

室温似单电子晶体管高电流分析

张洪涛, 许正望, 李利荣, 黄杰, 王琰, 宋玲

(湖北工业大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068)

摘要: 在实验中观察到纳米线金氧半场效晶体管 (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET) 室温下出现 $I-V$ 高电流似单电子库仑阻塞特性。分析了这一现象产生的机理, 提出了似单电子库仑阻塞模型, 认为纳米线晶体中的结构发生变化, 造成特殊的“岛”, 电子在耦合机制的作用下, 形成类似的库伯电子对, 在“岛”上实现似单电子隧穿。这时, 库仑阻塞效应的机制由单电子变成成对的多电子, 这可造成充电能增大, 在室温下隧穿。由于耦合电子对的出现, 随栅压加大, 使电子隧穿时, 既可实现库仑阻塞, 又使电流加大, 室温下出现高电流台阶。

关键词: 纳米线 MOSFET; 单电子晶体管; $I-V$ 大电流; 电子对

中图分类号: TN323

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2009)02-0069-04

Analysis of Similar-Single Electron Transistors with High Current at Room Temperature

Zhang Hongtao, Xu Zhengwang, Li Lirong, Huang Jie, Wang Yan, Song Lin

(School of Electric and Electrical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: Large current intensities of micro-ampere magnitude with Coulomb blockade in $I-V$ curves of nanowire MOSFET devices were analyzed. The phenomena was formed by nanowire crystal because of crystal deformed structure. Single electron tunnels with some electron copula in the island, which make the charging energy become large. When electron tunnels in island with coupling electron pair with increasing gate voltage, the coulomb blockade effect with large current intensities are observed at room temperature.

Key words: nanowire; MOSFET; single electron transistor; $I-V$ large current; coupling electron pairs

单电子晶体管由于其工作时能耗小、运行精确快速, 一直受到科学界和工业界的广泛关注, 现在已经研制出可以在低温下稳定运行的单电子晶体管。但是, 由于单电子晶体管目前只能在低温运行, 而且其工作电流一般为纳安级或皮安级^[1,2], 这使得单电子晶体管的应用受到限制, 因而追求室温的高电流单电子器件是业界努力的方向。纳米线晶体管具有一维量子特性, 且具有单电子晶体管的某些特性, 是未来通信系统的核心器件, 也是高速通信系统的重要器件, 对

于通信系统具有重要的支撑作用, 因此研究纳米线晶体管具有重要的现实意义。

1 实验现象

以纳米线碳化硅构造 MOSFET 的具体实验工艺参见文献[3]。在实验中对 MOSFET 器件进行 $I-V$ 特性测试时, 笔者观察到一些特殊的现象, 即室温产生高电流量子台阶现象, 这与一般单电子器件的低电流强度

收稿日期: 2009-02-14

基金项目: 教育部重点科技基金资助项目 (206095), 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目 (教外司留[2006]331号), 湖北省教育厅重点基金资助项目 (D200614002)

作者简介: 张洪涛 (1963-), 男, 内蒙古包头人, 湖北工业大学教授, 博士, 主要研究方向为纳米电子技术, 嵌入式系统应用, E-mail: zhongtaoz@yahoo.com.cn

(纳安级甚至皮安级电流强度)的表现不同^[4],达到微安级甚至是毫安级^[3]。

图1是单纳米线碳化硅MOSFET的 $I-V$ 特性图,测试条件是室温。由图1可看出,当栅压 V_g 不大时,随着 V_g 的增加,电流 I_{ds} 的变化呈平台状改变,在纳安级到毫安级范围变化,每一个台阶呈现水平状,表明电流在这一台阶变化为零,呈超导态;每一台阶对应的 V_g 跨度不均匀,但在0.1~1.5 V范围内;当 V_g 达到9.5 V时,电流突然加大,达63 mA,随后再振荡下降,一直可到100 V的10 μ A;反向偏压100 V时,器件被击穿。实验中所用的测试系统是美国KEITHLEY4330半导体测试仪。

