

## 从光栅衍射到现代纳米晶体观测技术

胡泊 孙祖尧 崔凤全

(上海海事大学文理学院物理教研室, 上海 201306)

**摘要** 本文从工科大学学生现有的光学物理基础知识出发, 拓展了大学物理教学内容, 逐渐深入介绍现代科研纳米观测技术、X 射线衍射以及电子衍射。以开阔大学物理教师的视野为目的, 为大学物理教师更好地理解电子衍射和 X 射线衍射提供帮助, 利于教师在工科大学学生现有物理基础上讲解现代科研技术, 把前沿科学引入教学, 把最新科技知识传授给学生, 也可以实现教学与科研相长, 培养学生的科学素养, 以此让学生认识到基础物理学习的重要性, 认识到大学物理是前沿科学研究和工程技术的基础, 从而提高学生学习大学物理的兴趣。

**关键词** 光栅衍射; X 射线衍射; 电子衍射; 纳米技术

## UNDERSTAND THE NANOMETER OBSERVATION TECHNOLOGY BY BASIC OPTICAL KNOWLEDGE OF GRATING DIFFRACTION

HU Bo SUN Zuyao CUI Fengquan

(Department of Physics, Arts and Sciences College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306)

**Abstract** Based on the basic knowledge of optical physics obtained by engineering college students, the nanometer observation technology X ray diffraction and electron diffraction were gradually introduced in our paper to expand the content of university physics. Introducing the nanometer observation technology will broad the view of university teachers and help them to understand the modern scientific research technology X ray diffraction and electron diffraction. It is beneficial for teachers to introduce the frontier science into teaching and impart the latest science and technology knowledge to the engineering students based on their current physics basis, which can cultivate students' scientific literacy and make them realize importance of learning basic physics. Help students to understand that the college physics is the foundation of frontier research and engineering technology, so as to improve students' interest in studying college physics.

**Key words** grating diffraction; X ray diffraction; electron diffraction; nanometer technology

工科院校开设的大学物理, 多为基础课和通识课, 其目的是为了让学生了解掌握物理基本知识, 为以后专业知识的学习打下基础。为了更好地拓展学生的视野和丰富教学思路, 很多人提出

了各种新方法<sup>[1-4]</sup>。有人提出“以科研促进教学, 以教学带动科研”的教学思路<sup>[5]</sup>, 把教学与当前学科的最新科学技术研究进展联系起来, 让大学物理基础性知识和正在进行的对未知探求的前沿

收稿日期: 2017-10-27; 修回日期: 2017-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(11647024)。

作者简介: 胡泊, 女, 讲师, 主要从事物理教学科研工作, 研究方向为凝聚态物理纳米材料, hubo@shmtu.edu.cn。

引文格式: 胡泊, 孙祖尧, 崔凤全. 从光栅衍射到现代纳米晶体观测技术[J]. 物理与工程, 2018, 28(4): 113-118.

科学融会贯通使学生对科技产生兴趣,从而体会到大学物理基础学科的重要性。本文将从基础光学衍射光栅出发逐渐深入探究超薄晶体薄膜测量技术,分析其衍射原理,重点介绍电子衍射和 X 射线衍射为何是镜面反射式衍射,并列举说明科研中 X 射线常见的缺级以及电子衍射斑点图像解析,以方便大学教师为工科学生在大学物理学习的基础上扩展讲授前沿的纳米科技探测手段。

