

实验四 半导体激光器与探测器特性测量

一 实验目的

1. 掌握半导体激光器和光电探测器的工作原理，及其特性测量方法。
2. 掌握发光二极管和半导体激光二极管的发光原理和相关特性。
3. 了解PIN光电二极管和雪崩光电二极管的工作原理和相关特性。

二 实验原理

光纤通信中的有源光电子器件主要涉及光的发送和接收，发光二极管（Light-Emitting Diode，简称LED）和半导体激光二极管（Laser Diode，简称LD）是最重要的光发射器件，PIN光电二极管和APD光电二极管则是最重要的光接收器件[13, 14, 15]。

2.1 发光二极管和半导体激光二极管

LED是一种直接注入电流型的电致发光器件，其机理在于半导体内部受激电子从高能级回复到低能级时发射出光子，属自发辐射跃迁。LED为非相干光源，具有较宽的谱宽（通常为 $30 \sim 60\text{nm}$ ）和较大的发射角（ $\approx 100^\circ$ ），常用于低速、短距离的光源系统。

相对于LED，LD是通过受激辐射发光，是一种阈值器件。LD不仅能产生高功率（ $\geq 10\text{mW}$ ）辐射，而且输出光发散角窄，与单模光纤的耦合效率高（约 $30\% \sim 50\%$ ），辐射光谱线窄（ $\Delta\lambda = 0.1 \sim 1.0\text{nm}$ ），适用于高速率的工作条件。载流子复合寿命短，能进行高速（ $> 20\text{GHz}$ ）的直接调制，非常适合于高速长距离光纤通信系统的光源。

使粒子数反转从而产生光增益是激光器稳定工作的必要条件，对于处于泵浦条件下的原子系统，当满足粒子数反转条件时将会产生占优势的（超过受激吸收）受激辐射。在半导体激光器中，这个条件是通过向P型和N型限制层重掺杂，使费密能级间隔在PN结正向偏置下超过带隙实现的。当有源层载流子浓度超过一定值时（称为透明值），就实现了粒子数反转，由此在有源区产生光增益，在半导体内传播的输入信号将得到放大。如果将增益介质放入光学谐振腔中提供反馈，就可以得到稳定的激光输出。

LED和LD的P-I特性

图 4.1 (a) 和 (b) 分别是LED和LD的 $P-I$ 特性曲线。LED是自发辐射光，所以 $P-I$ 曲线的线性范围较大，没有阈值条件。LD有一阈值电流 I_{th} ，当 $I > I_{th}$ 时才发出激光。当驱动电流在 I_{th} 以上时，光功率 P 随 I 线性增加。

阈值电流是评定半导体激光器性能的一个主要参数，本实验采用两段直线拟合法对其进行测定。如图 4.2所示，将阈值前与后的两段直线分别延长并相交，其交点所对应的电流即为阈值电流 I_{th} 。

发光效率是描述LED和LD电光能量转换的重要参数，发光效率可分为功率效率和量子效率。功率效率定义为发光功率和输入电功率之比，以 η_w 表示。量子效率分为内量子效率和外量子效率。内量子效率定义为单位时间内辐射复合产生的光子数与注入PN结的电子—空穴对数之比。外量子效率定义为单位时间内输出的光子数与注入到PN结的电子—空穴对数之比。

LED和LD的光谱特性

LED没有光学谐振腔选择波长，它的光谱是以自发辐射为主的光谱，图 4.3为LED的典型光谱曲线。发光光谱曲线上发光强度最大处所对应的波长为发光峰值波长 λ_P ，光谱曲线上两个半光强点所对应的波长差 $\Delta\lambda$ 为LED谱线宽度（简称谱宽），其典型值在 $30 \sim 40\text{nm}$ 之间。由图 4.3可以看到，当器件工作温度升高时，光谱曲线随之向右移动，从 λ_P 的变化可以求出LED的波长温度系数。

激光二极管的发射光谱取决于激光器光腔的特定参数，大多数常规的增益或折射率导引器件具有多个峰的光谱，如图 4.4所示。激光二极管的波长可以定义为它的光谱的统计加权。在规定输出光功率

