

单光子超导探测器

陈鸿林 杨晓段

(总装备部指挥技术学院物理教研室 北京 101416)

电荷耦合器件 CCD 已经成为天文学中经常使用的光学探测器,它对光子有很好的线性响应,在某些波长范围内非常有效.但是随着波长的减小,其探测效率越来越低,并且缺少本征频率和时间分辨率.在半导体 CCD 探测器中,光子的能量和激发态能量相当,因此不可能探测单个光子,也得不到光谱信息.

1996 年英国牛津仪器科学研究部门和欧洲航天局的一个小组宣布,他们制成了世界上第一个超导隧道结 (STJ),它的灵敏度足以分辨在可见光和红外能量范围内的单个光子.小组的技术部主任约翰·卢姆利说:“作为可见光和红外探测器,STJ 是无与伦比的.”

1. 原理及结构

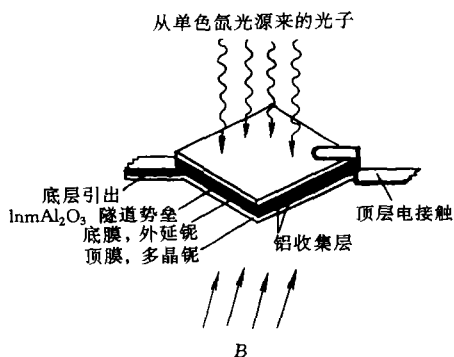


图1 单光子超导探测器

目前用的单光子超导探测器结构如图 1 所示.它是把 Nb / Al / Al₂O₃ / Al / Nb 层淀积到磨光的蓝宝石上.顶层和底层超导钨厚为 100nm,两个铝层厚 120nm, Al₂O₃ 作为绝缘隧道阻挡层仅为几个原子厚,大约为 nm 量级,电阻率为 $2.2 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$,在偏压 $V_b \approx 0.2\text{mV}$ 时,通道电流密度为 $2\text{pA} \cdot \mu\text{m}^{-2}$,动态电阻为 $0.3\text{M}\Omega$.当有光照射时,顶层超导膜吸收波长为 λ 的光子后,光子能量转换为打开的库珀电子对能量和声子的能量.和光子能量相比,打开库珀

电子对所需能量较小,每个光子都产生一连串的电子.在钨层中这种转化过程进行得非常快,大约为 2ns.这样形成了自由电荷载流子与声子并存的非平衡态分布.在极低的工作温度下(比超导体临界温度 T_c 低一个数量级)吸收光子后产生的初始自由电荷载流子 N_0 超过任何热传导的粒子数.可以证明,在一般情况下 $N_0(\lambda) \approx h\nu / 1.75\Delta$,在钨基底探测器情况下 $N_0(\lambda) \approx 7 \times 10^5 / \lambda\Delta$,其中 Δ (用 MeV) 是超导钨与温度有关的禁带宽度, $h\nu$ 是入射光子能量, λ 是入射光波长,单位是 nm.禁带把被束缚的库珀对的基态与激发态分离开来.氧化物绝缘层的势垒非常薄,大约为 nm 级,因此可以保证自由电荷载流子穿过势垒时具有高的透过率.加一个与势垒平行的小磁场 B ,来遏止库珀电子对的隧穿.势垒两边铝膜的作用类似于一个收集器,把自由电荷载流子限制在势垒附近.当提供一个偏压 $V_b < 2\Delta / e$ 时,保证只有自由电荷载流子从一个膜转移到另一个膜的隧穿过程发生,电荷的转移形成电流.输出的电量正比于光子的能量,因此也正比于光子的颜色.

2. 实验及结果

用强度很弱的光来照射超导探测器装置,光强弱到在一段时间内只有一个光子入射到探测器上,这段时间的平均值远大于电荷载流子在仪器中的寿命(大约为 $2\mu\text{s}$).图 2 表示 250nm 和 350nm 的光子产生的单光子电荷谱 Q .

