

微电子工艺与半导体材料实验·预习报告

唐延宇* PB22030853

2025 年 4 月 15 日

1 实验背景及相关领域前沿调研

半导体材料中非平衡少数载流子寿命是影响光电器件性能的重要参数,它直接关系到太阳能电池的光电转换效率、半导体探测器的灵敏度以及发光二极管的发光效率。本实验所采用的高频光电导衰减法(PCD, Photoconductance Decay)属于瞬态测量技术,通过测量光激发载流子复合过程中的电导变化,直接获取材料的少子寿命。

近年来,随着硅基太阳能电池效率的持续提升,对载流子寿命测量精度和空间分辨率提出了更高要求。前沿研究包括:

- 微波光电导衰减法(μ -PCD)的快速在线检测应用,可实现工艺线上晶片的实时质量监控;
- 表面钝化技术对有效寿命的显著提升,以及结合光声谱法的界面复合研究;
- 时间分辨光致发光(TRPL)与高频 PCD 方法的对比研究,以评估不同测试波段对深能级缺陷的灵敏度。

2 实验目的

1. 掌握高频光电导衰减法测量单晶硅中少数载流子寿命的基本原理与实验方法。
2. 深入理解少数载流子寿命与材料晶体质量、掺杂浓度及表面钝化状态之间的关系。
3. 熟悉高频信号源、检波器与脉冲示波器等仪器的操作及调试流程。

3 实验原理

当半导体样品受到光子能量大于禁带宽度的脉冲光照射时,会在样品内部产生相等浓度的非平衡电子和空穴,记为 $\Delta n = \Delta p$,其载流子迁移率分别为 μ_n 和 μ_p 。载流子产生导致样品电导率增加

$$\Delta\sigma = q(\mu_n + \mu_p)\Delta n, \quad (1)$$

其中 q 为电子电荷。光源关闭后,非平衡载流子将按指数规律复合,载流子浓度随时间衰减为

$$\Delta n(t) = \Delta n_0 \exp(-t/\tau), \quad (2)$$

τ 为少子寿命。由此可得电导率变化也满足

$$\Delta\sigma(t) = \Delta\sigma_0 \exp(-t/\tau). \quad (3)$$

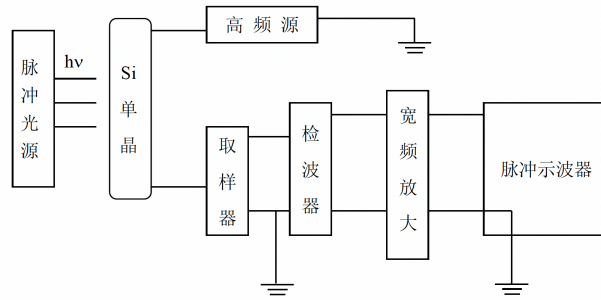


图 1: 高频光电导测量原理示意图

在高频光电导测量装置中，高频源对样品施加恒压，高频电流幅值随电导变化而改变。当脉冲光照射样品时，附加电导使电流增加 ΔI ；光停止后， ΔI 按指数规律衰减，其衰减时间常数即为 τ 。示波器上显示的幅度调制信号满足

$$\Delta V(t) = \Delta V_0 \exp(-t/\tau), \quad (4)$$

通过拟合指数衰减曲线即可求得样品的少数寿命。

4 实验仪器

- DSY-II 单晶少数寿命测试仪 (含高频源、脉冲光源、取样器、检波器及宽频放大器)。
- 脉冲示波器, 用于观察指数衰减波形并读取时间常数。
- 红外脉冲光源 (F71 型, 波长约 $1.09 \mu\text{m}$, 脉宽 $60 \mu\text{s}$, 闪光频率 $20 \sim 30 \text{ Hz}$)。
- 高频同轴连接线及取样探头。
- 清洁用蒸馏水及软布, 用于样品电极处的导电增强。

