

关于微波感应直流电压现象的理论*

吉 光 达 吴 杭 生

—

在一个开路(即未和直流电源相联)的约瑟夫逊隧道结上以微波辐照,隧道结的两端便出现一定的直流电压. 这就是微波感应电压现象.

文献[1]报道了 Chen 等人的实验结果. 他们采用尺寸很小的 Pb-PbO_x-Pb 结. 隧道结的结平面面积约 10⁻⁶cm²; 结电阻为 1Ω; 临界电流 I_c (在 1.4K 时)为 1.1mA. 在 10GHz 的微波辐照下,结两端出现的直流电压 V_n 是断续的,和微波频率 $\bar{\nu}$ 存在如下关系:

$$V_n = n \frac{\hbar \bar{\nu}}{2e}, \quad (1)$$

其中 n 取整数. 在同一文献中, Chen 等人还给出了此实验的理论解释. 他们的理论和流行的微波感应台阶理论^[2]是平行的.

基于作者在文献[3]所作的分析,可直接看到, Chen 等人的理论只适用于 $L_x \ll \lambda$, $L_y \ll \lambda$ 和 $L_x \ll \lambda_J$ 的隧道结, 其中 $L_x(L_y)$ 是沿着(垂直)微波 λ 射方向隧道结的尺寸; $\lambda = \frac{c_0}{\bar{\nu}}$ 是微波波长, c_0 是沿着结平面微波的传播速度; λ_J 是约瑟夫逊穿透深度^[2].

显然, Chen 等人所用的隧道结是满足这两个条件的.

本文是作者前一工作^[3]的继续. 本文给出的微波感应直流电压现象理论适用于 $L_x \gtrsim \lambda$, $L_y \ll \lambda$, 但 $L_x \lesssim 2\lambda_J$ 隧道结. 下面的讨论表明: 此时,出现的感应电压仍然是断续的,并满足(1)式. 但是,在未加磁场时,只出现偶数标号 n 的电压态; 只有沿着结平面并垂直微波入射方向加一个静磁场,才同时观察到奇数标号和偶数标号的电压. 本文还分析了 Langenberg 等人的实验^[4], 并指出他们对结电阻较高的隧道结观察到的现象和本文理论预言一致.

二

和文献[3]一样,我们限于讨论入射微波和隧道结共振的情形. 此时, $\bar{\nu} = \bar{\nu}_m$, 即 $L_x = m \frac{\lambda}{2}$, 其中 $\bar{\nu}_m = m \frac{c_0}{2L_x}$ 是隧道结的本征频率^[2], m 取整数.

文献[3]已证明了,在特殊电压 $V_n = n \frac{\hbar \bar{\nu}_m}{2e}$ 处,约瑟夫逊电流除了包含频率 ν 及其谐波的交流分量外,还包含一个直流分量:

* 1977 年 1 月 10 日收到.

$$I_s = (-)^n I_c \frac{1}{m\pi} \int_0^{m\pi} d\eta J_n \left(\frac{2\alpha}{m} \cos \eta \right) \sin \left(\frac{2}{m} \frac{\Phi_J}{\phi_0} \eta + \varphi_0 - n\theta \right), \quad (2)$$

其中 $\Phi_J = H\Lambda L_x$, 而 $\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2$, λ_1 和 λ_2 分别是组成隧道结的两个超导体的伦敦穿透深度; $\frac{\alpha}{m} = \frac{e\nu_0}{\hbar v_m}$, ν_0 是微波电压的振幅; ϕ_0 是磁通量子; I_c 是隧道结的临界电流; φ_0 是隧道结的初始位相差, θ 是微波场的常数相角. 把(2)式改写为

$$I_s = (-)^n |C_{nm}| \sin(\varphi_0 - n\theta + \gamma), \quad (3)$$

式中

$$C_{nm} = b_{nm} + ia_{nm}, \quad (4)$$

$$a_{nm} = \frac{1}{m\pi} \int_0^{m\pi} d\eta J_n \left(\frac{2\alpha}{m} \cos \eta \right) \sin \left(\frac{2\mu}{m} \eta \right), \quad (5)$$

$$b_{nm} = \frac{1}{m\pi} \int_0^{m\pi} d\eta J_n \left(\frac{2\alpha}{m} \cos \eta \right) \cos \left(\frac{2\mu}{m} \eta \right), \quad (6)$$

$$\gamma = \sin^{-1} \left(\frac{a_{nm}}{C_{nm}} \right). \quad (7)$$

因此,文献[1]中的(4)式应当用下式替代:

$$-\frac{V_n}{R} = (-)^n I_c |C_{nm}| \sin(\varphi_0 - n\theta + \gamma), \quad (8)$$

R 是外线路中的总电阻.

文献[3]证明了,在 $H = 0$ 的情形,

$$|c_{nm}| = \begin{cases} \frac{1}{m} \left| \frac{\sin\left(\frac{n}{2} m\pi\right)}{\sin\left(\frac{n}{2}\pi\right)} \right| J_{\frac{n}{2}}^2\left(\frac{\alpha}{m}\right), & n = \text{偶数}; \\ 0, & n = \text{奇数}. \end{cases} \quad (9)$$

图 1 是根据(9)式画的. 此图和文献[1]的图 1 是相当的. 注意到,此时只出现偶数标号的电压态.

