

## 第二讲 遥感分析基础——地物波谱

吕 斯 骅

(北京大学物理系)

早在 1962 年,即美国发射第一颗资源卫星(后称陆地卫星-1)的前十年,美国宇航局就委托密执安大学对岩石、土壤、植被、水体等几千个典型样品进行室内外光谱测试,为遥感器的波段选择提供了科学的依据.而陆地卫星-4 上主题制图仪(TM)的八个波段的选定,则更是采用了这几年来各国光谱测试的新成果.随着遥感波段从可见光扩展到红外和微波波段,人们已不能根据视觉的直接经验来分析红外图象和微波图象,必须依据各种地物的红外和微波波谱特性才能正确地分析这些图象.除了用波谱来识别各种地物外,还利用光谱量和某些量之间的相关关系来作定量分析,如光谱量和作物产量之间的定量关系,光谱量与污染物含量之间的定量关系等等.由此可见,地物波谱的研究是遥感中的一项基础性研究.

遥感波谱的研究包括四个方面: 波谱特性,空间特性,时间特性和偏振特性.在  $0.3-2.5\mu\text{m}$  波段,主要测量各种地物反射光谱特性,用反射率  $\rho(\lambda)$  表征;在  $8-14\mu\text{m}$  波段,主要研究地物的热辐射特性,常用辐射亮温  $T_b$  表征.而辐射亮温  $T_b$  与地物的比辐射率  $\varepsilon(\lambda)$  及地物的热惯性  $P$  等很多因素有关.对被动微波遥感,微波比辐射率用  $\varepsilon$  表征地物特性,而对主动微波遥感则用其背散射系数来表征地物特性.由于地物表面既非镜面也非漫反射面,故其反射率除与波长有关外,还与入射天顶角  $\theta_i$  (入射线与铅垂线之间夹角)、入射方位角  $\varphi_i$ ,测量的天顶角  $\theta_r$ 、测量的方位角  $\varphi_r$  有关.例如垂直观察一块麦田时,可看到麦苗和土壤,而从侧面观察时则看到的全是麦苗,这两种情况

下测得的反射率显然不会相同.

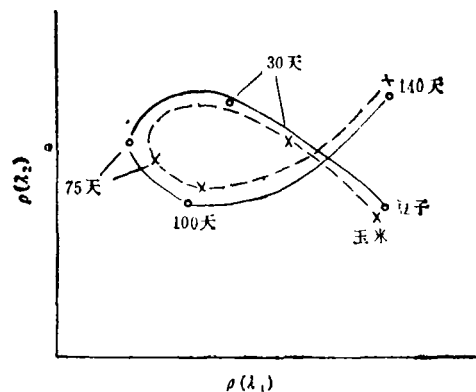


图1 大豆、玉米生长过程中反射率的变化

对一些光谱特性相近的物体,如大豆和玉米,在刚播种时两种作物的光谱很相似,到成熟期(140天)时则都枯萎,在整个生长过程中光谱特性也极相似.但在播种30天后两者的波谱特性有较大的差别,因此选取生长30天的影象就能把大豆与玉米区分开.地物在可见和红外波段的偏振特性目前还研究得不多,而在微波波段则要充分利用偏振特性,在微波中把偏振称为极化.

### 一、主要地物的波谱特性

#### 1. 岩石

岩石是由矿物组成的,而矿物的特征光谱在热红外波段,是由矿物分子振动能级间的跃迁引起的.例如,石英在  $7.5-12\mu\text{m}$  处有一特征反射峰,其极大值在  $9.3\mu\text{m}$  附近;钠长石的峰值在  $10.2\mu\text{m}$  处,而钙长石却移至  $10.8\mu\text{m}$ ;方解石

