

红外探测器

(内部资料)

红外情报协作小组

一九七六年十一月

73.7745

编 译：红 外 情 报 协 作 小 组

印 刷：天 津 市 第 一 印 刷 厂

出版发行：天津市（15）215信箱第一资料室

4169

毛主席语录

认真看书学习，弄通马克思主义。

思想上政治上的路线正确与否是决定一切的。

要搞马克思主义，不要搞修正主义；
要团结，不要分裂；要光明正大，不要搞
阴谋诡计。

抓革命，促生产，促工作，促战备。

极其悲痛地哀悼伟大的领袖和导师 毛泽东主席逝世

中国共产党中央委员会
中华人民共和国全国人民代表大会常务委员会
中华人民共和国国务院
中国共产党中央军事委员会

告全党全军全国各族人民书

中国共产党中央委员会、中华人民共和国全国人民代表大会常务委员会、中华人民共和国国务院、中国共产党中央军事委员会极其悲痛地向全党全军全国各族人民宣告：我党我军我国各族人民敬爱的伟大领袖、国际无产阶级和被压迫民族被压迫人民的伟大导师、中国共产党中央委员会主席、中国共产党中央军事委员会主席、中国人民政治协商会议全国委员会名誉主席毛泽东同志，在患病后经过多方精心治疗，终因病情恶化，医治无效，于一九七六年九月九日零时十分在北京逝世。

毛泽东主席是中国共产党、中国人民解放军、中华人民共和国的缔造者和英明领袖。毛主席领导我们党同党内右的和“左”的机会主义路线进行了长期尖锐复杂的斗争，战胜了陈独秀、瞿秋白、李立三、罗章龙、王明、张国焘、高岗饶漱石、彭德怀的机会主义路线，在无产阶级文化大革命中，又战胜了刘少奇、林彪、邓小平的反革命的修正主义路线，使我们党在阶级斗争和两条路线斗争中不断发展壮大。在毛主席的领导下，中国共产党经过曲折的道路，发展成为今天领导着中华人民共和国的伟大的、光荣的、正确的马克思列宁主义政党。

在新民主主义革命时期，毛主席根据马克思列宁主义的普遍真理，结合中国

革命的具体实践，创造性地规定了新民主主义革命的总路线和总政策，创建了中国人民解放军，指出了我国武装夺取政权，只能走建立农村根据地，以农村包围城市，最后夺取城市的道路，而不能走别的道路。他领导我党我军我国人民，用人民战争推翻了帝国主义、封建主义和官僚资本主义的反动统治，夺取了新民主主义革命的伟大胜利，创建了中华人民共和国。毛主席领导的中国人民革命的胜利，改变了东方和世界的形势，为被压迫民族和被压迫人民的解放事业，开辟了新的道路。

在社会主义革命时期，毛主席全面总结了国际共产主义运动正反两个方面的经验，深刻地分析了社会主义社会的阶级关系，在马克思主义的发展史上第一次明确提出了在生产资料所有制的社会主义改造基本完成以后，还存在阶级和阶级斗争，作出了资产阶级就在共产党内的科学论断，提出了无产阶级专政下继续革命的伟大理论，制定了党在整个社会主义历史阶段的基本路线。在毛主席的无产阶级革命路线指引下，我党我军我国人民乘胜前进，夺取了社会主义革命和社会主义建设的伟大胜利，特别是无产阶级文化大革命、批林批孔、批邓、反击右倾翻案风的伟大胜利。在幅员广大、人口众多的中华人民共和国坚持社会主义，巩固无产阶级专政，这是毛泽东主席对于当代所作的具有世界历史意义的伟大贡献，同时，为国际共产主义运动反修防修，巩固无产阶级专政，防止资本主义复辟，建设社会主义，提供了新鲜经验。

中国人民的一切胜利，都是在毛主席领导下取得的，都是毛泽东思想的伟大胜利。毛泽东思想的光辉，将永远照耀着中国人民前进的道路。

毛泽东主席总结了国际共产主义运动中的革命实践，提出了一系列科学论断，丰富了马克思主义的理论宝库，给中国人民和全世界革命人民指明了斗争的方向。他以无产阶级革命家的雄伟气魄，在国际共产主义运动中发动了批判以苏修叛徒集团为中心的现代修正主义的伟大斗争，促进了世界无产阶级革命事业和各国人民反帝反霸事业的蓬勃发展，推动了人类历史的前进。

毛泽东主席是当代最伟大的马克思主义者。半个多世纪以来，他根据马克思列宁主义的普遍真理和革命具体实践相结合的原则，在同国内外、党内外阶级敌人的长期斗争中，继承、捍卫和发展了马克思列宁主义，在无产阶级革命运动的历史上写下了极其光辉的篇章。他把自己毕生的精力，全部贡献给了中国人民的解放事业，贡献给了全世界被压迫民族和被压迫人民的解放事业，贡献给了共产

