

有关电子通过势垒的隧穿时间的研究^{*}

刘秋香, 张进修

(中山大学理工学院, 广东 广州510275)

摘要: 基于相位时间和隧穿时间的定义计算了电子穿过方形势垒的相互作用时间, 在此基础上设计一个实验尝试研究电子隧穿方形势垒的相互作用时间。

关键词: 相位时间; 穿透时间; 隧穿时间

中图分类号: O621.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2003) 05-0114-03

电子通过一个特定的势垒到底需要多长时间, 对这个问题的研究由来已久。1931年, Condon 提出波包通过势垒的隧穿时间的概念, 次年, MacColl 指出电子与势垒相互作用的重要性。自此, 基于不同方法提出了诸如逗留时间, 相位时间等隧穿时间的不同表达式^[1-6]。本文以相位时间和穿透时间为例, 根据其定义, 计算电子穿过方形势垒时的相互作用时间, 通过对结果的比较, 发现在同样参数下, 电子与势垒的相互作用的时间相差悬殊, 而我们知道, 在同样的实验参数下, 电子与势垒的相互作用时间应该只能有一种结论, 那么到底哪个定义更合适些, 是我们需要弄清楚的问题。本文借用光程差的概念设计了一个实验尝试研究电子隧穿方形势垒的相互作用时间, 以期对隧穿时间的研究有所帮助。

基于量子钟的概念, Buttiker 将相位时间定为电子透射波包的峰位穿过势垒的时间延迟^[3], 而穿透时间的定义则是基于几率的概念定义的^[4]:

$$j = \frac{\hbar}{2\mu i} (\psi^* \nabla \psi - \nabla \psi^* \psi) \quad (1)$$

为简单计, 考虑质量为 μ , 能量为 E 的电子穿过一个宽度为 a , 高度为 V_0 的方形势垒, $E < V_0$, 设自由电子的波函数为 $\Psi_m(x) = e^{ikx}$, 其中 $k = (2\mu E)^{1/2}/\hbar$, 为波矢。利用波函数及其一阶导数连续的性质, 可得相位时间 τ_p 和穿透时间 τ_t 的解析表达式为^[4]:

$$\tau_p = \frac{\mu}{2\hbar k K} \frac{2\sinh 2Ka - k\sin 4\delta}{f^2} \quad (2)$$

$$\tau_t = \frac{\mu a}{\hbar k} \left[\frac{\sin 2Ka \frac{1}{2} 2Ka - \cos 2\delta}{1 - \cos 2\delta} \right] \quad (3)$$

其中 η 为 Plank 常数, $K = [2\mu(V_0 - E)]^{1/2}/\hbar$, $\tan \delta = K/k$

根据方程(2)和(3), 我们计算了电子穿过不同势垒下的相位时间和穿透时间, 结果表明, 势垒越宽, 两者差别越大, 如图1所示为电子穿过很薄的势垒(0.5 nm)的结果, 即便如此, 两者仍然存在数量级的差别。

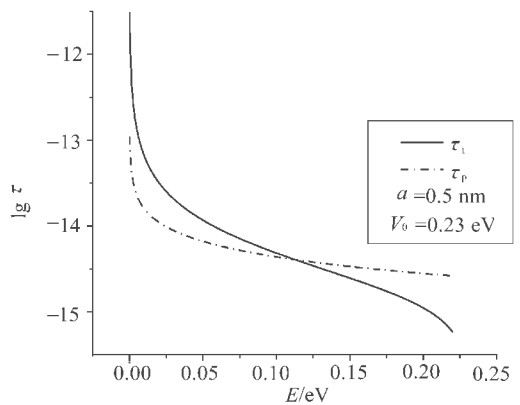


图1 电子穿过方形势垒时相位时间和穿透时间的比较, 势垒宽为0.5 nm

Fig. 1 The comparison of results between phase time and traversal time for electron going through a rectangular barrier

