

核辐射探测器的新进展

鲁振龙

(中国科学院兰州分院)

摘要:近十年来,随着加速器技术的飞跃进展,核物理实验和核技术应用的范围迅速扩大,这就促使核辐射探测器取得了引人注目的新进展。这些进展主要表现在下述新型器件和材料的问世上,本文也就主要讨论下述方面:光二极管;超导晶粒探测器;低温微量热器;钝化平面硅探测器;新的无机闪烁材料BGO等。

一、引言

近十年来,重离子加速器和高能粒子加速器技术发展十分迅速。随着加速器提供束流的种类和能量不断增加,所能进行的核物理实验和核技术应用的范围迅速扩大。这就为核科学工作者展示了美好的前景,当然也对核辐射探测技术提出了更高的要求。在核辐射谱仪中所用的仪器已经取得巨大进展,无论在性能改进还是应用范围展览方面都是如此。例如,几年前还普遍使用的锂漂移 γ 射线谱仪,现在已经让位给本征锗探测器,后者不但无需持续冷却而且还能明显改进谱仪性能。核辐射探测器的新进展日新月异,但主要表现在新型器件和材料的不断问世上。限于篇幅,本文只能依次讨论光二极管、超导晶粒探测器、低温微量热器、钝化平面硅探测器和新的无机闪烁材料。

二、光二极管

1. 兴起原因

无论在脉冲型和电流型工作方式中,光电倍增管都是与闪烁体联用的最常用的光放大器。但是半导体光二极管研制的最新进展表明,至少在许多应用中用它已可取代光电倍增管。一般说来,光二极管的优点是量子效率高,能量分辨好,功率损耗小,用于闪

烁计数时更经久耐用。光二极管实质上对磁场不灵敏,在磁场妨碍光电倍增管正常工作的场合就能取而代之。由于电荷在光二极管中必须穿越的距离相对较小,所以它的时间响应比得上光电倍增管,在符合测量和其它计时应用中也很有利。

从有可能取代光电倍增管的角度看,有两种类型的半导体光二极管引起人们的注意。常规光二极管没有内部增益,工作方式为把来自闪烁探测器的光学光子直接转换成电子空穴对然后简单收集。雪崩光二极管通过使用更高的电场而得到内部增益,在增加电荷载体后再收集。

2. 常规光二极管

当光入射到半导体上时,由于价电子穿过能带隙上升而产生电子空穴对。对于典型的闪烁光而言,光子相当于携带约 4eV 的能量。普通半导体的能带隙约 1 到 2eV ,上述光子足以产生电子空穴对。这个过程避免了过去常规光阴极表面电荷载体逃逸造成的损失,所以该过程的量子效率高达 60% 到 80% ,这比光电倍增管要高几倍。但是由于没有内部增益,信号幅度很小。在一次典型闪烁事件中,只能产生几千个光子,能够形成的电荷脉冲的大小仅为 10^4 到 10^5 电子电荷。由于信号幅度小,来自电荷载体热产生起伏的噪声,就成了脉冲方式工作时的一个主要问题,对于大面积探测器和低能辐射的情况就更加严重。这种噪声称作暗电流。由于在高

能辐射时能产生大量光子，而在二极管尺寸较小时相应的暗电流和电容较小，所以在这两种情况下都已取得了成功。在电流方式工作时，高计数率时许多闪烁事件的累积效应，就能超过固有噪声，从而使工作特性十分出色。例如，对于医学成像中x射线CT扫描器来说，如果所用的闪烁器是以电流方式工作的话，那末光二极管就可以用作光探测器。

对于一些典型的硅光二极管而言，在-20到35℃的区间，漏电流在 10^{-11} 到 10^{-8} 安培之间，并且随温度增加而成正比增加。与典型的光阴极相比，它的量子效率较高、并且向长波区展宽很多。对于象CsI(Tl)或BGO这类闪烁体来说，由于发射谱在较长波长区数值较高，所以上述的展宽的频谱响应特别有用。由于没有内部增益，光二极管比光电倍增管稳定和耐用得多。要想得到好的电荷收集，光二极管所用偏压仅为几十或几百伏，而光电倍增管要用一千伏甚至更高。象硅、锗和最近的汞氧化物等多种半导体材料都已用于常规光二极管。汞氧化物半导体的能带隙宽，在室温下暗电流很低，这是很有吸引力的。对于能带隙窄的材料象硅或锗来说，室温下的暗电流大到足以引起可观的噪声，这噪声比相当的光电倍增管的噪声通常大一个数量级。由于暗电流起源于热产生的电荷载体，它与温度关系很大，因此光二极管的噪声水平，一般可通过把器件冷却来降低。超过室温时暗电流迅速增加，这就妨碍了光二极管在更高温度下的使用。

