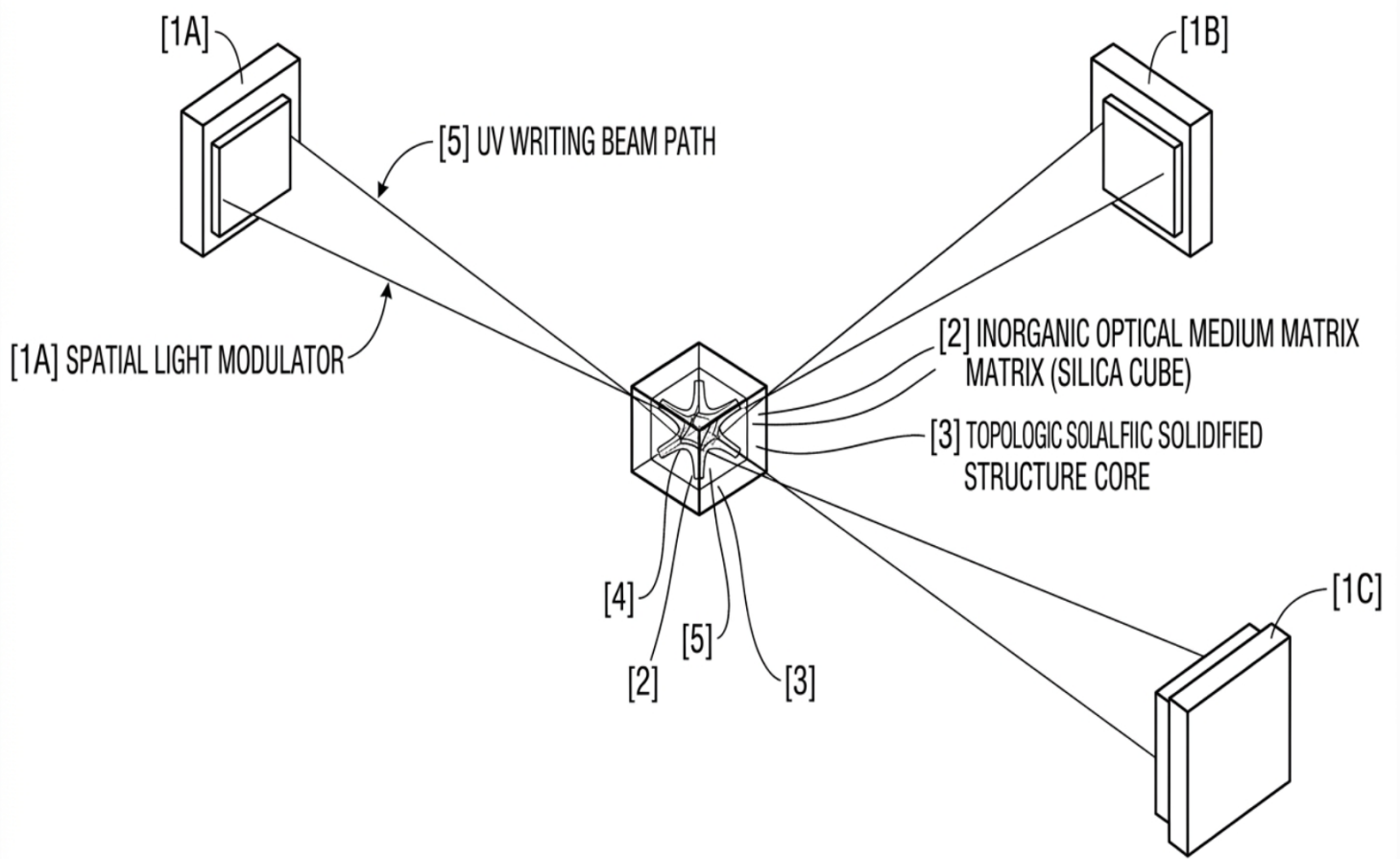


B³D-HPA 带物理哈希寻址和连续场演化的光子芯片架构探讨 V3.45

——机理、工程实现与连续场光计算

将人类代码逻辑精准编码到石英介质中，是连续场石英光子计算第一道也是最关键的门槛。一旦人类跨过这道门槛，后续道路将一马平川。



摘要

传统硅基芯片与存算一体架构高度依赖器件微缩与结构均匀性。随着先进工艺逼近物理极限，这类体系

正面临功耗墙、存储墙、良率与成本等严峻瓶颈。三维光计算具有天然并行性、低传输损耗与波场干涉能力，被视为后摩尔时代的重要发展方向。然而其实用化长期受限于介质无序性难以控制、光路稳定性不足、可编程性较弱以及对热漂移敏感等问题。

本文提出 B³D-HPA V3.45 物理哈希寻址架构，采用稀土掺杂熔融石英作为主力量产介质，可选用蓝宝石（刚玉， Al_2O_3 ）作为高性能备选介质。计算以连续光场演化为基础，通过物理哈希映射（PHM）

与物理哈希地址表（PHAT），将介质本征无序性转化为核心计算基元。架构不追求极致材料均匀性，而是利用固有散射与折射率分布，将制造约束转化为算法自适应能力。

本文核心实现了相位编码启发式搜索，将 A* 算法直接映射至光波传播过程。路径代价与启发式引导被编码为相位累积，最优路径通过相长干涉自然涌现，将迭代式数字搜索转变为单次物理过程，显著降低计算复杂度并使能耗趋近于零。

为支持实际部署，V3.45 构建多层级热漂移抑制方案：

