

红外量子级联激光器*

刘峰奇 王占国

(中国科学院半导体研究所 中国科学院半导体材料科学实验室 北京 100083)

摘要 量子级联激光器是一种基于子带间电子跃迁的新型单极光源.文章系统地介绍了量子级联激光器全新的工作原理、结构设计思想以及它所固有的特点,对其研究现状进行了简略总结,同时对其未来的发展作出展望.

关键词 分子束外延,量子阱,超晶格,能带工程,量子级联激光器

INFRARED QUANTUM CASCADE LASERS

LIU Feng-Qi WANG Zhan-Guo

(Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract The quantum cascade laser is a new mid-infrared semiconductor source based on electronic transitions between energy levels created in the conduction band by quantum confinement. A description is given of the basic principles, standard structural design, and inherent merits of quantum cascade lasers. Recent progress is summarized briefly and future prospects of these fascinating lasers are pointed out.

Key words molecular beam epitaxy, quantum well, superlattice, band-structure engineering, quantum cascade laser

1 引言

2—20 μm 的小型可集成光源具有广泛的应用,例如中远红外夜视、中远红外雷达、红外通信、远距离探测、大气污染监控、工业烟尘分析、化学过程监测、分子光谱研究、医学诊断和红外干扰(对抗)等.基于III-V族材料激光器的发射波长都不超过4 μm ,再长的波长只能采用IV-IV族的铅盐系及II-VI族的汞硫系等所谓窄带隙材料了.但窄带隙材料制备技术还欠成熟,难以制备无缺陷的材料.而窄带隙材料本身的种种不足,如过大的俄歇复合损耗以及过大的自由载流子吸收损耗等,又为高性能激光器的研制增加了新的难度.尽管在材料生长和器件制备方面一直进行着艰辛的努力,但窄带隙PN结半导体激光器如果沿用以往的模式是很难有所作为的.

因此,人们逐渐意识到利用量子阱子带间的光学跃迁现象有可能演变及开拓出红外特性可以剪裁的新型红外光源.1971年,前苏联Ioffe物理技术研

究所的Kazarinov和Suris共同提出了利用偏压下电子通过一系列量子阱的光子辅助量子隧穿实现光增益的创新思想^[1],即在偏压下电子从一个量子阱的基态跃迁到相邻量子阱的激发态并伴随光子发射.随后,各国科学家提出了基于量子隧穿的激光器的一系列设想,部分设想得到实验验证并实现了红外光发射,但都没有实现子带间的受激光发射.直到1994年,AT&T Bell实验室通过分子束外延技术在InP衬底上成功地生长出复杂的InGaAs/InAlAs梯度带隙多量子阱结构,这种多量子阱结构由几百层组成,通过能带工程实现了第一个偏压下子带间受激光发射的4.3 μm 红外激光器^[2].由于该激光器的有源区是由耦合量子阱的多级串接组成,从而实现了单电子注入的多光子输出,所以称作量子级联激光器.这种通过分子束外延技术和能带工程的方法,提供了一个用稳定性和重复性更好的III-V族宽带隙

* 国家重点基础研究发展规划(批准号:G20000683)、国家自然科学基金(批准号:69786002)和国家高技术计划新材料领域(批准号:715-001-0111)资助项目
2000-11-10收到初稿,2001-01-16修回

材料代替 HgCdTe 和 PbSnTe 材料组成带间器件的有效手段.量子级联激光器的出现开创了利用宽带隙材料研制中远红外半导体激光器的先河,在中远红外半导体激光器的发展史上树立了新的里程碑.以量子级联激光器为先导的新型量子阱、超晶格子带/微带激光器,以其优越的性能及其在材料选取、器件设计等方面的前所未有的自由度,为新一代中远红外半导体激光器的研制注入了新的活力,展示了诱人的发展前景.

2 量子级联激光器工作原理

利用分子束外延(MBE)技术生长超薄层半导体材料而对其电子能级、波函数及能带结构实施的量子工程,使人们能够在远大于原子尺度的介观尺度(1—100nm)上观察到量子现象.这种能带工程是剪裁电子学、输运及光学性质并开辟新材料和器件应用的基础.

