一文读懂光电探测器 PD 与 APD 的核心差异 - 增益

声明: 本资料转自互联网上公开可见的，来自日本 HAMAMATSU 的专业资料.

原创 滨松中国 (HAMAMATSU)
转摘 上海恩弼 (NBTECH)

硅光电二极管（Si PD）是最基础的硅光电探测器，深入理解其工作特性有助于理解雪崩光电二极管（APD）。本文将以 PD 为起点，介绍其基本原理、输出电流及时间特性等，并在此基础上，进一步讲解雪崩光电二极管（APD）的增益特性。

PD 的内部结构

在晶体硅中进行掺杂，形成 P 型和 N 型半导体，两者结合形成 PN 结。由于 N 区和 P 区之间的多数载流子浓度梯度较大，即电子从 N 区扩散，空穴从 P 区扩散至对侧并复合。复合过程会耗尽结两侧相邻区域的多数载流子，形成所谓耗尽层。如下图所示:

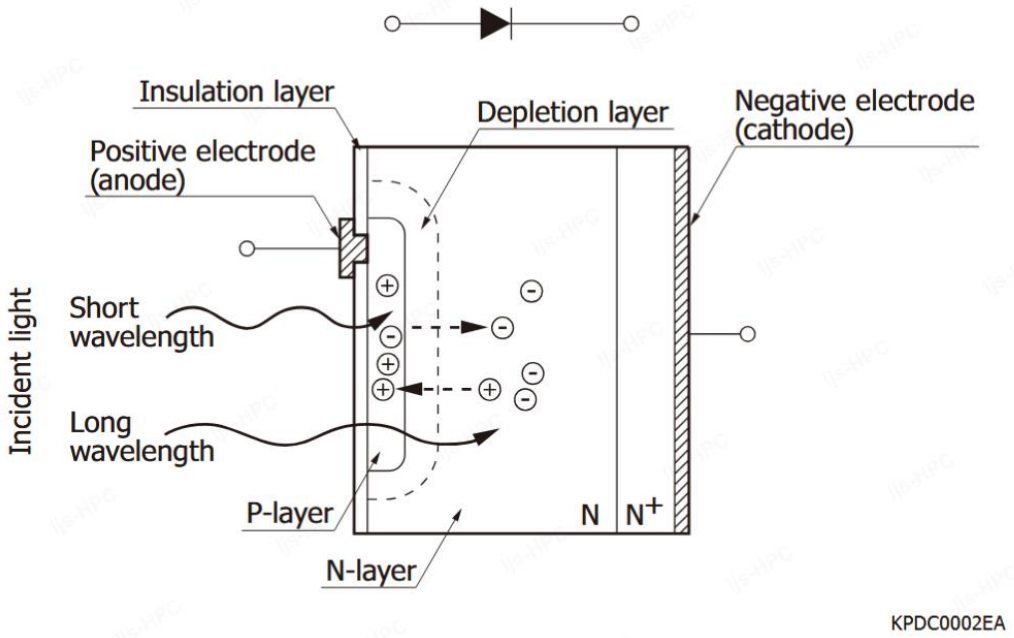


图 1 PD 工作原理

PD 的电流特性

内部电场形成过程中，由于载流子的漂移运动和扩散运动逐渐在强度上形成平衡，载流子的净迁移停止，此时，如果通过**外部能量源（如光子或热能）**在耗尽层两侧产生过剩载流子，则可能打破这种平衡，引发结两侧的净电流。

- 这种外部能量可以是热激发，产生电子空穴对，并分别向两端移动，即产生所谓的暗电流;
- 这种外部能量可以是光子，即产生光电流。通常用光电流来表征光强，**光电流从阳极流出，大小和光强成正比**。

PD 的时间特性

由于耗尽层外缺乏电场，载流子需依靠扩散和布朗随机行走到达耗尽层，之后才能在电场作用下快速漂移穿过 PN 结并被收集。

- 增加反偏电压，耗尽层深度增加，同时也会导致更多热生载流子被收集，那么暗电流也会增加。
- 类似于平行板电容器，通过增加反偏电压，增加耗尽层深度会减小 PN 结的结电容，从而提高光电二极管的频率带宽。
- 为进一步改善 PN 型光电二极管的频率响应和带宽，可在 P 区和 N 区之间引入本征硅区域，形成 PIN 型光电二极管。该本征区域可降低单位面积电容，从而提高截止频率和带宽。

