

- [7] Doig S J , Prendergast F G. Appl. Spectrosc. ,1995 ,49 : 247 —252
- [8] Asher S A ,Bormett R W ,Chen X G *et al.* Appl. Spectrosc. ,1993 ,47 :628 —633
- [9] Holtz J S W ,Bormett R W ,Chi Z H *et al.* Appl. Spectrosc. ,1996 ,50 :1459 —1468
- [10] Pajcini V ,Munr C H ,Bormett R W *et al.* Appl. Spectrosc. ,1997 ,51 :81 —86
- [11] Harada I ,Yamagishi T ,Uchida K *et al.* J. Am. Chem. Soc. ,1990 ,112 :2443 —2445
- [12] Sweeney J A ,Harmon P A ,Asher S A *et al.* J. Am. Chem. Soc. ,1991 ,113 :7531 —7537
- [13] Asher S A ,Larkin P J ,Teraoka J. Biochemistry ,1991 , 30 :5944 —5954
- [14] Cho N , Song S , Asher S A. Biochemistry ,1994 , 33 : 5932 —5941
- [15] Cho N ,Asher S A. J. Am. Chem. Soc. ,1993 ,115 :6349 — 6356
- [16] Asher S A. Anal. Chem. ,1984 ,56 :720 —724
- [17] Asher S A ,Johnson C R. Science ,1984 ,225 :311 —313
- [18] Rummelfanger R ,Asher S A , Perry M B. Appl. Spectrosc. ,1988 ,42 :267 —272
- [19] Jones C M ,Asher S A. J. Chem. Phys. ,1988 ,89 :2649 — 2661
- [20] Bormett R W , Asher S A. J. Appl. Phys. ,1995 , 77 : 5916 —5923

垂直腔面发射半导体微腔激光器*

潘 炜 张 晓 霞 罗 斌

(西南交通大学计算机与通信工程学院,成都 610031)

吕 鸿 昌

陈 建 国

(英国 Bath 大学物理系)

(四川大学光电科学技术系,成都 610064)

摘 要 评述了垂直腔面发射半导体激光器研究的最新进展,就其结构特点、应变量子阱结构、超晶格镜面和微腔效应作了简要的论述,探讨了进一步降低半导体激光器阈值的途径,介绍了新型的氧化约束型垂直腔面发射半导体激光器,并对微腔激光器中自发辐射增强效应和三维封闭腔的特性给出了描述,同时展望了该器件的应用及发展前景。

关键词 垂直腔面发射半导体激光器,微腔效应,自发辐射,应变量子阱

VERTICAL CAVITY SURFACE EMITTING LASERS

Pan Wei Zhang Xiaoxia Luo Bin

(School of Computer and Communication Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

L üHongchang

Chen Jianguo

(Department of Physics, University of Bath UK)

(Sichuan University, Chengdu 610064)

Abstract A review is presented of vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs), outlining the main structural properties strained quantum wells, microcavity effects, recent developments in the fabrication oxide confined VCSELs, ways to decrease the threshold current of the increase of spontaneous emission, and the properties of three dimensionally closed cavities. Finally, the prospects for the

* 铁道部科技发展计划资助项目

1998 - 05 - 18 收到初稿,1998 - 11 - 23 修回

application and development of these lasers are discussed.

Key words VCSELs, microcavities effect, spontaneous emission, strained quantum wells

1 引言

垂直腔面发射半导体激光器(VCSELs)作为当前光电子学领域最活跃的研究课题之一,一方面是由于用分子束外延(MBE)、金属有机化学汽相淀积(MOCVD)和化学束外延(CBE)等薄膜生长技术生长的半导体微腔具有良好的结构可控性;另一方面半导体微腔在具有极低阈值的VCSELs、垂直腔发光二极管和它们的二维阵列、压缩光子态产生等方面有着更为直接的应用^[1].与边发射半导体激光器(EELs)相比,它具有较小的远场发散角,发射光束既窄又圆,阈值电流低,调制频率高,在很宽的温度和电流范围内都以单纵模工作,而且VCSELs不必解理,就能完成工艺制作和检测.根据Dennard提出的器件尺寸按比例缩小原理,随着器件尺寸的缩小,集成密度呈平方关系提高,速度和功耗大幅度改善,易于实现大规模激光阵列及光电集成等优点.它如同MOS晶体管在集成电路中的贡献那样,占有无可替代的地位,因此它在光通信、光互联、光信号处理及光集成元件等方面有着广泛的应用前景.