量子级联激光器是一个量子工程用于设计新型激光材料和相应光源的光辉典范,它是一种基于子带间电子跃迁的中红外波段单极光源,其工作原理与通常的半导体激光器是截然不同的.量子级联激光器的激射方案是利用垂直于纳米级厚度的半导体异质结薄层内由量子限制效应引起的分离电子态,在这些激发态之间产生粒子数反转.它的有源区是由多级耦合量子阱串接组成,从而实现电子注入的倍增光子输出,第一级由注入区、耦合阱激光跃迁区和弛豫区三部分构成,而第一级的弛豫区又是下一级的注入区^[3].图1是典型的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 量子级联激光器有源区在正向偏压下一个周期的导带示意图,注入/弛豫区设计成梯度带隙超晶格结构.注入区的作用是从有源区的一侧注入电子,而弛豫区从另一侧收集电子,并在电子注入到下一级有源区之前使其充分弛豫降低能量,以避免因电子速度过高(较宽的速度分布函数)而引起隧穿效率降低.在阈值电压下,有源区的两个低能态子带($n=0$ 和 $n=1$)间距等于光学声子能量,这两个子带间的散射时间很小($\tau_1 \leq 0.5\text{ps}$),导致 $n=1$ 态的寿命很短;另一方面,子带2与子带1之间的间距较大,与大的动量转移相关的光学声子发射使得子带2与子带1之间的散射时间相当长($\tau_2 \geq 2\text{ps}$),导致 $n=2$ 态的寿命较长($>1.3\text{ps}$),满足粒子数反转条件.梯度带隙超晶格结构弛豫/注入区设计成 $n=2$ 态电子波的布拉格反射器,从而具有抑制电子从耦合阱的 $n=2$ 激发态逃逸和促使电子从耦合阱的低能态(n

$=0$)顺序隧穿抽运的双重作用.当注入能量对应于 $n=2$ 态时,要求弛豫区的每一对阱垒满足布拉格反射条件,形成 $n=2$ 态电子波的增反膜.这要求每一对阱和垒层(l_w, l_b)满足 $k_w l_w + k_b l_b = \pi$,这里 k_w 和 k_b 分别是电子在阱中和垒中的波数, l_w 和 l_b 分别是阱和垒层的厚度.这个条件保证被所有超晶格周期反射的电子波之间的相长干涉.从 $n=0$ 态抽运出来的电子进入梯度带隙超晶格结构区,迅速弛豫其动量和能量,然后再注入到下一级.注入电子在每一个耦合阱激光跃迁区产生一个光子,这种注入区、耦合阱激光跃迁区的多级(通常为25级)串接之后就实现电子注入的倍增光子输出.

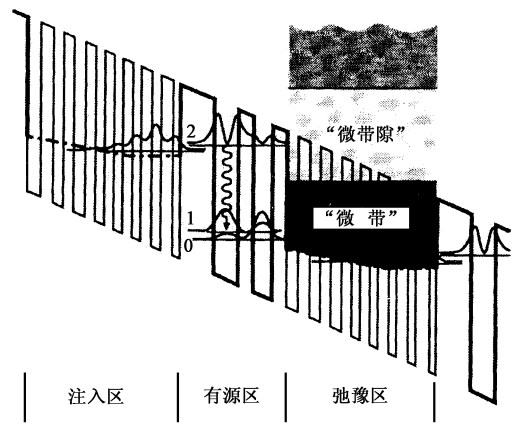


图1 正向偏压下 $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ 量子级联激光器一个周期的导带示意图

(为了减小因注入而产生的空间电荷效应,弛豫/注入区为部分N型掺杂,虚线是梯度带隙超晶格结构弛豫/注入区的有效带底,标有“微带”的区域表示一簇间距很近的能态的能量范围,这种超晶格又设计成一个“微带隙”阻止电子从 $n=2$ 能态的逃逸,波浪线代表激光跃迁)

量子级联激光器结构是利用分子束外延技术在InP衬底生长晶格匹配的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 异质结材料体系.它的有源区由25级以上交替生长的耦合阱激光跃迁区和梯度带隙超晶格结构弛豫/注入区构成.其他各层(光波导包层)的限制使有源区的辐射沿着平行于层的方向传播(如图2所示).子带间跃迁的选择定则使模式的极化方向垂直于薄层.这种单模波导的限制因子 $\Gamma=0.53$,折射率 $n=3.26$.整个激光器结构共500多层,其器件制作工艺比较简单,该类激光器的增益过程由自然解理面构成的法布里-珀罗(Fabry-Perot)腔实现,通常腔面不镀膜,这与量子阱激光器的增益原理基本上是一样的.

