清华大学物理系光学学科的科学研究的科学研究

李师群*, 尤力, 王力军, 王向斌, 孙家林, 吴念乐

清华大学物理系 北京 100084

*E-mail: lishq@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2011-01-20; 接受日期: 2011-03-14

摘要 该文简述了清华大学物理系光学学科近三十年的历史发展和近十多年该学科的学者在科学研究方面的代表性进展.

关键词 光学, 量子光学, 量子密码, 纳米光学, 精密测量

PACS: 42.50.-p, 42.50.Gy, 03.67.Dd, 03.75.Gg

1 1980 年以来清华大学物理系光学学科的历史发展

1982 年恢复清华大学物理系之前, 在清华大学物理教研组中光学(特别是激光)方面的研究已达到相当高的水平, 研究成果获得过多次奖励: 1978 年高功率氦氖激光器, 空阴极氦镭激光器, 双频激光干涉仪三项获全国科学大会奖; 1980 年自动补偿双频激光干涉仪与双频(塞曼)激光器两项获得北京市科技成果一等奖. 当时物理教研组内光学方面较大的科研组有红外激光与同位素分离组、激光光谱组、配合激光器研究的镀膜组, 另有光学加工组和激光车间. 这些科研力量的形成为招收和培养光学学科的本科生、研究生作好了准备.

1981 年国务院学位委员会批准第一批硕士博士学位授予点. 光学学科是首批被批准的光学硕士点、光学博士点(首批博士生导师是孟昭英, 徐亦庄, 而后 1984 年特批张培林). 清华第一个理学博士欧阳钟灿(现为中国科学院院士)于 1984 年在光学博士点通过答辩, 获得博士学位, 导师是徐亦庄, 副导师是谢

毓章.

1982 年恢复清华大学物理系时, 光学学科包括两个教研组: 原子分子物理教研组和近代光学教研组. 原子分子物理教研组的主要科研方向是红外激光器的研制和激光分离同位素. 激光分离同位素是 20 世纪 70 年代同位素分离的新方向. 近代光学教研组的基本力量是当时物理教研组的激光光谱组、镀膜组、光学加工组和激光车间. 清华的激光光谱学的研究始于 1979 年, 是当时光学研究的前沿方向之一. 开始的工作是在研制成功可调谐单纵模大功率 He—Ne 激光器和氮分子激光泵浦染料激光振荡、放大器的基础上进行饱和吸收光谱和光电流光谱研究, 后来发展到激光感生荧光、非线性四波混频和多波混频、相干反斯托克斯喇曼光谱、真空紫外相干辐射产生等的研究. 近代光学教研组还开展了光学薄膜研究、激光器研制和激光应用研究.

1986 年, 原子分子物理教研组和近代光学教研组合并成近代光学教研组, 合并后光学学科的发展大体走的是以光学领域的主流方向为学科发展的中心的道路, 例如非线性激光光谱研究. 同时保持重视

引用格式: 李师群, 尤力, 王力军, 等. 清华大学物理系光学学科的科学研究的科学研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 486–492

Li S Q, You L, Wang L J, et al. Scientific researches on optics in Department of Physics in Tsinghua University (in Chinese). Sci Sin Phys Mech Astron, 2011, 41: 486–492, doi: 10.1360/132011-82

教学和重视培养学生的传统, 进一步完善本科生、研究生的培养体系. 在规模上借鉴国外一流大学的经验, 逐步精缩, 形成主要由各位教授的研究组组成学科的格局. 当时的研究室有: 非线性激光光谱研究室, 原子分子研究室, 光学信息处理研究室, 激光器件研究室, 光学薄膜研究室等.

到 1999 年学校撤销教研组建制时, 光学学科除前述研究方向外, 还增加了量子光学、近场光学和微区光谱、全固化激光器研究等新的研究方向. 在这期间非线性光谱组的研究成绩突出, 原子的多波混频和多光子感生荧光检测获 1991 年国家教委科技进步奖(甲类)二等奖(张培林, 赵朔嫣, 郭建生).

近年来光学学科的研究方向有: 量子光学与原子光学、近场光学和微区光谱、全固化激光器物理、量子信息和量子密码通讯、纳米光学、光学精密测量, 其中长江学者特聘教授、国家杰出青年科学基金获得者王向斌教授在量子密码通讯方面的研究成绩突出. 最近, 随着全系蓬勃发展的步伐, 新鲜杰出人才的加入, 清华的光学学科正在迅速发展之中. 特别是, 由“千人计划”引进的王力军教授和尤力教授大大增强了光学学科的研究力量. 王力军教授在物理量的精密测量、量子频标的研究方面, 尤力教授在冷原子量子气体、量子光学的研究方面使清华光学学科的研究水平提升到一个新的高度.