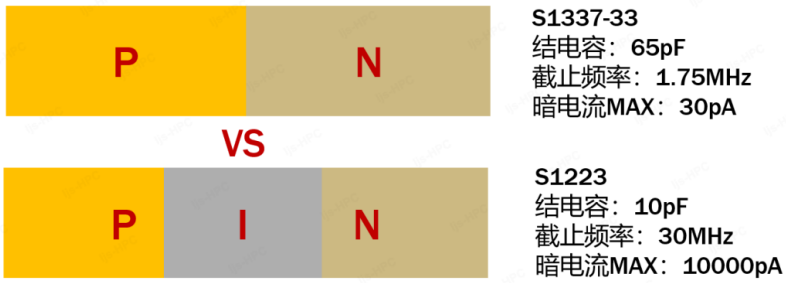


图 2 PN 型和 PIN 型 PD 对比

光电二极管没有内部载流子倍增或增益机制。这些光电二极管的增益为 1，因此适合检测相对强的光信号。接下来，我们将介绍具有内部增益机制、适用于检测低光信号水平的雪崩光电二极管（APD）。

迈向高灵敏度探测：雪崩光电二极管 APD

雪崩光电二极管 APD 全称：Avalanche Photo Diode，它具有高速、高灵敏度特性。常用于光纤通讯、激光测距、光谱测量、医学影像诊断、环境监测等方面。滨松提供各类封装（金属、陶瓷、表面贴装），单点/阵列，以及模块产品。



