

Mini Gamma 传感器问答

Q1: 应维持哪些条件以确保 mini Gamma 传感器保持在其有效工作范围内？

A1: Mini Gamma 传感器具有很长的使用寿命，这得益于其采用碘化铯晶体（一种高度稳定的材料）制造。它没有特殊的存储条件要求，可以在标准环境条件下存放，而不会有性能下降的风险。

Q2: Mini Gamma 传感器中使用的是哪种闪烁晶体？该晶体是脆性的还是吸湿性的？

A2: Mini Gamma 传感器使用的是铯掺杂碘化铯（CsI(Tl)），这是 X 射线和 γ 射线检测中最常用的闪烁体，因其高光输出和良好的稳定性。所有碘化铯（CsI）晶体都具有一定的脆性和吸湿性（对水分敏感）。其中，CsI(Tl) 的吸湿性最低，但仍应存放在干燥环境中，并避免与水或高湿度直接接触。如果晶体密封良好，通常的环境湿度是可以接受的。

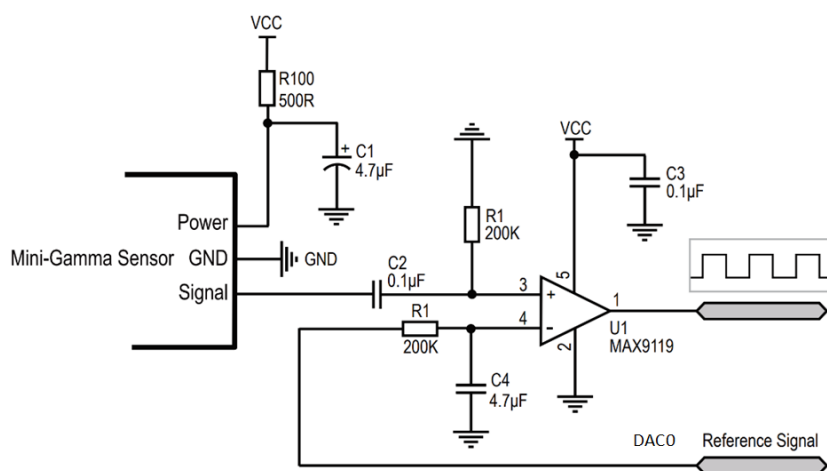
Q3: Gamma 传感器导线的横截面尺寸和长度是多少？

A3: 导线为实心结构，直径 0.45 毫米，对应 AWG（美国线规）#25。套管直径为 0.8 毫米，导线长度如规格书所示为 72.0 ± 5.0 毫米。

Q4: Gamma 传感器内部的最大电容和电感是多少？

A4: 电路的最大总电容并非精确可知，但最大的单个电容器为 4.7 微法（ μF ），位于电源部分。这是唯一该规格的电容器；其他所有电容器均在纳法（nF）范围内，因此总电容小于 5 微法。电路不含任何电感元件，因此其整体电感实际上为零。

Q5: Mini Gamma 传感器的推荐接口电路图是什么？



A5: 碘化铯（CsI）Gamma 传感器的输出近似为高斯形状的脉冲，其幅度与传感器检测到的入射 γ 光子能量成正比。在大多数应用中，无需进行详细的能谱分析；因此，可以使用一个简单的甄别器电路（主要由 MAX9119 比较器和后续的计数系统组成）通过脉冲计数率来确定 γ 强度。

MAX9119 的反相输入端（引脚 4）接收由微控制器（MCU）的数模转换器（DAC）输出产生的阈值电压。只有幅度超过该阈值的传感器脉冲才会通过比较器；较小的脉冲（通常是噪声）会被阻断。后续的计数系统对通过的脉冲进行计数，并根据脉冲率计算 γ 剂量率。

引脚 4 的参考电压不应固定；必须根据传感器的电子噪声水平进行调整。您可以使用示波器测量此噪声水平。在没有任何放射源的情况下，观察噪声脉冲的幅度，并将阈值设置为略高于最大噪声峰值。

