

# 飞秒激光诱导材料内部三维光功能微结构新进展\*

邱建荣<sup>†</sup>

(中国科学院上海光学精密机械研究所 上海 201800)

**摘要** 飞秒激光是近年来获得迅速发展的一种超快激光. 超短脉冲和超高电场强度是它的两个特征. 飞秒激光已广泛用于物理化学反应的动力学过程分析和热效应可忽略的超精细加工. 利用飞秒激光与材料的非线性相互作用, 还可以实现透明材料内部有空间选择性的三维调控光功能微结构. 文章重点介绍了在可擦重写三维超高密度光存储、立体彩色内雕、可集成超快光开关等方面的应用和国内外相关领域的最新进展, 并展望了应用前景.

**关键词** 强场, 飞秒激光, 多光子反应, 微结构改性, 光功能

## Recent developments in femtosecond laser-induced three-dimensional microstructures with optical functions

QIU Jian-Rong<sup>†</sup>

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** Femtosecond lasers have two characteristics: ultrashort pulse length and ultrahigh electric field. They are widely used in the analysis of dynamic processes of various physicochemical reactions and fine processing with minimal thermal effects. They can also be used for three-dimensional microstructure modifications due to the nonlinear interaction between light and matter. We review the application of femtosecond lasers to three-dimensional rewritable optical memories with ultrahigh storage density, the formation of colored three-dimensional images, the fabrication of integrated optical switches, and other related areas. We also suggest future research directions in this area.

**Key words** intense field, femtosecond laser, multiphoton reaction, microstructure modification, optical function

假如给你一块透明的晶体或玻璃材料,你能否想办法在材料内部某个地方打一个介观尺度的孔洞或改变它的颜色呢?近年来,超短脉冲飞秒激光的诞生使我们能够实现这样一个梦.你或许在一些工艺品商店看到过将三维的生肖像雕在玻璃内部的工艺品,这是利用微裂纹的三维排列而成的,而这种微裂纹是纳秒(ns,  $10^{-9}$ s)YAG激光的基频或倍频与玻璃的非线性相互作用所产生的灾变性破坏.由于微裂纹的散射,图像呈白色.利用飞秒(fs,  $10^{-15}$ s)激光能实现纳秒激光所不能实现的超精细加工.譬如下文中我们将要介绍的利用飞秒激光诱导微结构可以在一块无色透明的玻璃中雕入各种各样颜色的三维图案,也能够雕入肉眼不可见的、但在紫外线照射时会显现不同颜色发光的图案.这不仅可用来做具

有更高附加价值的工艺品,而且可用于三维超高密度光存储,其可能带来的经济效益不可低估.为什么飞秒激光能实现纳秒、皮秒(ps,  $10^{-12}$ s)激光难以实现的微结构修饰呢?这是因为飞秒激光的脉宽很窄,能在物质吸收激光能量,传递给晶格并最终热能以热的形式释放的特征时间( $10^{-12}$ s数量级)内,将能量注入材料中具有高度空间选择的区域,实现热的影响很小的纳秒和皮秒激光难以实现的材料超精细加工.同时,即使材料本身在激光波长处不存在本征吸收,由于聚焦飞秒激光的焦点附近具有超高电场强度( $\sim 10^{10}$ V/cm),也会因激光诱导多光子吸收、

\* 国家自然科学基金杰出青年基金(批准号 50125208)资助项目  
2002-12-03收到初稿 2003-05-06修回

<sup>†</sup> E-mail jrq@photon.jst.go.jp

多光子离子化等非线性反应. 由于这些非线性反应的速率与吸收的光子数的幂方成正比, 并且反应存在本征或动态的反应阈值, 因此只有呈高斯分布的激光束的中心能量达到或超过反应阈值的部分才能诱导多光子反应. 所以飞秒激光照射后产生反应的区域可远远小于光斑  $\sim \frac{1.22\lambda}{NA}$  ( $\lambda$  为波长,  $NA$  为透镜的数值孔径) 的大小. 其产生的一种效果相当于将紫外线甚至于 X 射线拿到激光聚焦的材料内部去照材料所产生的同样效果, 实现空间高度选择性的微结构改性, 并赋予材料独特的光功能<sup>[1-17]</sup>.

