

# 大尺寸锗酸铋闪烁晶体与暗物质 粒子探测

陈俊锋

(中国科学院上海硅酸盐研究所 201899)

暗物质的存在已被大量天文观测数据所证实，但却从未被直接探测到，揭开暗物质之谜有望是继相对论及量子力学之后的又一次重大科学突破。暗物质探测国际竞争异常激烈，为了抢占最佳时间窗口和保持优势，我国于2015年底发射了暗物质粒子探测卫星，该卫星是人类在轨观测能段范围最宽和能量分辨最优的空间探测器，其关键探测指标达国际领先水平。该卫星上采用了308根尺寸为 $25\times 25\times 600\text{mm}^3$ 锗酸铋闪烁晶体作为核心探测部件，这些大尺寸晶体是与高能宇宙线和暗物质可能湮没产物作用的直接媒介。本文将介绍这些大尺寸锗酸铋晶体的研制过程及其在暗物质探测卫星上的应用情况。

## 1. 闪烁效应和无机闪烁晶体

闪烁体是一类具有闪烁效应的发光材料，其作用是将入射高能粒子或射线的能量转换为荧光脉冲输出信号，而后通过光电转换器件，如光电倍增管(PMT)、硅光电倍增管(SiPM)或光电二极管(PD)等，将荧光脉冲信号转换为电脉冲信号，电脉冲信号通过读出电子学系统进行读取，从而获取入射粒子或射线的能量、剂量和方向等信息。高能射线和粒子对人眼是不可见的，可以说闪烁体是人们观测高能射线和粒子的“眼睛”。

根据化学组成的不同，可将闪烁体分为有机闪烁体和无机闪烁体。无机闪烁晶体是单晶态的闪烁体，它们一般具有密度大、有效原子序数高、射线/粒子俘获能力强、能量分辨率好、对自身发光透光性能好、抗辐照能力强、性能稳定等优点，是目前应用最广泛的一类闪烁体。

## 2. 锗酸铋闪烁晶体及其研究进展

锗酸铋( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ , BGO)晶体是一种具有立方结构、无色透明的人工合成晶体，该晶体是一种多功能光学晶体材料，具有电光、磁光和闪烁等多种物理效应，并可用作激光介质。1973年，韦伯(M. Weber)和蒙尚(R. Monchamp)率先发现BGO晶体的闪烁效应，该晶体在高能射线或粒子作用下会发出峰值位于480nm的闪烁光。

BGO晶体的密度为 $7.13\text{g/cm}^3$ ，有效原子序数为75.2，对 $\gamma$ 射线具有极高的探测效率，非常适合需要高 $\gamma$ 射线探测效率的应用，如石油测井和地质勘探等领域；BGO晶体的峰/康比大、反散射峰和逃逸峰小，是非常优异的反康普顿屏蔽材料；BGO的辐射长度仅为1.12cm，莫里哀半径为2.24cm，仅次于 $\text{PbWO}_4$ 和 $\text{CdWO}_4$ ，非常适于制作结构紧凑的探测器或探测部件，提高空间分辨率和节约设备投资；BGO晶体属于自激活发光的闪烁晶体，不存在激活离子不均匀导致的分辨率恶化问题，其在高能段的能量分辨性能好，可精确测定高能粒子或射线的能量；另外，BGO晶体无余辉，无解离面，莫氏硬度和化学性能稳定等优点，加工、维护和使用方便。综上所述，BGO晶体是一种综合性能优异的无机闪烁晶体。