## 1 纳米测量技术原理

随着电子技术的发展,电子器件开始朝着小型化、微型化发展。纳米电子器件一般在单晶基片上生长多种纳米薄膜,然后利用各种刻蚀技术处理成尺寸为纳米量级的器件。纳米薄膜的生长质量与结构严重影响着纳米器件的功能,探究晶体的结构和外延薄膜的质量就很重要。对于纳米晶体和薄膜来说它们都是由原子的规则排列组成,如图 1 所示。晶格原子规则排列类似于光栅常数较小的三维立体光栅,我们可以通过衍射的方法来探究晶格原子间距以及周期性特点。衍射光栅是工科学生在大学物理学习中的重点内容<sup>[6]</sup>,由于光栅狭缝的尺寸比拟于可见光的波长,符合光的衍射定律就会在光屏上形成衍射谱线。平行光垂直入射光栅其谱线的位置满足光栅方程:  $(a+b)\sin\theta = \pm n\lambda$ ,  $n=0,1,2,\dots$ 。式中  $a$  代表狭缝宽度;  $b$  代表障碍物宽度;  $a+b$  称作光栅常数;  $\theta$  为衍射角代表条纹位置;  $n$  为明条纹级数;  $\lambda$  为波长。另考虑单缝衍射,若同时满足光栅方程和单缝衍射暗纹方程  $a\sin\theta = n'\lambda$ ,则光栅的衍射条纹会出现缺级。可根据对应的衍射谱线计算光栅常数的值,使得光栅具有光谱分析等的作用。

由大学物理知识可知,可见光波长与衍射光栅狭缝的尺寸可比拟时产生衍射现象。对于由周期性排列的原子组成的长程有序晶体来说,能产生衍射效应的不再是可见光,而是与原子间距量级相当的波长较短的射线。现代纳米测量技术测量晶体以及薄膜结构最常用的波是 X 射线以及电子物质波,从电磁波谱上可以看出 X 射线波长靠近原子间距<sup>[7,8]</sup>。从波粒二象性学说上看,粒子具有波动性,其波长  $\lambda$  与动量  $p$  之间的关系满足公式:  $p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$ , 式中,  $h$  为普朗克常数;  $\nu$  为波

动频率;  $\lambda$  为粒子波波长;  $E$  为粒子动能。假设电子在电压为  $U$  的电场下从初速为零加速运动可得到速度  $v$ , 则  $eU = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m}$ , 所以  $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2meU}}$ , 式中,  $e$  为电子电荷;  $m$  为电子质量。当加速电压  $U$  不太高,  $v \ll c$  ( $c$  为真空中光速) 时,  $m$  为电子的静止质量。将  $h, e$  和  $m$  各值代入上式, 可得  $\lambda = \frac{1.225}{\sqrt{U}}$ , 这就是德布罗意公式<sup>[9]</sup>。该式中

加速电压  $U$  的单位为 V, 电子波波长  $\lambda$  的单位为 nm。当电子的加速电压为 1kV, 根据德布罗意公式可以得到电子束的波长  $\lambda = 0.03866\text{nm}$ 。也就是加速电子可以获得比拟原子间距的物质波。电子波也可作为一种波, 在晶体原子间产生衍射和干涉现象。现在介绍当 X 射线和电子物质波入射到原子周期排列的块状晶体或者纳米薄膜上时, 发生衍射的原理。相对于一维光栅, 其衍射图样为明暗条纹, 晶体的原子排列为二维或三维周期性的复杂光栅, 其衍射图样为斑点, 分析其衍射原理可能会更复杂一些。

### 1) 布拉格方程

图 1 给出原子二维周期排列的晶体, 让一束平行波  $S_0$  入射时, 因为原子对电子的散射而产生平行出射波  $S$  ( $S_0$  和  $S$  为单位方向波矢), 我们选取  $O$  为坐标原点,  $a, b$  代表原子周期性排列结构, 取