掺 Ti 蓝宝石固态可调谐激光器的开发, 以及超短脉冲产生和光啁啾脉冲放大技术的发展, 使得飞秒激光器作为研究工具已经进入很多实验室. 1995 年, 日本的三泽博士在做激光照射实验时, 发现当超短脉冲激光聚焦到玻璃内部时, 在显微镜下发现在激光聚焦的焦点处形成了一个小斑点. 改变焦点的位置可以将这种斑点随意地写入玻璃内部<sup>[18]</sup>. 因此他提出了利用这种现象进行三维光存储的方法. 但他没有分析激光照射到底形成了什么, 又是怎么形成的. 随后日本的研究人员发现了飞秒激光诱导玻璃的折射率升高的现象. 本文作者参与的项目首次利用这种现象演示了一种全新的三维集成光路的构筑方法<sup>[3]</sup>. 利用飞秒激光进行透明材料(如无机玻璃、聚合物、晶体等)的空间有选择性的微结构改性, 以获取新的光、电功能特性的研究, 是光、电功能材料研究的前沿和热点, 引起了材料、物理、化学、光学、信息等领域学者的极大兴趣并竞相参与.

## 1 实验装置

我们实验中采用的激光光源由锁模的 Ti:蓝宝石激光器、再生放大器和光学参量放大器组成. 两种脉冲频率分别为 1kHz 和 200kHz, 单个脉冲最高能量分别为 1mJ 和 5 $\mu$ J 的 800nm 飞秒激光(~120fs) 用于实验. 将飞秒激光引入光学显微镜系统, 通过物镜聚焦后照射到抛光好的样品内部. 放置样品的平台可由计算机控制作三维精密移动.

因飞秒激光焦点附近的能量密度很高, 用 10 倍的物镜聚焦可达  $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>. 由于在极短的时间内将巨大的能量注入到玻璃内部激光焦点附近, 激光与物质间产生复杂的非线性相互作用<sup>[1]</sup>, 如自聚焦的多光子吸收和激光的自相位调制引发的白光的单光子或多光子吸收, 结果诱导了玻璃的各种各样的

微结构变化. 根据激光的能量密度、脉冲频率等条件的变化, 诱导的微结构大致可分为四种类型<sup>[16]</sup> (1) 由于色心的形成和光活性离子(稀土离子、过渡金属离子以及金、银等重金属离子)的氧化还原所引起的着色 (2) 缺陷的形成和局域致密引起的折射率的变化 (3) 熔融和激光冲击波引起的微小孔隙; (4) 光学击穿引起的微裂纹. 在许多情况下, 诱导的结构是复合型的, 具有一定的空间分布. 例如, 在形成微裂纹的同时, 在其边缘诱发色心等缺陷. 诱导结构的产生除与材料有关外, 激光能量密度、脉冲宽度、照射时间及扫描速率、脉冲频率等也影响微结构产生的种类、形状和尺度.

## 2 飞秒激光诱导三维光功能微结构

通过利用上述的四种微结构的空选择性的引入, 可以实现各种各样的功能. 如微裂纹的产生只局限在激光的焦点附近, 可以在较薄的透明材料内部实现微裂纹的三维可控排列, 将微观立体图像写入玻璃内部. 由于微裂纹对光的散射在日光下图像呈白色. 通过利用诱导的色心的着色和发光, 可以实现彩色图像标记.

聚焦的激光会产生以一定的直径传播的细丝现象, 并观察到由于自相位调制形成的白光. 这些非线性光学效应对诱导结构的种类、浓度、空间分布、寿命等产生重要影响.

