

探索粒子物理世界的高速相机

——像素探测器

魏 微

在日常生活中，为了捕捉一瞬间的事件，人们通常利用相机抓拍，然后根据照片来回味那一刻的精彩，使瞬间成为永恒。为了拍摄百米赛跑冲线的那一刹那，更需要利用每秒可拍摄上千张照片的高速相机来进行记录，即使是百分之一秒的时间差，都有可能产生一个新的世界纪录的诞生。

在粒子物理的世界中，为了研究比质子、中子小得多的夸克、轻子等微观粒子，人们只能利用高能加速器首先将粒子（质子或电子等，在用对撞机情况下还要加速它们的反粒子）加速到接近光速，然后使两个（团）粒子发生对撞。在对撞的瞬间将产生大量粒子，它们的运动或衰变形成各自的径迹。在北京正负电子对撞机中，每秒将发生数百万次这样的碰撞。不幸的是，这其中有价值的碰撞事件每秒只有几次，图 1 就表示了众多对撞中的一个有效对撞事例。而更不幸的是，对撞产生的多数粒子，如 π 介子、K 介子等，寿命都小于千万分之一秒（ 10^{-7} s），其后将衰变为更为稳定的电子、 μ 子等。物理学家对未知世界的探索却恰恰使他们对那些初级粒子的行为感兴趣，希望对他们的能量、运动轨迹和动量进行精确的分析。

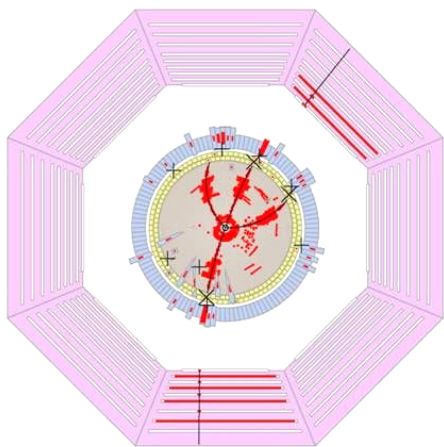


图 1 北京谱仪 III 的一个有效对撞事例

显然，依靠人的观察或记录绝对无法完成这样复杂且要求分析速度极高的实验，物理学家也只能依靠粒子物理的高速相机首先将对撞的瞬间捕捉下来，然后再通过自动化软件来分析那一瞬间究竟发生了什么。这需要在浩如烟海的粒子径迹中首先找出感兴趣的事例，并准确测量粒子运动方向和能量。同时，由于初级粒子的寿命极短，运动径迹的长度也因此很短，物理学家还希望这台高速相机尽量靠近对撞中心来直接拍摄对撞的第一手资料。否则如果相机功能较差，就只能通过拍摄次级粒子的行为来反推出原始事例，测量精度就大大降低。这就好比新闻的记录，事件直接目击的真实性总是远高于根据间接描述进行的事件还原。

这台粒子物理的高速相机一方面要求极高的拍摄速度，完成一次拍摄的时间需要小于百万分之一秒；另一方面需要极高的拍摄精度，能将对撞中心高密度的粒子径迹区分开来，并精确测量其到达时间和能量；此外还需要高速的信息处理能力，能将海量的数据交给自动化软件进行分析。像素探测器就是这样一台粒子物理的高速相机。

一、像素探测器的前世今生

人们通过相机拍照，可以将环境或事件予以捕捉，这一行为实际上构成了对信息的记录和处理；而将照片保存在胶片或者存储卡上，则是对信息的存储。人类对信息的处理水平经历了漫长历史时期的发展，可以说人类的信息史几乎就是一部人类的文明史。原始社会，信息的传播通常只能依靠语言手口相传，偶尔还能够借助洞穴岩画或结绳记事这样的手段辅助记录一些更复杂的信息。这种传播手段一来准确度很有限，主要依靠传播人语言的精确性；二来信息不易传播，传播人语言的不一致性将导致信息在传播过程中很有可能出现偏差；三来信息不易保存，特别是对相隔时间很远的事件，主要

依靠传播人的记忆，时间越久，信息越容易丢失。文字的出现使得信息的准确性、可传播性和可保存性都产生了一个飞跃，从此信息可以以一种标准化的方式进行传播和保存，寿命也得到了大大的提升。其后我国又先后发明了造纸术和活字印刷术，从此造纸术使得信息的传播成本更低更便利，稳定性更好，活字印刷术也使信息的复制和传播效率更高。四大发明中的两种都同信息有关，大大推动了人类文明的进程。之后的故事我们就很熟悉了：电力的广泛应用，使得信息可以实现远距离传播，同时开始朝自动化处理的方向发展，而计算机和网络的出现，则彻底实现了信息的自动化处理，大容量、高可靠性存储和高速且无视距离的传播。人类彻底进入了信息时代。这一场暴风雨式的革命，从 1831 年法拉第发现电磁感应定律并用于发电至今不超过两百年的时间，而我们正在感受它给生活带来的巨大冲击力。至于生活中的相机，从胶片存储到数码，从黑白相机到单反，从几千克的专业设备到随身携带的手机，性能越来越高，价格越来越便宜，外型越来越小巧。虽然只是短短十几年间的事，但却是信息技术发展的一个缩影。

同信息技术的发展史相比，像素探测器的前世今生也许没有那样轰轰烈烈，但却同样凝聚了几代粒子物理学家对技术的不断探索和努力。他们不变的追求仍然可以总结为四个最终目标：精确性、高速传输、高速可靠的保存，以及高效自动的处理。最早的粒子物理相机采用了最直接的思路——物理学家真的采用了照相的方法，只不过为了保存粒子事件，需要先将充满纯净蒸汽的密封容器绝热膨胀，使蒸汽变为过饱和状态。带电粒子在穿过气体时将产生离子对，这些离子对即成为气体的凝结核，好比下雨时空气中的饱和水蒸气依靠灰尘形成水滴。粒子运动路径上结成的微小水滴便成为了粒子径迹。然后需要用相机直接拍照并显影胶片进行分析。这就是最早的粒子径迹探测器——威尔逊云雾室。