5 实验内容与操作步骤

1. **仪器连接与预热:** 将高频输出插座 (CZ) 通过同轴线连接至示波器的 Y 输入端, 开启示波器; 开启测试仪总电源 (KD), 预热 15 分钟。
2. **样品准备:** 将清洗干净并自然风干的单晶硅样品置于取样器电极之间, 为提高取样灵敏度, 可在电极处涂抹少量蒸馏水, 注意避免水量过多。
3. **参数调整:** 按下脉冲电路电源开关 (K), 旋转光源电压调节旋钮 (KW) 至适当电压 (一般不超过 7 V 连续工作), 并在关机时将旋钮逆时针旋至最低位置。
4. **信号优化:** 在示波器上调整 Y 轴灵敏度、X 轴扫描速度及触发条件, 采用内同步方式, 使指数衰减波形稳定、清晰。
5. **数据采集:** 触发脉冲光源, 记录示波器上多组 ΔV 曲线; 对每组曲线选取指数衰减部分进行拟合, 读取相应时间常数 τ 。
6. **结果处理:** 对三组寿命值取平均, 作为样品的少数寿命, 并分析表面复合或注入条件对测量结果的影响。

微电子工艺与半导体材料

唐延宇* PB22030853

2025 年 5 月 22 日

摘要

半导体中的非平衡少数载流子寿命它对半导体太阳能电池的换能效率、半导体探测器的探测率和发光二极管的发光效率等都有影响。因此，掌握半导体中少数载流子寿命的测量方法是十分必要的。本实验通过测量少子寿命实验和 Bonding 实验，帮助掌握微电子工艺和半导体材料相关的基本实验方法。

关键词：少子寿命；高频光电导衰减法；小注入条件；Bonding

1 引言

半导体中少数载流子寿命 (τ) 是一个关键的物理参数，它直接反映了半导体材料的质量，如重金属含量和晶体结构的完整性。这一参数对于半导体器件的性能有着至关重要的影响，例如影响太阳能电池的转换效率、探测器的探测率以及发光二极管的发光效率等。因此，准确测量少子寿命对于半导体材料研究和器件制造具有重要意义。高频光电导衰减法 (High-Frequency Photoconductive Decay, HFPCD) 因其便捷性和适用于特定样品 (如 Si 单晶) 的质量检测，成为一种常用的测量技术。

1.1 基本原理

非平衡载流子的产生与复合 当一束能量大于半导体材料禁带宽度 (E_g) 的光照射到半导体样品上时，价带中的电子会吸收光子能量跃迁到导带，从而产生额外的电子-空穴对。这些由光照激发产生的、超过热平衡状态下载流子浓度的载流子被称为非平衡载流子。若样品中没有明显的陷阱效应 (即陷阱对载流子的捕获和释放过程不占主导)，那么产生的非平衡电子浓度 (Δn) 和非平衡空穴浓度 (Δp) 在体复合占主导的情况下是相等的，即：

$$\Delta n = \Delta p$$

并且它们的寿命在体复合机制下也是相同的。

当外部光照停止后，这些被激发的非平衡载流子会通过各种复合机制逐渐恢复到热平衡状态。主要的复合机制包括辐射复合、俄歇复合以及通过复合中心 (如缺陷、杂质) 进行的 Shockley-Read-Hall (SRH) 复合。在间接带隙半导体 (如硅) 中，SRH 复合通常是主要的复合途径。非平衡载流子浓度随时间的衰减过程反映了这些复合过程的速率。

电导率的变化与测量基础 半导体的电导率 (σ) 取决于其内部载流子浓度和迁移率。在热平衡状态下，电导率 σ_0 可以表示为：

$$\sigma_0 = q(n_0\mu_n + p_0\mu_p)$$

*近代物理系, 19942431972, yanyutang@mail.ustc.edu.cn

其中 q 是电子电荷的大小 (约 1.602×10^{-19} 库仑), n_0 和 p_0 分别是热平衡时的电子和空穴浓度, μ_n 和 μ_p 分别是电子和空穴的迁移率.

当光照产生非平衡载流子后, 总的电子浓度变为 $n = n_0 + \Delta n$, 总的空穴浓度变为 $p = p_0 + \Delta p$. 此时, 样品的电导率变为:

$$\sigma = q((n_0 + \Delta n)\mu_n + (p_0 + \Delta p)\mu_p)$$

因此, 由光照引起的电导率增量 (光电导) $\Delta\sigma$ 为:

$$\Delta\sigma = \sigma - \sigma_0 = q(\mu_n\Delta n + \mu_p\Delta p)$$

对于例如 p 型半导体, 电子是少数载流子 (Δn), 空穴是多数载流子 (Δp). 尽管非平衡电子和空穴的产生是成对的, 但少数载流子寿命的测量通常更关注 Δn 的衰减, 因为多数载流子浓度的相对变化可能很小. 然而, 在这个基本描述中, 假设 $\Delta n = \Delta p$.