BGO晶体的最常用的两种生长方法是提拉法和坩埚下降法，这两种方法均为熔体生长法。

**提拉法：**提拉法又称丘克拉斯基法(Czochralski Method)或引上法，该晶体生长方法是丘克拉斯基(J. Czochralski)于1917年发明的，其基本原理如图1(a)所示。提拉法的基本过程：将生长所需的高纯原料放

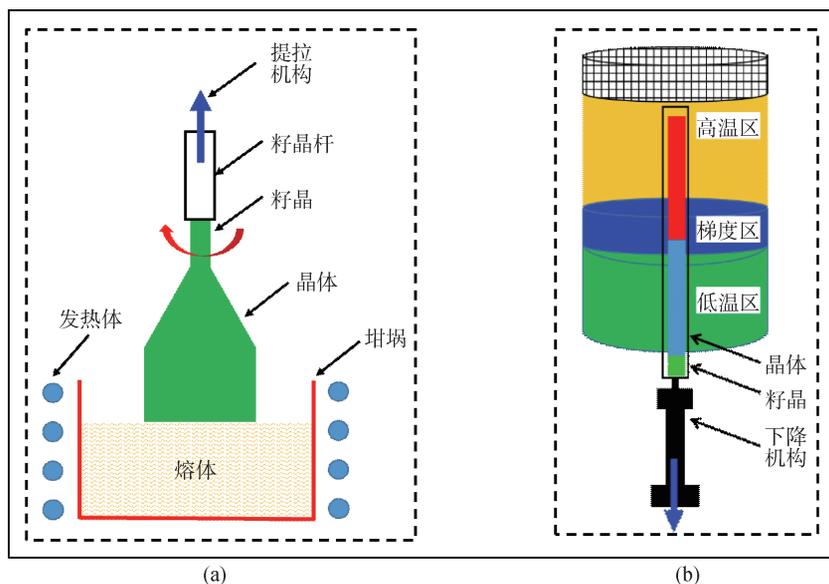


图1 提拉法 (a) 和坩埚下降法 (b) 晶体生长基本原理示意图

在坩埚中加热熔化，待原料充分熔融后，先将籽晶在熔体表面部分熔融，然后按照一定速率旋转并提拉籽晶，使籽晶和熔体在固液界面上进行原子或分子的重新排列，熔体逐渐凝固而生长出单晶体。

**坩埚下降法：** 又称布里基曼法 (Bridgman method)，该方法是由布里基曼 (P. Bridgman) 发明，而后经过斯托克巴杰 (D. Stockbarger) 改进，其基本原理如图 1 (b) 所示。坩埚下降法的基本过程：将高纯生长原料装入坩埚中，将坩埚中原料加热熔融后缓慢下降通过具有一定温度梯度的生长炉，当熔体下降到结晶点后开始结晶，晶体随坩埚的下降而逐渐长大。

**多坩埚下降法：**

20 世纪 80 年代初，西欧核子研究中心大型正负电子对撞机 L3 实验需要 12000 余根 240mm 长的 BGO 晶体作为量能器闪烁探测材料，在多年晶体生长的科学认识和实践基础上，中国科学院上海硅酸盐研究所的科研人员改进了传统的坩埚下降生长炉及生长技术，发明了多坩埚下降生长技术，并于 1982 年取得大尺寸 BGO 晶体多坩埚下降法制备技术的突破。

常规坩埚下降炉一般为圆柱形，结构如图 1 (b) 所示，温度场呈严格中心轴对称分布。而该所发明的多坩埚下降炉为长方体结构，其结构示意图如 2 所示，其中 (a) 为正视图，(b) 为侧视图；数十只装有原料和

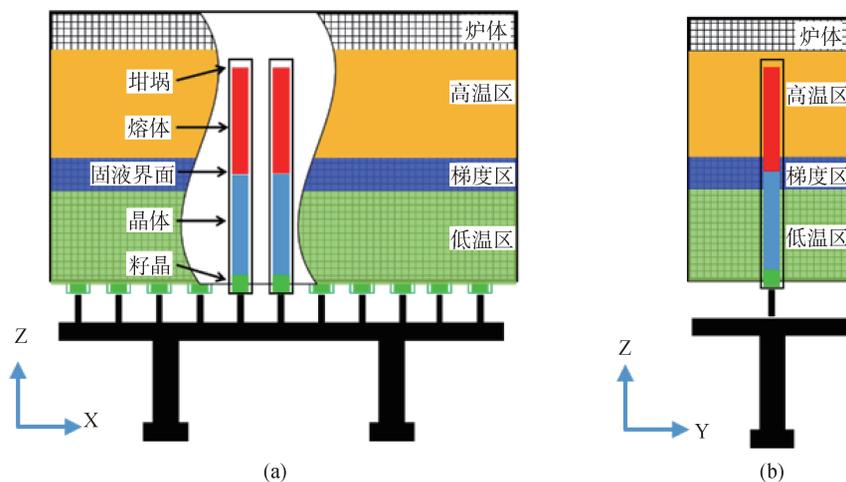


图2 多坩埚下降法晶体生长炉结构示意图 ((a) 为正视图, (b) 为侧视图)

籽晶的坩埚沿 X 轴直线排布，发热体则位于坩埚的两侧。经过该所改进的多坩埚下降法具有显著的优势，具有设备简单、操作简便、单炉产率高、生长成本低和易于批量化等突出优点。该所包揽了整个 L3 实验所需的 12000 余根大尺寸 BGO 晶体订单，奠定了该所乃至我国无机闪烁晶体的国际地位，取得了显著的经济和社会效益。

#### 核医学成像用高质量 BGO 晶体的研制：

20 世纪末期，随着经济和社会的发展，自身健康日益成为人们关注的焦点，正电子断层扫描仪(Positron emission tomography, PET) 作为一种高端医学影像设备开始了大规模应用，BGO 晶体是成为首选的 PET 探测器材料之一，用于探测正负电子湮没后发出的一对能量为 511keV 的  $\gamma$  射线。