在 7.2, 11.5 和 14 $\mu\text{m}$  处有其明显的反射峰。石英等硅酸盐类矿物在 8.5—12 $\mu\text{m}$  区的反射峰是由 O-Si-O, Si-O-Si, O<sup>-</sup>-Si-O<sup>-</sup> 的价键非对称伸缩振动引起的。长石在 15—20 $\mu\text{m}$  的特征峰是由 (Si, Al)-O-(Al, Si) 对称伸缩振动引起的。碳酸盐类在 7 $\mu\text{m}$  附近的峰是由 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 基团非对称伸缩引起的, 在 11 至 12 $\mu\text{m}$  的峰是由 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 基团面外弯曲振动引起的, 在 13—15 $\mu\text{m}$  的峰是由 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 基团平面弯曲振动引起的。

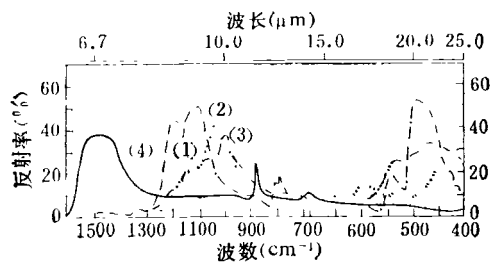


图 2 几种岩石在热红外波段的反射光谱  
(1)石英砂岩; (2)含霞石正长岩; (3)黑云母角闪片岩; (4)灰岩

岩石在可见光和近红外的一些光谱特征主要是由矿物中的微量元素(稀土金属和过渡金属如铁离子)和水所引起的。深色的基性火成岩如玄武岩在 0.45—2.0 $\mu\text{m}$  波段内的反射率较低, 整条曲线也较平直。中性的火成岩如正长岩的反射率较高。砂岩反射率也较高, 黄色粉砂岩在 0.5 $\mu\text{m}$  处反射率开始增加, 而红色砂岩在 0.55 $\mu\text{m}$  后才开始上升。在 1.4 $\mu\text{m}$  和 1.9 $\mu\text{m}$  处的两个反射谷是岩石中所含的水造成的。

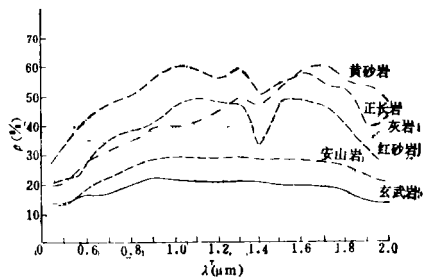


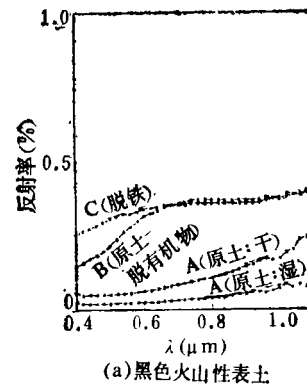
图 3 一些岩石在可见和近红外区的波谱特性

岩石的反射光谱与风化程度和干、湿情况有关。在自然界中, 大面积的裸露岩石较少, 往往覆有一薄层土壤或某些植物, 从而掩盖了岩石的光谱信息。

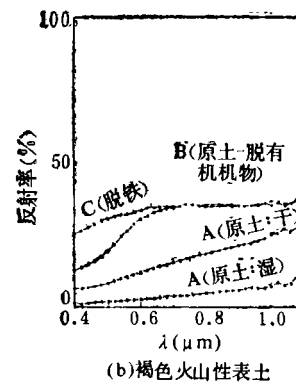
物理

## 2. 土壤

岩石经过长期的风化逐渐变为土壤, 故其主要光谱特征与岩石相似。在可见和近红外波段时, 反射率也是逐渐上升的, 但各自上升的斜率和绝对值都有差别。几乎所有的土壤在 1.4 和 1.9 $\mu\text{m}$  附近均有明显的水吸收峰。



(a)黑色火山性表土



(b)褐色火山性表土

图 4 土壤的光谱特性

土壤光谱所受的干扰比岩石要多, 主要的影响因素有:

