

高速摄影的发展概况

中国科学技术情报研究所

一九七四年二月

毛 主 席 语 录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

目 录

引 言	(1)
(一) 各种类型的高速摄影机的进展	(1)
(1) 单次曝光照像系统	(2)
(2) 分幅照像系统	(3)
(3) 网格照像系统	(5)
(4) 扫描照像系统	(7)
(二) 高速快门的进展	(10)
(1) 轉像管快門	(10)
(2) 克尔盒快門	(14)
(3) 轉像管快門和克尔盒快門的比較	(15)
(三) 高速摄影发展趋势及其应用	(16)
(1) 轉像管的应用	(17)
(2) 克尔盒快門的应用	(23)
(3) 高速全息摄影的应用	(25)
(4) 脉冲光源及其应用	(28)
(四) 結 束 語	(37)
参 考 文 献	(39)

高速摄影的发展概况

引言

早在本世紀初就曾做过零星的实验，期望采用高速摄影“冻结”运动图像的办法来研究物体的运动状态。但因受当时技术水平的限制，取得的摄影速度是很有限的。虽然在二次世界大战期间，由于军事武器研究的需要，利用高速摄影做过一些工作，但是在战争期间是处于严格保密之下的，公开的甚少。直到50年代初高速摄影在国际上才公开并被公认为是揭示物质运动规律的有力工具。从52年第一届国际高速摄影会议算起，迄今，历时廿余年，共举行了十届国际会议。从历届的会议来看，不论从军用到民用，从工业到化学、生物，从宏观机械运动到微观机制的研究，无所不包，研究的范围和内容是日趋广泛和深入的，进展是迅速的。如标志高速摄影的重要指标——时间分辨率已经突破微微秒，另外两个重要特征指标是曝光时间和幅频。如曝光时间已短至 10^{-13} 秒，甚至更短，幅频已达 10^9 幅/秒甚至更多。这样就开辟了研究微观世界的道路。如目前已经进行的分子弛豫时间的测量，激光超短脉冲的结构，大功率脉冲激光所引起的自聚焦理论的验证，声子存在的时间，分子，原子跃迁以及生物有机反应机制的研究等。

（一）各种类型的高速摄影机的进展

为了研究高速运动现象，要求照像机具备以下条件，即

（1）必须有一个适当的快门。

(II) 快門必須和被研究的事件同步。

(III) 保証有足夠的光強，使被研究的運動圖像能記錄下來。

圍繞着這些要求，世界各國製造了各種類型的照像機，花樣繁多，但是概括起來不外乎以下幾類。現分別闡述如下：

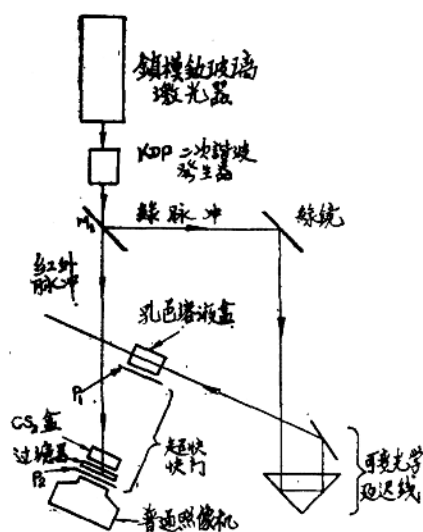
(1) 單次曝光照像系統：

只用透鏡，一個快門和記錄底片組成。十幾年來單次曝光照像技術有很大的發展，從單次閃光，電驅動克爾盒到光驅動克爾盒，曝光時間減少了四、五個量級，特別是鎖模激光脈沖的引入，可以獲得更窄的脈沖寬度和足夠強的曝光。如美國貝爾實驗室用釹玻璃激光器獲取了脈沖為10微微秒（一微微秒是萬億分之一秒）的曝光時間，拍攝下激光的二次諧波（綠光）在乳白溶液中的徑迹。

其裝置如圖（1）所示：鎖模釹玻璃激光器出射 1.06μ （微米）的紅光，其中占能量10%的光通過KDP二次諧波發生器轉換為 0.53μ 的二次諧波（綠光），經分束器通過由反射鏡，稜鏡組成的光學延遲綫路，射進盛乳白色溶液的透明盒。