图 3 长按下载 APD 技术使用指南

APD 的核心优势

APD 雪崩增益带来的最大优势，在于它能将原始光信号的幅值（相对于其自身的噪声）提升到足以压倒后续读出电路噪声的水平，从而显著改善系统的信噪比。

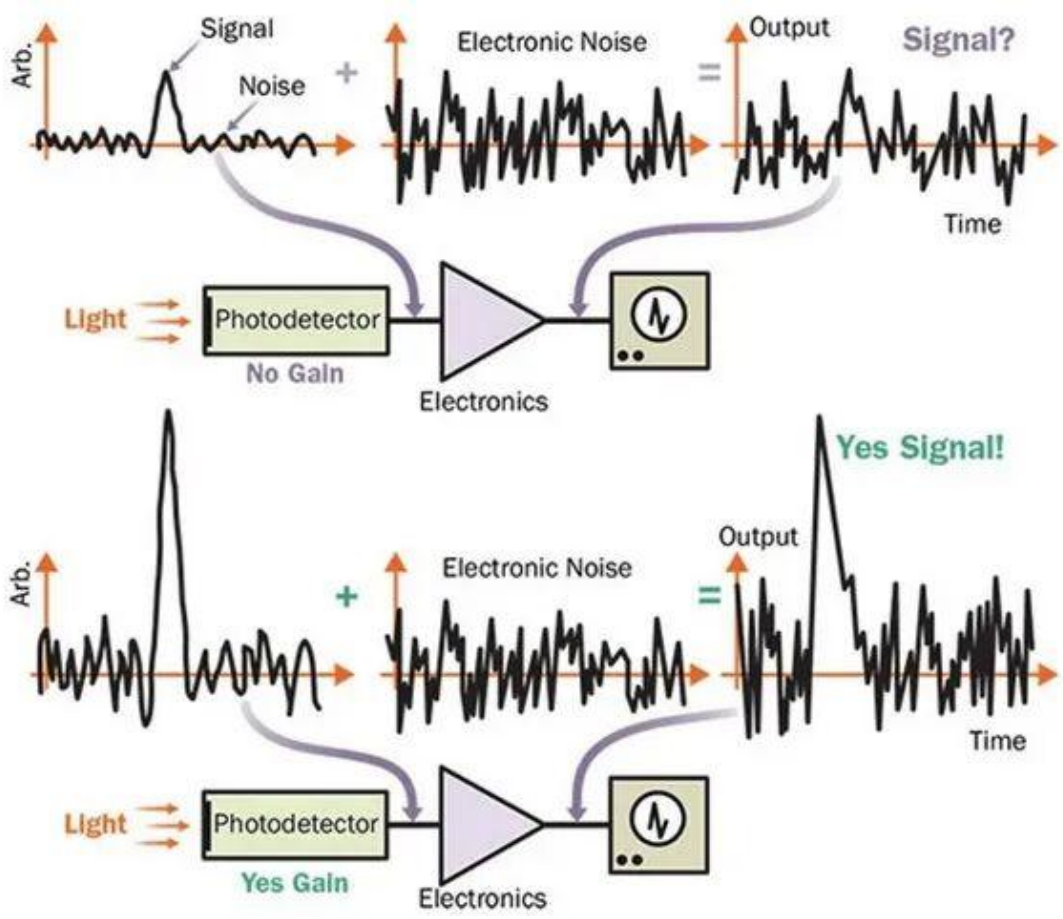


图 4 APD 雪崩增益效果

APD 的增益原理

除了加深耗尽层外，增加 PN 结两端的反向偏置电压还会增强耗尽层中的电场。载流子在电场的作用下，速度会增加。这些载流子撞击晶格时可能使其电离，这种碰撞电离效应构成载流子倍增现象，使漂移的载流子数量迅速增加，类似雪崩过程。**原始光生载流子数量与最终收集的电荷信号之间的载流子数量之比，即为雪崩过程的增益**。

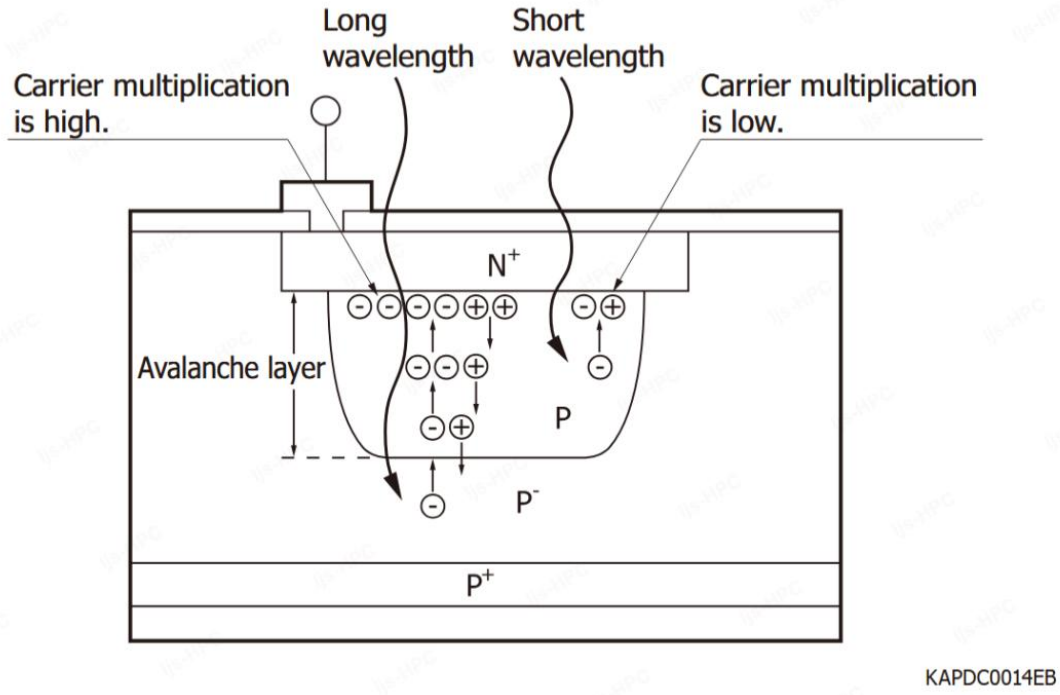


图 5 APD 工作原理

然而，APD 的增益特性依赖于其工作条件。接下来，我们将介绍**波长、温度与反向偏压**这三个条件如何影响 APD 的增益。

对波长的依赖性

量子效率受光波长影响，这个是比较好理解的。此外，APD 的增益也会受到波长影响，这个现象是比较有意思的。要理解这一点，需注意 **APD 有两种可选的制造结构：N-on-P（近红外型）和 P-on-N（短波长型）**。