3. 雪崩光二极管

在常规光二极管中，一次典型的闪烁事件产生的电荷数值不大。但是如果把所加偏压增加到足够大，半导体中就会发生雪崩使电荷数值大大增加。在两次碰撞之间电荷载体被充分加速，以致沿碰撞路程产生附加的电子空穴对，这种情况和正比计数器中发生的气体放大十分相似。这种内部增益有助于从噪声水平中提取出信号，并且能在较低辐

射能时以脉冲方式工作得到很好的能量分辨，而在这样低的辐射能时已不可能使用常规光二极管。因为增益因子对施加的偏压非常灵敏，为使雪崩光二极管工作稳定，必须十分严格地控制所加高压。对于电流方式应用而言，常规二极管的固有稳定性更为可取。现在商品化的硅雪崩光二极管的直径可以大至4.4cm。在过去，由于器件有效面积上的增益不均匀性，已经无法进行测量了。最近已用中子蜕变掺杂制成了很高均匀性的硅，从而大大改进了器件的性能。用上述材料制成常用尺寸的硅光二极管，再和闪烁体联合组成的谱仪已经取得了出色的测量结果。业已表明，常规闪烁计数时所用的光电倍增管，用光二极管取而代之的日子已经为时不远了。

无论是常规光二极管还是雪崩光二极管，它们都直接响应于电离辐射，这是与硅辐射探测器的相似之处。在闪烁谱仪中，这种关联经常同时引起不希望的本底，致使由闪烁体记录到的信息的解释遇到干扰。减少本底的方法有两种。第一种是对光二极管进行屏蔽来避免。第二种方法是在满足测量需要的情况下，尽量选用灵敏厚度小也就是耗尽深度小的二极管。因为二极管的电容随耗尽深度的增加而减小，二极管和前置放大器系统的噪声也大体如此。在具体实验中器件耗尽深度的选择就成了困难的问题，必须进行折衷考虑。

三、超导晶粒探测器

在接近绝对零度的温度时，材料的热容量很小。据此可以开拓出探测单个粒子或光子的另一类方法。象锡、铟等许多材料在很低温度时都是超导体，但是如果升高温度它们的导电性又恢复常态。几微米直径的这类材料的增益很小。但是致电离粒子造成的沉积能，已足以把上述大小的晶粒从超导态转变成正常态。如果晶粒质量不大并且维持在

很靠近转变温度的亚稳态，那末这个转变所需的能量小至几十到几百eV。在存在外加磁场时，转变温度就成了所加磁场的函数。有可能产生这样一种温度和场强的组合，使晶粒是超导的但又是亚稳态的。这种情况完全类似于超饱和蒸汽对于形成液态微滴是亚稳态的情况。要想把这种状态下的整个晶粒从超导态变成正常态，只需用很小的沉积能量进行触发。这个转变产生了一个电磁信号，然后进行检测和分析。D. Hueber 和 A. Drukker 先后报导了这种很灵敏的探测器。它叫作超导量子干扰器件，缩写为SQUID。直径范围 5 到 15 微米的单个晶粒的状态转变时，产生的电磁信号用上述探测器都能进行探测。

现在已经制成了直径几厘米的这种探测器。方法是在象石蜡这样的绝缘介质填充材料中，分散嵌置着许多超导体晶粒。在这个“胶体”探测器到处的许多点上都置放敏感元件。这样就不只是能够探测在整个探测器体积内某处某单个晶粒发生转变，而且也能够通过三角测量提供有关该相互作用发生位置的信息。

超导体晶粒探测器尽管目前尚处在积极开发研究阶段，但是它却提供了辐射探测的一种全新机制。为了尽可能减小所需要的触发阈能，晶粒直径应当不大，开创期的应用似乎更有利于探测短程重荷电粒子或反冲核，这也正是重离子核物理学家对此甚感兴趣的原因。用填充含硼的石蜡基体的方法，已经探测过中子。通过稀有散射事件中产生的低能反冲核，进行中子探测的尝试实验，也正在努力进行之中。人们普遍认为，超导体晶粒探测器前景十分乐观。

四、低温微量热器

任何物质在承受电离辐射辐照时，原则上都会引起温度升高，这是因为物质从入射粒子或光子处吸收了能量所致。著名的辐射热测量器多年来用于测量热辐射和红外辐

射，方法为用热敏电阻这类敏感器件测量入射束引起的靶温升高。对于致电离辐射的最常见的情况而言，除非样品受到很高通量的辐射辐照，否则上述靶温升高是太小了，以致无法测到。例如，一戈瑞的吸收剂量定义为每千克吸收体吸收一焦耳的能量。为了沉积这个能量所需的电离辐射的通量是相当大的，对于 5MeV 的 α 粒子辐射的情况，这相当于每克吸收体全吸收 10^9 个 α 粒子。我们发现该能量在水中绝热吸收，所引起的温度升高仅为 $2.39 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}$ 。因此，直接的量热式测量只能局限在相当强的辐射场的情况才是可行的。因为这种方法只是常规测量热绝缘样品的温度升高。