经飞秒激光照射的石英玻璃的电子顺磁共振谱 (ESR) 中, 观察到了因 SiE' ( $\equiv$ Si: , 即一个电子处于氧缺损侧位的 Si 的 sp<sup>3</sup> 轨道捕获) 的形成而引起的信号. 在石英玻璃中用飞秒激光诱导微裂纹写入的图像在日光下会因微裂纹的散射而呈白色. 在暗室中用 254nm 的紫外光照射时, 图像发出蓝绿色的光. 发光光谱的测试表明, 蓝绿光是由玻璃中的氧缺损的电子缺陷引起的. 研究表明, 飞秒激光在产生微裂纹的同时, 也诱导了电子缺陷. 通过调整激光的平均功率等, 也可以只诱导色心而不产生微裂纹.

飞秒激光还能实现光活性离子空间有选择性的价态操纵. Mn<sup>2+</sup> 和 Fe<sup>3+</sup> 离子共掺的无色透明碱金属硅酸盐玻璃经飞秒激光照射后, 其吸收光谱的 530nm 处出现了由 Mn<sup>3+</sup> 离子的 d-d 跃迁所引起的吸收带, 激光聚焦照射过的位置由无色变成了紫色<sup>[6]</sup>. 利用该现象可将紫色的三维图像写入玻璃中. 另外我们还实现了对重金属离子、稀土离子的有空间选择性的价态操纵.

利用飞秒激光对玻璃中活性离子进行空间有选择性价态操作,可实现超高密度的三维光存储。比起一般用飞秒激光诱导折射率变化进行存储的技术<sup>[9]</sup>来讲,由于可以利用活性离子在不同价态的发光谱不同,信噪比更高,并且可用普通的半导体激光器作为存储数据读出的激发源。最近,我们演示了利用飞秒激光照射后玻璃中的  $\text{Sm}^{3+}$  的还原进行超高密度的三维光存储<sup>[10]</sup>。用共焦点激光显微系统,采用飞秒激光将数据存入后,利用 488nm 的  $\text{Ar}^+$  离子激光抽运产生的  $\text{Sm}^{2+}$  的 682nm 的发光,读取存储的信息。单个存储单元的尺度可小于 200nm。如图 1 所示,当飞秒激光照射过的地方经 514nm 的  $\text{Ar}^+$  激光连续照射后,  $\text{Sm}^{2+}$  重新失去电子成为  $\text{Sm}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{2+}$  发光不再能被观察到。使用飞秒激光照射后,  $\text{Sm}^{3+}$  又被还原成  $\text{Sm}^{2+}$ 。这一现象为发展可擦重写式光存储提供了新的思路。再者,我们发现了飞秒激光照射还原部分的室温光谱烧孔现象。飞秒激光还原的部分用线宽很窄的染料激光照射,发现在  $\text{Sm}^{2+}$  的  ${}^5\text{D}_0 - {}^7\text{F}_2$  对应激发光谱中,在采用的染料激光的波长处形成了一个(光谱)孔。这意味着每个激光聚焦形成的空间上的一个小点里可以通过调节染料激光的波长,将信息以光谱孔的形式存储在光谱中,实现在空间和波长轴上的超高密度的光存储。

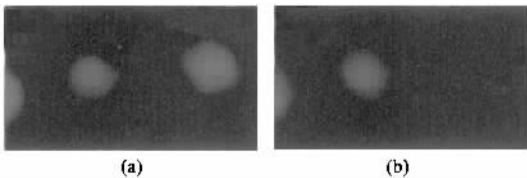


图 1 利用飞秒激光诱导  $\text{Sm}^{3+} \rightarrow \text{Sm}^{2+}$  的可擦重写的超高密度三维光存储

- (a) 飞秒激光记录, 488nm 的  $\text{Ar}^+$  激光读取;  
(b) 飞秒激光记录, 514nm 的  $\text{Ar}^+$  激光擦除, 再用 488nm 的  $\text{Ar}^+$  激光读取