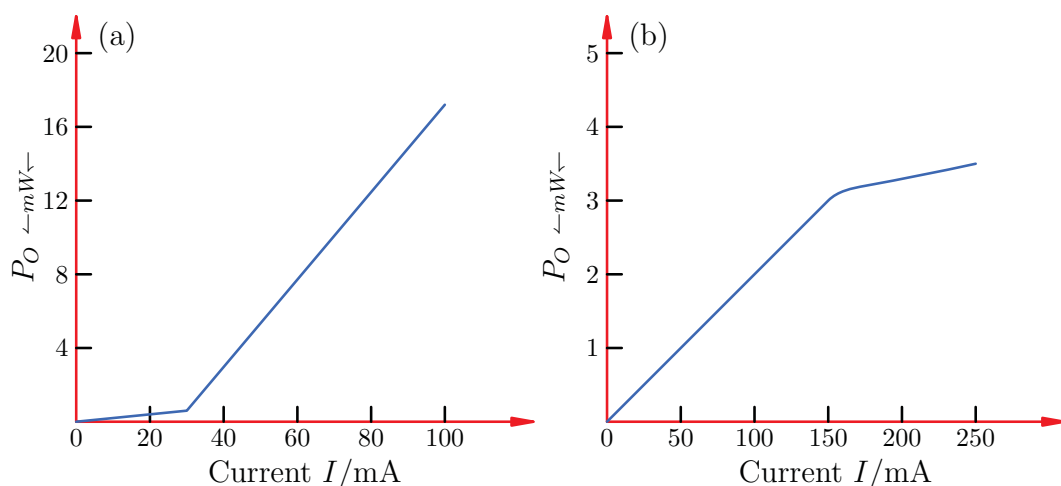


图 4.1: (a) LD的P-I特性曲线; (b) LED的P-I特性曲线。

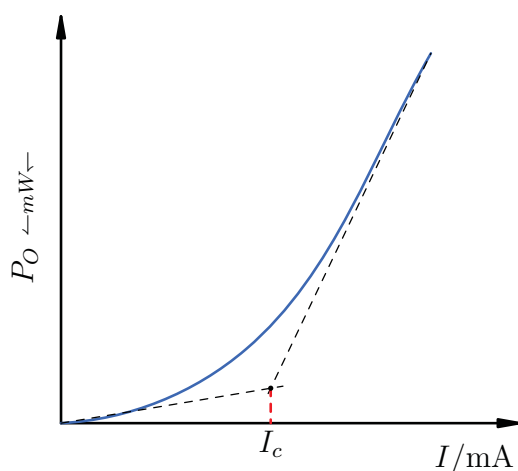


图 4.2: 两段直线拟合法测量LD阈值电流原理图。

时, 光谱内若干发射模式中最大强度的光谱波长被定义为峰值波长 λ_P , 对诸如DFB、DBR型LD来说, 它的 λ_P 相当明显。一个激光二极管能够维持的光谱线数目取决于光腔的结构和工作电流。

LED和LD的调制特性

在特定的直流正向工作电流下, 对LED进行数字脉冲或模拟信号电流调制, 便可实现对输出光功率的调制。LED有两种调制方式, 即数字调制和模拟调制, 图 4.5给出这两种调制方式的原理。调制频率(调制带宽)是光通信用LED的重要参数之一, 它关系到LED在光通信中的传输速度大小, LED因受到有源区内少数载流子寿命的限制, 其调制的最高频率通常只有几十兆赫兹, 从而限制了LED在高比特速率系统中的应用, 但是, 通过合理设计和优化的驱动电路, LED也有可能用于高速光纤通信系统。调制带宽是衡量LED的调制能力, 其定义是在保证调制度不变的情况下, 当LED输出的交流光功率下降到某一参考频率值的一半时(-3dB)的频率就是LED的调制带宽。

在LD的调制过程中存在以下两种物理机制影响其调制特性:

1. 增益饱和和效应。当注入电流增大, 因而光子数 P 增大时, 增益 G 出现饱和现象, 饱和的物理机制源于空间烧孔、频谱烧孔、载流子加热和双光子吸收等因素。谱烧孔也称带内增益饱和。这些因素导致 P 增大时 G 的减小。
2. 线性调频效应。当注入电流为时变电流对激光器进行调制时, 载流子数、光增益和有源区折射率均随之而变, 载流子数的变化导致模折射率和传播常数的变化, 因此产生了相位调制, 它导致了与单纵模相关的光(频)谱加宽, 又称线宽增强因子。