其餘90%的光用於驅動克爾盒快門。通過調整光學延遲綫路可以做到使綠光脈沖和克爾盒快門同步，並在感光底片上留下徑迹。

這種裝置十分簡單，可以拍攝微微秒甚至更短暫時間內發生的事件。目前世界各國正在利用光驅動的克爾盒來研究分子，原子躍遷現象。雖然克爾盒具有超高速快門的特性，但它每次只能拍攝一張照片，



圖（1）激光脈沖驅動克爾盒取得的綠光徑迹的裝置

要得到多幅照片，必須用几套类同的装置进行拍摄（或用透鏡組来进行图像分离），国外有人利用克尔盒拍摄四至十二幅照片。

另外克尔盒还具有不完全关闭的缺点，一般千分之一的漏光是不不可避免的，在最佳条件下可达到万分之一的漏光。

现将十五年来世界上用单次曝光所达到的指标列表如下：

表 1

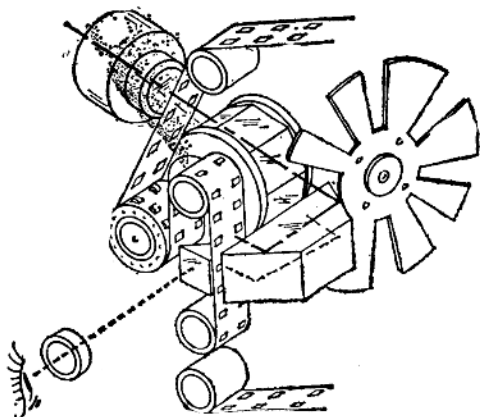
单 次 曝 光	曝 光 时 间 (秒)	
	至 1972 年	至 1957 年
亮度足以记录下轮廓的单次闪光	10^{-11}	10^{-8}
用于近目标反射光记录的单次闪光	2×10^{-10}	10^{-7}
视場为1米 ² 反射光记录的单次闪光	$1-10 \times 10^{-9}$	10^{-6}
电驱动的克尔盒	5×10^{-10}	10^{-8}
光驱动的克尔盒	5×10^{-12}	—
转像管	$10^{-10}-10^{-9}$	10^{-9}

（2）分幅照像系統：

可取得一系列連續曝光的像幅，其時間間隔由快門来分开。要取得多幅图像既可以通过移动感光底片的办法，也可以通过把图像分別轉到底片的不同位置使之感光的办法。在最簡單的分幅照像系統中底片作間歇运动，曝光时，底片停住，以保证图像不至于模糊。这就是所謂の間歇照像机。这种照像机受到底片在机內运动速度的限制，速度高了底片就会撕裂，一般的速率是几百幅/秒，如美国現已制成1000幅/秒の間歇式照像机，几乎接近底片撕裂的极限速度。

为了克服間歇式相机的缺点，采用了底片連續运动和光学补偿相結合的方法，通过旋轉的稜鏡使成像和底片同步移动，从而消除由于底片运动而带来的图像涂抹現象。

图(2)是美国研制的一种 Shotec照像机,其特点是把图像运动的补偿稜镜和带动底片的齿鼓輪安装在同一个軸上,这样就改进了记录的輪弧度同步。这种照像机虽图面較小和分辨率較低,但其速度还是比较高的。目前国际上利用底片連續运动和短曝光的办法能达到的速率为 10^5 幅/秒。



图(2)最近发展的Shotec照像机

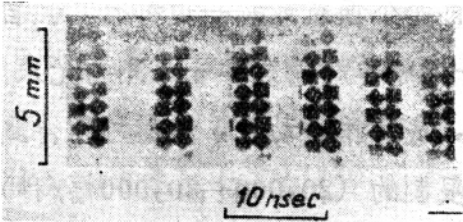
要进一步提高時間分辨率就必须提高鏡子的轉速和底片的运动速度。可是由于底片的机械强度,其运动速度是受到限制的,要克服这一点就要在轉速增加时采取使底片不动的办法。