N ⁺ 型	InGaAs 帽层
N型	InAlAs/InGaAs 梯度带隙超晶格
N型	InAlAs 限制层 2μm
N型	InGaAs/InAlAs 梯度带隙超晶格
N型	InGaAs $n = 1 \times 10^{17}$ 300nm
25级有源区(每级18-22层 InGaAs/InAlAs)	
N型	InGaAs $n = 1 \times 10^{17}$ 300nm
N型	InAlAs/InGaAs 梯度带隙超晶格
N型	InP 衬底 $n = (1-4) \times 10^{18}$

图2 由分子束外延生长的 InGaAs/InAlAs 量子级联激光器的结构示意图

3 量子级联激光器的特点

量子级联激光器与常规的二极管激光器的工作原理是根本不同的,它具有许多普通激光器所不具备的优点:

(1) 它的工作波长与所用材料的带隙无直接关系,仅由耦合量子阱子带间距决定,从而可实现对波长的大范围剪裁.

(2) 这种单极粒子跃迁辐射具有单向偏振(TM波)性,极适合于“回音壁模式”微腔激光器的制作.

(3) 量子级联激光器最突出的优点在于它的级联本质是一个注入电子可以在每一个周期产生一个光子,而不像通常的半导体激光器那样,一个电子-空穴对仅产生一个光子.因此适当增加量子级联激光器有源区的串联级数可望获得大的光功率输出.

(4) 因为量子级联激光器是一个激光跃迁发生在导带的子带间的单极器件,其子带跃迁态之间的联合态密度类似于 δ 函数,对应的增益谱很窄并具有较小的温度敏感系数;另外,带间俄歇非辐射跃迁并不严重,因此对激光器工作的影响不大,这有助于实现红外量子级联激光器的室温工作.

(5) 既然量子级联激光器的受激发射过程是发生在导带的子带间,弛豫时间远比带间复合寿命短,因此它是一种超高速响应的激光器.

(6) 这种子带间的受激发射与所用材料的带隙结构的类别(直接或间接带隙)无直接关系,因此在制备材料的选取方面具有更大的自由度.对于 Si/GeSi 异质结材料体系,可以设计 20-50μm 的量子级联激光器,并可以和现有的 Si 基技术相兼容.

(7) 随着纳米加工技术和量子点制备技术的发展,在不远的将来,量子点级联激光器的问世将给我们带来惊喜,必将把量子级联激光器的发展推向新高潮.量子点级联激光器的增益谱非常窄,由于三个

方向的量子尺寸限制,因而避免了因声子发射引起的非辐射衰减,从而可以将阈值电流密度降低几个量级.

4 量子级联激光器研究现状

AT&T Bell 实验室于 1994 年首先实现 InP 衬底上 InGaAs/InAlAs 量子级联激光器的低温脉冲激励,随后器件性能逐年提高,并在该领域一直保持国际领先.波长约 5μm 的器件连续工作温度达 120K,20K 和 77K 的单腔面连续输出功率分别为 700mW 和 200mW;脉冲工作温度为 320K,室温单腔面峰值功率达 210mW^[4].波长约 8μm 的 InGaAs/InAlAs 激光器脉冲工作温度 $\geq 425K$,100K 的脉冲峰值功率 $\geq 1.3W$,30K 和 80K 的单腔面连续功率分别为 510mW 和 200mW,室温单腔面峰值功率达 325mW^{5,6]}.1998 年 6 月,Bell 实验室联合耶鲁大学和德国的 Max-Planck 研究所共同研制成功远场方向性极好、高功率、具有混沌谐振腔的量子级联微柱激光器^[7],这种微型激光器集谐振光学、混沌理论和半导体量子工程于一体,在降低阈值电流密度的同时将功率提高了 3 个量级.

随着该类激光器研究迅速升温,材料体系也扩展到 GaAs/AlGaAs 系列^[8,9].理论研究日趋深入全面,器件设计、材料生长和器件工艺逐步改进,器件性能逐年提高,级联激光器的波长范围已扩展到 3.4-20μm^[10].双色量子级联激光器^[11]、分布反馈量子级联激光器^[12]、表面发射分布反馈量子级联激光器^[9]和量子级联微柱(微盘)激光器^[13]已相继研制成功.