2.2 光电二极管

光电探测器的作用是完成光电转换。光纤通信所用的光电探测器是半导体光电二极管。它们利用半导体物质吸收光子后形成的电子-空穴对把光功率转换成光电流。常用的有PIN光电二极管和APD

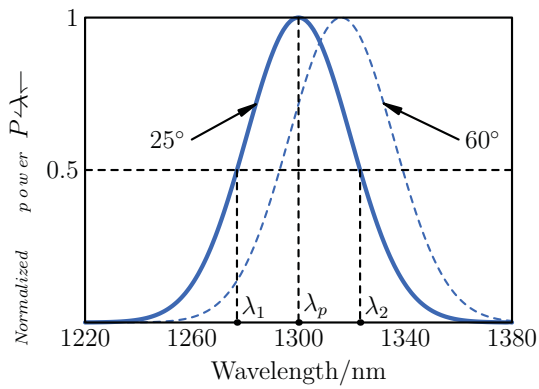


图 4.3: LED光谱特性曲线。

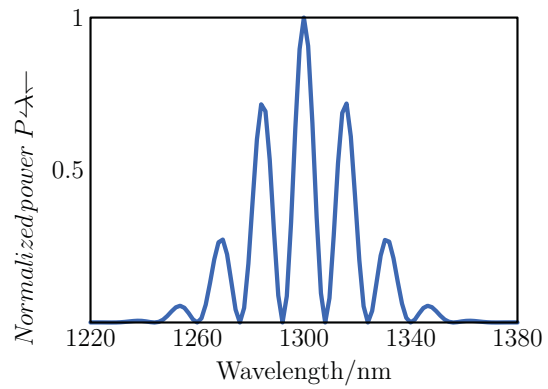


图 4.4: LD光谱特性曲线。

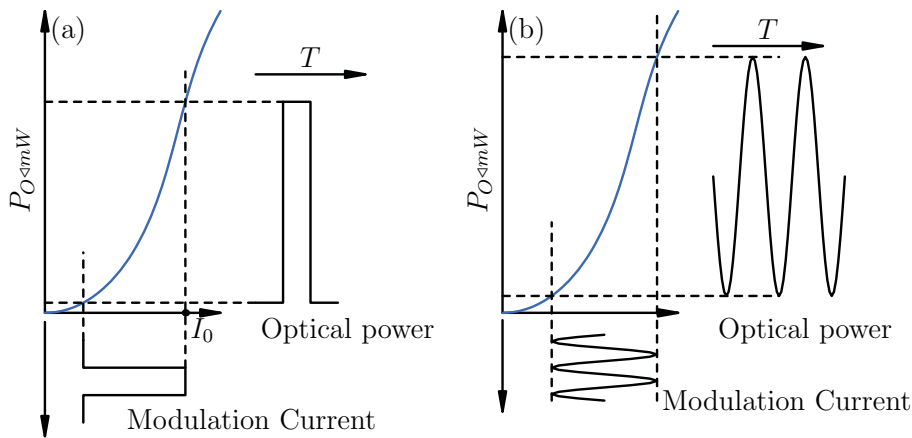


图 4.5: LED的调制特性。

(Avalanche Photodiode) 光电二极管，后者有放大作用。在短波长采用硅材料，在长波长采用锗材料或InGaAsP材料。由于从光纤中传过来的光信号一般是非常微弱的，因此对光检测器提出了如下的一些要求：

1. 在系统的工作波长上要有足够高的响应度，即对一定的入射光功率，光检测器能输出尽可能大的光电流；
2. 响应速度快，频带宽；
3. 噪声小；线性好，保真度高；
4. 体积小，使用寿命长。