(1) 土壤的含水量: 随着含水量增加, 反射率逐渐降低, 如图 4 所示。

(2) 土壤中有有机物质的含量: 有机物质中的腐殖质含量越高, 反射率越低, 如图 4 所示。

(3) 土壤中的矿物成分, 如铁的氧化物含量, 可溶性盐的含量等。

(4) 土壤的表面结构、风化程度。

## 3. 植被

植被的主要光谱特征是在可见和近红外区。它在  $0.55\mu\text{m}$  处有一个不太大的反射峰,在  $0.67\mu\text{m}$  附近有一个反射谷。在  $0.70\mu\text{m}$  附近,反射率开始急剧上升,在  $1.4$  和  $1.9\mu\text{m}$  有两个强的水吸收谷,在  $0.94$  和  $1.13\mu\text{m}$  处有两个较弱的水吸收谷。这是由于细胞内的各种色素(如叶绿素 a, b, 胡萝卜素、叶黄素等)均吸收  $0.445\mu\text{m}$  附近的蓝光进行光合作用。叶绿素还吸收  $0.645\mu\text{m}$  附近的红光进行光合作用,造成了  $0.55\mu\text{m}$  的反射峰。当叶子枯黄时,叶绿素死亡,叶黄素仍存在,故  $0.67\mu\text{m}$  附近的反射率上升,这时叶子就呈现黄色。当植物有病虫害时,  $0.67\mu\text{m}$  的反射谷也逐渐消失,红外反射率下降(如图 5 所示),因此可根据植物的光谱特性来监视农作物的病虫害。一些重金属如铅、锌、铜等能引起植物中毒,有些植物对这些金属特别敏感,我们可以利用这些植物来找矿。近红外波段的反射率大小还与叶子的层数有关,单层叶子和多层叶子在红外波段的反射率可相差 20% 以上,这是由于叶子在红外波段的透射率较高,透射光被下层叶子反射后再透射而造成的,因而可以根据红外反射率来估计植被的覆盖率和长势。植物长势好时,红外波段反射率高,  $0.67\mu\text{m}$  处的反射率小,所以可以根据两者的比值来估计作物的生长量,也可以找到比值和产量之间的相关关系。

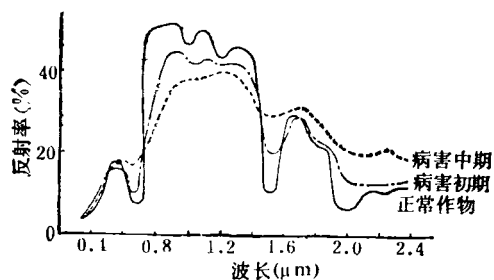


图 5 有病害植物的反射光谱

航天遥感从高空探测地面,其取样面积大于单株植物或单棵树木,因此必须考虑光通过叶间空隙或树间空隙到达地面再被反射的情况,如图 6 所示。土壤的反射特性会因植物和树木的不同地表覆盖率而产生不同的影响。从图 6(b) 中 A, B, C 三个角度去观察,它们的

方向反射率因子  $\rho'$  也不一样。如图 6(a) 中所示,从 B 方向观察时土壤的影响较大,故方向反射率  $\rho'$  在可见区的反射率较 A, C 高。

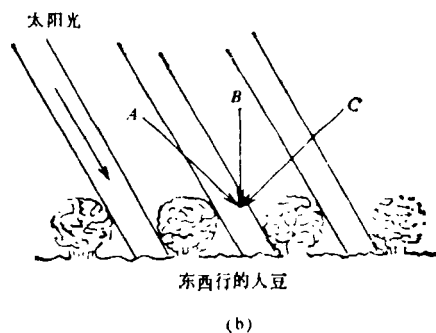
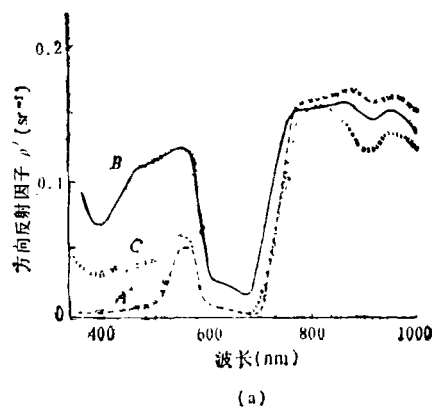


