

美军下一代光学原子钟发 展动态

(2026 年第 8 期, 总第 17 期)

2026 年 8 月 28 日

主办单位: 导航与时空技术国家级重点实验室

一、引言

现代战争中的时间同步常需精确到十亿分之一秒。高技术导弹、传感器、飞机、舰船与火炮均依赖全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 卫星所载原子钟提供纳秒级授时精度; 数十亿分之一秒的计时误差即可转化为一米或更大的定位偏差, 对武器精度与传感器相干性构成直接影响。

尽管各方已采取多种措施增强 GPS 信号的韧性, 这一以卫星授时为基础的时间同步体系仍存在干扰、欺骗与其他形式干扰等已充分记录的脆弱性, 常使作战人员失去决定任务成败的关键能力。与此相对, 过去二十年中, 光学域的精密

授时技术在实验室内快速进步，已在稳定性与精度上超越构成全球精密授时基础的微波授时技术；光学授时技术在提供数量级更高精度与准确度的同时，还凭借更长的保持时间与更难干扰欺骗的光学信号，带来对 GPS 依赖更低的韧性授时能力。

从作战概念层面看，授时的重要性同样上升。美国国防部于 1996 年启动“导航战”（Navigation Warfare, NAVWAR）工作，其背景是美国在保障己方部队使用 GPS/定位、导航与授时（positioning, navigation and timing, PNT）信息的同时，寻求在军事行动区域内拒止对手使用相关信息，并避免干扰区域外民用和平使用。NAVWAR 的对象是定位、导航与授时（PNT）信息整体，而非仅卫星授时。2018 年 4 月 10 日修订发布的美军联合出版物《JP 3-14: 太空作战》将 PNT 纳入联合太空作战能力体系；同期美国空军《AFDP 3-14: 反太空作战》明确使用 NAVWAR 概念，并将其界定为拒止对手 PNT、保障友军 PNT 使用和维护作战区域外和平使用的行动框架。

政策层面，2018 年美国《国家授时弹性与安全法案》（NTRSA）以 GPS 的授时组成部分为专门规制对象，要求建立陆基、可靠且具韧性的替代授时系统，作为 GPS 授时能力的补充与备份。这一立法并未将授时从定位、导航与授时（PNT）体系中概念性剥离，而是凸显了授时在关键基础设

施和国家安全中的独立脆弱性。其后，2020 年《通过负责任使用定位、导航与授时服务增强国家韧性的行政命令》（EO 13905）、2021 年《太空政策指令-7：美国天基 PNT 政策》以及 2023 年 4 月修订的《美国国防部第 4650.05 号指令：定位、导航与授时》（DoDD 4650.05），分别从负责任使用、替代 PNT、多源融合、信号与终端安全、以及国防部 PNT 治理等层面强化了 PNT 韧性，其中精确授时是重点组成部分。

技术层面，DARPA 自 2010 年起开展不依赖卫星导航的授时技术研发，在微 PNT 计划下先后开展芯片级原子钟（chip-scale atomic clock, CSAC）、集成化微型主原子钟（integrated micro primary atomic clock technology, IMPACT）与高稳原子钟（atomic clock ensemble in space, ACES）等项目，并设空间、时间和方向信息（STOIC）项目开发月频率漂移率低于 1 纳秒的新型光学钟。

光学原子钟由实验室走向规模化应用，仍受到体积、重量、功耗、成本、系统复杂度、环境鲁棒性及可制造性等工程条件制约。高性能光晶格钟和单离子光钟通常依赖真空系统、多激光器、超稳参考腔及复杂光机电控制，传统实验室系统可占据多张光学平台和电子机架；尽管紧凑型、可搬运及商用原型正不断出现，其市场仍处于低产量和高成本阶段。例如，岛津 2025 年推出的锶光晶格钟建议售价为 5 亿日元，约合 330 万美元。协调世界时（UTC）由国际计量局（Bureau

International des Poids et Mesures, BIPM) 汇集约 450 台、分布于约 85 个时间实验室的原子钟数据, 通过加权算法形成自由原子时 (Échelle Atomique Libre, EAL), 经原级和次级频率标准校准形成国际原子时 (Temps Atomique International, TAI), 并结合闰秒规则生成 UTC。高性能主动氢脉泽通常为大型机柜设备, 尺寸可接近家用冰箱, 且为维持最佳频率稳定度需要严格的温湿度与低振动 / 隔振环境控制。

在上述需求牵引与技术条件下, DARPA 相继部署 “稳健光钟网络” (Robust Optical Clock Network, ROCKN)、

“光学原子系统集成与校准” (Optical-Atomic System Integration & Calibration, OASIC) 与 “时机成熟” (It's About Time) 三个项目, 覆盖光学原子钟从样机研制、测试验证到规模制造的不同环节。

二、ROCKN 项目发展情况

(一) 立项背景与项目目标

2022 年 1 月 27 日, DARPA 国防科学办公室 (Defense Sciences Office, DSO) 发布题为 “稳健光钟网络” (ROCKN) 的广泛机构公告 (Broad Agency Announcement, BAA), 编号 HR001122S0023, 征集光学精密授时技术领域的创新研究提案, 以提升强健、低尺寸重量功耗 (size, weight, and power,