这种照像机是把被研究对象的图像通过一个迅速轉动的鏡子反射到一系列向心排列成弧形的透鏡組上。当反射光扫过透鏡組时,在每个小透鏡的焦点处的底片就有一幅图像。用这样的办法可以达到 5×10^7 幅/秒的速率。

法国已制成的一台机械光学照像机,用每秒9000轉的轉鏡,得到了最高幅頻为 $\sim 10^7$ 幅/秒,空間分辨率为50对綫/毫米,共144張面积为 6×6.2 毫米²的照片。应该指出,这样高的轉速是过去无法达到的,因为这种高轉速已超过了材料的抗張力,很容易引起轉动体的破裂。法国原子能委员会采用鈹材料或用硼纖維纏繞鈦合金制成的金属复合材料轉子以防破裂。并用气体軸承减少其摩擦,可达的轉子速率为10500轉/秒。

随着脉冲激光的出現,有人用曝光時間为3微微秒,間隔为10毫

微秒的激光脉冲，配合以扫描型的轉像管，取得了 10^8 幅/秒的幅頻見圖（3）。



圖（3）曝光时间为3微微秒，幅像时间间隔为10毫微秒的图像。

目前將高重复率脉冲激光和轉像管相联合，进行高速摄影已日趋广泛，有关轉像管将在后面再述及。現將国际上15年来采用的多次曝光方法和不同像机所取得的幅頻（即重复率）列表2进行比较：

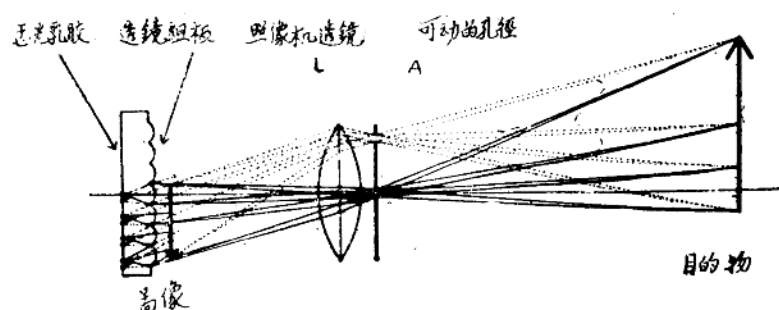
表 2

采 用 方 法	至72年 重复率 n (幅/秒)	至72年曝光时间 水平(秒)	至57年 重复率 n (幅/秒)	至57年前曝 光时间水 平(秒)
重复闪光放电重叠图像	3×10^5	5×10^{-9}	2.5×10^4	10^{-7}
重复闪光激光	10^8	$(2-3) \times 10^{-12}$	—	—
底片作间歇运动的(分幅)	800—1000	$1/2n - 1/100n$	300	$1/2n - 1/100n$
以旋转稜镜来补偿图像运动的分幅	10^4	$1/n - 1/100n$ (分辨率增加一倍)	10^4	$1/n - 1/100n$
底片做连续运动用瞬时曝光的分幅	10^5	$1/100n > t > 10^{-11}$	10^4	$1/100n > t > 10^{-7}$
用脉冲激光照明和转像管连续扫描的分幅	10^8	$(2-3) \times 10^{-12}$	—	—
分幅像机和旋转狭缝圆盘(或分幅透镜)	3×10^5	$10/n > t > 10^{-6}$	10^5	$10/n > t > 10^{-6}$
分幅像机和转镜	5×10^7	$1/n - 1/10n$	10^7	$1/n - 1/10n$
分幅像机和相位快门	10^8	$1/n > t > 10^{-9}$	10^7	$1/n > t > 10^{-8}$
分幅像机和相位火花源	10^8	$1/n > t > 5 \times 10^{-9}$	10^7	$1/n > t > 10^{-7}$
重复脉冲和扫描转像管像机	6×10^8	$1/3n > t > 5 \times 10^{-10}$	2.5×10^5	$1/3n > t > 5 \times 10^{-7}$

(3) 网格照像系統:

这是不同于(2)的一种連續記錄方法。它是用一系列的快門或像机彼此平行地使用，而每个像机或每一道都有其独自の物鏡給出图像之間的像差。也可用一个簡單的物鏡和一系列的光束劈裂裝置配合使用。