在没有辐射源的情况下，您将观察到一个以 0V 为中心的噪声脉冲带。该带的宽度对应于最大噪声幅度。超过此带的脉冲很可能是真实的 γ 辐射事件。通常，所有脉冲（无论幅度如何）都具有近似相同的半峰全宽（FWHM），这由传感器和放大器的时间常数决定。

Q6: 如何理解 mini Gamma 传感器电路及其原理？

A6: Mini Gamma 传感器输出类似高斯形状的脉冲，这是辐射探测系统中常见的波形。每个脉冲的幅度（高度）与传感器检测到的入射 γ 光子能量成正比， γ 光子能量越高，脉冲幅度越大。在大多数应用中，无需测量每个 γ 光子的确切能量。相反，系统专注于对探测事件进行计数，并通过脉冲计数率分析其强度。

甄别器电路用于滤除不需要的信号和电子噪声。MAX9119 比较器是该电路的关键组件。它将每个输入脉冲与由微控制器（MCU）的数模转换器（DAC）输出设定的阈值进行比较。该阈值定义了信号被识别为有效事件所需的最小脉冲幅度。

幅度高于阈值的脉冲通过比较器并被计数。幅度较低的脉冲（通常由噪声或微弱、无关事件引起）被阻断，确保只有有意义的脉冲才会被分析。

在甄别器之后，计数系统收集有效脉冲并在规定的时间间隔内对其进行计数。然后，脉冲计数率被用于计算 γ 剂量率，该剂量率表示 γ 辐射的强度。

Q7: 根据 mini Gamma 传感器电路图，MAX9119 的反相输入端（引脚 4）需要设置什么电压基准？

A7: MAX9119 引脚 4 的电压基准并非固定值，必须根据传感器电子噪声脉冲的幅度进行设置。该基

准电压可调节，应根据传感器在其工作环境中的特定噪声水平进行定制。

为正确设置此基准电压，请在无辐射源的情况下测量传感器产生的噪声脉冲幅度。这可以通过示波器完成，示波器可让您观察电子噪声波形并确定最大噪声幅度。然后，应将阈值（基准电压）设置为略高于此最大噪声水平，以确保只对真实的 γ 探测脉冲进行计数，同时有效抑制噪声。

Q8: 按照推荐电路，在没有任何放射源相互作用时，典型的输出偏置是什么？

A8: 当没有放射源存在时，传感器输出通常有一个约 0.08V 至 0.12V 的小直流偏置。建议在传感器输出和后续电路（如 MAX9119 比较器）之间插入一个隔直（耦合）电容，以去除这个直流分量。隔直电容之后，信号的直流电平取决于施加在电容另一侧的偏置，用户可以根据其电路设计要求进行调整。

Q9: 在 mini Gamma 传感器的推荐电路图中，设置比较器 DAC0 参考电压是否有指导原则？

A9: 对于 mini Gamma 传感器，DAC0 设定点应配置在 60 毫伏（mV）左右，以匹配此阈值。

Q10: CPS 与 FWHM 具体含义？

A10: CPS（每秒计数，Counts Per Second）是量化传感器每秒探测到的 γ 光子数量的关键指标。这种实时测量值反映了辐射强度，并同时受传感器灵敏度与放射源强度的影响。CPS 表示传感器随时间记录单个 γ 光子相互作用（亦称“事件”）的速率。较高的 CPS 值对应较强的辐射场或放射源，且与放射源活度及传感器距放射源的距离成正比。通过传感器校准阶段建立的转换系数，可将 CPS 读数校准为特定辐射剂量率单位，如微西弗/小时（ $\mu\text{Sv/h}$ ）或微伦琴/小时（ $\mu\text{R/h}$ ），从而使 CPS 数值能够在辐射安全标准与暴露水平的框架内进行解读。