自从1977年Iga提出制作VCSELs的设想,进展一直比较缓慢,直到1989年实现了室温连续波运行,才引起人们的广泛关注.首先是量子阱结构材料生长技术,以及近年来的应变量子阱和应变补偿量子阱结构的引入;其次是高反射率布拉格反射器(DBRs)技术的引入,才使性能得到了更大改善.同时,由于VCSELs具有微腔结构,从而使现行激光器的动态特性得以改善.目前,能在室温连续工作和具有极低阈值电流(100 μ A以下)的VCSELs已相继问世^[2],它将成为目前占主导地位的边发射半导体激光器的有力竞争对手.近期,氧化约束型VCSELs的出现标志着硅基微腔激光器的问世,尤其是氧化约束半导体微腔和自组织

族纳米结构的结合,使得VCSELs和微腔激光器的研究取得了可喜的进展.

2 垂直腔面发射半导体激光器的结构特点

一般VCSELs的结构如图1所示,它由超晶格镜面、有源层和金属接触层组成.这里之所以称其为超晶格镜面,是因为它的晶格周期并不是取决于材料的晶格常数,而是取决于交替子层的重复周期.这种VCSELs是柱对称结构,光轴沿半导体晶体外延生长方向,光和电流矢量是平行的.两个反射镜分别为n型和p型DBR堆的布拉格反射器,有源区由多量子阱组成,常见的有圆形、方形和环形结构,分别在衬底和p型DBR的外表面制作金属接触层,并在p型DBR上制成一个圆形光窗口^[3].可采用顶端或底端输出,输出近圆形的激光束,方便地汇聚成细光束,圆形模式易于光纤耦合.

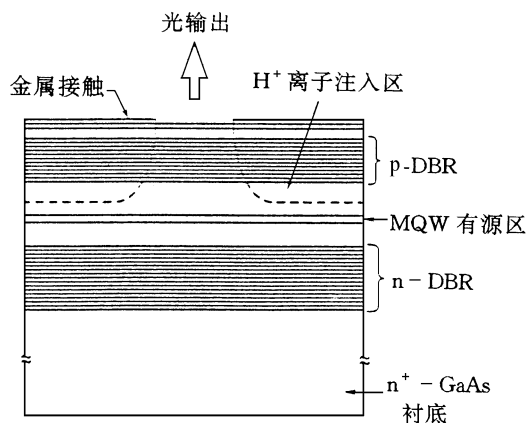


图1 VCSELs的结构示意图

2.1 氧化约束型 VCSELs

一种新型的氧化约束型VCSELs如图2所示.利用选择局部氧化GaAs/AlAs异质结,在GaAs层和有源层之间形成单边电介质层(天然氧化层 Al_xO_y),中间仅留下直径为6 μ m的AlAs区域未被氧化,形成内建侧向势垒,用于

限制注入载流子和电磁场。由于薄氧化层被夹在高反射率的 DBRs 中,从孔的中心向氧化层的侧面看去,对电磁场它可视为平面波导,结果不仅使得激发场不能在侧面进入氧化层,有效地阻止了光波的侧向传播,而且有利于电流注入效率的提高,降低串联电阻。这种结构表现出极小的光模体积(比离子注入型的 VCSELs 减小一个数量级)。实验室中光电转换效率已达到 60%, 阈值功率在 100 μ W 以下,比目前实用的 VCSELs(几个 mW 量级)降低了一个数量级。尽管这种激光器结构有待于完善,但其应用与发展前景是美好的。

