

# 光电融合相关概念及其中英文术语

谭旻

2022年8月13日 V1.1

2022年9月12日 V1.2

2022年9月22日 V1.3

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)	光电全集成回路
Opto-Electronic Integrated Circuits (OEIC)	光电子集成回路
Photonic Integrated Circuits (PIC)	光子集成回路
Electronic-Photonic Heterogeneously-converging Integrated Circuits (EPHIC)	光电融合集成回路或光电融合集成芯片或光电融合芯片
Electronic-Photonic Converging Integration (EPCI)	光电融合集成
Electronics-Photonics Convergence (EPC)	光电融合

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]。光电子集成电路(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]。光子集成电路(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。**光电融合集成电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。**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。从这个意义上讲，光电融合是一个长期演进(long-term evolution)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)作为光电融合集成电路或光电融合芯片的英文术语[10]。集成电路侧重于电子之间的互相作用，集成光子侧重于光与物质的互相作用，光电融合芯片在集成电路和集成光子的基础上，进一步深入研究光子与电子互相作用的“集成”回路，侧重于通过光子与电子器件之间的连接和物质参数的动态调节来控制片上光子、电子的运动及相互作用。光电融合芯片可以是单片集成也可以是通过混合封装进行集成，同时也可以使用硅基、InP 基等多种材料体系。

光电融合集成或者集成光电融合是一个首先在中文世界提出的一个概念，是指光子器件和电子器件的融合集成，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。光和电是不同性质的信号，光为自旋为正整数的玻色子、电为自旋为半整数的费米子，光电融合集成是光子与电子不同性质（异质）粒子作为信息载体的融合集成。光电融合(EPC)是指光与电的一体化融合集成设计，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。

光电融合是对集成光子、集成电路等传统技术的继承发展，光子和电子的融合是一个长期演进的发展过程。我们必须认识到光电全集成并不是发展光与电回路级融合的前提条件。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。实际上一旦全集成为发展光与电回路级融合的前提，则出于经济成本的考虑该领域无法形成产业迭代。混合封装融合是光电融合的必经阶段，而光电融合的终极发展目标是片上光电全集成。

## 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回路: 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.