图 6 大豆的反射特性

#### 4. 水体

土壤、岩石的反射过程仅涉及表面很薄的一层,与内部成分和结构没有多大关系。水体则不然,它表面的镜向反射对遥感来说不是主要的,遥感器接收的信息主要取决于水体中的散射和吸收过程以及水底的反射。

当不考虑水底的反射及水面的镜反射时,水体的反射比  $R$  为

$$R = C \frac{\beta_b}{\alpha + \beta_b},$$

式中  $\beta_b$  为水体的背散射系数,  $\alpha$  为吸收系数,  $C$  为常数在 0.32—0.37 之间。

在  $0.475\mu\text{m}$  左右的蓝波段,纯水的吸收系数最小,形成一个水的“窗口”,其数值为  $15 \times 10^{-3}\text{m}^{-1}$ ,即传播 67m,光强才衰减到原光强的  $1/e$ ,而在  $1\mu\text{m}$  时吸收系数为  $3 \times 10^{-1}\text{cm}$ ,即传播 3cm 左右光强已衰减到  $1/e$ 。从上式可知,

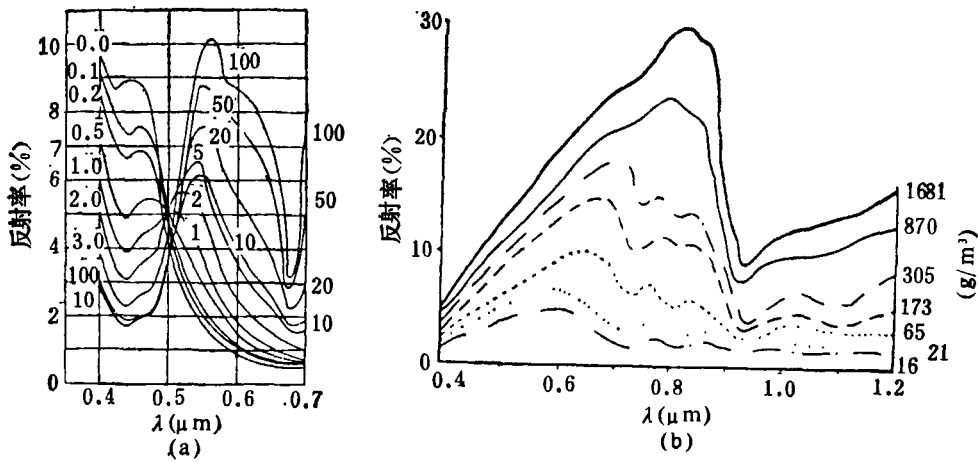


图7 水体中含叶绿素和泥沙时的光谱特性

由于红外的  $\alpha$  很大, 故水体的红外反射比  $R$  很小, 而且也只反映表层水体的信息。

水体的背散射系数  $\beta_b$  与水中含的杂质有关。这些杂质包括含有叶绿素的浮游植物、泥沙、有机物等各种悬浮物以及一些可溶性盐类和有机物等。浮游植物及有机物对渔业生产有重要意义, 可以用它来估计渔业的产量及渔群的分布。悬浮泥沙含量及泥沙的流动、扩散也是人们非常关心的问题, 它决定河道淤积、出海口的变迁、海口陆地的伸长等。含有叶绿素海水的反射比由叶绿素的吸收系数  $\alpha_{che}$ 、背散射系数  $\beta_{che}$  和海水的吸收系数  $\alpha_{H_2O}$ 、背散射系数  $\beta_{H_2O}$  共同决定。图 7(a) 为有不同叶绿素含量的水体光谱曲线, 从中可以看到含叶绿素的水体光谱大致可以分为三个区域:

(1) 叶绿素含量较低时,  $0.42-0.46\mu\text{m}$  波段的反射比随着叶绿素浓度的增加而不断减小, 这是由于  $\alpha_{che}$  的增加大于  $\beta_{che}$  的增加造成的。

