

带间级联激光器的发明

——我的经历与物理

杨瑞青[†]

(俄克拉荷马大学电气与计算机工程系 诺曼 OK73019 美国)

2015-12-05 收到

† email: Rui.Q.Yang@ou.edu

DOI: 10.7693/wl20160107

2015年的夏初,在清华园中与朱邦芬教授交谈,朱教授建议我结合自己的经历为《物理》杂志写篇文章。其实,《物理》一直是我这三十多年来喜欢浏览的刊物。于是,便欣然应允了朱教授的提议。

1 早期的回顾

说起与物理的渊源,要追溯到1978年,那时我15岁,刚入浙江大学物理系本科就读。那时虽然对物理有兴趣,但并不清楚将来要做什么。年纪小阅历浅,没有把握好赴美读研究生的机会。大学毕业后,考入南京大学物理系凝聚态理论专业读研,导师是当时著名的蔡建华教授。可不久,蔡教授便离开

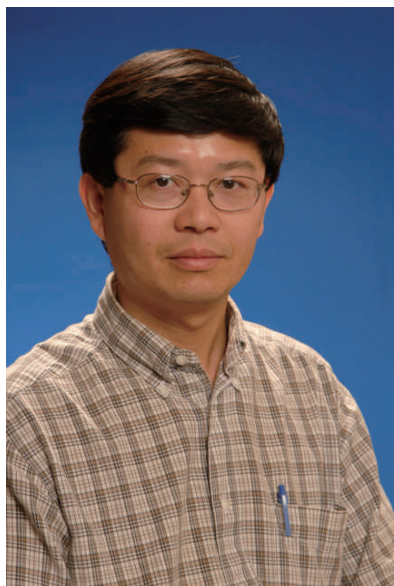


图1 文章作者杨瑞青教授

南京大学,去了上海交通大学,我们一部分留守南大的蔡教授学生,享受着无拘无束的学习和研究生活。蔡教授给了我研究金属超晶格输运的大方向,让我处于自由想象,任意发挥的环境中。当然,在那个年代,周围尽是兢兢业业的老师,勤奋优秀的同学,学习讨论的环境让人憧憬向上。比如李正中教授的课给了我固体理论方面严格的训练。我也常找师兄马红孺聊,请教问题。还有就是与当时上海冶金所的陆晓佳和雷啸霖先生建立了合作。

我真正开展较为独立的研究是从博士论文开始的,我当时拟写的题目是半导体超晶格电子系统的集体激发与输运理论。因为蔡建华先生在澳洲访问,那时交流不方便也费时,我就自己先做了再写信说服蔡先生。后来蔡先生审查我的论文提案后,同意了我的课题。我在1987年底通过了博士论文答辩毕业。

回顾中国刚改革开放不久的年代,缺乏有经验和深度的研究人员,我当时虽然有些原创的想法,但并不清楚如何进行更深入和有意义的研究。我的博士论文应该还有很多空间去提高,现在想来有些遗憾。毕业后我去了中国科学技术大学工作,感受到那里独特的开放和自由气氛,也想出国体验外面的世界。不

久,就去了加拿大多伦多大学物理系短期工作,从事与自己博士论文有关的理论研究。

2 加拿大的岁月

刚去加拿大的日子,英语交流能力低,我在多伦多大学物理系的研究不顺利,也觉得没什么意义,就想有所改变。当时找到多大电子工程系与物理有关联的J.M. Xu教授,他在1990年初给了我电子工程系做博士后的工作,申请的一笔加拿大博士后基金也随后到位,这样我的研究开始转入物理与应用相结合的方向。Xu教授思想很活跃,开始时给了我好些研究方向和课题。在做了一番调查研究后,发现一些课目我无法继续,一些课题已经被他人做了,但有两个方向是很新的,我可以进行有意义的探索。一是类比于光波导的电子波导耦合,从事这方面的研究,让我学习了光波导的理论和涉及的物理概念,并应用在电子波导理论的发展上,理解了它们的相似性和差别,为以后我从事诸如半导体激光的研究增加了有益的知识 and 经验。另一个是半导体量子阱(quantum well, QW)结构的带间共振隧穿,这方面的研究使我熟悉了第二类异质结半导体InAs/GaSb/AlSb材料体系,发展了相应的理论来理解这类量子阱结构和有关的实验现象,并在结合