虽然高能物理应用(如 L3)和核医学成像应用(如 PET 等)均属于辐射探测应用，但二者对晶体内在质量和性能的要求存在显著的差异。首先，高能物理应用是通过 BGO 晶体探测数百 MeV 到 GeV 的超高能量的粒子或射线，这些粒子或射线产生的光脉冲信号极强，而核医学成像应用是通过 BGO 晶体探测低能  $\gamma$  射线(如 511keV)，这些低能  $\gamma$  射线产生的光脉冲信号极其微弱，晶体的散射、着色会直接影响光脉冲信号的幅度。其次，对于高能物理应用而言，即使晶体内部存在许多肉眼可见的散射颗粒、着色甚至双晶等也可以使用，而核医学成像应用则需要利用  $\gamma$  射线进行成像，晶体内部的微观和宏观缺陷产生的光散射、光吸收及辐照损伤会对成像的质量产生严重影响；再有，高能物理应用可以根据需要一定程度地增加粒子或射线的剂量，而核医学成像应用是面向主要是人或动物等活体，必须尽可能降低  $\gamma$  射线的剂量，要求晶体分辨率高、光散射小和光吸收小以提高计数率。最后，单台设备使用数十只晶体元件组成一个探测模块，总共需采用 1 万多只晶体元件，这要求晶体的质量和性能有很好的 consistency。

如上文所言，核医学成像应用对 BGO 晶体的质量、性能及一致性提出了更高的要求，上海硅酸盐研究所采用多坩埚下降法制备的 BGO 晶体在高能物理领域应用取得了巨大的成功，但在核医学成像领域应

用却碰到了极大的障碍，甚至被认为根本无法用于核医学成像领域。1998 年以来，新组建的 BGO 晶体科研团队在继承原有设备的基础上，从原料控制、晶体生长设备改进、生长工艺优化等多方面入手，对原有的生长设备、生长工艺和管理机制进行了全面革新，使得晶体的尺寸、质量和性能得到了质的提高。科研团队突破了核医学成像用大尺寸、高质量 BGO 晶体的制备技术瓶颈，实现了毛坯、元件和器件的低成本和规模化制备，该所逐渐成为全球 PET 用 BGO 晶体元器件的最大供应商，占据了全球 BGO 晶体核医学成像应用的主要市场份额。在此基础上，新的 BGO 晶体科研团队实现了  $\Phi 3\sim 4$  英寸截面、 $75\times 110\text{mm}^2$  截面、 $300\sim 400\text{mm}$  超长晶体的技术突破、批量化，并研制出多种高性能 BGO 晶体辐射探测器，技术能力和产品竞争力得到极大的提升。

### 3. 暗物质、暗物质探测及暗物质探测卫星

#### 暗物质及其发现：

1933 年，瑞士天文学家兹威基(F. Zwicky)根据后发座(Coma)星系团的研究，猜想该星系团中存在不发光但存在引力的物质，并把这类物质称作暗物质，但该概念并未得到科学界的广泛认可。直到 20 世纪 70 年代，美国天文学家鲁宾(V. Rubin)通过旋涡星系的旋转曲线，第一次基于观测证据提出了暗物质的存在。此后，引力透镜和宇宙微波背景辐射等许多观测结果均证实了暗物质的存在，暗物质的概念已得到科学界的广泛认可。

暗物质的含量远超过我们已知的普通物质，根据 2015 年普朗克卫星(Planck)宇宙学参数的观测数据，宇宙总质能(Mass-energy)包含 4.92% 的普通物质即重子物质，26.47% 的暗物质，以及 68.44% 的暗能量，暗物质构成宇宙全部物质组成的 84.33%。尽管暗物质的存在已被众多科学观测证据所证实，但至今仍未被人类直接探测到，人类尚不清楚其是否参与其他类型的相互作用，甚至连暗物质粒子的质量也无法确定；近乎完美的粒子物理标准模型中并不存在暗物质粒子，暗物质的研究对于人类认识物质的基本组成和

相互作用具有至关重要的作用。

#### 暗物质候选者 WIMPs 及其探测:

在理论物理学家所建立的多种暗物质模型中, 最受欢迎的模型是“大质量弱相互作用粒子 (Weakly interacting massive particles, WIMP)”。理论上, 这些 WIMPs 会以极小的概率发生衰变或它们之间发生湮没, 从而产生可以探测到的正电子、负电子、反质子以及光子等普通物质粒子, 通过高灵敏的探测器及长时间的观测才能实现暗物质粒子的实验研究。为了研究 WIMPs 的物理属性, 首先需要对其进行有效地探测, 全球多个科学团队设计了三种类型的探测实验, 即直接探测、间接探测和对撞机探测, 籍此了解引力之外的暗物质物理属性。这三类暗物质探测方案各有优点, 互为补充。其中, 间接探测是在地面或外太空搜寻 WIMPs 衰变或湮没的产物间接寻找暗物质存在的证据, 通过高灵敏的探测器探测暗物质粒子衰变或者湮没产生的末态粒子, 从而间接探测暗物质。

