

- [14] Qian Z W, Jiang Wenhua. In Proc. 16th ICA/135th ASA, Vol.3, edited by Kuhl P K, Crum L A. Seattle, Washington;1998.1727
- [15] 马大猷.声学报,1990,15:354;Maa Dah - you *et al.* J. Acoust. Soc. Am., 1995,98:1
- [16] Webster D A, Blackstock D T. J. Acoust. Soc. Am., 1977,62:518
- [17] Wu Junru *et al.* Phys. Rev. Lett.,1984,47:1421
- [18] Wei Rongjue *et al.* In Technical Paper, 2nd Western/ Pacific Regional Acoustics Conference. Hong Kong:1985. 198; Technical Paper, 3rd Western/ Pacific Regional Acoustics Conference, Shanghai:1988. I - 11
- [19] Xu Y, Wei Rongjue. J. Acoust. Soc. Am., 1992,91:2576; Ni Wan - sun, Wei Rongjue. Science in China (Series A),1992,35:626
- [20] Wang Xinlong, Wei Rongjue. Phys. Rev. Lett.,1997,78:2744
- [21] Wei Rongjue *et al.* J. Acoust. Soc. Am.,1990,88:469
- [22] Zhou X, Cui H. Science in China (Series A),1992,36:816
- [23] 颜家壬,黄国翔.物理学报,1988,37:874
- [24] Lauterborn W, Cramer E. Phys. Rev. Lett.,1981,47:1445
- [25] 魏荣爵等.电声技术,4/1986;Miao G *et al.* In Technical Paper 3rd, Western/ Pacific Regional Acoustics Conference, Shanghai:1988, IP.858; Tong Peiqing *et al.* Chinese Phys. Lett.,1991,8:442
- [26] Zhang Yu *et al.* Phys. Rev. E, 1998,58:3022; Electron. Lett.,1988,34:951
- [27] Lauterborn W, Holzfuss J. Phys. Lett.,1986,115A:369
- [28] Qian Z W. Phys. Rev. E, 1996,53:2304
- [29] Ingard U, Pridmore - Brown D C, J. Acoust. Soc. Am., 1956,28:367
- [30] Westervelt P J. J. Acoust. Soc. Am.,1957,29:973
- [31] Westervelt P J. J. Acoust. Soc. Am.,1963,35:535
- [32] Berktaay H O. J. Sound & Vib.,1965,2:435; J. Acoust. Soc. Am.,1974,55:539
- [33] Zhu Z *et al.* J. Acoust. Soc. Am., 1983,74:1518
- [34] Gaitan D F *et al.* J. Acoust. Soc. Am.,1992,91:3166
- [35] Weninger K R *et al.* Phys. Rev. Lett.,1997,78:1799; Hiller R A *et al.* Phys. Rev. Lett.,1998,80:1090
- [36] Wu C C, Robert P H. Phys. Rev. Lett.,1993,70:3424
- [37] Matula T J *et al.* Phys. Rev. Lett.,1955,76:651; Flint E B, Suslick K S. Science,1991,253:1397
- [38] Xu Ning, Wang Long, Hu Xiwei. Phys. Rev. E,1998,57:1615; Xu Ling, Wang Long, Hu Xiwei.1998, (Private comm.)
- [39] Eberlein C *et al.* Phys. Rev. Lett.,1996,76:3842
- [40] Cheng H Y *et al.* Phys. Rev. E, 1998,58:2705
- [41] Lauterborn W. In Fortschritte der Akustik - FASE/ DAGA '82,1982,47
- [42] Kevin B *et al.* J. Acoust. Soc. Am.,1992,91:1939, 1950

中国物理学家对世界拉曼光谱学发展作出历史性贡献*

张 树 霖

(北京大学物理系 北京 100871)