其原理在于：由于长波（如近红外光）的穿透力更强，往往在器件的更深区域激发产生光生载流子。同时，对硅材料而言，电子的电离率比空穴更高。在 N-on-P 结构中，由长波光子在深处激发的电子需要穿越更长的雪崩倍增区，从而经历更多的碰撞电离机会，**因此，N-on-P 结构在长波长响应方面具有更高的增益**。类似的，P-on-N 结构则在短波长响应方面具有更高的增益。如下图所示，该图清晰地展示了短波型和近红外型 APD 的灵敏度（即增益）随波长的变化趋势。

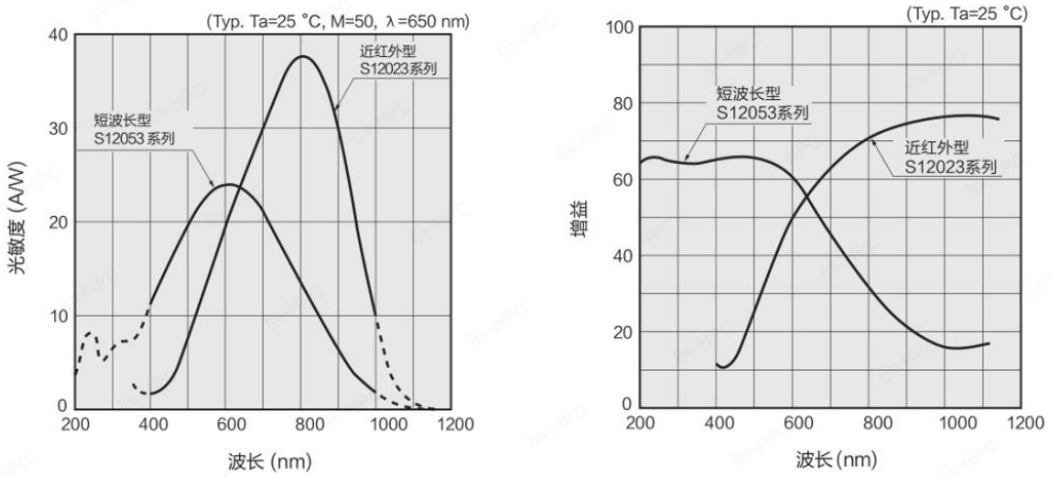


图 6 短波型和近红外型 APD 的光灵敏度/增益随波长的变化

对温度依赖性

APD 增益会随温度升高而降低。其物理机制是：在高温下，晶格的热振动（声子振动）增强，这就导致被电场加速的载流子与晶格发生碰撞的概率增加。这些碰撞会使载流子损失动能，当能量不足以碰撞电离出新的电子-空穴对时，雪崩倍增效应就会被抑制，新生的载流子数量减少，最终造成增益的下降。其变化趋势如下图所示。