#### 暗物质粒子探测卫星:

在该暗物质的间接探测方面, 以中科院紫金山天文台常进研究员为首的我国暗物质探测科研团队有比较优势。1998 年起, 常进研究员等与美国、德国、俄罗斯等有关单位开展合作, 利用美国科学家主导的 Advanced Thin Ionization Calorimeter (ATIC) 装置实验观测高能电子, 研究发现电子能谱在 300~800 GeV 能量区间, 与理论结果相比有一个很强的超出, 观测结果与暗物质理论预言的 Kaluza-Klein 粒子模型 (质量 620 GeV) 吻合得很好, 但还需要更精确的测量结果来证实。以 ATIC 实验中的经验积累和实验成果为基础, 由中国科学院紫金山天文台牵头, 联合中国科学技术大学、中国科学院近代物理研究所和高能物理研究所等多家单位, 提出了中国的暗物质粒子探测卫星 (DARK MATTER PARTICLE EXPLORER, DAMPE) 计划。

暗物质粒子探测卫星“悟空”, 主要探测电子宇宙射线、高能  $\gamma$  射线和高达 PeV 的各类核素宇宙射线, 聚焦于 5GeV 和 10TeV 的正负电子和伽马射线能谱, 以实现中能端 (1GeV ~ 100GeV) 与其他实验进行对比和验证, 并在高能段 (100GeV ~ 10TeV) 提供更高精度的能量测量和本底区分。该卫星于 2015 年 12

月 17 日发射升空, 是我国首颗空间科学卫星, 其能量分辨率、探测能量范围和本底抑制能力等探测指标达国际领先水平, 打开了观察世界的新窗口。

## 4. 大尺寸 BGO 晶体在暗物质探测卫星的应用

暗物质探测卫星的探测器由四部分组成, 分别是塑料闪烁体阵列探测器、硅阵列探测器、BGO 量能器和中子探测器。其中, BGO 量能器是 DAMPE 最为核心的组成部分, 该量能器为全吸收型电磁量能器, 其功能是精密测量入射粒子尤其是高能电子和伽马射线的能量, 获取高能粒子或者射线簇射的能量、位置及形状等信息, 实现对高能粒子或射线的能量测量和粒子甄别, 并为整个探测器提供触发信号。

BGO 量能器采用上海硅酸盐研究所研制的 308 根尺寸为  $25 \times 25 \times 600 \text{mm}^3$  的 BGO 晶体作为探测元件, 600mm 长 BGO 晶体的两个  $25 \times 25 \text{mm}^2$  端面分别耦合两只日本滨松光子公司生产的 PMT (R5610A) 形成一个最小探测模块, 308 个最小探测模块以单层 22 只、共 14 层、相邻两层相互垂直交错排列方式形成三维探测阵列。图 3 中给出了 DAMPE 有效载荷结构 (a)、600mm 长晶体排布 (b) 和最小探测模块 (c) 的示意图。在 DAMPE 中, 这些大尺寸 BGO 晶体是与高能宇宙线和暗物质可能湮没产物作用的直接媒介, 其总重占卫星有效载荷质量近 59%, 是 DAMPE 质量上的“重心”、结构上的“中心”和科学目标实现上的“核心”探测部件, 是“悟空”号“火眼金睛”的超级“视网膜”。

在 DAMPE 项目预研和 BGO 量能器 1/6 原型样机的设计中, 由于无法获得 600mm 长 BGO 晶体, 项目组被迫采用基于 576 只 BGO 晶体 ( $25 \times 25 \times 300 \text{mm}^3$ ) 的量能器设计, 在该设计中 300mm 长 BGO 晶体的排布如图 3 (a) 所示。根据初始设计方案, 300mm 长的 BGO 晶体只有一端耦合光电倍增管形成单个最小探测模块进行光信号读出, 安装时需先将 24 个探测模块排成一列形成一个组合, 然后将两列共 48 个最小探测模块拼成一个完整平面, 如图 4 (b) 所示。300mm 长 BGO 晶体的 1 端面耦合 PMT 构成最小探

