22日 V1.3, 2022年12月28日 V2

目录

1.1 融合与分离.....	2
1.2 光电相关概念.....	2
1.3 光电融合相关概念.....	3
1.4 小结.....	5
参考文献.....	5
中英文术语对照表.....	6

1. 引用说明：请采用以下格式引用本报告内容或者直接引文本报告中所提到的文献。

“谭旻，光电融合芯片相关概念与术语，12月28日，2022. Available :

<https://ephic.net/EPCTerminology.pdf>”

2. 如需原始报告，请通过 mtan@hust.edu.cn 邮箱联系我。

光电融合是集成电路和光子集成等多个领域的交叉融合，相关概念在领域发展之初是比较模糊的。厘清定义与概念是进行高效有组织创新的前提，否则概念的混乱将给交流带来困难，阻碍有组织创新工作和制度建设的开展。虽然国内外各个机构均在推动光电融合的发展，但是人们对于光电融合的定义及相关概念并没有达成广泛的认识，迫切需要从概念原理上厘清光电融合的定义及相关概念。唯有理清集成电路、光子集成回路及光电融合芯片制备与设计等相关概念，才能够扫除光电融合芯片发展过程中的概念障碍，从而通过技术创新和制度改革双轮驱动，加速光电融合芯片的发展进程。

1.1 融合与分离

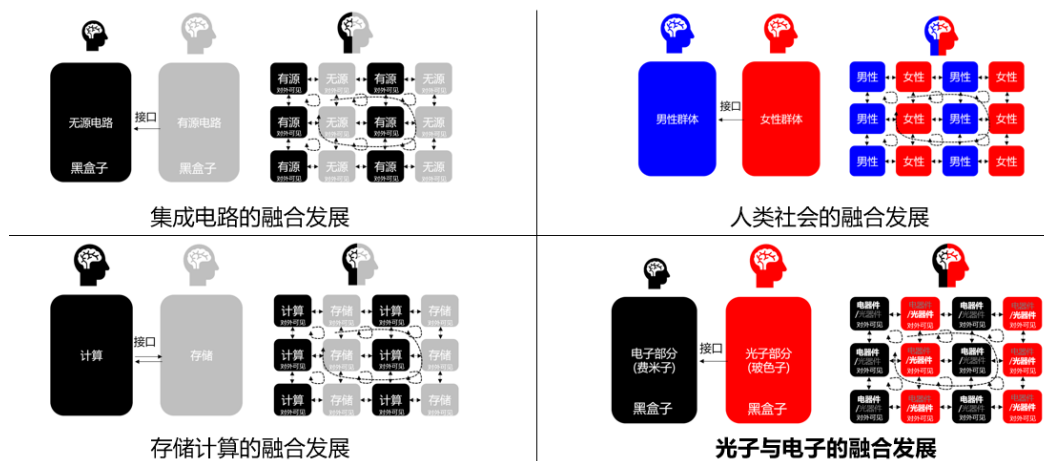


图 1. 不同的分离和融合发展范式

融合和分离是区分两种不同属性主体关系紧密程度的术语，但是两者也绝对简单的黑白关系。分离是相对融合而言，是指两个主体间存在较弱的联系，而非完全没有联系。两个主体间单项、静态、粗颗粒度、互相不知道内部具体信息的关系可以认为是一种分离的关系，而双向、动态、细颗粒度、具备充分内部信息的关系可以认为是一种融合关系。集成电路可以认为是无源器件和有源器件的融合，存算一体则是计算和存储的融合。相对男性群体和女性群体互相隔离的落后生产关系，现代社会分工是男性和女性交流更为紧密融合的生产关系。类似地，光子和电子也慢慢地从分离走向融合。一般而言，分离可以被认为是一个子集，因此融合总是能够实现比分离更好的性能及更多的功能。分离可以做到的，融合同样可以做到，反之则未必。

1.2 光电相关常用术语

虽然 optics, photonics, quantum electronics, quantum optics, optoelectronics, electro-optics, electronics-photonics convergence 及 lightwave technology 等术语被广泛使用，然而人们这些术语所代表的具体含义并未达成一致[1]。厘清概念是进行高效有组织创新的前提，否则概念的混乱将给交流带来困难，阻碍有组织创新工作的开展。本文试图根据文献中的相关描述厘清不同术语的定义和关系，并给出对应的中英文翻译。

光学(optics)和光子(photonics)之间存在一定的交集，但是两者的区别逐渐变得模糊。广义上讲，光学通常被认为代表自由空间光学及波导光学等相关内容，并包括干涉、衍射、成像、统计光学及光子光学等具体课题。光子学通常被认为包括与光与物质互相作用相关内容，面向器件及系统方面的研究。电光子(electro-optics)通常指电学效应扮演重要角色的光器件，比如激光器、电光调制器及光开关等。电子学(electronics)是关于真空及物质中