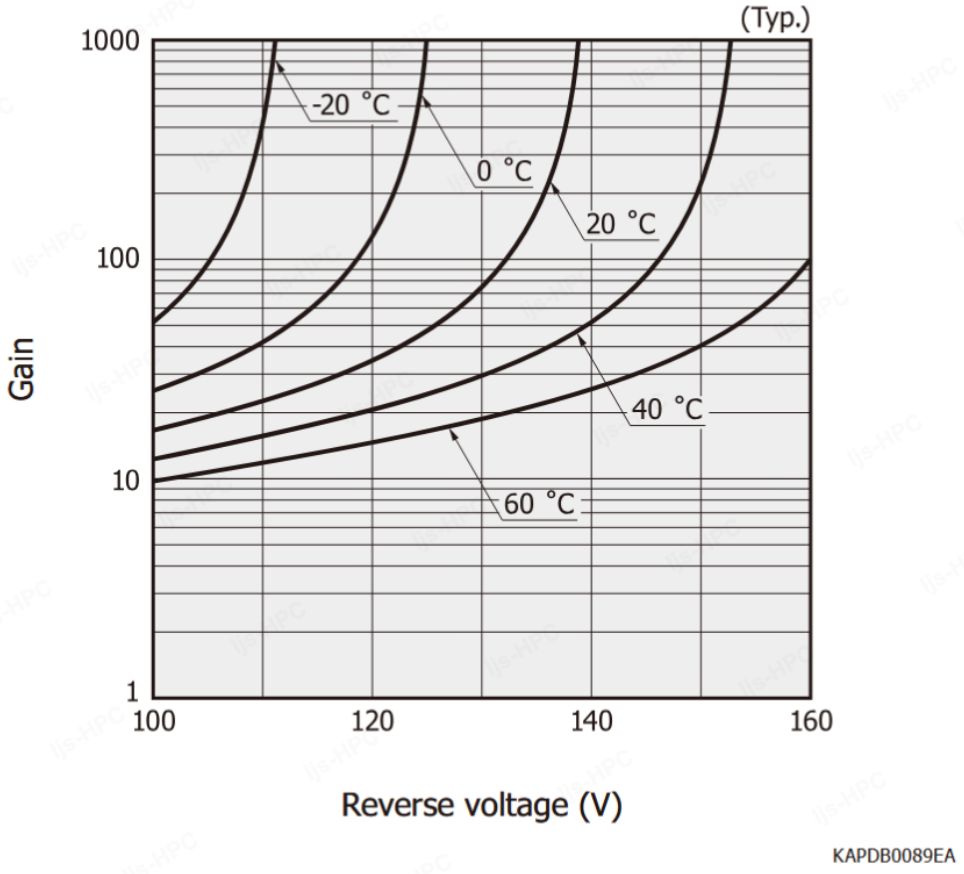


图 7 增益 vs 反偏电压曲线随温度的变化

因此，如果需要让 APD 的增益在工作过程中保持相对稳定，就必须对施加的反偏电压进行**温度补偿**。温度补偿的具体逻辑是：将温度传感器放置在 APD 旁边实时监测其结温。当监测到温度上升了 1℃时，便根据该型号 APD 产品手册中提供的击穿电压温度系数，相应地将反偏电压提升一个对应的电压值，以抵消温度升高带来的增益下降。
对反偏电压的依赖性

APD 增益随反向偏置电压的增加而增大，这个规律比较容易理解：反向偏压越高，耗尽区内的电场强度就越大，载流子在电场中被加速后获得的动能也就更大，其碰撞电离的概率（电离率）随之增高，从而导致增益增大。
从下图的增益-电压曲线可以看出，这条曲线上存在两个明显的拐点，分别在 50 V 和 110 V 左右。

