

文章编号: 1000-7032(2003)01-0001-07

## 黄昆对物理学的贡献

朱邦芬

(清华大学 高等研究中心, 北京 100084)

**摘要:** 黄昆是晶格动力学的奠基人和权威, 声子物理学学科开拓者。他是多声子光跃迁和多声子无辐射跃迁理论学科的开创者, 是“极化激元”概念的最早阐述者。他的姓氏也与晶格振动长波唯象方程、X 光漫散射理论联系在一起。在多年离开科研第一线后, 黄昆 70 岁还建立了半导体超晶格光学声子的“黄-朱模型”。本文简要介绍黄昆先生在科学研究领域的几项主要贡献。

**关键词:** 声子物理; 多声子光跃迁; 极化激元; X 光漫射; 黄方程

中图分类号: O481 文献标识码: A

## 1 引 言

经过国家最高科学技术奖评审委员会多轮严肃而认真的筛选, 经过国务院常务会议的最后批准, 黄昆先生荣获 2001 年度国家最高科学技术奖。2002 年 2 月 1 日, 江泽民主席在人民大会堂向黄昆颁发获奖证书。黄昆是世界著名的物理学家和杰出的教育家, 是固体声子物理学学科开拓者, 他的几项开创性成就, 除了 X 光漫散射理论外, 均与固体发光学密切相关。为祝贺黄昆先生荣获国家最高科学技术奖, 本文将简要介绍黄昆先生在科学研究领域的几项主要成就<sup>[1]</sup>。

## 2 X 光“黄散射”

X 射线入射到材料, 会被周期排列的原子的电子所散射, 并在一定的反射角出现非常尖锐的衍射峰。然而, 实际材料往往偏离严格的周期排列, 除了晶格振动, 另一种可能的漫散射机制是由材料中外来杂质与缺陷引起的晶格畸变所导致的, 这是黄昆 1946 年在研究稀固溶体 X 光漫散射时提出的<sup>[2]</sup>。黄昆抓住物理本质, 用一个简化模型估算了溶质原子在稀固溶体中引起的长程晶格畸变对 X 射线衍射的影响, 推导了这种点缺陷长程弹性位错场在衍射峰附近产生的漫散射强度公式, 预言其主要特点如下:

1. 溶质原子的存在使布拉格衍射峰强度减小了一个因子, 该因子正比于倒格矢的平方且与

溶质浓度有关;

2. 在布拉格峰附近, 漫散射有一定的强度分布。在垂直于倒格矢方向上, 漫散射为零; 在平行于倒格矢方向上, 漫散射强度随偏离布拉格角而迅速下降;

3. X 射线漫散射与热漫散射在形式上比较相似, 但微观机制及定量规律很不一样。在常温下, 点缺陷畸变场导致的漫散射往往被热效应掩盖。从而开创了 X 射线研究中的一个新的分支领域, 产生了深远的影响。

由于观察黄散射要求很高的实验条件, 直到 1967 年, 德国的 H. Peisl 等在研究  $\gamma$  射线辐照氟化锂晶体 X 射线散射实验时, 才观察到了由点缺陷长程位错场所引起的漫散射, 证实了黄昆预言的上述漫散射强度分布规律<sup>[3]</sup>。此后, 在快中子辐照铜晶体和电子辐照铝晶体等材料中, 国外科学工作者都观察到了这种漫散射, 从而被国际学术界普遍承认。为了区别于热致漫散射, 这种漫散射在文献中, 有时被称作黄漫散射 (Huang's Diffuse Scattering, 缩写为 HDS), 或简称为黄散射。1972 年德国物理学家证明, 利用黄散射强度分布, 可以倒推出点缺陷的结构 (种类、对称性、大小), 从而使黄散射发展为一种能直接研究晶体中微观缺陷 (如离子注入 Si 单晶的缺陷) 的强有力手段。

近年来, 黄散射的研究仍在深入。人们在掠射条件下观察到表面层 (0.1 $\mu$ m) 的黄散射, 在中子

收稿日期: 2002-08-11; 修订日期: 2002-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (19974044)

作者简介: 朱邦芬 (1948-), 江苏宜兴人, 清华大学高等研究中心教授, 主要从事凝聚态理论、半导体物理和晶格动力学研究。

E-mail: bzfhu@castu.tsinghua.edu.cn, Tel: (010)62787784(O); (010)62789710(H), Fax: (010)62781886