主义事业。他以无产阶级革命家的伟大毅力，同疾病进行了顽强的斗争，在病中继续领导了全党全军和全国的工作，一直战斗到生命的最后一息。他为中国人民、为国际无产阶级和全世界革命人民立下的丰功伟绩，是永存的。他赢得了中国人民和全世界革命人民衷心的热爱和无限的崇敬。

毛泽东主席的逝世，对我党我军和我国各族人民，对国际无产阶级和各国革命人民，对国际共产主义运动，都是不可估量的损失。他的逝世，定将在我国人民和各国革命人民的心中，引起极大的悲痛。中共中央号召全党全军全国各族人民，一定要化悲痛为力量：

我们一定要继承毛主席的遗志，坚持以阶级斗争为纲，坚持党的基本路线，坚持无产阶级专政下的继续革命。

我们一定要继承毛主席的遗志，加强党的一元化领导，坚决维护党的团结和统一，紧密团结在党中央的周围。要在两条路线的斗争中，加强党的思想建设和组织建设，按照培养接班人的五项条件，坚决执行老中青三结合的原则。

我们一定要继承毛主席的遗志，巩固工人阶级领导的工农联盟为基础的各族人民的大团结，深入批邓，继续开展反击右倾翻案风的斗争，巩固和发展无产阶级文化大革命的胜利成果，热情支持社会主义新生事物，限制资产阶级法权，进一步巩固我国的无产阶级专政。我们要继续开展阶级斗争、生产斗争和科学实验三大革命运动，独立自主，自力更生，艰苦奋斗，勤俭建国，鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

我们一定要继承毛主席的遗志，坚决执行毛主席的建军路线，加强军队建设，加强民兵建设，加强战备，提高警惕，随时准备歼灭一切敢于入侵之敌。我们一定要解放台湾。

我们一定要继承毛主席的遗志，继续坚决贯彻执行毛主席的革命外交路线和政策。我们要坚持无产阶级国际主义，加强我党同全世界真正的马列主义政党和组织的团结，加强我国人民同各国人民特别是第三世界各国人民的团结，联合国际上一切可以联合的力量，把反对帝国主义、社会帝国主义和现代修正主义的斗争进行到底。我们永远不称霸，永远不做超级大国。

我们一定要继承毛主席的遗志，努力学习马克思主义、列宁主义、毛泽东思想，刻苦攻读马列著作和毛主席著作，为彻底推翻资产阶级和一切剥削阶级，用无产阶级专政代替资产阶级专政，用社会主义战胜资本主义，为把我国建设成为

一个强大的社会主义国家，争取对人类作出较大的贡献，为最终实现共产主义而奋斗。

战无不胜的马克思主义、列宁主义、毛泽东思想万岁！

伟大的、光荣的、正确的中国共产党万岁！

伟大的领袖和导师毛泽东主席永垂不朽！

（新华社北京一九七六年九月九日电）

译 者 序

在反击右倾翻案风的斗争推动下，科技战线的广大工人、干部和技术人员坚持以阶级斗争为纲，认真学习毛主席的重要指示，发展和巩固无产阶级文化大革命的伟大成果，进一步贯彻执行科学研究必须为无产阶级政治服务、为工农兵服务，与生产劳动相结合的正确方向，努力赶超世界先进水平，为我国社会主义革命和社会主义建设作出新贡献。

遵照伟大领袖毛主席“洋为中用”的教导，为适应我国红外科学技术发展的需要，迎接全国红外材料和器件经验交流会的召开，出版了这本译文集，供从事红外材料和器件制造和研究的同志参考。

本译文集的十二篇文章译自英国出版国际性刊物《红外物理》(INFRARED PHYSICS) 1975年第15卷第4期，这些文章主要介绍三元半导体材料碲镉汞和碲锡铅的制备工艺、性能分析以及其在红外探测方面的应用，还涉及到电荷耦合器件的空间应用特性。通过对这些文章的分析，有助于我们了解和分析近年来国外在红外光子探测器件（包括列阵器件）研制方面的进展动向和水平。

由于时间仓促，编译出版工作难免存在不少缺点和错误，欢迎读者及时提出宝贵意见和批评。

红外情报协作小组

一九七六年六月

目 录

电荷耦合器件中的 γ 辐射噪声.....	(1)
碲镉汞中电子辐照产生的缺陷的模型.....	(11)
激光引起的 PbSnTe 和 HgCdTe 光伏二极管暂时退化的实验研究.....	(16)
PbSnTe 探测器的热限制.....	(20)
在适当减少背景辐射的情况下 PbSnTe 二极管的性能.....	(25)
Hg ⁺ 离子注入 Hg _{1-x} Cd _x Te 光伏探测器的进展.....	(31)
平面型 Pb _{0.8} Sn _{0.2} Te 光电二极管研制工作.....	(37)
用气相生长方法制备 8~14 微米光电二极管用的 PbSnTe 材料.....	(43)
通过表面分析来评定 Pb _{0.8} Sn _{0.2} Te 探测器的制造过程.....	(49)
碲锡铅扩散结探测器的探测率极限.....	(53)
用于红外辐射的 Cd _x Hg _{1-x} Te 光伏探测器的一些性质.....	(65)
光学浸没 HgCdTe 光电导探测器.....	(71)