非平衡载流子浓度的瞬态衰减 当脉冲光照停止后 ($t \geq 0$), 这些额外的非平衡载流子将通过复合逐渐消失. 在满足一定条件下 (例如, 低注入水平、单一复合机制主导), 非平衡少数载流子浓度随时间的衰减遵循一级动力学过程, 即呈指数规律衰减. 以非平衡空穴为例 (假设是 n 型半导体中的少数载流子, 或在一般情况下讨论非平衡载流子的衰减), 其浓度随时间的变化可以表示为:

$$\frac{d(\Delta p)}{dt} = -\frac{\Delta p}{\tau}$$

积分上式可得:

$$\Delta p(t) = \Delta p_0 e^{-t/\tau}$$

其中 Δp_0 是光照脉冲结束瞬间 ($t = 0$) 的初始非平衡载流子浓度, τ 被定义为少数载流子寿命. 它代表了非平衡载流子浓度衰减到其初始值的 $1/e$ (约 36.8%) 时所需要的时间, 是衡量载流子在复合前平均存在时间的物理量.

由于电导率的增量 $\Delta\sigma$ 与非平衡载流子浓度成正比, 因此 $\Delta\sigma$ 也将以相同的指数规律随时间衰减:

$$\Delta\sigma(t) = \Delta\sigma_0 e^{-t/\tau}$$

其中 $\Delta\sigma_0$ 是 $t = 0$ 时刻由光脉冲产生的初始电导率增量. 单晶寿命测试仪正是基于这一原理工作的.

高频测量技术与信号获取 在高频光电导衰减法中, 被测样品接入一个高频交流电路中, 通常是高频恒压源. 选择高频电流进行测量的原因之一是可以有效减小电极接触电阻和势垒电容对测量的影响, 并且易于通过电磁耦合 (例如使用感应线圈作为取样器) 实现非接触式测量, 从而避免了制作欧姆接触的复杂过程, 对于快速检测非常有利.

当红外光源 (例如 F71 型 $1.09 \mu\text{m}$ 红外光源) 的脉冲光照射样品时, 样品内产生非平衡光生载流子, 导致样品电导率增加, 即样品电阻减小. 由于实验装置中的高频源通常设计为恒压输出, 根据欧姆定律, 流经样品的高频电流幅值将会增加一个量 ΔI .

$$I + \Delta I = \frac{V}{R_0 - \Delta R} \approx \frac{V}{R_0} \left(1 + \frac{\Delta R}{R_0}\right) = I_0 \left(1 + \frac{\Delta R}{R_0}\right) \quad (\text{当 } \Delta R \ll R_0)$$

或者更直接地, 电流增量与电导增量成正比. 当光照消失后, ΔI 会随着非平衡载流子的复合而逐渐衰减, 其衰减速度直接取决于少数载流子寿命 τ .

在小注入条件下 (即 $\Delta n, \Delta p \ll n_0 + p_0$, 光生载流子浓度远小于多数载流子浓度), ΔI 的衰减也严格遵循指数规律. 此时, 通过取样器 (例如耦合线圈或直接测量样品两端电压变化的一部分) 感应或检测到的电压变化 $\Delta V(t)$ 也将与 $\Delta I(t)$ (以及 $\Delta\sigma(t)$) 成正比, 因此也按同样的指数规律衰减:

$$\Delta V(t) = \Delta V_0 e^{-t/\tau}$$

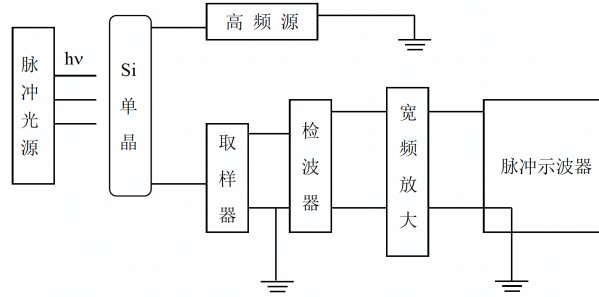


图 1: 高频光电导测量原理示意图

其中 ΔV_0 是对应于 $\Delta\sigma_0$ 的初始电压变化信号的幅值。

这个随时间衰减的电压信号 $\Delta V(t)$ 是一个被指数衰减包络调制的高频信号。该信号首先需要经过检波器解调（去除高频载波，提取出衰减的包络信号）和高频滤波（进一步滤除残余的高频成分和噪声）。之后，这个包络信号再经过宽频放大器放大，最后输入到脉冲示波器上进行显示。示波器上直接将显示出一条指数衰减曲线。