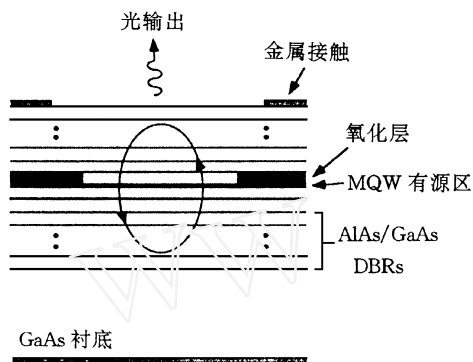


图 2 氧化约束型 VCSELs 示意图

2.2 VCSELs 中高反射率的布拉格镜面反射器

半导体光电器件端面的光学特性直接影响器件性能, 阈值电流、输出功率、外量子效率等都与端面反射率有着密切关系。由于 VCSELs 中获得增益的路径(10—30nm)比 EELs 小 4 个量级, 且单程增益小于 1%, 因而需要具有高反射率(99.6%)的反射镜。人们曾采用多种途径以提高腔面反射系数, 如镀上金属反射膜和多层介质膜以及利用生长半导体异质周期结构的布拉格反射器。常用的介质高反膜一般由光学厚度为 $\lambda/4$ 的高、低折射率材料的膜层交替构成, 典型的 VCSELs 镜面 (AlGaAs/GaAs) 包括 20—40 个周期结构, 对于 $\lambda/4$ 膜系介质高反射膜, 由于相长干涉结果, 使反射光得以加强, 总反射率将趋近于 1。目前 AlO_x -GaAs 的 DBRs 已表现出优良的性能, 因此裁剪膜层数的可能

性将具有重要的应用前景。

2.3 VCSELs 的纵模谱

VCSELs 具有微腔结构(有效腔长为 10 μ m 量级), 比 EEL 的腔长小 2 个量级, 纵膜间隔很大, 因而可实现稳定的动态单纵膜工作, 从而使现行激光器的动态特性、单纵膜和空间发射模特性得以改善。主激射模和相邻的纵膜之间有较大的模间隔, 这就使得主模和邻近的次模有较大的增益差, 边模抑制比 (MSR) 得到提高, 具有较高的光谱纯度。

2.4 VCSELs 结构的优化

在过去的几年中, 围绕离子注入型和近期的高效率氧化约束型 VCSELs 的优化设计, 包括其腔镜面、有源区材料、侧向电注入和波导限制的研究, 已使器件性能得到了巨大的改善。单模 VCSELs (横模控制和偏振控制)、长波长 VCSELs、可调谐 VCSELs 和多波长 VCSELs 阵列等方面的研究已成为人们关注的热点。

采用二次晶体生长形成反导引介质结构, 在氧化约束 VCSELs 中选择圆锥形氧化孔径、DBRs 镜面或增益区, 切断横向对称性, 在 DBRs 镜面区引入反对称的镜面反射率。不同的研究者使用了各种柱形和条形结构, 分别用于控制 VCSELs 的横模和偏振。早期的 VCSELs 都是用 AlGaAs/GaAs 系列材料发射 850nm 波的短波长激光器, 目前人们已经把 VCSELs 的波长从红光波段扩展到长波段, 以 InP 为衬底, 采用 GaAs/AlAs 薄片熔融技术和电介质镜面技术, 突破了由于基质对于 GaAs/AlAs 的晶格失配而引起缺陷损耗限制。采用对生长层厚度和组分的精确控制, 来进行模式波长的确定和调节。国内研究者采用选择腐蚀技术控制模式波长, 梯形截面掩埋结构控制横模的研究也取得了一些进展。然而, 在 VCSELs 的研究中, 仍存在着一些急待解决的问题, 诸如 VCSELs 的偏振控制直接影响着器件的信噪比、啁啾和传输容量。单横模控制和波导结构的优化、器件的热响应、空间横向烧孔和由于侧向尺寸的减小而导致光损耗增加, 以及对于各种注入电流、调制和其他工作条件下的稳定性, 这

