

浙江大学

本科设计报告

课程名称: 信息电子学物理基础

设计名称: 半导体激光器设计

姓 名:

学 号:

学 院: 信电学院

专 业: 电子科学与技术

班 级:

指导老师:

2021 年 1 月 6 日

摘 要

半导体激光技术及应用在现代科学技术中, 是一个非常重要的研究领域, 特别是飞秒激光的出现为人类探索世界提供了崭新的技术手段。半导体激光器所具有的低电流密度阈值与很好的单色性与光学性质使其在军事、工业、科研、通讯、环境、医学、极端物理条件模拟等各个领域均有重要应用。本设计基于已有的电子跃迁理论模型以及法布里帕罗光学谐振腔谐振理论, 采用双异质结 GaAs/AlGaAs 半导体激光器方案, 进行了一个工作波长为 867nm 的半导体激光二极管的初步方案设计, 在不考虑材料色散的前提下其纵模间距为 0.560nm。本设计在查阅了半导体激光器设计领域的诸多论文与期刊后, 对其提出的模型加以比较分析之后, 采用理论分析与计算得出了相应的参数范围, 并定量地对其能带图加以了描述。最后对设计过程中存在的社会与环境、安全因素进行了考虑。

关键字: 半导体激光器 双异质结 砷化镓

目录

1 设计指标与要求	4
2 理论模型	4
2.1 半导体激光器的设计原理	4
2.2 半导体激光器的原理性结构	4
3 工程技术考虑与设计	5
3.1 工作波长和有源区材料考虑	5
3.2 载流子限制与光场限制及有源区结构考虑	6
3.3 谐振腔考虑	7
3.4 半导体激光器的参数设计	8
3.4.1 衬底材料选择	8
3.4.2 异质结材料组分选择	8
3.4.3 异质结的结构	8
3.4.4 谐振腔长度	9
3.5 半导体激光器性能优化考虑	9
3.5.1 量子阱激光器	9
3.5.2 分布反馈式 (DFB) 半导体激光器	10
3.5.3 分布布拉格反射式 (DBR) 激光器	10
4 社会环境方面的考虑	11
4.1 器件生产安全与防护	11
4.2 社会与环境的评估	11
4.2.1 社会效应	11
4.2.2 环境因素考虑	12
参考文献	13

1 设计指标与要求

初步设计 1 个半导体激光器，器件指标：

- (1) 第一代光纤通信 850 波段的波长 ($867nm$)
- (2) 纵模间隔为 $0.560nm$ (不考虑材料色散)
- (3) 增益系数 g 减去损耗系数 α 为 $0.300mm^{-1}$

2 理论模型

2.1 半导体激光器的设计原理

半导体激光器是一种相干辐射光源，要使它产生激光，必须具备三个基本条件：

(1) 增益条件：建立起激射媒质 (有源区) 内载流子的反转分布，在半导体中代表电子能量的是由一系列接近于连续的能级所组成的能带，因此在半导体中要实现粒子数反转，必须在两个能带区域之间，处在高能态导带底的电子数比处在低能态价带顶的空穴数大很多，这靠给同质结或异质结加正向偏压，向有源层内注入必要的载流子来实现。将电子从能量较低的价带激发到能量较高的导带中去。当处于粒子数反转状态的大量电子与空穴复合时，便产生受激发射作用。

(2) 要实际获得相干受激辐射，必须使受激辐射在光学谐振腔内得到多次反馈而形成激光振荡，激光器的谐振腔是由半导体晶体的自然解理面作为反射镜形成的，通常在不出光的那一端镀上高反多层介质膜，而出光面镀上减反膜。对 F-p 腔 (法布里-珀罗腔) 半导体激光器可以很方便地利用晶体的与 P-n 结平面相垂直的自然解理面 [110] 面构成 F-P 腔。

(3) 为了形成稳定振荡，激光媒质必须能提供足够大的增益，以弥补谐振腔引起的光损耗及从腔面的激光输出等引起的损耗，不断增加腔内的光场。这就必须要有足够强的电流注入，即有足够的粒子数反转，粒子数反转程度越高，得到的增益就越大，即要求必须满足一定的电流阈值条件。当激光器达到阈值时，具有特定波长的光就能在腔内谐振并被放大，最后形成激光而连续地输出。可见在半导体激光器中，电子和空穴的偶极子跃迁是基本的光发射和光放大过程。