2 近年清华大学物理系光学学科的研究工作

2.1 量子光学和原子光学研究

清华大学物理系量子光学方面的研究, 1997 年前主要集中在光子回波、非经典光场非线性光学等研究方向, 1997 年后转入玻色-爱因斯坦凝聚(Bose-Einstein Condensation, BEC)、超冷原子导引和光子晶体的研究, 近年较深入地研究了超冷原子体系的量子效应、量子左手特异材料等. 近十多年的代表性进展有:

我们首次研究了玻色-爱因斯坦凝聚中的 Lamb 位移^[1], 指出由于玻色激励导致的受激过程, BEC 的量子简并性质会对原子气体的辐射性质产生影响. 原子原有的兰姆位移将要附加一项正比于凝聚体中原子数的附加项, 且当激发原子的波函数与 BEC 中

基态原子波函数重叠时附加值最大. 在 BEC 研究方面我们还最早提出了旋转对称 W 型势阱中玻色-爱因斯坦凝聚环的新模型, 并研究了 BEC 环的集体振荡^[2]. 关于 BEC 的另一重要工作是对 BEC 的超流特性的研究. 我们首次明确指出并通过数值计算显示了: 形成涡旋(Vortex)的 BEC 中的基态是所谓“碎裂”态(fragmented state); 采用精确对角化的方法可以显示 Vortex 的形成是内在的对称自发破缺的结果, 是在密度分布场内部演化形成, 不是如平均场理论显示的那样从外部逐步进入内部^[3].

在冷原子研究方面, 我们提出了一种周期性磁化原子波导模型^[4], 研究了这类波导中原子的量子运动及传输效率^[5]; 研究了冷原子系统中的一系列量子相干效应, 如超冷原子中的 EIT(电磁感应透明)及慢光^[6]、两个 BEC 间的绝热布居转移、超冷玻色原子气体的光诱导非线性等^[7].

在光子晶体研究方面, 我们首次研究了光子晶体特殊模密度导致的暗态^[8], 与通常暗态机制不同, 暗态的形成完全依靠原子在特殊真空场环境中的自发辐射建立起来, 而不需要外加耦合场. 我们还对光子晶体中 EIT 的瞬态特性^[9]、光的超慢传输^[10]、以及光子晶体中四能级系统的量子相干效应等问题进行了深入研究, 发现光子晶体环境中原子的吸收谱呈现出 EIT 谱线的特征, 并可以实现光子开关效应. 另外, 发现原子的自发辐射谱上会出现很窄的暗线, 并可以通过施加外场来调节暗线的频率位置.

在量子特异材料研究方面杜春光最早提出了量子左手特异材料(Quantum Left-handed Metamaterial)的概念^[11], 并给出具体设计方案, 即该材料由超导量子干涉器件(超导环与约瑟夫森结)构成. 这种材料除了具有普通左手材料的性质(如负折射率)外, 还具许多新特性, 例如在磁导率和折射率频谱上表现出与 EIT 系统类似的特征. 另外由于约瑟夫森效应, 这种材料整体上表现出强非线性特征, 例如磁导率和折射率会对外加静磁场十分敏感, 而且磁导率和折射率会随外磁场变化而出现双稳态跳变^[12]. 这一研究工作是量子光学、超导器件和特异材料(Metamaterial)三个领域的交叉, 这在国际上是量子特异材料(Quantum Metamaterial)研究的首次报导, 引起了国内外同行的关注. 在我们的研究工作发表之后, 国外一些研究组也先后开展了量子特异材料的研究工作.