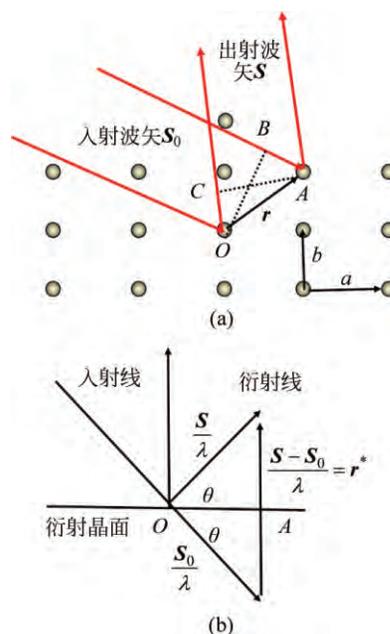


图 1 (a) 二维晶体衍射示意图; (b) 布拉格方程的矢量形式

任意一个原子  $A$  其位置矢量可以用  $r = n_1 a + n_2 b$  表示。根据大学物理中学习到处处理光学光程差的方法, 我们可以得到两束波的波程差  $\Delta = \overline{OC} - \overline{AB}$ , 其中  $\overline{OC} = r \cdot S$ ,  $\overline{AB} = r \cdot S_0$ , 可得  $\Delta = r \cdot (S - S_0)$ 。当波程差等于波长的整数倍时发生衍射,  $\Delta = r \cdot (S - S_0) = n\lambda$  即  $r \cdot (S/\lambda - S_0/\lambda) = n$ ,  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ 。扩展到三维空间  $r = n_1 a + n_2 b + n_3 c$ , 同样满足上述公式, 其 3 个方向满足  $a \cdot (S/\lambda - S_0/\lambda) = H, b \cdot (S/\lambda - S_0/\lambda) = K, c \cdot (S/\lambda - S_0/\lambda) = L$ , 其中  $H, K, L$  为整数。为了更好地解 3 个矢量方程, 引入倒易矢量  $r^* = Ha^* + Kb^* + Lc^*$  其中  $a \cdot a^* = 1, b \cdot b^* = 1, c \cdot c^* = 1, b \cdot a^* = c \cdot a^* = a \cdot b^* = c \cdot b^* = a \cdot c^* = b \cdot c^* = 0$ , 代入上述 3 式可化为  $(S/\lambda - S_0/\lambda) = r^* = Ha^* + Kb^* + Lc^*$ , 波矢量差正好为倒易矢量。当选  $[HKL]$  为衍射晶面时(由  $a/H, b/K, c/L$  3 矢量终点连接形成的面), 图像可简化为图 1(b) 所示。由于  $r^*$  方向垂直于衍射晶面,  $S - S_0 = \lambda r^*$  也垂直于衍射晶面, 对于上述等腰三角形只有当入射角等于出射角时才满足。

从上述推导过程来看, 当入射波照射到晶体衍射晶面时, 只有满足入射角和衍射角相等时才会出现衍射斑点。这种情况不同于我们学习的光栅衍射(衍射方向可以任意), 晶体衍射由此可借用镜面反射规律来描述射线的衍射几何<sup>[10,11]</sup>, 其分析波程差的方法类似于薄膜干涉而非光栅衍射。如图 2(a) 所示为衍射晶面是一系列平行排列的晶面, 晶面间隔距离为  $d$ 。波长为  $\lambda$  的射线被晶面上两原子  $A, B$  散射, 入射角和衍射角相等, 入射束在  $P, R$  处相位相同, 两散射线波程差  $\delta = (\overline{PA} + \overline{AP'}) - (\overline{RB} + \overline{BR'}) = \overline{AB} \cos \theta - \overline{AB} \cos \theta = 0$ , 此时干涉加强发生衍射。当射线穿入晶体多层原子面时, 如图 2(b), 对相邻两层原子  $A, A'$  来说, 波程差  $\delta = \overline{CA'} + \overline{BA'} = 2d \sin \theta$ 。若得到衍射斑点为亮纹, 需满足光程差  $\delta = 2d \sin \theta = n\lambda, n = 1, 2, \dots$  此式为布拉格方程<sup>[12]</sup>。

### 2) 衍射条件图解法——厄瓦尔德图解

据布拉格方程, 厄瓦尔德提出衍射条件的图解法, 用该方法可以方便直观地得到衍射点阵。作图方法如图 3, 沿入射线方向作长度  $1/\lambda$  的矢量  $S_0/\lambda$ , 矢量末端落在原点  $O$ 。以该矢量的起点  $C$  为中心, 以  $1/\lambda$  为半径作反射球, 凡是与反射球面相