从这些数据可以看出,该装置不仅能探测单光子,而且能测量它们的波长.单光子电荷谱强度符合简单高斯分布.实验表明,平均电荷值 $\langle Q \rangle$ 是 λ^{-1} 的线性函数,而波长的分辨率 $d\lambda$ 由 σQ 和 $\langle Q \rangle$ 确定, σQ 是电荷分布的标准偏差.在 $\lambda = 350\text{nm}$ 处,测得分辨率 $d\lambda = 45\text{nm}$.理论计算表明,进一步降低电子噪声,改进探测器响应的均匀性,可以在 $\lambda = 350\text{nm}$ 处达到理论极限

分辨率 $d\lambda = 20\text{nm}$. 如果用临界温度更低的超导体, 可以提高该仪器的固有光谱分辨率, 使在 $\lambda = 350\text{nm}$ 处, 理论极限分辨率为 $d\lambda = 8\text{nm}$.

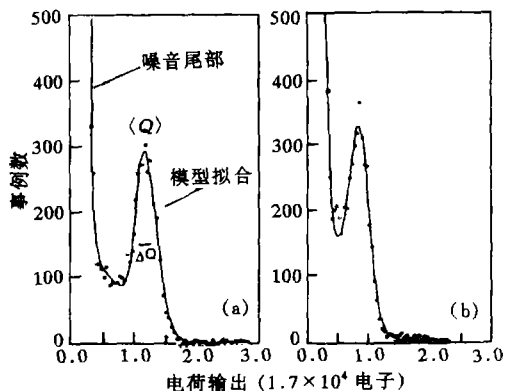


图2 a, b 分别为用 250nm 和 350nm 的单色光源照射时产生的电荷谱. 图中同时表示出了最佳拟合曲线, 以及 $\langle Q \rangle$ 和 $\Delta Q \approx 2.355\sigma Q$ (假设为正态分布)

3. 应用及展望

实验证明, 铌基底的 STJ 可用做紫外和可见光的光子计数及本征光谱的识别. 通过镀抗反

射膜, 可进一步提高吸收效率. 这些探测器从本质上来说是很快的. 它主要受信号处理的限制. 已经证明, 光子波长为 1nm 的纯铌超导探测器典型速率是 10kHz, 也有可能达到更高的速率.

超导隧道结的研究已经深入到 X 射线范围的光子探测, 吸收光子后产生的自由电荷数目比可见光区域大 10^3 倍. STJ 可作为高量子效应和高分辨率的光子计数器.

记录单个光子到达的时间有很多潜在的天文应用: ①潜在的亚毫秒能力可应用到观察被大气层限制的物体方面. 如: 快速成像、斑点成像、自适应光学等. ②与全景成像耦合后的计时能力可用到短时间物体的变化方面 (例如脉冲星、白矮星的辐射振荡和吸积流稳定性等), 以及天文量子光学从未探测过的领域. ③应用到高效率宽频带光子计数系统的空间干涉度量方面. 它将成为可见光和紫外波长范围的重要天文观测仪器.

(编译自英《自然》1996 年 5 月号)

科苑快讯

巴西多孔硅研究取得新进展

可作为制造半导体器件的新材料

据《科技日报》报道 巴西国家空间研究院 (INPE) 近日宣布, 该院传感与材料实验室经过实验证实, 多孔硅可作为制造半导体器件的新材料, 电学性能优于普通的硅半导体. 多孔硅还可用于制作更高效的光-电、电-光信号转换芯片. 此外, 该院对多孔硅的光学性能也有了新的认识, 他们发现多孔硅有良好的吸光性, 并检测到它可发出 8 个谱带的光, 比日本发现的多孔硅发光谱带数多 6 个.

科学家对多孔硅的研究始于 50 年代. 直到 1990 年, 多孔硅在常温下发光现象才被英国国防研究局发现. 近年来, 许多国家的科学家都在积极研究多孔硅的电学和光学性能, 以期开发出替代普通硅的半导体新材料.

INPE 称, 有望在今年年底开发出可发光 (从可见光到红外谱段) 的多孔硅芯片. 该院传感与材料实验室主任席尔瓦说: “我们现在把所有的工作集中在提高多孔硅的性能上. 比如, 使之产生更大的发光强度.”

在与砷化镓材料进行比较时, 席尔瓦说: “多孔硅在常温下就能发光, 而含铝的砷化镓发光需要低温. 而且多孔硅取材于单晶硅, 制造工艺简单, 成本较低廉.”

利用多孔硅良好的光能吸收性, INPE 正在研究是否可用多孔硅制作卫星太阳能面板, 以取得比现在的太阳能面板更高的能源转换率.