为了提高量子级联激光器的电流承载能力,AT&T Bell 实验室的 Scamarcio 等人于 1997 年实现了超晶格结构的级联激光器^[14].它是基于导带的微带间光学跃迁的单极激光器,由于在有源区和注入区的微带输运,超晶格量子级联激光器具有大的电流承载能力及相伴的高功率输出.其他的优点包括本征的粒子数反转(这与大的微带间/微带内弛豫时间比有关)以及在布里渊区边界处激光跃迁的高振子强度.这种振子强度要比通常双阱耦合量子级联激光器的子带间的振子强度大得多,特别是在长波长($\geq 10\mu m$)时更是这样.图 3 是超晶格量子级联激光器的概念示意图,偏压下其典型的导带示意图如图 4 所示.超晶格低掺杂($\leq 10^{17}cm^{-3}$)或不掺,可以保证电子的费米能级远在第一微带顶之下($E_F \leq$

10 meV), 因此, 直到室温, 第一微带的顶部是空的. 电子是从靠近第二微带的底部注入, 从这里, 电子能够产生光学跃迁至(波浪线)第一微带的顶部. 在 k 空间, 这种跃迁是发生在布里渊区边界. 图中显示微带间散射过程主要是光学声子发射. 严格地讲, 一个电子热化至第二微带的底部可以通过在平行于薄层的声学声子发射(具有大的动量转移, 散射时间 $\tau_{\text{im}} \sim 10\text{ps}$) 和一系列微带内散射而散射至第一微带的顶部. 而微带内散射是快的 ($\sim 0.1\text{ps}$), 因为它只包含小波矢的声学声子发射. 这个大的弛豫时间保证了粒子数反转.

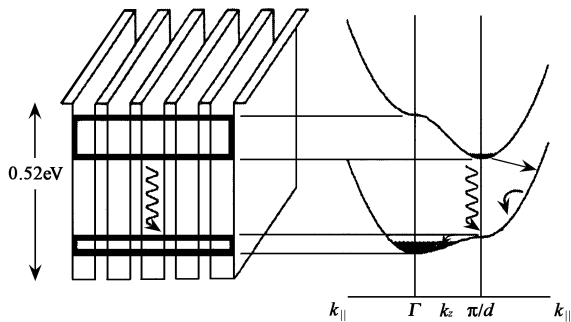


图3 超晶格实空间能级示意图(左图)和超晶格的色散曲线(右图)

[右图的左半部(k_{\perp}), 右半部(k_{\parallel}) 分别表示垂直于、平行于生长薄层. 波浪线代表微带间激光跃迁过程, 电子被注入到上面微带的接近底部的位置. 电子从这些态散射到较低微带的散射时间要比微带内的散射时间大得多, 因此在布里渊区边界产生粒子数反转. 通过控制掺杂浓度, 较低微带的载流子浓度控制得足够低, 因此, 微带宽度与准费米能级的差值远大于热能 kT . 这保证了较低微带的顶部的粒子数可以忽略]

目前, 有两种设计方案避免有源区掺杂并且不导致电压诱导的超晶格态的局域化^[15]: (1) 调制掺杂产生一个空间电场正好补偿没有掺杂的超晶格有源区的电压降; (2) 超晶格有源区设计成厚度变化的量子阱(啁啾超晶格), 因此, 在外场下, 局域量子阱态相互交叠, 形成微带. 这两种措施可以大大降低阈值电流密度, 增加功率输出及提高工作温度. 以啁啾方式设计的 $7.6\mu\text{m}$ 的激光器室温峰值功率已达 500mW .

由于量子级联激光器的结构十分复杂, 技术含量高, 目前国际上仅有 10 个左右的实验室正式报道研制成功量子级联激光器, 其中有中国科学院半导体研究所和中国科学院上海冶金研究所. 从量子级联激光器潜在的应用前景方面考虑, 拓宽其工作波长范围是必要的. 但是, 向长波长方向发展存在一定的困难. 因为随着跃迁能量的减小, 声子发射率增强

