

能在室温下连续工作的砷化镓激光二极管*

半导体激光组

(中国科学院物理研究所)

编者按:物理研究所半导体激光研究组的同志们,在无产阶级文化大革命、批林批孔、学习无产阶级专政理论和回击右倾翻案风的伟大斗争中经受了锻炼,坚持科学研究为社会主义革命和建设的急需服务,顶住了应用项目“下马风”,发挥社会主义大协作的作用,“自力更生,艰苦奋斗”¹⁾,勇攀激光科学技术高峰,在毛主席哲学思想指导下,研制成功能在室温下连续工作的砷化镓双异质结激光二极管,同兄弟单位一起填补了我国在这一方面的空白,做出可喜的成绩,以实际行动有力地驳斥了邓小平所散布的“今不如昔”反动谬论。这里发表了该组同志们对这一成果的报导。

一、文化大革命促进了 半导体激光的研究

我们研究组是在轰轰烈烈的无产阶级文化大革命中,为了填补我国在半导体激光器上的空白,为了社会主义革命和建设的急需而建立起来的。建组几年来,我们的工作就随着科研领域的斗、批、改的深入而发展着。

我们所研究的是什么样的激光器?我们为什么对它特别感到兴趣呢?具体地讲,我们所研究的是砷化镓(GaAs)半导体注入式激光器,或者叫砷化镓激光二极管。它是利用半导体材料砷化镓制成的超小型激光器件。同现行的固体或气体激光器相比,它有很多优点。它体积小(管芯尺寸为 $0.1 \times 0.2 \times 0.3 \text{mm}^3$),操作简单(直接加电流来激励光),调制容易(直接用电调制),结构紧凑(共振腔面就是晶体的解理面)。充分利用这些优点,激光二极管在国民经济上将会有很广泛的应用(例如激光光纤通讯就需要这类器件),因此颇受人们的注意。

但是,事物总是一分为二的,它也有许多固有的缺点,诸如:功率不能太大,相干性较差,方向性不好,以及在室温下连续工作比较困难等。这些缺点也就大大限制了激光二极管的应用范围。然而,缺点又绝不是固定不变的,只要通过实践去理解造成缺点的原因,就可以采用一些特殊的手段,使这些缺点得到不同程度的克服。例如,把大量二极管堆积起来可以提高输出功率,应用外共振腔可以改善方向性等。自1970年采用了所谓砷化镓-砷化镓铝($\text{GaAs-Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$)双异质结

以来,国外激光二极管在室温下连续工作问题也得到解决。我们的任务就是在半导体激光器上“赶上和超过世界先进水平”²⁾,为社会主义服务。

“革命就是解放生产力,革命就是促进生产力的发展”³⁾。经过文化大革命锻炼的全组科研战士,在没有现成设备、没有半导体实验室而且大多数人都没学过或搞过半导体和激光的情况下,自己动手,艰苦奋斗,因陋就简,建立起实验室。全组同志在实践中边干边学,仅五个月的时间,就研制成功脉冲半导体激光器。这就是在室温下用脉冲电流来驱动,产生不连续的光脉冲。

胜利鼓舞着大家继续前进。大家知道,室温脉冲半导体激光器的制成,只是标志着闯过室温的关口,使半导体激光器摔掉低温冷却这根拐棍。前面还有一个更大的关口——连续工作,有待于我们攻下。大家发扬了连续作战的作风,向室温连续工作半导体激光器进军。这种激光器不仅不需要低温冷却,能在室温下工作,而且能用直流电来驱动,造成连续输出激光。

然而前进的道路是不平坦的,还有许多困难有待于我们去克服,胜利果实永远是靠斗争得来的。我们首先遇到的困难是修正主义路线的干扰。1973年党内走资派刮起了否定无产阶级文化大革命的妖风。科学院也出现了右倾回潮,刮起所谓“理论风”,大砍联系实际科研项目,强令我们组下马。我们坚决进行针锋相对的斗争,坚持科研为无产阶级政治服务、与实践相结合的方向。在毛主席亲自发动和领导的批林批孔运动的鼓舞下,回击了右倾回潮风,取得了胜利。

为了早日实现室温连续出光,在研究室党支部的领导下,通过学习无产阶级专政理论,狠批“知识私有”等资产阶级法权观念,大大提高了我们为人民服务的自觉性。在攻关时刻,全组同志不分昼夜地干,不少同志从未睡过整夜觉,经常连续奋战几十小时。同志们说:“只要激光器不连续出光,我们就要为革命连续

