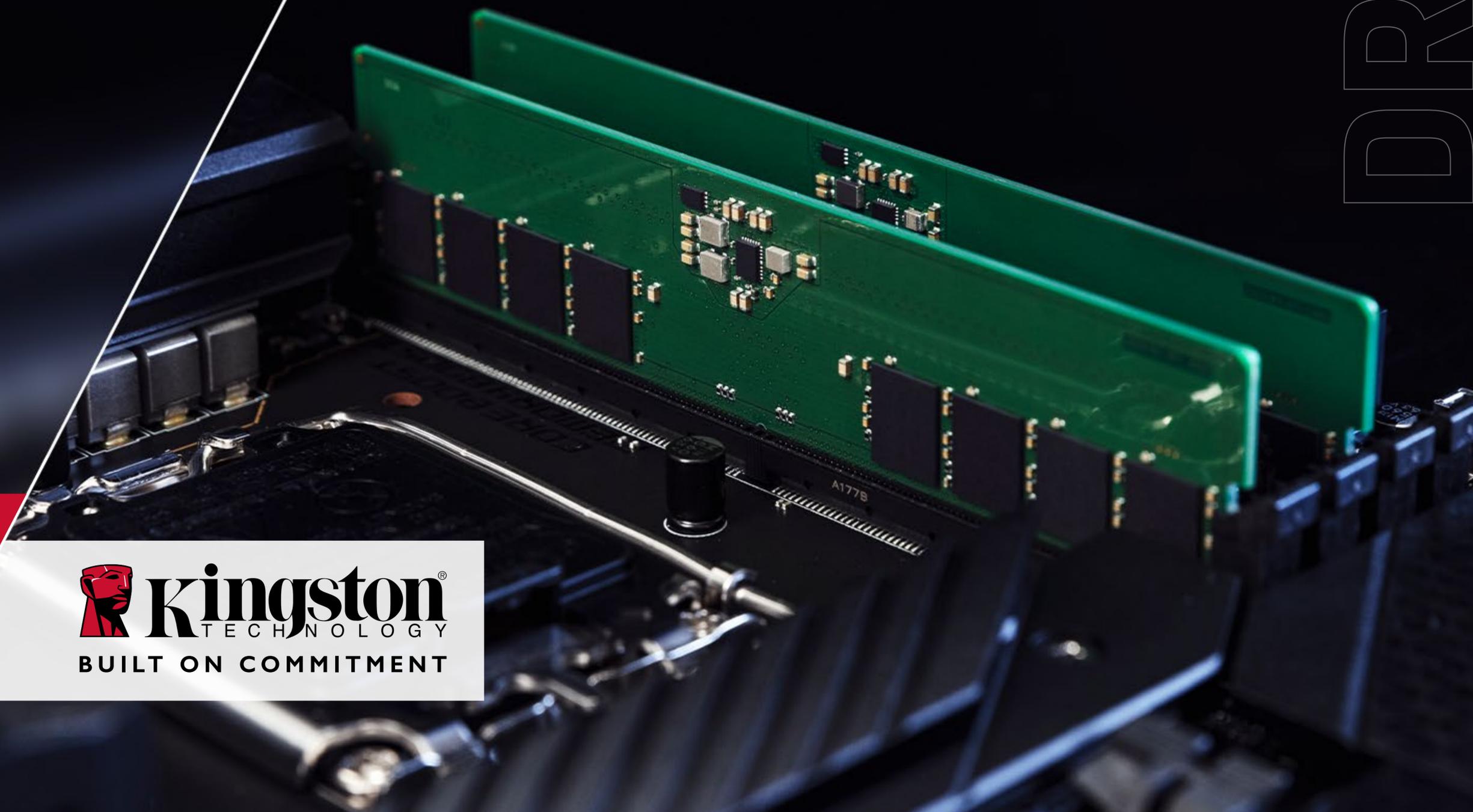


内存技术的发展

DRAW



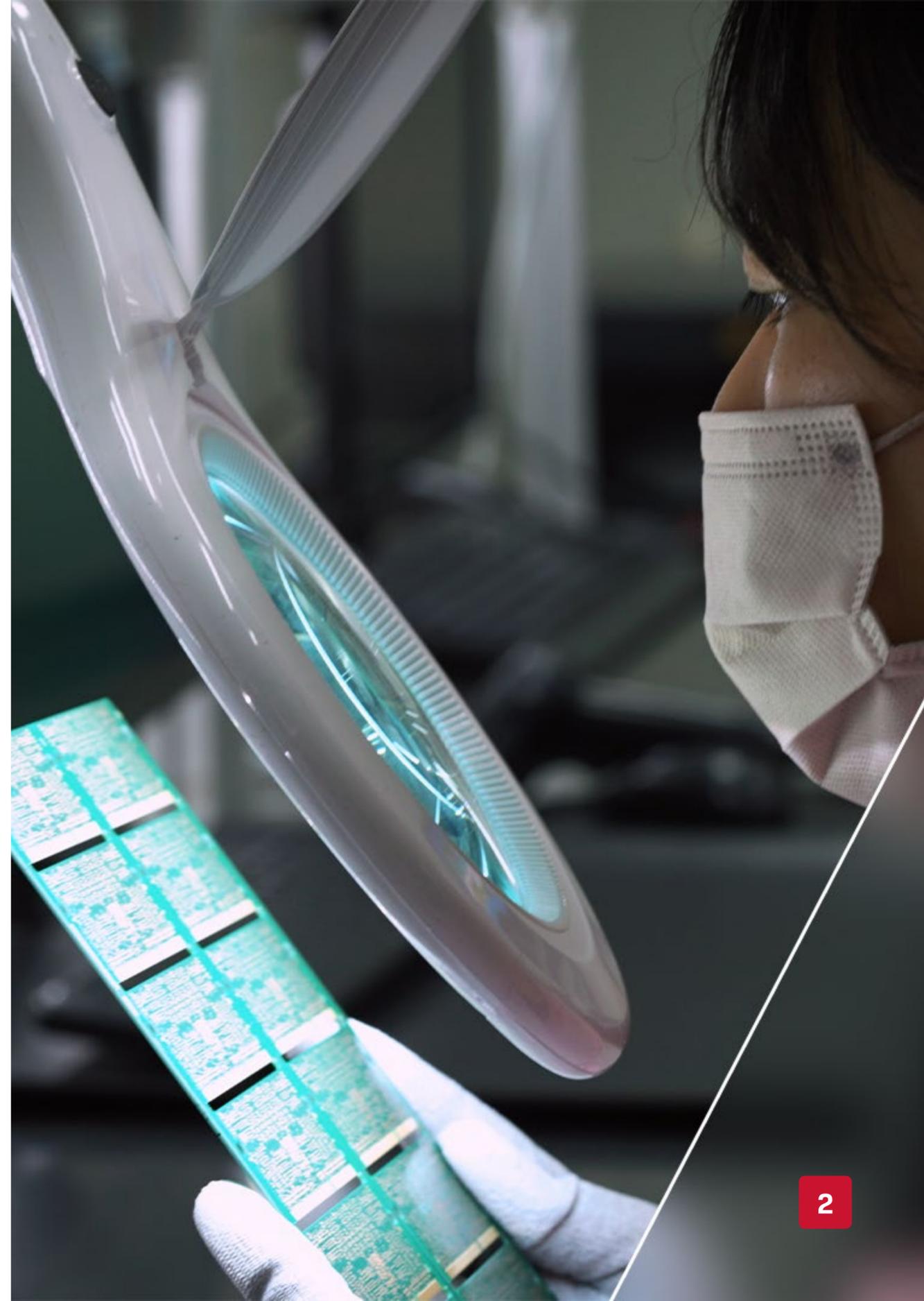
 **Kingston**[®]
TECHNOLOGY
BUILT ON COMMITMENT