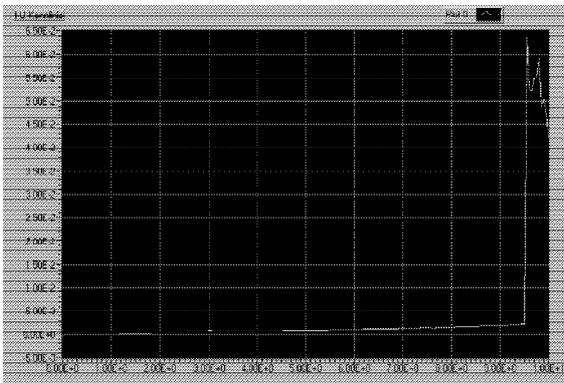


图1 纳米线MOSFET的 $I-V$ 特性图

Fig. 1 Characteristics of nanowire MOSFET's $I-V$

2 实验现象分析

室温单电子晶体管隧穿电流一般非常弱,在纳安级或皮安级^[1,2],达到微安级甚至毫安级的比较少见,纳米线碳化硅MOSFET随着栅压的增加,出现大电流台阶现象,应该属于宏观量子效应。纳米炭管和纳米线室温单电子晶体管的 $I-V$ 特性已有很多研究^[1,3],其基本原理是单个电子从电极的一端透射进入孤岛,岛上的电子数是确定的,电子自身具有能量,单个电子必须克服库仑能,才能脱离岛到另外一极,这个自身具有的能量称为充电能(charging energy),在室温下,由于热运动,充电能非常小,一般在室温下很难观察到单电子隧穿效应,文献^[1,2]对这一机理给予了阐述。但是,随着器件进入纳米尺度,根据单电子隧穿的充电能公式 $\Delta E=e^2/C$ 可知,其电容变得很小,因此使充电能变大,这就有可能在室温下发生单电子隧穿效应;但是,根据对硅纳米线和炭纳米管单电子晶体管器件的研究,在室温下发生单电子隧穿也难于观察到。而纳米线MOSFET却可以在室温下观察到单电子隧穿现象,而且是大电流平台隧穿。

碳化硅材料的结晶构造是六角堆垛,原子间是离子化达11%的共价键性,具有好的导热性能,电子饱和速度高。由图1所示的 $I-V$ 特性可见,出现的 I_{ds} 平

台对应的 V_g 可达1.5 V,这里在电流达毫安级时,就不能归之为单电子库仑阻塞。那么随着 V_g 的变化, I_{ds} 不改变,说明在此期间纳米线MOSFET器件电阻为零,也就是说,当每一台阶出现时发生了器件漏电流变化为零的现象,为形象起见称为“似单电子库仑阻塞或阶梯状隧穿”。当每一个似准周期的 V_g 跨度完成时,导致一次“阶梯状隧穿”完成,随着发生一次电流的改变,又一次“阶梯状隧穿”产生,这一现象与低温超导单电子隧道效应相类似^[3],但超导单电子隧道效应只能在低温下观察到,在室温下为何会发生单电子隧穿的超导现象,最近有研究者提出了一种解释,认为电子与声子耦合形成耦合电子对^[4],这突破了BCS(Bardeen, Cooper, Schrieffer theory)金属超导理论。

根据BCS金属超导理论^[5],BCS基态波函数为:

$$\Psi = \prod_k (u_k + v_k a_{k\uparrow}^+ a_{-k\downarrow}^+) |0\rangle, \quad u_k^2 + v_k^2 = 1, \quad (1)$$

式中: k , a 分别为电子的波矢和自旋;

u_k , v_k 是实数,分别表示对态($k\uparrow$, $-k\downarrow$)空着的和占有的概率振幅,且满足归一化条件 $u_k^2 + v_k^2 = 1$ 。

式(1)代表了一个粒子数不守恒的体系,BCS理论的核心是电子体系存在能隙。由BCS理论可以计算,超导物的转变温度不会超过100 K,而目前的高温超导材料的临界温度已可达160 K,甚至可能出现室温超导,但一点都不影响它的正确内涵。