量子光学和原子光学研究由于尤力教授的引进

展现了新的面貌. 尤力教授与其合作者最早在国际上开展了近共振光和囚禁量子简并原子气体散射的研究工作, 为当时即将成功实现的 BEC 的探测和应用提供了先期的理论基础^[13]. 他们引入了对囚禁量子简并原子气体的量子场论描述, 建立了冷原子与量子光场共振相互作用的多体理论^[14]. 在玻色凝聚体的性质方面, 他们首先在国际上开展了有相互作用的玻色凝聚体的低能集体激发和热力学性质的研究工作, 成功地发现了在相互作用的玻色气体标准理论(Bogoliubov 理论)框架中与连续对称破缺对应的零模, 即所谓的 Goldstone 模^[15]. 在此基础上, 将这一理论推广到两个相互耦合的玻色凝聚体, 系统地研究了该体系中的塌缩和复苏等量子相关现象^[16], 这些结果和预言的现象现已在多个国际知名实验室中观察到. 此外, 在玻色凝聚原子的非经典量子态, 多体量子纠缠, 特别是在最大纠缠态和最大自旋压缩态的产生以及它们在超越标准量子极限探测方面也提出了一些实验想法^[17].

在调控低能原子之间的偶极相互作用方面, 尤力教授率先在国际上提出和研究了各向异性相互作用的原子低能散射特性, 并以静电场中的原子为基础系统地开展了偶极相互作用的玻色凝聚体的特性研究^[18]. 进一步阐明了长程偶极相互作用对多通道散射的低能阈值定理的修改, 并发现了许多新颖的行状共振效应, 提出了与 He3 超流体类比的单分量费米原子的库珀对的形成机制^[19]. 该方向已成为当前冷原子物理最热门的研究方向之一.

2.2 量子密码通讯和量子信息研究

清华大学光学学科内量子密码通讯方面的研究, 是近年王向斌教授进行的. 其主要的成果是提出了三强度诱骗态(decoy state)量子密码理论.

点对点保密通信最直接的办法是让通信双方先共享一串密码, 然后以此密码通过一次一密的加密方式对通信内容加密、解密. 现有的经典协议不能确保通信双方的共享密码的安全性. 相比于经典通信, 量子通信的一个重大优势是可以实现严格数学证明下的绝对安全性. 现有的实验多采用单一强度弱激光, 即弱相干态光. 以弱相干光替换单光子的量子密钥分发, 要求通道损耗不能太大, 也就是密钥分发距离不能太长. 根据 2005 年的典型实验技术指标, 计算表明, 密钥分发的安全距离最多只有 10 km 左右. 为

了解决这一问题, 美国西北大学黄元瑛于 2003 年提出了在量子密码理论实用化上具有革命性的诱骗态的思想. 可是黄的结果尚不能立即实用于现有真实系统, 王向斌于 2005 年的理论研究表明^[20], 采用三强度随机切换的诱骗信号量子密码方案可以准确侦察出任何窃听行为, 包括所谓的光子数分离攻击, 并可实用于现有真实系统, 其中包含通道噪声, 大损耗等.

诱骗态方法的首个实验由清华大学和中国科技大学的联合团队完成^[21]. 这也成为历史上首次超过 100 公里的安全量子密钥分发. 同一时期的实验还有美国橡树岭国家实验室与美国国家标准局合作团队的实验; 维也纳大学等单位的实验等. 迄今为止, 基于诱骗态方法的量子密钥分发已经至少获得世界主要研究机构近 20 个公开发表的在不同条件下的实验证实. 诱骗态方法已经成为当前量子密码走向实际应用的最重要方法. 目前诱骗态方法实验距离已经超过 200 km.

诱骗态方法需要用户对相干态光源在 3 种不同强度之间随机切换. 然而在实际中每个光源的强度值并不能精确控制, 它们总是有涨落. 王向斌等人^[22]的理论研究解决了这个问题. 最终的给出的成码率理论公式表明, 诱骗态方法即便对于不稳定光源也是行之有效的, 只要预先知道光强涨落范围上界值. 这是目前全世界唯一的带统计涨落和任意光强涨落的安全量子密码理论.

清华大学物理系在量子信息和量子密码通讯方面还有两个研究亮点. 一个是采用了石蜡表面涂敷的 Rb87 热原子系综样品池, 大大降低了热运动与容器壁发生非弹性碰撞造成的自旋翻转; 同时考虑到制备的原子集体激发态的模式与样品池本征模式之间的匹配, 以减少模式失配造成的 Dephasing 时间. 测量的集体激发态时间达到了 300 μs , 这在国际上同类实验中是最长的^[23]. 另一个重要的工作是实现了超过 16 km 的自由空间量子隐形传态(quantum teleportation)^[24], 我们的实验突破了原有隐形传态实验仅于一地的限制, 证实了空基实验的可行性, 因此是朝着空间量子通讯应用迈出的重要一步.

