



光电子技术 (6)

§ 2.8、染料激光器

染料激光器是一种液体激光器，染料指具有共轭双键的有机分子

一、工作原理

工作物质：有机染料溶液

激活介质：染料分子

能级结构：等效四能级结构，如图，染料为大分子结构，振、转动能级耦合使能级展宽为宽的能带。

泵浦：光激发，通常为激光激发，染料分子激发到 S_1 能级

激励方式：横向和纵向两种。



光电子技术 (6)

二、激光的猝灭

由于 $S_1 \rightarrow S_0$ 的发射能量与 $T_1 \rightarrow T_2$ 的吸收能量接近，所以，如果有大量染料分子积累在 T_1 态上，发出的激光就会被 T_1 态吸收，称这种现象为激光猝灭。

消除激光猝灭方法：使溶液富含氧， T_1 态能量通过氧迅速泄放返回基态 S_0 。氧分子的基态为三重态，而激发态为单重态。

三、染料激光器的调谐

发展染料激光器的主要目的就是要实现激光波长的调谐。波长能在几十纳米范围连续可调，这是染料激光的特点或优点。

调谐方法：光栅衍射法或色散频谱上狭缝移动法。

光电子技术 (6)

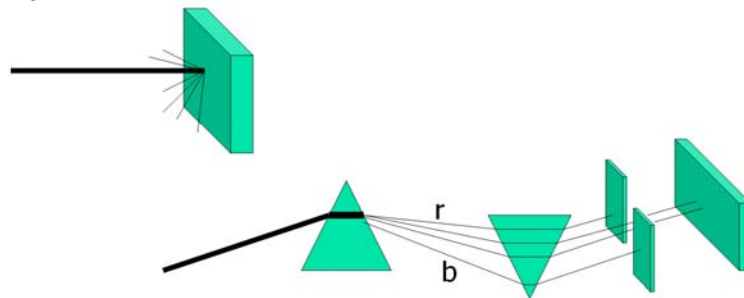


Fig.19a 染料激光波长调谐

光电子技术 (6)

§ 2.9、半导体激光器

一、固体能带理论

固体中由于大量原子周期排列，形成晶格场，使得单原子的能级分裂为宽的能带，能带由相距很小的精细能级组成。电子在能带中的分布形式决定了固体材料的导电性能。如图所示为绝缘体、半导体、金属的能带结构和电子分布。

1、禁带宽度

指导带底与价带顶之间的能量差，通常用符号 E_g 表示。

2、费米能级

指绝对零度时全满电子态与全空电子态的能量分界面。或绝对零度时电子占据的最高能态的能量，用符号 E_F 表示。占据概率1/2的能级



光电子技术 (6)

绝缘体的费米能级：位于价带顶，即价带全满，导带全空。

半导体费米能级：本征（纯）半导体的费密能级位于禁带中心。

金属的费米能级：位于导带中，即零度时导带中已有电子。

二、p-n结的形成

1、基本概念

半导体掺杂：用本征半导体中所不具有的一种元素部分替换本征半导体晶格中某一种原子。

杂质：被掺入本征半导体的元素称为杂质。

P型掺杂：用相对低价元素掺杂本征半导体。

N型掺杂：用相对高价元素掺杂本征半导体。



光电子技术 (6)

P型半导体：**P**掺杂形成的半导体。以空穴导电，费米能级降低。

N型半导体：**N**掺杂形成的半导体，以电子导电，费米能级升高。

2、p-n结的形成

由于**N型**半导体中有富裕的自由电子，而**P型**半导体中有富裕的自由空穴，所以当**P型**和**N型**半导体接触时，**P型**半导体中的空穴就会向**N型**中扩散，而**N型**半导体中的电子向**P型**中扩散，结果是**P型**端带负电，而**N型**端带正电。因而会形成**内建电场**，内建电场的方向从**N型**端指向**P型**端，从而又阻止电子和空穴的扩散。最后，依靠电子和空穴浓度梯度的扩散和内建电场的电作用达到平衡，在接触面附近形成一个耗尽层，即**p-n结**。

3、p-n结的能带图

光电子技术 (6)

平衡态p-n结形成后，费米能级达到平衡，整个p-n结的费米能级在同一水平，而在耗尽区由于电子和空穴浓度的不均匀分布，所以，导带和价带会发生弯曲。如图。p-n结是半导体激光器的基础，也是现代半导体电子器件的基础，如晶体二、三极管

思考题：是否可以形成p-p, n-n结？

三、半导体激光器中粒子数反转及增益

与通常介质中传播情况相同，光在p-n结中传播通常也是吸收的，要获得增益，也必须能够实现粒子数反转或消除发射的再吸收。

1、重掺杂

由于费米能级随掺杂浓度而变化，所以使用重掺杂使P型半导体的费米能级进入价带，而使N型半导体的费米能级进入导带，这样在p-n结耗尽层中就形成等价的四能级结构。

光电子技术 (6)