其他方面的研究经验后，促使了带间级联激光器(interband cascade laser)的发明。

在中国学习和研究的经历给了我较强的物理基础训练和独立工作能力历练，但多伦多大学电子工程系博士后的经历却使我真正开始明白和学会如何做研究，以及为什么做。在大多伦多的早期岁月中，有机会与 Xu 教授展开了相当多的讨论，让我受益匪浅。这段时期以及我后面的研究都需要明白或阐述意义何在，能解决什么问题或有什么应用，并且要求最好有量化的估计。这种研究不像纯物理理论的研究那么抽象，实际应用要求，解决问题的需要，实验观察到的现象都能帮助研究者选择和提炼合适的方案和途径，并有较大可能得到实验和应用的检验，而不似有些纯理论悬在空中难于证实对错、意义大小。我认为理论与实际应用相结合的学习和研究应该更适合大部分人。

1991年，受 Helm 和 Allen 1990年发表在 *APL* 上的一篇文章^[1]的触动，Xu 教授和我提出了利用第二类量子阱(type-II QW)结构的带间共振隧穿来达到子带间粒子数反转，从而实现子带跃迁激光器^[2, 3]。这种激光器是基于半导体量子阱结构中产生的子带跃迁(intersubband transitions)，从而显然不同于常规基于导带到价带跃迁的半导体二极管激光器。它发射光子的波长是由两个属于同一导带(或价带)的分立子带的能量差决定的，并可以通过调节量子阱层厚来控制，而不需要改变构成量子阱的材料。由于子带激光器的新颖性质，包括可以覆盖通常半导体激光器难于工作的中红外波段，自从它的原始概念由两位俄国

科学家在 1971 年提出^[4]，吸引了世界上许多优秀的研究者想方设法去实现它^[5-7]。但是光学声子的散射在子带间是允许的，而且非常快(皮秒量级)。这就使得注入电子转化成光子的效率非常低，而且达到激光的先决条件，即子带间的粒子数反转，也难于实现。所以它在被提出二十年后仍然没有成功的迹象，许多人也因此产生了悲观的看法，从而放弃了继续探索。Xu 教授和我在 1991 年提出的方案从原理上能够解决粒子数反转的难题。所以当时我很兴奋，随之展开了有关的研究，并试图联系有设施条件的单位，希望能启动实验研究。同时我也在探索思考如何克服声子散射的途径，并经常关注和阅读有关课题的研究和进展，梦想有一天我能率先实现子带跃迁激光器。但现实是，这一类还停留在原始概念上的提案很难得到重视和支持。我的梦于 1994 年被贝尔实验室在子带激光器上的突破唤醒了。这个时候我面临是继续追求原来的子带跃迁激光的方案还是另辟途径的抉择。

在探索子带激光的时候，我注意到，电子的寿命在带间跃迁过程中，与子带跃迁相比，可有超过三个数量级的差距，即电子带间跃迁的时间，包括辐射和非辐射的过程，由于没有声子的散射，要长很多。我在 1993 年写的文章中^[8]讨论了它们在它们之间的差别。尽管有了些初始的想法，但我没在文章中明确提出用第二类量子阱结构的带间跃迁实现中红外激光器。主要是由于情感惯性还在子带跃迁上，没能完全跳出原来框框的限制和影响。同时我也决定，要在一个专业会议上提出基于第二类量子阱结构的带间激光方案。所以在 1994 年 3