在高速摄影中，底片作运动时，虽然可以得到較多的幅面，但底片的运动速度是受限制的（20,000—30,000幅/秒），因此幅頻也小，当底片不动时，可以获得較高的幅頻，但是幅数比較少，这两者之間是矛盾的。利用透鏡网格进行图像分割就可以解决此矛盾，这种方法实际上是把图像分割成許多画点交織在一張底片上，这样就可获取 10^8 — 10^9 幅/秒的幅頻的成百上千張照片。基于以上思想这种像机可以通过移动感光片，透鏡网格或孔徑的办法进行照像。見图（4）。



图（4）可动孔徑的网格照像机

今就孔徑运动为例加以說明如下:

A代表可动的孔徑，被摄物經過孔徑成像在透鏡网格后的底片上，实綫表明孔徑在中心位置时的光程，虛綫表示孔徑在边緣位置时的光程。这种相机在苏联最为发展。

另外利用光学纖維分割图像的方法可以 10^5 幅/秒的速率和低分辨率得到多張照片，或以 10^6 幅/秒的速率得到几張照片，用这种办法摄影15年来沒有取得什么进展。由于光学纖維高速摄影設備要求簡單易

做，因此对分辨率要求不高的摄影来说，这种方法还是可用的。

这种摄影机是用压缩空气驱动活塞，活塞带动感光板，在光学纤维的输出端滑动进行拍照的。显然其分辨率取决于光学纤维的直径及感光板的滑动速度，另外值得注意的是光学纤维输出端与感光板之间的间距应尽量减小为佳，其间距越小，图像越清晰。

现将世界上的图像分割照像机十五年来的进展列表 3 如下：

表 3

类 型	重复频率 幅/秒	
	至1972年	至1957年
在不透明衬底上有清晰的线或洞的简单分割网格	10^5-10^6	10^5-10^6
简单的狭缝网格加转镜	10^8	10^8
透镜网格，孔径扫描	10^6	2.5×10^5
具有能机械移动的透镜网格(包括电影摄影直到2000倍)	10^5	10^5
长序列低分辨率的纤维光学分割	10^5	10^5
短序列每幅面宽度有200个信号的分辨率	10^6	—
苏联的透镜网格加转镜	10^9	$\sim 10^8$
透镜网格或狭缝网格加转像管	$>10^9$	$>10^9$

(4) 扫描照像系统：

是对所发生事件采用线切取元的方法，即把事件的图象聚焦到一狭缝上，通过狭缝的光被聚焦到照像底片上，然后在垂直于狭缝方面的底片上进行扫描。

这是一种应用日趋广泛的照像系统，实际上，将以上讲的网格系统中的透镜组换成一条狭缝并把图像直接聚焦到照像感光板上，不再通过透镜，就成为扫描照像机了。由于转像管既能适合高速摄影的要求，又可获得极高的幅频，因此当前发展高速和超高速相机都着重采用转像管的办法(1945年前，由于它用于军事研究而处于严格保密状态，现已被广泛应用于高速摄影了)。在这里介绍一下这种转像管的

簡單机理和新近发展情况。

轉相管如图 (5) 所示, 是一真空管在其一端装有光阴极, 入射图像在此光阴极上轉換成光电子图像, 电子图像通过一电子光学系統射到熒光屏上 (实际上是把光电子加速, 使其获得足夠的能量来激发熒光屏上的物质) 在那里再构成一幅可見光图像, 然后, 用照像底片把它記錄下来。

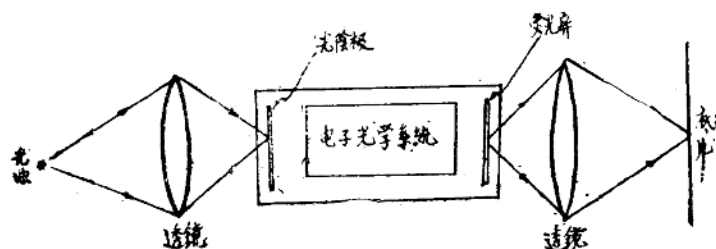


图 (5) 轉相管基本原理图

外来入射光綫从光阴极上打出的光电子数取决于入射綫的波长和强度, 在已知波长的情况下, 其光电子流正比于照度, 光阴极的灵敏度由符号 S 来表示, 一般 S_1 系指銀-氧-鋇, S_9 系指銻-鋇, S_{20} 系指銻-鋇-鈉-鉀光阴极而言。