散射实验中也观察到黄散射。随着实验手段的日益完善,特别是更加理想的同步辐射光源的利用,黄散射将在探索晶体微结构缺陷上发挥更大的作用。

### 3 “黄方程”与声子极化激元

对于极性晶体(又称离子晶体),正负离子在光学振动时会产生极化场,由此导致的宏观电场使得纵光学振动(振动方向与波传播方向平行)频率高于横光学振动频率。这种极化的微观机制非常复杂。离子极化不仅包括电子云的极化,而且还存在伴随光学振动而出现的电子云畸变的贡献。此外,以微观模型处理长程库仑作用对动力学过程的影响,本身也是一个相当复杂的问题。早期的研究工作曾因未能正确地认识长程库仑作用而得到一些错误的结论。

针对这种情形,黄昆于 1950 年提出了一对唯象方程,以描述极性晶体的长波光学振动。黄昆把宏观电场作为一个新的变量,用来描述离子光学振动所受到的库仑作用,而宏观电场与离子光学位移又共同对电极化有贡献。这就是以后被广泛引用的“黄方程”。它确立了约化光学位移  $W$ (正比于正负离子位移之差)、宏观电场  $E$  与电极化  $P$  三者之间的关系,即

$$\begin{aligned} -\omega^2 W &= b_{11} W + b_{12} E, \\ P &= b_{21} W + b_{22} E \end{aligned}$$

其中四个系数中,  $b_{12} = b_{21}$ , 三个独立系数可由实验直接确定。黄方程的物理意义十分明确,作为宏观关系是严格的,它简洁而有效地解决了极性晶体光学振动的问题<sup>[4-6]</sup>。

作为应用黄方程的一个尝试,黄昆将其用于研究电磁作用的“推迟效应”(即库仑作用以有限速度(光速)传播)对长波长光学振动的影响。黄昆把黄方程与麦克斯威尔方程联解,用于双原子极性晶体,发现电磁模(光子)与横光学声子模互相耦合而形成新的模式。

这在物理上提出了一个非常重要的新观念。首先,光子(可以不限于介质内)与声子(仅限于介质内)以同等地位同时得到处理。其次,电磁波在极性晶体内传播模式应被理解为介质特征模式。再次,这种电磁波-极性元激发耦合模式对应于一种新的元激发的概念,以后相继被推广到其他元激发(激子,磁子,等离激元)与电磁波的作用,并被命名为各种极化激元(polariton)。黄昆最先提

出的光学声子-电磁波耦合模(声子极化激元)在实验上则由 C. H. Henry 和 J. J. Hopfield 于 1965 年在 GaP 材料中首次观察到<sup>[7]</sup>,引起人们极大兴趣。

1972 年,在第一次关于极化激元的国际学术会议上,黄昆开创性的贡献得到会议高度评价。会议文集重新刊登黄昆 1951 年的论文“关于辐射场和离子晶体的相互作用”,并誉为该领域的一个里程碑<sup>[8]</sup>。今天,各种极化激元已经作为一种基本运动形式在固体光学各个领域中得到深入的研究,已得到广泛的应用。2000 年 8 月,第 17 届国际喇曼散射谱学大会在北京举行,美国宾夕法尼亚大学 E. Burstein 教授(第一届极化激元的国际学术会议主席)在一篇题为“黄改变了我们对电磁波在晶体介质中传播的概念”的报告中,回顾了这一领域的历史、发展和现状,黄昆的贡献受到了高度赞扬<sup>[9]</sup>。

### 4 多声子跃迁理论

通常,一个束缚电子从激发态跃迁到基态时,对应于一个确定的能量,所看到的光谱是线状光谱。可是,F 中心的实验光谱,是一个非常宽的光谱带,参照分子物理类似现象,这种很宽的光谱,可以断定源于离子的热运动。但 F 中心光谱的宽度相当于几十个声子的能量,这表明,如果把电子与声子的相互作用当作微扰处理,几十个声子宽度的光谱,意味着把微扰论展开到几十阶,这对理论提出了挑战。黄昆认识到,在 F 中心的光谱问题上,微扰论的观点是理论上的误导,解决这一难题的线索应从分子光谱的弗兰克-康登原理得到启发。实验上发射光谱峰相对于吸收光谱峰向长波方向移动,其原因是,不同电子态所对应不同的分子构型,而在光跃迁时可以认为原子核的位型不变。原则上,在固体中也存在这种依赖于电子态的晶格畸变现象,即晶格弛豫现象。但是 1950 年前,尽管不少物理学家已认识到对晶体中电子跃迁的理解上也应采用类似弗兰克-康登原理的物理图像,但并无一个理论,连晶格弛豫大小也没认真估算过。