摘 要 吴大猷先生在1939年出版的国际上第一本全面总结分子结构拉曼光谱研究成果的专著《多原子分子的振动谱和结构》,表明中国从一开始就对世界拉曼光谱学的发展有重大贡献.虽然在拉曼光谱学的第二个大发展时期——六七十年代,由于“文革”,中国的拉曼光谱学研究被迫停顿,但是在此以前的1954年,黄昆先生出版了与玻恩合著的《晶格动力学理论》.在八九十年代,中国拉曼光谱学研究的论文数及水平迅猛上升,尤其在低维纳米材料领域,诞生了全面正确描述超晶格拉曼散射的被人们称作黄 - 朱模型的理论,发表了大量有世界一流水准的论文.因此,拉曼光谱学成为近代中国科学家为之作出重大贡献的少数几个学科领域之一.

关键词 拉曼光谱学,科学史

* 国家自然科学基金资助项目和“九五”攀登计划支持项目
1999 - 06 - 03 收到

HISTORICAL CONTRIBUTIONS TO RAMAN SPECTROSCOPY BY CHINESE PHYSICISTS

Zhang Shulin

(Department of Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract In 1939, at the starting point of Raman spectroscopy, Chinese physicist T. Y. Wu published 《Vibrational Spectra and Structure of Poly-atomic Molecules》 and started a series of important contributions to the development of Raman spectroscopy by Chinese scientists. The book is the first published account summarizing all Raman spectral research results in molecular structures since the discovery of the Raman effect. Unfortunately, during the sixties and seventies when the second wave of rapid development in Raman spectroscopy occurred, the tumultuous Cultural Revolution had practically shut down Raman research in China. However, shortly before this time, in 1954, Kun Huang, in collaboration with Max Born, published the book 《Dynamical Theory of Crystal Lattices》. This book still has wide influence in the related Raman field nowadays. In the eighties and nineties, both the quantity and the quality of Raman papers published by Chinese physical scientists increase rapidly. In particular, in the low dimensional field, a microscopic theory of Raman scattering in superlattices, which is now known as the Huang - Zhu model, was published, followed by a series of widely accepted, top notch papers. These indicate that the field of Raman spectroscopy is a few examples of important contributions by modern Chinese scientists.

Key words Raman spectroscopy, history of science

拉曼散射现象由印度科学家拉曼(C. V. Raman)于1928年在 CCl_4 中首先观察到,拉曼也因此获得诺贝尔奖.拉曼散射是光散射现象中的一种,物质中原子(离子)的振动以及电子的自旋等运动都可以引起拉曼光散射.记录拉曼散射的拉曼光谱本质上是一种分子水平的实验手段,已在化学化工、物理、生物医学、地质矿物、环境科学等各个科学领域以及高新技术和工业生产中得到了广泛应用,例如,分析化学分子或材料的组分和结构,研究物质的相变,测量应变等物化参数.

1 新中国成立前的三四十年代^[1]

1934年,吴大猷先生在他任教的北京大学物理系实验室开始了中国国内最早的拉曼光谱学研究,并于1936年在“中国化学学会会志”上发表了他的第一篇拉曼光谱论文^[2].在抗日战争时的昆明西南联大,在教授们都不得不养猪、

28卷(1999年)10期

种菜的艰难条件下,吴大猷先生也没有中止拉曼光谱学研究.他在土墩木架上组建起摄谱仪,继续开展拉曼光谱研究和发表论文^[3],还在1939年用英文出版了一本著作《Vibrational Spectra and Structure of Polyatomic Molecules (多原子分子的振动谱和结构)》^[4].这是自1928年观察到拉曼效应以后,国际上第一部全面总结分子结构拉曼光谱学研究成果的专著.1941年即被美国翻版.60年后,该书仍被人们在工作中引用,有时还作为礼品赠送给访美的北京大学教授.由此可见,吴大猷先生的著作和工作在世界拉曼光谱学发展中起了重大的历史作用,也为中国拉曼光谱学研究奠定了坚实的基础和树立了锲而不舍、艰苦奋斗的榜样.