月初，我投了一篇摘要到当年 8 月份要召开的国际会议上。因为当时贝尔实验室的子带量子级联激光器突破性的工作还没在 4 月份的《科学》上报道^[9]，我那篇摘要及随后的会议张贴报告和文章的标题仍然是集中于子带跃迁的激光器^[10]，尽管会议报告和文章包含了带间级联激光器的结构和讨论。后来看到《科学》上贝尔实验室的工作，经过一段时间思考，我觉得继续追求子带跃迁的激光已没多大意义，我既无资源也没优势。从研究目的和功能方面上考虑，如何使激光器的性能满足各方面应用的要求应该是最重要的，而不只是看重这个研究是不是新的或者是不是“热点”。从物理原理上看，子带量子级联激光器并没越过声子散射的限制；而带间级联激光器没有声子散射的问题，且具有级联的优点，应该会成为性能更加优越的中红外激光器。所以我此后的工作主要集中在带间级联激光器的实现和发展。这里需要补充说明一下，级联(cascade)是类似于早期超晶格研究中的顺序隧穿(sequential tunneling)结构^[5-7]。由于先前的研究聚焦在子带跃迁发光，级联结构对中红外激光器的重要性和优点并没有在那时候的研究中明显提到或强调。级联结构的优点和重要性可能并没有被包括那些量子级联激光器的先驱在内的研究者在初期就完全认识到。例如，笔者在 1994 年提交了一篇专门讨论带间级联激光器的文章到《应用物理快报》(*Applied Physics Letters*)，但被拒绝了。显然，评审者当时没能认识到带间级联激光器与常规半导体带间激光器的差异，忽视了级联的重要性。图 2 给出了常规带间激光器，子带量子级联激光器和带间级

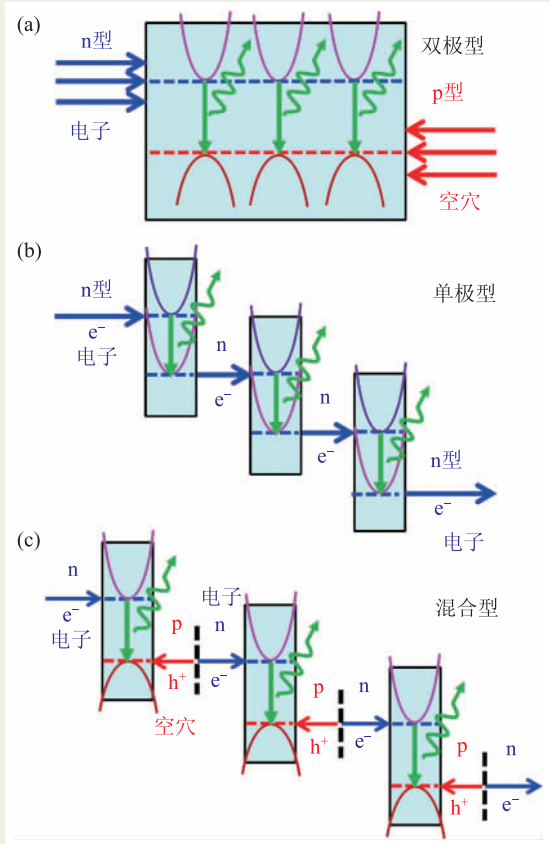


图2 三种半导体激光器的对比 (a)常规的双极型(电子和空穴)带间激光器;(b)单极型(仅有电子或空穴)子带量子级联激光器;(c)结合了前两者优点的带间级联激光器。注意导带和价带有相反的能量一波矢色散关系,而属于同一导带的子带有相似的能量一波矢色散关系

联激光器这三种半导体激光器的对比。常规带间激光器(图2(a))是涉及分别在导带和价带的电子和空穴的双极(bipolar)型器件,其中多个产生光的有源量子阱区(active QW regions)按载流子注入的方式是等效于并联连接。子带量子级联激光器(图2(b))是仅涉及电子(或空穴)的单极(unipolar)型器件,但它的有源区是串联连接的。这使得级联激光器中的每个注入电子,在电压下,能够重复利用,发射多个光子,从而导致高的量子效率。带间级联激光器(图2(c))可以被看成结合了前两者优点的混合(hybrid)型,它利用InAs和GaSb之间的第二类破缺带隙能带排