少数载流子寿命的提取 从示波器上显示的指数衰减曲线 $\Delta V(t) = \Delta V_0 e^{-t/\tau}$ 中，可以通过多种方式提取少数寿命 τ 。最直接的方法是找到信号幅值从其初始峰值 ΔV_0 下降到 $\Delta V_0/e$ (约为 $\Delta V_0 \times 0.368$) 时所经过的时间，这个时间即为少数载流子寿命 τ 。

如文档图 2 和图 5 所示，如果在示波器屏幕上，信号的峰值为 n 格（或某个电压值 V_0 ），那么当信号衰减到 n/e 格（或 V_0/e ）时，对应的时间轴上的时间间隔就是少数寿命 τ 。例如，如果示波器荧光屏上最大讯号为 n 格（一格为 1cm），在衰减曲线上获得纵坐标为 $n/e \approx n/2.718 \approx 0.368n$ 格（如文档中取 1.48 格作为 $4/e$ 的近似值，若最大信号是 4 格）。如果对应的横坐标（时间）读数为 x （例如 x 格，每格代表时间 t_{div} ），则寿命 $\tau = x \times t_{div}$ 。

需要注意的是，由于表面复合以及光照不均匀等因素的影响，衰减曲线在初始的一小部分可能并非严格的指数形式（可能存在高次模衰减）。因此，在读取数据时，应尽量选取曲线中表现为纯指数衰减的部分进行测量和计算，即在操作中可能需要去除波形初始衰减较快的部分。

1.2 小注入条件与测量准确性

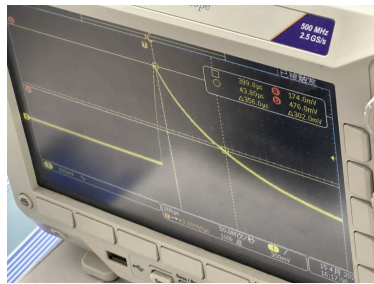
为了确保测量的准确性并简化理论分析，实验通常要求在“小注入条件”下进行。小注入条件指的是光生非平衡少数载流子的浓度远小于样品中多数载流子的平衡浓度（例如，对于 p 型半导体， $\Delta n \ll p_0$ ）。在此条件下，少数载流子寿命可以被认为是基本恒定的，不随注入水平变化。如果注入水平过高（大注入），复合机制可能会发生改变，例如双分子复合（电子和空穴直接复合）的比例增加，导致寿命的定义和测量变得复杂。因此，实验中应适当调节光源强度（例如，在可读数的前提下，尽量调小光源电压），并可能使用较大的示波器倍率来观察小信号，以满足小注入条件。

2 实验装置与内容

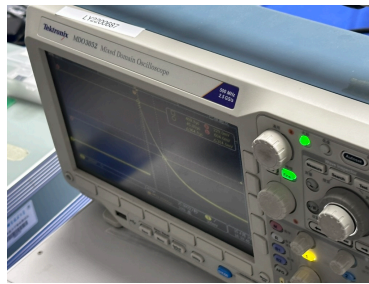
高频光电导衰减法测量装置示意图如图 1 所示。本实验的主要内容即使用不同的 Si 材料样品，获得 Si 材料在光照下的 $\Delta V - t$ 曲线。对于每一种材料，读取了不同测试电压下三组寿命值，给出 Si 材料的寿命。

3 实验结果

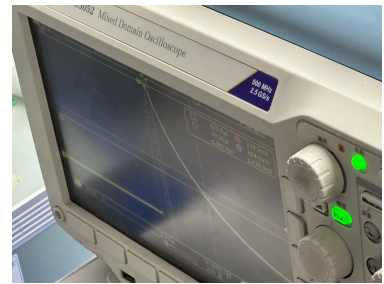
在以下结果分析过程中，我们认为半导体的少子寿命不随外加电压变化，（实际可能存在依赖），因此可以直接取平均值作为该材料的少子寿命。实验结果如图2,3,4,5所示。