电荷耦合器件中的 γ 辐射噪声

摘要: 全部实验结果表明, 用来读出探测器信号的电荷耦合器件 (CCD) 或用作信号处理电子装置的 CCD, 可以在高电离辐射环境下实时工作。进一步的工作应是在制造过程中提高 CCD 所能承受的硬度而耐受总剂量达 1×10^6 拉德的辐射 (Si), 并研究在与红外探测器相结合的电荷耦合器件中电离辐射的效应。用来读出探测器信号的 CCD 器件可以制成能够处理辐射产生的过量噪声, 并能处理探测器元件中产生的高虚警率。在 CCD 读出结构内直接产生的影响中, 预计主要是探测器中产生的电离辐射效应; 但许多影响因探测器的相对尺寸而异。在 CCD-MOS 场效应管结构中测得的 γ 辐射引起的过量低频噪声可能使需进行实时工作的空间传感器仅仅在 γ 辐射通量级很高的情况下出现疑问。有可能在 CCD 电子读出装置的输出端使用鉴别和避免的方法。在 CCD 电子读出装置输出端测得的 γ 辐射引起的脉冲, 其振幅是不一致的, 脉宽是变化的 (有些是时钟周期的好几倍)。

一、引言

本文讨论的工作是在 1974 年进行的。本工作的全部目的在于研究电离辐射对 CCD 的影响, 以验证在天然 (范爱伦带) 或人为的高辐射环境下用来作信号处理的优点。在未来的空间传感器中, 用来读出探测器信号或用作信号处理装置的 CCD 必须能在高电离辐射环境下实时工作 (并能经受得住这个环境)。因此设计了一个试验, 在 Co^{60} 环境下测试 CCD 在装上探测器的前后的工作温度下 (取得实时数据的) 工作能力。所以, 对所测 CCD 并未专门提高其耐总剂量的硬度, 并未尝试检验其生存能力。

二、器件选择

用于辐射试验的 CCD 器件考虑过许多种, 最好的选择对象是图 1 所示休斯公司的 2071 CCD 片。之所以最好, 是因为“表面金属”铝和“埋入金属”硅栅加 (负) 偏置, 把因总电离剂量而形成的正空间电荷所造成的阈值电压漂移降到最小。此外, 使用 2071 器件, 探测器电信号和 γ 辐射产生的电荷可用电子读出方式进行串联读出, 或可进行多路传输。根据在电子读出输出端上观察到的 γ 辐射效应的实时测量结果, 就可以研究探测, 鉴别和抑制电路技术。

试验了图 1 所示的片子, 它是个 141 位移位寄存器, 在胖零 1 扩散区 (FZ1 扩散) 有一电信

号输入。图2是该器件在Co⁶⁰环境下受试时的示意图。每一位的尺寸相当小(见图2),因此,从提高核硬度的观点来看,此器件是良好的选择对象。片上输出场效应晶体管的源输出器也相当小。

三、实验装置

图3是所用实验装置的示意图。使用了Delta公司的3900型实验室在77~300°K下试验2071CCD,为了取得最佳的CCD直流偏置并测量电压增益,通过胖零1扩散区接入了函数发生器输入电信号。为试验制作的专用试验性电子电路有:(1)用来加直流偏置的分泄电阻;(2)(对辐射屏蔽的)缓冲线路激励器,它激励CCD的电子读出装置输出信号,通过50呎同轴线从Co⁶⁰室接到试验监控室;(3)低噪声的低通七极有源滤波器(5和75千赫的-3分贝点),分别用来滤出10和150千赫的时钟分量。采用了专门设计的和Keithly公司103A

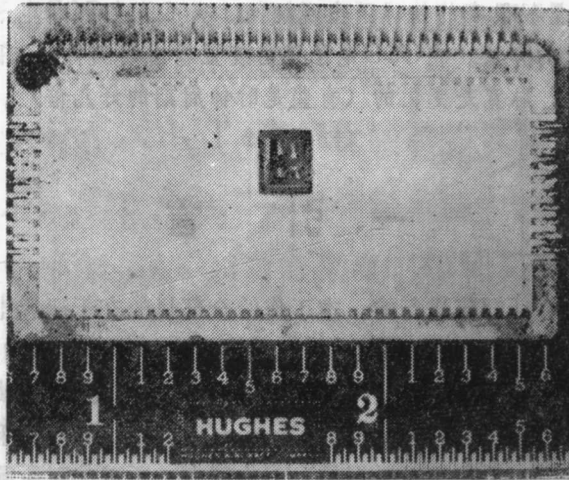


图1 辐射试验用的休斯公司2071CCD片子(74-30728)