(2)  $0.47-0.52\mu\text{m}$  波段内, 反射比几乎与叶绿素含量无关, 这时  $\alpha_{che}$  和  $\beta_{che}$  的作用正好互相抵消。

(3)  $0.54$  至  $0.60\mu\text{m}$  波段, 随着叶绿素含量的增加反射比不断增加, 这是由于这个波段内  $\alpha_{che}$  较小,  $\beta_{che}$  的作用相对增强引起的。由于含叶绿素的水体光谱有这个特性, 一般选用这三个波段或其中的两个来寻找叶绿素浓度与

光谱之间的定量关系。

水中泥沙含量与光谱之间的关系比叶绿素的情况更复杂一些, 但总的说来有两个特点:

(1) 随着泥沙含量的增加, 光谱反射比也增加;  
 (2) 光谱的峰值逐渐由蓝波段向红端位移, 也就是水体自身的散射特性逐渐被泥沙的散射特性所掩盖。图 7(b) 为 1979 年 8, 9 月间在长春作遥感试验时, 测量的七个水库的光谱反射比随波长变化的曲线。悬浮泥沙的含量从  $16\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  增加至  $1681\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 光谱反射比不断增加, 峰值也由  $0.60\mu\text{m}$  逐渐移至  $0.80\mu\text{m}$ 。当选用  $0.65-0.85\mu\text{m}$  区间的平均反射比  $R$  时, 发现在泥沙含量  $C$ , 变化不大时, 可认为  $\log R$  与  $\log C$  之间呈线性关系。

## 二、地物光谱仪

地物光谱可以在野外实地测量, 也可以采样送到实验室测量。在实验室测量中, 常用的是分光光度计, 它的光谱分辨率比较高, 但样品的面积不可能太大, 只能取典型样品。这 and 实际野外状况有很大差别, 有些物体如植被采回后甚至会枯死。实验室测量的样品常是典型的, 在寻找这些地物细微的光谱特征时使用。为了确切地把地面的光谱测量结果与遥感影像对应起来, 需要在野外实地测量光谱。野外测量中用的是光谱辐射计, 光谱分辨率要求不太高。

常用的地物光谱辐射计可分为两大类。一类是连续扫描的光谱仪，可以测量一定光谱区间内的光谱反射率。这种光谱仪能描绘地物的光谱细节，在需要仔细研究地物光谱特性及选择最佳工作波段时，这种光谱仪无疑是非常合适的。另一类是非连续的光谱辐射计，它通常是由几片干涉滤光片组成几个固定的光谱通道。这些滤光片的光谱透过率曲线与空中遥感器使用的光谱曲线一致，例如可使它与陆地卫星上的多波段扫描仪的光谱通道一致。这样测出的光谱反射率可直接与卫星记录的数据进行对比，而连续型的光谱仪所得到的数据要经过换算才能把所得的结果与卫星数据进行比较。这种辐射计还具有重量轻、携带方便、使用简便等优点，很适合遥感判读人员在野外作光谱调查时使用。

在一些野外光谱辐射计中，采用渐变滤光片作为色散元件。渐变滤光片是一圆形（或长条形的）滤光片，沿着圆周方向，滤光片透射的中心波长连续变化，例如从  $0.40 \mu\text{m}$  变到  $0.78 \mu\text{m}$ 。渐变滤光片的光谱分辨率较低，这在遥感工作中不会成为问题，但其制造工艺复杂，目前没有几个国家能做出质量较好的渐变滤光片。