为了研究电子与势垒的相互作用时间, 我们设计了如图2所示的实验装置。其中 A 为一个纳米尺寸的洞, B 为一个纳米尺寸的势垒。 A 与 B 的距离为 d 。 Q 代表圆形接受屏的中心, P 是接受屏上不同于 Q 的另一点, PQ 的距离用 S_{PQ} 。假定一波矢为 k 的电子由 O 射入, 分别经过 A 或 B 到达接受屏的某点 P , 这时两电子束的相位差来自于两方面, 首先是 AP 与 BP 的距离差导致的相位差 ϕ_1 ,

^{*} 收稿日期: 2002-03-13

基金项目: 广东省重点学科基金资助项目 (20010674)

作者简介: 刘秋香 (1970年生), 女, 博士后; 通讯联系人: 张进修; E-mail: stdp28@zsu.edu.cn

再有， A 和 B 两孔洞尺寸虽然一致，但 B 孔洞内存在势垒，与电子穿过 A 孔洞相比， B 孔洞对相位有延迟作用，由此可造成相位 ψ 。

因电子 $k = (2\mu E)^{1/2} / \hbar$ 的波矢，据 $v = \frac{\hbar k}{\mu}$ 得电子波周期 $T = \lambda / v$ 。对单色电子束，由 AP 与 BP 的距离差导致电子到达 P 点的时间差为 $\Delta t_1 = (S_{BP} - S_{AP}) / v$ ，相应的相位差为 $\psi_1 = (S_{BP} - S_{AP}) \lambda / 2\pi v^2$ 。

同样地，可以通过计算电子通过 A 和 B 两孔洞的时间差得到其相位延迟 $\psi_2 = t_T - a / v$ （对相位的定义）或 $\psi_2 = t_P - a / v$ （对穿透时间的定义）。显然，即使在相同条件下，电子经过 A 和 B 两个孔洞到达接受屏上各点处相位延迟是不相同的，这样接受屏上不同点处电子波的振幅也不相同，从而在接收屏上形成花样。

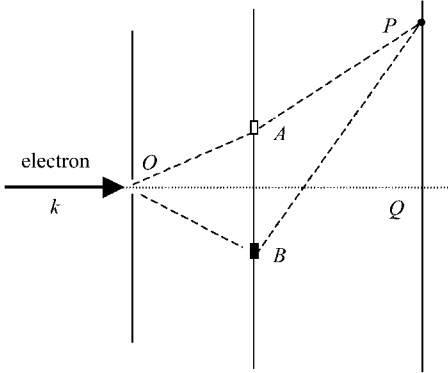


图 2 电子所经路线示意图
Fig 2 The sketch map of electron going through the rectangular barrier

如图 3 所示为计算结果，参数为：方形势垒宽度为 0.5 nm ，高度为 20 eV ， A 和 B 两狭缝距离 $d = 200\text{ nm}$ ，其中 (a) 为相位时间导致的花样，(b) 为穿透时间的花样，很显然，两者差别很悬殊。上述计算中势垒高度比图 1 中高了近两个数量级，电子的能量也相应地提高，其目的是为了

提高电子的相对单色性。可从以下几个方面提高实验的可行性：① 将电子的加速电压增大以提高电子束的相对高单色性；② 为了避免电子离化，电子束所经路线区域须抽成高真空；③ 增大电子束流量以提高电子数量；④ 势垒的厚度须薄至纳米量级。就目前而言，问题的关键点在于势垒加工部分。相信随着纳米加工技术的迅猛发展，是有可能将此实验实现从而为研究电子与势垒的相互作用提供有利的实验条件。