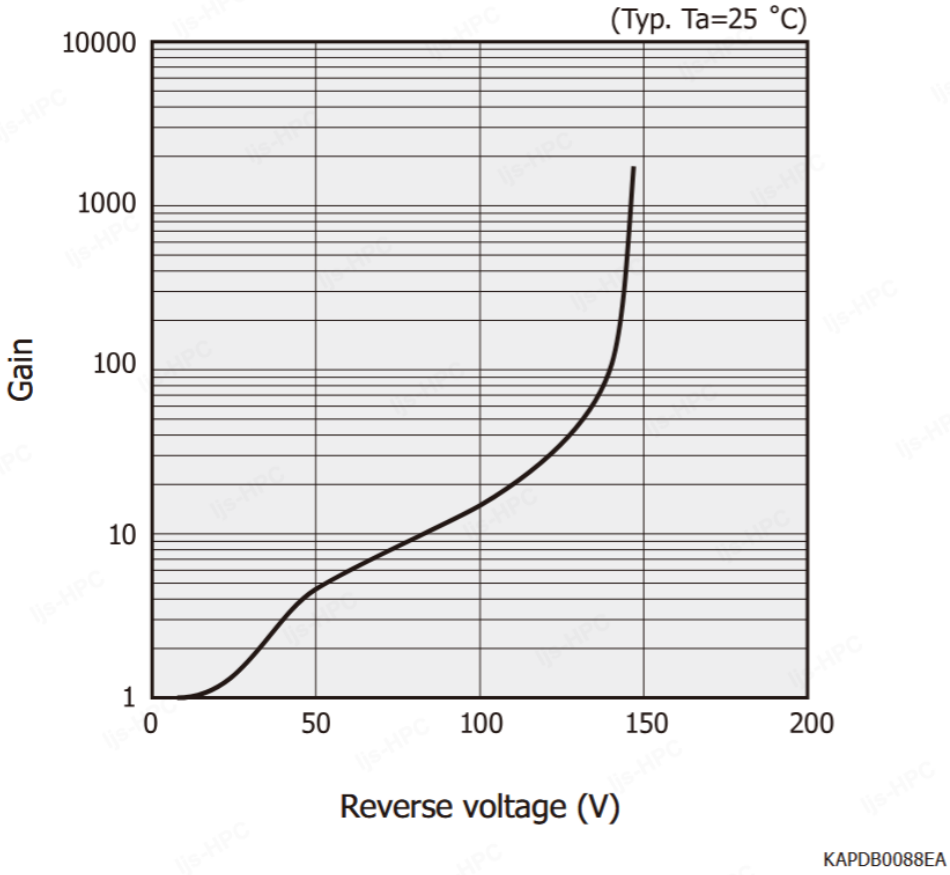


图 8 增益随反偏电压的变化
对于 50V 至 110V，在对数坐标下更像直线，符合指数函数规律。对于 110V 至 140V 左右则适用于理想突变结近似拟合。
APD 增益与反偏电压的拟合

APD 的增益 M 与反偏电压 V 的关系，核心是基于雪崩倍增效应的物理模型。
雪崩光电二极管（APD）的增益 M 与反偏电压 V 的关系，核心是基于雪崩倍增效应的物理模型。
下面我们举个实际的测试案例：