半峰全宽（FWHM，Full Width at Half Maximum）是界定 Gamma 传感器能量分辨率的关键参数，用于衡量其区分 γ 射线能量的能力。这一能力对识别特定同位素或放射源至关重要。FWHM 表示在 γ 射线能量峰最大值一半高度处测得的峰宽度，通常以千电子伏特（keV）等能量单位，或峰值中心值的百分比形式表示。FWHM 数值越低，意味着能量分辨率越优异，传感器越能精准分辨相邻的能量峰。该参数常被用于区分发射能量相近的 γ 射线同位素，并作为比较不同 Gamma 传感器分辨率性能的标准依据。此外，脉冲的半峰全宽 FWHM（以其最大高度一半处测量所得）无论脉冲大小如何都保持一致。这种一致性反映了脉冲形态具有统一性，对确保在不同振幅下获得可靠测量结果至关重要。

Q11: 在设定时间内计数脉冲数量是否足以确定辐射强度，还是需要额外的处理步骤？

A11: 是的。在给定时间内检测到的脉冲数量与辐射强度成正比，计数的脉冲越多， γ 辐射剂量率越高。

Q12: 当 mini Gamma 传感器检测到每分钟 14 个脉冲时，它指示的背景辐射水平是多少？

A12: 如果 mini Gamma 传感器检测到每分钟 14 个脉冲，这对应于 14 微伦琴/小时 ($\mu\text{R/h}$) 的背景辐射水平。

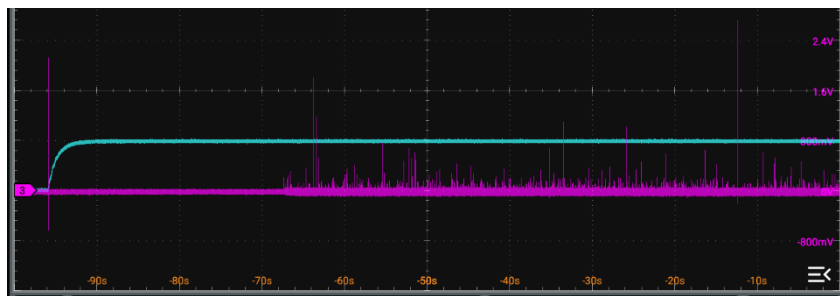
Q13: 对于处理准高斯脉冲，是否有推荐的特定时序或滤波算法？

A13: 是的。由于传感器输出脉冲具有准高斯形状和随机到达时间，我们建议使用 200 毫秒的计数窗口来捕获脉冲事件。然后，可以将若干连续窗口的读数在 1 至 2 秒内进行平均，以平滑短期统计波动，并产生稳定的辐射强度指示。

Q14: 辐射强度超限时会产生何种现象？传感器会饱和还是输出失准？固件是否需要处理饱和场景？若需要，推荐的应对方案是什么？传感器是否需要特定的启动或预热时间，这一点是否应在固件中加以考虑？

A14: 当辐射强度超过测量上限时，脉冲率会变得过高，单个脉冲可能开始重叠（脉冲堆积）。这会导致计数损失，从而低估实际辐射水平。在这种情况下，固件应检测到此状态并显示 "饱和" 或 "超量程" 警告，表明测量不再准确。上电后，传感器通常需要约 30 秒的稳定时间，读数才能变得稳定可靠。固件在报告有效剂量率数据之前，应考虑这段预热时间。

Q15: 测试 Gamma 传感器时，示波器捕获到输出信号（洋红色轨迹）。观测到的尖峰是否为正常现象？



A15: 完全正确。尖峰表征 Gamma 传感器对放射源的响应。若充分扩展水平时基，每个尖峰均会呈现技术手册所示的拟高斯脉冲形态。

Q16: 按照推荐电路，什么幅度被视为有意义的输出，什么被视为噪声？

A16: 在没有放射源的情况下，可以观察到一个由传感器电子噪声形成的脉冲噪声带。该带宽表示相对于 0V 的最大噪声幅度。幅度大于此噪声带的脉冲被视为有意义的信号，对应于实际的 γ 探测事件。