2.2 半导体激光器的原理性结构

图 2.1 表示 GaAs pn 结正向注入式半导体激光器的基本结构，与一般二极管一样也以 pn 结为核心，不同的是有两个垂直于 pn 结的平行反射断面，一般用半导体的解理面。

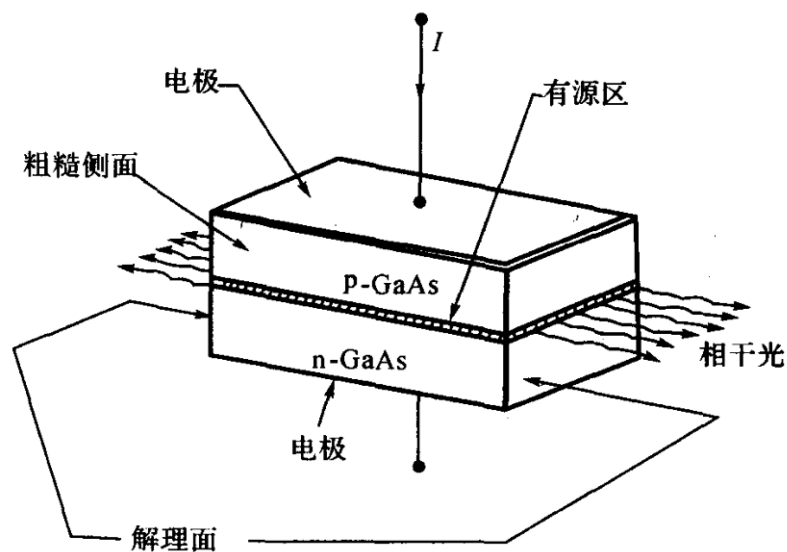


图 2.1: GaAs 结型激光器的基本结构

图 2.2 展示了 GaAs 半导体激光器的脊形波导结构，可以加强对光在水平方向的限制作用。

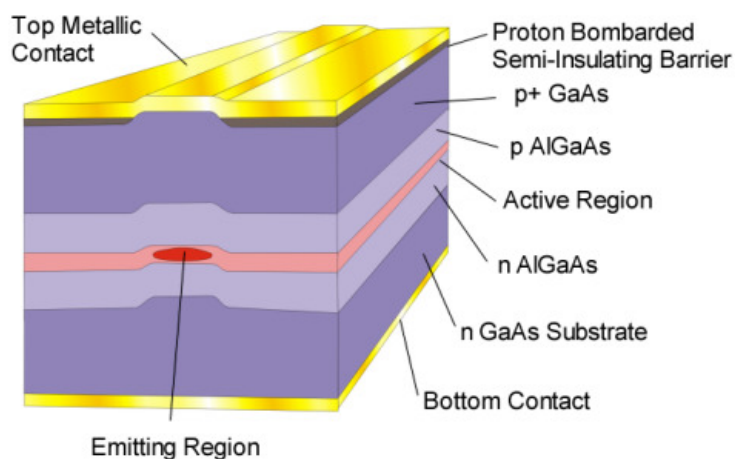


图 2.2: 半导体激光器的脊形波导结构

3 工程技术考虑与设计

3.1 工作波长和有源区材料考虑

图 3.1 展示了合金半导体的禁带宽度同晶格常数的关系，我们将在其中挑选合适的半导体材料。

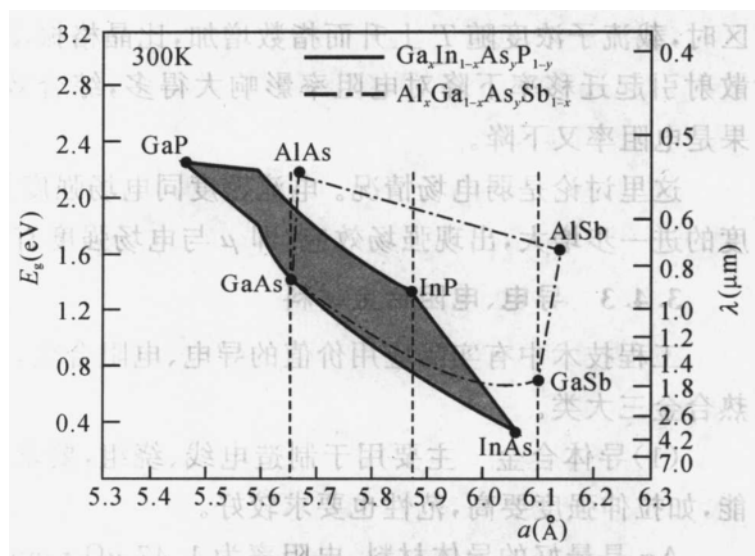


图 3.1: 合金半导体的禁带宽度同晶格常数的关系