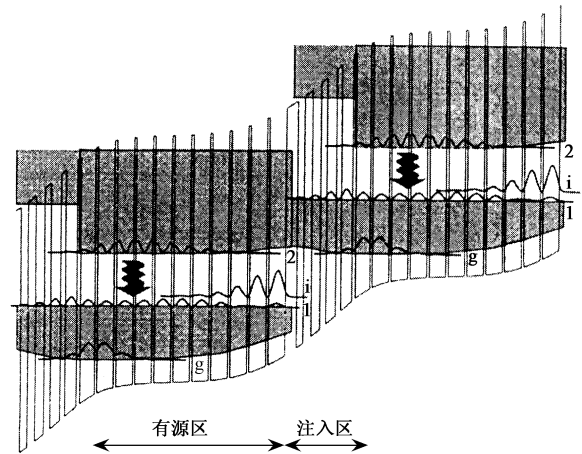


图4 阈值偏压下 InGaAs/InAlAs 超晶格子级联激光器的导带示意图

(电子从前一级的基态 g 注入, 波浪线代表激光跃迁, 即从第二微带的底部 2 跃迁至第一微带的顶部 1)

导致辐射效率降低; 而且掺杂半导体的带内自由载流子吸收系数大致与波长的平方成正比, 从而导致较大的光学波导损耗. 这些因素必将导致很高的阈值电流密度.

对军事上最敏感的 $3-5\mu\text{m}$ 的第一个大气窗口, $4\mu\text{m}$ 左右的波长是最佳选择. 然而, 量子级联激光器对光子能量的剪裁也是有一定限度的, 要使该类激光器的工作波长在 $4.3\mu\text{m}$ 以下, 必须采用应变补偿的方法来提高 InGaAs/InAlAs 材料体系的导带带阶. 由于材料制备更难, 目前国际上仅有中国科学院半导体研究所^[16] 和 AT&T Bell 实验室^[10] 实现了 $4\mu\text{m}$ 以下的级联激光器激射. 中国科学院半导体研究所的刘峰奇等人通过优化生长条件和设计方案, 生长出应变补偿 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ 量子级联激光材料, 并实现该类激光器 34°C 准连续激射(占空比 $7.2\mu\text{s}/165\mu\text{s}$), 波长 $3.5-3.7\mu\text{m}$. 室温下 $20\mu\text{m} \times 1.6\text{mm}$ 器件的最大输出功率大于 10mW , 阈值电流密度为 $1.2\text{kA}/\text{cm}^2$, 在最大输出功率处的准连续激射可持续 30min 以上, 器件性能优于 AT&T Bell 实验室^[16,17]. 图 5(a) 是刘峰奇等人用分子束外延方法生长的 25 级应变补偿 $\text{In}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}/\text{In}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ 量子级联激光器材料(其有源区每级 22 层)的 X 射线衍射结果^[17]; 图 5(b) 是用示波器在线监测部分器件的老化结果: 上部脉冲为电脉冲, 下部脉冲为相应的光脉冲^[18].

受量子级联激光器新的工作原理的启发, 1997 年杨瑞青(Rui Q. Yang) 等人提出并研制成功 InAs/

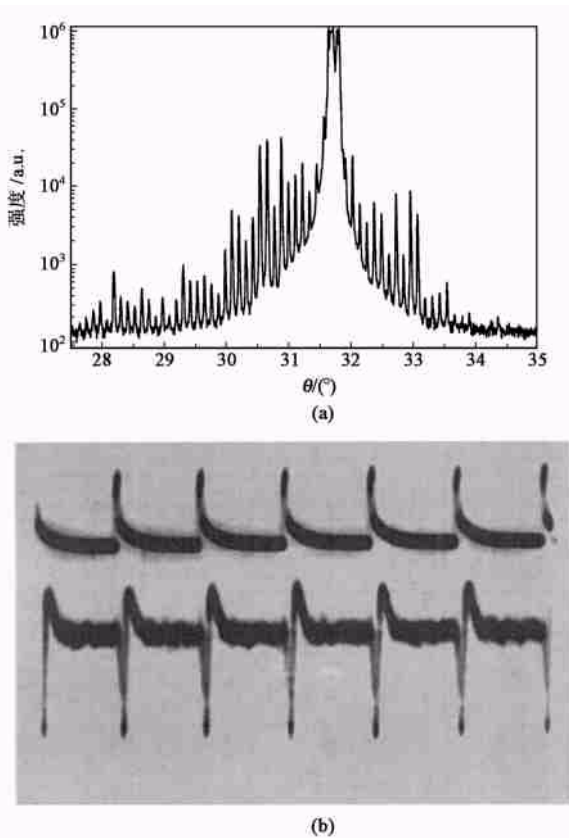


图 5

(a) 应变补偿 $\text{In}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}/\text{In}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ 量子级联激光器材料的 X 射线衍射结果;(b) 部分器件的老化结果:上部脉冲为电脉冲,下部脉冲为相应的光脉冲