Q17: 输出脉冲宽度是否会随着幅度减小而变短？

A17: 一般来说，所有脉冲无论其幅度如何，都具有近似相同的半峰全宽（FWHM）。通过测量不同幅度脉冲的半峰全宽，您会发现尽管脉冲高度不同，但宽度几乎保持恒定。

Q18: 为什么传感器有时会显示高于预期的背景计数？

A18: 许多小脉冲源自电子噪声，而非实际的 γ 辐射事件。为抑制这些噪声脉冲，请增加施加到比较器反相输入端的基准电压（甄别阈值）。选择合适的阈值，使得在没有放射源的情况下不计数任何脉冲。此调整可确保所有噪声脉冲都被阻断。设置此阈值的过程称为甄别阈值校准。基准电压并非固定值，必须根据传感器电子噪声脉冲的幅度进行设置。您可以使用示波器测量噪声水平。在自然背景环境中（无辐射源），观察噪声脉冲的幅度，并将阈值设置为略高于最大噪声幅度。根据盛密科技的测试，典型阈值约为 0.08V。该传感器使用带超高增益前置放大器的 PIN 光电二极管，这也可能放大二极管的固有噪声。由于不同 PIN 二极管的噪声幅度存在差异，必须为每个传感器调整阈值。典型值范围为 0.06V 至 0.10V，尽管某些光电二极管可能需要略高或略低的阈值。

Q19: 有什么方法可以防止计数损失的发生？传感器是否有最大计数率（以 CPS 为单位），超过该计数率后传感器将不再有效？

A19: 在高辐射强度下，由于脉冲堆积（脉冲开始重叠且无法单独分辨），一定程度的计数损失是不可避免的。原则上，可以在固件或数据处理中应用二次校正函数，在一定程度上补偿这种非线性。未经校正时，可靠工作的最大计数率约为 1500 计数 / 秒 (cps)，此时测量精度约为 $\pm 30\%$ 。使用这种紧凑型传感器通常难以实现优于 $\pm 10\%$ 的精度。作为比较，霍尼韦尔 GammaRAE II R 使用类似的碘化铯(CsI)晶体，但晶体体积约为 10 倍，其精度规格为 $\pm 20\%$ （参见用户手册：霍尼韦尔 GammaRAE II R 手册）。

Q20: 如何解释 Gamma 传感器的线性回归？

A20: 线性回归是用于构建传感器输出值（每秒计数 CPS）与辐射水平关联模型的统计方法，可反映传感器输出随辐射强度增加遵循线性规律的贴合度。这有助于掌握传感器对不同辐射强度的响应特性。为评估线性度，会抽取一批传感器在不同辐射水平下测试，将测得数据绘制成数据点，拟合的线性回归线最能代表整批传感器的辐射响应特性，确保覆盖该批次所有传感器的线性度评估。在 95%置信水平下，该批次所有传感器的性能（测量计数率 CPS 与辐射强度的关系）均落在线性回归线 $\pm 30\%$ 范围内，即传感器读数预期处于线性模型定义的理想响应值 $\pm 30\%$ 偏差内。若将传感器基于回归线的线性特性整合到 γ 或 X 射线探测器等系统中，整个系统的测量精度将为 $\pm 30\%$ 。

CPS（每秒计数，Counts Per Second） 指传感器每秒探测到的辐射事件计数，该指标可用于构建线性回归模型。为抑制短期波动噪声，每个数据点通常取用一段时间内的平均 CPS 值。由于辐射探测的

随机性导致 CPS 存在波动，需采用移动平均滤波器对数据平滑处理，以提升读数稳定性。滤波器窗口尺寸需根据 CPS 数值动态调整：

- **强辐射场：**探测事件密集，单个数据点所需 CPS 样本量可减少；
- **高辐射环境（CPS>1000）：**数据点分布密集，采用 2-3 点小窗口即可保持稳定；
- **低辐射环境：**需扩大窗口集合足够数据，保障读数稳定