云室技术首次显示了肉眼可见的粒子径迹，如图 2 所示，今天它仍然作为一种能直观展示粒子存在的“宣传型”探测器，活跃在各大高能物理实验室中，引领公众走进高能物理的大门。同它原理类似的还有利用过沸液体工作的气泡室，利用电离倍增效应的火花室和流光室等。不过这些技术的测量精度都较差，并且需要进行大量人工处理，无法实

现自动化。这便导致了高精度、自动记录技术的研究，例如将粒子径迹直接保存在胶片上。这种胶片被称为核乳胶，只不过胶片经过了特制，由于颗粒更小，对高能粒子的测量精度和灵敏度大大提升，特别适合探测前面提到的短寿命粒子。图 3 就显示了利用核乳胶探测方法首次发现的 π 介子和它衰变之后的次级粒子径迹。核乳胶方法的分辨率可达亚微米量级，今天依然可算空间分辨率最高的探测器。而更重要的是，它实现了粒子物理事件的自动保存。

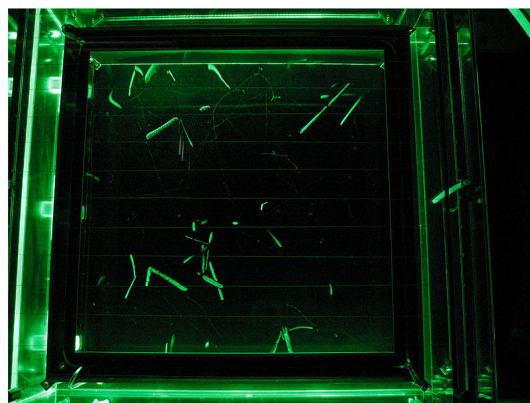


图 2 德国电子同步辐射 (DESY) 实验室里的一个云室，显示了宇宙线入射事例 (图片来自互联网)



图 3 π 介子的发现，显示了多张胶片拼接成的粒子径迹 (图片来自劳伦斯伯克利实验室网站)

然而核乳胶技术仍然无法摆脱人工测量，无法实现完全的自动化，处理速度仍然受到很大限制。20 世纪中后期，物理学家对世界的探索进入到夸克领域，粒子对撞产生了越来越高的事例率。以照相技术为代表的径迹探测器一来记录速度慢，二来需要大量人工处理，完全无法满足微秒、纳秒量级的处理速度要求，只得逐渐让位于以电离室和闪烁体计数器为代表的电子学探测器。早期的电子学探测器功能简单，主要以对到达探测器的粒子数量进行计数，或者测量带电粒子形成的电流为主，后来逐渐发展到现在的多路探测器和电子学联合探测，并配合高速传输总线 and 高速磁盘阵列进行处理的超大

规模系统。今天粒子物理实验的探测器已经发展到图 4 中那样的巨大规模。而以核乳胶为代表的照相技术，只应用于事例率不高的宇宙线等实验中，继续发挥它高空间分辨率的特点。

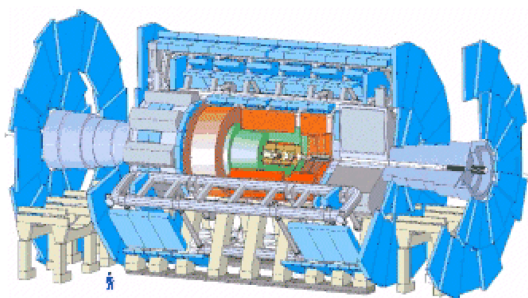


图 4 世界上最大的探测器之一——ATLAS 探测器，左下角人和探测器的比例显示了其规模

电子学探测器相比基于传统照相技术的径迹探测器，主要优势就在于高速的传输和高效的自动化处理，而这两者都只有依靠电子技术才能实现。无论是前面提到的哪种径迹探测器，都没有实现粒子信号到电信号的转换，有的虽然在过程中利用了电离作用，最终的信息载体依然是胶片。虽然电子学探测器的空间分辨能力一直不如径迹探测器，但转变为电信号就能实现自动化，而自动化就意味着高速化、规模化。电子学探测器牺牲了一些空间分辨的精确性，却赢得了高速传输、高速保存和自动处理这三个显著优势。那么如果能将照片中的每个点的图像信息都变成电信号传送给计算机，是不是意味着在保留照相技术精确性的同时，还能实现高速化和自动化，从而使照相技术东山再起呢？答案是肯定的，像素探测器就是其中一个解答，但是做出这个解答，粒子物理学家花费了超过 40 年的时间，解答中的每一步，都得益于一项关键技术的诞生。

二、如何探测？——从电容器和二极管说起

像素探测器首先要解决的关键问题，就是如何将探测平面中每个点的位置、能量和时间等物理信息转换为电信号。说起探测平面，最经典的平面探测器就是平行板探测器——一个经典的电容结构。

图 5 给出了平行板探测器的示意图。带电粒子穿过平行板探测器时，由于电离作用沉积能量，产生了等量的正负电荷。根据中学物理的知识，电荷将在电场力的作用下分别向正负极板运动。电荷的运动便形成了电流，正负电荷运动方向相反，形成的电流方向一致，于是我们只要对该电流进行探测，

就能获得带电粒子的到达时间、能量等信息。虽然本质上说平行板探测器属于气体探测器，而本文讨论的像素探测器属于半导体探测器，两者的探测原理还是不完全相同的，但基于电离作用将物理事件转换为电信号这一思路却几乎适用于所有的电子学探测器。（关于气体探测器以及图 6 中提到的微结构气体探测器的相关讨论，感兴趣的读者可参见本刊 2011 年第 4、5 期谢一冈老师的文章。）