前言与目录

动态随机存取存储器 (DRAM) 从快速页面模式 (FPM) 到同步动态随机存取存储器 (SDRAM)，再到双倍数据速率同步动态随机存取存储器 (DDR SDRAM)，如今已发展到第五代 (DDR5)，这一演进代表了计算技术的重大进步，其驱动力在于对更高性能、更大带宽和更高能效的需求。在 AI 应用浪潮的推动下，这一需求持续增长，DDR5 和 HBM（高带宽内存 DRAM）在数据中心和客户端系统中备受青睐。作为半导体存储领域的“老黄牛”，DDR SDRAM 凭借其低功耗和高性能，能够快速将数据传输到处理器，在行业中占据独特地位。

据行业专家称，作为核心存储技术，DRAM 的发展势头未减。但从性能和架构的角度来看，究竟是什么让这种内存类型如此擅长满足当今企业的需求呢？某些类型是否更适合服务器而非台式机？这项技术是如何发展的，面临哪些典型挑战和用例？在 Kingston 技术专家的协助下，本电子书将解答这些问题，并探讨 DRAM 的未来前景。

目录	页码
撰稿人	3
DRAM 的发展：从 FPM 到 DDR5 SDRAM	4
DRAM 类型和主要区别	5
延迟和速度的重要性	6
典型应用场景和工作负载影响	7
DRAM 兼容性问题和升级考虑因素	8-9
克服 DRAM 制造挑战	10
DRAM 的发展：市场趋势的影响	11
DRAM 技术的未来	12
总结	13



撰稿人

本电子书由 Kingston 的两位专家编写。



Mike Mohney | Kingston Technology

Mike Mohney 是总部位于加利福尼亚州 Fountain Valley 的 Kingston Technology 的高级技术经理。自 1996 年加入 Kingston 后，他为公司带来了超过 28 年的丰富经验。

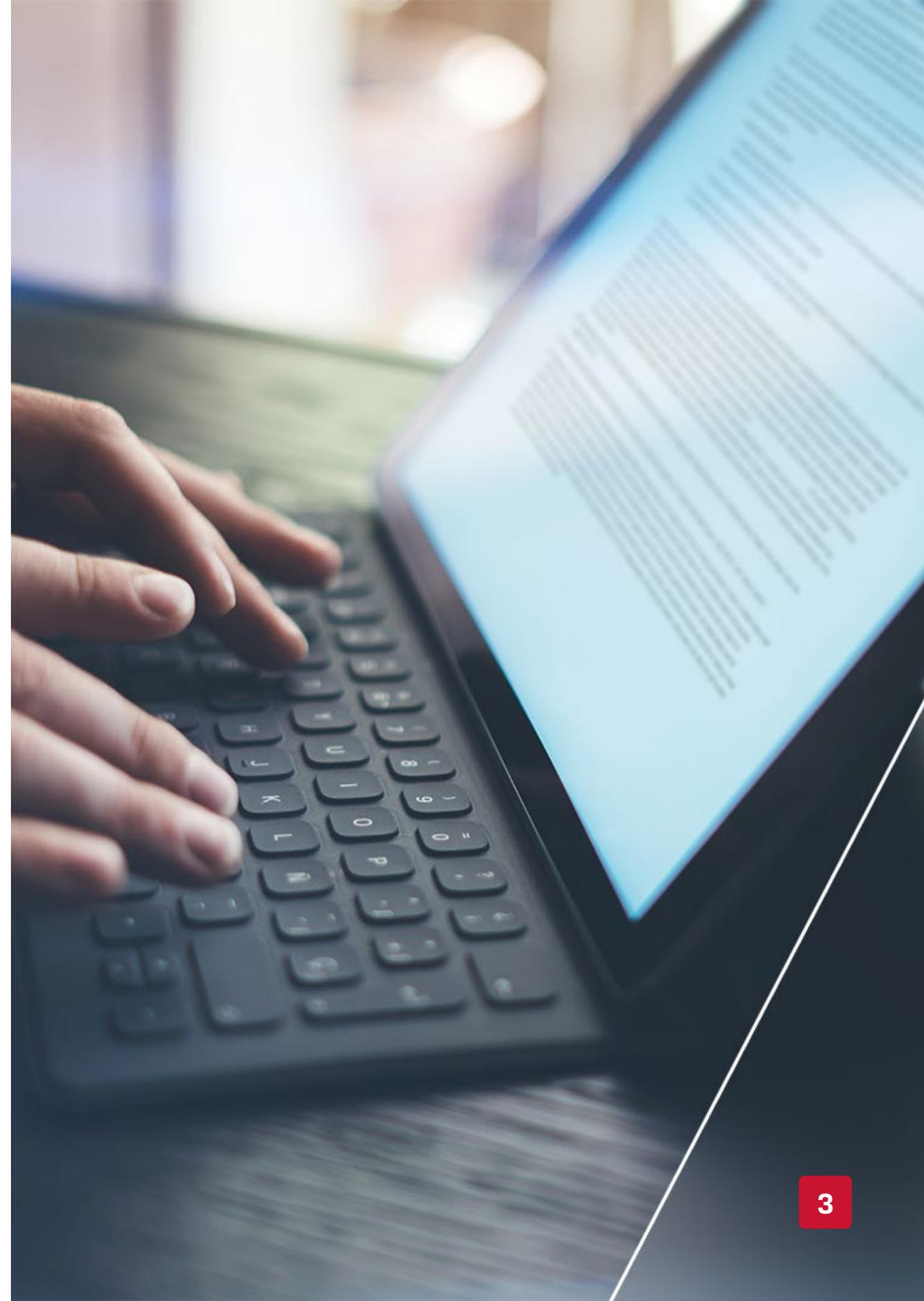
在其职责范围内，Mike 对 Kingston 的技术项目的管理和推进起到了关键作用，特别是在 DRAM 和内存解决方案领域。他的专业能力和领导力为 Kingston 成为领先的 DRAM 解决方案第三方制造商奠定了坚实的基础。

