

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

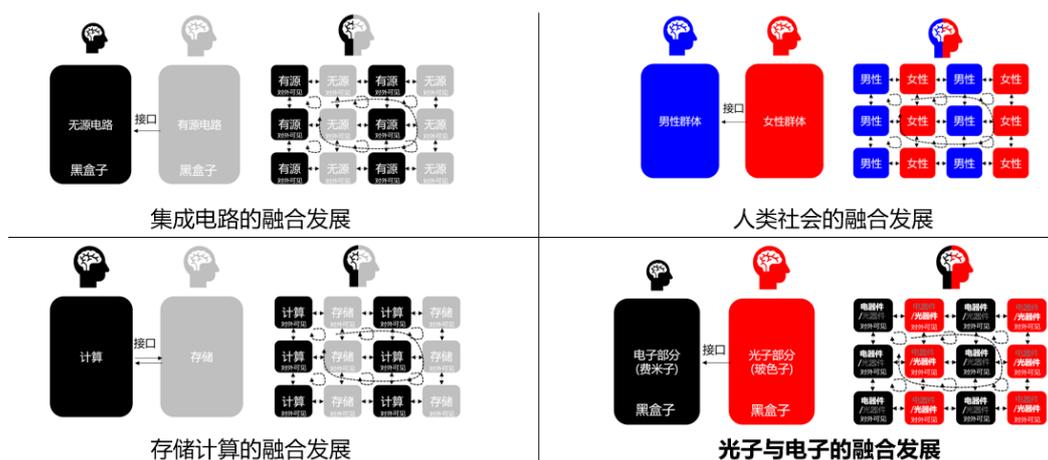


图 1. 不同的分离和融合发展范式

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)研究光的量子性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。

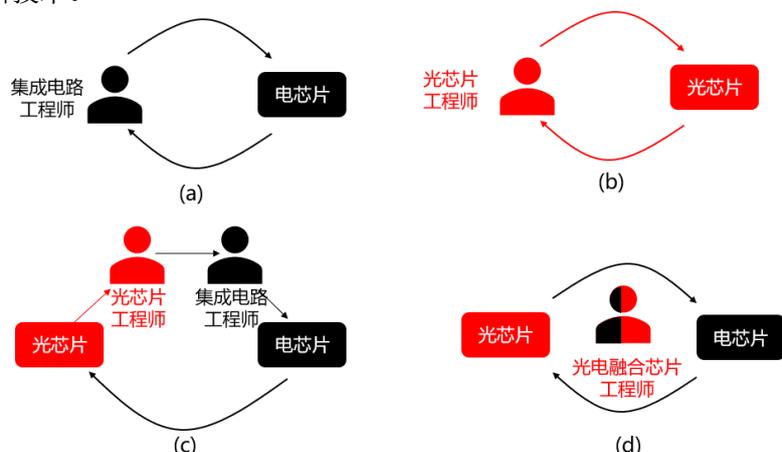


图 2. 不同类型的设计范式 (a) 集成电路设计; (b) 光芯片设计; (c) 光电分离设计; (d) 光电融合芯片设计

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