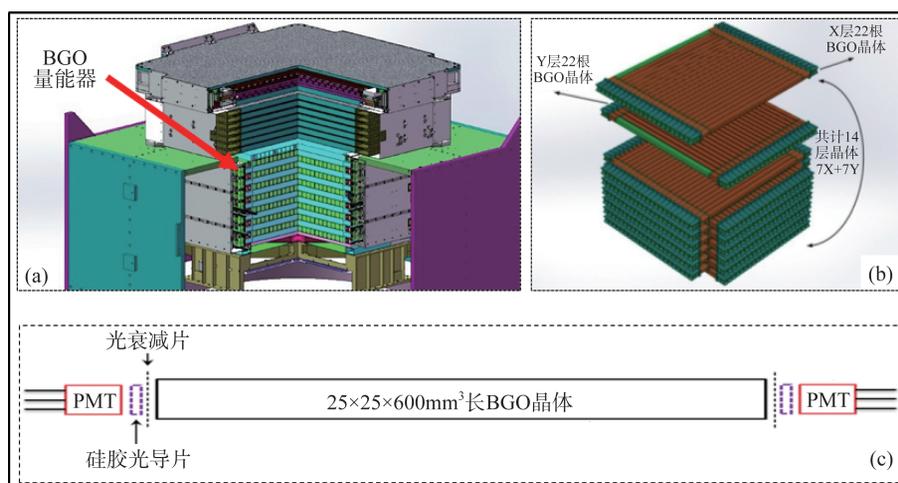


图3 DAMPE 有效载荷结构 (a)，600mm 长晶体排布 (b) 和最小探测模块结构 (c) 的示意图

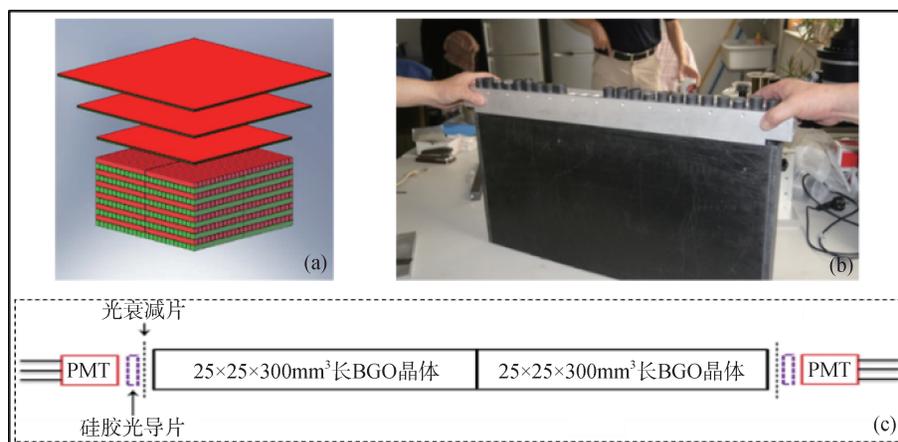


图4 量能器初始设计中 BGO 晶体排布 (a)、单层探测模块组合 (b) 及最小探测模块 (c) 示意图

测模块，其结构如图 4 (c) 所示，将两个最小探测模块的非 PMT 耦合面相对放置形成 600mm 长的有效探测长度。

我们知道，空间应用对卫星载荷尺寸、质量和功耗和均有严格限制，要求供电、信号读出和分析模块满足高度集成化、高可靠性和低功耗的苛刻要求。例如，在 DAMPE 上，每个 PMT 高压模块要给多只 PMT 供电，这对高压模块的稳定性和可靠性均提出了艰巨的考验，任何一个高压供电模块出现异常将导致多组 PMT 完全失效，BGO 量能器也将面临完全失效的风险。而如果采用 600mm 的 BGO 晶体，可采用双端面各耦合 1 只 PMT 的新颖设计，该设计可以在不增加系统复杂程度情况下，使得高压供电模块失效的风险直接降低为原来的 1/4 或更低。DAMPE 基于 600mm 长 BGO 晶体的量能器设计使得双端读出、互

为备份的电子学读出成为可能，大幅度地提升系统稳定性和可靠性，并显著地降低数据处理复杂程度，且可采用两端加和的数据处理方式，增加探测数据的利用率。

## 5. 大尺寸 BGO 晶体的研制

在上海硅酸盐研究所的研究前，仅俄罗斯无机化学研究所报道采用提拉法生长长度达 450 mm 的不规则毛坯 BGO 晶体，但因提拉炉单根 / 炉、晶体形状不规则及机械行程受限等特点，该方法无法在短期内实现 600mm 净长晶体的低成本、高效和批量化制备；国内外均无坍塌下降法生长大于 400mm 长晶体的先例，仅上海硅酸盐研究所能生长 400mm 长毛坯晶体，且已有装置和方法不能生长净长 600mm 晶体，更无法实现批量化生长。

600mm 长 BGO 晶体的制备存在艰巨的挑战，主要有以下方面：（1）超长生长周期引起的坩埚熔蚀、漏料；（2）生长炉炉腔高度和机械行程限制了晶体的长度增加；（3）超长晶体自身散热增大、固 - 液界面失衡和加热体功耗激增；（4）超长生长周期面临的外界环境挑战；（5）配套超大尺寸铂金坩埚和陶瓷引下管制作；（6）超长晶体高精度加工设备缺乏；（7）超长晶体的性能测试平台特殊搭建；（8）影响超长 BGO 晶体光输出和光响应均匀性的因素尚不清楚。

根据 DAMPE 的迫切需要，上海硅酸盐研究所 BGO 晶体科研团队开展了大尺寸 BGO 晶体研制和应用研究，在科学认识、生长装置和生长方法均取得了很好的研究成果。