几个实验小组的国际竞争实验表明结果令人振奋。如果只是在维持很低温度的小型材料样品中测量这种温度升高，上述量热式方法的灵敏度可以提高许多数量级。绝缘材料或晶体的热容量一般正比于 T^3 ，式中 T 是绝对温度。因此，温度越低，吸收单位能量引起的温度升高就越大。必须指出的是，这个温度升高是在温度起伏的本底背景下测到的。这个本底温度起伏是由于吸收体吸收能量的随机起伏造成的。这个起伏归因于“声子”流穿过吸收体和环绕介质间的热耦合体时的随机起伏。业已证明，这些起伏的均方值正比于 T^5 。这就表明，大大降低了本底，在此本底上的待测信号自然就变得相当容易测量了。

如果把低温微量热器的温度降至低于 1°K ，那末就有可能探测单个声子或入射粒子引起的瞬时温度升高。用一个和吸收体相接触的热敏电阻，就能够测量这个温度升高。这个热敏电阻提供的电信号，与更普通的脉冲型探测器得到的信号脉冲相当类似。必须注意的是，这里的信号脉冲并不是由象离子对或电子空穴对那样的分离电荷收集组成，而只是由吸收体热状态的变化产生的。这是十分难得的优点。它从根本上避免了对能量分辨的限制；而其它任何类型的辐射探测

器，都由于电荷载体的统计起伏而使能量分辨永远不能尽如人意。低温微量热器的能量分辨的最终极限，只是决定于吸收体中声子水平上的热动力学起伏。因为声子能量比半导体中产生一个电子空穴对所需的能量低几个数量级，所以低温微量热器的理论能量分辨要提高许多倍。这应当说是十分振奋人心的。

已经用厚度25到250微米、面积小于一平方毫米的硅和金刚石晶体，成功地进行了实验。用液氮致冷系统使吸收体处于1°K或更低的绝对温度。目前由于吸收体体积很小，主要兴趣在于测量象软x射线这类贯穿本领低的辐射。但是，现在已经能够做到，把许多上述的小样品采用先进的硅工艺装配成一个实体。用上述方法进行的实验已经获得成功。测到的x射线能谱的能量分辨甚佳，比用常规Si(Li)探测器测到的最佳结果还要好五倍。这些结果展示了激动人心的前景，当然极大地推动了低温微量热器的研制热潮。

五、钝化平面硅探测器

把离子注入和照相平版印刷技术结合起来，是制作结型硅探测器的最新方法。用这种方法制作的探测器，漏电流很小，工作性能出色。在半导体工业中首次研制出集成电路的那些方法，现在都已成功地用于制作探测器了。这些方法成批生产的复杂的探测器，能够既有大的硅表面灵敏面积，又能明显降低成本，还能加工成所需要的复杂的电极形状。在长盛不衰的位置灵敏测量中常用的硅微条式探测器的电极，用这种方法就能事半功倍。

平面制作过程通常用n型高纯硅开始。在把表面抛光和清洗之后，进行高温氧化。照相平版印刷术的下一步骤是有选择地弄掉部分氧化层，这些部分正是待制探测器的入射窗。然后把窗范围内的硅的很薄一层转变成P⁺型从而形成结。方法是用加速器把受主

离子B，用离子注入法注入。为了确保背电极接触良好，用注入As施主离子的方法把背表面转变成n⁺型。下一步是用高温退火的方法消除注入层的辐射损伤。最后一步是在器件的正反两面蒸发上Al层，以便在两面都能提供所需要的欧姆接触。紧接着就可以对制成的探测器基体进行逐个封装。

这种平面制作过程的一个显著优点在于，结的边缘由离子注入区严格确定，并且整个注入区表面非常均匀。这种氧化钝化表面的漏电流小，比一般面垒探测器的要小得多，主要原因是后者的结边缘明显展宽。通过离子注入形成的P⁺层就提供了一个平面探测器，优点是入射窗和死层都很薄而均匀，这就保证了探测器有好的能量分辨。与面垒探测器制备中所用的金前表面相比，现在的铝前表面更加耐用而不易磨损。

集成电路制作工艺与硅探测器制作方法熔于一炉，这就有可能在制作一个探测器所用的同一表面上制备一个探测器的许多电极。这个可能性是令人神往的，目前国外许多实验室都为实现这一目标而展开广泛研究。与过去的分离的探测器和前置放大器组元相比，这种混合电路的前景既能明显降低成本，又能提供非常小型而经久耐用的系统。