APD 型号：S3884
击穿电压值 Vb：164 V@25℃
推荐工作电压值 Vr：150 V@增益为 100
环境温度：25℃。

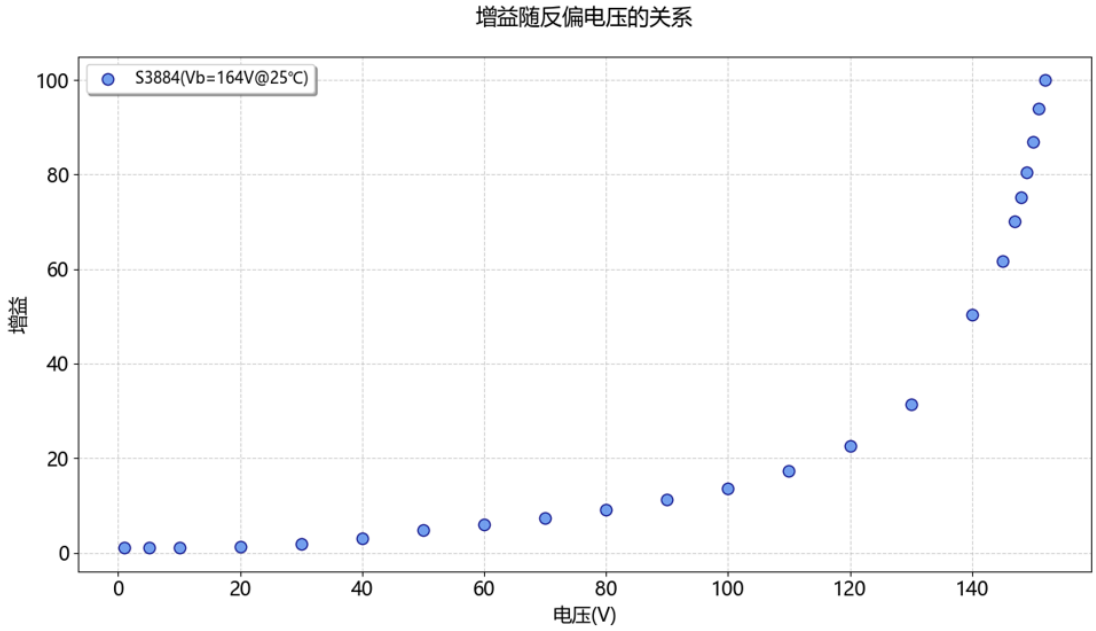


图 9 增益随反偏电压的关系
对于反偏电压远低于击穿电压的低增益区间时，我们使用以下指数函数公式进行拟合：

$$\boldsymbol{M} = a \times 10^{bV}$$

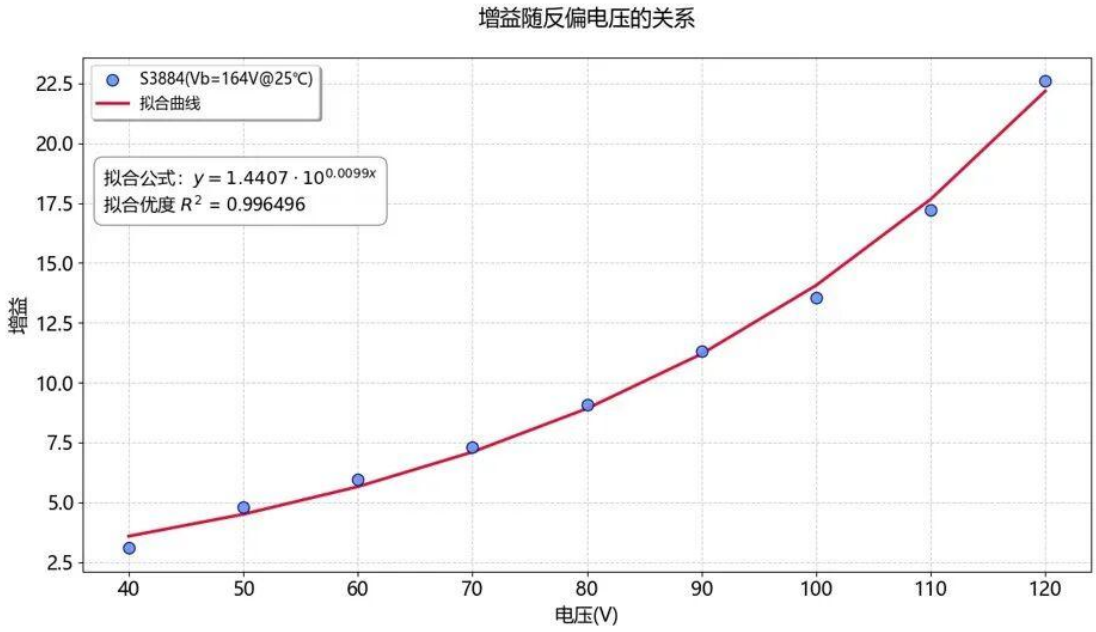


图 10 低增益区拟合
对于反偏电压接近但未达到击穿电压时，我们使用以下理想突变结近似公式进行拟合：

$$\boldsymbol{M} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\boldsymbol{V}}{Vb}\right)^{n}}$$