些问题的研究还有待于进一步深入。

3 垂直腔面发射半导体激光器中的应变量子阱有源区

1975年,第一个量子阱激光器诞生,1982年,贝耳实验室制出 $0.25\text{kA}/\text{cm}^2$ 的量子阱激光器。现在,量子阱激光器的阈值电流已达到 0.2mA 。由于MBE, MOCVD和CBE等超薄层生长技术的发展和成熟,人为地改变半导体的结构参数,生长出优质的量子阱和超晶格材料,为发展新一代的光电子器件创造了前提条件,所以采用量子阱(GaAs, InGaAs或InGaAsP等有源材料)作为半导体激光器和半导体激光放大器的有源区已成为必然趋势^[4]。

异质结能带的带边不连续性决定了量子阱和超晶格的所有性质,使其呈现出许多与体材料不同的新特性。可以毫不夸张地说,有源区量子阱结构的引入大大优化了半导体的几乎所有品质。尤其是近些年来,应变量子阱结构用于VCSELs器件的有源层,使器件特性得到进一步优化。表1列举了3种 $1.55\mu\text{m}$ 激光器的相对性能指标^[3,4]。可以看出,多量子阱(MQW)比通常双异质结结构(DH)性能有明显改善,而应变多量子阱结构(SL-MQW)比一般量子阱的性能又大大提高了。

表1 $1.55\mu\text{m}$ DH, MQW和SL-MQW激光器性能比较

性能指标	DH	MQW	SL-MQW
阈值电流密度(A/cm^2)	1000	450	96
阈值电流(mA)	3.6	2.5	0.62
外量子效率(mW/mA)	0.2—0.25	0.2—0.3	82%
最大输出功率(mW)	180	330	380
特性温度(K)	55—65	76—80	97
最小线宽(Hz)	500	56	3.6
线宽增强因子	5.5	3.5	2.0
3dB调制宽度(GHz)	17	25	22
50mA(1Gb/s)频率啁啾(nm)	0.12	0.06	0.04

在一般量子阱基础上发展的应变量子阱结构,使得半导体激光器从追求晶格匹配的材料发展到采用晶格不匹配的两种材料生长在一起作为激光器的有源区,这无疑是一个重大的突

破。理论和实验都表明,采用应变量子阱结构具有更低的阈值电流密度,国内已报道的为 $145\text{A}/\text{cm}^2$,国际上已低于 $100\text{A}/\text{cm}^2$ 。激射波长得到延拓,填补了晶格匹配材料发射波长的盲区。更高的增益系数改善了线宽、调制频率和特征温度等特性。而采用阱垒间相反应变的“应变补偿量子阱结构”,使得量子阱的阱数和阱宽不受应变量的限制,进一步增加有源区的微分增益,降低阈值,提高饱和功率。可见失配异质结构材料因为没有晶格匹配的要求而具有更大的材料选择性质。正因为这一系列优点,为发展新兴人工改性材料和研制新型光电器件开拓了一个崭新的领域,引起了人们极大的兴趣和关注。

4 垂直腔面发射半导体激光器中的微腔效应

既然限制电子体系的维度(量子阱结构,以及作为量子阱激光器自然发展的量子线和量子点结构)已表现出对光与半导体相互作用的重要影响,那么同时也限制光电磁场的维度又会产生什么样的结果呢?近期已经揭示出一系列重要的腔量子电动力学(CQED)新现象,诸如微腔对激发子自发辐射的控制(增强或抑制),以及腔模对自发辐射谱的调制,微腔对原子的作用力(引力或斥力),微腔中原子物质波的干涉,微腔耦合模与原子的Rabi振荡和分裂等^[5,6]。

1989—1994年,VCSELs的阈值电流和输出功率迈上了一个新台阶,但光电转换率仅是6%—17%。近期氧化约束微腔结构的VCSELs使得光电转换率达到50%—60%,阈值电流达到几十至 $100\mu\text{A}$ ^[2]。如果采用高Q值的光学微谐振腔来改变真空电磁场的模式结构,甚至只选择某一种特殊的光场模式,那么微腔中自发辐射性质将会有很大的变化。可通过调整微腔线度(μm 量级),使腔的边界条件与原子自然发射的波长相匹配而形成共振腔。实验表明,自发辐射在一个波长的微腔中被增强,在小于半个波长的微腔中被抑制。对于VCLSELs的微腔