黄昆认识到,固体中局域电子态与周围晶格原子之间的相互作用,使晶格原子的平衡位置发生移动。对于不同的电子态,由于电子初态与末态对应不同的晶格平衡位置,初态与末态的振动波函数之间不存在严格的正交关系。电子跃迁过程中振动量子数(声子数)可以任意改变而跃迁几

率并不为零。根据电子跃迁过程中是否伴随光跃迁, 它又可分为光跃迁和无辐射跃迁多声子过程。国际物理学界公认黄昆的这项理论工作的开拓性意义, 并把这一理论称之为黄-里斯 (Huang-Rhys) 理论<sup>[10]</sup>, 其要点如下:

1. 绝热近似: 系统总波函数  $\psi_{in}(x, Q)$  ( $x, Q$  分别是电子和晶格坐标) 是电子态  $\varphi_i(x, Q)$  与晶格振动态  $\chi_{in}(Q)$  的乘积;

2. 康登近似: 认为  $i$  电子态与  $j$  电子态之间偶极跃迁矩阵元  $M_{ij}$  与晶格坐标  $Q$  无关, 跃迁矩阵元为晶格振动波函数的重叠积分乘以  $M_{ij}$ ;

3. 假定所有纵光学声子具有单一频率, 并可运用连续介电模型描述纵光学振动 (即声子单频多模近似, 可以证明, 它也能转换为单一声子局域模式问题), 假定 F 中心电子通过其电荷分布引起的库仑场与晶格相互作用;

4. 在线性电-声子相互作用与简谐近似下, 通过把晶格振动波函数以平衡位置时的正则坐标来展开, 他们得到, 低温下振动态之间的重叠积分中所含  $p$  声子发射概率来自  $p$  个声子模的声子数由 0 至 1 的跃迁。对单频多模声子模型,  $p$  声子跃迁的总贡献正比于

$$|M_{ij}|^2 e^{-S} S^p / p!$$

其中  $S$  (通常称作 Huang-Rhys factor, 或  $S$  因子) 表征晶格弛豫的大小, 与晶格弛豫  $\Delta_j$  有关, 这里  $\Delta_j$  为电子从  $i$  态跃迁到  $j$  态时晶格坐标  $Q$  的移动值。公式表明, 由于晶格弛豫, 原先一条谱线变成一系列的多声子峰。在低温下, 多声子谱线强度呈泊松分布。当  $S \gg 1$  时, 峰值在  $P$  声子峰附近,  $P \sim S$  附近。1959 年 J.J. Hopfield 首先在 CdS 的带边发射中证实了多声子结构<sup>[11]</sup>。

5. 在有限温度下, 发射  $p$  声子的概率包括  $p+q$  个声子模的声子数增加 1 和  $q$  个声子模的声子数减 1 的跃迁。 $p$  声子跃迁的总贡献可以用一个虚数宗量的贝塞尔函数  $I_p$  表示

$$\exp[-S(2n+1)] [(n+1)/n]^{p/2} \cdot I_p \{2S \sqrt{[n(n+1)]}\}$$

其中  $n$  是该温度下频率为  $\omega$  的声子的平均占据数。黄昆的这个结果与当时溴化钾 (KBr) 晶体中 F 中心在多个不同温度下的吸收实验符合得很好。现在, 光跃迁多声子理论虽然仍在一些更深入的问题上进行探讨, 但基本原理业已确定无疑。