2 新中国成立后

2.1 五十年代

新中国成立时,由于受所用激发光源(汞

灯)强度的限制,世界拉曼光谱学研究正处于低潮期.但是黄昆先生却和玻恩合作在1954年写完并出版了学术专著《Dynamical Theory of Crystal Lattices(晶格动力学理论)》^[5].正如玻恩在《晶格动力学理论》一书的序言中所说,这本书“不是已有出版物的汇编”.黄昆先生在任北京大学教授期间撰写的最后一章“光学效应”,是全书中具体涉及拉曼散射现象最多的一章,正是在这一章中,黄昆先生通过批判Theimer发表的拉曼散射理论,进一步发展了拉曼光谱理论.黄昆先生的名著《晶格动力学理论》在1954年和1969年先后发行了第一和第二版以及进行多次印刷后,1978年出版社宣布该书不再发行,但此后不久,又因著名光散射专家J. L. Birman教授的建议,出版社又重新排版,于1985年发行第三版.在第三版的封底上写的关于该书的介绍说“玻恩和黄昆关于晶格动力学的主要著作已出版30年了,当时该书是关于该主题的最终总结,现在该书在许多方面仍是该主题的最终总结(It is over thirty years since Born and Huang's major work on the dynamics of crystal lattices was published, at that time it represented the final account of this subject, and in many respects it still is)”.在该书出版35年后的1989年,在德国Hedeburgh召开的第三届声子物理和第六届凝聚态声子散射联席大会上,一个中国与会者听到美国麻省大学物理系主任依然深情地说:“我把黄昆先生的书像圣经一样放在我的书桌上”.《晶格动力学理论》一书已成为声子物理和拉曼散射的经典理论著作,陈列于世界各大学图书馆的书架上,使世界上几代学生和科学家受益.毫无疑问,黄昆先生已成为世界拉曼光谱学发展中少数几个起重大作用的物理学家之一.

2.2 六七十年代

1962年发明的激光器从根本上解决了拉曼光谱所需的强发光源的问题,为拉曼光谱学推广并应用于分子结构研究以外的其他领域开辟了道路.拉曼光谱学迎来了它的第二个黄金时期.

• 602 •

1964年,黄昆先生在当时的国家重点项目“固体能谱”研究计划中,拨款6.5万美元进口拉曼光谱仪,以开展固体拉曼光谱学的实验研究.但是,“文革”使到货的仪器躺在实验室中,北京大学的实验拉曼光谱学研究也未能重新开始,中国科学家错过了大好时机.

2.3 八九十年代

2.3.1 奋起直追国际一流水平

“文革”后打开“大门”一看,发现各国科学家已用激光拉曼光谱仪进行了多年的工作并发表了大量论文,有关激光拉曼光谱学的专著也已出版了多种^[6,7],中国物理学家不得不奋起直追.在1981—1990年的10年间,在国内外学术刊物和学术会议上发表的物理学方面的拉曼光谱论文和报告在数量上开始逐年上升^[8](见图1),从80年代末起,中国的拉曼光谱学研究开始进入世界先进行列,从国外出版的《物理、化学和地球科学近期目录》光盘资料统计可以看出,1993和1994年中国在国内外著名学术刊物上发表的拉曼光谱论文总数分别为150和185篇,均排在美、日、德、法、英之后列第六位^[9].

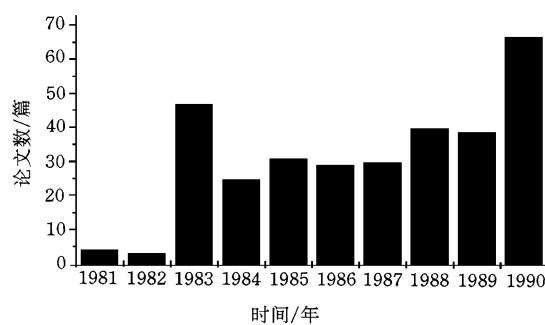


图1 1981—1990年10年间中国物理学家发表的论文数图示

国内物理学家进行拉曼光谱学研究的手段,从80年代初的常规的单声子拉曼散射,很快扩展到多声子、共振、表面增强、高压、时间分辨和显微等线性拉曼光谱,以及受激拉曼和相干反斯托克斯拉曼散射等非线性拉曼光谱.在扩展拉曼光谱手段过程中,除了四川大学和北京大学分别在受激光散射和拉曼样品架上取得了国家专利外,同时,在多声子^[10]和高压^[11]拉