尤力教授在量子信息学与基于原子物理的量子计算研究方面也有一批具有国际影响的工作. 比如对于高保真的光学微腔中的囚禁原子(或离子)系统, 他们提出了原子能级最简化实验最优化的, 同时不需要单个原子可分辨的相关逻辑门的操控方案^[25].

他们同时还系统地研究了光学微腔中的囚禁原子(或离子)系统的单光子源的应用, 并阐明演示了最简单但仍有意义的量子调控程序^[26]. 此外在旋量 BEC 中的量子动力学方面的研究, 提出并参与实验验证了一些关于量子调控和量子模拟基本原理和想法^[27].

2.3 近场光学和纳米光学研究

纳米结构及其光学性质的研究是近年特别受到关注的研究领域. 清华大学物理系光学学科结合近场光学的发展, 开辟了独特制备宏观长金属纳米线、金属化合物半导体纳米线、多种纳米异质结构和纳米结的新的技术道路, 取得了一系列物理新成果.

孙家林教授发明了一种制备金属纳米材料的固态离子学新方法, 实现了宏观长金属纳米线阵列的定向控制生长. 制备出长达几个厘米的 Ag 纳米线和 Cu 纳米线阵列, 并且可以通过电场有效控制纳米材料的形貌、长度及有序程度, 该系列成果在国际上得到同行专家的普遍关注和好评. 进一步探索出一条制备宏观长金属化合物半导体纳米线的新途径, 即利用宏观长金属纳米线, 通过气-固反应进行二次化学处理, 成功制备出厘米长的金属氧、硫化物半导体纳米线, 并研究了半导体纳米线的输运特性^[28].

在纳米异质结构的研究中, 利用宏观长碳纳米管等材料制备“碳纳米管/金属”异维异质结构, 研究了该异维异质结构在光场作用下的输运特性. 分析认为, 这种异维异质结不同于传统的 p-n 结或其他异质结, 其光致电流不仅与位于结区两端材料的物质属性有关, 而且与它们的维数之差相关^[29]. 采用不同维度的纯银纳米材料和体材料首次制备出纯银“异维结”, 并研究它的光电和热电特性, 实验证明了低维纳米材料与更高维度的体材料相比具有更强的光致电子发射本领^[30]. 还利用宏观长金属纳米线和动态电化学表面沉积技术制备出“银芯镍壳一同轴电缆型”纳米异质结构, 并详细研究了该纳米异质结构的光致电流增强效应^[31].

在纳米结的研究中, 利用扫描探针显微镜, 完成了对单根 Ni 纳米线及其异质结构物性的测量, 发现了强电场作用下 Ni-NiO 异质结构的“半导体-金属转变(SMT)”行为, SMT 对纳米肖特基结伏安特性的优化具有显著影响. 首次通过实验观察到强场作用下纳米肖特基结向欧姆结的转变效应, 为设计优质的纳米肖特基二极管奠定了实验基础^[32]. 制备 Au-NiO-

Ni 双肖特基纳米结并发现显著的电流跳变行为, 跳变前后的电流变化可达 6600 倍. 该器件在导电性能上展示出明显的“半导体-金属转变”行为, 为设计新型纳米双肖特基结二极管奠定了实验基础^[33].

另外, 采用脉冲光场激发宏观长 Ag 纳米线的表面, 在 77~300K 的温度范围内详细研究了 Ag 纳米线的输运特性. 首次发现 Ag 纳米线具有显著的负光电导效应, 理论分析表明, 这种负光电导源自于 Ag 纳米线表面的等离激元(SPPs)与传导电荷之间的相互作用^[34].

2.4 全固化激光器物理研究

清华大学物理系的全固化激光器研究始于 1991 年, 偏重于激光二极管泵浦新型激光器及其器件物理的研究. 主要的研究亮点之一是二极管泵浦自调 Q 单片激光器^[35], 采用双掺的新型晶体 Cr, Nd:YAG 既作增益介质, 又作饱和吸收体, 一块薄片晶体即构成了自调 Q 的袖珍激光器. 进一步还研制了二极管泵浦自调 Q 的腔内倍频激光器, 并讨论了这类激光器的激光动力学. 另一个较重要的工作是被调 Q 判据的推导^[36]. 这两项工作受到了国内外同行的广泛关注.