结构,光模式体积急剧减小,仅有几个光学模式处于有源介质的增益谱中,因而具有较高的自发辐射系数(理论估计值为 0.05).同时,由于二维 VCSELs 模式密度随频率呈台阶状变化,模式量子化也同样导致光与物质的强耦合相互作用,模密度呈现出不同于自由空间中的空间不均匀性和频谱分立性分布,故自发辐射系数自发辐射耦合率的改变将充当重要的角色.利用 CQED 效应(或称微腔效应),有可能成为进一步更大幅度地降低半导体激光阈值的新途径.如图 3 所示,在普通的开腔中, $A_c(s+1)n$ 表示耦合到腔模上的辐射, $(1-\beta)A_f n$ 表示耦合到自由空间中的辐射,后者对于增加腔内光子数无贡献,这里 n, s 分别表示激子数(即反转数)和光子数,参量 β 表示腔模在整个立体角中所占的比例, A_c, A_f 分别是表示腔内和自由空间的自发辐射速率^[1,5].

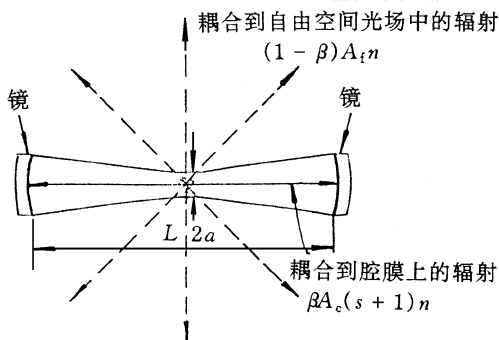


图 3 普通开腔中,耦合到腔模上的辐射和耦合到自由空间光场中的辐射

通常仅有十万分之一的自发辐射光被耦合到激发模中.在这种情况下,腔模光子数只有在阈值以上才可能迅速增加,也就是说,腔模输出中存在有阈值,如图 4 所示.如果自发辐射耦合到腔模的效率足够高(Q 值大于 500),微腔激光器的行为将会有明显的改善.在理想的三维封闭微腔中,当 $\beta = 1$ 且忽略非辐射损耗情形下,光输出与泵浦呈线性增加关系,即所谓的“无阈值”行为.随着泵浦的增加,发射将很快由自发辐射转变为受激发射,输出特性曲线中将不出现阈值,所有的发射光子被耦合进单一腔共振模,自发辐射率得到较大的共振增强.然

而,这种自发辐射的控制不仅在封闭的三维结构中存在,同样,在二维限制的圆柱和圆盘微腔以及一维限制的平面微腔中也存在.目前已出现的半导体微腔大体可归结为 F-P 微腔、“回音壁模式”(WG)微腔和光子晶体缺陷模微腔 3 种典型的腔结构^[7-9].其中 F-P 微腔是目前理论和实验上研究最广泛的半导体微腔,它的 CQED 效应已从实验上得到证实.VCSELs 和微腔型高效率发光二极管正是这种平面微腔的典型代表.与此同时,与传统激光器平行镜面结构截然不同的图钉状微腔结构的 WG 微腔研究也竞相开展起来.近期报道的 InGaAs 量子阱微盘激光器,其自发辐射系数可达到 0.2.国内由北京大学研制的微盘(InGaP/AlGaAs/GaAs)也有一定的特色.

