

会逐渐变成相应的金属间化合物。从薄膜扩散偶实验可以知道,在 Al 和 Ni 反应过程中,Al₃Ni 是首先形成的相。根据上述这些现象,可以得出如下结论:利用球磨,AlNi 不可能由扩散反应形成,否则 Al₃Ni 应该是形成的第一个相,AlNi 形成的过程可解释如下:球磨的最初阶段产生层状 Al-Ni 基本混合颗粒^[10],并且每个颗粒都包含许多层,它的平均组分接近整个样品的组分,即 1Al:1Ni。作为第一个相的 AlNi 的形成的机制要求反应一开始就出现平衡。显然在自助、放热反应中,这种平衡是能够达到的。如果这样的反应发生的话,晶粒间平衡块状结构将会逐渐出现。可以预计,觉察不到的自助反应同样会出现在具有大的负形成热的其他系统中。

综上所述,元粉的机械合金化能在不同约束和机制下进行,甚至包括在平衡状态下不互溶混的体系,例如具有正混合热的 Fe-Cu 系统。除了在亚稳平衡下层状结构内部的等温固态层扩散机制外,在机械合金化过程中通过多晶型约束也能控制相的形成。多晶型约束是由界面自由能引起的,这种界面自由能是和重复变形的具有超细结构的两相合金相联系的。另外,通过自助、放热反应也能导致平衡相的形

成。

- [1] J. S. Benjamia, *Metall. Trans.*, **1**(1970), 2943.
- [2] 王景唐、沈同德, *物理*, **22**(1993), 456.
- [3] R. B. Schwarz, R. R. Petrich, and C. K. Saw, *J. Non-Cryst. Solids*, **76**(1985), 281.
- [4] A. W. Weeber and H. Bakker, *Physica B*, **153**(1988), 93.
- [5] 杨元政、马学鸣、董远达, *金属学报*, **28**(1992), A400.
- [6] M. A. Morris and D. G. Morris, *Mat. Sci. Eng.*, **A136**(1991), 59.
- [7] 刘方新等, *物理学报*, **43**(1994), 327.
- [8] L. Schultz, in *New Materials by Mechanical Alloying Techniques*, ed., Arzt and L. Schultz, Informationsgesellschaft Verlag, (1989), 53.
- [9] W. L. Johnson, *Prog. Mater. Sci.*, **30**(1986), 81.
- [10] H. J. Fecht et al., *J. Appl. Phys.*, **67** (1990), 1744.
- [11] E. Ma and M. Atzmon, *Modern Phys. Lett. B*, **6**(1992), 127.
- [12] 刘方新等, *科学通报*, **38**(1993), 1565.
- [13] A. R. Miedema, *Phillips Tech. Rev.*, **36** (1970), 217.
- [14] H. J. Fecht et al., *Met Trans.*, **A21**(1990), 2333.
- [15] R. W. Bene, *J. Appl. Phys.*, **61**(1987), 1826.
- [16] Z. A. Munir and U. Anselmi-Tamburini, *Mat. Sci. Reports*, **3**(1989), 277.
- [17] G. B. Schaffer and P. G. McCormick, *Appl. Phys. Lett.*, **55**(1989), 45.
- [18] M. Atzmon, *Phys. Rev. Lett.*, **64**(1990), 487.
- [19] I. Brian, O. Knack and Kubaschewski, in *Thermodynamic Properties of Inorganic Substances*, Suppl., Springer-Verlag, (1977), 490.

半导体面发射微腔激光器及其集成面阵的应用

林世鸣

(中国科学院半导体研究所、集成光电子国家重点实验室,北京 100083)

半导体面发射微腔激光器可用于制作极低激射阈值、高密度、动态单纵模工作的二维光源。它的光场分布是圆形的,方向性好,耦合效率高,在并行光互连中采用面发射激光器有很多优点。此外,若制成锁相面阵,可以得到相当强的光功率输出。总之,它将可能在光通信、光互连、光信息处理、面阵光源等方面得到重要应用。

一、半导体激光器发展的历史回顾

自 60 年代半导体激光器问世以来,由于光

通信、光交换、光互连和光信息处理等应用方面的需要,在短短 30 年中,它取得了飞速的发展。其制作技术经历了由扩散法到液相外延法,直到今天的分子束外延法;其激射阈值电流由几