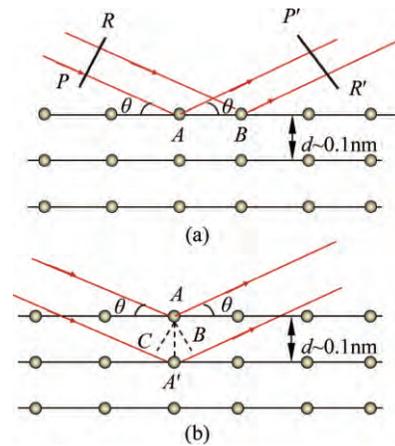


图 2 晶格衍射原理示意图

(a) 同一晶面原子间; (b) 相邻晶面原子间

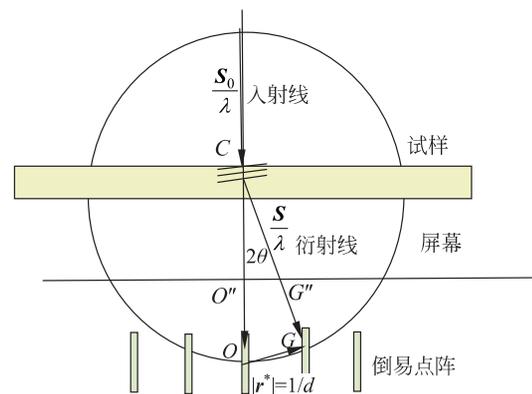


图 3 厄瓦尔德球图解示意图

交的点阵( $\overline{OG} = |r^*| = 1/d$ )都能满足衍射条件而产生衍射。可投影在底板或者演示屏, 显示斑点或收集到电子信号( $O', G''$ ), 由相似三角形可知  $\overline{O'G''} = R\lambda \overline{OG}$ ,  $R$  为显示屏半径。收集到的斑点之间的距离与晶面间距成反比, 即实际观察到的斑点反映了晶体的倒易点阵结构, 这也是前期推导时为何要引入倒易矢量的原因所在。根据倒易点阵和晶格原子排列之间的关系, 可以推测出实空间原子的层间距以及结构。

### 3) 系统消光——几何结构因子

晶体有一定的晶格结构, 原子的周期性规则排列也有其一定的规律, 但作为组成晶体的最简单的周期性单元——单胞, 单胞内不仅只有一个原子, 晶体内部原子的排列也不仅按一种规律, 原子位置的不同会对电子或者射线的散射出现差异。测量技术上得到的信号一般是所有原子散射后的干涉叠加。这种原理与衍射光栅中光谱出现缺级现象有相似之处, 缺级是因为单个狭缝里面

许多光线之间有相位差,它们相互叠加形成单缝衍射,单缝衍射加上多缝干涉从而出现缺级。对于晶体衍射也会因为单胞内有多位置不同的原子而出现相位差,这些不同位置原子散射的叠加也会出现消光。设单胞中含有  $n$  个原子,各个原子占据不同的坐标位置,它们的散射振幅和相位各不相同。单胞中所有的原子散射(单胞相干散射)的合成振幅并不是简单的单个散射相加。我们引入一个结构因子  $F_{HKL}$  的参量来表征单胞相干散射与单个电子散射间的关系<sup>[13]</sup>

$$F_{HKL} = \frac{A_b}{A_e}$$

其中,  $A_e$  表示一个电子散射的相干散射振幅;  $A_b$  表示一个单胞内所有原子散射的相干散射振幅。如图 4 所示,  $O$  为晶胞的一个顶点,同时取为坐标原点,  $A$  为晶胞中任一个原子  $j$ , 其中位置矢量  $r_j = x_j a + y_j b + z_j c$ , 式中  $a, b, c$  为晶胞的单位方向矢量。  $A, O$  两处原子散射波波程差为:  $\Delta_j = \overline{OQ} - \overline{PA} = r_j \cdot s - r_j \cdot s_0 = r_j \cdot (s - s_0)$ , 其相位差为