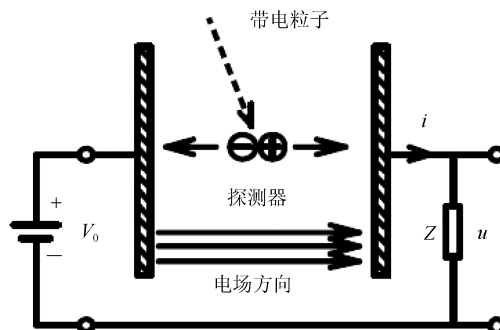


图 5 平行板探测器（重绘自王经理等，《核电子学》，1983）

然而这样的两个平板，却只能提供我们单纯的电流信息，我们无法获知粒子在平板上到达的精确位置。如果能将一整块平板电容分割成许多块小电容，使粒子只在到达的那块电容上产生信号，这样就附带上了位置信息。不过为了提供电压，仍需如图 6 所示保留其中一块极板为公共极板平面，这样分割极板可为地电位。然而，单纯采用机械的分割方式单元尺寸仍然较大（一般在毫米量级），虽然已前进一大步，但测量精度还达不到物理学家的要求。所谓像素者，其英文 Pixel 原为图像（Picture）和元素（Element）两者的结合，即图像的基本元素。要实现像素探测器，成为图像中的点，获得高位置精度，单元尺寸还应该进一步降低。

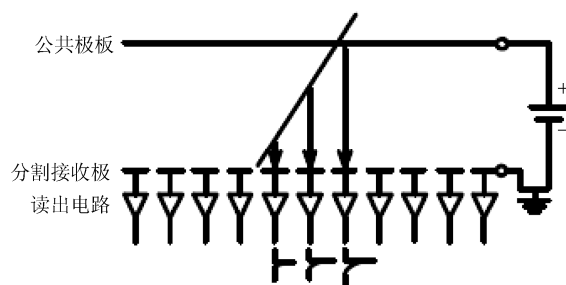


图 6 微结构气体探测器示意图，采用整块公共极板提供高压，接收极被分割成大小相等的接收单元

单元尺寸的进一步降低意味着电极尺寸进入了

微米量级，如果没有半导体技术，我们很难想象如何构造一个如此精密的电容阵列。不过，为了解释半导体中的电容器，我们还要首先从二极管说起。

我们知道，导电来自于电荷的运动，我们将电荷的携带者称为载流子，它们必须具有可自由运动的能力才可导电。一块纯净的硅中，绝大部分电子都被原子核紧紧束缚，只有少数受热后脱离束缚的电子可以自由运动，导电能力很弱。因此，我们通常要在纯净硅中添加一些和硅原子外围电子数不同的杂质原子，来占据一些硅原子的原有位置，它们或者能够提供空位供相邻硅原子的电子移动，相当于提供了可移动的正电荷，称为空穴，形成 p 型半导体；或者提供富裕的电子，由于无法在硅原子网格中找到自己的位置，而成为自由电子，形成 n 型半导体。掺杂半导体的导电能力因此大大提高。

为了形成半导体电容器来探测粒子，我们分别在纯净硅的一侧添加 n 型掺杂，另一侧添加 p 型掺杂（实际过程是首先进行全面 n 掺杂，然后在另一侧进行过量的 p 掺杂）。在两种半导体的接触区，可自由运动的正负电荷将发生中和，在这一区域内，将留下只剩束缚电荷的离子，无法产生自由电荷，称为耗尽区。这样就形成了所谓的 PN 结，即一个形式上的二极管（图 7）。

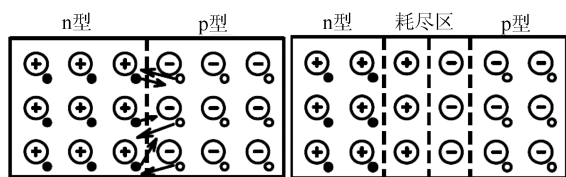


图 7 掺杂半导体中的载流子扩散（左）和 PN 结形成（右），实心圆为电子，空心圆为空穴（重绘自康华光等，《电子技术基础》模拟部分（第四版），1999）

在耗尽区中，形成了从 N 区指向 P 区的内电场，已经具有了电容器的特征，然而自然形成的 PN 结区域非常薄，有效探测区域很小。为了扩大 PN 结的区域，我们可以给半导体加上反向电压，使得电子和空穴分别流向电源的正负极。如果电压足够高（通常需要一二百伏左右），这块半导体中的所有自由电荷将全部被电源吸收，耗尽区将扩散到半导体的全部区域，成为全耗尽 PN 结。此时内电场分布在整个范围内，半导体区域全部成为探测灵敏区，它对粒子的探测行为就非常类似于平行板电容器了（图 8）。之后我们可以继续刚才的思路，利用整块

公共极板提供反向偏压，利用分割后的接收极实现对位置灵敏的探测。接收极的大小就决定了位置探测的精度。

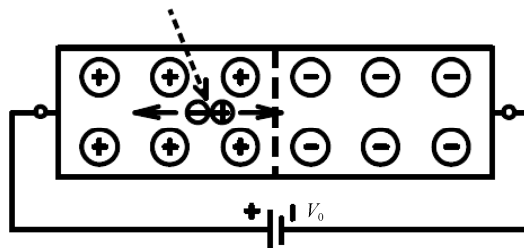


图 8 外加反向偏压的全耗尽 PN 结对粒子的探测（重绘自康华光等，《电子技术基础》模拟部分（第四版），1999）

利用半导体工艺，我们可以用精度更高的激光来控制分割精度（图 9）。首先利用激光在一块不透光胶片上刻上微米尺寸的透光槽，然后将这块胶片覆盖在硅晶圆上，并利用掺杂离子束进行照射。晶圆的大部分区域都将被不透光区域挡住，而只有开槽部分能够接收离子束，这样便实现了高精度位置的掺杂和离子注入，也就是半导体技术中有名的光刻过程，不透光的胶片被称为掩膜（也有主要是透光区域的相反类型掩膜）。现代半导体工艺能够以亚微米尺寸对精度进行控制，从而有可能实现微米量级的电极尺寸。这样，我们终于成功的将物理信号转换为电信号，并且实现了对位置信息的探测，由于探测电极尺寸很小，依然能够保证很高的位置测量精度。