$\text{GaInAs}/\text{AlSb}$ 的 II 型带间级联激光器,并在最近几年也取得一定进展,但其综合指标与量子级联激光器相比还相差甚远,由于铋化物材料制备技术还不成熟,II 型带间级联激光器在最近几年内很难有所作为。

5 量子级联激光器的发展前景及展望

尽管量子级联激光器具有鲜明的物理图像,但其商用前景目前还不容乐观.其罕见的复杂结构和浩繁的生长层次是对分子束外延生长技术极限的挑战;其较大的阈值电流密度还影响着实用化进程,其致命的弱点是散热性能较差,但是该类激光器向微型化发展其前景看好。

新概念的“移植”和“杂化”对量子级联激光器的发展起着至关重要的作用.1998 年 6 月, Bell 实验室、耶鲁大学以及 Max - Plank 研究所共同将“非对称谐振腔”概念用于研制 $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ 量子级联微腔激光器并取得巨大成功之后,奥地利的维也纳技术大学^[19]于 2000 年 4 月研制成功四极子形状(类似

于畸变的足球场形状或弓型交叉形状)的 $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ 量子级联微柱激光器,在降低阈值电流、提高输出功率及调整远场方向性方面取得了突破性进展.可以预见,在量子级联激光器的家族中,微腔型激光器将会在实用化方面首先取得突破,从而有望成为发展中远红外有效光源的强有力手段和新技术生长点。

人工微结构的设计和加工制作技术的提高孕育出新型光电子器件,又衍生出深层次的物理问题.新型半导体激光器的发展趋势是更小的尺寸、更低的功耗和更高的集成度.现在席卷全世界的纳米浪潮必将推动纳米加工技术和量子点制备技术的蓬勃发展.量子点激光器被认为具有比量子阱激光器更优越的性能,那么一旦量子点级联激光器研制成功,将触发 21 世纪信息高科技的革命并影响未来半导体激光器市场发展趋势。

目前量子级联激光器的研究只局限于 InP 衬底上的 $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ 和 GaAs 衬底上的 $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ 材料体系,波长覆盖 $3.4\text{--}20\mu\text{m}$.由于量子级联激光器所固有的优点,人们寄希望于量子级联激光器能够用于光纤通信(波长为 $\sim 1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$).然而,量子级联激光器的短波极限由异质结材料体系的导带带阶决定,因 III 族氮化物 ($\text{InGaN}/\text{AlGaIn}$) 材料体系具有很高的导带带阶而成为探索光纤通信用量子级联激光器的首选材料, Bell 实验室已着手这方面的工作,德国的 Paul - Drude 研究所联手三个有实力的研究所共同制订了一个研制 $1.55\mu\text{m}$ 量子级联激光器的庞大计划.对于波长大于 $20\mu\text{m}$ 的量子级联激光器,则由 Si/GeSi 材料体系主演。

参 考 文 献

- [1] Kazarinov R F, Suris R A. *Sov. Phys. Semicond.*, 1971, 5: 707
- [2] Faist J, Capasso F *et al.* *Science*, 1994, 264: 553
- [3] Faist J, Capasso F *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1995, 66(5): 538
- [4] Faist J, Tredicucci A, Capasso F *et al.* *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, 33(2): 336
- [5] Gmachl C, Tredicucci A, Capasso F *et al.* *Electron. Lett.*, 2000, 36(8): 723
- [6] Gmachl C, Tredicucci A, Capasso F *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 72(24): 3130
- [7] Gmachl C, Capasso F, Narimanov E E *et al.* *Science*, 1998, 280: 1556
- [8] Sirtori C, Kruck P *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 73(22): 3486
- [9] Schrenk W, Finger N *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2000, 77(14): 2086
- [10] Faist J, Capasso F *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 72(6): 680
- [11] Gmachl C, Tredicucci A *et al.* *Science*, 1998, 286: 749
- [12] Gmachl C, Faist J *et al.* *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, 9(8): 1090