列促成了级联结构。这种第二类破缺带隙异质界面也可看作是产生电子和空穴的半金属源,如图2(c)垂直虚线所示。文献中对级联结构明确的认知和重要的讨论^[11, 12]是出现在量子级联激光器实现之后,也是在笔者公开提出带间级联激光器之后。那时虽然有不少人向我表达了对带间级联激光器的兴趣,但并没有切实地付诸于行动。这可能有多种原因,包括怀疑和不清楚它到底能够进步到什么程度。所以,仅仅知道或提出一个看起来还不错的新想法是远远不够的。

3 在美国的发展

在有了带间级联激光的基本想法和公开提出后,我就与世界上有条件进行实验工作的机构联系,希望他们能采纳我的方案并给我工作的机会。带间级联激光器要利用基于含镨化合物的第二类异质结构中特有的能带位置排列方式。这需要用到有装备镨源的分子束外延设备来实现。那时世界上有这种设备的单位并不多,即使有也不一定会用来支持我这样一个当时基本上还是做理论的,也没什么背景的年轻人。通过理论物理学家赵光安先生的引

荐,朱经武先生决定给予支持,我因此于1995年初到美国休斯顿大学由朱先生创立的空间真空外延中心任研究科学家。那时朱先生已在掌管超导中心,不再领导外延中心,我当时在从贝尔实验室来中心任副主任的白先慎教授组里工作。那时期经费还较充足,也有些半导体方面的基础设施包括所需的分子束外延设备,中心想要拓展一些新的有潜力的研究项目。所以几个人联合起来开始推动了带间级联激光器的实验研制,也与美国海军研究实验室、加拿大国家研究院、桑迪亚(Sandia)国家实验室、贝尔实验室的科研人员建立了合作。1997年初,带间级联激光器在世界上第一次被实验证明可产生激光。虽然第一个的器件性能并不好,但很快,随后制作的带间级联激光器被大大地改进了,证实了它的一些优越性。初步的成功给大家带来兴奋,也给休斯顿大学带来了荣誉,同时孕育着我不久的离开。

在1999年初,我离开了休斯顿,先后去了美国陆军研究实验室、加州理工喷气推进实验室(JPL)、俄克拉荷马大学(University of Oklahoma),继续推动带间级联激光器的研发和应用,以及拓展到其他有关的光电功能器件。期间也与人合创公司,试图把带间级联激光器转化成商业产品。这些过程当然有曲折起伏,却不是本文要讲述的。

在去JPL前,虽然也做测量表征,但我主要是考虑概念的发展和整体方案的实施,做器件设计,理论计算和分析。在JPL,我需要搭建检验激光性能的专用实验设置,此后,我从一个理论家转变成以实

验为主，并拥有自己掌控设备的研究人员。不过，在工作中仍然经常要用到理论物理的知识和技能。比如，设计、分析和判断带间级联激光器，量子力学是必不可少的。如果没有理论物理的素养和基础，碰到的实际问题很有可能在限定的时期内无法解决，也不知道如何入手。当然，在大学本科和研究生期间学习的知识是不够的，也不一定对口。所以在工作中还要不断地补充专业知识，学习新的技能。当跨越理论和实验的界限时，视野就变得更加开阔，也能从不同方面获得益处。更为重要是，能深入地理解现实中的问题，从而找出或制定可行的解决方案。另外我也体验到理论与实验工作中的差别。做理论研究时需要专心平静，而做实验时，如果已比较熟练，可以通过手的操作进入工作状态。所以，当我心情烦躁无法专心脑力劳动时，就安排自己去实验。