近年来全固化激光器方面吴念乐教授与国外研究组合作, 主要进行了二极管泵浦 Yb:YAG Thin Disk 激光器和混合腔结构半导体端面泵浦板条激光器的研究. 这两类激光器是发展大功率激光器的重要方向, 特别是混合腔结构半导体端面泵浦板条激光器保持了端面泵浦棒状激光模式匹配好光束质量佳的优点, 同时输出功率可大幅提高, 自 1998 年问世以来结构不断完善^[37], 并在 Q 开关、二次谐波、三次谐波, 放大等方面做出了一系列瞩目的结果^[38].

2.5 光学精密测量研究

清华大学物理系的光学精密测量研究由于王力军教授的引进展现了新的面貌. 王力军教授多年来从事量子光学、原子物理、精密测量、光电子学器件的基础和应用研究. 其关于透明介质中反常光速的脉冲传播实验及其信息速度的研究得到了科学界的极为广泛的关注^[39]. 该工作曾被美国《科学新闻》(Science News)评为 2000 年十大物理学新闻之一. 近年来, 科研方向侧重于精密测量科学与仪器, 特别是原子钟^[40]和重力精密测量^[41].

王力军教授领导的实验小组在德国马普光学所对铷单离子光频标进行了长期的研究, 积累了丰富的实践经验. 目前铷离子光频标频率统计不确定度达到 9.1×10^{-15} (受限于比对的射频原子钟). 该实验小组先后研制了三台窄线宽固体和半导体激光器, 并利用三角比对法, 成功的测定了各单个激光器的频率稳定性^[42]. 激光线宽均小于 1 Hz, 绝对频率稳定度最好达到 1.4×10^{-15} (1s 积分时间)^[43]. 该小组还利用

飞秒光梳对空气^[44]及其各种组分与及二氧化碳^[45]进行了精密测量, 精度达到 10^{-9} 量级, 为目前国际上气体折射率最精确的测量. 在光梳频率测量方面, 该实验小组亦成功地提出了无辅助波长计飞秒光梳模数判定方法与及频率的精确绝对测量^[46].

目前, 王力军教授已在清华大学建成清华大学-中国计量院精密测量联合实验室, 离子光频标和重力加速度的精密测量等实验已在开展中.

致谢 清华大学物理系光学学科的老师为撰文提供了材料, 除几位作者外, 还要感谢杜春光、高健存和蒋硕等老师.

参考文献

- Huang H, Wang D Z, Chang L, et al. Lamb shift of absorptive resonance in a Bose-Einstein condensate. *Phys Rev Lett*, 1997, 79: 2923–2926
- Wang D Z, Li D J, Liu X J, et al. Study of ring-shaped BEC and its collective excitation. In: CCAST Proceeding of Workshop on Laser Cooling: BEC and Atom Laser, 2000, 116: 141
- Liu X J, Hu H, Chang L, et al. Fragmented condensate ground state of trapped weakly interacting bosons in two dimension. *Phys Rev Lett*, 2001, 87(3): 030404
- Li D J, Huang H, Lu X H, et al. A magnetic tube structure for atom guidance. *Opt Commun*, 1999, 160(1-3): 72–74
- Liu X J, Li D J, Huang H, et al. Atom Coherence propagation in a magnetic atomic waveguide. *J Opt B-Quantum Semicl Opt*, 2001, 3(3): 171–177
- Hu Z F, Du C G, Li D J, et al. Atomic interaction effects on electromagnetically induced transparency and slow light in ultracold bose gas. *Chin Phys Lett*, 2002, 19(12): 1805–1807
- Hu Z F, Du C G, Li S Q. Light induced nonlinear effects on dispersion of ultracold Bose gas. *Chin Phys Lett*, 2003, 12(40): 403–407
- Du C G, Hou C F, Hu Z F, et al. Atomic coherence via an nonsingular-DOM reservoir. *Phys Lett A*, 2003, 307(4): 196–201
- Du C G, Hu Z F, Li S Q. Transient properties of atomic coherence induced by an nonsingular-DOM reservoir. *Opt Commun*, 2004, 233(1-3): 139–147
- Zhou B, Du C G, Li S Q. Slow light by modified reservoir induced transparency with a non-singular density of modes. *Chin Phys Lett*, 2004, 21(5): 856–859
- Du C G, Chen H Y, Li S Q. Quantum left-handed metamaterial from superconducting quantum-interference devices. *Phys Rev B*, 2006, 74(11): 113105
- Du C G, Chen H Y, Li S Q. Stable and bistable SQUID metamaterials. *J Phys-Condensed Matter*, 2008, 20 (34): 345220
- Lewenstein M, You L. Probing Bose-Einstein condensed atoms with short laser pulses. *Phys Rev Lett*, 1993, 71: 1339–1342
- Lewenstein M, You L, Cooper J, et al. Quantum field theory of atoms interacting with photons: Foundations. *Phys Rev A*, 1994, 50: 2207–2231; You L, Lewenstein M, Cooper J. Quantum field theory of atoms interacting with photons, II: Scattering of short laser pulses from trapped bosonic atoms. *Phys Rev A*, 1995, 51: 4712–4727; You L, Lewenstein M, Glauber R J, et al. Quantum field theory of atoms interacting with photons. III: Scattering of weak cw light from cold samples of bosonic atoms. *Phys Rev A*, 1996, 53: 329–352
- Lewenstein M, You L. Quantum phase diffusion of the Bose-Einstein condensate. *Phys Rev Lett*, 1996, 77: 3489
- Imamoglu A, Lewenstein M, You L. Inhibition of coherence in trapped Bose-Einstein condensates. *Phys Rev Lett*, 1997, 78: 2511–2514
- Helmerson K, You L. Creating massive entanglement of Bose condensed atoms. *Phys Rev Lett*, 2001, 87: 170402; You L. Creating maximally entangled atomic states in a Bose-Einstein condensate. *Phys Rev Lett*, 2003, 90: 030402; Zhang M, You L. Quantum Zeno subspace and entangled Bose-Einstein condensates. *Phys Rev Lett*, 2003, 91: 230404
- Marinescu M, You L. Controlling atom-atom interactions at ultralow temperatures by dc electric fields. *Phys Rev Lett*, 1998, 81: 4596; Yi S, You L. Trapped atomic condensates with anisotropic interactions. *Phys Rev A*, 2000, 61: 041604(R)