在这篇著名文章中, 黄昆还讨论了荧光的猝灭问题。他提出, 既然电子跃迁过程中可以有任意数目声子的变化, 电子还应可能发生无辐射跃迁, 即电子跃迁中的能量变化, 原则上可以完全由多个声子的吸收或发射来补偿, 而无光跃迁伴随。这就是直接联系着固体发光中心效率与半导体深能级动力学等重要问题的多声子无辐射跃迁理论。这个理论在 20 世纪 70 年代被证实性上是正确的, 然而定量估算产生了一些曲折和矛盾。国际上相继出现了“非康登近似”和“静态耦合”理论, 取得了较好的定量结果。但是也出现了一个令人困惑的局面: 为什么在绝热近似框架内作修正的“非康登近似”与彻底抛弃绝热近似的“静态耦合”会有相近的结果? 为什么以理论上更为严格的绝热近似为基础的“康登近似”反而不如根据不充足的“静态耦合”? 1979 年黄昆又重新剖析了这个难题, 他发现用于无辐射跃迁理论的康登近似实质上是把跃迁计算中的一阶微扰与包含高阶微扰的晶格弛豫混合并用; 并且证明, 一旦消除了这种不自洽性, 绝热近似与静态耦合在一级近似下是等价的。这样就得到一个统一的理论, 从而澄清了 30 年来围绕无辐射跃迁理论发展所出现的混乱, 也给比较简单的静态耦合计算提供了理论上的依据<sup>[12]</sup>。黄昆在 1980 年建立的统一绝热近似与静态耦合的理论, 一发表即引起广泛重视, 并被英国 B. K. Ridley 编入教科书<sup>[13]</sup>。

1980 年以来, 黄昆与顾宗权合作提出了多声子跃迁理论中的多频声子模型, 该模型表明在光跃迁过程与无辐射跃迁过程中所参与的声子可以具有非常不同的频率, 从而解决了多声子光谱实验解释的疑难点<sup>[14]</sup>。

黄昆同 Rhys 合著的《F 中心的光吸收与无辐射跃迁理论》<sup>[10]</sup>一文是人们在这个领域必引的经典文献。成立于 1975 年, 位于美国费城的科学信息研究所 (ISI, Institute of Science Information) 是一个专门分析研究科学论文被引用情况的机构。从统计平均的角度来看, 一篇论著在 ISI 所收录的 3 000 多种 SCI 核心学术刊物 (或 5 000 多种 SCI 扩展学术刊物) 所发表学术论文中被引用的次数越多, 延续年代越长, 表明这篇论著在科学上影响越大。从 1975 年 (这篇文章发表 24 年以后) 以来, 这篇论文被他人在 SCI 收录的刊物上被引用 652 次, 其中 1994 年以后被引用 173 次, 平均每年引用 20 多次。黄昆的理论, 不仅奠定了固体中束缚

在杂质和缺陷上的局域电子态跃迁理论的基础,而且近年来由于量子点中的光吸收与发射和 F 中心的光跃迁过程有很大的相似性,随着量子点等纳米结构研究热的兴起,科学家开始测量和计算量子点中的 S 因子,黄昆这篇论文又引起人们新的兴趣。

## 5 《晶格动力学》专著

马克斯·玻恩自 1910 年起就致力于晶格动力学的研究工作,该学科几十年的研究进展大部分是由他自己、他的学生和合作者完成的,是晶格动力学的奠基人和无可争议的权威。身为量子力学和晶格动力学两个领域的开创者,玻恩早就计划以量子力学为基础写一本《晶格动力学》,并在二次大战前和大战中间,断断续续写了若干章节。但是,战后他忙于其他研究,且年事已高,书被搁置了起来。1947 年黄昆到玻恩处访问,玻恩发现黄昆熟悉这门学科,有深刻见解,就向黄昆建议,由两人合作,共同完成该书的写作。经过国内批准,黄昆愿意与玻恩一起写书。

玻恩原先的计划是从量子理论的最一般原理出发,以演绎的方式推导出晶体的结构和性质。但并不合黄昆的口味,因此他增写了第一部分“基础理论”。按照黄昆设想,第一部分为比较基本的引论,尔后再逐步引伸至书的第二部分“普遍理论”,即玻恩已断断续续写了若干章节的部分。

《晶格动力学》全面地总结了玻恩学派关于晶格动力学的基本理论。黄昆不仅以严谨的论述和非常清晰的物理图像对这个固体物理学中的一个最基本领域进行了系统的总结,而且还以一系列创造性的工作,发展和完善了这个领域。玻恩对这本书,显然十分满意。他在《晶格动力学》序言中写道<sup>[15]</sup>:“黄昆成功地完成了任务,不过,本书已变得和我原来的计划很不相同了。黄博士坚信科学之主要目的在于社会效益,而他同时也重写了我原先的内容,在很多方面使之更普遍化,并增加了新的章节。因而,本书之最终形式和撰写应基本上归功于黄博士。”