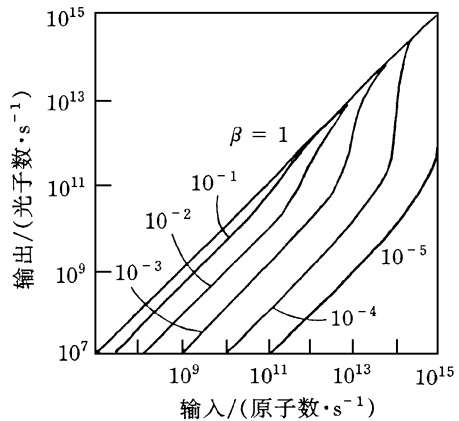


图 4 光输出与泵浦速率关系的曲线 (β 的取值范围为 $10^{-5} - 1$)

5 垂直腔面发射半导体激光器的应用及其发展前景

随着光互连及二维光信息处理的发展,微小尺寸、极低功耗和高集成度激光器阵列的需求将提上日程.VCSELs 的结构决定了它具有高密度、高传输率、高平行光传输和可方便地进行二维空间组合的特点,成为理想的集成光电子学有源器件和空间光学以及光计算机并行处理的关键器件.VCSELs 的高速响应特别适用于计算机中的芯片光互连和自由空间光互连,

因而一些光学的傅里叶变换技术和全息技术都将在光互连中采用,以满足并行处理的传输要求.在高速长距离数据传输中,直接调制 VCSELs 已获得波长为 980nm 时传输速率为 10Gb/s,长波长 1.55 μ m 时传输速率为 2.5Gb/s,传输距离达 200km,氧化约束结构调制带宽超过 16GHz 的结果.近年来的研究进展相当迅速,在光互连方面已走向实用阶段.

在光纤通信中,随着局域网(LAN)带宽的拓宽,千兆位以太网(Gigabit Ethernet)和其他高速 LAN 协议的需求,为满足低成本的多模光发射器和光纤的要求,VCSELs 将成为理想器件.据预测,到 2001 年,将安装 1000 万公里的多模光纤,其中 80% 用于与数据交换(或 LAN)相关的应用,为多模光发射器提供了巨大的市场.对于发射波长为 850nm 的 GaAs(四量子阱)和 980nm 的 InGaAs(三量子阱) VCSELs 是目前比较成功的器件,其中波长为 850nm 的短波长 VCSELs 已表现出良好的应用前景.然而在 1.3—1.55 μ m 的波长段,一度由于长波长 VCSELs 材料的折射率差值小,使得单片半导体 DBR 的周期数增大,在工艺上制作困难,近期已获得室温下 100s 连续工作(mA 量级阈值电流, mW 量级光输出)的好结果,在 WDM-LAN 系统中,多波长 VCSELs 阵列和可调谐 VCSELs 的应用,被认为是理想的“波长工程”器件^[2],近期实现了连续可调范围达到 32nm(13THz)的结果,140 \times 140 单元微腔 VCSELs 面阵也已实现.此外,各种波长的 VCSELs,例如红、绿、蓝三原色的 VCSELs 阵列一旦成功,则在彩色印刷和平面显示等方面的应用前景就不言而喻了.

VCSELs 很容易实现高密度的平面阵列集成,对于光信息处理和光计算技术的发展有着特殊的贡献.它首先用于图像处理、模式识别;其次用于光神经网络计算技术、多值逻辑等新型电路.采用 VCSELs 的光电子集成器件(OE-IC)面阵芯片,即一对 VCSELs 和 PD 探测器构成一个光电子神经元,可以方便地在各神经元之间实现自由空间光互连;另外,由于 VCSELs

的竖直谐振腔可以非常小,因而有可能做成高速率的光开关,控制二维阵列中各 VCSELs 的位相,可以控制输出光的相干性.通过对各个 VCSELs 激射光的锁模效应,可以得到方向性很强的大功率激光输出.同时,它也是一个理想的泵浦光源,VCSELs 适宜于跟光纤实现高效率耦合,满足高密度光盘的读写光源的要求.人们已着力研制 VCSELs 作为掺 Er 光纤放大器的泵浦源的 980nm 波长量子阱激光器,有报道研究者正试图利用单片 VCSELs 平面阵列作为光电转换器件,实现人眼的基本功能.