从熟知的爱因斯坦方程不难算出, 光阴极表面发出的电子最大能量为一电子伏。

$$E = h\nu - \phi$$

ϕ 是电子的逸出功 (或称功函数), 一般为 2 电子伏。 $h\nu$ 是光子能量, 一个 (藍) 光子的能量約为 3 电子伏。

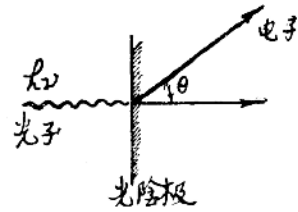
阴极发射电子的分布, 近似于餘弦分布見图 (6)。这是一个很重要的量, 在一些轉相管中, 它决定了時間分辨率, 而空間分辨率是动量的二个分量 ($P\cos\theta$, $P\sin\theta$) 的函数。因此, 为了提高時間分辨率就必须尽量减小光电子飞越時間, 这一点从下式不难看出

$$\Delta t = \frac{m \Delta u}{eE}$$

Δu 是光电子发射速度的半宽度，

E 是靠近光阴极处的电场，

e ， m 分别是电子的电荷与质量。



图(6) 光电子发射示意图

由此可见，增加光阴极附近的电场 E 就可以减少 Δt 时间。这是当前世界各国改进转像管提高时间分辨率的一个主要努力方向（另外的重要措施是提高扫描速度，如苏联现已有扫描速度为光速两倍的转像管），英国 E.E.V 把 P₈₅₅ 管子的电场提高到达 5000 伏/厘米。从而获得的时间分辨率为 1 微微秒。当前，苏联的转像管已取得时间分辨率为 0.5 微微秒。

这些带有被研究事件信息的光电子在电子光学系统中被加速到具有 ~10 千电子伏的动能，使每个电子打在荧光屏上可以给出 ~1000 个光子。因此对于量子转换效率为 10% 的光阴极，通过转像管，不仅光强不会减弱，而且还会大大地增强，这就是有时把转像管做为像增强器用的道理。从荧光屏发出的光谱成分取决于荧光物质，用符号 P 表示，如荧光屏是 P₁₁，其荧光物质就是活性银硫化锌，它在波长为 ~4700 埃处有一最大输出。

顺便提一下荧光屏的制备工艺要点，因为荧光屏的制备质量对高速摄影是相当重要的。当荧光物质沉积在玻璃表面上之后，还要复盖一层很薄的铝膜，但它并不影响电子的穿过，这样做可起到以下的重要作用：

(a) 可作导电用，防止荧光物质的充电。

(b) 可以把荧光物质所放出的光反射到记录底片的一方以增加

感光強度，另外不致于有反射到光陰極上造成反饋，從而產生不穩定性。

(c) 防止沒有被光陰極吸收的入射光直接射到熒光屏上，產生過亮的光點使圖像失真。

現將15年來掃描照像機所取得的進展列表4如下，進行比較。

表 4

掃 描 照 像 機	時間分辨率 (秒)	
	至1972年	至1957年
掃描記錄鼓輪像機	5×10^{-9}	10^{-7}
掃描記錄轉鏡式單轉子	2×10^{-9}	10^{-8}
掃描記錄轉鏡式多次反射	10^{-10}	0.25×10^{-9}
夏定極限像機	0.25×10^{-9}	0.25×10^{-9}
偏轉轉像管像機 (一般)	$(2-3) \times 10^{-12}$	$10^{-10} - 10^{-11}$
五極增強轉像管	0.5×10^{-12}	—