百 mA 降到几十 mA,直到亚 mA;其寿命由几百到几万小时,乃至百万小时,等等。各方面都取得了许多重大的突破。粗略地看,在这30年中大约每10年便产生一个重大进展,其中有代表性的进展是研制成功双异质结构激光器(DHL),量子阱激光器(QWL)和面发射激光器(SEL)。

60年代出现的初期的半导体激光器是同质结型激光器,它是在一种材料上制作的pn结二极管,在正向大电流注入下,在原来的pn结耗尽区内实现了载流子分布的反转,直至使腔内光的增益超过各种损耗之和(所谓透明),从而产生总的光的放大作用。同时在垂直于pn结的方向上通过解理晶片的方法,制作一对相互平行的光学反射平面,形成了一个法布里-珀罗腔,于是具有特定波长的光在腔内谐振并被放大,最后形成激光而输出。

在同质结中,由于注入载流子的扩散效应,其激射阈值电流很高,难于实现室温连续激射。在60年代末期出现的双异质结激光器是个突破性的进展,其结构的特点是,在P型和n型材料之间生长了仅有 $0.2\mu\text{m}$ 厚的、不掺杂的、具有较窄能隙材料的一个薄层,因此注入的载流子被限制在该区域内(有源区),因而注入较少的电流就可以实现载流子数的翻转,以致透明。此外,由于有源区材料的折射率较高,形成了很好的光波导,增强了光电的耦合效率。这两种限制效应极大地减小了激射阈值电流,实现了长寿命的室温连续激射,半导体激光器开始广

泛地应用于光通信等领域^[1,2]。

量子阱激光器的出现是半导体激光器在80年代的主要进展^[3]。它在结构上的特点是,它的有源区是由多个或单个阱宽约为 100\AA 的势阱所组成。由于势阱宽度小于材料中电子的德布罗意波的波长,产生了量子效应,连续的能带分裂为子能级,因此特别有利于载流子的有效填充,所需要的激射阈值电流特别低。此外,它还改善了激光器的高频性能、光谱特性、温度稳定性以及偏振特性等性能,因此量子阱激光器被誉为理想的激光器。

90年代登台的则是面发射激光器^[4]。在此之前的形形色色的半导体激光器都是沿着衬底片的平行方向出光的,而面发射激光器却是沿着垂直于衬底片的方向出光的,因此特别适合于制作光互连、光计算等的面阵光源。近年来取得了瞩目的进步,下面将对面发射激光器及其在光互连、光通信、面光源等方面的一些应用作一介绍。

二、面发射微腔激光器及其阵列

理论和实验证明,由于面发射激光器的谐振腔特别短,要实现室温连续激射,其镜面反射率必须达到或高于98%(对侧面出光的激光器而言,它只需30%即可)。前期的研究中,常通过蒸 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 或金、银等作成高反射镜,但为了简化工艺,现在一般采用具有不同折射率的同类半导体材料,作成 $1/4$ 波长相间的DBR(分布布拉格反射器)高反射率镜面,如图2中的 AlAs/GaAs (折射率 $\sim 2.95/3.6$)作成的DBR。为了得到98%以上的反射率,通常要生长20—30个周期的反射层^[5,6]。

如图2所示,面发射激光器是由顶部P型掺杂的DBR、中间i型(未掺杂)的谐振腔、底部n型掺杂的DBR所组成的pin二极管,谐振腔的中部是1—3个量子阱(100\AA 阱/ 80\AA 垒)的有源区,有源区宽度约为 600\AA ,略小于