物理

曼光谱方面,国内物理学家也取得了一些高水平的研究成果,而在表面增强拉曼光谱研究中,中国物理学家作出了一些开拓性的物理工作^[12],在非线性拉曼光谱研究中,更是作出了十分杰出的工作^[13].

中国物理学家用上述各种拉曼光谱学手段,大力开展了凝聚态拉曼光谱学的研究,并发表了 SCI 论文 153 篇以上.其中高温超导体^[14]、新型碳材料^[15,16]、铁电体^[17]和激光晶体^[18]等都进行了系统的研究,并有世界一流水平的工作发表.而对于低维纳米体系,中国科学院半导体研究所、复旦大学和北京大学等单位更进行了长期的理论和实验结合的拉曼光谱学研究,已在《Phys. Rev. B》,《Appl. Phys. Lett.》和《J. Appl. Phys.》等三大物理杂志上发表了 34 篇论文.

2.3.2 处在国际最前沿的低维纳米材料的拉曼光谱学研究

我国低维材料的拉曼光谱学研究起步较晚,但在理论和实验两方面都很快地跃进到国际最前沿.不仅如上所述在国际一流学术刊物上发表了许多论文,还在大型国际会议上作邀请报告^[19,20]和被授予优秀论文奖^[21],以及受邀在专业学术刊物上发表论文^[22-24],此外,也获得了国家和许多高等级的部级奖.

(1) 二维体系 - 半导体超晶格的拉曼光谱学研究

从 1970 年起,国际上就开始进行超晶格拉曼光谱学的理论研究,可是 10 多年中,没有一个理论模型能正确全面地解释实验中观察到的超晶格中特有的选择定则和宏观界面模.1988 年,黄昆先生等人发表了超晶格拉曼散射的微观理论^[25],解决了上述两个问题,成为迄今最为正确和完整的超晶格拉曼散射理论,也打下了一维和零维体系拉曼散射的理论基础,被国际学术界誉为“黄(昆) - 朱(邦芬)”模型.有关该模型的 3 篇基本论文^[25],迄今已被引用 362 次.

超晶格中的拉曼模有折叠(纵或横)声学(FLA or FTA)、限制(纵或横)光学(LO or

TO)、宏观界面(IF)和微观界面(MIF)等 4 类声子模.前两类模分别对应于体材料中的声学和光学模;后两者为超晶格所特有.光学限制模又有限制于阱上和垒上的区别.我们在表 1 中列出了发表超晶格单声子模的首次实验观察结果的文献目录.从中可以看出,在已观察到的 6 种声子模中,美国、法国和印度学者各占一种,而中国学者占了余下的 3 种.

表 1 超晶格单声子拉曼光谱的首次观察记录

声子类型	文献
折叠声学声子	C. Colvord <i>et al.</i> Phys. Rev. Lett., 1980, 45: 298
光学声子	限于阱中(LO 模) B. Jusserand <i>et al.</i> Phys. Rev. B, 1984, 30: 6245
	限于垒上(LO 模) Zhang Shu - Lin. Pro. of ICORS' 86, 1986, p9 - 4
	限于阱中(TO 模) Z. P. Wang <i>et al.</i> Phys. Rev. B, 1988, 38: 8483
界面声子	宏观模 A. K. Sood <i>et al.</i> Phys. Rev. Lett., 1985, 54: 2115
	微观模 Y. Jin <i>et al.</i> Phys. Rev. B, 1992, 45: 12141

此外,中国物理学家对与超晶格界面直接有关的界面质量与拉曼光谱特征的关联以及微观界面模及其本质等方面,开展了理论与实验相结合的较系统全面的研究,取得了许多重要成果^[26-28].