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_j &= \frac{2\pi}{\lambda} \Delta_j = 2\pi r_j \cdot \frac{(s - s_0)}{\lambda} = 2\pi r_j \cdot r^* \\ &= 2\pi(x_j a + y_j b + z_j c)(H a^* + K b^* + L c^*) \\ &= 2\pi(x_j H + y_j K + z_j L) \end{aligned}$$

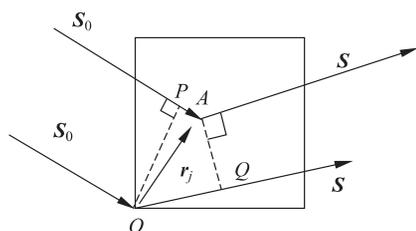


图 4 单胞内两个原子的相干散射

设晶胞内各原子的原子散射因子分别为  $f_1, f_2, f_3, \dots, f_j, \dots, f_n$ , 各原子散射波长与入射波的相位差分别为  $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \Delta\varphi_3, \dots, \Delta\varphi_j, \dots, \Delta\varphi_n$  则所有原子干涉散射的复合波振幅为

$$A_b = A_e (f_1 e^{i\Delta\varphi_1} + f_2 e^{i\Delta\varphi_2} + \dots + f_j e^{i\Delta\varphi_j} + \dots + f_n e^{i\Delta\varphi_n})$$

结构因子  $F_{HKL} = \frac{A_b}{A_e} = \sum_{j=1}^n f_j e^{2\pi i(Hx_j + Ky_j + Lz_j)}$ , 根据欧拉公式  $e^{i\varphi} = \cos\varphi + i\sin\varphi$

$$F_{HKL} = \sum_{j=1}^n f_j [\cos 2\pi(Hx_j + Ky_j + Lz_j) + i\sin 2\pi(Hx_j + Ky_j + Lz_j)] \quad (1)$$

衍射强度正比于散射振幅的平方,故求  $F_{HKL}^2$ , 可由结构因子乘以其复共轭求得。

## 2 纳米测量技术实例

对于电子器件的基片 Si 单晶来说我们可以用 X 射线衍射(XRD)测量其结构。根据布拉格方程  $2d\sin\theta = n\lambda, n=1, 2, \dots$ , X 射线入射到晶体表面,收集一定角度范围的衍射信号,对于满足该方程的衍射角会出现信号极大值。考虑到 Si 的晶格为金刚石结构,单胞中有 8 个同类原子,坐标为  $000, \frac{1}{2} \frac{1}{2} 0, \frac{1}{2} 0 \frac{1}{2}, 0 \frac{1}{2} \frac{1}{2}, \frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}, \frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4}, \frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4}, \frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4}$ 。根据式(1)计算可得出原子散射结构因子为

$$F_{HKL}^2 = 2f_a [1 + \cos\pi(H + K) + \cos\pi(L + K) + \cos\pi(H + L)] \left[ 1 + \cos \frac{\pi}{2}(H + K + L) \right]$$

以 Si(001)面的晶体基片为例,根据上式(HKL)为(001)时结构因子为零,不会出现衍射峰,2 级衍射面(HKL)为(002)时,结构因子同样为零,3 级衍射时同样结构因子为零,所以对 Si(001)面的晶体基片测量时只有(004) 4 级衍射峰,如图 5 所示。

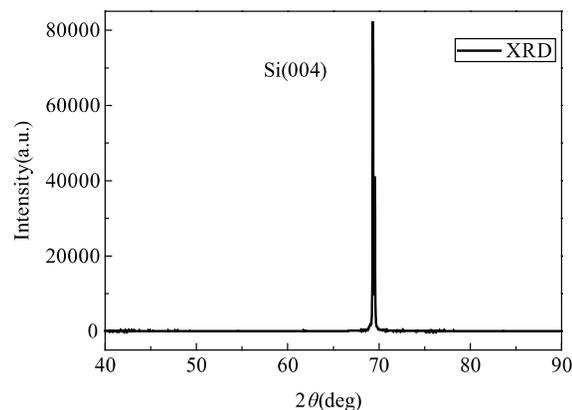


图 5 Si 单晶 XRD 衍射

对于测量纳米器件上的薄膜时,因 X 射线穿透性强,很难探测表面薄膜信号,一般采用电子衍射。由于晶体原子对电子束的散射能力要大于原子对 X 射线的散射能力数万倍之多,因而电子穿透性相对于 X 射线来说很差。常用的电子衍射有两种形式,一种是低能电子衍射(LEED),电子的