一般而言,两个人合著一本书,序言应由两人共同署名;玻恩独自一人撰写序言,其原因正如他在序言中所写<sup>[15]</sup>:“由我单独撰写和签署这个序言的原因并非只是与合作者之间遥远的距离,我是希望说明,如果没有他专心致志且富有成效的劳动,本书是绝对不可能完成的。”

玻恩在给爱因斯坦的一封信中还写道<sup>[16]</sup>:“我现在正在跟一个中国的合作者黄昆博士完成一本晶格的量子力学的书。书稿内容已完全超越了我的理解,我能懂得年轻的黄昆以我们俩人的名义所写的东西,就很高兴。”这些话,一方面显示了玻恩的谦虚和奖掖后进的美德,同时也从一个侧面反映出黄昆确实对这本书作了非常重要的贡献。

牛津大学出版社 1954 年正式出版《晶格动力学》这部专著。这本书自问世以来,一再重印,并译成俄、中等多国文字,是所有固体物理学教科书及晶格动力学专著的标准参考文献,对于物理学家熟悉该分支学科,起了很大的作用。1978 年,牛津大学出版社曾决定停止印刷,但是过了 3 年,美国物理学家 J. L. Birman 等人又呼吁再次出版。在将近半个世纪以后的今天,牛津大学出版社把它列入“牛津经典物理著作丛书”,仍在加印,人们仍能在 Amazon 网站上直接购买到,这不能不说是一个奇迹。英国爱丁堡大学理学院院长、晶格动力学权威 W. Cochran 在他写的《晶格中的原子动力学》一书的 1973 年版引言中说“玻恩和黄昆在 1954 年出版的《晶格动力学》,至今仍是这个学科的主要方面的权威著作”<sup>[17]</sup>。据笔者检索,从 1975 年至 2001 年 3 月,玻恩和黄昆合著的《晶格动力学》一书英文版被引用 5 254 次,俄文版被引用 376 次,平均每年引用 200 多次。无论从被引证次数,还是从被引证延续时间,《晶格动力学》一书在国际上都是罕见的,确实代表了世界一流水平。

## 6 黄-朱模型

1965 年以来,准二维系统的光学声子 LO 类体模,一直是沿用由宏观介电模型导出的片层模型(slab model)<sup>[18]</sup>。由此可得静电边界条件,即静电势在界面处为节点。若阱宽为  $d$ ,原点设在阱中心,则静电势  $\Phi$  为

$$\Phi(z) = \cos(m\pi z/d) \quad m = 1, 3, 5, \dots$$

$$\Phi(z) = \sin(m\pi z/d) \quad m = 2, 4, 6, \dots$$

因为静电势是光学位移的导数而片层模被认为是正弦驻波,因而光学位移在界面极大。

1985 年,德国科学家 M. Cardona 组的短周期超晶格喇曼散射光谱实验表明,这种模式的对称性有疑问<sup>[19]</sup>。他们的一种简单化的处理是将各级模的位相移动  $90^\circ$ ,即把原先由连续介电模型所

要求的静电势在界面处极小改成光学位移在界面极小, 即所谓的力学边界条件。由此得到光学声子模式, 被称为“波导模型”。

$$\Phi(z) = \sin(m\pi z/d) \quad m = 1, 3, 5, \dots$$

$$\Phi(z) = \cos(m\pi z/d) \quad m = 2, 4, 6, \dots$$

这样产生了两个令人困惑的问题:

(1) 如果连续介电模型给出的类体模对称性不对, 那么为什么由同一模型预言的界面模的存在却又为同组人员的实验所证实?

(2) 正确的光学声子模式的边界条件应是什么?