查阅资料得知，异质结激光器常用衬底材料有 GaAs、InP 等。第一代光纤通信常用材料为 GaAs，波长为 0.85nm；第二代光纤通信常用材料为 InP，波长为 1.31nm；第三代光纤通信常用材料为 InP，波长为 1.55nm。光纤通信波长与损耗的关系见图 3.2。

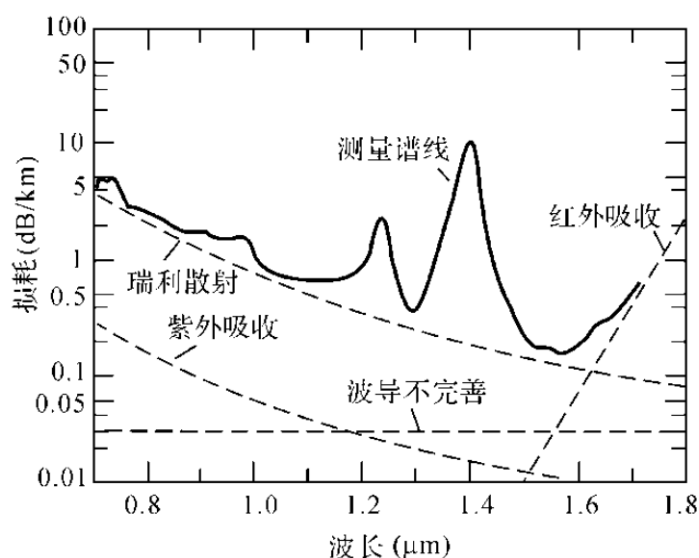


图 3.2: 光纤波长与损耗关系

3.2 载流子限制与光场限制及有源区结构考虑

图 3.3(a) 表示 $GaAs - Al_xGa_{1-x}As$ DH 激光器的结构示意图。图 3.3(b) 是正偏下的能带图。电子从 N-AlGaAs 区注入 p-GaAs。由于 p-GaAs 与 P-AlGaAs 之间形成

导带高势垒，阻止 P-GaAs 区的电子向 p-AlGaAs 区扩散，所以在 P-GaAs 区形成粒子束分布反转，进而发生辐射符合。加之 DH 具有图 3.3(c) 所示折射率分布，所以光波也被限制在 p-GaAs 区内，形成图 3.3(d) 所示光强分布。