- 材料级稳定性：低膨胀熔融石英或高导热蓝宝石
- 架构级共模抑制：单片介质内全局相位同步漂移
- 算法级鲁棒性：基于相对相位不变性支持 A* 与 PHAT
- 系统级全局补偿：通过导航光束实现闭环遥测校正

为最大限度避免热漂移，本架构明确放弃飞秒激光等热光刻蚀方式，仅采用多路并行 SLM 激光阵列与

双波长紫外泵浦实现冷态可擦写重构。

整套方案可将热漂移控制为可处理微扰，无需真空封装、惰性气体填充或主动温控，同时支持可复用、可重构的光子计算硬件。

B³D-HPA V3.45 实现了逻辑正确性与物理均匀性的解耦，使无序介质成为可靠计算载体。在热漂移得到有效抑制后，剩余工程问题均非根本性障碍，可为连续场光计算提供一条相对务实、可扩展、具备量产潜力的技术路线。

1 引言

传统数字计算与存算一体系统依赖精密制造与高度一致的器件结构。随着半导体微缩放缓，性能提升受限于发热、互联延迟与先进工艺良率。三维光计算利用相干波干涉实现天然并行与超低功耗运行，对连续场类智能任务具备天然适配性。

但其规模化应用一直存在核心矛盾：光学性能对微观不均匀性与环境变化极为敏感，尤其热漂移会显著破坏一致性，制约工程化与量产。

为此，B³D-HPA V3.45 放弃对硬件绝对均匀与严格环境隔离的追求，通过光学指纹采样与物理哈希映射，将硬件差异性转为可寻址计算资源，并以层级热漂移抑制保证逻辑稳定性。通过对介质内部天然光路进行校准与激活，系统可在真实环境下保持稳定逻辑行为，实现了从“依赖完美硬件”向“依赖自适应物理层”的范式转变。