电荷流控制的研究，而光子学(photonics)则是关于真空及物质中光子控制的相关研究。很显然光子学和电子学存在交集，光子的控制需要电参与，而光子也可以控制电子。光电子(optoelectronics)通常指与光相关但是本质上为电学属性的器件和系统，比如 LED、液晶显示器件及光电探测器阵列等。光电子学可以被认为是光子学的一个子集。量子电子学(quantum electronics)是指于与光与物质互相作用相关的器件和系统，比如激光器、用于光放大和混频的非线性光器件[2]。量子光学(quantum optics)研究光的量子化和相干性方面的内容。光波技术(lightwave technology)则是指与光通信和光信号处理相关的器件和系统。

集成光学(integrated optics)一词在1969年首次被Bell实验室的Stewart E. Miller所创造[3]，有文献认为集成光学和集成光子(Integrated photonics)表达同一含义[2]，是指在平面衬底和表面制备集成的波导和器件，是光子学的一个分支[4]，可以认为是光子学的集成版本。通过集成的方式，复杂的光路可以像集成电路信号处理和传输一样对光参数进行处理和传输。集成光学现在主要指在玻璃、二氧化硅及铌酸锂等透明衬底上的回路[5]。典型的集成光学包括铌酸锂开关阵列、滤波器阵列、高速调制器等。国际上第一个关于集成光学的主题会议于1972年由美国光学协会组织召开[6]。光电子集成回路(OEIC)包括片上晶体管和光电器件，采用金属连接，但是不包括波导[5]。1978年OEIC首次被试验验证，包含一个光电二极管及一个耿氏电子二极管[6]。需要说明的是文献中并没有形成对OEIC的统一理解，Soref认为OEIC是光子和电子集成在同一衬底的芯片[7]。光子集成回路(PIC)则强调片上激光及片上波导连接，而没有金属连接[8]。

光电全集成回路(EPIC)是美国国防部DAPAR所资助的一个项目[9]，其目标是实现光子器件在微电子工艺平台的制备，主要涉及光电全集成制备工艺方面的研究。文献中的EPIC也大多是指单片工艺制备，而非回路设计方面的内容。从回路设计的视角来看，单片集成或者通过封装的形式实现混合集成两种方式并无太大差异。**从这个意义讲，我们需要一个新的术语来指代光子器件和电子器件的互连设计。**

1.3 光电融合相关概念与术语

由于光本身并不具备实用化的全光控制和存储能力，任何实用化的光子系统必然有电的参与。不管是传统光电系统还是新兴的光电融合芯片，电的参与均是必须的；两者的区别并不在于是否有电的参与，而在于光与电相结合的方式。**光电融合集成回路或光电融合芯片是指通过一系列特定的加工工艺，将晶体管、光电二极管等电子和光子有源器件和电阻器、波导等电子和光子无源元件，按照一定的回路互连，“集成”在半导体（如硅或砷磷等化合物）晶片上，封装在一个外壳内，执行特定功能的回路或系统。**在半导体芯片范畴内，光电融合芯片和光电融合是等价概念。本文主要讨论半导体芯片范畴内的光电融合，我们不对以上两个术语进行区分，两个术语将交替使用。不管出于技术水平还是经济成本的考虑，光电融合的回路连接和物理制备难以在短期内实现单片集成，但是随着技术水平的进步和成本的下降，器件集成度将逐步提高，回路设计水平也会进一步提升。光电融合是一个长期演进的过程，heterogeneously-converging 是对这个概念精准的英文描述。我们采用 Electronic-Photonic Heterogeneously-converging Integrated Circuits (EPHIC)作为光电融合集成回路或光电融合芯片的英文术语[10][11]。

光电融合(EPC)包括物质融合和信息融合两个方面。物质光电融合主要涉及光与电一体化制备方面的内容，而信息光电融合主要包括光与电一体化设计的器件互连及系统优化方面的内容。从信息第一性原理出发，信息光电融合更加严谨的定义是指在光参数产生、处理、存储、探测等动态过程中，通过光与电互相作用实现光参数非确定性消除的科学及技术的总和。任何信息系统均需要物质实体的支持，物质存在先于信息存在，芯片物质实体的制备是

其实现任何信息功能的前提。芯片的制备不是随意制备,而是人类有目的地改造自然的结果。既然是用于实现人的目的,则需要在制备前做好规划和设计,也就是芯片设计。芯片设计过程就是设计人员在整个设计参数空间内通过参数的反复迭代寻求优化解,直至达到设计目标的过程。具备一定复杂度的现代系统设计皆需要借助计算机辅助设计软件,从而**加快以上反馈迭代的设计进程**。

