

李景修

自从1963年发现晶体沟道效应以来,带电粒子与晶体相互作用方面的研究已十分活跃.随着一些新现象的发现,人们对晶体结构的特性的认识进一步深入.许多效应在工业上已得到了广泛的应用.带电粒子在晶体沟道中的作用是人们感兴趣的研究课题.新现象时有发生.沟道辐射就是其中之一.

1976年莫斯科大学的库玛克霍夫首先从理论上得出进入晶体沟道的正电子会发生辐射的结果.随后他们又用量子力学对正、负电子作了进一步计算.发现沟道辐射具有一些特点.79年美国加州大学劳伦斯利弗莫实验室的科学家首先观测到这一现象,证实了这一理论计算的正确性.从此沟道辐射效应才受到重视.目前在美、苏、法、丹等国的实验室正在对这一现象作深入的研究.我国在高能物理研究所的30MeV电子直线加速器上也开展了沟道辐射的实验工作.

沟道辐射的产生

我们知道晶体是由许许多多原子有规则地排列起来的.在一定的方向上组成很多相互平行的平面,晶体中的所有原子都处在这些平面上,这样的平面称为晶面.晶面之外不存在原子.图1是金刚石型晶体(100)面原子分布情况,象金刚石、硅单晶、锗单晶等均是这种晶体结构.(100)晶面之间的距离 $d_{100}=a$, a 为晶格常数.不同元素构成的晶体, a 不相同.如金刚石中 $a=3.56\text{\AA}$,硅中 $a=5.43\text{\AA}$,锗中 $a=5.65\text{\AA}$.与(100)晶面垂直且相交于AC线上的晶面为(110)晶面.AB和AD方向原子之间的距离为 a .

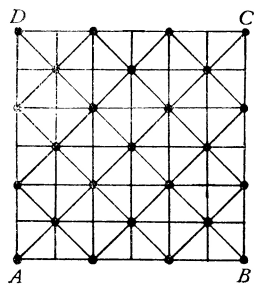


图1 金刚石型晶体中(100)晶面上的原子分布,图中黑点为原子的位置.

当一个带电粒子沿某晶面之间的空间飞行时,就如同飞行在两面是由带正电的原子核砌成的高墙胡同中.虽然原子核之间互不连续,但在近于光速

沟道辐射

的带电粒子看来它们差不多就是连续的了.这样带电粒子与晶面之间的作用可以用一平面连续势描述.这种描述晶面间电势的方法是丹麦奥尔胡斯大学的林哈德教授于1965年提出来的.图2是平面连续势横切面示意图.只要把这横切面沿纵向平移就得到了平面连续势的三维图象.对正电子来说晶

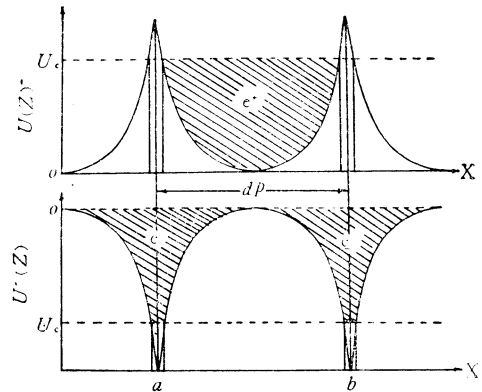


图2 正负电子在晶面中的横向连续势,上图为正电子情况,下图为电子情况. d_p 是晶面之间的距离, a 和 b 是晶面的位置, U_c 表示平面连续势的深度,阴影部分为正、负电子形成束缚态的区域.

面和正电子均带正电荷,相互作用为斥力,平面连续是正的.对电子来说作用力为吸力,平面连续势是负的.一个有很小横向速度而沿晶面以很高纵向速度飞行的正、负电子,在纵向没有作用势,不受晶面影响;而在横向处在平面连续势的作用下.在一定条件下,带电粒子就会被约束在平面连续势形成的渠道中.犹如水在水渠中流动一样,带电粒子只能一面做横向振荡,一面以很高速度在沟道中飞行.我们称由平面连续势形成

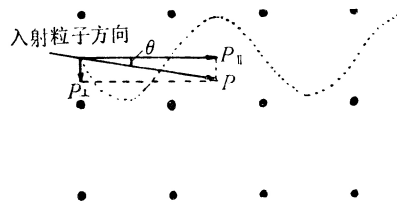


图3 带正电粒子在晶体沟道中入射方向和走的轨迹.

成的这种渠道为晶面沟道.在晶轴的周围还存在着轴沟道.事实上在晶体中不同的方向上纵横交错地分布着许多种沟道.