SWaP) 时钟的精度与保持时间; 公告明确, 主要结果为对现有实践作渐进式改进的研究不在征集之列。项目意在将实验室光学授时技术转化为可在实验室外运行的设备, 使国防部授时能力获得数量级提升。

项目设定两大目标: 便携时钟精度提升 100 倍; 以实用 SWaP 实现 1 纳秒的月级保持。此类时钟将支撑现有能力之外的分布式相干运行与无需 GPS 的月级精密授时服务。时任项目经理塔季扬娜·库尔西奇 (Tatjana Curcic) 表示, 若成功, 这些光学钟将比现有微波原子钟提供约 100 倍的精度提升或计时误差降低, 并将纳秒级授时精度的保持时间从数小时提高到一个月; 该计划可产生通向潜在未来网络化时钟架构的关键技术、组件与演示。到 2026 年 It's About Time 项目时, ROCKN 项目计划内原型光钟实现了精度超越 GPS 级授时许多个数量级的紧凑、长保持时间同步。

(二) 项目结构与两大技术域指标

ROCKN 项目由两个技术域 (Technical Area, TA) 构成, 执行期包括 24 个月第一阶段与 24 个月可选第二阶段; 提案须同时响应两个阶段, 单个提案仅可响应一个技术域, 否则视为不合规; 目标启动时间为 2022 年 9 月。结项时, 将在地点待定的场地开展 TA1 与 TA2 时钟在自由空间网络中的同步演示, 参加演示的时钟须满足公告规定的设备输出要求。

TA1 开发小型便携光学原子钟, 须在约 100 秒的短时间

内实现亚皮秒计时稳定度，并在 10 天内保持 GPS 级授时精度（3 纳秒）；SWaP 指标为 5 升、5 千克、25 瓦；工作温度 10 至 50 摄氏度；温度系数为 1×10^{-14} 每摄氏度；振动噪声（最高 1 千赫）为 $1 \times 10^{-2} g^2 / Hz$ ；加速度敏感度为 $1 \times 10^{-14} / g$ 。此类钟面向战术飞机、卫星等机载与天基平台，按公告设想，其将以接近铷原子频率标准（rubidium atomic frequency standard, RAFS）的封装提供氢脉泽级精度，并在保持时间上显著优于氢脉泽；第二阶段设备应提供 10 MHz、1 MHz 与 1 PPS 输出，以及兼容现有光学钟同步技术的光输出。2026 年时正在开发中的鞋盒尺寸紧凑 TA1 便携钟功耗仅与一个灯泡相当，可在无干预情况下保持 GPS 级（亚纳秒）授时精度最长两周。

TA2 开发可运输光学原子钟，须在 1 秒积分时间实现阿伦偏差（Allan deviation, ADEV） $1 \times 10^{-15} / \sqrt{\tau}$ ，并保持 1 纳秒或更优计时精度达 1 个月；SWaP 指标为 200 升、200 千克、400 瓦；工作温度 10 至 50 摄氏度；温度系数 1×10^{-15} 每摄氏度；振动噪声 $1 \times 10^{-3} g^2 / Hz$ ；加速度敏感度 $1 \times 10^{-13} / g$ 。此类钟面向舰船与陆上基地等较稳定平台，设想作为局域或区域网络的母钟，在一个月战役期内以自主方式近连续运行，无需人工干预。

结项演示要求两类时钟间的时间同步在 100 秒平均时间下实现时间偏差（time deviation, TDEV）小于 0.5 皮秒；计

划结束时将演示静止、移动与机载时钟之间的同步，精度足以支撑 100 GHz 分布式相干。表 1 按上述材料汇总两大技术域关键指标。

表 1 ROCKN 项目两大技术域关键指标对照

指标项	TA1 便携钟	TA2 可运输母钟
定位	机载与天基平台，如战术飞机、卫星	舰船与陆上基地等较稳定平台
短时稳定度	亚皮秒，约 100 秒	$ADEV\ 1 \times 10^{-15}/\sqrt{\tau}$, 1 秒
保持时间	10 天保持 GPS 级精度（3 纳秒），2022 立项指标；最长两周，2026 更新口径	1 个月保持 1 纳秒或更优，2022 立项指标；6 个月以上，2026 进展口径
SWaP	5 升/5 千克/25 瓦	200 升/200 千克/400 瓦
工作温度	10 至 50 摄氏度	10 至 50 摄氏度
温度系数	$1 \times 10^{-14}/^{\circ}\text{C}$	$1 \times 10^{-15}/^{\circ}\text{C}$
振动噪声（ $\leq 1\text{ kHz}$ ）	$1 \times 10^{-2}g^2/\text{Hz}$	$1 \times 10^{-3}g^2/\text{Hz}$
加速度敏感度	$1 \times 10^{-14}/g$	$1 \times 10^{-13}/g$

（三）关键技术挑战与采购安排

时任项目经理塔季扬娜·库尔西奇向 Breaking Defense 描述，实验室光学钟占据一个大房间，需要多名博士操作；把其小型化为能够自主连续运行的低功耗封装是巨大挑战，须在极端精度与可用性之间作出权衡。她表示，拟开发的钟将牺牲实验室演示的部分性能，但仍比现有钟好约 100 倍。她指出，频率梳是另一关键挑战：频率梳负责把光频段（300