利用飞秒激光诱导的折射率变化,通过扫描飞秒激光焦点位置,可以在玻璃内部形成一条线。研究表明,扫描线可起单模或多模光波导作用(见图 2),光波导的芯径、折射率分布可通过激光功率密度、脉宽、重复扫描次数等进行调控。利用这种方法,已在石英玻璃、氟化物玻璃、硫系玻璃等材料中成功地写入了光波导<sup>[3]</sup>。我们在有源器件(如波导放大器和波导型激光器)方面也进行了尝试,在玻璃中形成光波导阵列、Y 字形波分复用光波导、Damann 光栅、微透镜等。

比起已有的制备光波导的气相沉积法和离子交

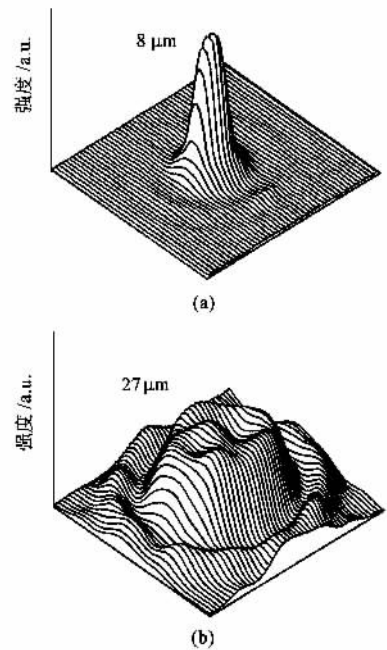


图 2 玻璃内部由飞秒激光诱导光波导的波导模式  
(a) 单模 (b) 多模

换法等,这种方法受材料组分的限制小,并且工艺简单,可进行光功能的三维光学合成,因此是一种崭新的、很有前景的方法。

最近我们通过飞秒激光照射和后续的热处理,实现了有空间选择性的功能纳米颗粒的析出和控制。图 3(a)是用飞秒激光照射在掺  $\text{Au}^+$  离子的硅酸盐玻璃中雕入的图像。图 3(b)是飞秒激光照射后再在  $550^\circ\text{C}$  下热处理 1 小时的图像。飞秒激光照射后,激光焦点附近成灰色,其起源于色心的形成。当在  $300^\circ\text{C}$  以下热处理时,灰色逐渐褪去变成无色透明。再在  $500^\circ\text{C}$  以上热处理,飞秒激光照射过的地方呈红色。吸收光谱、透射电镜观察表明,飞秒激光照射和热处理后,玻璃中析出了金的纳米颗粒。红色是由于金的纳米颗粒的表面等离子体吸收所致。用 365nm 紫外光激发时,单纯飞秒激光照射过的部分与纳米金颗粒析出的部分的发光不同。再者通过改变照射条件,可控制析出的金纳米颗粒的尺寸分布。我们实现了一块玻璃内部 3 种以上的着色,并且确证了利用这一技术可构筑、可集成的具有超快响应的全光开关。我们还实现了感光玻璃的三维打孔<sup>[14]</sup>。这种感光玻璃中含有的少量  $\text{Ag}^+$  和  $\text{Ce}^{3+}$  离子,在紫外光照射下,产生光氧化还原反应:  $\text{Ag}^+ + \text{Ce}^{3+} \rightarrow \text{Ag} + \text{Ce}^{4+}$ 。然后在一定的热处理温度下,还原产生  $\text{Ag}$  原子团聚,形成胶粒。 $\text{Ag}$  胶粒起晶核的作用,即紫外光照射部位容易析出晶体。因析晶部位与

未析晶部位在氢氟酸中的溶解速度不同,故可将晶化部分选择性地溶出.利用这一现象,制成了光纤耦合器等精密微器件.如前所述,红外的飞秒激光也具有紫外光同样的功能,并且其空间选择性更好.我们通过飞秒激光聚焦照射、热处理和酸蚀,实现了玻璃中的三维打孔.利用飞秒激光具有高度空间选择性析晶、折射率变化、打孔等功能,可望在微机械元件、微分析系统、具有完全带隙结构的光子晶体的制备方面得到应用.