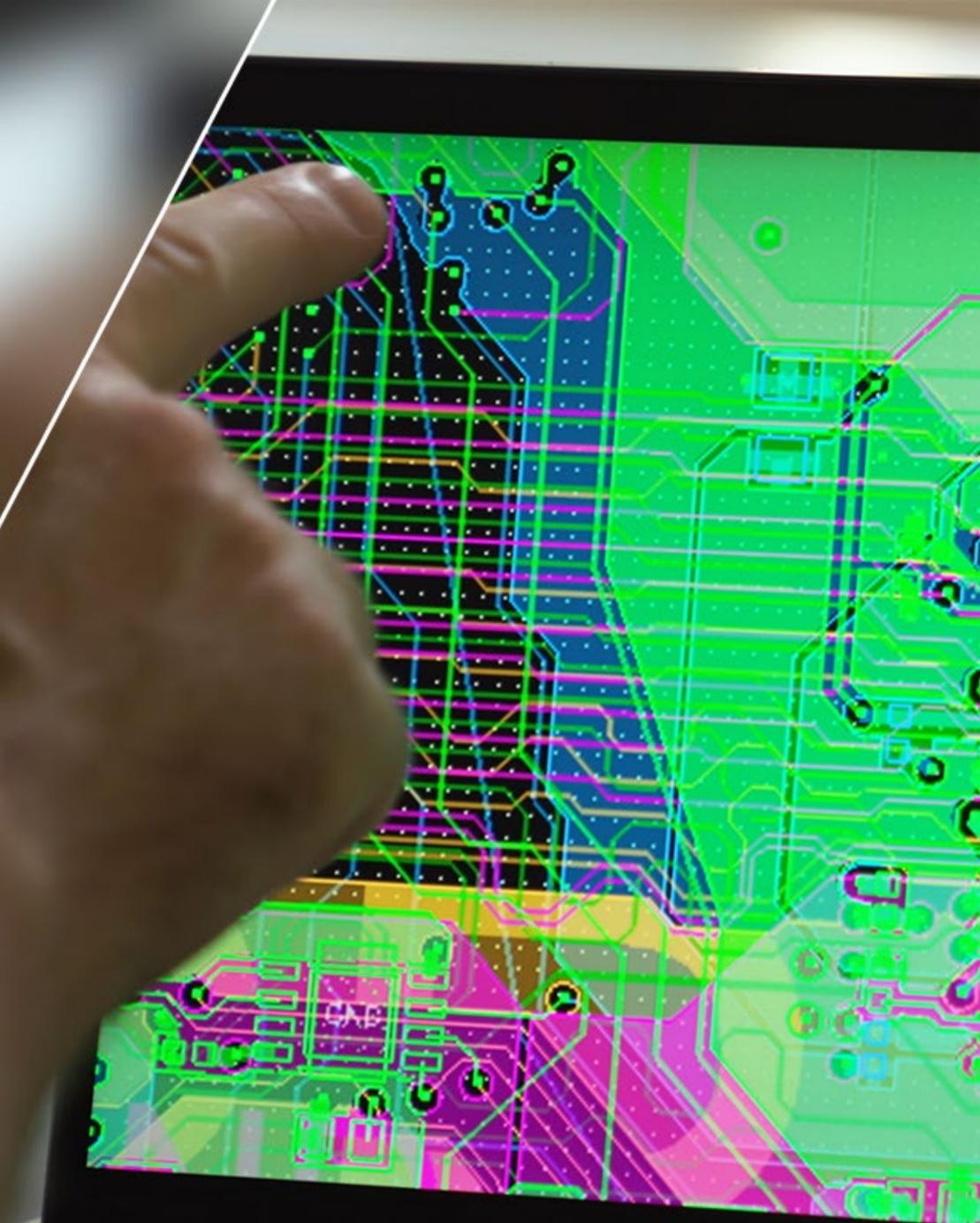


Geoffrey Petit | Kingston Technology Europe

Geoffrey Petit 是 Kingston Technology 欧洲技术资源组的团队负责人。他于 2016 年加入 Kingston，担任技术支持工程师，为欧洲、中东和非洲 (EMEA) 地区的客户提供售后技术支持，为同事和新员工提供技术培训，并参与新产品的测试。

Geoffrey 及其团队的责任是为客户提供技术支持，以及为业务经理、营销人员、内部销售团队、客户及关键人员提供售前查询支持。





DRAM 的发展：从 FPM 到 DDR5

到了 20 世纪 80 年代中期，随着 80486 处理器的推出，个人电脑革命如火如荼。此时，单列直插式内存模块 (SIMM) 上的快速页面模式 (FPM) DRAM 是主要的内存技术。为了提高性能，20 世纪 90 年代初开发了扩展数据输出 (EDO) DRAM，随后很快便出现了同步动态随机存取存储器 (SDRAM) 和双列直插式内存模块 (DIMM)，它们通过与 CPU 时钟同步并以单一数据速率运行，实现了更高的运行效率。2000 年，首款双倍数据速率 (DDR) SDRAM 问世，它通过在时钟信号的上升沿和下降沿都传输数据，从而将数据传输速率提高了一倍。与前代产品相比，它的能效也更高，每个模块的电压降至 2.5 伏，而前代产品的电压为 3.3 伏。在行业标准组织 (JEDEC) 的精心规划下，DDR SDRAM 不断发展，第二代 DDR (DDR2) 于 2003 年推出。随后，2007 年推出了 DDR3，2014 年又推出了 DDR4。每一代产品都在提高内存速度、扩大内存容量并降低工作电压，充分利用半导体晶圆光刻技术的改进和内存单元的缩小。

转眼到了 2021 年，DDR5 SDRAM 问世，标志着内存技术取得了重大进步。DDR5 首次亮相时的速度为 4800MT/s，相比 DDR4 最高 3200MT/s 的速度，带宽提高了 50%。除了速度之外，DDR5 模块还集成了电源管理 IC (PMIC)，有助于调节内存模块中各组件所需的电源，相比前几代产品，它能提供更好的电源分配，改善信号完整性并减少噪声。降低功耗的趋势仍在继续，DDR5 仅需 1.1 伏即可运行。同时，在数据完整性方面也进行了重大改进，例如采用了片内错误校正码 (ECC)，能够检测和纠正 DRAM 组件内的位错误，从而降低了数据损坏的可能性。

“

除了主要的性能、功耗和密度方面的改进外，每一代新产品还设计了许多其他功能。这包括增强的错误校正技术、信号完整性的改进、为防止硬件黑客攻击漏洞而增加的缓解措施，以及新型态因素。

Mike Mohny | Kingston Technology

”

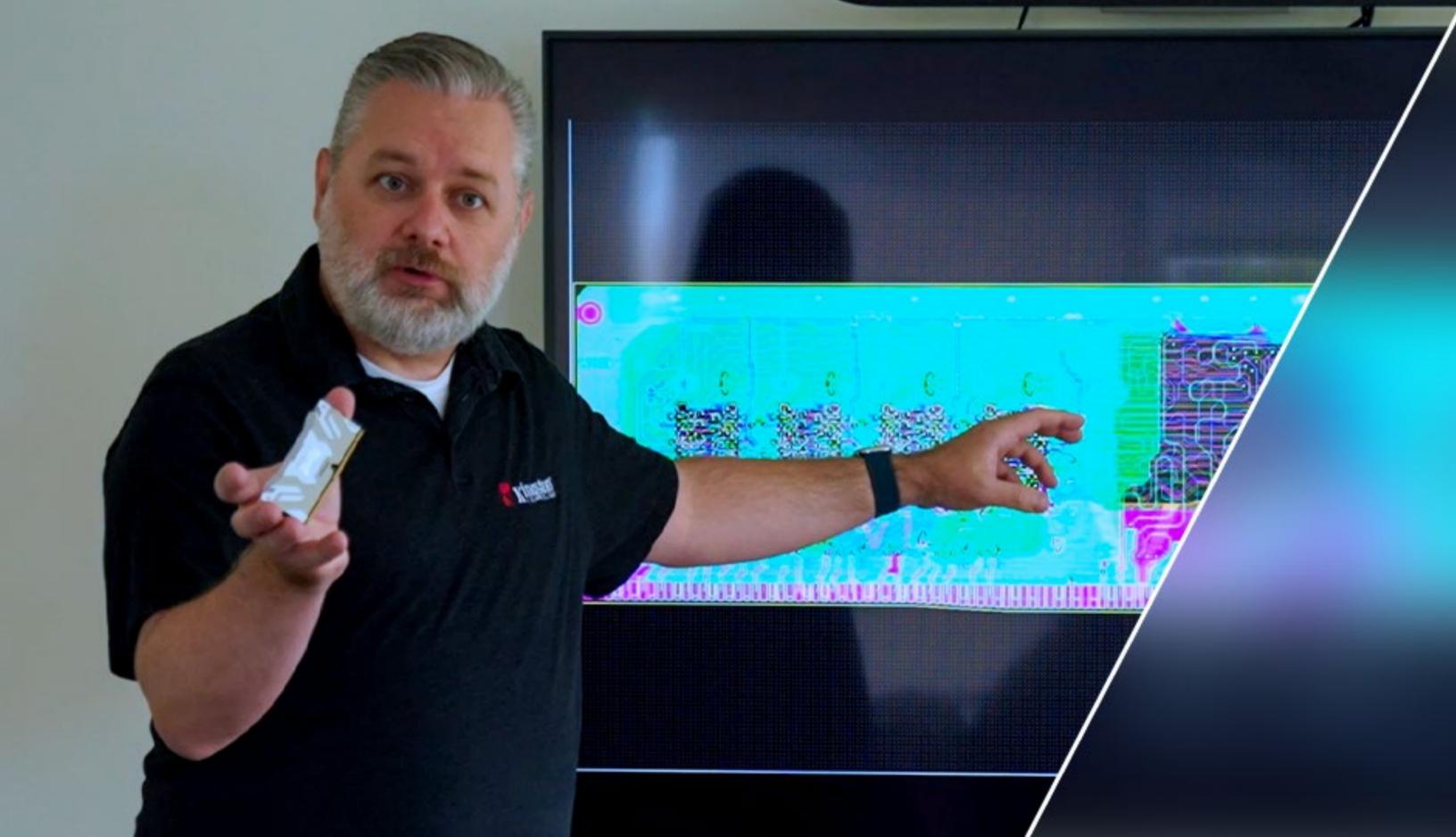
自推出以来，DDR5 经历了四次计划内的速度提升，这些提升得到了 Intel 和 AMD 连续发布的平台的支持。从历史上看，内存速度每年提升一次，遵循内存行业标准设定的预定节奏，并由新的芯片组提供支持。DDR5 跳过部分速度等级的部分原因是芯片组和处理器制造商之间的竞争，以及对能够处理 AI 等内存带宽密集型应用的高性能内存的需求。