六、新的无机闪烁材料

1. BGO

早在七十年代末期，在国际市场上就可以买到新型闪烁材料Bi₄Ge₃O₁₂了。这种材料的晶体简称作BGO，它的应用领域展宽速度之快令人目不暇接。BGO的主要优点是密度高达7.3g/cm³和Bi组分的原子序数高达83。与任何一个其它常规可以得到的闪烁材料相比，对于γ射线的光电吸收而言，BGO具有最大的几率。BGO的机械性质和化学性质都使它易于保存和使用，用它制成的探测器更加坚固耐用。相比之下，NaI(Tl)就显

得太容易破碎并且易潮解吸水得令人讨厌了。但是BGO也有缺点，它的光产额相当低，国外报导表明为NaI(Tl)的8%到10%。当对高 γ 射线计数效率的需要超过对能量分辨的要求时，BGO就大有用武之地了。

我们分析一下在一次闪烁事件中，BGO和NaI(Tl)这两种晶体发射光的不同时间剖面图。在BGO时，主要衰变的 $\tau = 300\text{ns}$ ，而次要衰变的 $\tau = 60\text{ns}$ 并且只占总的光产额的约10%。在NaI(Tl)时，初始衰变的 $\tau = 230\text{ns}$ 。这些不同，再加上BGO的光产额明显低，所以总的时间分辨BGO的要比NaI(Tl)的坏二倍。在BGO中，几乎没有导致在NaI(Tl)和其它闪烁体中出现余辉的那些长衰变组分。因此，在x射线CT扫描器中已得到日益广泛的应用，在扫描器中闪烁体工作在电流方式下，并且必须精确地跟随x射线强度迅速变化。

BGO是一种“纯”无机闪烁体。它无需通过掺入痕量激活元素增进闪烁过程。另外，来自 Bi^{3+} 离子的光学跃迁的发光是晶体的主要贡献。在 Bi^{4+} 态的光学吸收和发射光谱之间的Stokes漂移相当大。因此，闪烁光的自吸收相当小。在晶体内部许多厘米的整个范围内，对于它自身的发射而言，晶体是基本透明和自吸收相当小的。由于闪烁效率与晶体所含杂质关系很大，所以过去报导的BGO光产额方面的差别很大，现在就可以解释为各次测量所用的晶体含有的杂质不同了。BGO的成本是NaI(Tl)的二到三倍，现在得到的尺寸还受到限制。BGO迅速发展的势头却仍然是有增无减。与许多其它闪烁体的共同之处在于，BGO的光输出也随温度的增加而降低。它的相对光输出和闪烁衰变时间都是温度的函数。由于它的光产额在室温时已经不高，室温以上的剧烈下降就严重地限制了BGO在高温场合的应用。这可能也是它的主要缺点之一。

2. BaF₂

BaF₂是另一种纯无机闪烁体。它之所以

在最近突然时髦起来，主要原因是它在快计时测量中的应用潜力很大。它是目前唯一的一种高原子序数材料具有衰变时间小于1ns的闪烁组分。因此，无论是在每单位体积要求高探测效率还是在要求快响应这两种情况下，BaF₂作为闪烁探测器都是很有吸引力的。

非激活的BaF₂作为闪烁材料问世，那还是七十年代初的事情，但是，只是在最近才发现它的闪烁光实际上是有两个组分组成的。其中的快组分的衰变时间是0.6ns，在光谱的短波长区放出。其中的慢组分的衰变时间是630ns，在光谱的稍长波长区放出。这两个组分很容易区分，在发射谱上表现为两个分离的峰。由于许多光电倍增管对光谱的这个短波长区不灵敏，所以过去许多年来一直没能观测到这个快组分。但是，如果使用对近紫外区灵敏的光电倍增管特别是光二极管，在快组分中就已测到室温下总闪烁光的大约20%。BaF₂的总的光产额，大约只是典型NaI(Tl)的20%，所以BaF₂闪烁探测器的能量分辨相当差。尽管如此，许多研究已经表明，BaF₂的快计时特性，再加上它有高的密度和原子序数，这些优点的总和使它在许多场合都是无法取代的。

3. CsF

CsF是具有很快衰变时间的另一种无机闪烁体。对于入射 γ 射线的激发来说，实际上所有闪烁光产额的衰变时间都为4.4ns。它的光产额低，各种文献报导的数值仅为NaI(Tl)的5%到10%。当然，它用作闪烁体时预期的能量分辨也不会好。但是，快的衰变使它能用于计时测量，并且时间分辨很出色。

限于篇幅，我们只是为核辐射探测器的新进展，勾画出一个极为粗略的全景要点。我们深信，随着核科学的持续发展，核辐射探测器也必将出现美好的前景。

参考文献

1. G. Hall et al., IEEE Trans. Nucl. Sci.