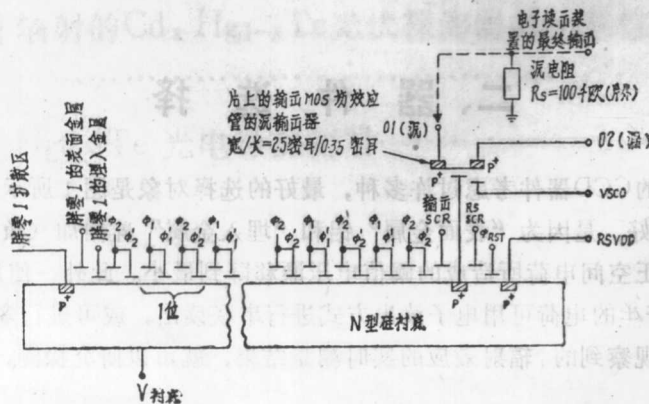


图2 辐射试验用休斯公司2071CCD(电子读出装置,串联输出,141位,每位尺寸 $w = 2.0$ 密耳, $l = 2.4$ 密耳/位)

型低噪声放大器 ($\times 100$ 和 $\times 1000$) 来测量输出信号和噪声频谱。如图 3 所示, 取得了示波器曲线、波形分析器测量结果和磁带记录。缓冲线路激发器 (2N 4392 结型场效应晶体管的

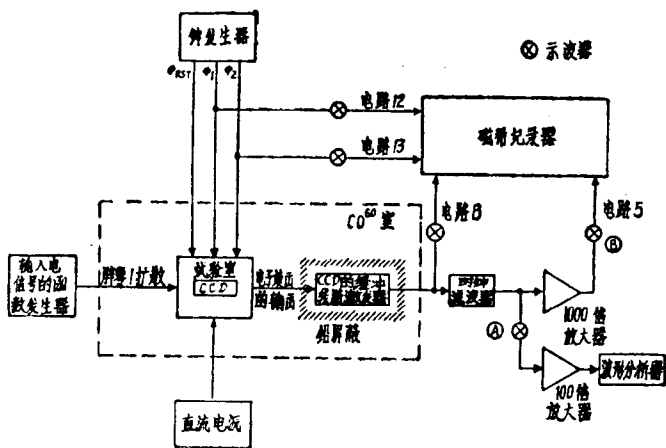


图 3 辐射试验装置

源输出器) 装在 CCD 电子读出装置输出端附近, 起变换阻抗的作用 (电压增益接近 1), 把 CCD 电子读出装置的有效输出电阻 (5 千欧) 降低到在缓冲器输出端上的大约 100 欧姆, 为了经过 50 呎的 50 欧同轴电缆观测 150 千赫以下的不畸变的 CCD 电子读出装置输出信号, 后一电阻是必须的。有源滤波器的增益接近 1, 它在 9 和 130 千赫下降 -40 分贝。为取得实时数据, 采用了 Ampex 的 AR1700 型宽/中频带的磁带记录器, 所记录的每个电路 (电路 5、8、12、13) 在各自的磁带上用放大 1000 倍的 1 毫伏方均根信号定标。磁带记录器的电子装置的起始频率约为 800 赫 (交流耦合的), 响应范围为 800 赫~400 千赫。

四、洁净环境下的试验结果

休斯公司的 2071 CCD 进行了一系列洁净环境 (即无 Co^{60} 照射) 试验。在两个钟频 (10 和 150 千赫) 下测得的电压增益、互阻抗和噪声谱与预计的理论结果相当一致。图 4 比较了在洁净环境下计算的噪声与测得的噪声。该图说明: 在低频下, 噪声谱中为主的是 CCD 输入的 $1/f$ 噪声、CCD 沟道输入热噪声和 MOS 场效应管的输出 $1/f$ 噪声 (片上的源输出器); 在接近钟频的高频下, 为主的是 CCD 的快速界面态噪声。

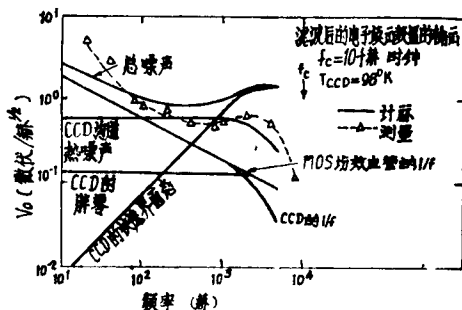


图 4 洁净环境下计算的输出噪声与测量的输出噪声, $f_c = 10$ 千赫时钟, $T_{CCD} = 98^\circ K$

五、Co⁶⁰环境试验结果

采用50千居里的源进行了Co⁶⁰环境试验。图3所示试验装置用来测量 γ 辐射引起的脉冲(电荷)特性,并用来测量在 $5 \times 10^7 \sim 5 \times 10^9$ 光子/厘米²-秒范围内过量方均根噪声与 γ 辐射通量的函数关系。在两种CCD工作温度(98和300K)和两种钟频(接近10和150千赫)下取得了测量结果。为避免CCD栅极阈值漂移所引起的直流工作点的明显变化,在低剂量时取了试验前后的数据和实时数据⁽¹⁻⁴⁾。因为没有专门提高受试器件耐受总剂量的能力,所以没有认真作耐受能力试验,而只是作了工作能力试验(取得实时数据)。试验是在多数空间传感器系统将要工作(及耐受)的整个 γ 辐射通量范围内进行的。