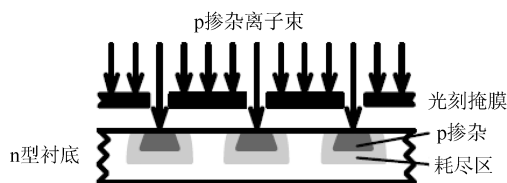


图 9 利用光刻和掩膜对半导体进行掺杂，实现了接收极的分割

如果我们认为一个成功的探测器就是照相技术问题的全部，那就大大低估了问题的复杂度。事实上，探测器只解决了前文提到四个目标中的精确性问题。更大的困难在于，如何将这么小尺寸，这么密集的接收极的信号传输到计算机中进行处理。更文字游戏地说，这是三个问题：如何将接收极信号引出，如何对引出信号处理，以及计算机如何接收并进行储存。这也正好印证了四个目标中的剩下三个。

三、如何引出？——新工艺带来的曙光

日常生活中，大家一定见惯了各种各样的电线：各种电器的电源线，随身听的耳机线，闭路电视的电缆线。它们都有一个共同的特征——可以传送电信号。探测器产生的也是电信号，也需要通过电信号线传输。然而我们谁也没见过直径仅微米量级的连接线。无论是机械强度，还是对信号的传输能力（电阻率），即使能够实现这样的连接线，它的性能也很难满足要求。另一个更严重的问题在于，我们实际上需要的是对分割后的接收极阵列的并排传输，并且由于接收极尺寸变得很小，这些连接线的定位精度要求也变得非常高。

如果大家参加过夜间的庆典，也许见过同图 10 中“夜光花”类似的玩具。它形象地表现了物理学家面临的困境——如何实现这一束连接线同接收极阵列的精确连接，并正确传输信号？事实上，一束光导纤维在这个问题上面临的困难要小得多，原因在于两束临近的光信号可以各自独立远距离传播而不互相影响，而两条紧邻的电信号线的问题在于，一由于线电阻的存在，将使信号衰减，无法实现远距离传输；其次由于电容和电感的存在，一条信号线上的电信号将在另一条上叠加自身的一个比例复制，两条线并行的距离越长，互相间影响越大。如果使得连接线的直径只有十几微米，用于和接收极阵列精确定位，长度也只有十几微米，保证小信号的原样传输，减小线间的相互影响，这样只要尽快将探测器的微小信号交给一个强力的接收器，也就是读出电路，就可以利用第一手资料进行处理，从而暂时完成传输任务。

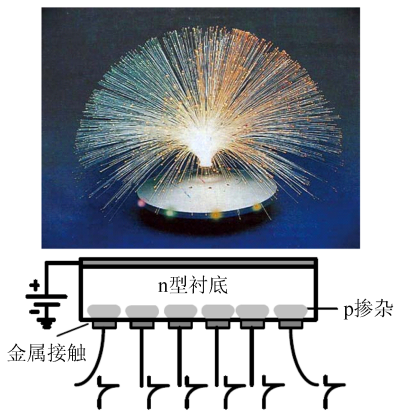


图 10 “夜光花”——一束光导纤维对光信号的传输（上），下图显示了试图采用同样方式引出的半导体像素探测器示意图

当连接线的长度和直径都只有十几微米时，听上去似乎这条线将退化为正圆柱形或球形？没错，人们正是利用图 11 中显示的一种金属钢的小球来实现这条连接线。首先在分割后的接收极半导体上沉积上金属铝的薄层圆盘作为金属接触，然后在铝盘上继续通过特殊工艺沉积上高度和直径都只有十几微米的金属钢小圆柱。在读出芯片的对应位置也沉积上铝连接圆盘阵列后，探测器和读出芯片终于可以正式连接了。然而如何让读出芯片的铝盘阵列同探测器钢柱阵列精确对准绝对是个难题，我们可以想象，这实际上要求两者如图 12 中那样进行面对面连接，称为倒装焊技术，于是其中之一将要面临背向精确定位的问题。今天，利用现代精密机械，已经可以实现误差只有几微米的定位精度，然而几十年前，人们无法想象如何才能完成这种高难度工艺。

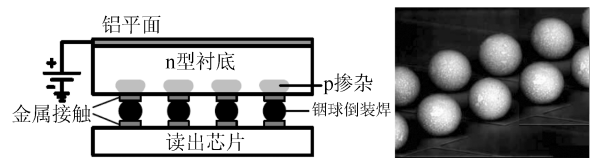


图 11 利用钢球倒装焊进行引出的像素探测器（左），右图是扫描电镜中完成预制成，准备进行连接的钢球阵列（照片来自 Leonardo Rossi, et al., *Pixel Detectors: From Fundamentals to Applications*, Springer Science & Business, 2006）

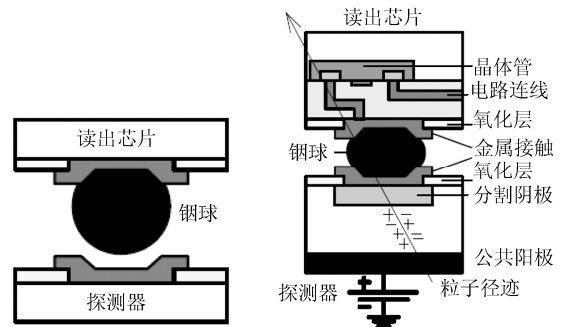


图 12 正在进行倒装焊定位的探测器系统（左）和已完成连接的一个像素单元结构示意图（右）（重绘自 Leonardo Rossi, et al., *Pixel Detectors: From Fundamentals to Applications*, Springer Science & Business, 2006）

为了使探测器和读出芯片连接紧密并导电良好，人们还要在保证两者精确接触的前提下加热使钢球熔化。如同流线型的水滴般，在液体表面张力的作用下，熔化成液体的钢变为球状然后冷却，填满整个金属接触面，并使探测器和读出芯片牢固地