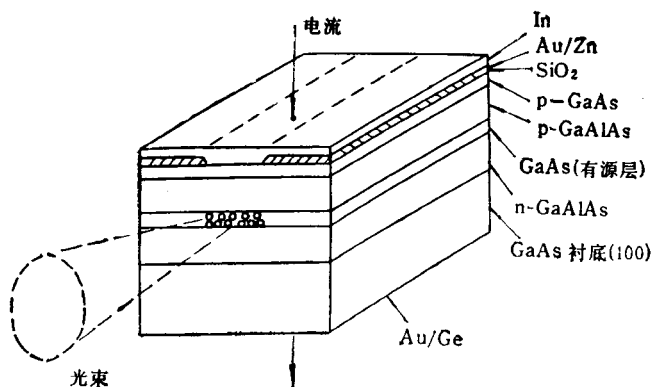


图1 双异质结激光器结构示意图

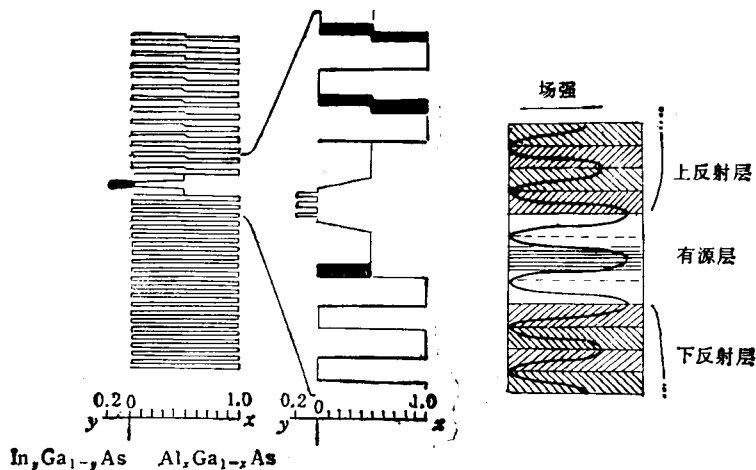


图2 面发射激光器的结构示意图
(左图表示成分,中间是有源区结构;右图是驻波强度分布图)

材料中的 $1/4$ 波长,且落在光场驻波峰处.增加光场与有源区的耦合度以降低阈值.有源区的两侧是限制层,它一方面起限制载流子的作用,另一方面调节谐振腔的长度,使其谐振波长正好是所需要的激光波长.由于谐振腔很短(约等于1个波长),因而模间距大,可以实现动态单纵模工作.考虑到 AlAs/GaAs 的 $1/4$ 波长层厚约为 $820 \text{ \AA}/680 \text{ \AA}$, 以及有源区量子阱势垒/阱宽为 $80 \text{ \AA}/100 \text{ \AA}$, 必须采用分子束外延的方法生长上述器件结构.分子束外延生长法是指在超高真空条件下,通过加热蒸发固态源喷射出分子,沉积在基片上,它可以通过控制束流来进行精确的超薄层生长.

面发射激光器沿垂直于衬底片的方向出光,这一点与发光二极管(LED)相似.但它发出的是相干光,光场很强,基横模的光场是高斯分布的,其光斑是圆的,光束很窄,在进行空间光互连时便于准直,与光纤耦合时效率很高,这些都是LED阵列所无法比拟的.除了上述优点以外,由于它不必采用解理面来形成谐振腔,可以进行整个衬底片的工艺制作和检测,而且易于和其他器件进行集成,因此在并行光信息处理中将会发挥很大的作用^[7].

为了充分地发挥面发射激光器的优点,一般在并行光信息处理应用中常把它作成下述两种阵列形式中的一种.一种叫做独立寻址形式,

图3是它的一个 8×8 阵列,其中所有激光器的n电极是公共的,但是各个激光器的p电极则是分开的,因此可按要求激发指定地址的激光器.另一种叫做矩阵式寻址形式,它按纵、横向把激光器分成行和列,其同行的激光器的p电极联在一起,其同列的激光器的n电极联在一起.当x行y列接通电源时,阵列中的(x,y)地址的激光器激射,但当 x_1, x_2 行和 y_1, y_2 列接通电源时,阵列中的 $(x_1, y_1), (x_1, y_2), (x_2, y_1), (x_2, y_2)$ 地址的激光器同时激射,可见它并非独立寻址,但是这种阵列可以作得十分密集.

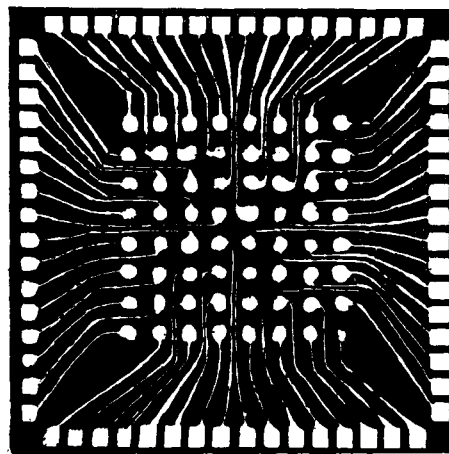


图3 8×8 独立寻址面发射激光器阵列俯视图

在面发射激光器面阵中每一个单管的截面

积已作得很小(其直径约 $1-3\mu\text{m}$),因而可以实现很低的阈值电流,目前已达到亚 mA 的水平。继续提高工艺水平,可以将有源区的体积减小一个量级而制成微腔激光器。在微腔激光器中,通过对自发辐射的控制,可使基模的自发辐射因子接近于 1 (普通激光器的自发辐射因子仅为 $10^{-4}-10^{-5}$),这可使其阈值电流降到 0.1mA 以下,因此它将是未来光电互连等应用方面的优选器件^[9]。