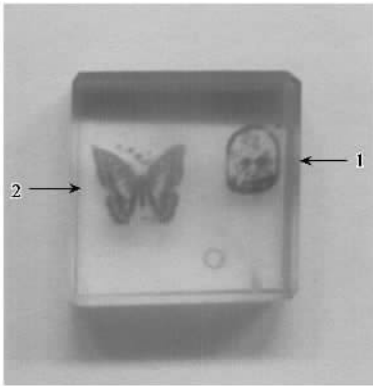


图3  $\text{Au}^+$  掺杂硅酸盐玻璃

(1 为飞秒激光照射后的图像,2 为飞秒激光照射及  $550^\circ\text{C}$  热处理 1 小时后的图像)

1999 年,我们提出了利用飞秒激光的线性、非线性干涉场、复合场与材料的非线性相互作用高效率制备光子功能微结构材料的方案,并开始了系统探索.最近, Kawamura 等<sup>[17]</sup>利用飞秒激光的线性干涉场施加到石英玻璃等透明材料表面,单个脉冲的作用可形成一个具有几百纳米周期的微光栅.我们利用飞秒激光的干涉场,实现了在透明介质内部写入微光栅,并获得了高达 90% 的衍射效率<sup>[19]</sup>.利用激光的基频和倍频形成的非线性相干场对玻璃进行全光极化,实现了 2 次非线性功能转换,并通过优化玻璃材料组成,我们实现了大而稳定的 2 次非线性转换效率<sup>[20]</sup>.另外,当用飞秒激光照射稀土掺杂玻璃及石英玻璃时,观察到了飞秒激光诱导的具有记忆特性的偏光依存光散射现象<sup>[21]</sup>.利用该现象可望制备偏光依存的微光学器件.最近我们观察到在飞秒激光诱导的微米尺度的小斑点里存在偏光依存的约 180nm 尺度大小的显微光栅结构(图 4),这种结构可用来解释偏光依存光散射现象.通过理论计算,我们认为这种结构是由于激光与激光诱导的等离子体的干涉与物质的非线性相互作用的结果.进一步的研究还在进行中.