满足上述要求、适合于光纤通信系统使用的光检测器主要有半导体PIN光电二极管、雪崩光电二极管、光电晶体管等。

半导体PN结的光电效应

半导体光电检测器的核心是PN结的光电效应，PN结光电二极管是最简单的半导体光检测器。

图4.6(a)所示是一个未加电压的PN结，它是一个由不可移动的带正、负电荷的离子组成的耗尽层，或称作势垒区。当以适当波长的光照射PN结时，P型和N型半导体材料将吸收光能。如果光子能量 $hf \geq Ke$ 时，则光子将被吸收，使价带中的电子受激跃迁到导带中，而在价带中留下空穴，如图4.6(b)所示，这一过程称为光吸收。因光照射而在导带和价带中产生的电子和空穴称为光生载流子。

产生在耗尽层的光生载流子在内建场的作用下作漂移运动：空穴向P区方向运动；电子向N区方向运动，它们在PN结的边缘被收集。另外，耗尽层外的光生少数载流子会发生扩散运动：P区中的光生电子向N区扩散；N区中的光生空穴向P区扩散。在扩散的同时，一部分光生少数载流子将被多数载流子复合掉。由于这些区域的电场很小，甚至可以称为无场区，光生少数载流子在这些区域扩散速率较慢，只有小部分能扩散到耗尽层，继而在内建场的作用下分别快速漂移到对方区域。这样，在P区就出现了过剩空穴的积累，N区出现了过剩电子的积累，于是在耗尽层的两侧就产生了一个极性如图4.6(c)所示的光生电动势。这一现象称为光生伏特效应。产生于耗尽层的电子和空穴也要产生光生伏特效应。基于这一效应，如果将PN结的外电路构成回路，则外电路中会出现信号电流。这种由光照射激发的电流称为光电流。

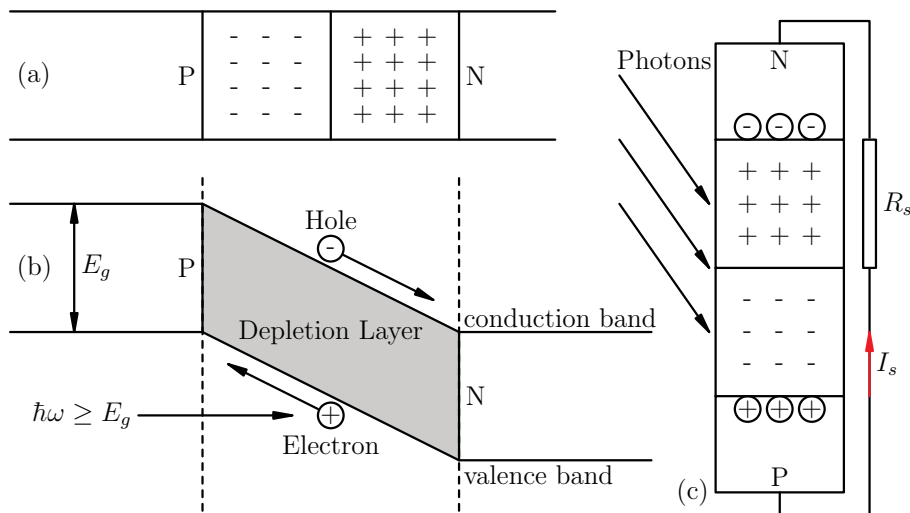


图 4.6: PN结光电二极管。(a) PN结; (b) 能带图; (c) PN结外电路构成回路。

照射到半导体材料上的光，由于材料的吸收等原因使光随着深入材料的深度的增加而逐渐减弱。半导体内部距入射表面 d 处的光功率为

$$P(d) = P(0) \exp(-\alpha d) \quad (4.1)$$

式中： $P(0)$ 为照射到材料表面的平均光功率； α 为半导体材料的光吸收系数， α 决定了入射光深入材料内部的深度，如果 α 很大，则光子只能进入半导体表面的薄层中。吸收入射光子并产生光生载流子的区域称为光吸收区；耗尽层及其两侧宽度为载流子扩散长度的区域，称为作用区。在吸收区产生的光生少数载流子只有一部分进入作用区，这一部分光生载流子以较慢的速度扩散至耗尽层，进入耗尽层后在内建电场作用下作快速漂移运动，从而产生光生伏特效应。由于在作用区内，光生少数载流子的扩散速度较慢，从而影响了产生光生伏特效应的速度，导致PN结对光信号响应速度减慢。如果输入的光信号为光脉冲；则输出的光电脉冲会产生较长的拖尾。