“

现在可以实现更高的密度，这意味着单个模块可以实现更大的内存容量，这对于服务器和高性能计算至关重要。

Geoffrey Petit | Kingston Technology Europe

”



DRAM 模块类型和主要区别

JEDEC 行业标准组织不仅为 DRAM 内存制定规格，还确定 DRAM 所处的尺寸规格，以适应各种计算平台和环境。

无缓冲型模块，如无缓冲 DIMM (UDIMM) 和无缓冲小型 DIMM (SODIMM)，是消费者台式电脑和笔记本电脑中最常用的内存模块类型。

增加 DRAM 组件以支持错误校正码 (ECC)，从而形成了支持主流工作站级系统的 ECC UDIMM 和 ECC SODIMM。它们为内存密集型应用提供了关键的数据完整性支持。

对于单处理器或多处理器服务器，ECC 寄存 DIMM (RDIMM) 在模块上配备了一个寄存器组件，该组件可在 DRAM 和内存控制器之间缓冲数据。这在需要大量内存且需要数据可靠性的环境中至关重要。

降载 DIMM (LRDIMM) 配有数据缓冲区来减少内存控制器上的负载，否则会降低内存速度以进行补偿。LRDIMM 技术支持大容量模块，又不影响性能，该技术于 2012 年首次应用于 DDR3，然后在 2014 年针对 DDR4 进行了改进。

低功耗 DDR (LPDDR) 内存于 2006 年进入市场，是移动设备节省电池电量的一种解决方案。尽管 LPDDR 内存通常直接安装在系统板上，但从 2024 年起，LPDDR5 也可以用于 CAMM2（压缩附加内存模块）尺寸规格，为制造商在笔记本电脑或小尺寸个人电脑中提供模块化解决方案。

除了 DDR SDRAM 之外，增长最快的内存类别是高带宽内存 (HBM)，它由 AMD 于 2008 年开发，旨在满足对高性能和高容量内存日益增长的需求，以支持功耗要求更低的 GPU。HBM 使用高速接口来管理单个芯片封装内的 3D 堆叠的 SDRAM 层。这提供了宽域（128 位+）可寻址内存访问，并且主要面向显卡、封装内处理器内存和 AI 加速卡。

“

在过去十年中，HBM 经历了连续几代的发展，以增加对更多层更高内存容量的支持、更宽的数据总线和更高的性能吞吐量：也就是说，HBM 内存目前并未用于内存模块，并且不被视为 DDR DRAM 在价格每 GB 方面的可行替代技术。

Mike Mohny | Kingston Technology

”

延迟和速度的重要性

延迟和速度是由内存行业标准组织 (JEDEC) 定义的两个关键属性，用作性能指标。

“

在计算领域，有许多不同类型的应用程序可能会因其工作量而选择使用一种而非另一种硬件。与那些侧重于存储或 GPU 的应用程序不同，内存密集型应用程序将从高性能的内存速度和较低的延迟中受益。

Mike Mohny | Kingston Technology

”

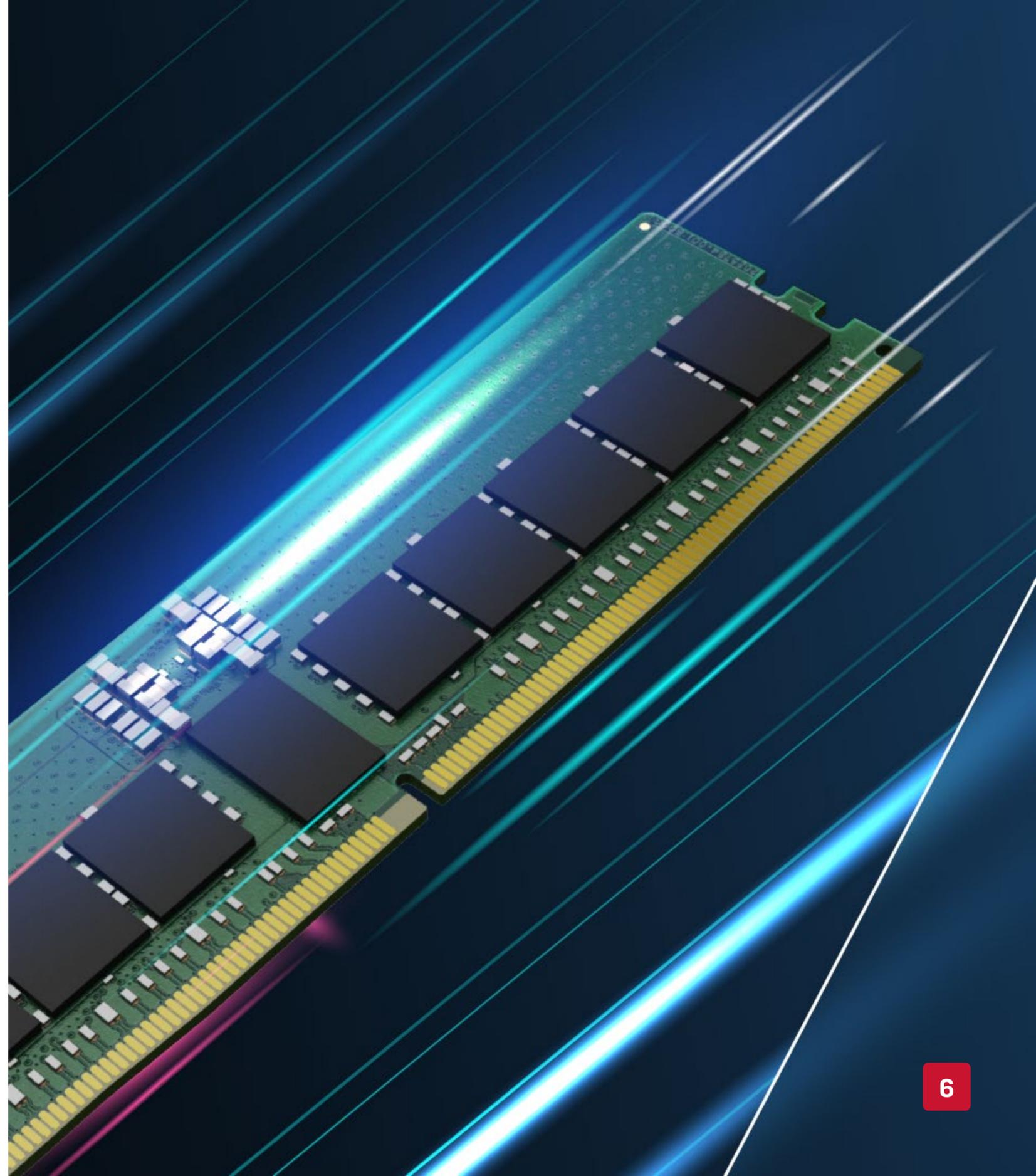
对于每一种新的内存技术，JEDEC 都会规定标准速度和时序，这些标准被内存制造商、处理器和芯片组架构师以及主板/系统制造商用于保持一致。随着行业标准内存速度的提高，延迟也会增加。这通常会引起争议，并被用户误解，这些用户认为更快的标准速度会被增加的 CAS 延迟时序所抵消。然而，总延迟（速度和时序的组合）是更准确地衡量内存性能的纳秒级指标。这指的是处理器从内存中接收数据所需的时间。