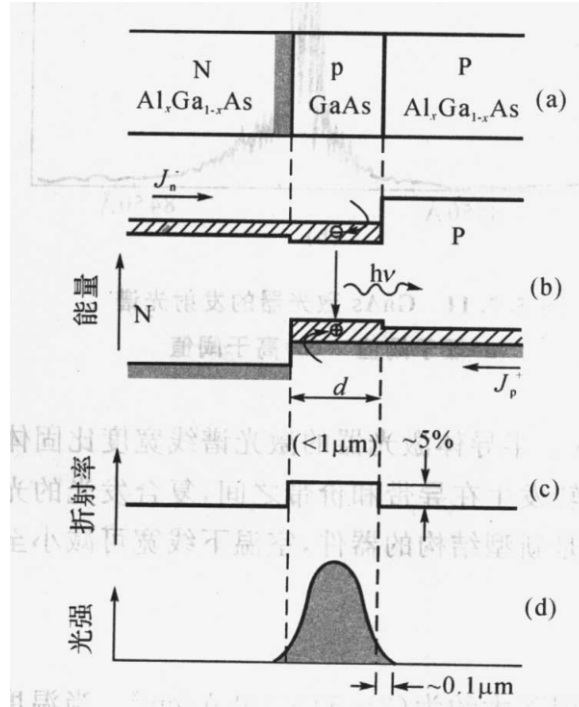


图 3.3: (a) 双异质结 (b) 正偏能带图 (c) 折射率分布 (d) 光限制在介质波导内

3.3 谐振腔考虑

在结型激光器的有源区内，粒子数分布必须处在反转状态，导带电子才能开始自发地与价带空穴复合，引起自发发射。但所发射的光子，位相和方向各不相同，为非相干光。大部分光子一旦产生，立刻穿出有源区，而有一部分光子严格在 pn 结平面内传播，并激发其他电子-空穴对的受激发射，产生更多的与入射光子频率、位相等均相同的光子。为了获得单色性和方向性都很好的单色光，一般需要建立一个光学谐振腔，在结型激光器中常用 Fabry-Perot 谐振腔。如图 2.1 所示的激光器，以严格垂直结面方向的一对解理面作为镜面构成平面谐振腔，结内广播沿 z 向，在两端的镜面之间来回反射和传播。每一回程，光波得一次放大。由于端镜只是部分反射，所以有一部分光波从结内投射出去形成激光输出。

3.4 半导体激光器的参数设计

3.4.1 衬底材料选择

根据设计要求，激光器工作在 850 波段，结合图 3.1，我们选择衬底材料为 GaAs。

3.4.2 异质结材料组分选择

根据激光器工作波长为 867nm，我们在下列异质结材料中选择 $Al_xGa_{1-x}As$ 。

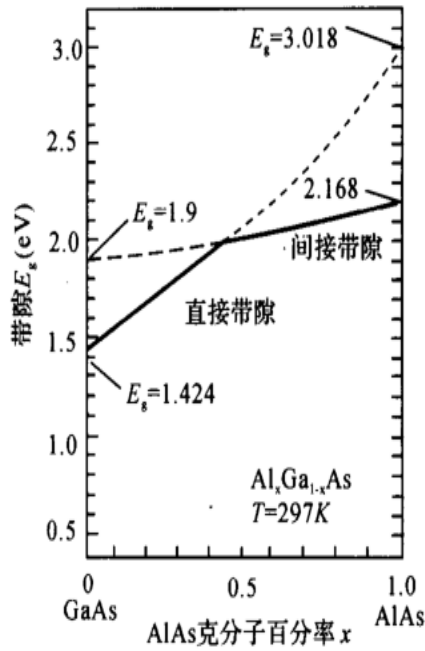


图 3.4: $Al_xGa_{1-x}As$ 的 $E_g - x$ 关系

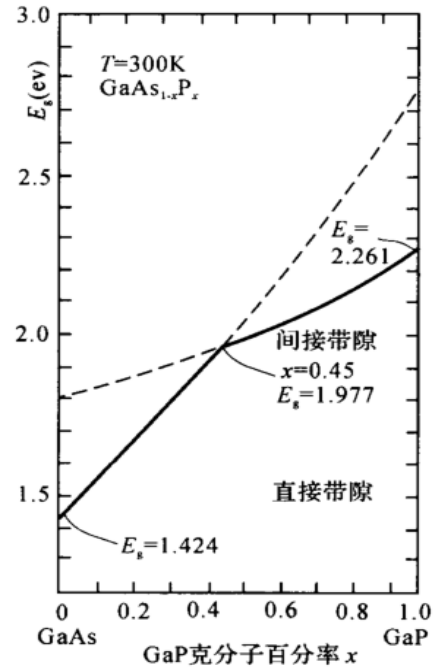


图 3.5: $GaAs_{1-x}P_x$ 的 $E_g - x$ 关系

对于 GaAs 半导体材料，其禁带宽度为 1.424eV，而对于 $Al_xGa_{1-x}As$ 半导体材料，在 $x < 0.45$ 时为直接带隙材料，其带隙为：