GHz 至 3000 THz)的时钟信号转换到各类射频设备可使用的微波频段(约 1 GHz 至 100 GHz)，其尺寸与功耗须同步压缩；2022 年时点该项目尚未开发同步技术，DARPA 希望相关工作启发后续创新。

采购安排方面，提案者日活动于 2022 年 2 月 3 日举行，摘要截止 2022 年 2 月 10 日，完整提案截止 2022 年 4 月 4 日；SAM.gov 预征集公告经修正后，响应截止日延至 2022 年 4 月 25 日。公告同时载明，进入第二阶段的 TA1 执行方须取得美国秘密（SECRET）级许可，以及国防反情报与安全局签发的秘密级设施许可。截至 2026 年，ROCKN 项目现页面显示项目隶属 DARPA 国防科学办公室，项目经理为穆昆德·文加拉托雷（Mukund Vengalattore）。

（四）实施进展与演示

2026 年 3 月 2 日，DARPA 发布 ROCKN 项目进展更新，称项目正在开发两个等级的战术钟：其一为鞋盒尺寸紧凑便携钟，功耗与灯泡相当，可在无干预情况下保持 GPS 级（亚纳秒）授时精度最长两周；其二为洗衣机大小的本地母钟，目标是在无需干预、不与 GPS 同步的情况下向大区域网络提供 6 个月以上 GPS 级授时精度。按时间序列对照，TA2 的保持目标已由 2022 年立项文件的 1 个月表述为 6 个月以上。

在网络层面，ROCKN 项目正在演示空地光学时间同步协议，其精度可达 GPS 级授时之上许多个数量级，且光学时

间同步技术更难欺骗或干扰。近期演示中，ROCKN 项目在数百公里距离上实现飞秒级同步，并在从潮湿到热浪到暴风雪等多种天气条件下演示了多节点时钟网络的运行。在组件层面，美国加州理工学院喷气推进实验室（JPL/Caltech）与 OEwaves 公司于 2026 年发表的论文确认，OEwaves 获 DARPA ROCKN 项目资助完成真空密封封装回音壁模式（whispering-gallery-mode, WGM）谐振腔的设计、装配与验证；该封装谐振腔本征品质因数约 1×10^9 ，锁定激光在 10 毫秒积分时间实现 3×10^{-12} 量级的相对频率稳定度，论文称其指向便携激光稳频应用。

平台试验方面，ROCKN 项目系统已在固定翼飞机上飞行、在多种地面车辆上行驶，并在一艘巡航于太平洋热带海域的军舰船上连续部署三周。执行方 Vector Atomic 公司 2023 年 1 月发布的消息记载，其三台光学钟在 2022 年环太平洋演习（RIMPAC）替代 PNT 挑战赛中连续海上运行超过 20 天，性能较美国国家标准与技术研究院（NIST）测试几乎无退化。DARPA 项目经理乔纳森·霍夫曼（Jonathan Hoffman）评价，这是数十年来光学钟首次在真实世界中无人工干预自主运行。

后续计划方面，未来一年项目计划围绕下一代 PNT、电子战与情报监视侦察能力开展系列野战演习，并引入试验线制造以满足国防部转移伙伴的需求。DARPA 同时展望，从

GPS 级纳秒精度向皮秒及更优精度跃升可支撑一系列颠覆性能力，包括在 X 波段以上频率对多个紧凑、移动、远征传感器网络信息作相干合成，对抗环境下辐射源的快速地理定位与瞄准，多个紧凑发射机的功率合成与其他形式的电子战，以及韧性高速宽带通信网络。

ROCKN 项目在约五年间从立项指标推进到多平台外场演示与试验线制造规划阶段；DARPA 官方将这一进程概括为从实验室面包板上的概念验证钟，发展为经多个国家实验室与野外广泛测试的强健紧凑原型钟。

三、OASIC 项目发展情况

（一）立项背景与征集流程

2024 年 2 月，DARPA 小企业计划办公室（Small Business Programs Office, SBPO）发布特别通知 DARPA-SN-24-37，宣布于 2024 年 2 月 16 日以网络直播形式举行 OASIC 项目小企业技术转移（Small Business Technology Transfer, STTR）机会信息说明会；通知预期 2024 年 2 月发布 STTR 征集，并说明预期成功的提案将开发基于原子的量子测试平台，以加速评估原子基集成与芯片级量子传感、计算、通信技术所需的纳米光子、光电子与电子组件及子系统。

OASIC 项目主题编号为 HR0011ST2024D-01，属 DoD 24.D 年度 STTR 广泛机构公告发布之主题；主题页将其归属

于美国国防部研究与工程副部长办公室（Office of the Under Secretary of Defense for Research and Engineering，OUSD(R&E)）关键技术领域中的先进材料与量子科学。目标为创建基于原子的量子测试平台用户设施，加速纳米光子、光电子与电子组件及子系统的原型化、验证与基准测试，以支撑可扩展、低 SWaP 的原子基量子传感器、时钟与计算架构及芯片级量子技术的实现。