(a) $\tau = \Delta = 356.0 \mu s$

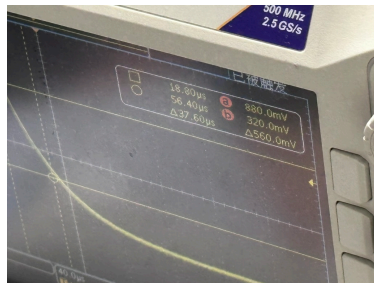


(b) $\tau = \Delta = 356.0 \mu s$

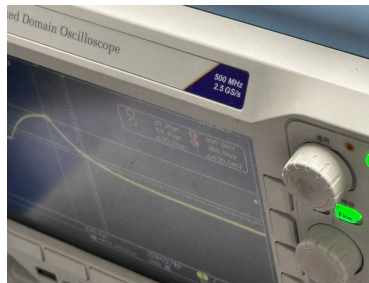


(c) $\tau = \Delta = 380.0 \mu s$

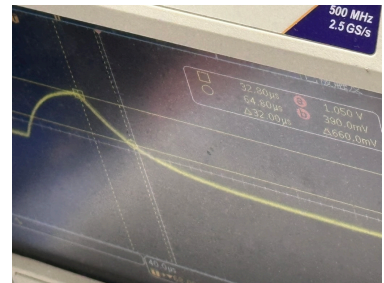
图 2: 圆形 Si 片样品测试结果, 不同电压下平均少子寿命为 $\tau = 366.67 \mu s$ 。



(a) $\tau = \Delta = 37.60 \mu s$

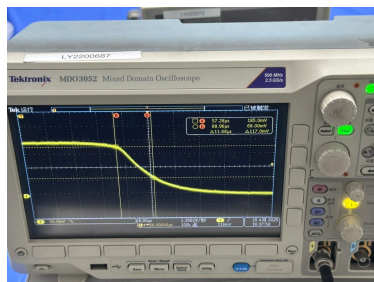


(b) $\tau = \Delta = 35.20 \mu s$

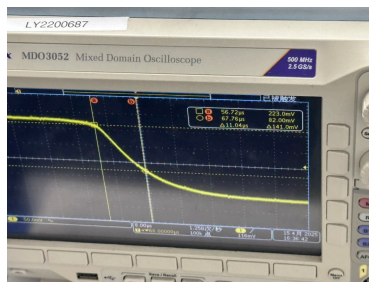


(c) $\tau = \Delta = 32.00 \mu s$

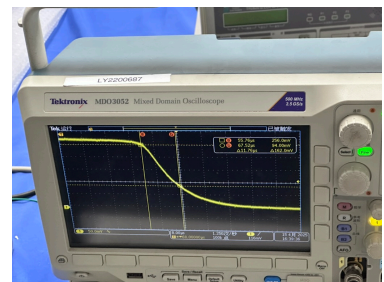
图 3: 方形 Si 片样品测试结果, 不同电压下平均少子寿命为 $\tau = 34.93 \mu s$ 。



(a) $\tau = \Delta = 11.68 \mu s$



(b) $\tau = \Delta = 11.04 \mu s$



(c) $\tau = \Delta = 11.76 \mu s$

图 4: 第三种 Si 片样品测试结果, 不同电压下平均少子寿命为 $\tau = 11.49 \mu s$ 。

4 实验讨论（思考题）

1. 简述少子寿命概念。

在半导体材料中，当通过光照或电注入等方式产生过剩载流子时，这些非平衡的少数载流子（例如 P 型半导体中的电子，或 N 型半导体中的空穴）会在材料中渡越和复合。少子寿命 (Minority Carrier Lifetime, τ) 指的是这些过剩的少数载流子在复合之前能够存在的平均时间。它是衡量半导体材料质量和器件性能的重要参数。