1. γ 脉冲特性曲线

γ 辐射引起的脉冲(电荷)特性曲线系在CCD电子读出装置的输出端记录在磁带上的,并用示波器示出。如图3所示,在CCD电子读出装置输出端的两个点上观察 γ 辐射脉冲,即在未滤波的电子读出装置输出端(电路8)上和时钟滤波器输出端(电路5)上。电路5的示波曲线是先经1000倍放大器(图3中的A点和B点)放大后取得的,因为滤波后的CCD电子读出装置的小输出脉冲必须先行放大,才能记录到磁带上。为了观察 γ 辐射引起的脉冲的特性,必须在对示波器扫迹作不同时间调整的情况下记录数据。在时钟分量(电路8)未滤波时,在CCD电子读出装置输出端观察不到 γ 辐射引起的电荷群。但是,在时钟滤波器输出端(电路5的A点和B点)观察到了 γ 辐射引起的脉冲。这些脉冲(或电荷群)很小,原因是CCD的位和(片上)输出MOS场效应管前置放大器都很小。这些 γ 辐射引起的小电荷群的净效应是产生过量低频方均根噪声,这在时钟滤波器输出端(电路5的A和B点)测出。

图5所示是,在Co⁶⁰照射前和照射时(实时),在已滤波的CCD电子读出装置输出端(电路5的A点)观察到的 γ 辐射引起的单个脉冲的特性曲线。在洁净环境下 $[\phi(E)=0]$,在时钟滤波器(~ 0.4 毫伏的振幅,0.09毫秒的周期)的后面仍能观察到小的时钟馈通脉冲。在调节的时间较长的情况下(~ 1 毫秒/格,图5b),在滤波后的CCD电子读出装置的输出端观察到 γ 辐射引起的脉冲,这表示 γ 辐射引起的脉冲中的低频部分(脉冲宽度比钟周期大好几倍)。在通量级较高时, γ 辐射引起的脉冲之间的平均时间较短,因为 T_{γ} (平均)与 γ 辐射转变率 F_{γ} (转变数/秒)成正比,而 F_{γ} 则与 γ 辐射通量 $\phi(E)$ 成比例,即 T_{γ} (平均) $\propto 1/F_{\gamma} \propto 1/\phi(E)$ 。显示器按分辨时钟输出(~ 0.35 伏振幅, ~ 0.09 毫秒周期)的要求调整时,在未滤波的CCD电子读出装置输出端(电路8)上观察不到 γ 辐射引起的脉冲。滤掉时钟分量后,较易分辨 γ 辐射引起的脉冲的特性曲线,曾试图通过缩小电压振幅的标度和改变时间标度来分辨未滤波的CCD电子读出装置输出端(信道8)上 γ 辐射引起的脉冲,但未取得有效的数据。

在已滤波的CCD电子读出装置输出端观察到的 γ 辐射引起的电荷群可能来源于受试器件的若干区域。在CCD电子读出装置输出端看到的 γ 辐射引起的脉冲的极性决定于在CCD片上不同的区域(即元件)内产生 γ 辐射转变的部位,因而决定于产生电子-空穴对的部位,

在胖零1扩散区的正常的输入电信号(胖零1 p^+ 扩散区上的正电压)可以看成是CCD电子读出装置输出端上的正极性电压脉冲,亦即注入空穴是定时传输并存储在漂移扩散区,因而激励MOS场效应管的栅极,使之更加正(栅极电压 V_G 下降)。这造成MOS场效应管源输出器从源到漏的空穴电流下降(一个负电流脉冲 $-\Delta I_D$),并表现为源电阻 R_s 两端的正输出电压脉冲(图2中的源电压 V_G 遵从 V_G)注入的可动空穴反型电荷降低了胖零1(埋入金属)存储电极下面的表面电势 ϕ_s (使 ϕ_s 更正)。正向负值变化的时钟脉冲 ϕ_1 和 ϕ_2 提高了表面电势 ϕ_s (使 ϕ_s 呈较大的负值),这就造成在未滤波的CCD电子读出装置的输出端观察到的负极性电压脉冲。 γ 辐射在衬底范围内引起的电子空穴对会提高载流子浓度和反向结漏电流,这决定于剂量等级(γ 辐射通量级)。在反向偏置的 p^+n 结区产生的电子空穴对会造成正或负的输出电压脉冲,这因在CCD片上的位置而异。在(宽度为 w)的耗尽区产生的电子空穴对、胖零1扩散区的少数载流子扩散长度 L_p 和MOS场效应管漂移栅的扩散会降低 ϕ_s (使其更正),这意味着 γ 辐射引起的脉冲将具有正极性。另一方面,在MOS场效应管源和漏的某些区域产生的电子空穴对将造成极性为负的、由 γ 辐射引起的脉冲,因为提高从源到漏的空穴电流就产生正的电流脉冲($+\Delta I_D$, V_s 电压更负),其极性与胖零1扩散区上正常($+$)电压输入信号产生的电流的极性相反。在加直流偏置的栅极区内产生的电子空穴对,其效应是变化的。栅极氧化层中的电离辐射使正空间电荷 Q_{ss} (在负电极附近俘获的空穴)和快速界面态 N_{ss} 增多。为使 Q_{ss} 、或 N_{ss} 明显增多,采取了相当高的剂量[$\geq 1 \times 10^4$ 拉德(Si)]。 Q_{ss} 增多,就使平带电压 V_{FB} 漂移(更负),因而 V_T 亦相应地漂移,并降低了 ϕ_s (使其更正)。提高 N_{ss} (快速界面态密度)会提高加总剂量时CCD的快速界面态噪声。在不同栅极的($W + L_p$)区域内产生的电子空穴对降低了 ϕ_s (使其更正),并使可动空穴电荷存储在MOS场效应管的漂移栅上,因而产生极性为正的 γ 辐射(引起的)脉冲。在MOS场效应管的栅极氧化物(漂移栅和VSCO)中产生的电子空穴对使栅极带正电,它产生负的空穴电流脉冲($-\Delta I_D$),因而使 γ 辐射引起的脉冲具有正的极性。但是,MOS场效应管栅极的($W + L_p$)区内产生的电子空穴对会使空穴电流提高,因而使 γ 辐射引起的脉冲具有负极性。最后,移位寄存器整个时钟栅内产生的电子空穴对会产生可动空穴电荷而定时输送给MOS场效应管的源输出栅(该栅带正电)。于是,在CCD电子读出装置的输出端观察到 γ 辐射引起的脉冲具有正极