OASIC 项目 STTR 于 2024 年初启动，第一阶段为期六个月，三支小企业与大学组合团队入选以制定技术与商业计划。第一阶段资助额 20 万美元；第二阶段资助额 180 万美元、周期 24 个月，另有 180 万美元、12 个月的选项；第二阶段固定付款里程碑分别为第 2、6、9、12、16、20、24 个月，其中第 20 个月应完成测试平台的构建与基准测试，第 24 个月提交最终报告；第三阶段定位于传感、PNT 与原子基量子计算架构等双用途应用。

（二）测试平台的立论与功能设计

OASIC 项目征集文本的立论为：激光冷却或超冷原子分子系统长期为量子增强传感与守时提供最高精度、精密与长期稳定性的可能，中性原子量子计算平台近年亦取得显著进展；但原子基量子设备从实验室演示向强健、高技术就绪度（technology readiness level, TRL）系统的过渡缓慢，冷却、囚禁、问询与量子控制所需的大量使能技术尚未同时实现紧

凑低 SWaP 运行与替代大型实验室设施的严格性能要求。征集文本进一步指出，主要瓶颈之一在于缺乏与量子极限性能要求兼容的严格测试评估程序；常规光学或电子测试设备的基准测试数据，远不如以最先进的原子基量子系统为基准检验光子或电子控制与测量架构的信息丰富。

在功能定位上，DARPA 将 OASIC 项目类比 NIST 与美国保险商实验室（Underwriters Laboratory，UL）的测试认证体系，目标是使 OASIC 项目认证成为光学原子组件性能公认的认可印章，帮助国防部识别可集成进国防系统的量子组件，降低各方评估成本与不确定性。项目经理穆昆德·文加拉托雷（Mukund Vengalattore）以激光器为例说明：若企业能证明某紧凑激光器经最先进原子钟基准测试且性能更优，量子实验室会乐于采用。

在设施形态上，OASIC 项目强调类似乐高积木的高度模块化，将重新配置测试装置的时间从数月压缩，便于快速换件测试；在生态功能上，测试平台承担量子生态系统“饮水机”的角色，使器件企业与量子系统用户在同一场所对接，例如把高速光调制器等需求传递给使能技术企业。DARPA 选择 STTR 机制的原因在于其要求大学与小微企业合作，配套具备商业化能力的企业主体，以支撑测试平台自维持运营的商业模式。

（三）执行团队与阶段安排

三支入选团队及其分工为：量子比特测试平台由 QuEra、哈佛大学、麻省理工学院与蒙大拿州立大学承担，位于波士顿；量子传感器测试平台由 Rydberg Technologies、密歇根大学与普渡大学承担，位于安娜堡；原子钟测试平台由 Vector Atomic 公司与科罗拉多大学承担，站点位于博尔德与普莱森顿。2025 年 4 月，DARPA 启动为期两年的第二阶段，三支团队将在该阶段构建测试平台并开展演示。

关于后续安排，DARPA 预期设立第三阶段，聚焦提供面向广泛测试平台访问的合同机制，使量子传感、量子计算与原子钟组件技术的 DARPA 执行方及其他军地实验室能够请求并获得测试平台支持，其愿景相当于量子领域的大学附属研究中心（university-affiliated research center, UARC）。DARPA 在 It's About Time 项目新闻中表述，OASIC 项目测试平台在理解需求、组件级规格、测量协议、封装与标准化程序方面被证明极具价值，为更大规模制造以及下一代授时技术与既有时钟的集成和向后兼容提供了支撑。

（四）测试平台实例:MIT 的 OASIC-AQUA 与 Optiverse 工具

麻省理工学院网站介绍 AQUA 实验室为 DARPA OASIC 项目测试平台，旨在桥接集成光子学与中性原子量子系统，

初始能力目标为 2026 年秋季。其规划的平台能力包括：1000 个被俘获的铷原子（含原子运动控制与读出）；原子阵列诊断与光子器件参数之间的闭环反馈以实现原位优化；支持 D1 跃迁、囚禁与里德堡（Rydberg）激发波段多个波长的同时表征；以及经专用 CMOS 专用集成电路实现的低延迟控制、信号处理与反馈。平台同时寻求建立严格的定量性能指标，用于标准化组件认证。

AQUA 规划三个集成模块：模块 A 对应 795 纳米 D1 跃迁，模块 B 对应 800 至 860 纳米光囚禁，模块 C 对应大于 1 微米的里德堡激发通道；每个模块提供自由空间光学端口、温控样品载体及不少于 32 路射频与 32 路直流信号线；激发光路经全息生成的任意强度图案将光耦合进被测器件，器件出射光束由空间光调制器整形后成像至原子阵列。

设想的协作流程分三步：合作方经 Optiverse 提交器件规格作虚拟兼容性评估；将器件寄送至 MIT 站点与原子阵列基准比对；运行认证测试并获得标准化数据。知识产权方面，所有协作由 MIT 技术许可办公室支持，以适当协议保护企业专有技术。Optiverse 是随平台开发的交互式光线追迹工具，目前为 alpha 版本，支持 Zemax 导入、偏振计算与局域网实时协作，其文档载明协作功能无认证、无加密，不建议用于非可信网络与生产环境。