目前国际上对飞秒激光超精细加工方面的研究

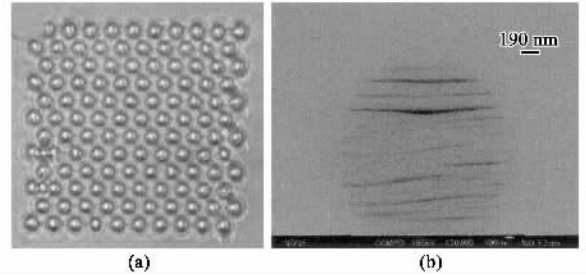


图4 飞秒激光写入  $\text{SiO}_2$  玻璃中的折射率变化斑点的光学显微镜 (a) 和背散射电子显微镜 (b) 照片

可以说是热火朝天.德国 Hannover 激光中心的研究重点放在金属和玻璃等的表面烧蚀加工(包括打孔、切割和表面凹凸图案形成)方面<sup>[22]</sup>,已经在不锈钢上打出陡峭的直径为  $100\mu\text{m}$ 、深度为  $500\mu\text{m}$  的深孔.另外在镍、钨等金属薄板、 $\text{Fe}_{79}\text{B}_{16}\text{Si}_5$  金属玻璃、硅、金刚石等非金属基板表面上刻蚀了微米级的精细图案,表明飞秒激光可用于各种材料的精细加工.这项技术已应用于汽车零部件的加工.哈佛大学的 Mazur 小组在继日本三泽的发现后观测到飞秒激光照射到各种透明材料形成的亚微米级的小孔,提出了这种现象用于三维只读型光存储的可能性<sup>[9]</sup>,并且他们提出了已得到普遍接受的用来解释小孔形成机制的微爆炸理论.康奈尔大学的 Gaeta 小组首次利用飞秒激光探讨了在石英玻璃及掺杂玻璃中形成分波及光耦合器的可能性,并演示了分波功能<sup>[12]</sup>.日本大阪大学的伊东小组发现,当在飞秒激光行进的方向将飞秒激光聚焦照射到由飞秒激光照射形成的小孔背后附近,小孔会向后产生移动<sup>[23]</sup>,即原先形成的小孔被填充,而在新的激光焦点处形成了一个小孔.这一现象的机理尚在探讨中.但可以想象,在激光聚焦照射到玻璃内部后,局部产生了高温高压,在空洞附近加热的部分玻璃受激光辐射压(沿光传播方向)的作用被挤压到空洞中,于是在形成新的空洞的同时,原先的空洞就被填充.

Song 等利用飞秒激光形成的亚微米级空洞尝试了进行三维光子晶体的制作.他们在掺 10mol%  $\text{GeO}_2$  的石英玻璃中,通过飞秒激光聚焦照射,在沿激光光轴的垂直方向形成了宽度为  $40\mu\text{m} \times 40\mu\text{m}$ ,而在光轴方向层积了 7 层具有面心立方 fcc(111) 面点阵分布结构的光子晶体<sup>[15]</sup>.研究表明,飞秒激光照射形成的结构在透过光谱上观察不到光子晶体的带隙结构产生的峰.在  $900^\circ\text{C}$  热处理 1 小时后,在  $3500\text{cm}^{-1}$  观察到了“吸收”峰,并且实际测得的波数与通过计算得到的结果基本一致.他们还尝试了在

玻璃中形成具有金刚石型结构的光子晶体,但至今未能实现具有完全带隙结构的光子晶体,原因在于玻璃与空气的折射率差太小以及结构单元误差太大.另外微爆炸所形成的结构一般具有中间折射率小(接近1)周边折射率大的这样一种复合结构.在考虑小孔排列形成的光子晶体结构时,需要考虑这种结构的等价折射率差,而不是单纯的玻璃与空气的折射率差.

利用飞秒激光与光硬化胶的相互作用形成三维超精细微结构的研究最近成为一个热点.将聚焦的红外或可见的飞秒激光聚焦照射在紫外波长区域具有吸收的光硬化胶,通过双光子吸收诱导光聚合可以形成齿轮、弹簧、机器人等超微型机械部件.这方面的研究早在上个世纪90年代就开始了.它之所以再度引人注目,是由于 Kawata 等人在 Nature 上发表了利用这个方法制造了号称世界上最小的公牛<sup>[24]</sup>.也有用这种方法制造光子晶体的.但由于受到光硬化胶材料本身的限制,这个方法今后将主要用于做三维锥形模,以最终获得掺杂了活性离子或功能基团的、用其他材料作为基体的三维微结构功能材料.

除中国科学院上海光学精密机械研究所外,我国的许多研究机构包括北京大学物理系、中国科学院西安光学精密机械研究所、长春物理与光学精密机械研究所等也开展了飞秒激光诱导材料内部三维功能微结构方面的研究,并且在三维光存储、多光子光聚合制作微光学器件方面取得了一定的进展.特别是北京大学物理系在飞秒激光诱导微结构的理论解析方面的成果引人注目.

### 3 未来的发展

现今飞秒激光已发展成为只要按一下按钮,通过计算机输入几个数据就可以获得所需波长和脉宽的激光束.但飞秒激光在稳定性、可靠性和价格方面还有待进一步改善.尽管如此,飞秒激光所具有的超短脉冲、超高强度以及与介质的高度空间选择性的非线性光学效应的特点及其在新型光功能材料和相关器件制备领域中的独特作用,已越来越被人们所认识和关注.可以预见,利用飞秒激光进行材料的结构改性与修饰,将在光开关、波分复用、波导型有源器件、光子晶体、微光栅等微光学器件制备及其光学集成领域大显身手.