#### 超长晶体多坩埚下降法生长装置及生长技术

对于坩埚下降法而言，晶体生长过程是热量的动态平衡过程，随着晶体长度的增加，晶体和引下机构散失热量也在增加（见图 5(a)），使得生长驱动力增大，造成固 - 液界面推移速度即生长速度  $V_{real(t)}$  增大，大于机械下降速度  $V_{mech(t)}$ ，即存在所谓的“生长加速效应”，造成固 - 液界面向上推移，甚至进入高温区。“生长加速效应”的存在会对固 - 液界面形状及稳定性产生不利影响，使晶体中产生包裹体和气泡等宏观缺陷，恶化晶体光学性能，引起晶体失透和开裂。科研人员通过大量的温场模拟和生长实验，由于常规下降炉炉体结

构和温度的限制，晶体长度的显著增加会使得  $V_{real(t)}$  远大于  $V_{mech(t)}$ ，研制能动态控制晶体和引下机构散热的装置是超长晶体制备最为关键的技术突破口。

研究人员在常规下降法设备上增设辅助加温系统，构建起独特的四温区温场，发明了适合 500~1000mm 长 BGO 晶体生长的多坩埚下降装置（图 5 (b) 和 (c)）。通过炉体系统和辅助加热系统的协同控制，实现生长过程中温度场的动态调控；通过等比例调节高温区和辅助加热区高度，实现不同长度晶体生长。图 5 (d) 为该装置的实际生长测温曲线，上部和下部热电偶数值在梯度区和高温区有很好的重合性，能为晶体生长提供一个动态平衡温场，使固 - 液界面始终稳定于梯度区，有效地抑制晶体“生长加速效应”。该多坩埚下降法生长设备具有结构简单、操作便捷、适用性强和成本低的突出优点，单炉可生长多达 22 根超长 BGO 晶体。

对于超长大尺寸晶体生长而言，最为关键是要控制固 - 液界面平衡和抑制铂金坩埚腐蚀。

**固 - 液界面平衡控制：**采用炉体主、辅加热系统的联动，主加热系统提供热量使得原料在高温区熔化，稳定炉体中上部温度，辅加热系统维持底部温度，不断补充晶体、保温材料、铂金坩埚及支撑坩埚动态带走的热量，结合分时、分段的动态温度调控工艺，使固 - 液界面始终维持在梯度区，根本上减少机械下降速率与固 - 液界面推移速率差异，使生长过程处于严

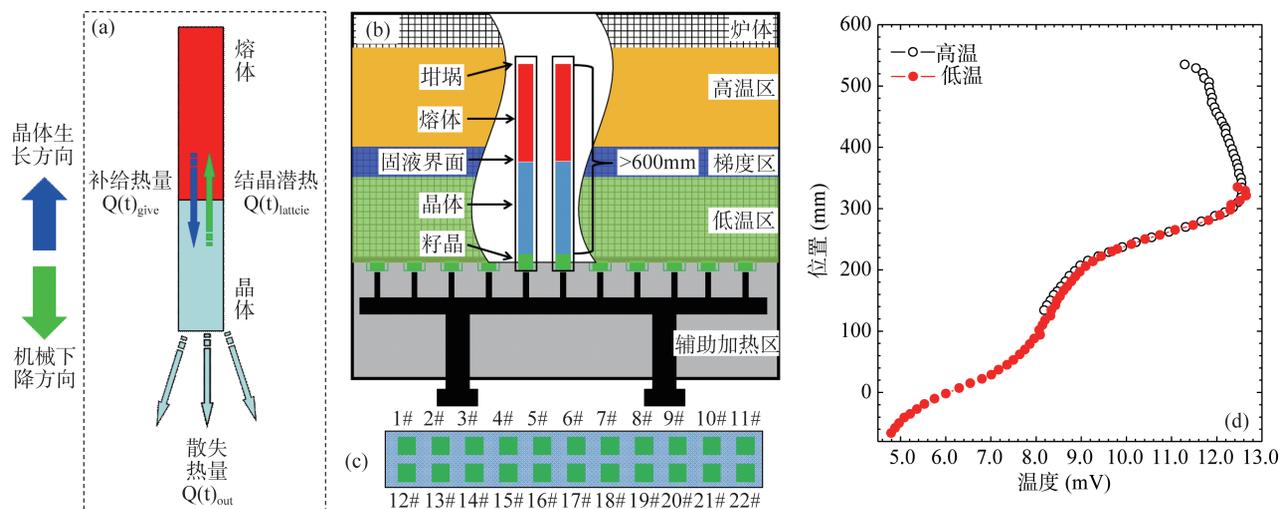


图 5 下降法晶体生长中的热量平衡过程示意图 (a)、带辅助加热系统的多坩埚下降法生长装置的结构示意图 (b- 横剖面, c- 俯视图) 及该装置的实际生长测温曲线 (d)