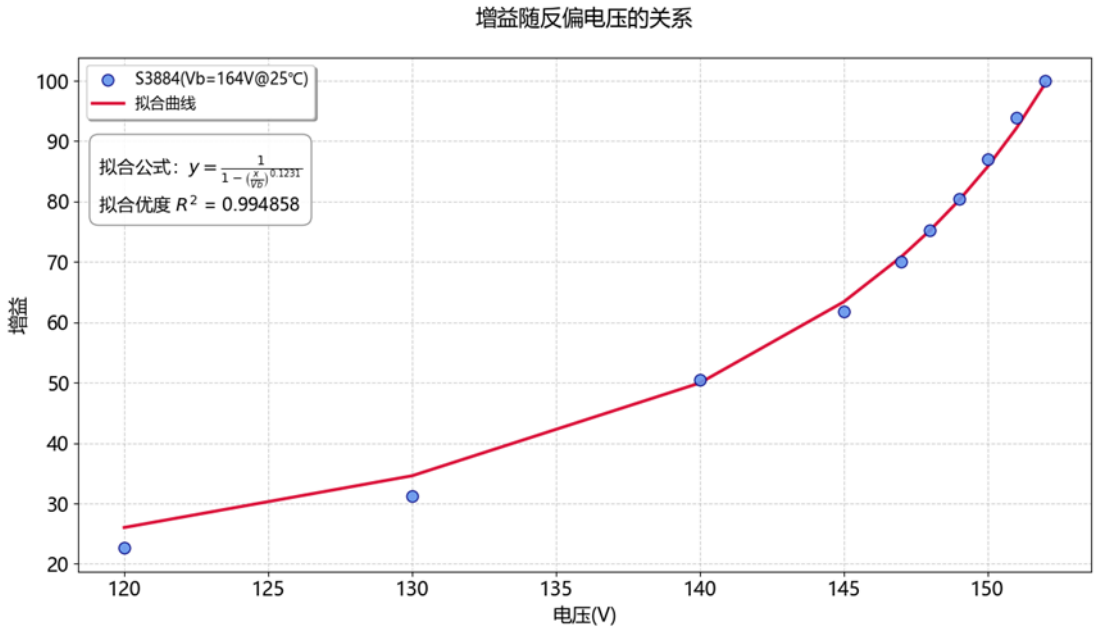


图 11 高增益区拟合

当 APD 工作在击穿电压附近时，增益急剧上升并且难以获取，我们可以注意到：暗环境下，当 APD 的反偏电压（158 V~161 V）接近击穿电压值（164 V）时，APD 的暗噪声会迅速提升。



图 12 击穿电压附近暗噪声迅速上升

APD 最佳工作点计算

APD 最佳工作点增益是指 APD 维持相对恒定带宽和稳定噪声输出时的最高增益水平，可以通过下图来进行估算，APD 的最佳工作增益通常在几十到一百左右。

$$M_{opt} = \left(\frac{4kT}{q(I_L + I_{dg}) \times R_L}\right)^{\frac{1}{2+X}}$$

M_{opt}：最佳增益
I_L：光电流
I_{dg}：待倍增的暗电流
R_L：负载电阻
X：过剩噪声指数

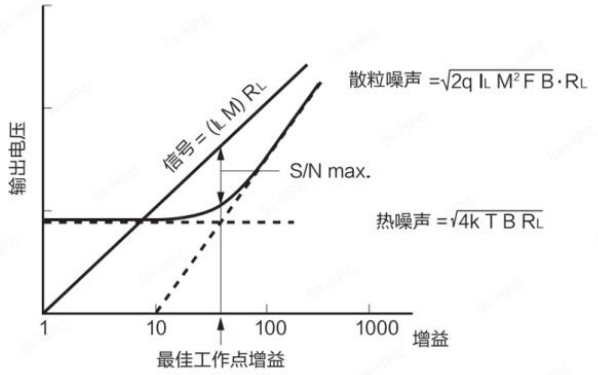


图 13 APD 最佳工作点增益计算

计算示例:

在温度 300K、光电流 1μA、负载电阻 50Ω、过剩噪声指数 0.3 的条件下，计算得到最佳增益约为 27.6。

此外，APD 的增益测试方法在此文章 APD 增益测量，2 分钟掌握核心方法中有详细说明。

总结：PD 与 APD 如何选型

PD 与 APD 是面向不同需求的解决方案，其核心区别在于是否具备内部增益。

- **PD (增益 = 1)**：结构简单稳定，成本较低，是强光信号探测应用的理想选择。通过反偏压优化和 PIN 结构，可满足大多数常规应用对速度和带宽的要求。
- **APD (增益 > 1)**：通过内部雪崩倍增效应提供高增益，专为微弱光信号探测设计，但需要更精细的电压控制和温度管理。