* 1975年8月19日收到。

- 1) 转引自《红旗》杂志1967年第13期文章《决不允许把社会主义企业拉到资本主义邪路上去》。
- 2) 转引自1966年10月29日《解放军报》。
- 3) 转引自1967年8月3日《解放军报》社论《坚守工作岗位,严防敌人破坏》。

大千!”经过努力奋战,终于在较短的时间内,先后突破外延工艺和器件工艺两个关键,实现连续出光.事实雄辩地证明了毛主席关于“无产阶级文化大革命是使我国社会生产力发展的一个强大的推动力”¹⁾的教导是千真万确的真理,也有力批判了党内最大的不肯改悔的走资派邓小平和科技界不肯改悔的走资派的“文化大革命破坏了科研生产”之类无耻澜言.我们决心坚持长期作战,把批邓、反击右倾翻案风的斗争进行到底,决心发扬“可上九天揽月,可下五洋捉鳖”的大无畏的革命精神,以阶级斗争为纲,坚持党的基本路线,夺取科技革命的更大胜利!

下面我们介绍半导体激光器的简单原理、外延工艺、制管工艺和测量结果.

二、激光二极管的简单原理

激光二极管是怎么个东西?它又是怎样工作的呢?

顾名思义,要做一个激光二极管,首先要用半导体材料做成一个 p-n 结.例如,在一个高掺杂的 n 型砷化镓(自由电子密度 $n \approx 10^{18}/\text{cm}^3$)晶体的(100)面上,用外延或扩散锌的方法,生长或形成一个高掺杂的 p 型层($p \approx 10^{17}/\text{cm}^3$).把 p 型边磨到 30 微米厚, n 型边磨成 70 微米厚,用一定的金属在这片子的两边做成良好的欧姆接触电极.因为砷化镓的(110)面族是解理面,这片子是平行于(100)面的,所以一定能找到同片子垂直的两个相互垂直的(110)面.沿着其中一个(110)面,把片子解理成为约 300 微米宽的小条;然后再把这些小条沿着另一个(110)面切成 200 微米宽的小块.这样就做成了长、宽、厚分别为 300、200、100 微米的管芯.而且沿着长的方向的两个与 p-n 结面垂直的端面是极其平整的、互相平行的解理面,它们形成了这一半导体激光器的光学共振腔的两个腔面.当把这种管芯装在一定的散热器(一般用铜或银做成的)上后,就成了一个激光二极管.因为在这种二极管被正向偏置后,电子就在 p-n 结附近被从 n 型区注入到 p 型区(同样,空穴也被从 p 型区注入到 n 型区,一般认为,空穴的迁移率很小,所以它的注入程度与电子相比是不重要的),并与空穴复合而发光,当注入水平高到足以使光的增益等于各种光损耗的总和时,光就能在相对的两个解理面组成的光学共振腔内发生共振,因而能在这两个端面输出相干辐射.但是这种简单的器件所需要的最小工作电流密度值(阈值)很高,而且阈值电流密度随着温度的上升而急速地增加.所以,通常在室温下只能用较窄的脉冲来操作这种器件.要使器件能在室温下连续地、高效率地工作,就必须采用较复杂的结构,提高增益,减小损耗,降低阈值电流密度和减轻阈值电流密度对温度的依赖关系.为此而发展起来的砷化

镓-砷化镓双异质结构是非常有效的.

所谓砷化镓-砷化镓铝双异质结构是在砷化镓活性区的两边都有一层砷化镓铝($\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$, $x \approx 0.3$)材料(如图 1a).因为砷化镓铝的能隙大于砷化镓(图 1b),所以, p 型和 n 型的砷化镓铝分别对电子和空穴产生一固有的势垒.这样,当 p-n 结被正向偏置时,被注入的载流子将被限制在这两层砷化镓铝之间.因此,当活性区的厚度(两层砷化镓铝之间的距离) $d <$ 电子扩散长度时,在同样注入水平的情况下,有了这两层砷化镓铝后,活性区内单位体积的注入水平就提高,因而提高了增益(阈值降低).同时,即使温度上升,电子扩散长度增加,而活性区的 d 不变,即活性区内单位体积的注入水平不变,这就大大降低了器件的阈值电流密度对温度的依赖关系.