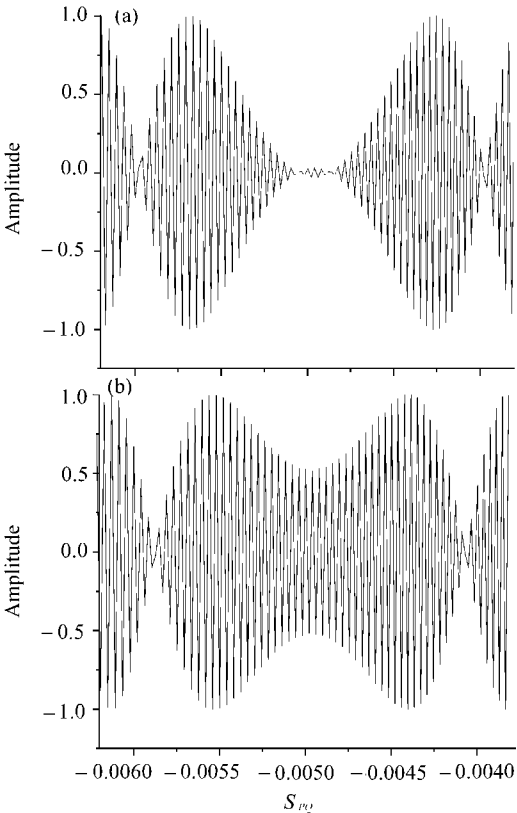


图 3 由相位时间 (a) 和穿透时间 (b) 得到的花样
Fig 3 The patterns received in acceptor phase time (a), traversal time (b)
势垒高度为 0.5 nm ，高度为 20 eV ，狭缝间距离为 200 nm

致谢 作者感谢钟凡教授、熊小敏博士和丁喜东博士对本工作的支持与帮助。

参考文献:

[1] HAUGE E H, STOVNENG . Tunneling times: a critical review[J] . Rev Mod Phys, 1989, 61: 917.
[2] FIGIELSKI T. The stationary traversal time for tunneling[J] . Solid State Commun, 1995, 94: 113.
[3] BÜTTJER M. Larmor precession and the traversal time for tunneling[J] . Phys Rev(B), 1983, 27: 6178.
[4] LI C F, WANG Q. A traversal time for tunneling particles through a potential barrier[J] . Physica(B) , 2001, 296: 356.
[5] SMITH F T. Lifetime matrix in collision theory[J] . Phys Rev, 1960, 118: 349.
[6] KREZLIN H M, BUDCZIES J, KEHR K W. Larmor clock for tunneling time[J] . Phys Rev(A) , 1996, 53: 3746.

Study on Traversal Time for an Electron Tunneling Through a Potential Barrier

LIU Qiu xiang, ZHANG Jin xiu

(School of Physics Science and Technology, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The interaction time for an electron tunneling through a rectangular barrier is calculated based on the definition of phase time and traversal time. Moreover, a conceptual experiment is designed to study the tunneling time.

Key words: phase time; traversal time; tunneling time

(上接第 89 页)

Propagation of Embryonic Stem Cells *in Vitro*

ZHANG Liang¹, TANG Shi bo¹, GUO Fen fen², HUANG Bing²

(1. Zhongshan Ophthalmologic Center, Sun Yat sen University, Guangzhou 510060, China;

2. Experimental Animal Center, Sun Yat sen University, Guangzhou 510080, China)

Abstract: The methods for propagating the embryonic stem cells (ES cells) were studied *in vitro*. First, the suitable medium was selected after the anabiosis of ES cells. DMEM with high glucose and glutamine is ideal. Then, 20% fetal bovine serum, 10⁵ U/L penicillium streptomycin, 0.1 mmol/L L glutamine, 10³ IU/L leukemia inhibitor factor and 0.1 mmol/L β mercaptoethanol were added to the medium. Another operations include using early generation ES cells, disposable culture bottle without gelatin, performing exact digesting, anabiosis, freezing and exchanging culture medium time. Cultivation, transfer of culture and freezing were operated in strict steps. The totipotent and chromosome of the expanded ES cells were also examined. The ES cells were expanded over 16 times in short time (about 5 days) to keep the totipotent and nucleus type. The results showed that a great deal of ES cells can be obtained in short time with proper medium and strict procedure.

Key words: embryonic; stem cell; culture; propagation