2、增益

半导体激光器的增益可表示为：

$$g(E) = \frac{c^2 h^3 r_{sp}(E)}{8\pi n^2 E^2} \left(1 - e^{\frac{E - \Delta E_F}{kT}}\right)$$

式中n为半导体的折射率， $\Delta E_F = E_{Fn} - E_{Fp}$ ，

$r_{sp}(E) = \sum_{E < \Delta E_F} r'_{sp}(E)$ 为总自发辐射率。

增益表达式也表明，只有当 $E < \Delta E_F$ 时， $g(E) > 0$ ，然而， $E > E_g$ ，所以，

$$E_g < E < E_{Fn} - E_{Fp}$$

即重掺杂，使发射能量小于吸收激发所需能量。



光电子技术 (6)

四、激光发射

当重掺杂半导体，满足 $E_{Fn}-E_{Fp}>E_g$ ，并给p-n结施加足够的正向偏置电压后，在结区导带上的电子与价带上的空穴复合，发射激光。激光波长 $\lambda \leq 1.239/E_g(\mu m)$ 。

五、半导体激光器的谐振腔

半导体激光器的谐振腔直接利用半导体的解理面组成的平行平面组成谐振腔。反射率通常在30-50%，所以损耗较大，但半导体的转换效率很高，达50-80%，所以足以维持足够的增益。此外，通过镀膜，还可提高端面的反射率，获得更高的增益。

六、半导体激光的模与光束发散角

- 1、横模：横模较差，形状不圆。



光电子技术 (6)

- 2、纵模：容易获得单纵模，因腔长较短，纵模间隔大。

- 3、光束发散角：发散角较大，因为腔长短。

七、常见半导体激光器

(一)、同质半导体激光器

同质半导体激光器以GaAs激光器为代表，通过掺入不同比例的Al形成三元化合物 $Al_xGa_{1-x}As$ 改变禁带宽度，可获得不同波长的输出。

常见的同质GaAs激光器为p⁺-p(n)-n结构，生长在GaAs衬底上，发射波长为0.84 μm ，效率为30%，发散角约5°。

缺点：阈值电流正比于温度的立方，所以只能在低温（液氮）下连续工作，室温下只能脉冲工作，寿命较短。



光电子技术 (6)

(二)、单异质结半导体激光器

由不同半导体材料组成的p-n结称为**异质结**。异质结又分为**同质异质结**(p^+-p, n^+-n)和**异型异质结**($p-n$)。

1、异质p-n结的形成

异质p-n结的形成过程与同质p-n结的形成类似，仍然涉及电子、空穴的扩散和内建电场的反作用，最后两种作用达到平衡，形成稳定的电子、空穴分布。[如图](#)。

2、正向偏置异质 p^+-n 结的粒子反转与增益

正向偏置下异质 p^+-n 结的**能带图**，此时形成一个等效的四能级结构，实现粒子数反转和增益。



光电子技术 (6)

3、单异质p-n结激光器

实际的单异质p-n结激光器也做成三层结构，即 $p^+-p(n)-n$ 或 $p-p(n)-n^+$ 型。要求中间层的折射率最大，形成波导结构，使激光发射约束在中间层中，提高激光转换效率。中间层厚度较薄，主要用于增加耗尽层的体积，提高激光发射效率。

常见的单异质p-n结激光器为GaAs-GaAs- $Al_xGa_{1-x}As$ 或 $Al_yGa_{1-y}As-Al_xGa_{1-x}As-Al_yGa_{1-y}As$ 结构，掺杂形成 $p^+-p-n(p-p(n)-n^+)$ 型单异质结激光器，其能带结构类似 p^+-n 型的**能带图**，除了耗尽层厚度大一点外。谐振腔两端面与结平面垂直，激光在中间层中振荡、发射。

单异质结激光器比同质结激光器具有更高的效率，低的阈值电流。

(三)、双异质p-n结激光器



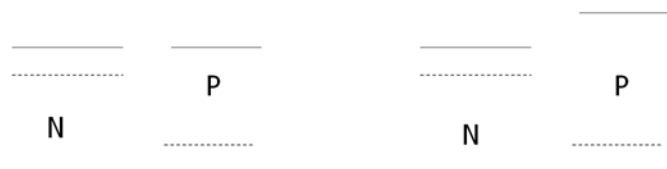
复习要点

- 1、半导体能带，P、N型掺杂，P、N型半导体，P-N结，费米能级，辐射放大条件，必要条件，P-N结能带图绘制？
- 2、同质、异质P-N结，能带图绘制，半导体激光器的特点，同质、单异质和双异质P-N结激光器的特点？
- 3、重掺杂，为何需要重掺杂，产生受激辐射放大的必要条件、充分条件？



作业六

- 1、何谓染料激光的猝灭，如何消除？设计调谐染料激光波场的方案，并解释工作原理？
- 2、绘制如下p、n型半导体形成的p-n结的平衡态能带图？



同质p、n半导体

异质p、n半导体