接合。这样我们就把面对面的金属接触一一对应地“焊接”在了一起。好在钢的熔点较低，只有大约 156°C ，我们可以用相比其他金属低得多的温度来完成这一操作，这对娇贵的半导体材料和电路来说都是非常重要的。当然，这也要得益于材料科学的发展，使我们得以发现金属钢的优良特性。

看起来我们似乎已经做出了对分割后的接收极阵列信号如何引出问题的解答，解答的思路似乎很直接。然而不幸的是，由于制造工艺的限制，这一问题长时间以来限制了半导体探测器真正成为像素探测器。一开始，物理学家只能采用图 13 中的变通方案，并不将接收极平面分割成像素，而仅仅是分割成条形，这样利用条形电极本身，就可以完成部分的信号引出功能，然后在探测器边缘连接到读出电路。这种探测器称为硅微条探测器。显然，除非同时在条形电极两端引出信号并测量信号到达时间，否则这样的方式将只能测量一个方向上的位置信息。后来，先进半导体工艺发展使得人们可以同时利用上下表面分别进行 X 方向和 Y 方向的位置探测，实现二维位置分辨。然而当两条带电粒子径迹同时穿过二维条形探测器时，探测器将无法在读出条的两种组合中进行正确分辨，如图 14 中右图所示，也即具有多次击中问题。这样一来，二维条

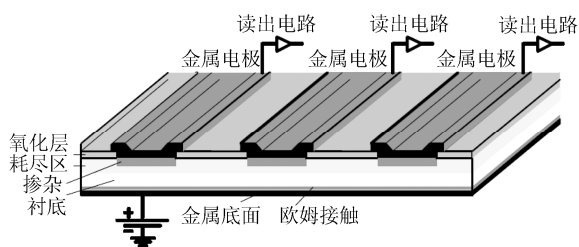


图 13 一维硅微条探测器，接收极分割为条形，边缘引出信号

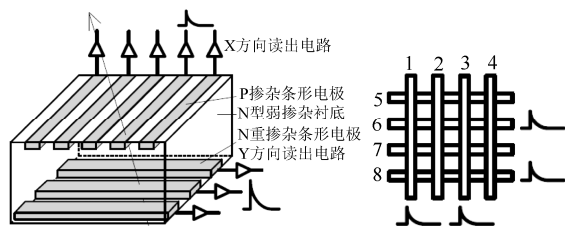


图 14 利用双面工艺实现二维位置分辨，由边缘引出信号（左）；右图表示了二维条形探测器的多重性问题，两条径迹同时入射时，入射点组合 (1, 8) (3, 6) 和 (1, 6) (3, 8) 具有同样的输出表现

形探测器只能对单粒子入射事例进行测量，凡是两个以上的粒子同时入射，只能放弃对它的进一步分析，从而大大限制了入射的事例率。然而，正如即将讨论的，在几乎同样的位置分辨下，它的电子学路数可比像素探测器大大减少，因此硅微条探测器近年来已有大量应用，如在大型正负电子对撞机 LEP 上的 ALEPH, DELPHI 等。在 LHC 上的 ATLAS 和 CMS 实验也用它作为内径迹室，安排在像素探测器之外。

限制像素探测器发展的不是思想，而是技术。物理学家心中一直就保留着那个目标的最终形态，然而正如我们开始就提到的，正是一个个关键技术的诞生，才使得像素探测器研究一步步向前推进。今天，物理学家终于可以不用再曲折地回避信号引出问题，而可采用最直接的方法实施像素对像素的点对点引出方案，得到比较完美的像素探测器结构。

四、如何处理？——大显身手的集成电路技术

细心的读者也许算另外一笔账：采用每面 N 条的二维条形探测器，我们一共需要 $2N$ 套读出电路；而采用 N 行 N 列的像素探测器，则一共需要 N^2 套读出电路。显然，像素探测器对读出电路的需求相比条形探测器是呈指数上升的，那么必须将每套读出电路的开销降到最低，包括制造成本的开销，功耗的开销等。如果我们再考虑到倒装焊面对面连接的特点，这实际上还要求读出电路单元的大小同探测器像素单元完全相同，否则将真的呈现“夜光花”的连接特点——越边缘的单元钢球连接的长度将越长，无法完成大规模阵列的工艺制作。从实际功能上说，探测器单元产生的电信号也非常小，如果不采用一整套性能良好，功能复杂的读出电路进行处理，探测器信号也将最终湮没在环境中无法读出。总结以上几点，我们实际上需要在和探测器单元等大的很小面积内，设计一套功能复杂的读出电路，电路的性能要求高，而成本、功耗开销很小，使得整体消耗在可接受范围内。

事物的发展都是由多种因素共同影响的。半导体工艺使得实现微米大小的像素单元成为可能，但连接技术却限制了接收极朝像素方向的进一步分割，而读出电路的设计则是另一个重要的限制因素。今天，我们可以不假思索地给出这个问题的答案——集成电路技术，然而 20 年前，当物理学家还在使用干电池大小的单个晶体管制作简单放大器时，

怎能想到这样的一套电路，今天可以在仅仅几十微米见方的面积内，实现更高的性能。集成电路的飞速发展，使这一切成为可能。

现在探测器单元已经将粒子能量转换为了电信号，并且通过钢球倒装焊，将电信号传递给了读出电路。留给读出电路的将是一批艰巨的任务。

读出电路的根本任务，也是最大挑战，就是将探测器微弱的电信号从环境噪声中分离开来。我们每天都在同噪声打交道：机器的轰鸣声，汽车的马达声和汽笛声等。这些是声学范畴的噪声，是许多不同频率、不同强度的声音无规则组合在一起形成的。在电的世界中也有噪声，同样也是电信号的无规则组合。在仍然使用天线的电视机上，我们还能经常看见“雪花点”，这就是电噪声给我们最直观的视觉感受。至于电话里的杂音，夜间照片上模糊的斑点，本质上也是电噪声所导致。电噪声产生的原因是多样的，但有一点可以确定——噪声是无法避免和彻底消除的，因此我们只能尽量降低噪声对目的信号的影响。