(二) 高 速 快 門 的 進 展

(1) 轉像管快門

要提高攝影的速度，關鍵在快門。具有代表性的是英國IMACON型管子，它是在蘇聯PLM型管子基礎上發展的一種帶偏轉式快門的轉像管。

管子的布局是這樣的，電子束穿越窗孔的時間即為曝光時間。因此，要縮短曝光時間，只要使偏轉電子束的電壓迅速變化就可達到。

實際應用時，是在快門上加一正弦波電壓，當正弦波通過零點時即曝光，因此每一周期有二次曝光。通過調節振幅，可以使曝光時間為兩幅之間的時間間隔的1/5。

為了防止在記錄底片上的行跡現象，就必須在補償板上加上一個

电压频率，其振幅与快门的波相同的正弦波，以保证在曝光时间内图像基本上不动。但在事实上，由于补偿板的杂散电容和电感。还是会引起一些附加移动的，不可能完全补偿。实验表明，如果将曝光时间取为两幅之间间隔的 $1/5$ ，则图像是相当清晰的。为了不使图像重叠在一起，还要附加一个阶梯形电压，这样就可以获得上下相间的不同幅面了。

在早期的管子上是采用连续的正弦波，现在改用电子线路产生的正弦波和阶梯形电压，它们在触发脉冲到来以前是静止的。这样一来功率就大大减少，可达50伏安，以致于不需要外加电源，仅靠像机本身的功率就够了。这样的转像管就轻便得多。典型的IMACON管子指标为 $5 \times 10^4 - 2 \times 10^7$ 幅/秒曝光时间500毫微秒，帧幅间隔1微秒左右。

IMACON管子在正常情况下，一般是保持在关闭状态的位置上直至有触发信号来到，在触发信号来到短暂时间后，才使正弦波开始与被研究的事件同步的。这样就势必漏掉触发信号来到和开始扫描时间之间的初始信息，而这些初始状态的信息往往是非常重要的。为此，就发展了“等待”同步法技术，这种方法是在触发信号来到以前就加以预脉冲，快门即开始振荡，因此就不至于再漏掉初始状态的信息了。用这种预脉冲式转像管，已经可以得到 10^7 幅/秒速率的不漏信息的十数张照片。

要进一步提高达 10^8 幅/秒的速率，靠IMACON管就不够了。改进的办法是不再利用过去那两对偏转板，而是在一个偏转板上加以锯齿波形，其频率必须要在100兆赫以上（这种锯齿波是用一个正弦波加一定振幅的二次谐波组成，如 $\sin \omega t - 0.22 \sin 2\omega t$ ），而在另一个偏转板上加以由单冲程系统组成的斜波，如图（7）所示。

像机的同步是通过触发斜波发生器和事件来实现的。这种像机已

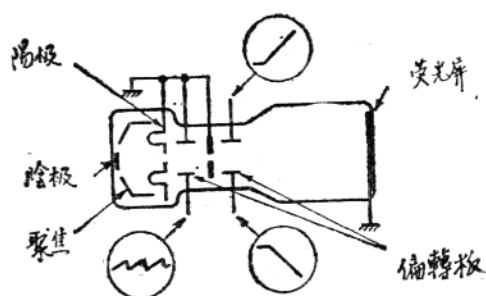


图 (7-1, 2) 新型转像管偏转器及其锯齿波型

达到 3×10^8 幅/秒的幅频，2 毫微秒的曝光时间和 1.5 对线/毫米的空间分辨率。进一步还可提高达 6×10^8 幅/秒，1 毫微秒的曝光。

下面表 5 列出目前国际上一些转像管的水平，以作比较。

苏联五级增强器的 Picochron 管见图 (8) 所示，其时间分辨率已达 0.5 微微秒，还准备进一步提高扫描速度，增强电压，改进信噪比以提高时间分辨率达 10^{-15} 秒。

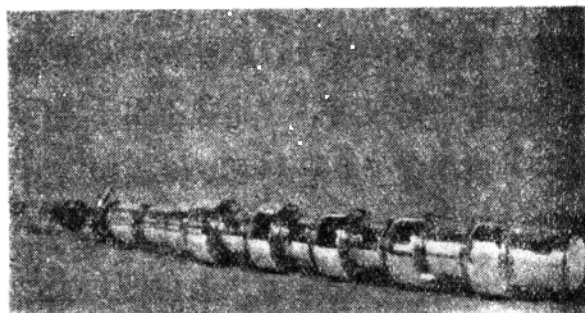


图 (8) 苏联的具有五级增强器的 Picochron 管
其时间分辨率为 5×10^{-13} 秒

应该指出，当前国际上为了提高转像管的时间分辨率，主要是靠增强光阴极附近的电场强度和提高了扫描速度（数倍于光速），其次就是改进光阴极的表面电阻以及电子在光阴极和屏幕间飞行时的电子库