$$E_g = 1.424 + 1.247x$$

由于工作波长为 867nm，我们可以算出对应的禁带宽度为：

$$E_g = \frac{1.24}{\lambda} = \frac{1.24}{0.867} = 1.430 \text{ eV}$$

由此可以算出 $x = 0.00573$

3.4.3 异质结的结构

我们设计的异质结结构如下图所示：

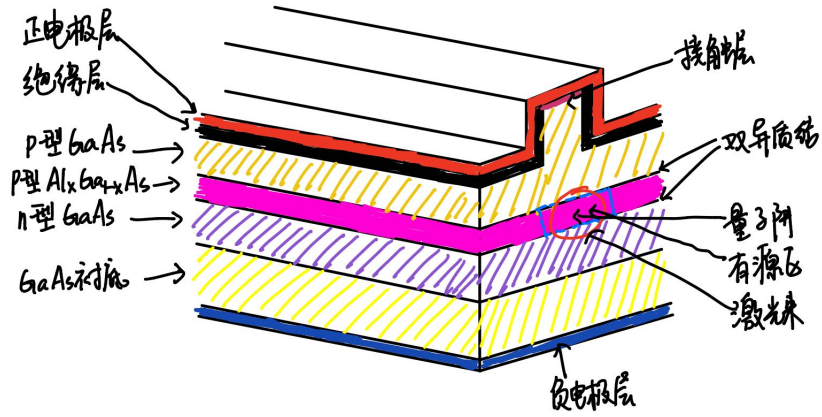


图 3.6: 异质结结构图

3.4.4 谐振腔长度

在不考虑材料色散的情况下，为了使纵模间距为 0.56nm ，要求

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2L} = 0.56\text{nm}$$

可以算出 $L = 6.71 \times 10^{-4} \text{ m}$

根据设计要求，增益系数 g 减去损耗系数 α 为 0.300mm^{-1} ，

$$g - \alpha = \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} = 0.300\text{mm}^{-1}$$

$R_1 = 100\%$ ，可以算出 $R_2 = 66.9\%$ 。

3.5 半导体激光器性能优化考虑

3.5.1 量子阱激光器

与光纤通信相匹配的长波 (大于 $1.3\mu\text{m}$) 长激光器的主要问题是阈值电流 J_{th} 对温度过于敏感，随温度升高，阈值电流 J_{th} 以指数形式增大，造成热不稳定性和低效率。一个理想的半导体激光器，它的能带结构应该是导带和价带都有小的有效质量。

量子阱激光器是指有源区多量子阱材料的异质结激光器。在量子阱激光器中，由于量子尺寸效应，电子状态密度分布由连续的抛物线状变成阶梯状，与普通 DH 激光器相比，有许多优点。(1) 改变量子阱的厚度可以在相当宽的范围内改变量子阱激光器的激光的波长；(2) 注入载流子提供更高的增益、使得阈值电流密度低、温度敏感性低、温度特性好；(3) 注入的载流子大部分克服内部的损耗，而量子阱激光器本身内部损耗比较小，使得小的注入载流子就可以有高的效率；(4) 增益变化，引起折射率的改变比较小，光谱线宽窄，频率啁啾小；(5) 微分增益系数高，可以工作在更高的调制速率下。

3.5.2 分布反馈式（DFB）半导体激光器

在有源区邻近的波导上制作周期性的波纹光栅结构，满足条件的光得在介质中来回反射，实现光耦合。当有源区内达到粒子数分布反转，则光波在来回反射中得到加强，只要增益达到阈值时便能导致光激励。激光波长有波纹光栅结构的周期确定。