滤波器窗口的具体尺寸最终取决于用户对读数稳定度的实际需求，故应采用动态可调机制而非固定值。

Q21：如何使用线性回归来评估 盛密科技 Gamma 传感器的线性度？

A21：为评估线性度，我们通常从不同生产批次中选择约 30 个传感器样本，并将它们暴露于多种不同强度的辐射源下。我们将得到的计数 / 秒（CPS）与已知剂量率进行绘图，并应用线性回归来表征平均响应。根据我们的数据，95% 的传感器落在该回归线的 $\pm 30\%$ 范围内，这反映了当集成到更高层次的系统（如 γ 或 X 射线探测器）中时的预期线性度。由于固有的 CPS 波动，我们应用移动平均滤波器来稳定读数。滤波器窗口大小是自适应的：对于高 CPS（>1000），窄窗口（2-3 个点）就足够了；对于低 CPS，则需要更宽的窗口。确切的窗口大小取决于用户的稳定性要求。未经筛选的传感器之间的差异在 $\pm 15\%$ 以内。在低辐射水平下（例如，低 GBq 源），由于有限的 CPS 统计量，可能会出现更大的差异。

Q22：温度是否影响盛密科技 Gamma 传感器输出？若有影响，如何进行校准？

A22： γ 光子因高能量特性及辐射探测的物理本质，其检测过程对温度不敏感。在 -20°C 至 60°C 工作温度范围内，环境温度变化对碘化铯晶体的 γ 光子探测效率及光电转换脉冲幅度无显著影响。

但温度会显著影响光电二极管性能： 40°C 以上时，硅 PIN 光电二极管噪声幅值急剧增大； 50°C 时，噪声可能湮没低能量 γ 射线产生的脉冲。从高温环境转入低温环境时，噪声随热平衡建立而衰减，反之亦然。若未实施温度补偿，脉冲计数率在高温转低温时降低，低温转高温时升高。

对于 3cc Gamma 传感器采用的 Hamamatsu S5106 光电二极管，温度升高会使性能差异加剧：相同剂量率下，不同传感器可能输出 100 脉冲（对应 $30\mu\text{REM/hr}$ ）或 150 脉冲。该光电二极管对环境温度高度敏感，超过 40°C 时尤为显著，因此 Gamma 传感器安装到监测仪后，必须进行针对性校准，且监测仪需配备热敏电阻实现温度补偿。

值得注意的是，温度校准无需放射源，而是通过分析不同工况下的噪声特性，验证传感器全温区性能。脉冲幅度甄别器常用于分离辐射脉冲与噪声，其阈值通常设定为光电二极管的噪声高度。但温

度升高导致噪声幅值增加时，需提升甄别等级，这可能屏蔽部分低能量 γ 光子脉冲，造成应用系统（非传感器本身）计数率降低。

由于噪声与温度的关系无固定量化指标，且各光电二极管性能存在差异，每支传感器均需在实际应用中校准。环境温度达 35°C 时，热噪声会干扰辐射信号输出，此时需采用更强放射源获取清晰输出。探测到脉冲（此时计数较低）后，需通过补偿算法维持输出线性。镅-241(Am-241)源强度不足，建议改用铯-137(Cs-137)源。

校准传感器时，首先需在无铯-137 放射源状态下测定其基线噪声水平。记录基线数据后，引入铯-137 源并测量传感器响应，从而确定相对于本底水平的输出变化。

Q23: 如何理解 Gamma 传感器中的二次函数 ($aX^2 + bX + c$) ?

A23: 系统级校准对于确保 Gamma 传感器的性能精准至关重要。若未经过适当校准，用户可能会获得不可靠的读数，因为每个传感器都可能存在个体差异。因此，必须通过单独校准来实现精确测量。

在校准过程中，系统会在多个测量点采集数据，将传感器输出值与已知参考基准进行比对。这些数据点随后被绘制在图表上。为精确表征传感器的响应特性，需要采用数学曲线——具体为二次函数 ($aX^2 + bX + c$)——对数据点进行拟合。应用二次函数拟合后，传感器的实际读数应当以 $\pm 10\%$ 的可接受误差范围紧密贴合曲线。这意味着传感器读数的预期偏差通常不超过二次函数模型预测值的 10% 。

由于每个传感器都具有独特性状，因此需要为其建立专属的二次函数模型，该模型能在系统层级最精确地拟合其校准数据。这意味着每个传感器的校准曲线都具有排他性，即便是相同型号的传感器，其校准曲线也不能互换使用。

Q24: 为何校准或相关性 (CoC – Calibration or Correlation) 数据中传感器间差异显著?