由上述分析可见，光在耗尽层外被吸收使得光电转换效率降低、光电响应速度变慢。为此，必须设法加宽耗尽层，使照射光子尽可能被耗尽层吸收。给PN结加负偏压有助于加宽耗尽层。负偏压在势垒区产生的电场与内建场方向一致，使势垒区电场增强，加强了漂移运动，而且N区的电子向正电极运动并被中和，P区的空穴向负电极运动并被中和，这样耗尽层被加宽。

除了加负偏压的方法外，还可以通过减小P区和N区的厚度来减小载流子的扩散时间，减少在P区和N区被吸收的光能，以及降低半导体的掺杂浓度，来加宽耗尽层，以此来提高器件的响应速度。这种结构就是常用的PIN光电二极管。

PIN光电二极管

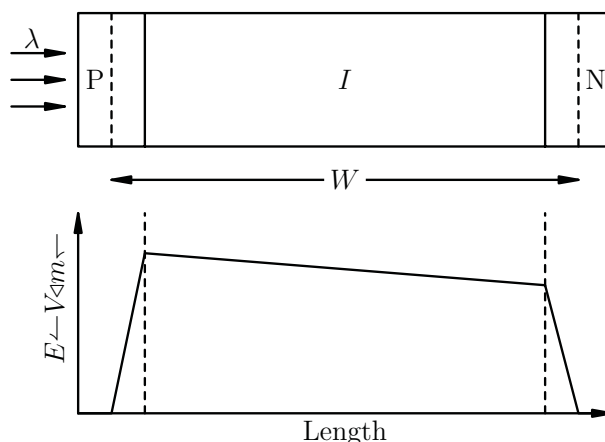


图 4.7: PIN光电二极管的结构和它在反向偏压下的电场分布。

图4.7是PIN光电二极管的结构和它在反向偏压下的电场分布。在高掺杂P型和N型半导体之间生长一层本征半导体材料或低掺杂半导体材料，称为本征层（I层）。在半导体PN结中，掺杂浓度和耗尽层宽度

有如下关系：

$$\frac{L_P}{L_N} = \frac{D_N}{D_P} \quad (4.2)$$

其中： D_P 和 D_N 分别为P区和N区的掺杂浓度； L_P 和 L_N 分别为P区和N区的耗尽层的宽度。在PIN中，如对于P层和I层（低掺杂N型半导体）形成的PN结，由于I层近于本征半导体，有

$$D_N \ll D_P, \quad L_P \ll L_N \quad (4.3)$$

即在I层中形成很宽的耗尽层。由于I层有较高的电阻，因此电压基本上降落在该区，使得耗尽层宽度 W 可以得到加宽，并且可以通过控制I层的厚度来改变。对于高掺杂的N型薄层，产生于其中的光生载流子将很快被复合掉，因此这一层仅是为了减少接触电阻而加的附加层。

要使入射光功率有效地转换成光电流，首先必须使入射光能在耗尽层内被吸收，这要求耗尽层宽度 W 足够宽。但是随着 W 的增大，在耗尽层的载流子渡越时间 τ_{rc} 也会增大， τ_{rc} 与 W 的关系为

$$\tau_{rc} = W/v \quad (4.4)$$

式中： v 为载流子的平均漂移速度。由于 τ_{rc} 增大，PIN的响应速度将会下降。因此耗尽层宽度 W 需在响应速度和量子效率之间进行优化。

如采用类似于半导体激光器中的双异质结构，则PIN的性能可以大为改善。在这种设计中，P区、N区和I区的带隙能量的选择，使得光吸收只发生在I区，完全消除了扩散电流的影响。在光纤通信系统的应用中，常采用InGaAs材料制成I区和InP材料制成P区及N区的PIN光电二极管，图4.8为它的结构示意图。InP材料的带隙为1.35eV，大于InGaAs的带隙，对于波长在1.3 ~ 1.6 μm 范围的光是透明的，而InGaAs的I区对1.3 ~ 1.6 μm 的光表现为较强的吸收，几微米的宽度就可以获得较高响应度。在器件的受光面一般要镀增透膜以减弱光在端面上的反射。InGaAs的光探测器一般用于1.3 μm 和1.55 μm 的光纤通信系统中。