迄今为止,人们在飞秒激光诱导微结构方面已做了大量的工作.今后飞秒激光诱导微结构研究的

重点将在深度和广度上进一步向前推进:

(1)在进一步理解飞秒激光与物质相互作用的基础上建立相应的模型,半定量和定量地解释飞秒激光与物质相互作用的规律和动力学过程,包括群速度色散、自相位调制、多光子吸收、多光子电离、白光产生、自聚焦和自散焦、杂质的影响、等离子体形成、光子与等离子体的相互作用、电子与孔穴捕获过程、电子与声子耦合、局域高温高压形成、冲击波及激光辐射压的影响等.

(2)在微结构形成方面需要研究的是进一步理解飞秒激光精细加工的特点与极限制作,譬如对于给定材料究竟能打多小多深的孔.从根本上理解飞秒激光照射条件(如波长、波宽、脉宽、偏振、激光模式、脉冲频率、激光功率密度、照射时间、扫描速度、扫描次数等)对诱导结构的影响.

近来飞秒激光已开始应用于包括物理、化学等在内的基础科学,应用于工程学、医学、生命科学、环境科学、能源科学甚至宇宙科学.其发展迅猛之势可以与激光诞生后光科技飞速的发展相比拟.具有超高速、超强电磁场的飞秒激光的发展将进一步拓展我们对微观世界和浩瀚宇宙的认识.

有关飞秒激光超精细加工方面,当今国际上正出现你追我赶的局面.美国、日本、德国相继启动了飞秒激光与物质相互作用方面的国家级项目.如何抓住这一契机,联合我国在超强超快激光研究方面的优势力量,发挥已有的知识和经验的积累,迎头赶上,并有所侧重,在某些领域有所突破,有所作为,已成为当务之急.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Stuart B C, Feit M D, Rubenchi A M *et al.* Phys. Rev. Lett., 1995, 74 : 2248
- [ 2 ] Davis K M, Miura K, Sugimoto N *et al.* Opt. Lett., 1996, 21 : 1729
- [ 3 ] Miura K, Qiu J, Inouye H *et al.* Appl. Phys. Lett., 1997, 71 : 3329
- [ 4 ] Chickov B N, Momma C, Nolte S. Appl. Phys. A, 1996, 63 : 109
- [ 5 ] Qiu J, Miura K, Hirao K. Jpn. J. Appl. Phys., 1998, 37 : 2263
- [ 6 ] Qiu J, Zhu C, Nakaya T *et al.* Appl. Phys. Lett., 2001, 79 : 3567
- [ 7 ] Qiu J, Miura K, Suzuki T *et al.* Appl. Phys. Lett., 1999, 74 : 10
- [ 8 ] Qiu J, Miura K, Nouchi K *et al.* Solid State Commun., 2000, 113 : 341

- [ 9 ] Glezer E N , Milosavljevic M , Huang L *et al.* Opt. Lett. , 1996 , 21 : 2023
- [ 10 ] Miura K , Qiu J , Fujiwara S *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2002 , 80 : 2263
- [ 11 ] Qiu J , Kojima K , Miura K *et al.* Opt. Lett. , 1999 , 24 : 786
- [ 12 ] Homoelle D , Wielandy S , Gaeta A L *et al.* Opt. Lett. , 1999 , 24 : 1311
- [ 13 ] Miura K , Qiu J , Mitsuyu T *et al.* Opt. Lett. , 2000 , 25 : 341
- [ 14 ] Kondo Y , Qiu J , Mitsuyu T *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. , 1999 , 38 : L1146
- [ 15 ] Sun H B , Xu Y , Juodkasis S *et al.* Opt. Lett. , 2001 , 26 : 325
- [ 16 ] Qiu J , Ceram J. Soc. Jpn. , 2001 , 109 : S25
- [ 17 ] Kawamura K , Sarukura N , Hirano M *et al.* Appl. Phys. , 2000 , 39 : 2767
- [ 18 ] Misawa H. Japanese Patent Application No. 023614( 1995 ) ; Electrics Weekly , News Page , 1995
- [ 19 ] Si J , Qiu J , Zhai J *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2002 , 80 : 359
- [ 20 ] Qiu J , Si J , Hirao K. Opt. Lett. , 2001 , 26 : 914
- [ 21 ] Qiu J , Kazanski P , Si J *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2000 , 77 : 1940
- [ 22 ] Ostendorf A. Laser Rev. , 2002 , 30 : 221
- [ 23 ] Watanabe W , Toma T , Yamada K *et al.* Opt. Lett. , 2000 , 25 : 1669
- [ 24 ] Kawata S , Song H B , Tanaka T *et al.* Nature , 2001 , 412 : 697