（五）OASIC 项目资助与相关组件技术

组件成果方面，QuEra 计算、桑迪亚国家实验室、MIT 与亚利桑那大学等机构 2025 年 8 月的预印本致谢确认获 DARPA OASIC 项目资助（合同号 HR0011-24-P-0314）；该工作在 200 毫米晶圆工艺上制造 8 通道光子集成电路（photonic integrated circuit, PIC），面向铷 87 中性原子量子计算机，在 795 纳米单量子比特门波长实现平均消光比 71.4 ± 1.1 分贝、最近邻片上串扰负 68.0 ± 1.0 分贝、自由空间并行投送后负 50.8 ± 0.2 分贝，器件上升时间（10% 至 90%） 26 ± 7 纳秒，脉冲稳定度误差在 1×10^{-3} 量级，并在 420 纳米与 1013 纳米两量子比特里德堡门波长实现 42.4 分贝与 61.5 分贝消光比。

周边使能技术方面，NIST 页面显示其目标是制造可量产的光学晶格钟，尺寸约为 JILA（美国国家标准与技术研究院与科罗拉多大学博尔德分校的联合研究所）创纪录实验室版本的千分之一，采用集成光子学与超表面光学，NIST 与 Octave Photonics 合作开发小型频率梳，整钟由 Vector Atomic 公司组装，最终封装除激光器外仅几英寸见方。NIST、科罗拉多大学、Octave Photonics 与 Vector Atomic 公司于 2025 年发表的论文演示用集成光子学系统将铯 88 冷却至微开尔文温度，红磁光阱温度低至 2 微开尔文、总转移效率最高 16%，其致谢载明资助来自 DARPA 原子光子（A-PhI）项目（合同

号 FA9453-19-C-0029)；NIST 与 Vector Atomic 公司等的面光子学论文演示了 12 束双色磁光阱光束及晶格与时钟共线光束，资助亦为 DARPA A-Phi 计划。

综合来看，OASIC 项目的功能设计沿认证、模块化、生态聚合与自维持运营四条线索展开，DARPA 官方将其价值表述为对后续制造环节的支撑。

四、It's About Time 项目发展情况

(一) 立项逻辑与制造瓶颈

2026 年 8 月 6 日，DARPA 发布“时机成熟”（It's About Time）项目。项目目标是建立战术级光学钟的试制制造管线，证明量子及量子使能技术具备规模生产能力；项目同时将这些光学钟集成进国防部多个平台，演示皮秒级授时精度引入作战范式所带来的超越 GPS 的能力。项目页载明，该努力是 DARPA 加速量子及量子集成技术规模化与采纳综合战略的组成部分，并建立于 ROCKN 项目计划原型光钟的成功之上；成功转移高精度、低尺寸重量功耗与成本（SWaP-C）授时技术，要求把产量提升至远超量子技术迄今已展示的水平。

官方对制造瓶颈的表述集中于量子邻近组件。项目经理穆昆德·文加拉托雷（Mukund Vengalattore）表示，量子界长期在实验室内推动最前沿进展，但这些创新很少进入战场；尚未有人成功尝试扩大量子制造，因为先进激光器与集成光

子学等量子邻近组件的集成、小型化与加固，即使在单个原型内都异常困难；解决这一制造、加固与集成瓶颈属于 DARPA 量级的问题，将打开多个与国防部相关领域的机会空间。他进一步说明，当前多数量子传感器由高专技人员以定制小批量方式装配，缺乏标准化的测试、校准与装配协议。

官方同时回顾了前序项目的作用。ROCKN 项目约五年间从实验室面包板上的概念验证钟，进展为经多个国家实验室与野外广泛测试的强健紧凑原型钟；OASIC 项目测试平台则为更大规模制造定义了需求、组件级规格、测量协议、封装与标准化程序。DARPA 的注意力正从量子技术的实验室演示转向规模制造，并将光学钟视为初始试验场，因其结合了成熟的量子科学与苛刻的工程要求。

在推广方向上，DARPA 希望基于 ROCKN 项目、OASIC 项目与 It's About Time 项目，把弹性量子制造与快速量子技术转移范式推广至量子射频传感器、红外成像系统等领域。

（二）合同与执行安排

2026 年 8 月 6 日，IonQ 公司发布新闻稿宣布该公司经 DARPA It's About Time 项目计划获得 2800 万美元合同延长；该 2800 万美元系对既有 DARPA 协议的修改，覆盖制造开发与 25 台 Evergreen-05 光学原子钟，另有 3000 万美元尚未执行的选项覆盖另外 100 台时钟，两者合计最高 5800 万美元、最多 125 台。DARPA 官方新闻确认已向 IonQ 公司授予合同，

以利用 Vector Atomic 公司的专业能力建立光学钟制造管线。生产投入方面，IonQ 公司宣布将投资 1500 万美元用于专用生产空间、先进制造与测试设备及支持人员。DARPA 官方新闻载明，制造设施预计 2027 年年中开放，设施完成后约一年内可交付生产单元。