A24: 每个传感器相对于辐射源的定位存在微小差异，就会导致计数率 (CPS) 出现明显变化。受几何灵敏度和角度灵敏度影响，即使是微小的位置偏移，也会显著改变探测到的辐射强度。此外，在强辐射场中，部分传感器可能发生脉冲重叠（堆积），进而造成计数损失。当两个或多个脉冲重叠并被记录为单个事件时，固定时间段内的总计数会被低估。

传感器的脉冲宽度也可能因电子元件的公差而存在个体差异。产生较宽脉冲的传感器更容易出现饱和与脉冲重叠现象，这会进一步加剧测量差异。而在低辐射场中，脉冲重叠的可能性大幅降低，脉冲在时间上保持良好分离，因此传感器间的读数一致性更高。

Q25: 为何 mini Gamma 传感器长期使用后有时会出现灵敏度下降?

A25: 灵敏度下降的可能原因包括: (1) 寒冷环境: 在低温条件下 (尤其是冬季), Gamma 传感器的灵敏度可能降低。极端低温会影响传感器元件的物理和电子特性, 削弱其准确探测 γ 射线的能力。(2) 放射源半衰期: mini Gamma 传感器采用铯 -137 (Cs-137) 作为内置校准源, 其半衰期约为 16 年。传感器的灵敏度与该放射源的活度直接相关, 因此传感器长期使用后, 其输出会随放射源衰变而成比例逐渐下降。建议采取的措施: (1) 根据 Cs-137 的半衰期, 核实该放射源是否仍在有效使用期内。(2) 使用一组“标准样品传感器”(经校准的参考传感器) 进行定期比对测试, 助力发现灵敏度偏差, 确保长期测量准确性。

Q26: 如何减轻电磁干扰 (EMI) 对 mini Gamma 传感器的影响?

A26: 盛密科技的 3cc Gamma 传感器采用双层电磁屏蔽设计, 而 mini Gamma 传感器仅配备单层屏蔽。为降低电磁干扰敏感性, 建议优化 mini Gamma 传感器的屏蔽设计, 可考虑以下措施: (1) 双层屏蔽: 增加第二层屏蔽, 在两层屏蔽间保留微小间隙或插入非导电介质, 避免电耦合, 提升电磁干扰衰减效果。(2) 无缝外壳: 确保屏蔽外壳为全包裹式连续金属结构, 无接缝或开口, 防止高频干扰穿透。(3) 线缆屏蔽: 对电源线和信号线进行妥善屏蔽与接地, 最大限度减少电磁干扰通过线路侵入。

Q27: Gamma 传感器是否存在“死区时间”?

A27: 死区时间是电子学理论中的一个专业概念。由于光信号逐渐衰减, 光子会在探测器形成长尾波形。计数率升高时, 后续脉冲与前一脉冲尾部重叠的概率增加, 因此, 两个或多个信号可能会合并成一个信号, 导致记录到的计数少于实际入射光子数。辐射越强, 计数偏差越大, 这也解释了

为何探测器的计数率会随辐射强度升高而出现增长放缓的现象。与其他从事 Gamma 传感器设计生产的企业一样, 盛密科技缺乏直接测量该参数的设备。建议通过计数率与辐射强度的关系构建数学模型, 可将测量上限提升至 $15,000 \mu\text{R/hr}$ (精度 $\pm 30\%$); 若仅采用标准二次曲线拟合, 测量上限约为 $8,000 \mu\text{R/hr}$, 且精度难以保障。