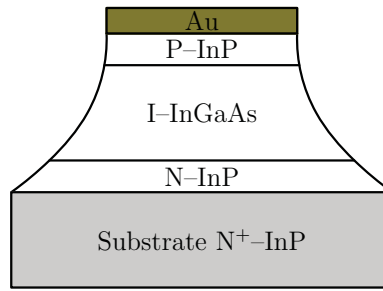


图 4.8: InGaAs PIN光电二极管的结构示意图。

PIN光电二极管的主要特性包括波长响应范围、响应度、量子效率、响应速度、线性饱和、击穿电压和暗电流等。从光电二极管的工作原理可以知道，只有当光子能量 hf 大于半导体材料的禁带宽度 E_g 才能产生光电效应，即 $hf > E_g$ 。因此对于不同的半导体材料，均存在着相应的下限频率 f_c 或上限波长 λ_c ， λ_c 亦称为光电二极管的截止波长。只有入射光的波长小于 λ_c 时，光电二极管才能产生光电效应。Si-PIN的截止波长为1.06 μm ，故可用于0.85 μm 的短波长光检测；Ge-PIN和InGaAs-PIN的截止波长为1.7 μm ，所以它们可用于1.3 μm 、1.55 μm 的长波长光检测。

当入射光波长远小于截止波长时，光电转换效率会大大下降。因此，PIN光电二极管是对一定波长范围内的入射光进行光电转换，这一波长范围就是PIN光电二极管的波长响应范围。响应度和量子效率表征了二极管的光电转换效率。响应度 R 定义为

$$R = I_P/P_{in}$$

其中： P_{in} 为入射到光电二极管上的光功率； I_P 为在该入射功率下光电二极管产生的光电流。 R 的单位为A/W。量子效率 η 定义为

$$\eta = \frac{\text{光电转换产生的有效电子—空穴对数}}{\text{入射光子数}} = \frac{(I_P/q)}{(P_{in}/hf)} = R \frac{hf}{q} \quad (4.5)$$

响应速度是光电二极管的一个重要参数，响应速度通常用响应时间来表示。响应时间为光电二极管对矩形光脉冲的响应——电脉冲的上升或下降时间。响应速度主要受光生载流子的扩散时间、光生载流子通过耗尽层的渡越时间及其结电容的影响。

光电二极管的线性饱和指的是它有一定的功率检测范围，当入射功率太强时，光电流和光功率将不成正比，从而产生非线性失真。PIN光电二极管有非常宽的线性工作区，当入射光功率低于mW量级时，器件不会发生饱和。

无光照时，PIN作为一种PN结器件，在反向偏压下也有反向电流流过，这一电流称为PIN光电二极管的暗电流。它主要由PN结内热效应产生的电子-空穴对形成。当偏置电压增大时，暗电流增大。当反偏压增大到一定值时，暗电流激增，发生了反向击穿(即为非破坏性的雪崩击穿，如果此时不能尽快散热，就会变为破坏性的齐纳击穿)。发生反向击穿的电压值称为反向击穿电压。Si-PIN的典型击穿电压值大于100V。PIN工作时的反向偏置都远离击穿电压，一般为10~30V。

雪崩光电二极管

雪崩光电二极管APD是具有内部增益的光检测器，它可以用来检测微弱光信号并获得较大的输出光电流。

雪崩光电二极管能够获得内部增益是基于碰撞电离效应。当PN结上加高的反偏压时，耗尽层的电场很强，光生载流子经过时就会被电场加速，当电场强度足够高(约 $3 \times 10^5 \text{V/cm}$)时，光生载流子获得很大的动能，它们在高速运动中与半导体晶格碰撞，使晶体中的原子电离，从而激发出新的电子-空穴对，这种现象称为碰撞电离。碰撞电离产生的电子-空穴对在强电场作用下同样又被加速，重复前一过程，这样多次碰撞电离的结果使载流子迅速增加，电流也迅速增大，这个物理过程称为雪崩倍增效应。