(2) 一维和零维体系的拉曼光谱学研究

① 本征拉曼光谱及其本质

中国物理学家近年在一维和零维 Si 体系拉曼散射的理论方面,对微晶模型做出了迄今为止最全面细致的研究^[29].

对于硅纳米线、多孔硅和 SiC 纳米棒等一维和零维体系,由于样品常包含原始反应物,给确认本征拉曼谱带来极大困难,因而鉴别本征拉曼谱便成为拉曼光谱研究的首要课题.我们在采用多种实验方法并与理论计算结果比较后,在国际上第一个获得了上述样品的一级和二级本征拉曼光谱(见图 2)^[20,30],同时也发现,微晶理论模型虽仍适用于低维非极性半导体,但对于内部具有众多结构缺陷的材料,如硅纳米线,其限制尺寸是量子线中具有完整晶格

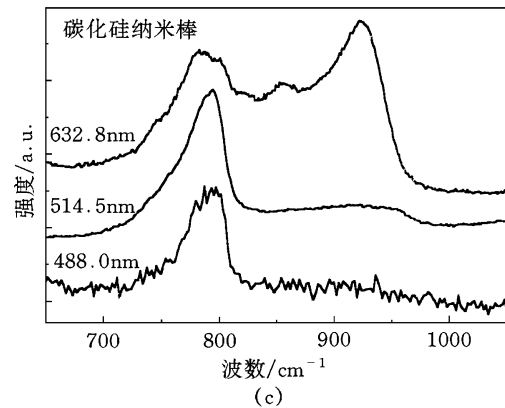
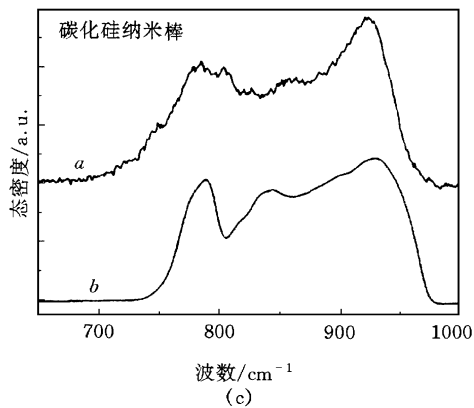
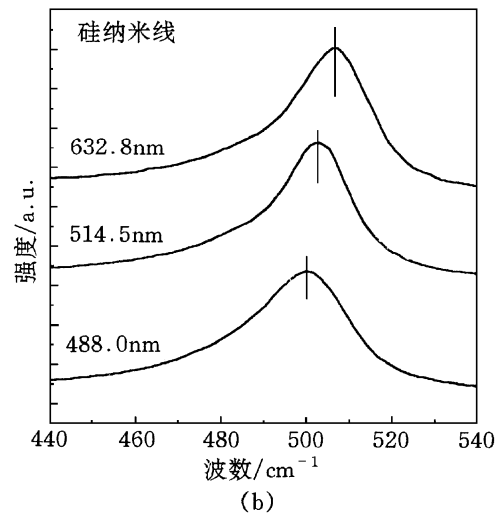
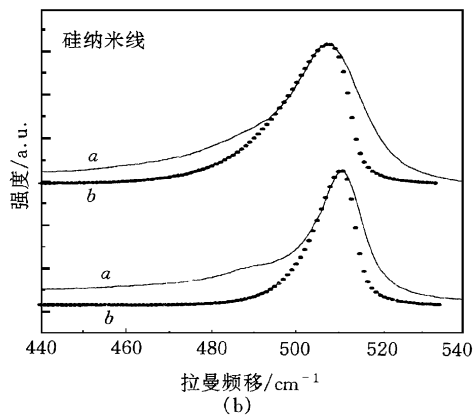
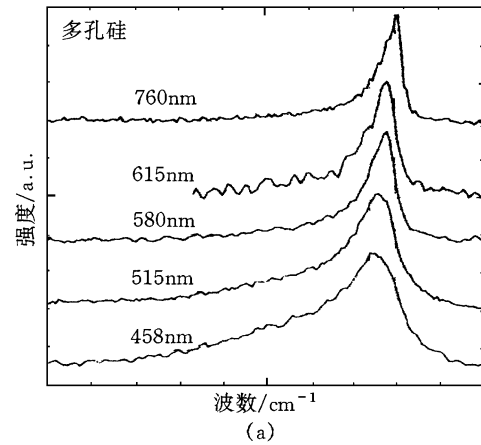
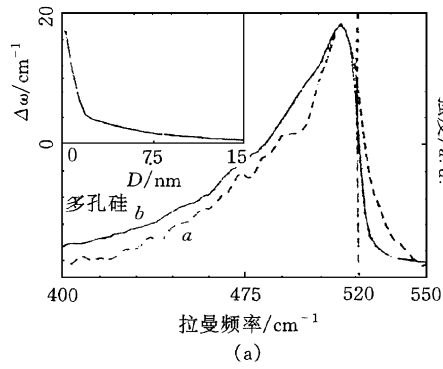