图 15 形象地说明了读出电路的首要任务。探测器信号在传递到读出电路时，已不可避免地叠加上了环境噪声的影响。读出电路需要从这样的混合信号中，尽量将探测器信号提取出来，还原为最真实的物理信息。当然，读出电路本身也会不可避免地产生噪声，这也要求电路本身的噪声尽量低。然而对于读出电路来说，探测器信号和噪声信号都是电信号，本质上没有区别。幸好图 15 给了我们这样两个直观的印象：探测器信号通常具有特定的形状，而噪声的形状是杂乱无章的；探测器信号的大小（图中点的明暗）跟被探测粒子的能量有关，而噪声的大小通常只在一个平均值附近波动。

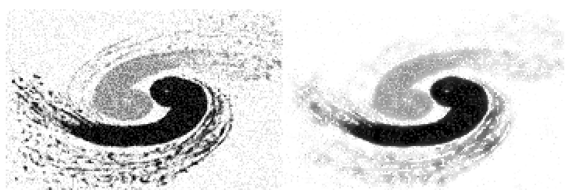


图 15 噪点均匀分布的照片（左）和噪声过滤后（右）的照片

大家对筛子应该都很熟悉：一堆形状不同的物体，形状跟筛孔相符合的将被自动选出，而其他形状的都将被过滤掉。读出电路中也利用了这个思想。探测器信号的特定形状本质上是由于电信号具有特

定的频率特性，就好比每个人的声音不同，其实是由于声带有特定的振动频率。如果我们能将低于和高于探测器信号频率的信号都剔除掉，就将只剩下探测器频率的信号，从而完成选择任务。我们将电路中的这个信号筛称为滤波器。图 16 就显示了粒子物理读出电路中的一种典型的滤波器结构。

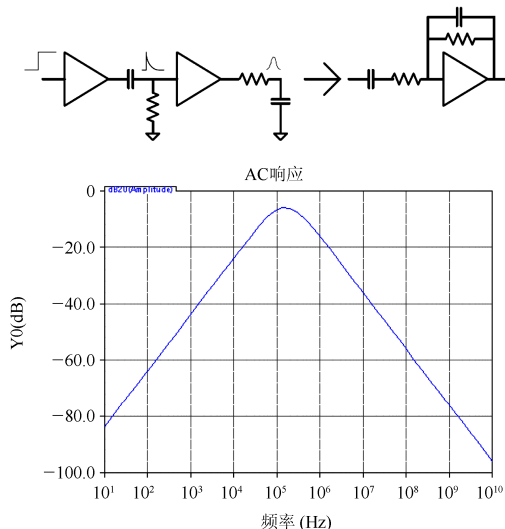


图 16 CR-RC 有源滤波器及其频率响应（时间常数 1 微秒）

我们知道，电容器是由两个极板构成，电荷无法从一个极板直接运动到另一个极板，这也因此赋予了电容器“通高频、阻低频”的特性。我们的滤波器中的核心器件还是这个神奇的电容，我们调节电阻、电容值的大小，使电路允许通过的频率正好等于探测器信号频率，这样就使非探测器频率的信号都被滤掉，只剩下目标信号。不幸的是这只是非常理想的情况，实际中探测器信号有一定的频率范围，既有低频成分，也有高频成分，我们在滤掉噪声的同时也使探测器信号受到了损失，就好比图 15 中右图的亮度变暗，细节变得模糊；同样，任何频率都有噪声的存在，在我们的允许频率内，该频率的噪声也原样通过了电路，溜到了输出端，图 15 中我们也能看到这部分噪点的存在。但是，纵然有许多不理想，我们仍保留了大部分有用信号，剔除了绝大部分噪声，使信号分量和噪声分量的比例相比未处理前大大增加了，即噪声的影响被大大降低了。

为了进一步扩大战果，在滤波之后我们进一步利用了噪声的第二个特性，即噪声的大小通常只在一个平均值附近波动。图 17 给出了一个形象的比

喻：站在一片高高杂草中的小孩我们可能难以发现，而大人的存在却一目了然，即使是在同一片杂草中。这表明，只要信号的大小显著大于噪声，那么我们也很容易地将目标信号同噪声分辨开。可以给电信号的大小设定一道关卡，凡是大于关卡的信号，就认为是探测器信号，关卡以下的信号，都认为是噪声。我们将这道关卡称为甄别阈。显然，应该将甄别阈设定得比噪声的最大幅度稍大，这样能够保证将所有的噪声都排除；同时应该在此基础上将甄别阈设定得尽量低，因为在设定甄别阈的同时，也会将一些幅度很小的有用信号当作噪声排除，需要尽量减少这部分的损失。

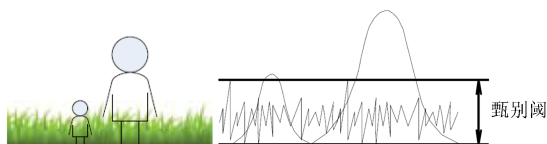


图 17 放大甄别思想和甄别阈的设定

像素探测器输出信号的问题在于其信号幅度很小，如果直接进行甄别，可能同噪声的区分不太明显，这样将损失掉很多真实信号。因此还需要利用放大器将信号放大。生活中有很多放大器，喇叭能够放大声音，使声音的响度增加，但是仍然能够分辨声音的来源，这是因为声音的频率没有改变。电放大器也是这样一种器件。然而它在放大信号的同时也对噪声进行了等量的放大，幸好放大器没有改变频率特性，所以我们还是能够配合采用滤波的方法，一方面得到较大的探测器信号，另一方面增大信号和噪声的区别，从而很容易地利用一道甄别阈将信号分辨出来。

值得注意的是，噪声是无处不在的，放大器本身也会产生噪声，因此我们应该让滤波器和甄别器两者紧密相连，避免因额外添加的中间过程使本来取得的滤波成果变差，于是最终演变成了图 18 中读出电路经典的“放大-滤波-甄别”结构。