图4.9为APD的一种结构。外侧与电极接触的P区和N区都进行了重掺杂，分别以 P^+ 和 N^+ 表示；在I区和 N^+ 区中间是宽度较窄的另一层P区。APD工作在大的反偏压下，当反偏压加大到某一值后，耗尽层从 $N^+ - P$ 结区一直扩展(或称拉通)到 P^+ 区，包括中间的P层区和I区。图4.9的结构为拉通型APD的结构。从图4.9中可以看到，电场在I区分布较弱，而在 $N^+ - P$ 区分布较强，碰撞电离区即雪崩区就在 $N^+ - P$ 区。尽管I区的电场比 $N^+ - P$ 区低得多，但也足够高(可达 $2 \times 10^4 \text{V/cm}$)，可以保证载流子达到饱和和漂移速度。当入射光照射时，由于雪崩区较窄，不能充分吸收光子，相当多的光子进入了I区。I区很宽，可以充分吸收光子，提高光电转换效率。我们把I区吸收光子产生的电子-空穴对称为初级电子-空穴对。在电场的作用下，初级光生电子从I区向雪崩区漂移，并在雪崩区产生雪崩倍增；而所有的初级空穴则直接被 P^+ 层吸收。在雪崩区通过碰撞电离产生的电子-空穴对称为二次电子-空穴对。可见，I区仍然作为吸收光信号的区域并产生初级光生电子-空穴对，此外它还具有分离初级电子和空穴的作用，初级电子在 $N^+ - P$ 区通过碰撞电离形成更多的电子-空穴对，从而实现了对初级光电流的放大作用。

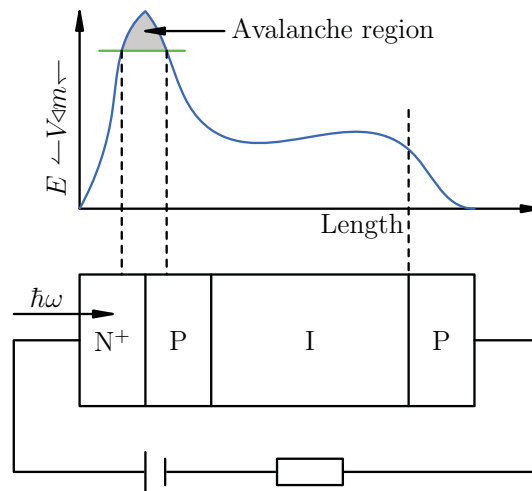


图 4.9: APD的结构及电场分布。

碰撞电离产生的雪崩倍增过程本质上是统计性的，即为一个复杂的随机过程。每一个初级光生电子-空穴对在什么位置产生，在什么位置发生碰撞电离，总共碰撞出多少二次电子-空穴对，这些都是随机的。因此与PIN光电二极管相比，APD的特性较为复杂。

与PIN光电二极管相比，APD的主要特性也包括：波长响应范围、响应度、量子效率、响应速度等，除此之外，由于APD管中雪崩倍增的存在，APD的特性还包括了雪崩倍增特性、噪声特性、温度特性等等。APD的雪崩倍增因子 M 定义为

$$M = \frac{I_P}{I_{P0}}$$

式中： I_P 是APD的输出平均电流； I_{P0} 是平均初级光生电流。从定义可见，倍增因子是APD的电流增益系数。由于雪崩倍增过程是一个随机过程，因而倍增因子是在一个平均之上随机起伏的量，雪崩倍增因子 M 的定义应理解为统计平均倍增因子。 M 随反偏压的增大而增大，随 W 的增加按指数增长。

APD的噪声包括量子噪声、暗电流噪声、漏电流噪声、热噪声和附加的倍增噪声。倍增噪声是APD中的主要噪声。倍增噪声的产生主要与两个过程有关，即光子被吸收产生初级电子-空穴对的

随机性和在增益区产生二次电子-空穴对的随机性。这两个过程都是不能准确测定的，因此APD倍增因子只能是一个统计平均的概念，表示为 $\langle M \rangle$ ，它是一个复杂的随机函数。

由于APD具有电流增益，所以APD的响应度比PIN的响应度大大提高，有

$$R_0 = \langle M \rangle \frac{I_P}{P} = \langle M \rangle \left(\eta \frac{q}{hf} \right)$$