表 5

国 家	转像管的技术指标		达到的时间分辨率	
美 国	触发与扫描之间起伏为100微微秒 微道板装在转相管内, 做为增强管用, 能 拍摄持续时间为100毫微秒的自发光过程。 扫描速度2厘米/毫微秒 光增益 10^3 。		4—7微微秒	
法 国			10微微秒	
北 爱 尔 兰			目前 <5 微微秒 拟进一步提高达1微微秒	
英 国	光 阴 极 型	电子发射速度(米/秒)	$P_{855}(E=600$ 伏/厘米)管子	$P_{855}(E=5000$ 伏/厘米)管子
苏 联	S_9 光子能2.3电子伏	2.2×10^5	20微微秒	2.4微微秒
	S_1 光子能1.6电子伏	1.4×10^5	13微微秒	1.5微微秒
苏 联	UMI-93SK型转像管 近 S_1 光阴极处的电场为200静电单位 三极光增强器增益达 10^5 偏转系统的基振频率为1千兆赫 空间分辨率为40对线/毫米 扫描速度为 3.3×10^{10} 厘米/秒		1 微微秒	
苏 联	Picochron转相管 五级增强管 电场为20静电单位 扫描速度 6.6×10^{10} 厘米/秒		0.5微微秒	

论相互作用等。这些都是很重要的措施。但即使这样, 估计用转像管达到 10^{-15} 秒的时间分辨率还是很困难的。因为到目前为止, 由光子引起的电子发射时间的间隔还是以 10^{-14} 秒来度量的, 如果找不到发射时间更短的光阴极, 是不可能期望用转像管来研究小于 10^{-14} 秒的信息的。

要研究小于 10^{-14} 秒的过程, 就必须考虑新的快门机理, 如克尔盒的双折射效应和电子极化效应等。

(2) 克尔盒快门

进入到微观机制的研究时，要求的时间分辨率在 $0.1-0.01$ 微微秒的范围内，这时过去的一切摄影机都变得无能为力。就不得不依靠曝光时间更快的克尔盒快门了。

克尔盒的工作原理是将各向异性分子（如，二硫化碳，硝基苯，苯等分子）组成的液体置于电场内，它就具有象单晶体似的性质，产生双折射现象。双折射的值正比于加在液体上的电场强度的平方。无电场时，置于两正交偏振片之间的各向同性液体是不透光的，如果将一足够强的电场加到液体的电极板上，液体就产生双折射，并使光透过。用这种电子学办法目前是很难得到上升时间为 10^{-10} 秒的脉冲。所以进一步提高脉冲的速率必须利用快速的光脉冲，利用光脉冲中的电场部分来引起液体的双折射，但是在没有出现激光前要产生具有足够强的电场强度的光是非常困难的。激光问世后，是很容易获得电场强度为几百万伏/厘米的相干光，用以引起双折射现象。所以目前的最快速快门就是用短暂时间的激光脉冲所触动的。

这样快门在脉冲通过就透光，脉冲中断，光就透不过。实际上这种快门的最短时间取决于分子各向异性弛豫时间。目前对二硫化碳弛豫时间的直接测定值是 2 微微秒，采用脉冲的时间压缩法还可以短到 3×10^{-13} 秒。

用直接测量法，目前还没有证实是否存在短到 $0.1-0.01$ 微微秒的时间（尽管用消偏振散射光的谱线宽度间接方法已测量到各向异性分子的弛豫时间）。如果存在，那么利用二硫化碳还可能达到 $10^{-13}-10^{-14}$ 秒的瞬时曝光。

如果再进一步，要测量更短于 10^{-14} 秒时间的过程，利用液体的克尔效应就不行了，必须考虑同样引起双折射的电子极化效应。在玻璃