“

在影响计算任务方面，无缓冲内存非常适合需要快速响应时间的台式机和工作站。而服务器级内存（如寄存和降载 DIMM）在数据中心表现卓越，因为在数据中心的稳定性、错误校正和处理大型数据集比延迟更为重要。

Geoffrey Petit | Kingston Technology Europe

”





典型应用场景和工作负载影响

最终用户和数据中心架构师会根据其应用和工作负载需求来选择平台。反过来，应用对内存容量和性能的需求又决定了所选和配置的内存模块类型。

在内存行业，我们会对客户端（即个人电脑）和服务器级的组件和模块尺寸规格进行区分。客户端系统包括使用行业标准非 ECC 内存（在无缓冲 DIMM (UDIMM/CUDIMM)、SODIMM/CSODIMM 和 CAMM2 尺寸规格中）的台式机和笔记本电脑。与此同时，服务器级系统（包括台式工作站和移动工作站）使用支持 ECC（错误校正码）的内存模块。

消费类设备更青睐无缓冲内存的简洁性和速度。台式机和笔记本电脑并非设计为 24 小时不间断运行，在不使用时通常会关闭电源。这些系统上的应用和工作负载也不会像服务器那样对内存组件的容差造成压力，因此无需 ECC 支持。

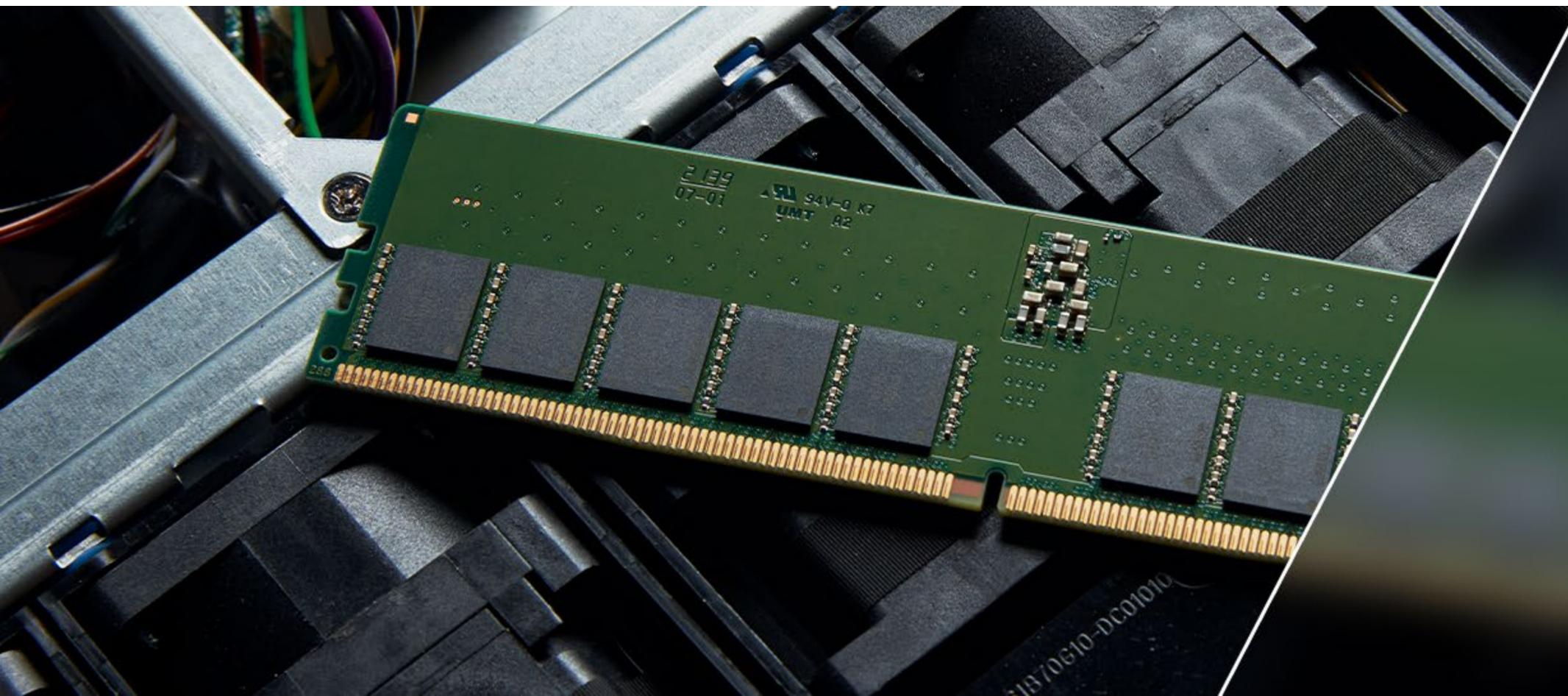
另一方面，对于设计为始终在线的更复杂的系统（如服务器和高性能工作站），ECC 寄存 (RDIMM) 和降载 DIMM (LRDIMM) 提供的额外稳定性和可靠性则大有裨益。ECC 级模块支持对损坏的数据进行错误校正，防止服务器崩溃或丢失关键信息。这些模块还采用更高级的 DRAM 组件，经过更高容差的测试，且故障率更低。

DRAM 兼容性问题 and 升级考虑因素

在评估内存选项时，除了考虑使用场景、应用和工作负载外，品牌声誉的重要性也不容忽视。通常，如果内存公司投资于测试基础设施，以验证其内存设计与芯片组架构师（如 Intel 和 AMD）的兼容性，并与主板和系统制造商合作进行内存资格测试，那么它们遇到的兼容性问题就会较少。在 Intel、AMD、主板制造商、主要系统品牌和内存制造商之间，存在着一个强大的制衡生态系统。但并不是所有的内存模块供应商都会参与其中。