- 19 You L, Marinescu M. Prospects for p-wave paired BCS states of trapped fermionic atoms. *Phys Rev A*, 1999, 60: 2324–2329
- 20 Wang X B. Beating the photon-number-splitting attack in practical quantum cryptography. *Phys Rev Lett*, 2005, 94: 230503; Wang X B, Hiroshima T, Tomita A, et al. Quantum information with Gaussian states. *Phys Rep*, 2007, 448: 1–111
- 21 Peng C Z, Zhang J, Yang D, et al. Experimental long-distance decoy-state quantum key distribution based on polarization encoding. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 010505
- 22 Wang X B, Yang L, Peng C Z, et al. Decoy-state quantum key distribution with both source errors and statistical fluctuations. *New J Phys*, 2009, 11: 075006; Wang X B, Peng C Z, Pan J W. Simple protocol for secure decoy-state quantum key distribution with a loosely controlled source. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 075006; Wang X B. Decoy-state quantum key distribution with large random errors of light intensity. *Phys Rev A*, 2007, 75: 052301; Hu J Z, Wang X B. Reexamination of the decoy-state quantum key distribution with an unstable source. *Phys Rev A*, 2010, 82: 012331; Wang X B, Yang C X, Liu Y B. On-demand entanglement source with polarization-dependent frequency shift. *Appl Phys Lett*, 2010, 96: 201103
- 23 Jiang S, Luo X M, Chen L Q, et al. Observation of prolonged coherence time of the collective spin wave of an atomic ensemble in a paraffin-coated Rb-87 vapor cell. *Phys Rev A*, 2009, 80: 062303
- 24 Jin X M, Ren J G, Ya B, et al. Experimental free-space quantum teleportation. *Nature Photonics*, 2010, 4: 376–381
- 25 Yi X X, Su X H, You L. Conditional quantum phase gate between two 3-state atoms. *Phys Rev Lett*, 2003, 90: 097902
- 26 You L, Yi X X, Su X H. Quantum logic between atoms inside a high Q optical cavity. *Phys Rev A*, 2003, 67: 032308
- 27 Chang M S, Hamley C D, Barrett M D, et al. Observation of spinor dynamics in optically trapped 87Rb Bose-Einstein Condensates. *Phys Rev Lett*, 2004, 92: 140403; Chang M S, Qin Q, Zhang W, et al. Coherent spinor dynamics in a spin-1 Bose condensate. *Nature Phys*, 2005, 1: 111–116
- 28 Sun J L, Xu J, Zhu J L. Oxidized macroscopic-long Cu nanowire bundle photoconductor. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 201119
- 29 Sun J L, Wei J, Zhu J L. Photoinduced currents in carbon nanotube/metal heterojunctions. *Appl Phys Lett*, 2006, 88: 131107
- 30 Xu J, Sun J L, Zhu J L. Thermo- and photoinduced voltages in Ag heterodimensional junctions. *Appl Phys Lett*, 2007, 91: 161107
- 31 Sun J L, Zhao X C, Zhu J L. The prominent photoinduced voltage effect of as-prepared macroscopically long Ag core/Ni shell nanoheterojunctions. *Nanotechnology*, 2008, 19: 085703
- 32 Zhao X C, Sun J L, Zhu J L. Field-induced semiconductor-metal transition in individual NiO–Ni Schottky nanojunction. *Appl Phys Lett*, 2008, 93: 152107