2 连续场计算与三维光学介质基础

架构算力来源于掺杂介质内部三维

连续光场的相干传播与干涉。入射光的振幅、相位、波长与偏振形成全局电磁场分布，多波叠加、模式耦合与相位调制共同完成并行类张量运算。

与基于离散逻辑门的电子架构不同，连续场计算以全空间并行方式处理信息，无明显时序开销与内部数据搬移，具有天然高带宽与高能效特征。

基本波传播关系：

$$v = c / n$$

光程长度：

$$OPL = n \cdot L$$

路径相位累积：

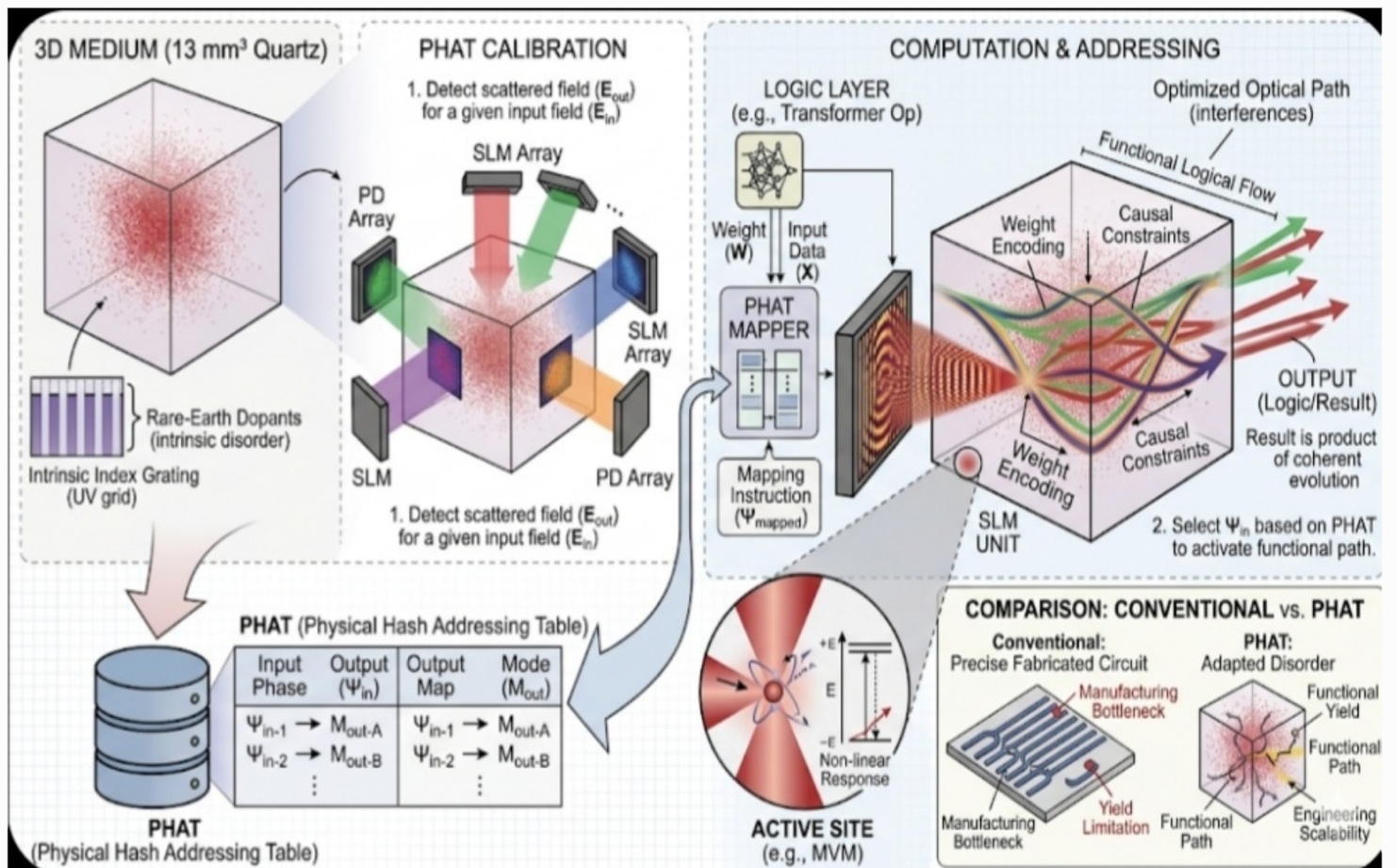
$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot OPL / \lambda$$