格受控状态, 实现晶体毛坯原位退火, 避免晶体的应力开裂现象。

**抑制铂金坩埚腐蚀:** 在坩埚下降法生长过程中, 铂金坩埚是盛放 BGO 高温熔体的直接容器, BGO 高温熔体对铂金坩埚有较强的侵蚀性, 周期越长则坩埚蚀穿几率越大, 严重时将导致生长失败和炉体受损。避免坩埚蚀穿的常规方法是增加坩埚层数和厚度, 但为得到净尺寸 600mm 长的晶体, 毛坯长度至少为 620~650mm, 按照常规 BGO 晶体的生长速度 (0.4~0.6mm/h), 整个晶体生长过程需要持续 2~3 个月, 单纯增加坩埚层数和厚度并不能显著地消除蚀穿现象, 却会显著地增加铂金损耗, 会大大增加晶体生长的成本。研究人员采用“二次结晶”和“提速生长”法, 大大减少了铂金坩埚在晶体生长过程中的腐蚀, 生长时的坩埚蚀穿现象得到显著地抑制, 晶体生长成品率达 90% 以上, 晶体毛坯最长 945mm。

#### 宽板状晶体坩埚下降法生长装置及方法

获取宽板状晶体的常规方法是提高晶体直径, 如从 3 英寸提高至 4~5 英寸, 但受制于炉膛直径和晶体导热系数的限制, 提拉法生长 BGO 晶体的最大直径仅为 150mm, 且外形极不规则, 取材率极低。常规下降法生长装置无法提供超宽均匀温度区, 项目开展前尚无宽度 400mm 以上宽板状 BGO 晶体的先例。基于此, 研究人员将下降炉梯度区的隔热砖由“工”形变成“L”形, 极大地拓展了有效炉膛宽度, 保证同一水平线上不同位置有较小温差。

当生长晶体尺寸变化时, 可通过导轨移动炉腔调

节炉膛宽度, 通过调节炉帽高度来调节炉膛高度, 使横向和纵向空间能满足不同截面晶体生长。图 6 中给出了宽板状坩埚下降炉结构示意图 (a) 和 600mm 净长晶体加工 (b) 示意图, 该装置大大地缩短了生长周期, 降低了超大截面晶体的制备难度, 生长出的单根宽板状晶体可加工出多根 600mm 长晶体, 具有设备简单、操作简便和尺寸形状可定制等诸多优点。

利用宽板状晶体下降法生长设备, 科研人员创新性地采用超长晶体横向放置作为籽晶进行“接种”生长的“横向籽晶接种法”, 籽晶的最长边与宽板状晶体的宽度一致。“横向籽晶接种法”大大缩短了晶体生长周期, 可避免常规小端面籽晶径向生长的超长周期相关的坩埚腐蚀、电力、机械、震动等不可控因素对晶体的影响。通过温度场和工艺制度的系统优化, 实现了宽板状 BGO 晶体的低成本和高效率制备。图 7 是采用该方法制备的宽板状 BGO 晶体, 截面积为  $610 \times 280 \text{mm}^2$ , 这是世界上已知单体截面积最大的 BGO 闪烁晶体。

综合利用上述的装置和方法, 上海硅酸盐研究所的科研团队在世界上率先突破超长和宽板状 BGO 晶体的坩埚下降法制备技术, 实现了超长 BGO 晶体的低成本和高效率量产制备; 超长晶体的单炉产能达 22 根, 生长成品率可达 90% 以上, 共为 DAMPE 初样和正样研制提供 650 根 600mm 长 BGO 晶体, 图 8 为量产的 600mm 净长 BGO 晶体。表 1 中给出了国内外开展大尺寸 BGO 晶体研制的主要机构/公司的生长技术比较。就已公开的文献和资料看, 上海硅酸盐研究所研制出