就物质融合而言,分立光学元件正慢慢地被集成器件所替代,而电学部分也慢慢走向集成,形成由集成光子和集成电路混合集成的混合光电融合芯片方案。集成光子和集成电路在同一个衬底的单片集成是光电融合芯片的终极方案。光与电的物质融合是一个长期演进的发展过程,一方面受限于基本科学原理,例如硅基材料为间接带隙难以发光;另外一方面受经济因素影响,即便能够实现物质制备,如成本太高则难以大规模实用化,从而失去经济上的意义。**器件集成与封装是物质融合的核心内容**。光电融合芯片采用集成的光芯片和电芯片,其物质制备可以分为单片集成、混合封装两种主要方式。光电融合制备通常和异质异构、光电融合集成等作为等价词汇被使用。异质异构的英文翻译是 heterogeneous,不过英文词汇中并不区分异质和异构。光电融合集成是一个首先在中文世界提出的一个术语,其英文翻译可以是 Electronic-Photonic Converging Integration (EPCI),国内最早的相关项目是国家重点研发计划“纳光子器件及光电融合集成基础”。融合集成是一个比单片集成更加广义的概念,既包括在同一个衬底上光子器件和电子器件的单片集成也包括不同封装形式的光子器件和电子器件的集成,是光子器件和电子器件物理融合的一个总称。

1. 单片集成(单片异质集成):目前还处于起步阶段,虽有工艺厂实现了原型,但是还非常不成熟,特别是激光器的集成极具挑战性。实用化的激光器目前还难以和其他部件一起形成单片集成,文献中的光电单片全集成芯片通常需要依赖外部的激光器。从实用角度出发,激光器未必需要完全集成,外置方案也不失为可以商用的可行方案。可行性初步验证,成本、可靠性、规模化制备是需要长期攻克挑战。实际上目前并没有严格意义上完全能够独立工作的光电单片全集成芯片。

2. 混合封装(封装异构集成):光芯片和电芯片的分别制备是混合封装的前提。为了实现优化的封装后性能,在光芯片和电芯片设计之初必须考虑封装对性能的影响。封装异构集成在其他领域出现过,比如三维存储器,已有基础设施可以复用到光电融合芯片,武汉在这方面有较好的研究基础,特别是存储器的封装异构集成。封装异构集成首先需要高质量的光芯片,在此基础上需要针对光芯片的特点定制化地进行封装性能的优化,既需要考虑物理制备性能,也需要考虑经济因素。比如光纤封装耦合就是其中难点之一, pwb 光子引线是当前这方面的创新技术。