· 书评和书讯 ·

评介《半导体光谱和光学性质》一书(第2版)

(沈学础著 科学出版社出版)

于 鑫

(美国加利福尼亚大学物理系, Berkeley, CA94720 U. S. A)

这是一本由一位令人敬重的中国学者撰写的光学性质方面的经典著作. 其第一版是 1992 年问世的, 有里程碑标志意义, 是第一本有关半导体光学性质的论著. 其写作定位的读者群是相关科学和技术领域内的研究生和科研工作者. 当时论著已涉猎了多方面的丰富内容, 但其中仅有一章讨论量子阱光学性质(该领域的最新研究成就, 译者注补). 书的印刷质量按西方的标准看来是相当差的, 书的后面缺少主题索引.

在第二版中作者对第一版的论述内容作了极其重要的( significantly )拓展. 新增加了一章, 并在其他各章中新添加了若干小节. 例如, 在第一章中增添了关于光学常数实验测量一节; 在第七章中增加了两节内容, 其中一节是关于半导体中浅杂质磁光性质(另一节是关于低维电子回旋共振及相关磁光性质, 译者注补). 新增加的第十章涵盖了量子线和量子点光谱最新研究结果的论述. 除了这些新增加的内容外, 第二版还有不少重要的改变, 如参考文献不再像第一版那样统统安排在书后, 而是按引用次序放置在每一章的后面; 新添加的主题索引可以使读者方便地查找到感兴趣的内容. 在作了以上这些重大而深刻广泛的修改增补后, 为了更好地反映新版书的内容, 作者将第一版的半导体光学性质更名为现在的半导体光谱和光学性质. 书的容量增加到

了 770 页, 而每一页的尺寸也比前增加了约 40%. 考虑到中文字句比英文词句紧凑, 如果用英文表达这本书的内容, 估计定会超过 1000 页. 这样, 该书在半导体线性光学性质方面的选题和丰富的内容, 无论与目前有关中文书籍, 还是英文书籍比较, 都有自己明显特色, 许多地方是前所未有的( unparalleled ).

该书以实验作为其坚实的基础, 对工作在材料(不限于半导体)光学性质领域的实验工作者来说, 是一本非常有用的手册和工具书. 这不仅因为书中详尽深刻地描述了各类实验技术和实验结果, 更有许多有关公式及物理过程的仔细推导. 书中还包括了通常专门的理论书籍中作为读者练习用的公式推导. 因此, 该书对于需要了解实验结果以及材料参数的理论工作者来说, 也是一本极好的参考书.

总之, 这是一本扩充和更新了许多内容的最新版本, 对从事半导体光学性质这一重要领域内的实验和理论工作者都极有裨益. 从涵盖半导体线性光学性质的广度和深度上看, 可以说该书是独一无二的( unique ). 唯一希望改进之处是, 请作者斟酌书中引用参考文献的选取, 以便帮助读者更易于从原始文章获取到所需要的更多信息, 因而使本书发挥甚至更大的参考价值.