

利用超导结的直流约瑟夫逊效应探测 β 粒子的初步实验结果

濮焕顺 钟元元 蒋建华 庄杰佳

(中国科学院高能物理研究所)

1984年6月18日收到

提 要

利用超导结的直流约瑟夫逊效应探测粒子,具有能量分辨率高和时间响应快的优点.我们首次进行了用 $\text{Sr}^{90}\text{-Y}^{90}$ β 源辐照 $\text{Nb-NbO}_x\text{-Pb}$ 超导结的实验.结果表明:在 β 粒子的辐照下,不仅超导结的临界电流和能隙电压都变小,而且在超导结的两端产生电压脉冲讯号.本文报道了利用直流约瑟夫逊效应探测 β 粒子所观察到的一些现象.

一、前 言

随着实验物理学的发展,对粒子探测技术提出愈来愈高的要求,例如更高的能量分辨率和时间分辨率.目前常用的探测器中,能量分辨率最高的属于半导体探测器.能量分辨率与探测器所用的材料中产生一对离子或一对电子-空穴时所需的能量平方根成比例,所需的能量越小,则能量分辨率越高.目前用作探测器最好的半导体材料锗,它产生一对电子-空穴所需的能量约为 2.8 eV. 为了进一步提高能量分辨率,需要我们去寻找新的探测技术.超导电性作为一门新的技术随着科学事业的发展,越来越被人们所重视,特别是约瑟夫逊效应发现以后,给超导电性在各个领域的应用开辟了新的前景.根据 BCS 理论,超导电子表现为电子对,称为库珀对.在超导体中拆散一对超导电子对所需的能量大约是千分之几电子伏.因此,如果能做成超导探测器,它的能量分辨率有可能比半导体探测器提高一个数量级以上.同时,由于超导结从超导态转变到电阻-超导混合态的时间极短 ($\approx 10^{-14}\text{s}$),因此,若利用超导结探测粒子有可能获得几十微微秒的时间分辨率.

早期,国外曾有人提出并研究用超导薄膜来探测粒子^[1-3]. 1969年以来,人们开始研究利用超导结来探测粒子.加拿大学者 Wood 和 White 最先做了用 α 粒子轰击 $\text{Sn-SnO}_2\text{-Sn}$ 隧道结的实验,观察到了由于 α 粒子的轰击引起结中正常电子隧道电流的脉冲变化^[4]. 1980年日本学者 Kurakado 和 Mazaki 进一步研究了 $\text{Sn-SnO}_2\text{-Sn}$ 隧道结受到 α 粒子轰击时的正常电子隧道效应,他们较仔细地测量了粒子轰击时产生的电压脉冲讯号^[5]. 并从理论上探讨了将超导结用于粒子探测器的可能性^[6].

国外利用超导结探测粒子的实验工作,都是利用正常电子隧道效应的变化来探测 α 粒子,而我们是利用超导结的直流约瑟夫逊效应来探测粒子的.首先用 β 粒子作为探测

的对象,经过努力,不仅观察到利用 β 粒子辐照超导结引起直流约瑟夫逊特性曲线的变化,而且还观察到 β 粒子辐照超导结所产生的电压脉冲讯号.初步实验结果表明:利用超导结的直流约瑟夫逊效应做高能量分辨率探测器是有可能的.

二、探 测 原 理

我们在1981年全国超导电学术讨论会上报告过“利用超导结探测粒子的设想”.我们提出的设想,不是基于正常电子隧道效应,而是利用超导结的直流约瑟夫逊效应,其探测原理如下:

超导电子对于绝缘介质薄层的量子力学隧道穿越作用,致使两块相距很近($10\text{\AA}$ 左右)的超导体中的超导电子波函数产生弱耦合,使两边超导电子的量子相位具有一定的相位差 θ ,从而导致绝缘层中存在一个超导电流密度 j_s .

$$j_s = j_c \sin \theta,$$

式中 j_c 为结的临界电流密度.只要通过隧道结的电流 I 小于、等于结的临界电流 $I_c = j_c \cdot S$ (S 为超导结的面积),上述约瑟夫逊电流关系总能满足,结区处于直流超导状态,流经结的电流是无阻的超导电子流,结区两端不出现电压.但是,如果电流 $I > I_c$,则上述约瑟夫逊关系就不能满足,结区转变为电阻-超导混合态,流经结的电流是有阻的正常电子隧道电流,结区两端出现电压,同时结区还存在有交变的超导电流.