黄昆与朱邦芬是最早认识并解决了这个难题的人。1987 年, 他们设计了一个构思巧妙却十分简明的“偶极子超晶格”模型, 这一模型与连续介电模型完全相容, 而又是个微观模型。据此, 黄昆和朱邦芬澄清了原来理论出现矛盾的原因, 提出和发展了关于半导体超晶格光学振动的系统理论<sup>[20~22]</sup>; 这一被国际学术界普遍称作“黄朱模型”的要点有:

1. 光学声子类体模的光学位移和静电势在界面均应为节点。

2. 界面模与类体模之间存在内在联系。界面模具有强烈的各向异性。当声子波矢与超晶格生长方向平行时, 界面模演变为半波长等于阱宽的驻波。类体模一般应从全波长振动模起算。

3. 声子色散引起界面模与频率相近的类体模之间的混合。

4. 连续介电模型所固有的局限性(忽略声子色散效应)导致简并的类体模解具有任意性, 其所假定的正弦驻波形式导致了错误的对称性, 然而界面模对应于纵光学声子与横光学声子的混合, 不存在模式不确定的问题。这就是为什么连续介电模型给出正确的界面模然而错误的类体模的原因。

5. 波导模型理论上并无根据, 它只是在声子波矢与超晶格生长方向平行时给出正确的光学位移表达式。

6. 在分析错误原因的基础上, 基于他们的理论计算, 黄昆和朱邦芬给出了一套描述超晶格中光学振动模式与静电势的近似解析表达式,

$$\Phi(z) = \cos(\mu_m \pi z/d) - (-1)^{m/2}, \quad m = 2, 4, 6, \dots$$

$$\Phi(z) = \sin(\mu_m \pi z/d) + C_m(z/d), \quad m = 3, 5, 7, \dots$$

其中  $\mu_m$  和  $C_m$  由静电边界条件和力学边界条件联合确定。

黄朱模型引起国际上普遍重视, 由此引发了一系列的理论和实验研究工作, 有力地推动了这一研究领域的深入发展。国外多个著名实验室特地精心设计许多实验来验证三种声子模型。例如, 美国加州大学伯克利分校 P. Y. Yu 和亚利桑那大学 K. T. Tsen 等人特地设计一组实验以比较量子阱中光学声子的三种模型, 他们的结论是“唯有黄朱模型既能定性又能定量地解释我们的实验结果, 而其他二种模型则不能”<sup>[23]</sup>。英国牛津大学的时间分辨光谱实验表明:“与各种声子理论比较, (1) 偶数阶限制模的观测支持波导模型和黄朱模型, 不支持 Slab 模型; …(4) 观测到的界面模的频率符合 Slab 模型和黄朱模型, 但不和波导模型相符合”<sup>[24]</sup>。

黄朱模型已作为该领域的必读文献列入许多国外专著和研究生教材, 例如由德国斯普林格出版的“半导体及纳米结构的超快光谱”<sup>[25]</sup>, “半导体基础”<sup>[26]</sup>, “超晶格与其他异质结构: 对称性与光学现象”<sup>[27]</sup> 等著作, 均有多页篇幅的介绍。三篇主要论文被他人引用超过 400 次, 其中《连续介电模型与超晶格中弗洛里希作用》<sup>[22]</sup> 一文, 已被他人引用 280 次。

近年来, 黄朱模型被广泛用于研究低维半导体材料与声子有关的各种物理问题与器件研究, 包括运输、喇曼散射、热载流子弛豫、声子等离激元、自由载流子吸收、带边光荧光飞秒动力学等一系列问题的研究。朱邦芬、黄昆等基于黄朱模型建立了超晶格光学声子喇曼散射的微观理论。

黄昆和他的研究组还在超晶格电子态结构领域进行了富有成效的研究工作。黄昆等创造了一种用有限几个平面波展开计算超晶格空穴子带结构的方法, 并将其用于量子阱中激子态, 外电磁场下超晶格能带, 一维及零维量子结构的研究, 使我国在这个领域的研究大体上与国外平行, 颇具特色。

## 参 考 文 献:

[1] Zhu Bang-fen (Ed.) *Selected Papers of Kun Huang with Commentary* [M]. Singapore: World Scientific, 2000.