（三）核心产品：Evergreen-05 及其前代

Evergreen-05 最初在 DARPA ROCKN 项目计划下开发，为 5 升、鞋盒尺寸的全集成光学原子钟：在 1 秒处提供 50 飞秒计时稳定度，10 天纳秒级保持；公司推算其计时误差在 3000 万年内小于 1 秒，该数值为公司推算并属前瞻性表述。与主动氢脉泽相比，Evergreen-05 提供更优的相位噪声与短时稳定度，长期漂移相当，体积仅为主动氢脉泽的 75 分之一；其战术封装与更宽环境运行范围使既有钟技术可扩展到陆、海、空平台。DARPA 与公司材料均将其应用方向指向雷达、保密通信与精确地理定位等关键任务应用。

前代产品 Evergreen-30 于 2023 年 11 月 13 日发布，Vector Atomic 公司称其为全球首款全集成商用光学钟：1 秒处 25 飞秒稳定度，多日亚纳秒保持；29 升机架式、3U 规格，单人可搬运；输出 10 MHz、100 MHz 与 1 PPS 信号，可选 1064 纳米波长基准与 1560 纳米频率梳输出；该钟曾在白宫 American Possibilities 演示日展出，底层技术受美国海军、陆军、DARPA 与 OUSD 支持。Vector Atomic 公司时任 CEO 贾

米尔·阿布-沙伊尔（Jamil Abo-Shaeer）称该钟可能 3200 万年差 1 秒。

商业格局方面，截至 2024 年 10 月，除 Vector Atomic 公司外，Infleqtion 公司的 Tiqker 光钟已售出 7 台，QuantX Labs 公司的 Tempo 光钟已售出前两台，Vescent 公司亦在销售未整机集成的光学钟；三家整机厂商的时钟均约 30 升并计划压缩至 5 升，且均有将钟送入太空的计划。Vector Atomic 公司选择碘分子为钟心，经工业激光倍频至 532 纳米，其设计以激光器为中心展开，原子体系的选择随激光器方案而定，目标竞争对手是市售时钟。

（四）执行主体沿革与范式推广方向

Vector Atomic 公司于 2018 年成立，目标为开发并商业化近期可用的量子设备，包括原子钟与惯性传感器。DARPA 对 Evergreen-05 核心技术的支持始于 2019 年，当时 Vector Atomic 公司为成立一年的初创企业；Vector Atomic 公司共同创始人、IonQ 公司授时部门负责人马蒂·博伊德（Marty Boyd）表示，DARPA 的初始支持对验证其钟的核心概念至关重要。

验证记录方面，2022 年 RIMPAC 演习期间，Vector Atomic 公司三台光学钟在海上连续运行超过 20 天，并在同一演习中部署了用于导航辅助的量子重力仪；2023 年 1 月其在 PTI 会议上发布的数据显示，两台 35 升机架式光钟交付 NIST 与协调世界时比对，计时误差小于 10 皮秒，持续时间比用于

GPS 主钟与数据中心的现役机架原子钟长 2000 倍，一对 40 升同步收发模块经 NIST 30 公里自由空间链路评估，在整个评估期内保持小于 10 飞秒的互同步误差；硬件开发与测试受美国海军、陆军与 DARPA 支持。

2025 年 10 月 7 日，IonQ 公司宣布完成对 Vector Atomic 公司的全股票收购，为 IonQ 公司带来超过 75 名员工、29 项已授权与在审专利、超过 2 亿美元的美国政府合同，以及用于 X-37B 轨道试验飞行器等项目的技术；IonQ 公司称 Vector Atomic 公司的传感技术可提供皮秒级授时并宣称能使 GPS 精度提升 1000 倍。此前 12 个月内 IonQ 公司还收购了 Oxford Ionics、Capella Space、Lightsynq、Qubitekk 并取得 ID Quantique 多数股权。

生态旁证方面，美国国防创新单元（Defense Innovation Unit, DIU）2025 年 3 月披露，其过渡量子传感（Transition of Quantum Sensing, TQS）计划的执行方名单包含 Vector Atomic 公司，首阶段约 12 个月将开展 10 次以上实地测试；DIU 2023 年 9 月另披露，Vector Atomic 公司与霍尼韦尔航空航天合作交付了首台完成空间鉴定的原子陀螺，预期成为首个在太空运行的原子惯性传感器。It's About Time 项目的产业承接主体呈现自 Vector Atomic 公司至 IonQ 公司的单线演进。

五、总结

综合梳理可以发现，DARPA 三个项目构成样机研制、

测试验证、规模制造的递进安排：ROCKN 项目承担实验室光学钟技术向低 SWaP 战术装备的转化，OASIC 项目建立以原子系统为基准的组件测试验证能力，It's About Time 项目承接 ROCKN 项目样机成果并建立规模制造管线。这一递进关系即 It's About Time 项目建立于 ROCKN 项目原型光钟的成功之上，OASIC 项目测试平台为更大规模制造定义了组件规格、测量协议、封装与标准化程序。