在BCS金属超导理论中,Cooper^[5]等清晰地阐述了低温下金属发生超导现象时,电子在超导体中的配对机理问题^[6],就是所谓的Cooper pair。那么似单电子库仑阻塞现象与超导现象的关系是否可以采用BCS理论解释成为疑点,尽管这里使用了Cooper对,但不能采用BCS理论来直接描述这样的超导特性,因为这里使用的材料不是金属,而是纳米线半导体,这里就出现了一个关于室温是否会发生超导单电子隧穿的问题。所探讨的实验现象拟用超导单电子库仑阻塞效应解释^[7],因为作为一种在超导体中存在的电子形式,它未被规定具体的存在温度,只不过在低温容易实现,它主要取决于晶体中电子和声子的耦合形式。在纳米尺度范围内,晶体的结构形式与体材料晶体空间构型应该是不同的^[8],主要体现在原子的堆垛及其离子之间的相互作用不同,而且纳米线晶体空间的结构改变导致一个限域态的“岛”出现,可以推断,没有超导现象的室温单电子隧穿现象可以出现,但条件要求非常苛刻。但是在室温下,出现超导现象所描述的电子对形式却是可能的,伴随着似单电子库仑阻塞现象就容易发生了,在纳米线晶体中的“岛”上,产生库仑阻塞效应,出现室温下的超导现象,即存在似Cooper对使似单电子隧穿现象发生,它能够把大电流的量子台阶维持下去。

下面解释似Cooper对(这里指的不一定是2个电

子形成 Cooper 对, 可能是多个电子, 或者以 Cooper 对为基本形式) 是如何产生的, 目前只能假设在晶体中存在电子与声子的耦合产生 Cooper 对, 在纳米线 MOSFET 器件运行时存在似单电子隧穿现象, 并伴随库仑阻塞效应同时发生, 其中的谐振隧穿效应正是 2 个电子以上的隧穿效应, 在一般情况下, 谐振隧穿会削弱库仑阻塞效应, 然而, 当电子被晶格声子诱化为自旋作用的电子对时, 其谐振隧穿不一定会削弱库仑阻塞效应, 甚至可能加强这一体系下的库仑阻塞效应。另一个原因就是发生 Andreev 反射, 此时, 电导应该表示为: $G = 2 \left(\frac{2e^2}{h} \right) \sum_n T_n / (2 - T_n)^2$, (2) 式中, T_n 是透射率。

式 (2) 描述了在结点截面下的超导电导关系。Andreev 反射是指 1 个类电子 (类空穴) 准粒子入射到正常-超导界面时, 会反射成 1 个类空穴 (类电子) 准粒子, 即 1 个电子 (或空穴) 从正常端入射到正常-超导界面时, 若电子能量小于超导能隙, 则该电子不可能发生正常隧穿进入超导体, 然而, 入射的电子 (或空穴) 可能被反射成为 1 个空穴 (或电子), 同时在超导体内产生 (或消灭) 1 个库珀对, 这有利于形成耦合电子“堆”。如果大于能隙, 则电子被界面散射。

事实上, 由于纳米线碳化硅在分子范围的键为离子化的共价键, 其表面和晶体内部的电荷分布不均匀, 由于固定的纳米线在振动, 那么其电子以隧穿形式穿过量子线运动, 因此会产生电流, 同时会产生磁场, 即发生了微局域的电磁感应现象, 这种规律的电磁效应或磁激励会进一步有助于电子对的形成。

这里或许可以用 Ginzburg-Landau 方程描述这一宏观量子效应^[6]。由于超导态的超导电子密度存在某种有序化, 引进 1 个序参量 ψ 来描述这种有序化, 即引入宏观波函数, 其形式可以表示为

$$\psi = \Delta e^{i\theta}, \quad (3)$$

ψ 在 $T < T_c$ 时 (T_c 为超导临界转变温度) 满足

$$\frac{1}{4m} \left(-i\hbar \nabla - \frac{2e}{c} \mathbf{A} \right)^2 \psi + a(T - T_c) \psi + \beta |\psi|^2 \psi = 0. \quad (4)$$

式 (4) 称为 Ginzburg-Landau 第一方程, 它是在考虑外加磁场和磁场本身的情况下得出的, 它与带电粒子在势能 $V(\mathbf{r})$ 和磁场 $\nabla \times \mathbf{A}$ 中运动的 Schrödinger 方程于形式上是一致的, 此处, 与我们分析的情况不符合。下面给出 Ginzburg-Landau 第二方程

$$\mathbf{J}_s(\mathbf{r}) = -\frac{ie\hbar}{2m} (\psi^* \nabla \psi - \psi \nabla \psi^*) - \frac{2e^2}{mc} |\psi|^2 \mathbf{A}, \quad (5)$$