在JPL，研究工作要能为美国航天任务提供或发展有用和必需的技术。虽然JPL也鼓励研究人员发表论文，但更看重研究成果是否能为它所用。我在那里的工作是研制先进的中红外半导体激光器，其性能指标要达到内部和外部客户对指定分子探测的要求。这不同于一般基础研究的标准，所涉及的问题跨越半导体物理，材料的生长，量子器件设计、制备、封装，可靠性，等等。挑战是多方面的，同时我们的研究工作能对人类星际探索有所贡献也是难得的机会和荣幸。在头几年，我们团队研制了一些在重要波段中的单模可调式带间级联激光器给有关的客户试用，得到了他们的肯定和反馈。然后我们就获得了为火星探险任务提供带间级联激光

器的机会。这个激光器是为了探测火星上的甲烷气体，对它的技术指标诸如功耗、工作温度、输出功率、激光波长、可调范围都有非常严格的要求，在当时有限的时间内，几乎是不可能达到的。但那时没有比我们的激光器更好的选择。因此这个激光器被列为最具风险的项目。这意味着，如果我们的进展达不到预先设定的一系列里程碑，项目随时可能被备用方案取代。虽然压力巨大，但动力也是不可阻挡的。前期的工作让我们的团队有了清楚的认识和准备，其中物理上的考虑发挥了关键作用。与之相关的技术细节已发表^[13]，此文不再赘述。我们在2007年初交付了达到要求的带间级联激光器，其中一支随着“好奇号”火星探测车于2012年登陆火星，并在火星上成功探测到甲烷^[14]。

当合格的激光器被交付后，我在JPL的使命就算完成了，NASA的行话就是“Mission completed”。那时有两个地方希望聘用我去工

作。其中之一是University of Oklahoma(OU)电子工程系。我很想去大学工作，因为那更自由、灵活，加之自己对教育也有兴趣，希望有更多机会与年轻人交流。但OU地处比较保守的州，地理位置不具优势，学校在半导体科研方面的硬件设施和环境明显落后于JPL这类国家实验室级别的单位，要在那做出类似于JPL的工作很具挑战性。经过实地考察和一段时间考虑后，并征得了家人的同意，我于2007年接受了大学教授的职位。主要的理由是：大学需要开辟有意义的新研究方向，而不是非要去做与国家实验室比硬件实力的研发课题。保守地区较慢的节奏也有其好处，工作的方式不总是为了赶进度而变得匆匆忙忙。OU有我所需要的分子束外延设备和基本必需的半导体器件制作设施，我也可以用启动资金购入一些更好的仪器，还可以通过与外单位的合作来弥补和加强学校的不足。所以我相信能在俄克拉荷马再次突破，开拓出新的局面。就位

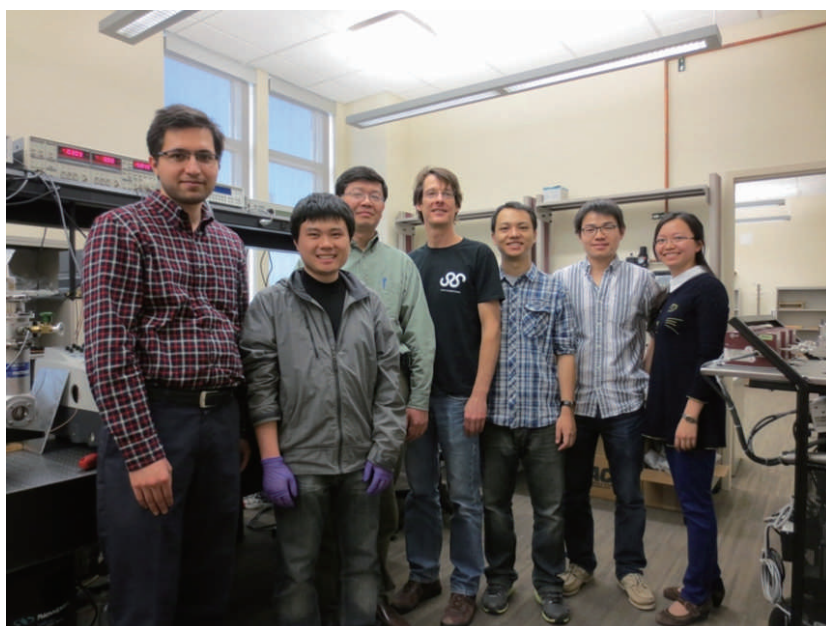


图3 杨瑞青教授与学生及合作者在实验室留影(2014年)