我们设想利用超导隧道结在受到粒子轰击时直流约瑟夫逊特性的变化来探测粒子.当粒子入射到超导结中时,可能出现这样一个过程,即通过入射粒子与超导电子对之间的相互作用,入射粒子的部分能量被电子对所吸收,使超导体中的若干电子对被激发为单个的正常电子,从而导致超导结中超导电子密度下降.结中超导电子密度的下降可能从两个方面改变结的特性:一是使超导结的临界电流下降.一旦结的临界电流下降到工作电流以下,结区便立即由直流超导状态转变为电阻-超导混合态,从而在结区两端出现电压,通过测量这一电压脉冲,就可以达到探测入射粒子的目的.二是使超导能隙变小,这将导致结的 I - V 特性曲线向左移动,使结区两端的电压发生变化.通过测量能隙电压的这个变化也可以达到探测入射粒子的目的.

三、实 验 与 结 果

实验观察到超导结受到 β 粒子辐照时引起直流约瑟夫逊特性曲线的变化和产生的电压脉冲讯号.

1. 实验测量系统 实验所用的超导结是由北京大学物理系制备的Nb-NbO_x-Pb薄膜隧道结,Nb膜厚约为 $3000\text{\AA}$,Pb膜厚约为 $2000\text{\AA}$,NbO_x层厚小于 $30\text{\AA}$.结的面积为 $0.3 \times 0.9\text{ mm}^2$.测量是在四个结串联的结片上进行的. β 源采用Sr⁹⁰-Y⁹⁰源,能量为 2.26 MeV ,源强为 $50\mu\text{Ci}$.实验温度为 4.2 K .实验装置示意图见图1.

2. 观察利用 β 粒子辐照超导结引起的直流约瑟夫逊特性曲线的变化 实验用的电源是恒流源,并用X-Y记录仪把特性曲线记录下来,测量方法是:先对未经过 β 源辐照

的结片测定 I - V 特性曲线,然后在 β 源辐照下进行测量,此后再撤走 β 源,在无辐照的情况下重新测定超导结的 I - V 特性曲线,随后再次在 β 源辐照的情况下进行测量.上述四步,每步都重复测量若干次,相邻两次测量间隔约三、四分钟,测量结果见图 2.

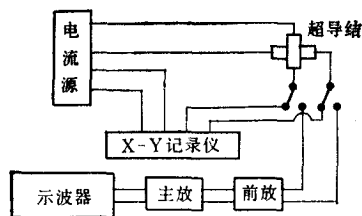
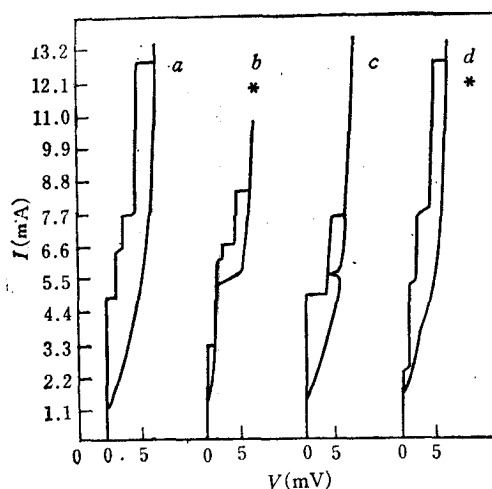


图 1

图 2 在 β 粒子辐照下超导结的直流约瑟夫逊特性曲线的变化

从图 2 可知,每步中各次测量所得曲线基本一致.图 2 中四条曲线分别代表四步测量典型结果.

比较图 2 四条曲线可见,有和无 β 源辐照时,超导结的 I - V 特性曲线有明显变化,突出地表现在临界电流的下降.曲线 b 与 a 相比较,四个结的临界电流都有下降,其中第一个结的临界电流下降约为 1.5 mA .曲线 d 与 a 相比较,第一、二两个结的临界电流也有下降,第一个结的临界电流下降约为 2.4 mA ,第三、四两个结的临界电流没有变化,这可能被解释为 β 粒子没有恰好照到这两个结上.曲线 c 与 a 都是在无 β 源辐照时测量的曲线,两者相比,第一、三两个结的临界电流分别保持不变,这说明一旦 β 源撤走,两个结的特性曲线又恢复到各自先前的状态.至于曲线 c 没有全部显示出四个台阶的原因还不很清楚,有可能是 X-Y 记录仪的机械性能欠佳造成的.据其他一些单位反映,他们用 X-Y 记录仪记录超导结的 I - V 特性曲线时也常出现这种情况.