- [ 2 ] Huang K. X-ray reflexions from dilute solid solutions [J]. *Proc. Roy. Soc. (London)*, 1947, **A190**: 102-117.
- [ 3 ] Peisl H, Spalt H. X-ray diffuse scattering in  $\nu$ -irradiated LiF [J]. *Phys. Stat. Solidi*, 1967, **23**: K75.
- [ 4 ] Huang K. Phenomenological equations of motion for simple ionic lattices [R]. *E. R. A. Report Ref.*, 1950, L/T **239**: 1-8.
- [ 5 ] Huang K. On the interaction between the radiation field and ionic crystals [J]. *Proc. Roy. Soc.*, London 1951, **A208**: 352-365.
- [ 6 ] Huang K. Lattice vibrations and optical waves in ionic crystals [J]. *Nature*, 1951, **167**: 779-781.
- [ 7 ] Henry C H, Hopfield J J. Raman scattering by polaritons [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1965, **15**: 964-967.
- [ 8 ] Burstein E, Martini F. *Polariton* [M]. New York: Pergamon Press, 1972.
- [ 9 ] Burstein E. Huang has changed our way of thinking about the propagating EM modes in crystalline media [A]. *Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Raman Spectroscopy* [C]. Ed. by Zhang Shu-lin, Zhu Bang-fen, John Wiley & Sons Ltd., 2000, 49-52.
- [ 10 ] Huang K, Rhys A. Theory of light absorption and non-radiative transition in F-centers [J]. *Proc. Roy. Soc. (London)*, 1950, **A204**: 406-423.
- [ 11 ] Huang Kun. Adiabatic approximation and static coupling theory of nonradiation transitions [J]. *China Science*, 1980, **10**: 949-954 (in Chinese).  
Huang Kun. Lattice relaxation and multi-phonon transition [J]. *Progresses in Physics*, 1981, **1**: 31-84 (in Chinese).
- [ 12 ] Hopfield J J. A theory of edge-emission phenomena in CdS, ZnS and ZnO [J]. *J. Phys. Chem. Solids*, 1959, **10**: 110.
- [ 13 ] Ridley B K. *Quantum Process in Semiconductors* [M]. Oxford: Clarendon Press, 1982.
- [ 14 ] Huang K, Gu Z. Frequency dispersion effect in multiphonon transitions [J]. *Physica*, 1983, **117B** & **118B**: 552-554.
- [ 15 ] Born M, Huang Kun. *Theory of Crystal Lattice Dynamics* [M]. Beijing: Peking University Press, 1988, Preface: V-IX (in Chinese, Translated from English).
- [ 16 ] Born M. *Born-Einstein Letters with Commentaries by Max Born* [M]. New York: New York Walker Company, 1971.
- [ 17 ] Cochran W. *The Dynamics of Atomic Crystals* [M]. London: Edward Arnold, 1973.
- [ 18 ] Fuchs R, Kliewer K L. Optical modes of vibration in an ionic crystal slab [J]. *Phys. Rev. B*, 1965, **140**: A2076.
- [ 19 ] Sood A K, Menendez J, Cardona M, *et al.* Resonance Raman scattering by confined LO and TO phonons in GaAs/AlAs superlattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **54**: 2111-2114.
- [ 20 ] Huang K, Zhu B F. Long wavelength optic vibrations in a superlattice [J]. *Phys. Rev. B*, 1988, **38**: 2183-2186.
- [ 21 ] Bang-fen Zhu. Optical phonon modes in superlattices [J]. *Phys. Rev. B*, 1988, **38**: 7694-7701.
- [ 22 ] Huang K, Zhu B F. Dielectric continuum model and Frohlich interaction in superlattices [J]. *Phys. Rev. B*, 1988, **38**: 13377-13386.
- [ 23 ] Tsen K T, Yu P Y, *et al.* Electron-optical-phonon interactions in ultrathin GaAs/AlAs multiple quantum wells [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **67**: 2557-2560.
- [ 24 ] Tatham M C, Ryan J F. Inter- and intra-subband relaxation of hot carriers in quantum wells probed by time-resolved Raman spectroscopy [J]. *Semicond. Sci. Tech.*, 1992, **7**: B102-B108.
- [ 25 ] Shah J. *Ultrafast Spectroscopy of Semiconductor and Semiconductor Nanostructures* [M]. Berlin: Springer, 1996, 208-211.
- [ 26 ] Yu P Y, Cardona M. *Fundamentals of Semiconductors* [M]. Berlin: Springer, 1996, 507-511.
- [ 27 ] Ivchenko E L, Pikus G E. *Superlattices and Other Heterostructures: Symmetry and Optical Phenomena* [M]. Berlin: Springer, 1994, **110**: 119-121.