### 三、地物光谱反射的空间分布及反射率的测试方法

物体反射率  $\rho(\lambda)$  的定义是，投射到某面上的人射通量与反射通量之比。这个定义只考虑到入射和反射的总量而没有考虑反射通量的空间分布。如果两个反射面的反射率均为  $\rho$ ，其中一表面为镜面，当入射角为  $\theta_i$  时，只在  $\theta_r = \theta_i$  的镜面反射方向才能观察到反射光，在其他方向观察不到反射光。另一表面为漫反射面，其反射亮度与观察角无关，即从任何角度观察，其亮度均不变。如果从垂直方向观察这个平面，镜面看起来是“黑色”的；当观察者从镜面反射方向观察时，镜面的亮度又远远大于漫反射面的亮度，而两者的反射率  $\rho(\lambda)$  都是一样的。实际的物体表面常常介于这两者之间，既非镜

面又非漫反射面，它们有复杂的方向分布。

遥感器接收的是在某一立体角（通常是垂直于地面）内的反射能量，所以地物反射的方向分布是遥感光谱测量中必须考虑的问题。

为描写物体反射的空间特性，引进方向反射因子  $\rho'(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$

$$\rho'(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{L(\theta_r, \varphi_r)}{E_i(\theta_i, \varphi_i)}$$

式中  $E_i(\theta_i, \varphi_i)$  是以  $\theta_i$  为天顶角、 $\varphi_i$  为方位角的人射光束所引起的照度， $L(\theta_r, \varphi_r)$  是从天顶角为  $\theta_r$ ，方位角为  $\varphi_r$  的方向观察的反射辐射亮度（图 8）， $\rho'$  的单位是  $(\text{Sr})^{-1}$ 。一般说来  $\rho'$  随  $\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r$  四个参数变化，其中任意一个参数改变， $\rho'$  都可能改变。漫反射体的辐射亮度  $L$  与观察角  $(\theta_r, \varphi_r)$  无关，与入射方向  $(\theta_i, \varphi_i)$  也无关，因而  $\rho'$  为常数。

漫反射体的反射率  $\rho$  与方向反射因子  $\rho'$  有以下关系：

$$\rho = \pi \rho'$$

如果测量时取样的面积大于物体不均匀性的尺度，则对卫星遥感而言，即  $\theta_r \approx 0^\circ$  时，岩石和土壤可粗略地认为是漫反射体。这意味着在测量岩石和土壤的光谱特性时，不需要测量一系列  $\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r$  所对应的  $\rho'(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ ，可以简单地用一个反射率  $\rho$  来表征它的光谱特性。对一些特别低矮的草、地衣等植物，除太阳入射方向外，可认为  $\rho'$  与  $\theta_r, \varphi_r$  无关。一些株体较高的植物如水稻、玉米等光谱的空间分布较复杂，特别是在需要把测量数据与卫星

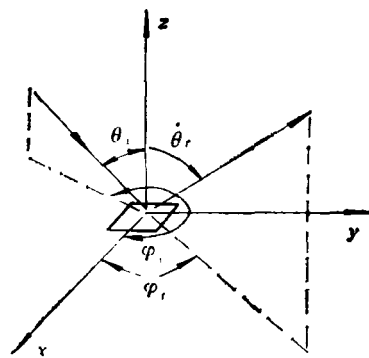


图 8 方向反射因子中各参量的意义

或飞机收集的数据进行对比时，一定要保证地面和空中测量时的  $\theta_i$  相同。例如，要与陆地卫星的数据对比，一定要用地方时 9:30 时测量的数据，而不能用中午测量的数据，因为此时太阳天顶角  $\theta_i$  已有了很大的改变。

用前面讲的单通道光谱仪测量反射因子  $\rho'$  时，采用比较法。首先把仪器对准一个反射率  $\rho_0$  为已知、漫反射性能较好的参考板，读出此时的测量值  $V_0$ 。读出  $V_0$  后马上撤去参考板，把仪器对准待测物，此时读数为  $V_1$ ，由于两次测量时间相隔很短，可以认为两者的辐照度  $E$  相等。这样就可导出该物体在  $\theta_i$ ， $\varphi_i$  和  $\theta_r$ ， $\varphi_r$  条件下的方向反射因子  $\rho'_i$  为