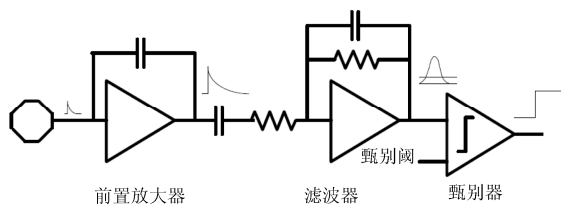


图 18 像素单元电路：放大-滤波-甄别结构

读出电路之后的任务就根据粒子物理实验的需

求而五花八门了。甄别信号是否过阈的“0”和“1”标志，实际上将敏感的信号大小信息（称为模拟量）转换为了对噪声不敏感的二进制信号（称为数字量）——即使噪声增加到一个相当大的程度，“有”就是“有”，“无”就是“无”。于是我们可以利用甄别信号对一段时间内到达的粒子数进行计数，从而反应图像强弱的变化；利用芯片内的数字秒表（计数器），也能测量甄别信号出现的时间，分析不同位置像素单元发生事件的因果关系；甚至还能测量放大滤波后信号的大小，即不经过甄别器而直接测量粒子的能量，获得第一手的能量测量数据。然而不管需求如何变化，“放大-滤波-甄别”方法都是粒子物理实验中读出芯片进行信号处理的主要手段。

本来，对一般探测器来说，读出电路的任务到这里就算告一段落了。然而每个像素单元间都不是独立的个体，它们需要组成一台精密相机，只有当每个单元在相同输入时都给出相同输出，最终的照片才会反映真实的世界，否则有的单元亮度很高，有的单元信号基本不放大，最后就会出现图 19 中的哈哈镜效果。这样的相机也肯定无法用来测量精密密度要求非常高的粒子物理事件。因此像素探测器还要求很好的像素单元一致性，不光是放大器的增益，还包括滤波器的允许频率，以及各个单元的甄别阈等。由于单元数很多，这些不一致性大小的随机分布最后都将等价为电路的噪声。不幸的是，集成电路工艺在制造过程中将不可避免地引入不一致性。为了抵消这种不一致性，我们只能首先测量每个单元的实际甄别阈，然后利用一个可控制的修正器，人为地将每个单元的阈值修正到一个统一值。只有完成了这一步，所有的像素单元才能统一工作，否则永远只能各自为阵，无法给出整幅粒子物理的图像。



图 19 凸面镜（非平面镜）和增益不一致时导致的图像畸变

五、如何存储？——最后的考验

现在看起来探测器微弱的信号经过读出芯片的

处理后终于安全了，然而九九八十一难，克服了最后一难才算功德圆满。虽然像素单元将一切都处理得很好了，但是不要忘了，我们的单元总数是巨大的，如何将处理完成的单元信息储存下来将是我们面临的最后一个难关。

显然我们不可能为每个像素单元提供一台计算机专门处理，只能依靠数量有限的信号线将单元信息依次传出，发送给计算机。好在读出线路留给我们的数字信号已经不像探测器信号一样娇弱，抗干扰能力比较强，也适合远距离传输，于是我们可以灵活地采用各种手段，从像素单元中收集信息。

研究中小学课堂如何收作业能给我们很多启发。无论是由小组长负责将每个组员的作业依次收集，再交到学习委员手中，还是每排从后往前依次将作业往前传，都是老师们根据长期经验总结出的一套高效的作业收集方式。它们的特点是，基本上每个人都有作业需要提交，采取的无意义操作很少；而采用的这两种方式都可以仅仅利用单一通道或人员完成高效的收集。类似的方法也用在像素单元普遍工作，信息量很足的情况。对应于小组长收作业的方式，称为令牌轮询方式。当令牌有效时，像素单元占用公共信号线，将本单元信息传出，然后将令牌传递给同列相邻的下一个像素单元，这样每列只需要一根公共信号线就能完成全部信息的有序送出。而从后往前依次传递，对应串行链的传输方式。不需要通过小组长（令牌）的审查，直接将所有信息从前往后依次输出。当有少量空闲单元时，串行链方式可能会花费稍多的读出时间。

相对而言，如果课堂中有人举手，将吸引全班同学倾听他的发言，则是另一种有效的信息收集方式。可以想象，这要求有发言要求的人比较少，否则如果全班都举手，一来需要老师一一允许依次发言，二来其他同学都要等待前一位同学发言完毕才能轮到自己。显然，当举手的同学很多时，一一询问是否发言是非常浪费时间的。对应像素芯片中的读出方式称为触发方式。芯片中任何单元有粒子信号时，都将引起全芯片读出单位的注意，尽快处理该信号。这种方式比较适合于事例率高，但粒子击中单元较少的情况。

这里看上去讲的还是信息的引出，实际上正是如何储存的关键问题。如同蓄满水的水池需要通过有限大小的管道排水，我们也不可能瞬间将所有的

单元信息取出，然后要求计算机立即把这些信息储存下来——不要忘了像素数量是巨大的，这要求传输、处理和保存的可能是每秒数太(1太 = 1兆兆 = 10^{12})字节，约相当于50部蓝光高清电影的大小。没有任何一种数据传输方式（总线协议）能实现这样高速的传输，没有任何一台计算机能完成这样高数据率的处理，也没有任何一块硬盘能将这样大的数据量瞬间储存。这也就是为什么家用相机从来无法号称是高速相机。即使单反已能实现很高精度的拍摄，却需要较长时间的存储过程，如果需要的话，每张照片也是几十兆字节的大容量。高速配上高精度，就需要付出相当的代价，需要一整套设备的支持。我们也只能在像素单元暂存的海量信息中拉出几条数据流大水管，使信息尽量快地流入到计算机和硬盘中进行处理和存储。得益于计算机迅猛发展，数据处理效率也越来越高，使得这样大的数据量最终能被计算机接收并处理，在硬盘上找到归宿，否则粒子物理学家可能只能退而求其次，采用较少的单元数降低精度，或者降低粒子事件率来降低速度，使好不容易得到的数据不会因为无法储存而浪费。

六、奋战在枪林弹雨中的“战地记者”