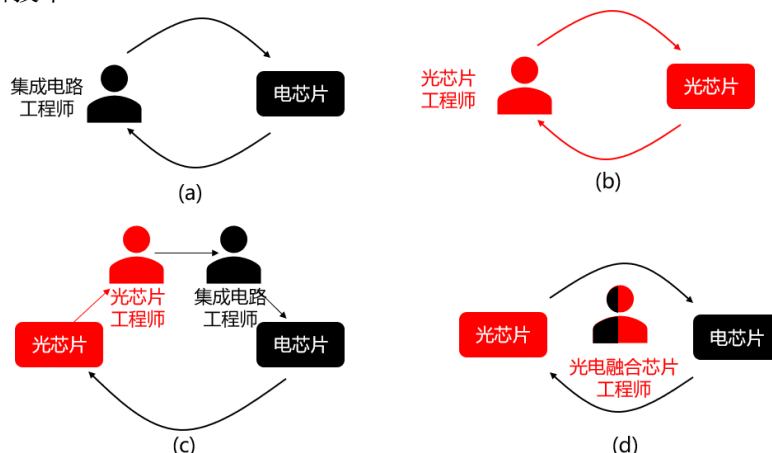


图 2. 不同类型的设计范式 (a) 集成电路设计; (b) 光芯片设计; (c) 光电分离设计; (d) 光电融合芯片设计

就信息融合而言,传统分离设计和融合设计有较大差别,但是也存在过渡区域。对于过渡区域,我们无法严格区分两种。一般而言,如果光与电之间是开环级联且是通过人工的方法实现接口的对接和设计迭代,则可以被认为是传统分离设计。反之,如果光与电之间存在闭环互连且是通过一体化设计的方式实现迭代优化,则可以被认为是融合设计。服务于光电融合集成物理制备的光芯片和电芯片独立设计也可以被认为是光电融合芯片设计的重要环节。图2对以上四种不同设计范式进行了对比。集成电路设计工程师借助计算机设计软件不断进行设计迭代,直至满足预期设计要求,如图2(a)所示。光芯片的设计和集成电路类似,但是采用不同的设计软件,如图2(b)所示。集成电路设计的重点是器件互连,光芯片设计基本以物理器件设计为主,同时其复杂度要远低于集成电路。如图2(c)所示,在光电分离设计中,光子工程师根据调研情况提供电子工程师设计接口参数,然后由电子工程师按照接口参数完成电芯片设计,并进行设计验证。具备最优并不意味着全局最优,即便能够实现最优的光芯片和电芯片,也无法保证分离设计的系统是最优的。如图2(d),在光电融合芯片设计中,设计人员借助光器件仿真模型可以实现光电协同仿真,支撑光电一体化设计。相比光电融合设计,分离设计的局限性在于(1)电子工程师并不知道完整的光芯片信息,在信息不完整的情况下难以做出最优的电子芯片;(2)在分离设计中,电子工程师和光子工程师实际上是通过人工的方式进行反馈迭代,沟通成本高,且容易出错,同时难以应对光与电存在反馈互动的情况;(3)电子工程师和光子工程师均只知道部分信息,而稳定性理论的研究需要完整全局信息,这会阻碍稳定性控制理论的发展;(4)缺乏软件平台工具,设计效率低,且无法保证正确性。融合设计基于新兴的光子器件紧凑模型和光电协同仿真方法,从全局及动态视角以更小颗粒度进行光子器件与电子器件回路级互连,实现更粗颗粒度器件互连及仅凭改进物质制备无法实现的功能和性能。

1.4 小结

光电全集成并不是发展光电融合芯片设计的前提条件。通过封装混合集成的形式满足实用化需求,同时通过规模化生产降低成本,形成利润收入后再投入技术升级逐步迈向片内融合,才可能最终形成产业迭代。**光电融合芯片发展的当务之急是需要使得光电融合产业具备造血功能,实现产品、研发的循环迭代。**电子系统经历了从分立到集成的漫长演进过程,光电融合芯片也将类似地经历从分离到融合的一个长期演化过程。**扫清相关概念有助于我们更好借鉴集成电路的技术和组织经验,从而加快光电融合芯片的演化进程。**

参考文献

- [1] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of photonics*. John Wiley & Sons, 2019.
- [2] G. Lifante, *Integrated Photonics: fundamentals*, vol. 90. 2004.
- [3] S. E. Miller, "Integrated optics: An introduction," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 48, no. 7, pp. 2059 - 2069, 1969.
- [4] "What is integrated photonics?" [Online]. Available: <https://www.aimphotonics.com/what-is-integrated-photonics>. [Accessed: 03-Apr-2022].
- [5] J. W. Goodman, *International Trends in Optics*. Elsevier, 1991.
- [6] C. P. Lee, S. Margalit, I. Ury, and A. Yariv, "Integration of an injection laser with a Gunn oscillator on a semi-insulating GaAs substrate," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 32, no. 12, pp. 806 - 807, 1978.
- [7] R. A. Soref, "Silicon-based optoelectronics," *Proc. IEEE*, vol. 81, no. 12,

- pp. 1687 - 1706, 1993.
- [8] A. H. Gnauck *et al.*, “Four-Channel WDM Transmission Experiment Using a Photonic-Integrated-Circuit Transmitter,” in *Optical Fiber Communication*, 1990, vol. 53, no. 9, p. PD26.
- [9] N. D. Heidel, N. G. Usechak, C. L. Dohrman, and J. A. Conway, “A Review of Electronic-Photonic Heterogeneous Integration at DARPA,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 22, no. 6, pp. 482 - 490, 2016.
- [10] 谭旻, 明达, 汪志城, “从光子集成迈向光电融合集成电路: 以微环波长锁定为例,” *微纳电子与智能制造*, vol. 1, no. 3, pp. 44 - 55, 2019.
- [11] M. Tan, Y. Wang, K. X. Wang, Y. Yu, and X. Zhang, “Circuit-level convergence of electronics and photonics: basic concepts and recent advances,” *Front. Optoelectron.*, vol. 15, no. 1, p. 16, Dec. 2022.

附件：中英文术语对照表

Optics	光学
Electro-optics	电光子学
Photonics	光子学
Optoelectronics	光电子学
Quantum Electronics	量子电子学
Quantum Optics	量子光学
Lightwave Technology	光波技术
Electronic-Photonic Integrated Circuits (EPIC)	光电全集成电路
Opto-Electronic Integrated Circuits (OEIC)	光电子集成电路
Photonic Integrated Circuits (PIC)	光子集成电路
Electronic-Photonic Heterogeneously-converging Integrated Circuits (EPHIC)	光电融合集成电路或光电融合芯片
Electronic-Photonic Converging Integration (EPCI)	光电融合集成
Electronics-Photonics Convergence (EPC)	光电融合