从实施状态看，ROCKN 项目已从 2022 年立项指标推进到多平台外场演示与试验线制造规划阶段，数百公里飞秒级光学时间同步与多节点网络天气条件运行均已演示；OASIC 项目三支测试平台团队于 2025 年 4 月进入两年建设阶段，其功能设计沿认证、模块化、生态聚合与自维持运营四条线索展开；It's About Time 项目已向 IonQ 公司授予合同，制造设施预计 2027 年年中开放、完成后约一年内交付生产单元。产业承接主体呈现单线演进：Vector Atomic 公司于 2018 年成立、2019 年获 DARPA 初始资助，经海试与商用产品阶段后于 2025 年 10 月并入 IonQ 公司，随后于 2026 年 8 月获得 It's About Time 项目合同。

在时间同步技术线上，飞秒级及以下精度同步呈现多路线演示：ROCKN 项目自身实现数百公里飞秒级同步；Vector Atomic 公司的双音方案在约 100 米自由空间链路实现亚飞秒级同步，接收功率低至 1 皮瓦仍保持飞秒级性能，并经链路

比对两台碘光学钟 4 天；NIST 主导的量子极限方案在 300 公里链路实现 320 阿秒级同步，可容忍链路损耗超过未来地面至地球同步轨道链路的预算。综合来看，光学原子钟正沿实验室仪器向可部署装备与可制造产品两个方向同时推进，其军事应用指向以 GPS 拒止环境下的韧性授时为核心，并延伸至通信、分布式传感与电子战方向。

参考文献

- [1] 高鹏,苏珂,徐龙威,等.美国授时战概念、技术进展与启示[J].现代防御技术, 2026(第3期): 28-37.
- [2] ZHAO M, SINGH M, SINGH A,等. An integrated photonics platform for high-speed, ultrahigh-extinction, many-channel quantum control[EB/OL]. arXiv, 2025. <http://arxiv.org/abs/2508.09920>.
- [3] GUO J, MCLEMORE C A, XIANG C,等. Chip-based laser with 1-hertz integrated linewidth[J]. Science Advances, 2022, 8(43): eabp9006.
- [4] ELEZHAR A E. DARPA backs shoebox-sized atomic clock for next-gen military systems[EB/OL]. (2026-08-07). <https://nextgendefense.com/darpa-atomic-clock-military/>.
- [5] YOUNG C. DARPA is building a portable atomic clock with trillionth of a second accuracy[EB/OL]. (2022-01-31). <https://interestingengineering.com/innovation/darpa-is-building-a-portable-atomic-clock-with-trillionth-of-a-second-accuracy>.
- [6] DARPA selects IonQ to produce next-generation atomic clocks[EB/OL]. (2026-08-06). <https://www.businesswire.com/news/home/20260805200809/en/DARPA-Selects-IonQ-to-Produce-Next-Generation-Atomic-Clocks>.

[7] DARPA selects IonQ to produce next-generation atomic clocks – company announcement - FT.com[EB/OL]. (2026-08-06). [//markets.ft.com/data/announce/detail?dockey=600-202608060005BIZWIRE_USPRX____20260805_BW200809-1](https://markets.ft.com/data/announce/detail?dockey=600-202608060005BIZWIRE_USPRX____20260805_BW200809-1).

[8] HITCHENS T, GILL J, GILL T H and J. DARPA's "ROCKN" laser-based clocks will know what time it really is, to the sub-picosecond[EB/OL]. (2022-01-28). <https://breakingdefense.com/2022/01/darpas-ROCKN-laser-based-clocks-will-know-what-time-it-really-is-to-the-sub-picosecond/>.

[9] DARPA's ROCKN program targets GNSS-free precision timing in contested environments[EB/OL]. (2026-03-04). <https://insidegnss.com/darpas-ROCKN-program-targets-gnss-free-precision-timing-in-contested-environments/>.

[10] DIU's TQS field testing to begin across five critical areas[EB/OL]. (2025-03-12). <https://www.diu.mil/latest/dius-transition-of-quantum-sensing-tqs-field-testing-to-begin-across-five>.

[11] DoD 24.D Small Business Technology Transfer (STTR) Annual Broad Agency Announcement (BAA) Proposal Submission Instructions Release 1[R]. Defense Advanced Research Projects Agency, 2024.

[12] ZHANG W, LAI Y H, SAVCHENKOV A,等. Environmentally stabilized crystalline WGM resonator[J]. Optics Letters, 2026, 51(3): 800.

[13] For quantum computing, different qubits are better together | DARPA[EB/OL]. (2026-04-14). <https://www.darpa.mil/news/2026/quantum-computing-different-qubits-better-together>.

[14] ROPP C, ZHU W, YULAEV A,等. Integrating planar photonics for multi-beam generation and atomic clock packaging on chip[J]. Light: Science & Applications, 2023, 12: 83.

[15] IonQ | UPDATED: DARPA selects IonQ to produce next-generation atomic clocks[EB/OL]. (2026-08-06). <https://www.IonQ.com/news/updated-darpa-selects-IonQ-to-produce-next-generation-atomic-clocks>.

[16] IonQ and CMC microsystems announce collaboration to expand cloud quantum computing access in Canada [EB/OL]. (2026-08-18). <https://www.businesswire.com/news/home/20260818599586/en/IonQ-and-CMC-Microsystems-Announce-Collaboration-to-Expand-Cloud-Quantum-Computing-Access-in-Canada>.