- 33 Sun J L, Zhao X C, Zhu J L. Metal-insulator transition in Au–NiO–Ni dual Schottky nanojunctions. *Nanotechnology*, 2009, 20: 455203
- 34 Sun J L, Zhang W, Zhu J L. Negative photoconductivity induced by surface plasmon polaritons in Ag nanowire macrobundles. *Opt Express*, 2010, 18(5): 4066–4073
- 35 Li S Q, Zhou S H, Wang P, et al. Self-Q-switched diode-end-pumped Cr,Nd:YAG laser with polarized output. *Opt Lett*, 1993, 18: 203–204
- 36 Bai Y X, Wu N L, Zhang J, et al. Passively Q-switched Nd:YVO4 Laser with a Cr4+:YAG crystal saturable absorber. *Appl Opt*, 1997, 36(12): 2468–2472
- 37 Du K M, Wu N L, Xu J D, et al. Partially end-pumped Nd:YAG slab laser with a hybrid resonator. *Opt Lett* 1998 23: 370–372
- 38 Zhu P, Li D J, Qi B S, et al. Diode end-pumped high-power Q-switched double Nd:YAG slab laser and its efficient near-field second-harmonic generation. *Opt Lett*, 2008, 33: 2248–2250
- 39 Wang L J, Kuzmich A, Dogariu A. Gain-assisted superluminal light propagation. *Nature*, 2000, 406: 277–279; Dogariu A, Kuzmich A, Wang L J. Transparent anomalous dispersion and superluminal light pulse propagation at a negative group velocity. *Phys Rev A*, 2001, 63: 053806
- 40 Sprenger B, Zhang J, Lu Z H, et al. Atmospheric transfer of optical and radio frequency clock signals. *Opt Lett*, 2009, 34: 965–967
- 41 Rothleitner C, Svitlov S, Merimeche H, et al. Development of new free-fall absolute gravimeters. *Metrologia*, 2009, 46: 283–297
- 42 Liu T, Wang Y H, Dumke R, et al. Narrow linewidth light source for an ultraviolet optical frequency standard. *Appl Phys B*, 2007, 87: 227–232
- 43 Liu T, Zhao Y N, Elman V, et al. Characterization of the absolute frequency stability of an individual reference cavity. *Opt Lett*, 2009, 34: 190–192
- 44 Zhang J, Lu Z H, Wang L J. Precision measurement of air refractive index with frequency combs. *Opt Lett*, 2005, 30: 3314–3316
- 45 Zhang J, Lu Z H, Wang L J. Precision measurement of the refractive index of carbon dioxide with a frequency comb. *Opt Lett*, 2007 32: 3212–3214
- 46 Wang Y H, Dumke R, Liu T, et al. Absolute frequency measurement and high resolution spectroscopy of $^{115}\text{In}^+ 5s^2 \ ^1\text{S}_0 - 5s5p \ ^3\text{P}_0$ narrowline Transition. *Opt Commun*, 2007, 273: 526–531

Scientific researches on optics in Department of Physics in Tsinghua University

LI ShiQun^{*}, YOU Li, WANG LiJun, WANG XiangBin, SUN JiaLin & WU NianLe

Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

The historical development for 30 years and recent scientific advances for ten years of Optics Group in Department of Physics, Tsinghua University were overviewed briefly in this paper.

optics, quantum optics, quantum cryptography, nano-optics, precision measurement

PACS: 42.50.-p, 42.50.Gy, 03.67.Dd, 03.75.Gg

doi: 10.1360/132011-82