越精密的仪器就需要越仔细的保护。我们可以想象，将一台相机直接靠近一枚炮弹的落点进行拍摄，对这台相机的稳定性将提出多大的考验。更何况我们的像素探测器需要常年累月的记录高能粒子炮弹的对撞信息。粒子炮弹对撞后的弹片——高能次级粒子不断的轰击我们的探测器和读出电路，将对敏感的硅晶体造成各种瞬间或持续的影响。水滴石穿，绳锯木断，何况是粒子炮弹数十年如一日的不断轰击？相比隐蔽在后排的各种其他探测器，粒子炮弹对像素探测器的影响要大得多。这些炮弹一方面有可能将硅晶体中的原子撞离它原有位置，影响晶体中的载流子浓度，另一方面这些带电粒子有可能停留在氧化绝缘层上，将电荷积累下来，形成一个逐渐变强的电场同外加电场相对抗，阻止PN结的形成。天长日久，探测器的性能将越来越差，最终无法使用。对于读出电路来说，除了上面这些效应外，高能粒子还有可能瞬间改变读出电路的一些记忆信息，例如将已保存的甄别信号从“1”变为“0”，就好比全黑的照片上突然出现一个白点。更有甚者，某些极高能量的粒子还有可能造成读出电路局部的短路放电，使电路烧毁，造成永久性的致

命损伤。

为了尽量延长像素探测器的寿命，人们一方面采用增加外加电压等方法抵消电荷效应，另一方面改进半导体工艺，试图降低辐射损伤的影响。对于记忆单元，也采用容错设计来提高它对高能粒子干扰的抵抗能力。不过这些抗辐射加固方法还没有从根本上解决辐射损伤问题，虽然比起过去，像素探测器的寿命已经大大延长，但毕竟还是有限的，大约经过十年左右的使用时间，就需要考虑采用一套全新的探测器来更换已经老化的设备。

七、像素探测器的昨天、今天和明天

许多新粒子的发现，都得益于当时的先进技术和新探测器的研究。利用照相径迹技术的鼻祖——威尔逊云室，物理学家发现了正电子、 μ 子等粒子；利用核乳胶技术，发现了 π 介子、K介子等。这些都是照相径迹技术在昨天取得的辉煌。

虽然经历过低谷，像素探测器今天又重新站在了粒子探测的第一线——最靠近对撞中心，事例率最高，位置分辨率最高，设计最精密。它重新代表了粒子探测器领域的最前沿。今天，大型强子对撞机（LHC）中的几个实验 ATLAS、CMS 等正在紧张地寻找传奇的希格斯粒子，像素探测器正在其中发挥着举足轻重的作用（图 20）。以 ATLAS 实验的像素探测器为例，每个像素单元的尺寸仅仅 250 微米长、50 微米宽。由于每个单元的读出电路同时测量了粒子的能量、到达时间等信息，使得位置测量的精度最终能够好于 10 微米。与此同时，每平方厘米的面积内，每秒的平均击中粒子数将达到惊人的四亿次，这使得每块读出芯片每秒将有 20 兆字节的信息需要输出并被储存，而整个像素探测器共有数千块这样的读出芯片，还需要采用特殊的压缩算法才能将信息读出。即使这样，每秒仍然有几十吉字节的信息量。对于受辐射损伤最严重的像素探测器来说，每块像素芯片需要承受 250 兆拉德以上的总辐射照射量，相当于仅一克的物质承受 2500 焦耳的能量。即使采用了最先进的工艺和电路设计，探测器整体寿命预计也只有区区十年左右的时间。

这样先进的探测器系统源自于物理学家对真实世界的不懈探索——不断的改进探测器性能，改进制造工艺，利用先进技术，最终凝聚为像素探测器的四个最终目标：精确性、高速传输、高效自动的处理、以及高速可靠的保存。这同样也是其他所有

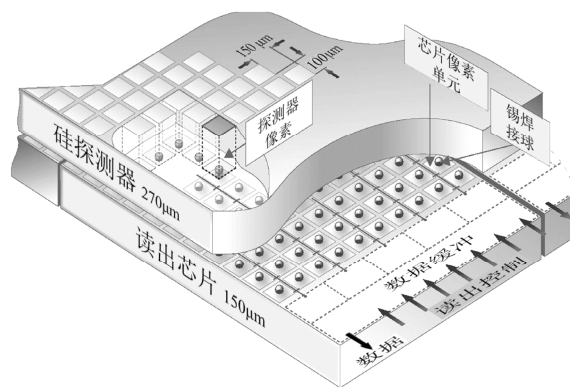


图 20 CMS 像素探测器结构和数据读出方案（图片引用自 DOI: 10.1016/j.nima.2008.11.114）

探测器发展历程的一个缩影。

物理学家并没有满足于今天比较完美的像素探测器形态，他们还想更精确的了解物质世界。他们想要更高的位置测量精度，为此想要更小的像素尺寸，于是他们考虑将读出电路折叠成几层设计，形成图 21 中三维结构的电路，将面积叠放到纵向，为

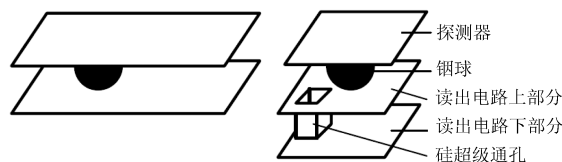


图 21 三维电路示意图，左为传统像素，右为三维像素结构

此需要采用最先进的硅超级通孔技术来连接读出电路的各层信号。他们想要更高效的处理，为此尝试采用最先进的、可以媲美 CPU 工艺的 65 纳米集成电路工艺，在更小的面积上实现更复杂的功能。他们还想要更高速的传输和存储，为此一系列高速总线传输协议、高速磁盘阵列技术都在火热的研究中。也许看上去很疯狂很异想天开，但昨天正是物理学家的疯狂和执着，才推动了今天如此复杂技术的实现。我们期待着看到像素探测器更精彩的明天。

（中国科学院高能物理研究所核探测与核电子学国家重点实验室 100049）