除超导结的临界电流有明显下降外,仔细比较图 2 中曲线 b 与 a ,还可以发现超导结的能隙电压在受到 β 粒子辐照时也变小了,变化幅度平均达到 0.1 mV 左右.

3. 观察单个 β 粒子辐照超导结产生的电压脉冲讯号 实验采用的电源是锯齿波扫描电源,频率为 500 Hz ,同时用自制的双端输入双端输出的放大器,再用示波器观察脉冲讯号.测量方法是:先在未经 β 源辐照的情况下测量超导结的 I - V 特性曲线,由于超导结是四个串联在一块结片上的,因此有四个不同的临界电流,我们选择第一个结的临界电流进行测量.第一个结的临界电流经测量为 $I_c = 3.2 \text{ mA}$,然后再把工作电流 I_0 调到 $I_0 = 3.09 \text{ mA}$,略小于结的临界电流 I_c ,再用 β 粒子进行辐照,这时在示波器上就观察到由于 β 粒子辐照而产生的电压脉冲讯号,脉冲讯号的形状如图 3(c) 所示.

图 3(a)~(c) 为在用 β 粒子辐照超导结的实验中,从示波器上拍摄下来的照片.

图 3(a) 为四个结串联在一起的 V - i 特性曲线.图 3(b) 为未经 β 源辐照的情况下,工作电流低于结的临界电流时的曲线.由图 3(b) 可清楚地看出:只要工作电流 I_0 低

于结的临界电流 I_c ，超导结的两端是不会出现电压的，即零电压。图 3(c) 为工作电流 I_0 调至略小于结的临界电流 I_c ，用 β 粒子辐照超导结时，在结的两端产生的电压脉冲讯号。