优点是容易有单模单频输出，容易与光纤、调制器等耦合，特别适合作集成光路的光源，而且有很好的温度稳定性。

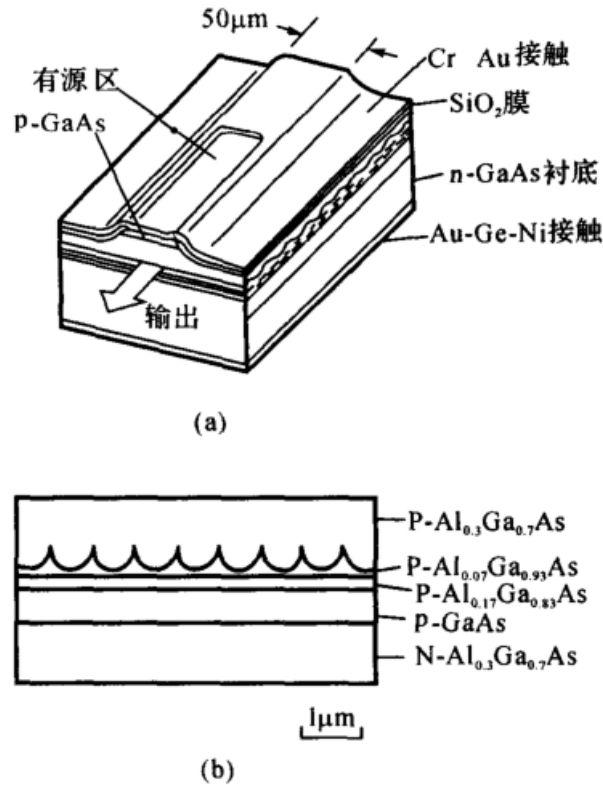


图 3.7: GaAs/AlGaAs DFBDH 激光器

3.5.3 分布布拉格反射式（DBR）激光器

DFB 激光器的波纹光栅做在有源区内，在制造光栅过程中引入的晶格损伤会损害随后外延生长层的光学质量，造成的缺陷称为光吸收的界面复合中心，从而降低量子效率和增大 J_{th} 。避免晶格损伤的常用方法是把光栅移到有源区外面，形成分布布拉格反射式（DBR）激光器，其结构如下图所示。于是可以降低损耗，提高发光效率，阈值电流密度可低至 $1000 A/cm^2$ 以下。这种器件不仅易于控制纵模，不需 F-P 反射腔，有利于与其它挂钩电子器件的耦合，并可在同一衬底上制备多个不同的波纹光栅，获得多个不同波长的激光器。

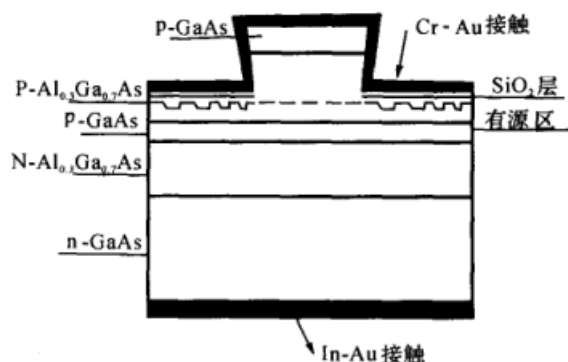


图 3.8: DBR 激光器

4 社会环境方面的考虑

4.1 器件生产安全与防护

(1) GaAs 晶体结构比较稳定，但生产过程中可能会产生具有毒性的砷元素，极易被氧化，需要加以注意。人体在没有直接食用、血液接触 GaAs 的情况下不会有致命危险。

(2) 在进行掺杂时，可能会产生磷、硫、砷等元素的汽化物，这些物质都具有极强的毒性，若操作不当造成人体吸入可能对身体产生较大影响。因此在高温、潮湿等环境下操作时需要特别注意防护措施。

(3) 需要制订严格的规章制度、操作规范与事故处理预案，做好安全防护工作与安全教育，进行危害辨识、认知与预防的训练，确保操作人员的健康和安全安全。

(4) 掺杂半导体制备现场要预防有毒气体液体、器件高温加工现场预防汽化物，要在工作区设置相应的侦测器及其报警器。

(5) 要定期对生产人员的身体健康以及相应的血液元素含量进行检测。

(6) 生产人员在工作时要依标准穿着完整护具和保护服装

4.2 社会与环境的评估

4.2.1 社会效应

半导体激光器的成功问世给社会生活的许多方面都带来了极大的便利，人们在使用各种高性能的电子设备时，需要的辅助设备也越来越多，上世纪以来人类开始慢慢接触光通信、激光打印、光计算机等先进的科学技术，但这些背后都需要最基本的激光技术的支持。本次设计中设计的异质结半导体激光器具有阈值电流密度低、光的单色性好、输出功率大等优势，这类半导体激光器在医学、光学、测量学等许许多多的领域都发挥了巨大的作用，已经融入了人们生产生活的各个方面，推动了经济的增长

与科技的进步。

4.2.2 环境因素考虑

(1) 生产过程中进行 P 型掺杂时金属化过程中会排放有机酸、无机酸、重金属废液等污染物。

(2) 在硅晶片生产过程中会产生蒸汽态砷、磷、硫化物。

(3) 掺杂过程中会产生含磷、砷、硼等污染物。

(4) 在清洗过程中会产生重金属废水、酸碱废液等污染物。

(5) 需要处理好废弃物排污与环保工作，保证不对空气、水资源、土壤等产生影响，并且持续进行工业卫生监控。

(6) 应从以下几个方面减小半导体生产过程中的污染物排放：工作室的废气收集管理、水的循环利用、提高管理和工艺控制水平，提高化学药品的利用率，减少浪费、开发新工艺、新技术，减少和代替有毒有污染物质的使用。

参考文献

1. 万文坚, 黎华. 太赫兹量子级联激光器研究进展. 中国激光, 2020, 47(07): 106-118
2. 杨冬晓, 陈秀峰. 现代信息电子学物理. 浙江大学出版社, 2007, 210-211
3. 王路威. 半导体激光器的发展及其应用. 成都大学学报, 2003, 9: 1-5