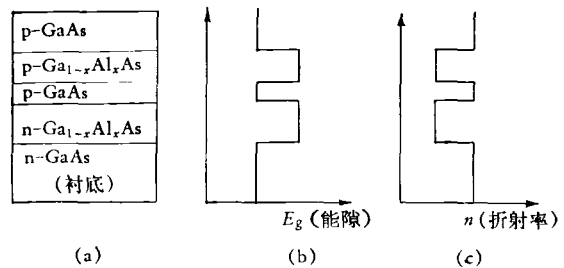


图 1 双异质结外延片各外延层的组份分布 (a) 及各层材料在垂直结平面方向上的能隙 (b) 和折射率 (c) 的变化情况.

另外,由于砷化镓铝对活性区内所产生的光的折射率小于砷化镓的折射率(图 1c),因而活性区对激光形成一光波导区,使大部分光被限制在活性区内,这样就大大增强腔内的光流密度.同时,由于穿透到非活性区的光大大减少,也就使光的吸收损耗大为下降.总之,上述两种限制的效果使阈值电流密度大幅度下降,以往同质结器件在室温脉冲工作时,一般阈值电流密度在 $10^3 \text{A}/\text{cm}^2$ 以上,而双异质结器件可低到 $10^3 \text{A}/\text{cm}^2$ 以下.而且随温度的变化远远不象同质结那样强烈.所以,这种器件就有可能在室温下连续工作.

另一方面,要使器件能在室温下连续工作,还要使器件有发热少,散热好的性能.所谓条形管芯(管芯上活性区的宽度小于 50 微米)就具有这样的性能.这种结构能使器件的阈值电流低到一、二百毫安以下.为了发热少,就还需要有小的串联电阻,以及有好的散热性能,热阻要尽量低.也就是要有良好的欧姆接触,尽量薄(但有很好限制效果)的砷化镓铝层,以及热导率高的散热器.国外最初做成的室温连续器件就应用 IIa 型金刚石作散热器的.

1) 转引自《中国共产党中央委员会关于无产阶级文化大革命的决定》,(1966年8月8日通过).

三、外延工艺是主要矛盾

要揭示自然界的奥秘,必须用马列主义、毛泽东思想来指导.我们组研制半导体激光器的工作,也是一个学习、应用毛主席哲学思想,指导科研工作的过程.整个研制半导体激光器的工作,工艺繁杂,究竟从何入手?遵照毛主席的“研究任何过程,如果是存在着两个以上矛盾的复杂过程的话,就要用全力找出它的主要矛盾”¹⁾的教导,我们从实践中体会到,外延生长是主要矛盾.因为外延生长是制备激光器材料的一个关键工艺.没有合乎要求的半导体材料,是不能做出连续工作器件的.能在室温下连续工作的半导体激光器同脉冲激光器所需要的材料有质的差别.不对原来的外延工艺作彻底的改革,就不能做出所需要的材料.因此必须集中优势兵力打歼灭战.怎么打好这一仗呢?大家认为应当从提高外延环境清洁度入手.众所周知,半导体工艺要求环境清洁度非常高.如果按照洋框框,我们的实验室根本不合格.但是我们按照毛主席关于“要打破洋框框,走中国自己工业发展的道路”²⁾的指示,利用现有设备、条件,应用毛主席哲学思想中关于整体和局部辩证关系的论述来解决这一矛盾.我们在整体做不到高度清洁情况下,就在局部关键地方保持高度清洁,采取保持高度密闭措施,以达到同样目的,从而得到高质量半导体材料.

为了要做成上述双异质结构,必需在n型砷化镓单晶薄片(衬底)上用液相外延^[1]的方法连续生长上四种不同组份的薄层.第一、三层分别为n、p型砷化镓铝层,它们就是起着上述对电子和光的限制作用的.第二、四层为p型砷化镓.第二层是活性区,注入载流子在这里复合发光,它的厚度和质量是器件的关键因素.第四层砷化镓是为了容易做好欧姆接触而生长的.