带电粒子被沟道俘获是有条件的.要求粒子的横向动能不能过大,大横向能量的粒子会穿过沟道飞走.图3给出了入射到晶体中粒子被沟道俘获后的运动情

况。一条虚的曲线是带正电粒子飞行的轨迹。入射粒子的动量 P 可分解为纵向动量 P_{\parallel} 和横向动量 P_{\perp} 。它们相应的能量为纵向动能 T_{\parallel} 和横向动能 T_{\perp} 。由于横向动能很小，一般只有几个电子伏。故 T_{\parallel} 基本上等于入射粒子的动能。从图中可看出，横向动能的大小决定于角度 θ 的大小，也就是决定于晶体平面与入射粒子束方向之间的夹角。这个角度可以人为的控制和调整。一般来说有一个最大角度 ψ ，只有 θ 小于 ψ 的那些粒子才有可能被沟道俘获。角度 ψ 称为临界角。经计算知道 ψ 近似为，

$$\psi = \sqrt{\frac{|U_c|}{E}}$$

式中 E 为入射粒子的能量。 U_c 为沟道连续势的深度。

被沟道俘获了的粒子才能做横向振荡。运动中的带电粒子当有速变化时就会发射电磁辐射。在晶体中被沟道俘获的带电粒子在横向做周期振荡，它的速度周期变化，因而发出相应于这周期的电磁波。我们称这种辐射为沟道辐射。沟道辐射是带电粒子在一定条件下与晶体中正电荷作用的结果。这是一电磁过程，因此沟道辐射也是一种电磁波。由于它是从晶体沟道中发出的，它除了具有电磁波的一般性质外，还具有一些特性。这些特性可由经典理论或量子理论进行计算和加以说明。

沟道辐射的特性

沟道辐射的特点之一是辐射具有单能性。从图2中可以看出平面连续势的形式是一对称曲线。如果作一级近似处理可以表示成线谐振势的形式。这样可以用量子理论计算出平面连续势中的能级及粒子的运动情况。它的能级是等间距的，辐射具有单能性。实验已经证实，正电子在面沟道中具有相当好的单峰结构。图4给出了正电子入射到硅单晶(110)平面的沟道谱。对电子来说，因为它是做穿越晶面的振荡，电子与晶面中的正电荷和电子的碰撞机会增大，使得平面连续势远离线谐振势，这样能级不等间距性加大。因而出现多峰结构谱。图5画出了金刚石晶体上(110)和(100)晶面中电子的辐射谱。

图4 正电子沟道辐射谱。

其中正电子能量为 56MeV，沿厚度为 18 μ m 的硅晶体(110)面入射，在入射束方向上观测到的，辐射能量 $E_r = 42.5$ keV。

除了单能量特性外，沟道辐射的能量还可以人工

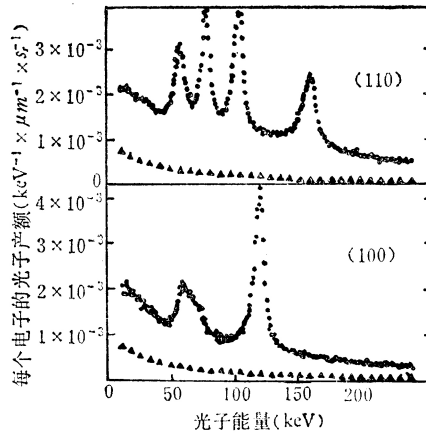


图5 电子沟道辐射谱。

其中电子能量为 54MeV，入射到 20 μ m 厚的金刚石晶体上，在入射束方向观测到的，上图(110)面沟道中四个峰的能量分别为：161.8, 104.4, 78.4 和 58.0keV，下图(100)面沟道中两个峰的能量分别为 120.9 和 65.4keV。

集中在低能段。原子的特征 X 射线和放射性同位素产生的 γ 射线能量虽然单一，但不可调。而沟道辐射则集中了这两类辐射的优点，能量即单一又可调。这是非常难得的。再加上沟道辐射的能量能达到很高，100MeV 正电子在 Si(110) 面产生最大能量 90KeV 沟道辐射。10GeV 正电子则可产生最大能量 90MeV 的辐射。而电子沟道辐射比正电子更高些。这是其他几种辐射所达不到的。

沟道辐射的谱密度高，在沟道辐射谱范围内，比韧致辐射约高两个量级。沟道辐射的方向性好，主要集中在向前的一小角度内，入射粒子能量愈高方向性愈好。因此沟道辐射的谱角密度也很高，比韧致辐射差不多高 4 个量级。目前电子储存环中平均流强大约等于 100ma，而强流直线加速器流强约为 1ma，在储存环上作同步辐射和在直线加速器上做沟道辐射，在几百 KeV 辐射或更高能量范围内，沟道辐射的谱角密度比同步辐射要高，在软 X 射线范围内二者则差不多。穿越辐射谱是低能连续谱，它的最大能量比沟道辐射约小 2 个量级。