在 $H \neq 0$ 的情形, $|C_{nm}|$ 的表示式已在文献[3]给出. 不论 n 取奇数或偶数,它一般都是不等于零. 所以,当 $H \neq 0$ 时,不仅出现偶数标号的电压态,而且还出现奇数标号的电压态(见图 2).

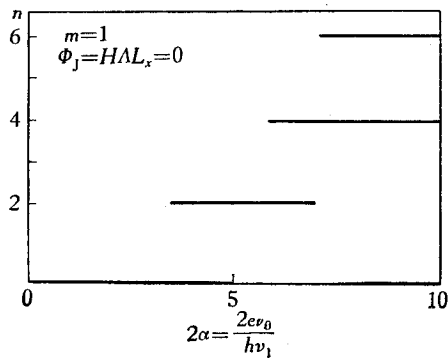


图 1

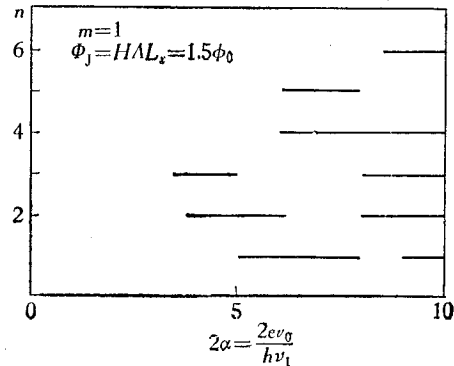


图 2

三

值得提一下 Langenberg 等人的实验工作^[4]. 该实验所用的隧道结是 Pb-PbO_x-Pb 和 Sn-SnO_x-Sn. 有关的参数如下: 结平面约 10⁻²cm²; 正常相结电阻从几 mΩ 至 1Ω 不等; 临界电流的实验值约为理论值的 0.1 至 0.8 倍. 辐照微波的频率高于 7.8 GHz. 对结电阻较高的隧道结, 在未加磁场时, 只观察到偶数标号的电压. 但如果沿着结平面并垂直波导轴加一个静磁场, 则同时出现奇数标号和偶数标号的电压态. 对结电阻较低的隧道结, 还观察到连续改变的电压. 它和微波功率及外磁场存在复杂的函数关系.

利用理论公式 $I_c(0) = 0.778 \frac{\pi}{2} \frac{\Delta(0)}{e R_N}$ ^[5], 估计 $T = 0\text{K}$ 时临界电流的理论值, 再代入 $\lambda_J(0) = \left(\frac{\hbar c^2 A}{8\pi I_c(0) e A} \right)^{1/2}$, 估计出 $T = 0\text{K}$ 时约瑟夫逊穿透深度^[2], 其中 R_N 是正常相结电阻, $\Delta(0)$ 是 $T = 0\text{K}$ 时超导体的能隙, A 是结平面的面积. 用 Pb 的有关数据代入, 并取 $A = 10^{-2}\text{cm}^2$, $R_N = 1\Omega$, 估计得到 $\lambda_J = 1.5\text{mm}$. 设想 Pb-PbO_x-Pb 结的尺寸约为 0.5mm × 2mm, 微波的入射方向和结的长边平行. 那末, $R_N = 1\Omega$ 的隧道结便满足 $L_x \lesssim 2\lambda_J$ 的条件. 仿照文献[3]的估计, 可以看出, $L_x \gtrsim \lambda$ 的条件也是满足的. 从以上的估计可以相信, Langenberg 等人对结电阻较高的隧道结的实验与本文理论预言是符合的. 但由于文献[4]很简短, 缺少必要的数据, 目前还不能作出肯定的结论.

文献[4]提到, 只观察到偶数标号电压态的条件有二, 一是 $H = 0$; 另一是短路活塞和结的距离在 $\frac{1}{4}$ 波导波长内. 从本文理论看, 后一个条件不是必要的.

显然, 结电阻较低的隧道结已不再满足 $L_x \lesssim 2\lambda_J$ 的条件, 超出本文理论适用的范围. 我们认为: 在此情形, 约瑟夫逊隧道结中可以出现磁通线. 连续变化的电压就是由磁通线流动引起的.

参 考 文 献

- [1] J. T. Chen, R. J. Todd and Y. W. Kim, *Phys. Rev.*, **B5** (1972), 1843.
- [2] 吴杭生、管维炎、李宏成, 超导电性(第二类超导体和弱连接超导体), 第七、八章, 科学出版社.
- [3] 吴杭生、吉光达、刘福绥, 物理学报, **26** (1977), 353.
- [4] D. W. Langenberg, D. J. Scalapino, B. N. Talylor and R. E. Eck, *Phys. Letters*, **20** (1966), 563.
- [5] J. Matisoo, 1972 Applied Superconductivity Conference, 535.

A NOTE ON THE THEORY OF MICROWAVE-INDUCED DC VOLTAGE PHENOMENON

Ji GUANG-DA WU HANG-SHENG