安装不兼容的 DRAM 可能会导致系统无法启动。在升级或更换内存时，请务必在购买新内存之前查阅主手册或制造商的网站，并考虑以下因素：

1. **主板支持**：确认主板支持哪种特定的内存技术和模块类型（如 DDR4、DDR5、RDIMM 与 UDIMM）。
2. **速度**：确保新内存的速度匹配当前 DRAM 的速度或更高，以避免性能问题。在 DDR 代际之内，速度通常向后兼容。因此，购买标准速度为 3200MT/s 的部件可以安全地降频至 2666MT/s 的系统上运行。
3. **容量**：选择以相同成对或成组的方式安装的内存模块，以匹配主板架构，并尽量预留多余的内存容量，以满足未来的内存需求。
4. **混合 DRAM 模块**：在成对或成组的内存中混合使用不同类型的 DRAM（位宽、密度、品牌）可能会导致系统不稳定。根据主板的内存架构，以相同成对或成组的方式安装内存模块可以减少发生问题的概率。
5. **纠错**：如果要在客户端或主流工作站中安装 ECC 无缓冲模块，请务必确认主板和处理器型号支持 ECC 功能。



例如，DDR4 RDIMM 和 LRDIMM 使用了与无缓冲 DIMM 相同的模块键（槽口）。当它们被插入到桌面级系统时，RDIMM 和 LRDIMM 将无法工作。DRAM 组件的位宽和密度也可能影响兼容性，因为某些芯片组无法与特定的 DRAM 位宽或高密度 DRAM 一起工作。

Geoffrey Petit | Kingston Technology Europe

DRAM 兼容性问题 and 升级考虑因素

内存行业一直在不断发展，它既要满足下一代的需求进行设计，又要兼顾当今和过去电脑的需求。因此，对于内存模块制造商而言，保持包含数代计算机平台的广泛档案库至关重要。

“

在一些内存模块制造商为降低成本而省略的步骤中，在旧系统上测试新的内存组件（也称为回归测试）是非常重要的。这一环节经常会暴露出兼容性问题。

Mike Mohnney | Kingston Technology

”

维护一个庞大的系统兼容性数据库也是预防问题发生的关键。作为世界上唯一积极维护超过40,000个计算机系统数据库档案的内存模块供应商之一，Kingston的工程师能够更准确地告知用户哪些内存升级选项与全球市场上成千上万的当前和旧款计算机型号兼容。Intel和AMD的芯片组和处理器代际之间的细微差别经常（有时甚至是故意）不向用户公开。Kingston的目标是分享用户所需的技术见解，帮助他们了解如何为自己的计算机选择最佳、最兼容的选项。

“

当组件未经芯片组或BIOS验证或优化时，可能会出现兼容性问题。常见的兼容性问题还包括在系统中使用不受支持的DRAM配置或模块类型。

Geoffrey Petit | Kingston Technology Europe

”

克服 DRAM 制造挑战

如果兼容性没有得到妥善处理，可能会成为一个问题，但这并不是唯一的挑战。设计复杂性、组装精确度以及质量控制都是 DRAM 制造中的主要挑战。而作为领先的第三方 DRAM 模块制造商，这些挑战也正是 Kingston 所面临的。但每个挑战都自有其解决方案：

我们首先来看看如何设计我们的内存解决方案。

- » **设计复杂度：**我们设计的每种 DRAM 模块都具有独特的功能，无论是 DDR4 与 DDR5 相比，还是无缓冲型与寄存器型相比，以及其他许多类型——这都增加了设计的复杂性。这要求采用先进的工程技术并进行精确的集成，以确保可靠性和性能。
- » **解决方案：**为了解决这个问题，我们采用专门的设计软件和严格的测试协议，以确保每种内存类型都能按预期无误地运行。