沟道辐射的另一个特点是极化程度好，是 100% 的极化束。这也是非常可贵的一种特性。

沟道辐射的应用前景

由于沟道辐射在很宽的能量范围内，能量可调、单能性好、强度大、定向性高以及极化程度好等优点，有着广泛的应用前景。引起许多科技工作者的重视。

1. 沟道辐射是一种优良的 X 射线和 γ 射线源。它

(下转第 31 页)

的能量范围广,包含了所有核子能级的能量,因此可用于核谱研究。由于它的谱密度大,若取出各种频率的X射线用作衍射分析,就可广泛用于物质的结构分析。如果造出强流可移动的电子加速器,作活化分析,X荧光分析对探矿,元素分析将是非常有益的。

2.用于 γ -激光 由于沟道辐射的能量可调,能级上的量子占位数可用改变入射角的办法加以调整。许多科学工作者建议,用沟道辐射产生可调 γ 激光。可以在较宽的波长范围内光。

3.在医学上的应用 目前肿瘤的放射性照射,相当一部分用韧致辐射。韧致辐射具有连续谱,因此照射效应是各种能量的集体效应。如果改用沟道辐射,利用它的能量单色可调的特点,找出对肿瘤最敏感的能量,就有可能用小剂量照射收致大的效果,同时又较少伤害正常组织,在医学上分析诊断使用沟道辐射也是十分有力的工具。

4.生产同位素电源 长寿命的同位素电源具有体积小、寿命长和不需要维修等优点,广泛的用于宇宙

飞船、人造心脏等方面。目前用的电源用同位素是钷²³⁸,它的半衰期是84.3年。是用反应堆生产的。价格非常贵,如果用沟道辐射在11MeV左右去照射钷²³⁸,利用它的(γ, n)共振反应截面,就可大大降低钷²³⁸的价格。

5.用作强聚焦中子源 沟道辐射方向性好,流强大。用它能量可调的特点,用重金属靶在巨共振区作(γ, n)反应,就可得到强聚焦中子源。有人计算了美国橡树岭电子直线加速器的情况,用150MeV电子束产生沟道辐射去打钷靶可得到 10^{17} 中子/cm²·s;若打重元素靶则可得 10^{20} 中子/cm²·s。这比用钷靶的韧致辐射要好得多。

6.用加速器生产核燃料。目前讨论最多的是用强流质子束把钷²³⁸和钷²³²分别加工成钷²³⁹和钷²³³。其方法是用质子束打靶产生中子,利用中子完成。通常没有人考虑用电子加速器,因为电子产生的中子少。用1GeV,300ma流强的质子一年可生产1吨核燃料。沟道辐射发现之后情况就有变化。用200MeV电子产生轴沟道辐射,能量刚好落在(γ, n)反应巨共振区。用它作中子源生产核燃料比质子加速器有可能要便宜得多。这是因为200MeV电子加速器比1GeV质子加速器便宜很多的缘故。

7.X射线光刻方面的应用 目前集成电路图形的产生主要还是用光学方法。这种方法达到的分辨能力越来越不能满足大规模集成电路的要求。1972年美国麻省理工学院林肯实验室利用电子的韧致辐射发明了X射线光刻技术,但韧致辐射X射线曝光时间较长,由于沟道辐射在几个MeV能量范围内强度比韧致辐射的X射线强度高约两个量级。用沟道辐射作光刻技术也有可能大大缩短曝光时间,并可提高图形的分辨率。

8.制作新型探测器 沟道辐射的能量和强度依赖于入射粒子的电荷和质量。在超高能带电粒子中测量它在晶体中产生的沟道辐射,有可能推知它的电荷和质量,用以鉴别粒子。

9.用作标准光源 加速器正、负电子的能量我们可以很准确的知道,利用沟道辐射和加速器粒子束能量之间的关系可以很准确的知道沟道辐射的能量。因此沟道辐射可以作为一种优良的标准辐射源来校准仪器或其他 γ 射线源。

当然以上这些方面还只是处在研究阶段。离实际应用还有相当距离。一些技术问题,如设计强流、高性能束流的加速器,寻找优良的晶体靶,以及解决靶子的冷却问题都要进一步研究。对沟道辐射本身的性质也还需要作更深入的研究。但它的应用前景已经展现在我们的面前。