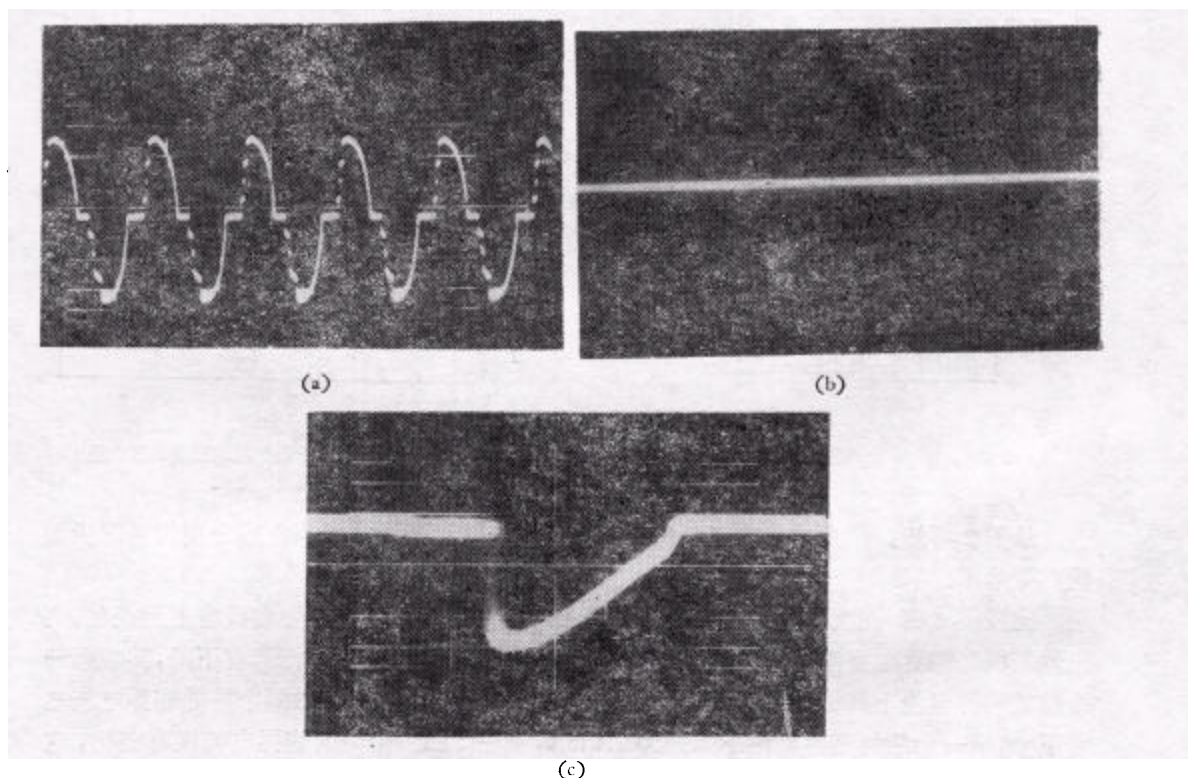


图 3 β 粒子辐照下超导结两端产生的电压脉冲讯号

由电压脉冲形状可以看出：脉冲前沿较陡，后沿较慢，脉冲宽度约 $60-70 \mu s$ ，脉冲幅度约为 $1.8 mV$ 。脉冲前沿说明超导结由超导态转变到电阻-超导混合态的时间。由于实验用的电源频率为 $500 Hz$ 的锯齿波扫描电源，而且电流源波形的下降较慢；再加上放大器的频率只有 $1-2 MHz$ ，超导结是面结，它是一个包含电容电阻的元件，考虑到结电容的充放电储能作用，结的 $I-V$ 特性曲线有一个滞后现象，所以使脉冲波形的脉宽变宽和后沿变慢。当然主要原因还是由于电流源波形下降时间较慢而造成的。但是，脉冲的形状和我们预期分析是一致的。

在观察单个 β 粒子辐照超导结产生电压脉冲讯号时，我们还观察到结的能隙电压也明显变小，变化的幅度约为 $0.5 mV$ 。这又说明：通过测量能隙电压的变化，同样也可以达到探测粒子的目的。

四、结 语

实验结果证实了我们预先的设想。当工作电流小于超导结的临界电流时，结的两端没有电压输出，而用带电粒子辐照时，便在超导结的两端产生电压脉冲讯号。这一新的实

验现象说明: 利用超导结的直流约瑟夫逊效应做高能量分辨率探测器是有可能的。

实验中还观察到: 在超导结多次受到带电粒子辐照后, 结的特性仍保持比较稳定。某些辐照后特性变坏了的结, 过一段时间也能恢复, 这为将来有可能做成超导结探测器延长其使用寿命提供了依据。

此外, 如果超导结采用阵列排列, 而且是多层交叉分布结构, 这样不仅可以提高探测效率, 而且还可以确定被探测粒子的空间位置, 提高空间分辨率。

在本实验工作中, 本所郑林生、王祝翔、顾以蕃等同志, 北京大学物理系李嘉璋、孟小凡, 南京大学物理系杨森祖、吴培亨, 北京师范大学物理系孟宪仁等老师, 物理研究所杨沛然同志都和我们进行过非常有益的讨论。本所十一室高频控制组, 以及胡锡麟同志、低温车间和物理一组的大力支持, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] D. H. Andrews, R. D. Fowler and M. C. Williams, *Phys. Rev.*, **76**(1949), 154.
- [2] N. K. Sherman, *Phys. Rev. Lett.*, **8**(1962), 438.
- [3] D. E. Spiel, R. W. Boom and E. C. Crittenden, *J. Appl. Phys. Lett.*, **7** (1965), 292.
- [4] G. H. Wood and B. L. White, *Appl. Phys. Lett.*, **15**(1969), 237.
- [5] M. Kurakado and H. Mazaki, *Phys. Rev.*, **B22** (1980), 168.
- [6] M. Kurakado and H. Mazaki, *Nucl. Instr. Meth.*, **185** (1981), 141; 149.

PRELIMINARY EXPERIMENTAL RESULTS OF THE β - PARTICLE DETECTION WITH SUPERCONDUCTING TUNNEL JUNCTION USING D. C. JOSEPHSON EFFECT

PU HUAN-SHUN ZHONG YUAN-YUAN JIANG JIAU-HUA ZHUANG JIE-JIA

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The detection of nuclear particles with superconducting tunnel junctions using D. C. Josephson effect is expected to have the merits of good energy resolution and fast time response. It was the first time to perform such an experiment to detect $\text{Sr}^{90}\text{-Y}^{90}$ β -particles by the Nb-NbO_x-Pb superconducting tunnel junctions. The results showed that, under the β -particle irradiation, not only the critical current and energy gap voltage of the superconducting tunnel junctions decreased, but also voltage pulse signals at both ends of the superconducting tunnel junction were produced. In this paper we report some phenomena observed about β -particle detection with superconducting tunnel junctions using D. C. Josephson effect.