近年来随着自组织生长技术的成熟,对于失配晶格材料(即使晶格常数相差较大的材料)可生长出没有缺陷的应变层超晶格,从而展现了其潜在的应用前景.运用氧化约束半导体微腔和自组织生长的 II-VI 族纳米结构(量子点)技术,为量子物理的实验探测敞开了大门,提供了丰富的研究内容,包括电子输运、控制自发辐射和微腔量子光学等方面.可以预计,以人工设计材料即能带工程(剪裁、再构和带偏移等)为背景的半导体量子阱、量子线、量子点和超晶格的低维半导体量子体系,仍将作为半导体物理研究的主流.对其光学性质的进一步认识,将形成光子物理学科,并将使光子器件的研究提到新的高度.微腔激光器是研究 CQED 的重要工具,而 CQED 则是实现微腔激光器高性能目标的理论基础.从技术发展趋势判断,最为可行的微腔激光器是 VCSELs^[10].除此之外,利用无粒子数反转光增益可能是另一条从根本上降低半导体激光器阈值的途径,而这方面的理论和实验目前刚起步,有许多问题尚待探索和开拓.

参 考 文 献

- [1] Yokoyama H, Nambu Y, Kawakami T. Confined Electrons and Photon: New physics and Application. in: Burstein E, Weisbush C eds. NATO ASI Series B, Vol. 340. New York: Plenum Press, 1995, 427—430
- [2] Chang - Hansnain C J. OPN Optics & Photonics News. , 1998, 9(5): 34—39
- [3] Agrawal G P, Dutta N K. Semiconductor Lasers. 2nd edition. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993. 462—468, 473—485

- [4] Zory P S. Quantum Well Lasers. London Academic Press: 1993. 73—78, 198—203
- [5] 郑厚植. 半导体学报, 1997, 18: 481—491
- [6] Yorokoyama H, Nishi K, Anan T *et al.* Opt. & Quantum Electron. , 1992, 24: S245—S272
- [7] 章蓓. 物理, 1996, 25: 652—658
- [8] Shtengel G, Temkin H. Appl. Phys. Lett. , 1994, 64: 1062—1064
- [9] Yamanishi M. Prog. Quant. Electron. 1995, 19: 1—39
- [10] Deppe D G, Huffaker D L. OPN Optics & Photonics News, 1998, 9(1): 30—33

非易失铁电存储器的进展和若干问题*

罗维根

(中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050)

摘要 铁电薄膜与半导体集成, 产生了新一代非易失存储器. 它的功耗之小, 写入速度之快, 可重写次数之多以及抗辐照能力之强是目前任何一种半导体存储器所不及的. 文章介绍了非易失铁电存储器的原理、特点、进展和应用, 并讨论了这类存储器在进入大规模商业生产时所面临的若干材料、工艺和器件失效等问题.

关键词 铁电薄膜, 铁电随机存取存储器, 非易失存储器

NON-VOLATILE FERROELECTRIC MEMORY AND RELATED ISSUES

Luo Weigen

(Shanghai Institute of Ceramics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)

Abstract The combination of ferroelectric thin films with integrated semiconductor chips has created a new generation of non-volatile memories. They are superior to all traditional non-volatile memories in their low power consumption, high writing speed, high writing cycle endurance and strong anti-radiation properties. This paper describes the principle, characteristics, development and applications of non-volatile ferroelectric memories. Related issues pertaining to ferroelectric thin films, processing technologies and device degradation should be solved before embarking on commercial production.

Key words ferroelectric thin film, ferroelectric random access memory, non-volatile memory

1 引言

铁电体是一类具有自发极化、自发极化矢量可随外电场而反转的极性电介质材料, 具有独特的电、光、力、声和热学等性能以及它们之间相互耦合或转换的功能. 但在过去 50 多年里, 只有单晶和陶瓷体块铁电体获得了应用. 近 10 年来, 世界各国许多实验室在发展薄膜铁电

体的制备和集成技术并实现铁电薄膜器件的商品化方面作了大量的研究和开发, 把性能优良的铁电薄膜与成熟的半导体电路结合, 产生了新颖的集成铁电器件, 在微电子、光电子和微电子机械等高新技术领域显示出十分重要的现实应用和潜在应用的前景^[1]. 其中, 最有竞争力的

* 国家高技术新材料计划和上海市应用物理中心资助项目
1998-06-15 收到初稿, 1998-08-18 修回