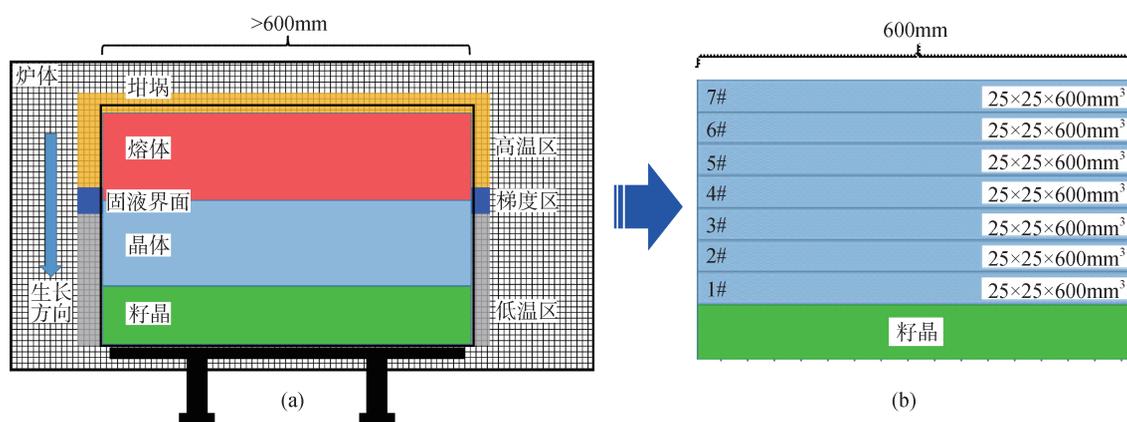


图 6 宽板状坩埚下降炉结构示意图 (a) 及 600mm 净长晶体加工示意图 (b)

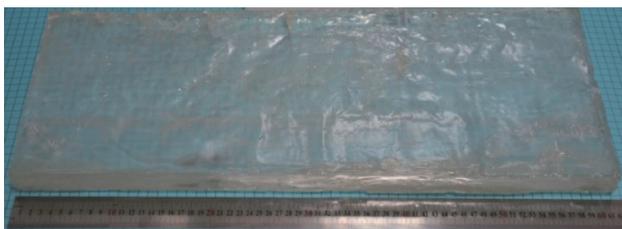


图7 坩埚下降法制备出的世界上已知单体截面积最大 (610×280mm<sup>2</sup>) BGO 闪烁晶体

BGO 晶体的长度 (达 945mm) 和截面积 (610×280mm<sup>2</sup>) 均处于世界领先地位, 发明的晶体生长设备和方法具有产能高、成本低、形状规则且可定制及取材率高等突出优点, 生长装置和方法的技术优势明显。

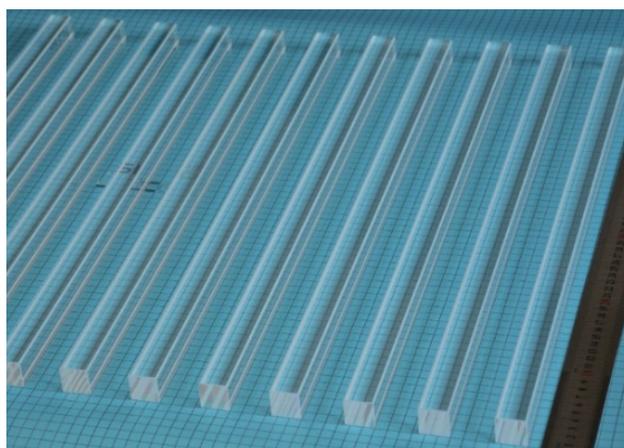


图8 量产的 DAMPE 用 600mm 长 BGO 晶体

表 1 全球主要 BGO 晶体研制机构 / 公司生长技术比较

研究机构/公司	生长方法	长度最值	直径/截面最值	单炉产能	生长成本	毛坯形状	取材率	质量
俄罗斯科学院无机化学研究所	低热梯度提拉法	450mm	Φ150mm	单根	高	不规则	低	高
法国圣戈班集团-晶体公司	提拉法	—	127mm	单根	高	不规则	低	高
乌克兰科学院闪烁材料研究所	导模法	100mm	Φ40mm	单根	高	不规则	极低	差
中国科学院上海硅酸盐研究所	坩埚下降法	945mm	610×280mm <sup>2</sup>	达 22 根	低	规则, 可定制	高	高

## 6. 总结与展望

暗物质探测卫星对大尺寸 BGO 晶体的迫切需求是 600mm 长 BGO 晶体研制的直接推动力, 科研团队在对晶体生长过程科学认识的基础上, 通过对生长装置和方法的再创新, 突破了超长和宽板状 BGO 晶体的关键制备技术, 创造了 BGO 闪烁晶体长度和单体面积的世界纪录, 实现了大尺寸 BGO 晶体的低成本、高效、快速和量产, 巩固并提升了我国在 BGO 晶体乃至闪烁晶体技术领域的国际领先地位。600mm 长大尺寸 BGO 闪烁晶体在 DAMPE 上获得成功应用, 为我国提高暗物质探测水平和抢占空间暗物质探测的国际领先地位提供了至关重要的保障, 取得了良好的经济效益和社会效益。超长尺寸、超大截面 BGO 晶体的研制取得的认识为其他超长、宽板状功能晶体材料的制备奠定了研究基础或具有重要的技术启示作用, 发展的高效制备技术可以进一步拓展用于常规生长工艺难以获取的异形和大尺寸晶体。目前, 科研人员仍在对制备科学和技术进一步深入研究, 开展更长尺寸、更

大截面、更高质量和更高效率的 BGO 晶体制备科学和技术的探索性研究。

## 致谢:

基金资助: 中国科学院空间科学战略先导专项 “空间科学预先研究项目” 课题 XDA04071000