能量为  $10\sim 500\text{eV}$ , 由于电子能量较低, 一般垂直入射, 衍射结果只能显示样品晶面  $1\sim 5$  原子层的结构信息, 常用于分析晶体表面结构、表面吸附、外延生长、表面处理等领域。另外一种为高能电子衍射(RHEED), 入射电子能量  $10\sim 200\text{keV}$ , 高能量使电子波的波长小, 对应远紫外波段, 由布拉格方程可知对应的衍射角  $\theta$  也很小, 一般只有几度。如此小的衍射角根据图 2 可知, 入射电子束和衍射电子束几乎平行于衍射晶面为掠入射。小能量或者小角度掠入射加上强烈的散射效应使得电子束穿入晶体内部的能力大大减弱。相对于 X 射线可以探究块状晶体内部结构, 电子衍射则适于纳米薄膜样品或材料表层的结构分析<sup>[14]</sup>, 这对于现代纳米技术和表面科学的发展至关重要。

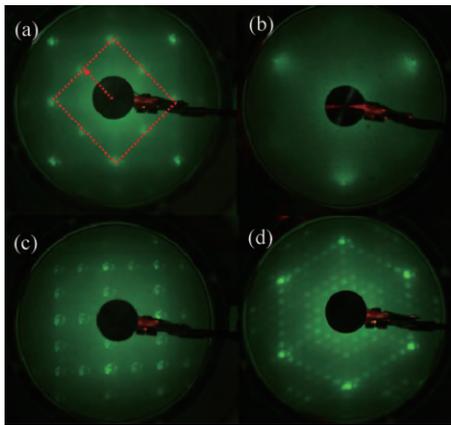


图 6 低能电子衍射图

(a) 2 原子层  $\text{CoSi}_2(001)$  纳米结晶薄膜; (b) 2nm  $\text{Fe}(111)$  薄膜;  
(c)  $\text{Si}(001)$  表面  $2\times 2$  重构; (d)  $\text{Si}(111)$  表面  $7\times 7$  重构

例如, 利用低能电子衍射可以探究薄到纳米量级甚至几个原子层厚度的薄膜结构, 本课题组利用低能电子衍射探测在硅衬底上外延生长两个原子层厚度  $\text{CoSi}_2$  单晶薄膜, 给出电子能量  $E=40\text{eV}$  的 LEED 图 6(a)<sup>[15]</sup>, 以及外延生长的 2 nm  $\text{Fe}$  金属薄膜图 6(b)<sup>[16]</sup>。从其规则排列清晰的衍射倒易点阵中, 我们可以判定  $\text{CoSi}_2$  为结晶质量很好的单晶薄膜, 从图 6(a) 还可以看出点阵排列成正方形  $C(2\times 2)$  结构(白色方框虚线标识), 表明薄膜实空间原子排列为立方结构。由显示屏中点阵距离(白色虚线边框一半长度)  $\overline{OG}'' = R\lambda \overline{OG}$ , (由图以及设备参数  $R/\overline{OG}'' = 0.362, \lambda = 1.225/\sqrt{U} = 0.1937\text{nm}$ ) 可得  $\overline{OG} = 1/d, d = 0.535\text{nm}$ 。加上外延衬底为(001)面以及  $\text{CoSi}_2$  稳定结构可以判