- [13] Faist J, Gmachl C *et al.* Appl. Phys. Lett., 1996, 69(17) :2456
- [14] Scamarcio G, Capasso F *et al.* Science, 1997, 276 :773
- [15] Capasso F *et al.* IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electron., 1999, 5(3) :792
- [16] Liu F Q, Zhang Y Z, Zhang Q S *et al.* Electron. Lett., 2000, 36(20) :1704
- [17] Liu F Q, Wang Z G *et al.* Semicond. Sci. Technol., 2000, 15(12) :L44
- [18] Liu F Q, Ding D *et al.* J. Crystal Growth, 2000, 220 :439
- [19] Gianordoli S, Hvozďara L *et al.* IEEE J. Quantum Electron., 2000, 36(4) :458

• 前沿和动态 •

中国电子学会学术工作委员会电磁波波速专家工作组 成立及第一届电磁波波速研究学术会议简讯

为在新世纪继续跟踪国际科学技术的发展,为我国电子科学技术注入新的活力,中国电子学会学术工作委员会决定在其下设立“电磁波波速专家工作组”。该工作组的任务是:搜集整理有关信息和情报,通过学术讨论会等方式作出分析、研究,交流国内科学家的有关工作,定期写出报告供本会及国家有关部门参考。该专家组挂靠在中国科学院电子学研究所高功率微波与电磁辐射开放研究实验室,聘请北京广播学院黄志洵教授为组长,中国科学院电子学研究所宋文森研究员为副组长。2001年4月21日,在中国科学院电子学研究所举行了工作组成立会,中国电子学会副理事长沙踪教授出席会议并讲话。同日召开了第一届电磁波波速研究学术会议。

沙踪教授在致辞中指出:“世界在不断变化,科学界的情况也在变化;许多人不理解,跟不上形势发展。我们认为,对于用科学观点、方法探索未知的活动必须坚决支持。在科学上,目前中国人的原创性工作很少。要不计名利,甘于寂寞,坚持探索,力争在创新的路上有所贡献甚至有所突破。”他希望工作组团结国内的有志之士坚持研究下去。开放研究实验室主任李芳对工作组成立表示祝贺,对委员们表示欢迎。她说:“我们对电磁波波速研究很感兴趣也坚决支持。过去已做了不少探索性工作,值得赞扬。”她认为,科学问题不怕争论,因为只有各种不同意见发表出来互相切磋才能接近和认识真理。

会议听取了8个学术报告,涉及超光速、超慢光速、负折射率光异常传播、光速不变原理等诸多领域。首都师范大学耿天明教授的报告题为“超光速存



作者简介

刘峰奇,男,1963年出生,中国科学院半导体研究所副研究员,博士,从事分子束外延技术、半导体纳米结构及器件方面的研究,在 Phys. Rev. Lett., Electronics Lett. 等国内外学术刊物上发表多篇研究论文。

Email: fqliu@red.semi.ac.cn

在的理论依据”,认为物质可分为三类固有属性不同的形态——实物(静质量 m_0 为实数)、光($m_0 = 0$)、虚物(m_0 为虚数),它们不能通过加速或减速而改变形态,只能在一定条件下变换身份。虚物有奇异性,常规条件下被发现的概率低。超光速可涵盖在相对论中,亦不与因果律冲突。用“父子佯谬”批评超光速是荒唐的,相反,如实验室发现超光速存在则因果律要修正。总之,量子力学是支持超光速的。北京广播学院黄志洵教授的报告题为“负能量问题——超光速研究的重要方向”,指出自从 P. Dirac 的负能态理论提出,到现在负能已不再是计算中的辅助手段,而已成为实在的物理概念,并用在宇宙学研究、Casimir 力测量、零点能探索、超光速研究等领域。近来美国圣迭戈加大(UCSD)研究组的工作,揭示了物质的电磁参数 ϵ 、 μ 可以为负,光折射率 n 可以为负,这种异常传播与负能量、超光速均有关系。首都师范大学沈京玲副教授报告了“超慢光速研究的进展”,她谈到 EIT(电磁诱导透明)技术。用 nK 级温度钠原子气减慢光速。用热(360K)铷原子气减慢光速。使光速停下并储存起来等国外高科技的情况,指出这些进展与超光速、量子相干通信研究有关。此外,今年1月 Phys. Rev. Letters 连续两期刊发了“零光速”文章,谈到用 EIT 使光脉冲停止,其中就包含了“负群速”问题,值得注意。信息产业部电子12所邬显平研究员报告了“传输系统特性对电磁波波速测量的影响”。他指出,我们对相对论的正确态度是改善而不是推

(下转第 646 页)