由于铝特别容易氧化,氧化铝是在千度高温都不熔化的物质,一旦形成就无法进行外延生长.所以在外延时必需四层生长依次连续地在一个流程中完成.在生长过程中绝对禁止氧的沾污^[1].为此我们采取了这样一些措施:尽量提高保护用的氢气的纯度,在钽净化器前加上一级用液氮冷却的分子筛,把来自气体厂的高纯氢内的残留的水分尽量被吸附掉,以减轻钽净化器的负担,并提高被净化氢气的纯度;衬底和各种掺杂体在化学清洗后经真空烘干,在惰性气氛中装入石墨舟内,使吸附性很强的石墨舟在高温处理后不再与空气接触,把高纯镓在外延前进行一次真空脱氧,真空度为 2×10^{-4} mmHg,在750℃下焙烧三小时;外延系统的设计采用不锈钢高真空密封接头(图2),代替石英磨口接头,这样,外延前就很容易把系统抽空到 1×10^{-4} mmHg的真空度,而且操作很方便.采取了这

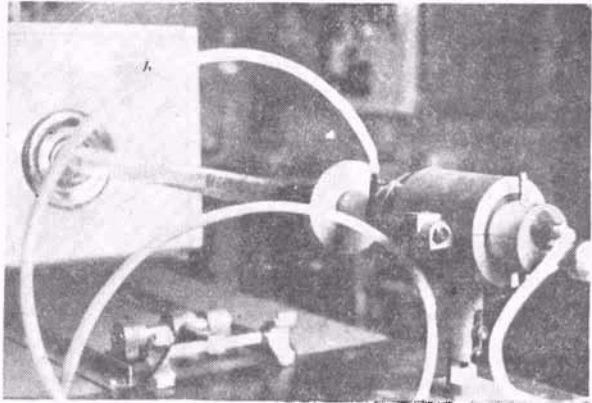


图2 外延系统,右边为不锈钢高真空密封接头,左边为可移动的外延炉

些措施后,外延片表面就很光亮,各层生长也很均匀.

另外,为了能很好地、重复地生长厚度很薄(<1 微米)的外延层,精确的温度控制也是十分重要的.这包括对炉温的时间变化和温度梯度的控制.为此,我们用函数记录仪来描出整个外延过程的温度变化曲线.电偶放在衬底下面,电偶的热电动势输入DWT-702温度自动控制仪,热电动势与定值器的电压之偏差经控制仪放大后输入函数记录仪.这样温度检测的精度可达 0.01°C .根据外延时的精确的温度曲线,可及时地对温度梯度和降温速率进行调整.可控性和重复性都较好.现在我们能有把握地外延生长四层的厚度分别为(图3):第一层3—5微米[砷化镓铝,掺碲(Te)];第二层0.2—0.4微米(砷化镓,掺硅);第三层0.8—1.3微米(砷化镓铝,掺锗);第四层1—2微米(砷化镓,掺锗).

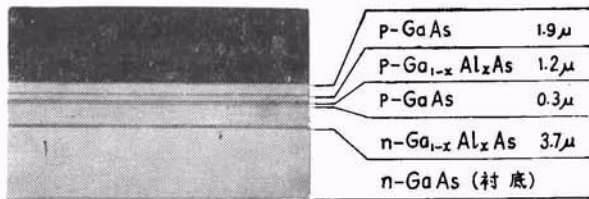


图3 75-47*外延片各外延层的横剖面的显微相片(用腐蚀法显结)

四、主要矛盾转移到制管工艺

我们制得的这种材料,从其物理性能推算,是应该可以做成连续工作的激光器的.可是在实验时却不出光.这又是什么原因呢?全组同志再一次进行辩证分析,重温毛主席关于“矛盾的主要和非主要的方面互相

- 1) 毛泽东,《矛盾论》,《毛泽东选集》,人民出版社,(1969), 297.
- 2) 转引自1967年7月5日《解放日报》社论《打倒爬行主义》.

转化着,事物的性质也就随着起变化”^[1]的教导,认为主要矛盾已从材料转移到器件工艺上了。我们又集中力量攻克器件难关,终于在较短时间里拿下室温连续出光这个关,取得了胜利。

一个好的欧姆接触是室温连续器件所必需的。取外延片表面光亮的部分,经化学清洗后进行扩散锌,在外延层内扩锌的深度为0.3微米左右,扩散锌是为了欧姆接触更好做一些。欧姆接触电极所用的金属材料在p型边是铬、金、银,都是用真空蒸发沉积上去的,总厚度约5000 Å。在n型边是用金-锗-镍,银。

我们用台面腐蚀法和质子轰击法来形成管芯的条形区。台面条形是用一般的光刻工艺,采用北京化工一号负性光刻胶。前烘是60°C,时间为20分钟,坚膜是在180°C,30分钟。腐蚀液是采用碘化钾加碘溶液(腐蚀银,金),氯化锡加盐酸(腐蚀铬)和4:1:1(H₂SO₄:H₂O₂:H₂O)(腐蚀砷化镓)。这样分步腐蚀能较好地控制腐蚀速度,因而刻腐出来的线条较平直。台高约7微米,台面宽小于20微米。