2.1 物理哈希映射 (PHM)

物理哈希映射在介质随机光响应与确定性逻辑地址之间建立稳定可复现的对应关系，将硬件差异性从缺陷转变为可索引资源。

传统系统需硬件高度一致与环境严格可控，而 B³D-HPA 允许物理上

存在差异的介质通过专属 PHAT 映射实现一致计算语义，在一定温度变化范围内仍可稳定工作，实现了物理层面的模型可迁移性。



2.2 PHM 三层翻译机制

2.2.1 物理层：本征响应采样

多路 SLM 投射正交参考场扫描介质体积，探测器记录干涉与散射输出，学习得到介质独有的光场响应函数，作为单元光学指纹。

2.2.2 地址层：响应空间哈希化

将连续光场离散为稳定地址锚点，映射为逻辑地址，形成物理哈希地址表 PHAT，将介质无序性转化为结构化地址空间，为路径搜索提供原生哈希索引能力。

2.2.3 逻辑层：地址-逻辑动态绑定

推理阶段，PHM 将逻辑操作映射至最优物理路径集合，由 SLM 生成适配波前，驱动介质内部低损耗、高稳定性天然通路。

2.3 介质形态：方糖 (SugarCube) 概念

“方糖”仅为初期实验载体形式（约 13 mm^3 ），不代表最终形态限制。架构支持球体、半球、不规则体、类脑树形等任意三维结构，充分发挥连续体介质的波传播优势。

2.4 基底选型：熔融石英与蓝宝石

量产主线采用熔融石英，制造成熟、成本较低、热膨胀系数小、折射率温漂低，可满足车载、工业、消费等场景稳定性需求。

极端环境下可选用蓝宝石

(Al_2O_3)，热膨胀稳定性与石英接近，导热系数显著更高，可有效抑制内部温度梯度与非均匀热形变。

典型热膨胀系数：

- 石英: $\alpha_{\text{silica}} \approx 0.55 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

- 蓝宝石: $\alpha_{\text{sapphire}} \approx 0.4 \sim 0.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

两类基底均可轻掺稀土离子，形成分布式相干散射中心，作为相位锚点提升干涉稳定性与物理寻址鲁棒性。

3 光子介质中的相位编码启发式搜索

3.1 A* 算法的物理映射

A* 算法通过相位编码波前在介质

中直接实现。经典代价函数

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

被映射为相位累积：

- 路径代价 $g(n)$ 对应传播相位延迟： $\varphi_g = kL$

- 启发式项 $h(n)$ 由 SLM 或预置折射率分布形成相位势场

总代价以总相位表达： $\varphi_{total} = \varphi_g + \varphi_h$

最优路径表现为输出端相长干涉极大。

3.2 相对相位不变性

架构所有逻辑判断均基于相对相位差，而非绝对相位。

全局热漂移会同步偏移所有绝对相位，但相对差异基本保持不变，因此 A* 路径优先级与 PHAT 地址映射均可维持稳定，构成抵御热漂移的核心机制。

相对相位判决：

$$\Delta\varphi_{\text{rel}} = \varphi_2 - \varphi_1$$

3.3 干涉式路径选择

路径优劣通过光波自然叠加体现：

低总相位路径相长干涉，高相位路径相消干涉。输出光强分布直接反映最优解，无需数字比较。

3.4 相位锚点与稳相机制

稀土掺杂形成分布式相位锚点，构成体域参考网络。通过监测导航光束回波，实时调整 SLM 波前，实现闭环稳相，无需大量数字后处理。

4 PHAT 物理哈希寻址核心机制

4.1 三维折射率网格制备

为最大限度避免热漂移，本架构明确放弃飞秒激光等热光刻蚀技术，仅采用多路并行 SLM 激光阵列与双波长紫外泵浦进行冷态预处理，在介质内形成弱调制散射位点网络，不植入固定逻辑，保留高度灵活性。