定外延薄膜为晶格常数约为  $a = 0.535\text{nm}$  的面心立方结构。同理在  $\text{Si}(111)$  面外延生长  $\text{Fe}$  金属薄膜清晰的衍射斑点也表明薄膜为结晶质量良好的单晶, 并可以判定其为体心立方结构。另一方面随着器件小型化, 材料的表面特性开始展现出来, 出现不同于宏观块材特殊的性质, 所以研究材料的表面特性也越来越重要, 电子衍射可用于表征表面结构。例如单晶体表面最上面一层原子重构现象等都可以利用电子衍射来表征。如图 6 中课题组利用低能电子衍射测的  $\text{Si}(001)$  表面的  $2\times 2$  重构图 6(c), 以及  $\text{Si}(111)$  表面的  $7\times 7$  重构 6(d)。所以从薄膜晶体倒易点阵的衍射斑点, 可以反推晶面的信息。电子衍射对现在的纳米技术和表面科学的探究发挥着至关重要的作用。

### 3 结语

首先介绍了大学物理学习的基础光学知识——衍射光栅, 根据其基本原理可以拓展到晶体衍射从而推导出布拉格方程以及厄尔瓦德球。从衍射光栅的缺级到晶格衍射的系统消光。纳米技术的现代科研测量手段 X 射线衍射以及电子衍射与大学物理基础知识息息相关。本文从简单的衍射光栅方程出发到现代科研分析手段, 为教授大学物理的教师提供一些现代科研技术与基础物理知识相联系的内容, 使学生深入浅出地了解现代科研技术现状, 拓展其知识面, 让其体会到基础物理的重要性。

### 参 考 文 献

- [1] 谢丽, 李春密, 徐大海. 马扎诺教育目标分类学下的大学物理问题设计[J]. 大学物理, 2017, 36(1): 45-48.  
XIE L, LI C M, XU D H. Design of college physics problems based on Marzano's taxonomy of educational objectives[J]. College Physics, 2017, 36(1): 45-48. (in Chinese)
- [2] 李永涛, 毛巍威, 刘猛洪, 等. 提高大学物理实验教学质量的思考[J]. 大学物理实验, 2013, 26(1): 117-119.  
LI Y T, MAO W W, LIU M H, et al. The thinking of enhancing teaching quality of experiment of college physics[J]. Physical Experiment of College, 2013, 26(1): 117-119. (in Chinese)
- [3] 邢磊, 董占海. 大学物理翻转课堂教学效果的准实验研究[J]. 复旦教育论坛, 2015, 13(1): 24-29.  
XING L, DONG Z H. A quasi-experiment study on the flipped classroom strategies: the case of Shanghai Jiao tong