质子轰击法(详细方法另外报道^{[1])}的质子束是由中国科学院高能物理研究所的静电加速器提供的。遮挡质子用的钨丝直径为30微米。

管芯长度一般为250—300微米,宽为300微米。所用的散热片是镀铟的小银片(φ5毫米,厚1毫米)。管芯是压触在两个小银片之间,用环氧树脂粘牢。

五、测量结果

用上述方法制成的二极管可在室温下连续地工作。宽接触(300×200微米²)的管子室温下脉冲工作时的阈电流密度一般为(2~4)×10³A/cm²,好的管子可达1100A/cm²以下。

直流工作时的环境温度是300—310K。直流阈电流密度为(2~5)×10³A/cm²,最低的为1000A/cm²。阈电流一般为150—400毫安。从I-V特性曲线推算出串联电阻为0.4Ω左右。

远场图样观察说明,在垂直p-n结方向上都是基横模工作,半功率点的全宽度为50°左右,而在平行p-n结方向上,只有在近阈值处才是基横模工作,半功率点约7°左右。

当直流工作时,在黑暗的房间正面观察管芯,都能见到一小红点,在几米之外还能看到。但光谱测量说明光输出的峰值位置是8600 Å左右,故眼睛见到的只是荧光谱中的可见部分(7000 Å附近)。由于脉冲工作的占空比较低(小于千分之一),光强较弱,不能引起眼睛的感觉。图4是5—20#二极管在室温(20°C)连续工作时的光谱,工作电流是215mA,而这二极管的阈电流为207mA。

室温连续工作的外微分量子效率一般为20—

30%,最高的达52%。

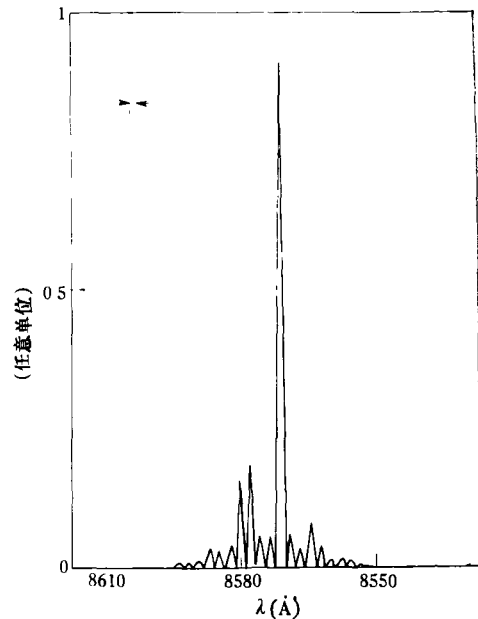


图4 5—20#二极管在室温(20°C)连续工作时的光谱,工作电流:215mA,阈电流:207mA

六、讨 论

通过我们的实验说明,只要对外延工艺作一定的改进,使外延片质量有所提高,那么做成条形管后就有可能做成室温连续的器件,即使不用IIa型金刚石做散热器关系也不大,而且,寿命超过1000小时也是可能的。

为了进一步提高器件寿命和改进器件的性能,我们今后着手进一步改进工艺的重点还是外延工艺。清洁度要进一步提高,氢气的纯度还必须提高1—2个数量级,从我们现在的含氧量1ppm左右减小到0.03ppm以下;温度控制的精度还需提高一个数量级(从0.1°C提高到0.01°C以上)等等,若能做到这些改进,就可指望寿命、功率、成品率都将会大幅度地上升。当然,制管工艺的改进也是重要的,改善欧姆接触,探索新的更有效的条形结构和管子的封装,都是我们今后需要解决的问题。这样才能使器件具有实用的价值。

参 考 资 料

- [1] Miller, B. I., *J. Appl. Phys.*, **43** (1972), 2817.
- [2] Kan, H. et al., *Appl. Phys. Letters*, **(27)** 1975, 138.
- [3] 中国科学院物理研究所半导体激光组、高能物理研究所一室应用组,《静电加速器在固体物理上的贡献——质子轰击条形 GaAs 双异质结激光二极管的研究》,《物理》杂志,5-11 (1976), 4.

1) 毛泽东,《矛盾论》,《毛泽东选集》,人民出版社,(1969), 297.