三、光电列阵互连中的面发射激光器

光电互连(包括光通信)已得到或将得到广泛的应用,其技术上的好处是有高的数据码率,大容量,抗干扰,串音小,能耗小,占据的空间小,以及可实现并行信息传输等^[9,10]。它不仅可

以用于长距离(大于几 km)的数字处理系统(这时主要采用点到点的互连,即一讲一听/通道的形式),而且可以用于短距离(cm—几 m)的数字处理系统(这时一般采用多点的互连形式,即多讲多听/通道的母线系统)。光电列阵互连(或并行光互连)就是为了满足后者的需要而产生的。

图 4 所示的是一个并行光互连的演示系统,它被设计为 128 个通道(8×16 二维阵列),可以用作电路版间互连所需的母线系统^[11]。它有三个组成部分:(1)二维光发射器,目前多用 LED (或普通激光器)与驱动电路一起焊在陶瓷片上,它们将被单片面发射激光器面阵所代替;(2)互连光学系统,主要有自由空间光学成像系统、矩形多模光纤束等;(3)高灵敏度接收器面阵,这是一个带有集成放大和逻

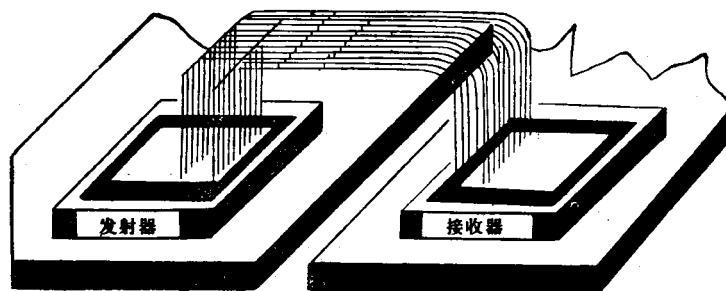


图 4 并行光电互连示意图

辑电路的 CMOS 光接收芯片。

为了使整个光电互连系统可靠地工作,必须使上述三部分协调地工作。首先要考虑光功率的配合。通常室温热噪声限制了接收器的灵敏度,传输 1 个 bit 的信息需要几千个光子才能达到必要的误码率,在可见或近红外光波段,这相当于 1fJ 的光能量,因此当传输率为 10Mbit/s 时,接收端需要 10nW 量级的光功率,这就对光发射器和互连系统的设计提出了要求。

作为比较,首先考虑由 LED 组成的光电互连系统,由于 LED 的量子效率在 $1\%-10\%$ 之间,而且发出的光是非相干光,因此不可能无损失地收集到所有方向上的光,并把它聚焦到探测器小小的接收面上,这是无法用光学系统

来弥补的基本缺陷。一般 LED 的耦合损失高达 99% ,其总效率(耦合进探测器的光功率与进入 LED 的电功率之比)只能达到 $10^{-4}-10^{-5}$ 量级,也即在接收端要接收到 10nW 的光功率,要求在发射端有 1mW 的能量消耗。单通道如此,当通道数增加时,其所需的能耗也相应地增加。由此可见,LED 比较适用于通道数较少和接收器灵敏度较高的系统^[12]。

对于由激光器组成的光电互连系统,由于激光器的量子效率在 $10\%-30\%$ 之间,尤其是它发出的是相干光,其方向性好,对光学或光纤系统以及探测器的耦合效率高,能量损失小,比起 LED 光互连系统,总效率至少可提高两个数量级,因此它对接收系统的要求低,特别适合作具有大量通道的平行光电互连系统。可见面发

射激光器面阵是光电互连中发射器阵列的最佳选择。有竞争力的 PICC (光子芯片间互连) 要求激光器阈值电流为 0.1mA 量级, 开关时间 $\sim 100\text{ps}$, 工作电压 $\leq 5\text{V}$ 。器件截面小于 $0.5 \times 0.5\mu\text{m}^2$ 的微腔激光器可能在不久的将来达到上述要求^[13]。