量子效率只与初级光生载流子数目有关，不涉及倍增问题，故量子效率值总是小于1。

APD的线性工作范围没有PIN宽，它适宜于检测微弱光信号。当光功率达到几 μW 以上时，输出电流和入射光功率之间的线性关系变坏，能够达到的最大倍增增益也降低了，即产生了饱和现象。APD的这种非线性转换的原因与PIN类似，主要是器件上的偏压不能保持恒定。由于偏压降低，使得雪崩区变窄，倍增因子随之下降，这种影响比PIN的情况更明显。它使得数字信号脉冲幅度产生压缩，或使模拟信号产生波形畸变，因而应设法避免。

在低偏压下APD没有倍增效应。当偏压升高时，产生倍增效应，输出信号电流增大。当反偏压接近某一电压 V_B 时，电流倍增最大，此时称APD被击穿，电压 V_B 称作击穿电压。如果反偏压进一步提高，则雪崩击穿电流使器件对光生载流子变的越来越不敏感。因此APD的偏置电压接近击穿电压，一般在数十伏到数百伏。须注意的是击穿电压并非是APD的破坏电压，撤去该电压后APD仍能正常工作。

APD的暗电流有初级暗电流和倍增后的暗电流之分，它随倍增因子的增加而增加；此外还有漏电流，漏电流没有经过倍增。APD的响应速度主要取决于载流子完成倍增过程所需要的时间，载流子越过耗尽层所需的渡越时间以及二极管结电容和负载电阻的RC时间常数等因素。而渡越时间的影响相对比较大，其余因素可通过改进结构设计使影响减至很小。

三 实验内容

3.1 半导体激光器特性测量

本实验要求测量半导体激光器的P-I特性曲线。按照要求正确搭建光路，然后测量所选用1550nm和1310nm F-P半导体激光器的P-I特性曲线，并用作图法求出半导体激光器的阈值电流。

1. 1550nm F-P半导体激光器P-I特性曲线测量

- (a) 将1550nm半导体激光器控制端口连接至主机LDC1，光输出连接至主机OPM端口，检查无误后打开电源
- (b) 设置OPM工作模式为OPM/mW模式，量程(RTO)切换至1mW
- (c) 设置LD1工作模式(MOD)为恒流驱动(ACC)，1550nm激光器为恒定电流工作模式，驱动电流(I_c)置为0
- (d) 缓慢增加激光器驱动电流，0至30mA每隔0.5mA测一个点，作 $P \sim I$ 曲线

2. 求1550nm F-P半导体激光器阈值电流

3.2 PIN特性测量

1. PIN光电二极管反向击穿电压测量。

- (a) 连接InGaAs PIN 光电二极管信号输出至主机PD输入，光电二极管偏压端口连接至主机PSG输出，屏蔽掉PIN管光输入。
- (b) PSG置于高压源模式(HVS)，PD量程置100nA档。
- (c) 0至56V每隔2V测一个点，作 $I_r \sim V_r$ 曲线，求PIN光电二极管反向击穿电压。

2. PIN光电二极管响应度测量

- (a) 将1550nm半导体激光器控制电缆连接至LD1控制器
- (b) 清洁光纤连接器接头，连接1550nm半导体激光器和光功率计OPM
- (c) 调节LD1控制器，设置激光器为恒流输出功率模式ACC，激光器输出功率调至0.2mW。
- (d) 将1550nm半导体激光器输出改接至被测PIN光电二极管，置反相偏压-10V，记录PIN检测器输出电流 I_P
- (e) 计算PIN光电二极管响应度。

四 思考题

完成实验后，请思考并回答如下的问题：

1. 半导体激光器和探测器的工作原理是什么？
2. 半导体PIN光电二极管有什么特点，使用时有什么注意事项。在反向击穿实验中，如何避免PIN永久击穿？
3. 雪崩光电二极管APD的主要特点是什么？使用时有哪些注意事项。

注意事项

为了同学们的安全，以及实验的顺利完成，实验中要特别注意以下几点：

1. 系统上电后禁止将光纤连接器对准人眼，以免灼伤。
2. 光纤连接器陶瓷插芯表面光洁度要求极高，除专用清洁布外禁止用手触摸或接触硬物。空置的光纤连接器端子必须插上护套。
3. 所有光纤均不可过于弯曲，除特殊测试外其曲率半径应大于30mm。