之后,我很快建立起与物理系教授研究组的合作,率先在世界上提出并实现了InAs基带间级联激光器,把它们的激光波长延伸到更长的波段,取得了一系列有意义的成果^[12, 15],并且最近在4.6 μm波长附近获得了室温阈值电流密度破世界记录的卓著成就^[16](越低越好)。我在OU的第一个学生来自本校物理系,除了实验研究成果外,还做出了非常出色的理论研究,毕业时被美国两家国家研究单位竞相招聘。另外在OU,我们开拓了两个新的研究方向:带间级联红外探测器和光伏器件,都获得了联邦研究基金的支持,取得了令人鼓舞的初步成果^[17-20]。当然也碰到了意想不到的困难和挑战。比如,时间被瓜分成更多的碎片,学生流动性大且程度往往相差较远。所以,新的环境带来了新的挑战,同时新的机遇也孕育其中。

4 思索与感想

纵观这些经历,在学习和研究工作中,什么是关键和重要的?多数情况下,专业领域方向和研究课题的选择应该占首要位置。如果专业方向不对,就可能变成“英雄无用武之地”;而研究课题选择不当,结果就没多大意义,也没有实际应用的价值,发表的文章除了哄哄外行装装门面,与废纸无异,浪费了时间和资源。那么如何选择,什么是有意义和有价值的,如何评判?

让我们先来讨论专业方向的选择。物理学是很多学科的基础,对

逻辑思维,分析和解决问题能力的培养极为有益。但经过上百年的发展,物理学的很多分支都相当成熟,有些已经过了高峰期,就像一个矿藏被开发了很多年,留下的宝贝不多了,也就不需要那么多人在那些传统的方向上开垦。所以在物理本科或研究生阶段后,对多数人来讲,转入与物理相关和应用的领域,不仅前景更加广阔,而且大有可为。我本人是在获得物理学博士学位后做的调整,考虑到现代社会的节奏加快,越到后面变化就越困难,对有些人,在年轻的时候尽早调整应该更合适些。具体选择什么方向,则要依据个人的兴趣爱好及当时的情形做较为长远的分析和计划。或许下面对研究课题选择的讨论能对这个问题有所启示。

如何选择和评判研究课题是难于让各方都满意的,特别对基础研究争议会较多。相当一部分基础研究是出于好奇心驱动,初期并不知道或不清楚未来有多大价值或应用。但对绝大多数研究而言,课题的选择和评判应当取决于最终能产生何种有用的知识和价值,实际应用和解决现实问题的程度。这就是说,研究成果应该在最后能经得起检验,虽然有些基础研究可能要经过很长时间。这种评判也不是完全由同行专家决定,因为同行之间为了保护各自行业利益和生存并不总是公正的。在此情况下,第三方或者潜在用户的参与应是必需的,也是有帮助的。这就意味着,项目的选择不仅要立意于同行的认同,也要争取对其他领域有所促进。这要