四、面发射激光器锁相面阵

如果把面发射激光器制作成锁相面阵, 则可以得到相当强的光输出, 成为激光光泵。虽然简单地增加有源区的体积就可以获得高的输出功率, 但如此制作的大截面面发射激光器容易产生光丝, 从而使光束质量变差, 因而采用类似于制作边发射激光器的锁相线阵的方法, 制作了面发射激光器的锁相面阵。因为它是二维阵列, 管芯数为线阵管芯数的平方, 所以其光强随线度增长得很快。此外, 它是面光源, 在光源形状设计上比线光源自由得多。

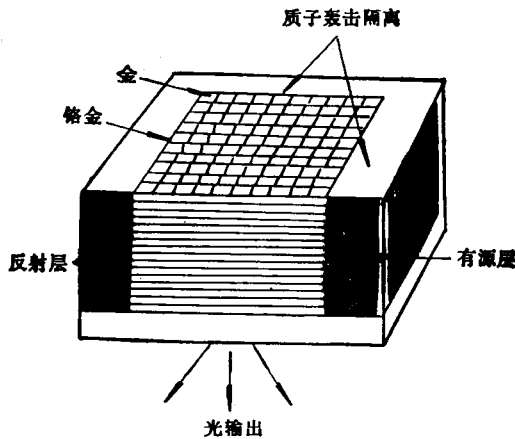


图5 面发射激光器锁相面阵示意图

制作面发射激光器锁相面阵的关键在于使其各个器件间的间距小于 $2-3\mu\text{m}$, 使得各个器件之间光相互耦合, 达到锁相相干的目的^[14,15]。一个 10×10 列阵结构图如图5所示, 每个激光器的截面为 $3 \times 3\mu\text{m}^2$, 相互间隔为 $1\mu\text{m}$, 整个激光器列阵的隔离由质子轰击形成, 各个激光器的上反射镜由高反射率的欧姆接触金膜方格形成, 管间由低反射率欧姆接触金膜网格形

成光隔离。

由于锁相面阵管子之间的间隔很小, 可以实现非常密集的集成, 其总光功率可以作得很大, 如已制作的 20×20 锁相面阵的最大输出光功率超过了 300mW , 它的总阈值电流是 380mA , 平均每个激光器的阈值电流仅 0.95mA 。

总之, 垂直腔面发射激光器是一种新型的量子阱激光器, 由于它的出光方向垂直于衬底, 易于制作二维阵列, 特别是由于它的激射阈值电流低, 输出光的方向性好, 耦合效率高, 将在并行光互连中取代发光管成为发射器阵列的最佳选择。另外, 由于其管芯截面小, 可以制作密集度很高的锁相面阵, 从而得到相当强的光功率输出。此外, 基于面发射激光器的动态单纵模工作的优点, 它还将在相干光通信中得到应用。

- [1] Kressel and J. K. Butler 著, 黄史坚译, 半导体激光器和异质结发光二极管, 国防工业出版社, (1983), 146.
- [2] G. H. B. Thompson 著, 张文芳等译, 半导体激光器器件物理学, 电子工业出版社, (1989), 143
- [3] H. Okamoto, *Japan. J. Appl. Phys.*, **26** (1987), 315.
- [4] F. Koyama et al., *Appl. Phys. Lett.*, **55** (1989), 221.
- [5] R. S. Geels et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-27**(1991), 1359.
- [6] G. Hasnain et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-27**(1991), 1377.
- [7] J. L. Jewell et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-27**(1991), 1332.
- [8] G. Bjork and Y. Yamamoto, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-27**(1991), 2386.
- [9] J. W. Goodman et al., *Proc. of the IEEE*, **72** (1984), 850.
- [10] M. R. Feldman et al., *Appl. Opt.*, **27**(1988), 1742.
- [11] K. Zurl and N. Streibl, *Optical and Quantum Electronics*, **24**(1992), S405.
- [12] T. Nagahori et al., *Optical and Quantum Electronics*, **24**(1992), S479.
- [13] T. Baba et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-27**(1991), 1347.
- [14] J. P. V. Ziel et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-26**(1990), 1873.
- [15] M. Orenstein et al., *Appl. Phys. Lett.*, **60** (1992), 1535.