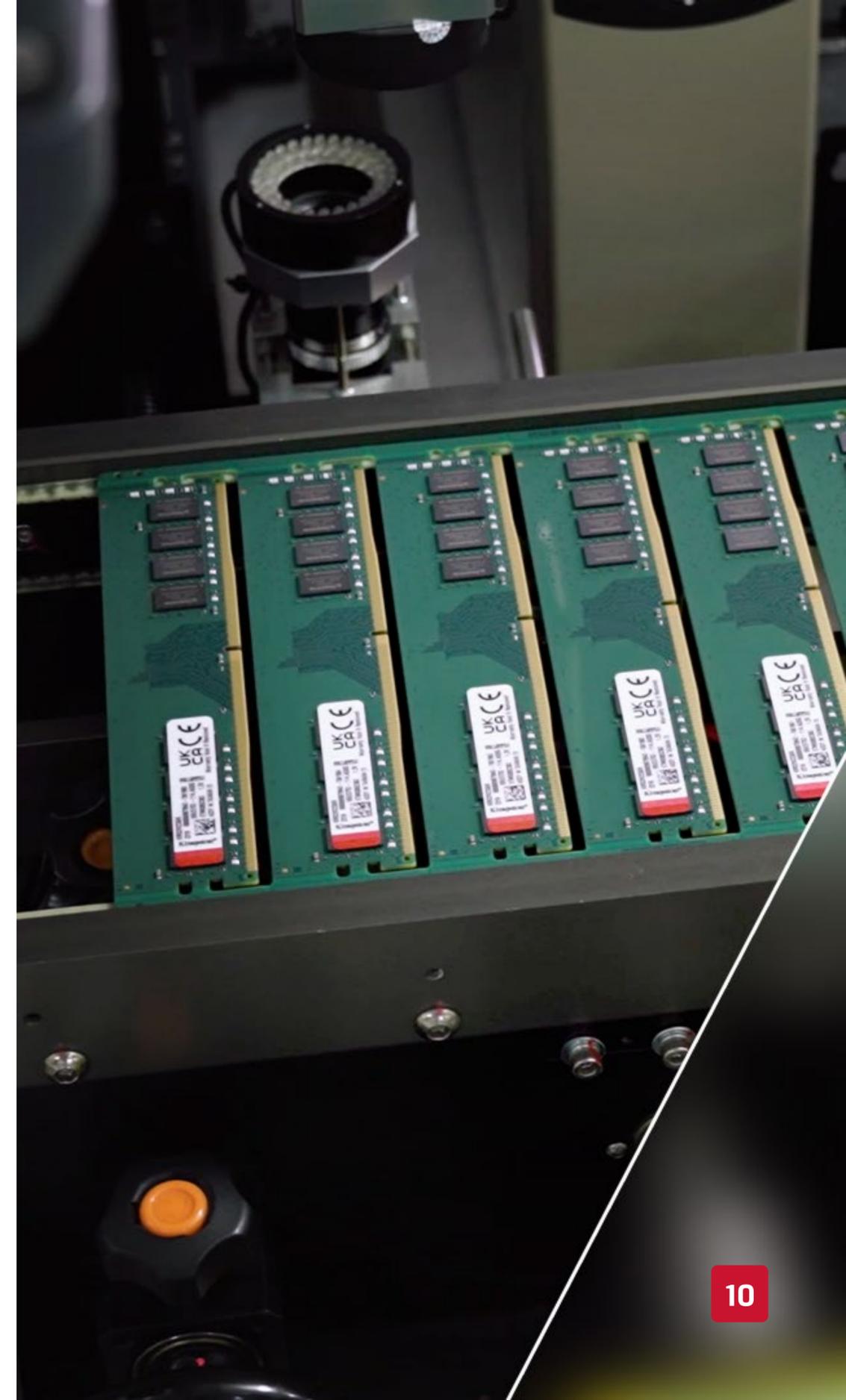
然后，我们与领先的 DRAM 半导体制造商合作。

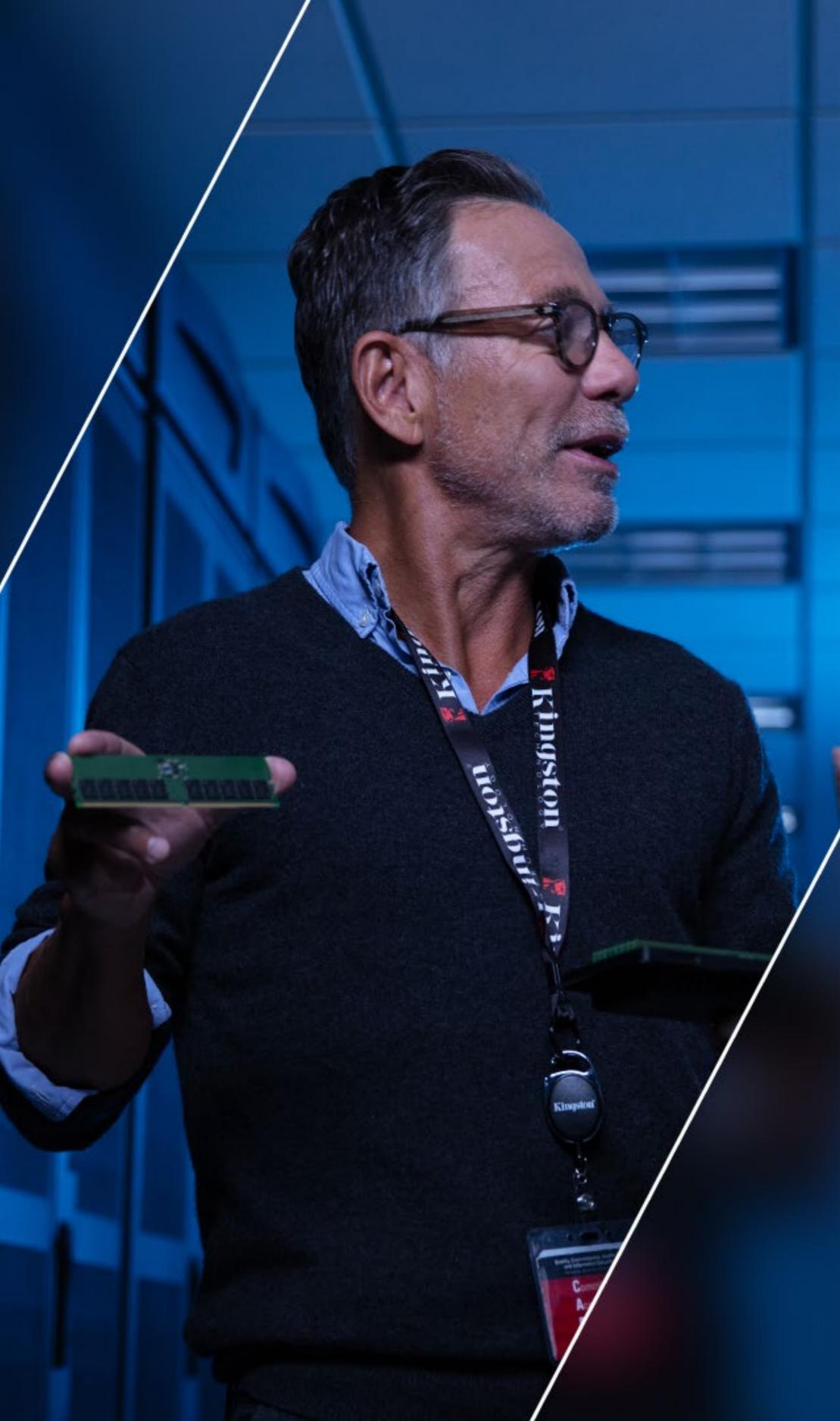
- » **制造精度：**DRAM 芯片是由半导体通过纳米级工艺生产的，即使微小的变化也可能导致缺陷，从而影响产量和性能。
- » **解决方案：**Kingston 只与能够保证高性能和高可靠性的半导体制造商合作。这些半导体制造商采用最先进的光刻技术和无尘室环境来最大限度地减少缺陷，确保生产过程中的高精度和一致性。如果他们无法满足这些要求，那么我们就不会与他们合作。

接下来，我们来看看我们是如何构建和测试 DRAM 模块的。

- » **质量控制：**一旦组装完成，我们所有的 DRAM 规格都必须满足严格的性能和可靠性标准。
- » **解决方案：**在各种条件下进行的大量测试，包括温度和压力测试，有助于识别和剔除故障部件，确保只有可靠的内存产品才能进入市场。

通过先进的技术和严格的质量保证，Kingston 生产出了高性能、可靠、适用于各种计算需求的 DRAM 解决方案。我们与 Intel 及 AMD 紧密合作，进一步获取参考平台，这些平台有助于我们开发新的内存技术，并为提高我们的生产测试能力做好准备。我们的生产环境不断进行硬件和软件升级，以支持新的内存速度、新的容量，并提高所生产模块的质量。





DRAM 的发展：市场趋势的影响

在推动不同类型 DRAM 内存的开发与采纳方面，市场趋势深受技术持续进步的驱动，同时，消费者行为也扮演着举足轻重的角色。性能、效率和可扩展性都是影响开发和采用的关键因素。

回顾过去，过去几十年的计算和工作负载需求对开发的内存类型产生了影响。2000 年代中期，内存行业开始转向提供能够降低整体功耗的内存技术，这既适用于移动设备领域，也适用于数据中心。到了 2010 年代中期，虚拟化推动了对更高容量模块的需求。当时，由于芯片组限制，大容量模块的性能损失最终导致开发出了适用于 DDR3 和 DDR4 的降载 DIMM。

如今，AI、游戏和大数据分析等产业持续增长，对高速、大容量内存的需求也越来越大。这推动了诸如多路复用级联 DIMM (MRDIMM) 等先进 DRAM 模块类型的开发，以满足这些性能需求。此外，对更轻薄设备的追求也促使紧凑且高效的内存解决方案（如 CMM2）得到采用，这些解决方案为制造商提供了成本效益高的模块化解决方案，可替代 DRAM 下置或无法物理安装到超极本类笔记本电脑或平板电脑中的多个 SODIMM。

另一个快速发展的领域是扩展内存容量的能力，这超出了传统 DIMM 插槽的范畴。

“

AI 对性能的需求是推动可扩展、大容量、高性能内存（如专门解决大容量内存性能瓶颈的 MRDIMM）开发的另一关键驱动力。

Geoffrey Petit | Kingston Technology Europe

”