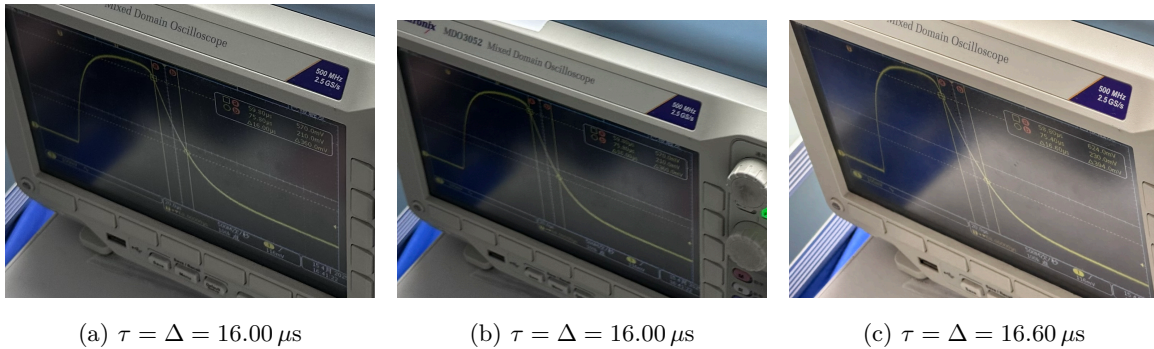


图 5: 第四种形 Si 片样品测试结果, 不同电压下平均少子寿命为 $\tau = 16.2 \mu\text{s}$.

2. 当样品含有重金属且存在缺陷时, 它们对寿命有影响吗?

有显著影响. 重金属杂质 (如金、铁、铜等) 和晶体缺陷 (如位错、空位、晶界等) 通常会在半导体的禁带中引入能级, 形成复合中心. 这些复合中心会显著提高少数载流子的复合速率, 从而缩短少子寿命. 因此, 样品中重金属含量越高、缺陷密度越大, 其少子寿命通常越短.

3. 什么是小注入的条件?

小注入 (Low-Level Injection) 条件指的是在半导体中, 通过外部激励 (如光照或电注入) 产生的过剩少数载流子浓度 (Δn 或 Δp) 远小于多数载流子浓度 (n_0 或 p_0) 的情况. 数学上可以表示为: 对于 P 型半导体, $\Delta n \ll p_0$; 对于 N 型半导体, $\Delta p \ll n_0$. 在小注入条件下, 多数载流子的浓度可以近似认为保持不变, 这简化了半导体器件中载流子输运和复合过程的分析.

4. 是否可选择可见光做光源?

在测量半导体材料的少子寿命时, 选择光源的原则是光源发出的光子能量必须大于或等于半导体的禁带宽度 (E_g), 这样才能有效地产生电子-空穴对, 产生过剩载流子. 但是, 光子能量也不能与半导体的导带匹配, 此时会产生过量电子-空穴对, 导致小注入条件无法得到满足. 因此:

- 对于禁带宽度小于可见光光子能量的半导体材料 (例如硅, 其禁带宽度约为 1.12 eV), 可见光是合适的光源. 实际上, 很多硅材料的少子寿命测量会使用可见光或近红外光源.
- 对于宽禁带半导体材料, 例如某些 III-V 族化合物半导体或氮化镓 (GaN , $E_g \approx 3.4 \text{ eV}$), 可见光的能量可能不足以有效激发产生足够的过剩载流子, 此时需要选择波长更短、能量更高的紫外光源.

所以, 是否能选择可见光作为光源取决于被测半导体材料的禁带宽度.

5. Bonding (键合) 对作用

在半导体器件中, Bonding (键合) 是将不同材料或器件连接在一起的过程. 它通常用于将半导体芯片与封装基板、引线框架或其他器件连接, 实现芯片与基板之间的电气连接和信息传递. Bonding 的质量直接影响器件的性能和可靠性. 良好的 Bonding 可以降低接触电阻, 提高热传导效率, 增强机械强度, 并减少应力和缺陷的产生. 相反, 劣质的 Bonding 可能导致接触不良、热失效、信号衰减等问题. 因此, 在微电子工艺中, Bonding 是一个至关重要的步骤.

6. 对实验室中 Bonding 机的改进建议与实现方法

在实验室中, Bonding 机的改进建议可以包括以下几个方面:

- 采用更高精度的温控系统, 确保在 Bonding 过程中温度的稳定性和均匀性.
- 引入更精确的压力传感器和控制系统, 以实现 Bonding 压力的实时监测和调节. 从而提高一焊与二焊的成功率.

- (c) 选择更适合的键合材料, 以提高 Bonding 的可靠性和性能.
- (d) 在 Bonding 机上增加实时监测功能, 如热成像、声发射等, 以便及时发现潜在问题并进行调整.
- (e) 在 Bonding 前进行更彻底的表面清洁, 以去除氧化物和污染物, 提高 Bonding 的质量, 并减少焊笔堵塞的可能.
- (f) 重新设计 Bonding 机的结构和布局, 以提高操作的便利性和安全性.

参考文献

- [1] 中国科学技术大学物理实验教学中心. 微电子工艺与半导体材料实验. 实验讲义. 2025.04.15.