- university[J]. Fudan Education Forum, 2015, 13(1): 24-29. (in Chinese)
- [4] 王祖源,倪志强,王瑜,等. 从 OC 到 MOOC 大学物理课程建设再思考[J]. 中国大学教学, 2014, 6: 53-56.  
WANG Z Y, NI Z Q, WANG Y, et al. The rethinking from OC to MOOC university physics course construction [J]. China University Teaching, 2014, 6: 53-56. (in Chinese)
- [5] 宁长春,索郎桑姆. 以科研工作介绍的融入促进大学物理教学[J]. 大学物理, 2012, 31(8): 39-43.  
NING C C, SUO L S M. Promoting college physics teaching through introduction of scientific research works[J]. College Physics, 2012, 31(2): 39-43. (in Chinese)
- [6] 刘莉. 光栅应用发展现状[J]. 长沙大学学报, 2009, 23(5): 23-27.  
LIU L. The development in the application of optical Grating[J]. Journal of Changsha University, 2009, 23(5): 23-27. (in Chinese)
- [7] 诺贝尔奖基金会编,宋玉升,等译. 诺贝尔奖获得者讲演集物理学[M]. 北京:科学出版社,1985: 305-318.
- [8] 麦振洪. X 射线晶体学的创立与发展[J]. 物理, 2014, 43(12): 787-800.  
MAI Z H. The founding and development of X-ray crystallography[J]. Physics, 2014, 43(12): 787-800 (in Chinese)
- [9] 宋长安,覃同,李军胜,等. 电子衍射研究[J]. 甘肃科技, 2008, 24: 69-71.  
SONG C A, QIN T, LI J S, et al. Electron diffraction investigation[J]. Gansu Science and Technology, 2008, 24: 69-71. (in Chinese)
- [10] 严燕来. 关于晶体衍射的劳厄方程和布拉格反射公式的关系[J]. 大学物理, 1991, 10(5): 23-26.  
YAN Y L. The relationship between Laue equation and Bragg reflection formula in the crystal diffraction[J]. College Physics, 1991, 10(5): 23-25. (in Chinese)
- [11] 胡建民. 固体物理学教程[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2010: 46-51.
- [12] 胡建民,王蕊,王春婷,等. 晶体 X 射线衍射模型和布拉格方程的一般推导[J]. 大学物理, 2015, 34(3): 1-2.  
HU J M, WANG R, WANG C T, et al. X ray diffraction model of crystal and general derivation of Bragg equation [J]. College Physics, 2015, 34(3): 1-2. (in Chinese)
- [13] 李胜利,王矜奉,张承璐,等. 晶体 X 光衍射强度与几何结构因子关系研究[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2001, 24(3): 305-306.  
LI S L, WANG Q F, ZHANG C J, et al. Relation of X-ray Diffraction Intensity with the Geometric Structure Factor of a Crystal[J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science), 2001, 24(3): 305-306. (in Chinese)
- [14] ZUO J M. Current developments in electron diffraction [J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2007, 26(6): 582-601.
- [15] HU B, HE W, YE J, et al. Effect of CoSi<sub>2</sub> buffer layer on structure and magnetic properties of Co films grown on Si(001) substrate[J]. Chinese Physics B, 2014, 24(1): 017502.
- [16] WU Q, HE W, LIU H L, et al. Tuning magnetic anisotropies of Fe films on Si (111) substrate via direction variation of heating current[J]. Sci. Rep., 2013, 3: 1547.
- (上接第 112 页)
- [5] 方苏. 窄线宽激光和窄线宽光梳的研究[D]. 上海:华东师范大学, 2013.
- [6] 母柏松,马孟祺,陈云琳. 利用迈克耳孙干涉仪测量透明体的折射率[J]. 物理与工程, 2015, 25(3): 51-53.  
MU B S, MA M Q, CHEN Y L. Refractive index of transparency measured by Michelson interferometer[J]. Physics and Engineering, 2015, 25(3): 51-53. (in Chinese)
- [7] 黄双林,龚雪飞,徐鹏,等. 空间引力波探测——天文学的一个新窗口[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2017, 47(1): 010404.  
HUANG S L, GONG X F, XU P, et al. Gravitational wave detection in space—a new window in astronomy[J]. SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, 2017, 47(1): 010404. (in Chinese)
- [8] 陈力,杨富荣,苏铁,等. 基于法布里-珀罗干涉仪的瑞利散射测速技术研究[J]. 光子学报, 2015, 44(1): 0112004.  
CHEN L, YANG F R, SU T, et al. Interferometric rayleigh scattering velocimetry using a Fabry-Perot interferometer [J]. ACTA PHOTONICA SINICA, 2015, 44 (1): 0112004. (in Chinese)
- [9] Pound R V. Electronic frequency stabilization of microwave oscillators[J]. Review of Scientific Instruments, 1946, 17(11): 490-505.
- [10] DREVER R W P, HALL J L, KOWALSKI F V, et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. Applied Physics B, 1983, 31(2): 97-105.
- [11] KESSLER T, HAGEMANN C, GREBING C, et al. A sub-40-mHz-linewidth laser based on a silicon single-crystal optical cavity[J]. Nature Photonics, 2012, 6(10): 687-692.
- [12] DROSTE S, OZIMEK F, UDEM T, et al. Optical-frequency transfer over a single-span 1840 km fiber link[J]. Physical Review Letters, 2013, 111(11): 110801.