

[37] Ackermann M *et al.* Science, 2011, 334: 1103
[38] Margon B *et al.* ApJ, 1980, 241: 306
[39] Marshall H L *et al.* ApJ, 2002, 564: 941
[40] Abeysekara A U *et al.* Nature, 2018, 562: 82
[41] HESS Collaboration *et al.* Science, 2024, 383: 402
[42] Mioduszewski A J *et al.* ApJ, 2001, 553: 766
[43] Marti J *et al.* A&A, 2001, 375: 476
[44] Sarmorski M, Stamm W. ApJ, 1983, 268: 17

[45] Ho W *et al.* MNRAS, 2017, 464: 1211
[46] Abeysekara A U *et al.* ApJ, 2018, 867: 19
[47] Ackermann M *et al.* ApJ, 2012, 750: 3
[48] Atkins R *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 95: 251103
[49] Bartoli B *et al.* ApJ, 2015, 806: 20
[49] Amenomori M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2021, 126: 141101
[50] Cao Z *et al.* Phys. Rev. Lett., 2023, 131: 151001
[51] Linden T, Buckman B. Phys. Rev. Lett., 2018, 120: 121101

悟理小言

低温物理学家看摩尔定律

笔者虽非电机电子领域出身，也不在半导体产业工作，但作为一位低温物理实验学家，我一直对这项横跨科学与人文的人类文明史上的最高成就之一：“摩尔定律” (Moore's Law)，倍感好奇与充满敬意。

1947年物理学家发明了晶体管，1961年第一个商用集成电路在美国硅谷上市。短短4年之后(1965年)，摩尔(Gordon E. Moore)应邀展望电子组件的未来时，他预测一个集成电路中的晶体管数目，将呈指数形式增长。当年一个集成电路中的晶体管数目约有60颗，2003年时已有一亿颗，如今更高达一千亿颗。最令人惊讶而赞叹的是，摩尔当年预测这一增长“定律”时，他手中只有1962到1965年4年间的4个数据点。他这一胆大又心细的技术与产业的发展预测，既是天才的神来之笔，又展现出了智者和哲人般的高瞻远瞩。

2015年，适逢摩尔定律诞生50周年。在接受纽约时报记者的祝贺和应景访谈时，摩尔特别强调说，半世纪以来，整个半导体工业的繁荣兴旺，都是来自于早期对一些材料的量子力学性质的理解。访谈中，摩尔用心良苦地反复强调基础研究的重要性；他同时深深感慨，认为美国政府(在2010年代)已经不如1960年代那样脚踏实地投资基础设施，制定宏大目标，支持基础科学研究了。他也提醒：“‘摩尔定律’是靠一批杰出的工程师和科学家来实现的。”

2022年11月18日，国际著名期刊《科学》上有一篇探讨摩尔定律前景的特邀文章，作者是美国普渡大学电气和计算机工程学院Mark S. Lundstrom教授及其合作者。文中他们指出，晶体管尺度的微小化已经到了极限，如再缩小，量子隧穿效应就会造成漏电流，危害芯片功能。他们进一步指出，采用立体多层方式把晶体管往上(三维)堆积在硅晶圆上，

虽可增加单位面积的晶体管数，却将造成芯片无法散热。第三点，作者指出当晶体管数目如天文数字般增加时，集成电路中的(分工/功能性)构成区块数目也将持续增加，从而形成一个“复杂系统”，其性质将难以理解和难以模拟预测。最后这点，作者更引用美国已故理论凝聚态物理学家Philip W. Anderson(1977年诺贝尔物理奖得主)的“多则生异”科学哲学观点来佐证他们的论述，令人敬佩其专业功力之深厚与知识之广博。

从以上讨论摩尔定律的精辟文章中，我们获得三点启示：

(1) 2015年接受访谈时，摩尔已86岁高龄，但他宝刀未老，回顾往事，展望未来，仍反复强调必须加强基础科学研究才能带来瓜熟蒂落的技术应用。

(2) Lundstrom点出摩尔定律即将面临的三个严峻问题——电子隧穿、散热和复杂系统——都牵涉基础物理定律如何规范与界定物质世界及其行为的知识和应用，这些问题没有简易的答案，唯有深入探讨，才可能厘清并妥善面对。

(3) 只有电子学，开创不了半导体世纪。例如，发明晶体管的William B. Shockley, John Bardeen和Walter H. Brattain三位，都拥有美国一流大学的物理博士学位。集成电路的共同发明者是Jack S. Kilby和Robert N. Noyce两位，前者有美国一流大学的电机学士和硕士学位，后者拥有物理博士学位。摩尔本人拥有美国一流大学的化学博士学位，并辅修物理。另外，使晶体管和集成电路得以进入大规模工业化生产的平面制程技术的发明人Jean A. Hoerni的学术养成经历也深具启发性，他拥有数学学士学位，两个物理博士学位，之后进入化学系当博士后研究员。

(台湾阳明交通大学 林志忠 供稿)