这些只是内存行业如何适应市场趋势的几个例子，展示了我们的生态系统和标准机构始终准备着应对未来内存需求所带来的挑战。

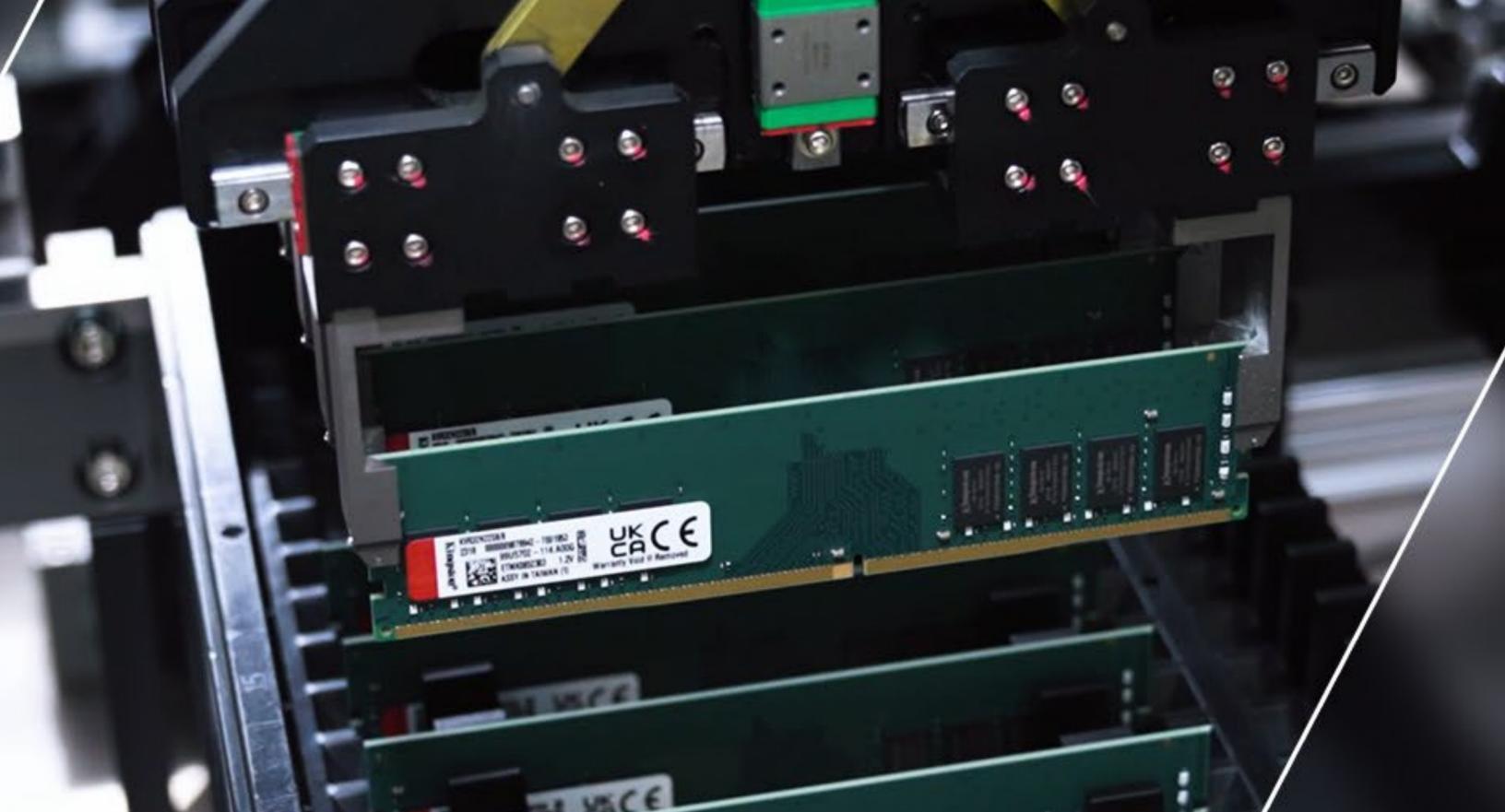
“

一直在加大对基础设施的投资力度，并不断扩大规模，以有力支撑下一代内存技术的研发与应用。内存速度每年都在提升，因此在新系统上市之前就拥有下一代平台至关重要，以便在新系统上市时能够迅速扩大生产，满足全球需求。

Mike Mohny | Kingston Technology

”

UDIMM
CUDIMM
SODIMM
CSODIMM
CAMM2
RDIMM
LRDIMM



“
这些革新举措，诸如CAMM2、CUDIMM 以及CXL，预示着一个崭新的未来，届时内存技术将引领各类应用与行业中的计算系统迈向更快速度、更高效率以及更强灵活性的全新发展阶段。
Geoffrey Petit | Kingston Technology Europe
”

DRAM 技术的未来

展望未来，内存行业将继续适应并规划以满足市场需求。DRAM 技术的未来发展将聚焦于提升速度、降低功耗以及增加密度，以满足 AI、大数据和云计算等高级应用的需求。此外，当今内存技术和规格所面临的挑战已经影响了 JEDEC 正在开发的下一代 DDR 规格——DDR6。DDR6 预计将于 2027 年完成制定，其重点可能在于实现更高性能，与 DDR5 相比，数据速率将实现显著线性增长，同时数据总线也将更宽。

在此之前，DDR5 的速度将继续提升，并将应用于新型规格中。这包括 CAMM2，据预测，在未来几年内，它将成为移动和小型规格系统的主要模块解决方案。薄型 CAMM2 可有效替代传统笔记本电脑中的两个 SODIMM，通过使用模块化内存解决方案而不是直接安装在主板上的离散 DRAM 组件，可为制造商节省大量成本。一些主板制造商甚至已经证明 CAMM2 可用于传统台式电脑中。作为 Dell 原始 CAMM 设计的认证内存供应商，Kingston 在推动 CAMM2 技术革新方面占据战

略高地，我们已配备了先进的制造与测试基础设施，并投入了充足的资源，以全力支持这一新型规格的研发与应用。请持续关注 Kingston 网站，我们的 CAMM2 解决方案预计将于 2025 年上半年推出。

CUDIMM 是另一种新型 DRAM 模块，它从 6400MT/s DDR5 开始，在无缓冲 DIMM 上集成了时钟驱动器。该组件在模块上重新驱动来自处理器的时钟信号，增强了信号完整性，并降低了由于噪声和抖动（在更高速度下会成为问题）导致的错误发生率。

还有 Compute Express Link（简称 CXL），这是另一个处于初级阶段的新型 DRAM 类别。CXL 是一个在 PCI Express 总线上运行的开放标准协议，与用于存储的 NVMe 非常相似。CXL 产品的首个重点是内存扩展器，它利用不同规格的 DRAM（DDR4、DDR5、HBM）来增加内存容量并扩展服务器的可用内存池。

总结

随着 AI 的崛起，内存设计师们正紧追不舍，不断推陈出新。作为半导体内存的核心支柱，DDR SDRAM 凭借其超大的存储容量以及向处理器高速传输数据的卓越能力，其技术演进之路仍在持续加速推进中。通过投资并严格把控质量，制造商能够克服关键的兼容性和制造挑战，生产出可靠且高性能的内存，以满足多样化的计算需求。但为了满足您特定环境的需求，Kingston 的专家团队始终在此为您提供支持，助您应对芯片组、处理器代际和优化内存配置等不断变化的复杂情况。

Built on Commitment

从大数据到物联网设备，包括笔记本电脑、个人电脑和可穿戴技术，Kingston Technology 致力于提供顶级的产品解决方案、服务与支持。我们深受领先的 PC 制造商和全球云服务供应商的信赖，珍视那些助力我们不断发展和创新的长期合作伙伴关系。我们始终将质量和客户服务放在首位，确保每一项解决方案都符合最高标准。在每一个环节，我们都将倾听、学习并与客户和合作伙伴紧密合作，共同打造出长期有效的解决方案。

©2024 Kingston Technology Far East Corp. (Asia Headquarters), No. 1-5, Li-Hsin Rd. 1, Science Park, Hsin Chu, Taiwan
保留所有权利。所有商标和注册商标均为各所有人之财产。