求研究人员有长远的眼光和洞察力,了解其他行业的应用和需求,并能与之合作。从理论物理到光电器件的研究经历让笔者体验了理论与实际应用相结合,跨学科合作的益处。在研究选向中,我不倾向,也不擅长做“热点”课题,觉得太拥挤了,已聚集那么多聪明人,无论如何努力也是赶不上的。因此,我更愿意考虑那些还没有什么人注意,但有潜在意义和应用前景的研究课题。这样的课题并不比纯理论的物理研究更难,我感觉通常还容易些。但要求研究者对涉及的物理机制有深入的理解,学习跨学科的知识,以及了解应用的要求。刚开始时,可能会很孤独,没什么支持,也没有掌声,可能还会有始料不及的技术上和非技术上的挫折。但是,只要物理原理是对的,坚持下去,就有可能克服困难获得最后的成功。当然,有时运气也是重要的。带间级联激光器的提出和发展正是反映了从原始概念的基础研究到实用技术和商业产品这样一个相当长的过程。在这当中,基础研究和科技发展相互交叉和促进。基础研究可以产生出人预料的突破和新技术,技术的发展和需求也促使了相关基础研究的开展和深入。另外需要提醒注意的是,对于有应用前景的研究,技术商业化,虽然是目标,并不一定在任何阶段都是有益或可行的,过早地涉及很可能是有损害的。

以上观点和叙述源自笔者与物理有关的近40年经历,希望这些可以促进探讨和交流,并对年轻研究者有参考作用。

参考文献

- [1] Helm M, Allen S J Jr. Appl. Phys. Lett., 1990, 56: 1368
- [2] Yang R Q, Xu J M. Appl. Phys. Lett., 1991, 59: 181; at 1991 Inter. Semiconductor Device Research Symp., Charlottesville, VA, Dec. 1991
- [3] Yang R Q, Xu J M. Can. J. Phys., 1992, 70: 1153
- [4] Kazarinov R F, Suris R A. Sov. Phys. Semicond., 1971, 5: 707
- [5] Capasso F, Mohamed K, Cho A Y. IEEE J. Quantum Electron, 1986, 22: 1853
- [6] Liu H C. J. Appl. Phys., 1988, 63: 2857
- [7] Kastalsky A, Goldman V J, Abeles J H. Appl. Phys. Lett., 1991, 59: 2636
- [8] Yang R Q. Phys. Lett. A, 1994, 186: 339
- [9] Faist J, Capasso F, Sivco D L *et al.* Science, 1994, 264: 553
- [10] Yang R Q. poster presentation at 7th Inter. Conf. on Superlattices, Microstructures and Microdevices, Banff, Canada, August, 1994, Superlattices and Microstructures, 1995, 17: 77
- [11] Yang R Q, Pei S S. J. Appl. Phys., 1996, 79: 8197
- [12] 杨瑞青, 李路, 江宇超. 物理学进展, 2014, 34: 169
- [13] Yang R Q, Hill C J, Mansour K *et al.* IEEE J. Selected Topics of Quantum Electronics, 2007, 13: 1074
- [14] Webster C R, Mahaffy P R, Atreya S K *et al.* Science 2015, 347: 415
- [15] Li L, Ye H, Jiang Y *et al.* J. Crystal Growth, 2015, 425: 369
- [16] Li L, Jiang Y, Ye H *et al.* Appl. Phys. Lett., 2015, 106: 251102
- [17] Yang R Q, Tian Z, Cai Z *et al.* J. Appl. Phys., 2010, 107, No. 5, 054514
- [18] Yang R Q, Tian Z, Klem J F *et al.* Appl. Phys. Lett., 2010, 96: 063504
- [19] Hinkey R T, Yang R Q. J. Appl. Phys., 2013, 114: 104506
- [20] Yang R Q, Lotfi H, Li L *et al.* Proc. SPIE, 2014, 8993: 899310



2016 亚洲通信与光子学大会 2016 国际光子与光电子学会议
Asia Communications and Photonics Conference 2016 International Photonics and Optoelectronics Meetings 2016

与您相约武汉光博会
See you on 3-5, November, 2016
武汉国际博览中心



微信二维码

“中国光谷”国际光电子博览会暨论坛组委会
地址: 武汉市武昌区中南路99号保利广场35层
电话/Tel: +86-27-87115260 传真/Fax: +86-27-87115261
网址/Web: www.ovcexpo.com.cn 邮箱/E-mail: ovcexpo@ovcexpo.com.cn

光联万物
智引未来
Light Links World,
Wisdom Leads Future