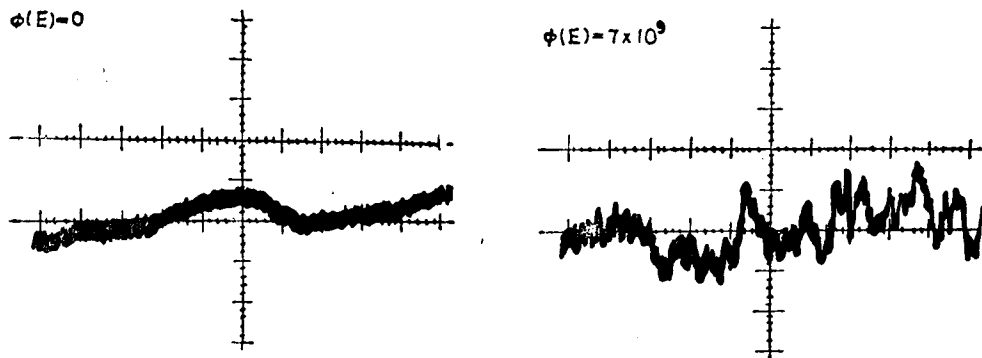


图5 γ 辐射引起的单个脉冲的特性曲线,经滤波的CCD电子读出装置的输出(信道5的A点,~11千赫时钟, $T_{CCD}=300^{\circ}K$), 1毫伏/格, 1毫秒/格。

性。所以，电离辐射会在整个CCD-MOS场效应管片子上产生电子空穴对，使 γ 辐射引起的脉冲具有 γ 辐射转变率型的脉冲分布，这样就会在CCD电子读出装置的输出端看到过量的方均根噪声。

2. γ 辐射引起的脉冲的高度

采用图 6 所示设备分析了在 CCD 电子读出装置输出端观察到的脉冲的高度。模拟磁带记录器(交流耦合的, 起始响应 ~ 800 赫)在10千赫时钟下是实时工作的。经滤波的 CCD 电子读出装置的输出(电路 5 的 A 点)经过一带通滤波器, 该滤波器的通带调整为0.01赫 ~ 5 千赫。模拟磁带减速为150千赫时钟的1/32, CCD 电子读出装置的输出通过0.01 ~ 400 千赫的带通滤波器。该滤波器的输出输送给模拟-数字变换器, 由其将数字数据输送给信息安排系统而把数据记录在数字带上。然后把数字带输送给Datacraft型计算机。该计算机采用快速付利叶变换程序来计算振幅频谱, 并将其输送给Gould 型打印机-标绘器。观察到正极性和负极性的 γ 辐射引起的电压脉冲都超过以伏(方均根)定标的给定阈值。在CCD电子读出装置输出端观察到的负极性脉冲, 大多数可能是在片上MOS场效应管源输出器内 γ 辐射相互作用所引起, 造成正极性脉冲的, 可能是在CCD片的任意数量的区域内 γ 辐射的相互作用。当 γ 辐射通量 $\phi(E)$ 增大时, 转变率(超过阈值的正或负脉冲数/秒) F_r^+ 和 F_r^- 增高, γ 辐射引起的脉冲的平均间隔时间 $T_r^+ \sim 1/F_r^+$ 和 $T_r^- \sim 1/F_r^-$ 下降。图 7 为测得的脉冲振幅谱, 根据计算机记录带对其作了分析。该频谱示出了脉冲振幅的分布, 其中大多数脉冲出现在计数阈值的附近。负极性脉冲的振幅谱与资料[5.6]所述在MOS场效应管源输出器前放上测得的相似。在电压振幅为150 ~ 225 微伏(方均根)的范围内(图 7), 看来正脉冲比负脉冲多, 预料这是由于造成正脉冲的区域在CCD片子上所占面积较大。有一个很好的例子, 即141位电子读出移位寄存器上复盖着时钟栅 ϕ_1 和 ϕ_2 (见图 2)。