$$\rho'_i = \frac{V_1 \cdot \rho_0}{V_0 \cdot \pi}$$

当被测物体也是漫反射体时，它的反射率  $\rho_i$  与方向反射因子  $\rho'_i$  也存在  $\rho_i = \pi \rho'_i$ ，则上式可直接写成

$$\rho_i = \frac{V_1}{V_0} \rho_0$$

当用双通道光谱仪时，其中一个通道对准待测物，另一个通道对准标准板，运算电路将两

个通道测出的数直接进行除法运算，可直接显示方向反射率  $\rho'$  的数值。双通道仪器保证标准板和待测物上的照度是严格相等的，而单通道仪器不能严格保证。但双通道仪器很难做到两个通道的性能完全一致，必须经过校准用修正曲线进行订正。

测量精度除了与仪器的性能有关外，还与参考板的性能有关。对参考板的要求主要有两点：第一应为漫反射面，第二反射率为已知且反射性能稳定。常用的参考板用  $MgO$  和  $BaSO_4$  制成。许多文献中经常用新鲜的  $MgO$  作为反射率标准，直接与其他物体进行比较。但  $MgO$  容易和空气中的  $CO_2$  结合成  $MgCO_3$  使反射率降低，因而不适于野外应用。野外用的参考板常用压制或喷涂的  $BaSO_4$  制成。制作时应注意保证参考板的漫反射特性，其关键在于掌握  $BaSO_4$  颗粒的大小，太大了背向反射增大，太小了镜向反射变大。

测量时要记录仪器观测的方位角、天顶角，太阳入射的方位角、天顶角，仪器的高度，视场大小以及云量、风速等气象条件。测量应在晴天，辐照度变化不大和无风的情况下进行。

(上接第578页)

- [5] A. Sommerfeld and H. Bethe, *Handbuch der Physik*, 24-2 (1933), 333.  
 [6] H. Jones and C. Zener, *Proc. Roy. Soc.*, A145 (1934), 268.  
 [7] D. Shoenberg, *Phys. Bulletin*, 29(1978), 16; *Proc. Int. Sym. Solid State Phys.*, Calcutta, (1977), 1; *Proc. Roy. Soc.*, A371 (1980); P. K. Hoch, *Contemp. Phys.*, 24(1983), 3.  
 [8] P. L. Kapitza, *Proc. Roy. Soc.*, A119 (1928), 358, A123 (1929), 292.  
 [9] R. Peierls, *Z. Phys.*, 81(1933), 186.  
 [10] D. Shoenberg, *Proc. Roy. Soc.*, A170 (1939), 341.  
 [11] J. A. Marcus, *Phys. Rev.*, 71(1947), 559.  
 [12] L. Onsager, *Phil. Mag.*, 43(1952), 1006  
 [13] I. M. Lifshits and A. M. Kosevich, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 29(1955), 730, 33(1957), 88 [*Sov. Phys. JETP*, 2(1956), 636, 6(1958), 67.]

- [14] E. N. Adams and T. D. Holstein, *J. Phys. Chem. Sol.*, 10(1959), 254.  
 [15] A. B. Pippard, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, A250 (1957), 325.  
 [16] I. M. Lifshits et al., *Sov. Phys. JETP*, 4(1957), 41.  
 [17] W. P. Mason, *Phys. Rev.*, 97(1955), 557; R. W. Morse, *Phys. Rev.*, 97 (1955), 1716; R. W. Morse et al., *Phys. Rev. Lett.*, 4(1960), 605.  
 [18] A. B. Pippard, *Phil. Mag.*, 2(1957), 1147.  
 [19] M. H. Cohen et al., *Phys. Rev.*, 11(1960), 937.  
 [20] M. YA' Azbel and E. A. Kaner, *Sov. Phys. JETP*, 5(1957), 730; *J. Phys. Chem. Solids*, 6(1958), 113.  
 [21] V. F. Gantmakher, *Sov. Phys. JETP*, 15(1962), 982.  
 [22] D. Shoenberg, *The Physics of Metals* (J. M. Ziman ed.), Cambridge Univ. Press, (1969), 62.