紫外调制折射率偏移：

$$\Delta n \sim 1e-4 \sim 1e-3$$

4.2 PHAT 校准与光学指纹

每个介质块因材料与加工差异具有

唯一内部分布。PHAT 校准通过 SLM 扫描与探测，提取最优入射角度、高对比度输出位置与稳定干涉模式，记录行为规则而非几何坐标。

4.3 运行时动态路径激活

推理时 PHAT 向 SLM 输出最优波前配置，光在预置折射率网格中自然演化，SLM 动态调整相位以引导光场沿可靠通路传播。

物理 A^* 与 PHAT 协同实现全并行、低时延路径搜索，消除数字迭代开销。

4.4 冷擦写可重构性

通过紫外激励实现非易失、可擦除、可重写的折射率调制，同一介质可复用于不同任务，实现真正三维的类 FPGA 光子重构能力。

5 多层级热漂移抑制

5.1 材料级稳定性

石英与蓝宝石本身具有远优于硅的低热膨胀、低热光系数，尤其蓝宝石高导热可快速均化温度分布，显

著降低非均匀形变与相位扰动。

光程热漂移：

$$\Delta OPL \approx n \cdot L \cdot \alpha \cdot \Delta T + L \cdot dn/dT \cdot \Delta T$$

5.2 架构级共模抑制

全部光路在同一块介质内传播，温度引起的折射率与尺寸变化接近全局一致，形成共模相位偏移，可被相对相位检测天然抑制。

5.3 算法级相对相位鲁棒性

A* 与 PHAT 均只依赖相对相位，

全局漂移不改变逻辑关系与计算结果，从算法底层实现抗扰。

5.4 系统级导航光束补偿

使用 1~3 束专用导航光束监测全局相位漂移，对 SLM 施加统一相位偏移即可完成整体补偿。介质热惯量大，校正频率低、功耗可忽略。

6 工程运行特性

- 非易失物理存储：紫外调制实现长期固化，无需刷新

- 缺陷自适应：自动剔除不稳定路径，提升可靠性
- 路径轮换均衡：延长介质工作寿命
- 物理唯一性：介质光学指纹不可复制，天然防克隆

7 范式特点：结构即模型，传播即计算

传统芯片依靠指令、调度、数据移动完成计算；

B³D-HPA 将模型嵌入介质光场结构，入射光传播干涉直接输出结果，无时钟、无指令流、无数据搬

运，从物理层面突破冯·诺依曼瓶颈。

8 关键工程问题与应对

- PHAT 规模：稀疏编码与压缩可压至 MB 级
- SLM 带宽：一次性校准+低频补偿，需求极低
- 热漂移：多层抑制可满足常规工业环境
- 计算精度：多路径投票、置信度滤波可实现工程可用精度

9 量产潜力

传统光电子器件依赖极高均匀性与精密对准，良率低、成本高。

B³D-HPA 将“良率”重新定义为可探测、可寻址，只要存在稳定光路即可使用，理论功能良率接近100%。

核心元器件均为商用成熟方案，无需极紫外光刻，适合规模化制造与边缘部署。

10 结论

B³D-HPA V3.45 提出了一套以连续场演化、物理哈希寻址、相位编

码启发式搜索为核心的光计算架构。通过将 A* 算法映射为波干涉，并以相对相位不变性保障系统鲁棒性，实现了高并行、超低功耗、强抗热漂移的计算能力。

架构以熔融石英为量产基底、蓝宝石为高端选项，通过冷态紫外擦写与多层热漂移抑制，攻克了连续场光计算实用化的主要障碍。

它将计算范式从“追求完美硬件”转向“利用介质本征特性+自适应物理层”，在热漂移得到控制后，剩余工程挑战均具备可行解决方案，可为后摩尔时代连续场光计算提供一

条相对务实的发展路径。