图 6 = CCD 振幅谱分析所用的设备 (信道 5 的 A 点)

所观察到的阈值以上的电压脉冲(150 ~ 350 微伏方均根)的分布与 CCD-MOS 场效应管片子不同区域内产生的电子空穴对的分布相对应。每一 γ 辐射转变 \bar{N}_r 所产生的电子空穴对的平均数与 γ 辐射相互作用期间损失或存储的能量成比例^[7-9]。决定 \bar{N}_r 的有: (1) 工作区的尺寸, (2) 在工作区的衬底内二次电子的平均路程, (3) 工作区内金属的电离能, (4) 二次电子的平均能量。 Co^{60} 辐射的平均 γ 辐射能量 $E_r(\text{平均})$ 为 ~ 1.25 兆电子伏, 它处在 Compton 散射的范围内。^[7] \bar{N}_r 的简单表达式列于表 1, 其中 \bar{N}_r = 工作区内产生的电子空穴对平均数/转变(电子空穴对/转变); $\bar{E}_e = \bar{E}_e(E_r)$ = 二次 Compton 电子的平均能量 (Co^{60} 在硅中为0.60兆电子伏); ϵ = 工作区中的电离能 (Si为3.9电子伏); E_r = γ 辐射引起的光子能量 (~ 1.25 兆电子伏); d = 工作区的厚度(微米); $\bar{R} = \bar{R}(\bar{E}_e)$ = 在工作区衬底内二次

Compton电子的平均路程 (Si为1720微米)。这样, $\bar{N}_r = 90d$ (微米), 这意味着厚度 $d = 10$ 微米的工作区得出 $\bar{N}_r = 900$ 电子空穴对/转变。表 1 根据不同尺寸的工作区列出了 γ 辐射引起的预计脉冲高度 \bar{N}_r 的估计值。这些尺寸包括耗尽层宽度 W 和 (n 型衬底中的) 少数载流子扩散长度 L_p 、 γ 辐射在这些区域内引起的电子空穴对能在 CCD 电子读出装置输出端产生 γ 辐射造成的脉冲。 γ 辐射引起的电荷脉冲 $Q_r(\bar{N}_r, e)$ 可以根据转换函数与 CCD 电子读出装置输出电压脉冲 \bar{V}_r 联系起来, 亦即在 CCD 输入端和电子读出移位寄存器各区域产生的电荷 Q_r 最终定时输出, 并存储在输出电容器 C_o 上, 产生电压脉冲 $\bar{V}_r = Q_r/C_o$ 。(采用 $C_o \sim 1.0$ 微微法时) 与 Q_r 估计值相应的不同 \bar{V}_r 值见表 1。 γ 辐射在尺寸相近的输出场效应管源输出器区域内生成的电荷 Q_r 预计产生数量级大致相同 (而极性相反) 的电压脉冲 \bar{V}_r 。 \bar{V}_r 的计算值与在 CCD 电子读出装置输出端的测量值相近 (见图 7)。测量值在振幅上是分散的, 因为衬底内实际上出现了 Compton 散射电子对角度的依赖关系 (即分散)。试验中所用 γ 辐射的照射方向垂直于 CCD 衬底的底面 (硅片与 Al_2O_3 层的交接面; 见图 1)。

现将计算和测量所得 γ 辐射产生的脉冲高度与以下两种载流子数相比较。其一是胖零 1 表面金属硅存储斗链内每个斗链所能存储的最大空穴载流子数 $N_{最大}$; 其二是电荷量变化所造成的空穴载流子数, 而这些电荷量变化则与 CCD-MOS 场效应管各种噪声源相对应。表 1 给出了 $N_{最大}$, 它仅仅表示 CCD 输入斗链的容量。 $\bar{N}_r \ll N_{最大}$, 这说明 γ 辐射引起的电荷群远远低于斗链的容量。然而, 探测器输入信号电荷 N_r (空穴数) 的相对值和 γ 辐射引起的脉冲 \bar{N}_r 的分布将与将来鉴别技术方面的折衷办法有关。在受照射时, 从 γ 辐射引起的噪声脉冲中也许不能区分出具有某些脉宽 (或取样时间) 的探测器小信号。随着探测器-CCD 读出的具体应用条件的不同 (即背景、温度、输入方案等等), 这些折衷方法也不同。

表 1 列出了 CCD-MOS 场效应管各种噪声源产生的空穴噪声电荷的计算值。在洁净环境下的全部噪声值都小于表 1 给出的典型 \bar{N}_r 值。所以, γ 辐射引起的电荷变化通常大于洁净环境下的噪声变化。