图2 非极性半导体多孔硅(a)、硅纳米线(b)和极性半导体碳化硅纳米棒(c)的拉曼光谱 (图中 a 为实验谱; b 为理论谱)

图3 多孔硅、硅纳米线和 SiC 纳米棒 随入射波长改变的拉曼光谱

的晶粒的尺寸,而非量子线的直径.但是,对于具有长程弗勒利希作用和大量结构缺陷的极性材料,如 SiC 纳米棒,拉曼光谱将不再是来自布里渊区某个特定区域的声子的散射,而是直接

与声子态密度相联系的散射^[20].

②“反常”的拉曼光谱特征与波长选择效应
拉曼光谱有两个区别于常规光谱的基本特征,一是拉曼频率不随入射的激发波长改变;二

是斯托克斯和反斯托克斯拉曼频率的绝对值相等.但是在几乎所有我们观察过的上述样品中,都发现拉曼光谱频率、线宽和谱线的不对称性均随入射波长改变^[20,24,29],图3就是多孔硅、硅纳米线和碳化硅纳米棒在改变入射激光波长时的拉曼光谱.对于上述“反常”现象,我们将它归因于所研究的样品的尺寸存在分布所造成的量子尺寸-波长选择效应.此外,我们在有的一维材料中还观察到了反斯托克斯与斯托克斯频率绝对值不相等的现象.

中国物理学家在低维体系的拉曼光谱学研究方面,之所以能不断获得世界一流水平的开创性成果,主要源于黄昆先生的高水平指导,此外,高水平的实验技术也是重要原因.中国科学家通过70年代末用国产的氦氛激光器,把汞灯拉曼光谱仪成功地改造成激光拉曼光谱仪,80年代初研制出国家教委颁发了教学仪器一等奖的RBD-II型小型激光拉曼光谱仪,积累了经验,使他们对进口的大型谱仪进行成功的改造和合理的使用,保证在实验上也能作出世界最高水平的工作.

3 结语

黄昆先生在新中国成立后出版的专著《晶格动力学理论》,实际上为它出版后10年才开展起来的固体(三维体系)激光拉曼学研究奠定了理论基础,而以他为首发展的超晶格拉曼散射的微观理论,不仅正确解决了困扰人们10多年之久的问题,也为一维和零维体系的拉曼散射打下了理论基础.此外,我国以低维体系为代表的拉曼光谱学研究也不断获得开创性的成果,为国际上所瞩目.因此,虽然中国科学家对现代世界科学的进步和发展具有历史意义的贡献的科学领域并不多,但是中国物理学家是对世界拉曼光谱学的发展作出了为世界公认的历史性重大贡献的.第17届国际拉曼光谱学大会将于2000年在北京召开,这既是对中国科学家的鼓励,也是我们对世界拉曼光谱学的发展作出新贡献的机会.