## Huang's Contributions to Physics and Their Significance

ZHU Bang-fen

(Center for Advanced Study, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The phonon, quantized lattice vibration, plays a fundamental role in condensed matter physics. Professor Kun Huang is known throughout the world for his many pioneering contributions to physics, in particular to the phonon physics, a branch closely related to the luminescence in solids. His book entitled "Lattice Dynamics in Crystal Lattice" (in collaboration with Nobel laureate M. Born) is the first comprehensive and compact presentation in this field on the basis of quantum mechanics, which, although published about half century ago, is still used as standard textbook until now. In his early articles on the interaction between radiation field and ionic crystals, he first proposed an important idea later known as "polariton", which has changed our way of thinking about the propagating the EM Modes in crystalline media. His theory on multiphonon transition in semiconductors and insulators,

the Huang-Rhys theory, which dealt with both the multiphonon optical and non-radiative transitions, laid the foundation of this important field. He pointed out the possibility of observing X-ray diffuse scattering in crystals due to impurities at first, later known as “Huang’s diffuse scattering”. In early 1950’s, he formulated a pair of phenomenological equations relating the long-wavelength optical vibration to macroscopic electric field and polarization, which has been widely applied and named as Huang’s Equation. As a 70 years old man, he and his collaborator resolved a puzzle about the optical phonon modes in semiconductor superlattices and worked out the “Huang-Zhu Model”. In recognition of his lifetime achievements, Huang was recently honored with the Supreme Scientific and Technological Award in China. Huang’s main scientific contributions and their significance are briefly reviewed in this paper.

**Key words:** phonon physics; multi-phonon transition; Polariton; X-ray diffuse scattering; Huang’s equation

### 附: 黄昆简历

1919年9月2日出生于北京市, 祖籍为浙江嘉兴。

1941年 毕业于燕京大学物理系, 获理学学士学位。

1941—1942年 任昆明西南联大物理系助教。

1942—1944年 就读于西南联大北大研究院, 获理学硕士学位。

1944—1945年 任昆明凤凰山天文台助理研究员。

1945—1947年 赴英国 Bristol 大学物理系学习, 获哲学博士学位。期间, 发表《稀固溶体的 X 光漫散射》论文, 理论上预言了“黄散射”的存在; 理论计算金中溶入银原子的稀固溶体的结合能和残余电阻率, 为固体物理中十分著名的“Friedel 振荡”奠定基础。

1947—1948年 部分时间在英国爱丁堡大学玻恩教授研究组访问。

1948—1951年 任英国利物浦大学理论物理系博士后研究员, 期间建立了“黄方程”, 提出了声子极化激元的概念, 并与李爱扶(A. Rhys)建立了多声子跃迁理论。

1947—1952年与玻恩教授合著《晶格动力学》一书(牛津出版社, 1954)。

1951—1977年 任北京大学物理系教授。期间从1954年起任北大物理系固体物理专门化教研室主任。

1960—1966年 任北京大学物理系副系主任。

1955年 被选为中国科学院数学学部 学部委员。

1956—1958年 任国内五校联合首次举办的半导体专门化主任。

1964年 被选为中华人民共和国第三届全国人民代表大会代表。

1977—1983年 任中国科学院半导体研究所所长, 1983年以后任半导体所名誉所长。

1978年 当选为中国人民政治协商会议第五届全国委员会常务委员, 以后分别连任第六届、第七届、第八届政协常委。

1979—1981年 重新研究多声子无辐射跃迁理论。

1980年 被遴选为瑞典皇家科学院国外院士。

1985年 被选为第三世界科学院院士。

1985年起, 从事半导体超晶格物理研究, 在电子态和声子模等领域有所建树。1988年与朱邦芬合作建立关于半导体超晶格声子模式的“黄-朱模型”。

1985—1988年 被选为 IUPAP 半导体分会委员。

1987—1991年 任中国物理学会理事长。

1992年 担任第 21 届国际半导体物理会议程序委员会主席。

1993年 获国家自然科学二等奖《半导体超晶格的电子态与声子模理论》。

1995年 荣获何梁何利科学技术成就奖。

1996年 获陈嘉庚物理奖。

2001年 获中华人民共和国最高科学技术奖。