3. γ 辐射的转变率

根据计算机记录带的记录分析了给定时间内 γ 辐射引起的脉冲的总数 (包括正、负极性的脉冲)。图 8 是转变率 F_r^+ 和 F_r^- 与 γ 光子通量的函数关系。 γ 辐射转变率 F_r 通常是 γ 辐射通量 $\phi(E)$ 的线性函数, 即 $F_r \propto \phi(E)$ 。图 8 说明, 这在试验误差范围内通常是正确的。而且,

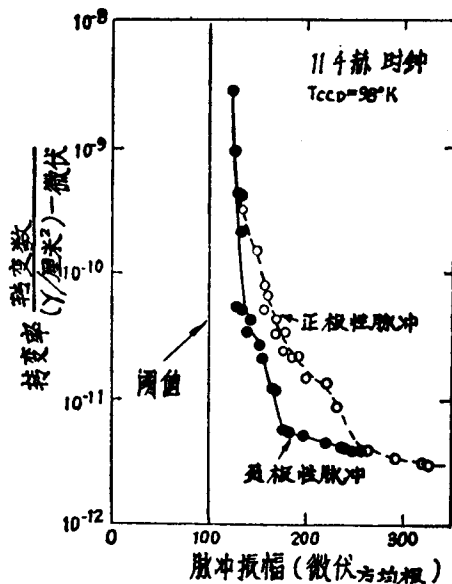


图 7 在滤波后的 CCD 电子读出装置输出端 (信道 5 的 A 点, ~ 11 千赫时钟, $T_{CCD} = 98^{\circ}K$) 测得的脉冲振幅谱

表1 相对脉冲高度

噪声源	空穴电荷数
计算的噪声电荷 (空穴的变化)	
CCD输入电路热噪声	250
CGD输入1/f噪声	110~750
CCD胖零输入噪声	59
CCD快速界面态噪声	720
输出MOS场效应管的1/f噪声	110~750
CCD的输入斗链电容	
$N_{\text{最大}} = Q_{\text{最大}}/e = C_0 A_s V/e$	6×10^7
γ 辐射引起的脉冲的平均计算高度	
$\bar{N}_\gamma = \bar{E}_s d / e \bar{R}$	1170~1620
$d = W + L_p$ (13~18微米)	
$\bar{R} = 1720$ 微米	
$\bar{V}_\gamma = \bar{N}_\gamma e / C_0$ (187~259微伏)	

当 γ 辐射通量 $\phi(E)$ 增大时, γ 辐射引起的脉冲之间的平均间隔时间 T_γ (平均) $\sim 1/F_\gamma$ 缩短,所产生的脉冲堆积在一起,难于对脉冲计数。转变率 F_γ^+ 和 F_γ^- 代表着在CCD电子读出装置输出端计数的总脉冲数,这是在CCD-MOS场效应管片子上不同区域内 γ 辐射相互作用直接造成的。决定试验用CCD片某一工作区总转变率的,不但有该工作区内直接的 γ 辐射相互作用,而且有衬底和周围材料内的相互作用。在CCD电子读出装置输出端测得的总转变率要进行分类或区分出某一工作区的转变率是相当困难的,因为总转变率是各工作区内的转变率的和。如果把衬底和周围的 γ 辐射的相互作用^[5,6]都计算进去,那么,计算的转变率处在CCD电子读出装置输出端测得的 F_γ^- 和 F_γ^+ 的一倍的范围内(见图8)。

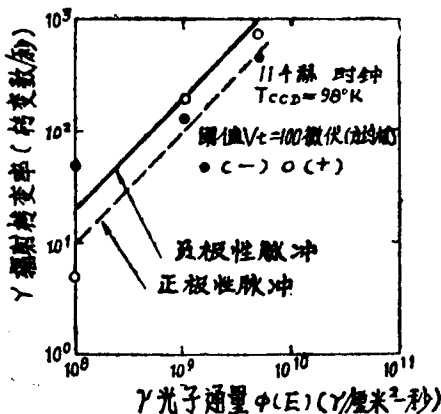


图8 测得的(超过背景的) γ 辐射转变率与 γ 辐射通量的函数关系, CCD电子读出装置经过滤波(电路5的A点, ~11千赫时钟, $T_{\text{CCD}} = 98\text{K}$)

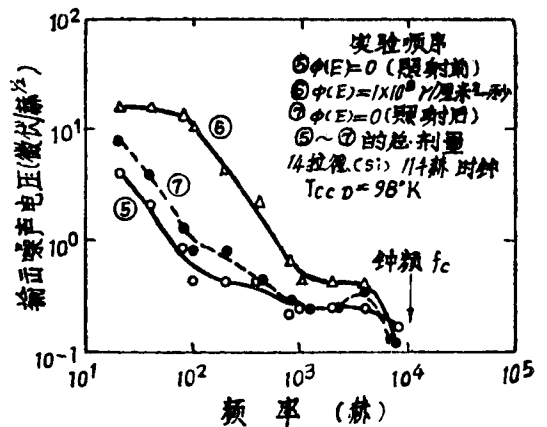


图9 测得的噪声谱; CCD电子读出装置的输出经过滤波(电路5的A点, ~11千赫时钟, $T_{\text{CCD}} = 98\text{K}$)