28卷(1999年)10期

致谢 作者十分感谢黄昆先生审阅了本文的部分内容和提出改正意见,以及黄大鸣、蓝国祥、钱世雄、汪兆平、相经国、张明生、朱邦芬、刘玉龙、莫育俊和资剑诸教授提供资料,以及丁伟同学对本文所作的技术上的帮助表示感谢.

参 考 文 献

- [1] 沈克琦,张树霖. 光散射学报,1992,4:1-2
- [2] Wu T Y. J. Chin. Cham. Soc.,1936,4:402
- [3] Wu T Y. Chin. J. Phys.,1944,5:180
- [4] Wu T Y. Vibrational Spectra & Structure of Polyatomic Molecules. Shanghai: The China Science Co.,1939
- [5] Max Born, Huang Kun. Dynamical Theory of Crystal Lattices. Oxford University Press,1954
- [6] Gilson T R, Hendra D J. Laser Raman Spectroscopy. London: Dawson & Goodall,1970
- [7] Long D A. Raman Spectroscopy. New York: McGraw-Hill International Book Company,1977. Chapters 1,3,4,5;
Long D A著,顾本元译.拉曼光谱学.北京:科学出版社,1982
- [8] 中国物理学会光散射专业委员会,南开大学物理系资料室编,中国光散射学术论文、著作及成果目录(1981-1991),1991
- [9] 莫育俊.光散射学报,1996,8:123
- [10] Zhang S L, Hou Y T, Shen M Y *et al.* Phys. Rev. B, 1993,47:12937
- [11] Lin Yuankun, Lan Guoxiang, Wang Huafu. J. Appl. Phys.,1995,77:3584
- [12] Mo Y J, More I, Wachter P. Surface Sci.,1983,133:L452;
Yu Feng - qi, Zhang Chun - ping, Zhang Guang - yin, Chem. Phys. Lett.,1988,146:478
- [13] Qian Shixiong, Chang R K. Phys. Rev. Lett.,1986,56:926
- [14] Zhang Mingsheng, Yin Zhen, Hu G J *et al.* Phys. Rev. B,1990,41:2003
- [15] Liu Yulong, Jiang Yijian, Liu Jingqing *et al.* Phys. Rev. B,1994,49:5058
- [16] Huang Fumin, Yue Kwok To, Tan Pinghang *et al.* J. Appl. Phys.,1998,84:4022
- [17] Chen Ting, Scott J F. Phys. Rev. B,1989,40:8978
- [18] Wu X L, Zhang M S, Chen X Y *et al.* Appl. Phys. Lett.,1994,65:1088