[17] IonQ completes acquisition of Vector Atomic, the

global leader in advanced quantum sensing[EB/OL]. (2025-10-07). <https://www.businesswire.com/news/home/20251007706897/en/IonQ-Completes-Acquisition-of-Vector-Atomic-the-Global-Leader-in-Advanced-Quantum-Sensing>.

[18] It's About Time | DARPA[EB/OL]. <https://www.darpa.mil/research/programs/its-about-time>.

[19] It's About Time for quantum manufacturing | DARPA[EB/OL]. (2026-08-06). <https://www.darpa.mil/news/2026/its-about-time>.

[20] FERDINAND A R, LUO Z, JAMMI S,等. Laser-cooling 88 Sr to microkelvin temperature with an integrated-photonics system[J]. Physical Review Applied, 2025, 23(3): L031002.

[21] KABIR KOHLI. Nano-Engineered Atomic Clocks for Ultra-Precise Military Positioning[J]. International Journal of Science, Engineering and Technology, 2025, 13(5).

[22] OASIC-AQUA · advanced photonics testbed at MIT[EB/OL]. <https://OASIC.mit.edu/mit.php#research>.

[23] Optical clock with integrated photonics[J/OL]. Nist, 2025. <https://www.nist.gov/noac/technology/time-and-frequency/optical-clock-integrated-photonics>.

[24] ROSLUND J D, KOWLIGY A S, FUJITA J,等.

Optical two-tone time transfer[J]. Physical Review Applied, 2025, 24(1): 014001.

[25] Optical-Atomic System Integration & Calibration (OASIC) Information Session[R]. Defense Advanced Research Projects Agency, 2024.

[26] Optical-Atomic System Integration & Calibration (OASIC)-SAM.gov[EB/OL]. (2024-02-17). <https://sam.gov/opp/b863b70f5373460ebc6acc6c5f8a9e4e/view>.

[27] Optical-Atomic System Integration & Calibration (OASIC)-Topic _ SBIR[EB/OL]. (2024). <https://www.sbir.gov/topics/10790>.

[28] Optiverse Documentation: User Guides / Collaboration Guide[EB].

[29] FAROOQUE F, PROVINI C. Pentagon may see one of quantum computing's first practical winners[EB/OL]. (2026-08-10). <https://www.thestreet.com/investing/pentagon-IonQ-atomic-clock-quantum-computing-first-practical-winner>.

[30] Providing GPS-quality timing accuracy without GPS[EB/OL]. (2022-01-20). <https://www.darpa.mil/news/2022/accuracy-without-gps>.

[31] QPG-MIT/optiverse[CP/OL]. MIT QPAI, 2026. <https://github.com/QPG-MIT/optiverse>.

[32] Quantum sensing enters the DoD landscape in first-of-a-kind demonstration[EB/OL]. (2023-09-27). <https://www.diu.mil/latest/quantum-sensing-enters-the-dod-landscape-in-first-of-a-kind-high-performance>.

[33] Robust Optical Clock Network (ROCKN)-SAM.gov[EB/OL]. <https://sam.gov/opp/d0c2dda1192944faa790f5cccf427e26/view>.

[34] ROCKN | DARPA[EB/OL]. <https://www.darpa.mil/research/programs/robust-optical-clock-network>.

[35] ROCKN enables GPS-free operations | DARPA[EB/OL]. (2026-03-02). <https://www.darpa.mil/news/2026/ROCKN-enables-gps-free-operations>.

[36] FLINT R. ROCKN leads new DARPA program tackling quantum tech manufacturing hurdles[EB/OL]. (2026-08-06). <https://quantumzeitgeist.com/darpa-quantum-tech-ROCKN-leads/>.

[37] SBIR Transition[R]. SBPO, 2026.

[38] KHOLLAM A. Shoebox-sized atomic clocks enter mass production under \$28M deal[EB/OL]. (2026-08-06). <https://interestingengineering.com/military/compact-atomic-clocks-darpa-IonQ>.

[39] Small business accelerates transition of quantum t

ech from lab to market | DARPA[EB/OL]. (2025-06-13). <https://www.darpa.mil/news/2025/small-business-accelerates-transition-quantum-tech-lab-market>.

[40] Startups Squeeze Room-Size Optical Atomic Clocks Into a Briefcase - IEEE spectrum[EB/OL]. (2024-10-15). <https://spectrum.ieee.org/x-square-robot-embodied-ai-stack>.

[41] Vector Atomic brings picosecond timing from lab to the real world[EB/OL]. (2023-01-23). <https://www.businesswire.com/news/home/20230123005152/en/Vector-Atomic-Brings-Picosecond-Timing-From-Lab-to-the-Real-World>.

[42] Vector Atomic brings world's first rackmount optical clock to market[EB/OL]. (2023-11-13). <https://www.businesswire.com/news/home/20231113157771/en/Vector-Atomic-brings-worlds-first-rackmount-optical-clock-to-market>.

[43] SWAYNE M. Why DARPA is turning its attention to quantum manufacturing[EB/OL]. (2026-08-06). <https://thequantuminsider.com/2026/08/06/why-darpa-is-turning-its-attention-to-quantum-manufacturing/>.