- [19] Zhu B F, Huang Kun, Tang H. Theory on optical modes and Raman scattering in quantum wells. In: Anastassakis E M, Joannopoulos J D eds. Proceedings of 20th International Conference on the Physics of Semiconductors. World Scientific, Aug. 11—15, 1990. Gress. 1409
- [20] Zhang Shulin, Zhu Bangfen, Fan Shoushan *et al.* Raman Characteristics of Novel One - dimensional Nano - scale Materials (Invited Plenary Lecture). In: Proceedings of the Sixteenth international conference on Raman Spectroscopy, Cape Down, South Africa, Pub. John Wiley & Sons Press, Sep. 7—11, 1988. 25
- [21] Jin Y, Hou Y T, Zhang S L *et al.* Localized interface phonon modes in CdSe/ ZnTe superlattices, (the “Young author best paper award” paper). In: Editors Ping Jiang and Zhang Houzhi, Proceedings of 21th international conference on the physics of semiconductors. Beijing, China. World Scientific, Singapor, Aug. 10—14, 1992. 815
- [22] Zhang S L, Yang C L, Hou Y T *et al.* J. Raman Spectroscopy, 1996, 27: 249
- [23] Zi J, Zhang K, Xie X. Prog. Surf. Sci., 1997, 54: 69
- [24] Li Bibo, Yu Dapeng, Zhang Shulin. Asain J. of Phys., 1998, 7: 313
- [25] Huang Kun, Zhu B F. Phys. Rev. B, 1988, 38: 2183—2186; 13377—13386; Huang Kun, Zhu B F, Tang H. Phys. Rev. B, 1990, 41: 5852—5842
- [26] Levi D, Zhang Shu - Lin, Klein M V *et al.* Phys. Rev. B, 1987, 36: 8032; Zhang S L, Yang C L, Hou Y T *et al.* Phys. Rev. B, 1995, 52: 1477; Jin Y, Siu G G, Stokes M J *et al.* Phys. Rev. B, 1998, 57: 1637
- [27] Zi J, Ludwig W, Zhang K *et al.* Phys. Rev. B, 1995, 51: 7886; Zi J, Zhang K, Xie X. Phys. Rev. B, 1993, 47: 9937; Appl. Phys. Lett., 1990, 57: 165; Phys. Rev., 1990, 41: 12862
- [28] Liu X, Huang D H, Jiang Z *et al.* Phys. Rev. B, 1996, 53: 4799
- [29] Zi J, Zhang K, Xie X. Phys. Rev. B, 1998, 58: 6712; Phys. Rev. B, 1997, 55: 9263; Zi J, Buscher H, Falter C *et al.* Appl. Phys. Lett., 1996, 69: 200
- [30] Zhang S L. Hou Y T, Ho K S *et al.* J. Appl. Phys., 1992, 72: 4469; Zhang S L, Wang X, Ho K S *et al.* J. Appl. Phys., 1994, 76: 3016; Li Bibo, Yu Dapeng, Zhang Shulin. Phys. Rev. B., 1999, 59: 1645

(上接第 608 页)

分别以概率 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ 精确复制 m 份的充要条件为 $n \times n$ 的矩阵 $X^{(1)} - \sqrt{\Gamma} X^{(m)} \sqrt{\Gamma}$ 半正定.

类似定理 2, 定理 3 决定了 $1 \rightarrow m$ 的概率克隆的最佳成功概率.

定理 4: 量子态 $|\Psi_1\rangle, |\Psi_2\rangle, \dots, |\Psi_n\rangle$ 可以分别以概率 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ 认证的充要条件为 $n \times n$ 的矩阵 $X^{(1)} - \Gamma$ 半正定.

显然, 当定理 3 中 $m \rightarrow \infty$ 时, $X^{(m)}$ 的非对角元趋于零, 从而 $X^{(m)}$ 趋于单位矩阵, 即得到定理 4. 定理 4 决定了对 n 个可能的量子态 (一般非正交) 进行认证的最大成功概率.

定理 1—4 给出了输入态为纯态时概率克

隆和量子态认证的完整描述, 如何将这些结果推广到输入态为混合态的情况, 将是一个值得进一步研究的有意义的课题.

参 考 文 献

- [1] Bennett C H. Phys. Today, 1996, 48(10): 27
- [2] Wootters W K, Zurek W H. Nature, 1982, 299: 802
- [3] Yuen H P. Phys. Lett. A, 1986, 113: 405
- [4] Duan L M, Guo G C. Phys. Lett. A, 1998, 243: 261
- [5] Buzek V, Hillery M. Phys. Rev. A, 1996, 54: 1844
- [6] Gisin N, Massar S. Phys. Rev. Lett., 1997, 79: 2153
- [7] Duan L M, Guo G C. Phys. Rev. Lett., 1998, 80: 4999
- [8] Dieks D. Phys. Lett. A, 1988, 126: 303
- [9] Bennett C H. Phys. Rev. Lett., 1992, 68: 3121