式 (5) 是超导体的电流密度公式, 它与量子力学的电流密度公式一致, 表明超导体具有类似于微观现象中的量子效应——超导体的宏观量子效应。

London 方程对于描述超导电流是合适的, 它反映

了超导电流密度 \mathbf{J}_s 与电磁势 \mathbf{A} 的关系:

$$\mathbf{J}_s = -\frac{c}{4\pi\lambda_L^2} \mathbf{A}, \quad \frac{d\mathbf{J}_s}{dt} = \frac{c^2}{4\pi\lambda_L^2} \mathbf{E}, \quad \lambda_L^2 = \frac{m^* c^2}{4\pi n_s e^{*2}}, \quad (6)$$

式中 λ_L 称为 London 穿透深度, 为 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ cm 量级。超导电流密度为:

$$\mathbf{J}_s = \frac{ne}{m} \left(\langle 0 | \mathbf{P} | 0 \rangle - \frac{e}{c} \mathbf{A} \right), \quad (7)$$

在低温下, 许多金属与合金中的导带电子由于长程相干作用而大量耦合形成 Cooper 对, 构成无相互作用的玻色气体, 它们的流动形成超导电流, 这一电流不服从欧姆定律。

可以把高电流的似单电子库仑阻塞效应归之为库珀对 (Cooper Pair), 尽管 Cooper 对的产生机制存在磁共振^[7] (magnetic resonance) 和晶格声子^[8] (crystalline lattice phonons) 2 种理论, 但其存在的确定性被广泛认同, 为此, 修改其充电能公式为:

$$\nabla E = (ne)^2 / C, \quad n=1, 2, 3, \dots; \quad (8)$$

式中: e 为电子电荷; C 为器件电容。

经过这样处理后, 充电能是单电子充电能的 n^2 倍, 这使得单电子隧穿可能在室温下进行, 有助于理解似单电子隧穿现象。需注意的是, 这里建议 n 取奇数, 因为在这一体系下实现的隧穿, 属于多电子耦合隧穿, 但这里表现为其它偶数多电子耦合, 形式上表现为单电荷隧穿。

当发生单电子隧穿时, 就是大部分实验观察到的单电子库仑阻塞现象, 此时电流较弱; 当 n 为 2 以上时, 就会产生高电流, 并且会产生量子台阶; 此外, n 的增大, 使充电能呈现平方数加大, 使室温超导单电子库仑阻塞效应成为可能。纳米线中电子传导机理被晶体所约束, 其电子波函数运动产生了变化, 可能存在 3 个或多个电子 (2 个电子对耦合) “堆” 等形式, 这样, 使充电能成平方放大, 从而增加室温发生库仑阻塞效应的机会, 这可以解释为什么当量子电容不一定很大或纳米晶体尺寸达不到发生单电子隧穿效应所要求的尺寸时, 在室温可以观察到单电子库仑台阶现象的原因。

关于预测 $I-V$ 高电流的问题, 纳米线中电子如何形成电子对或更高数目的电子, 日本科学家最近发表的论文阐述了这一假设^[9]。由于电子自旋相反使电子成对, 这意味着可以有第三个电子出现, 因为这并不影响形成的电子对, 或 2 个电子对以团体形式出现, 导致发生类似单电子的库仑阻塞效应。形成的 MOSFET 就可能似单电子器件出现, 而不是以纯粹的单电子器件的形式出现, 它在基本原理上服从单电子隧穿原理, 但电流却非常大; 同样出现量子台阶, 但在这里已经不是严格的单电子库仑阻塞效应形成的量子台阶了; 这一形式不好控制, 随着外部环境的变化, 电子

对的形式也在不断改变,但基本的“耦合”形式是不变的。

可以确定这不是二极管的特性曲线,而应是一种超导态。如果是二极管,如图1所示,在 $I_b=0$ 时,电流增高,器件失效,然而,可以看到几点不同,一是量子台阶,电流在几个微安级;其次,可以看到在9.5 V之外,器件电流仍然在随电压的增加而振荡。在每一台阶水平部分显然存在着电流变化为零,最长的跨度达1.5 V,这说明在此范围内,电流维持恒定,可以说这是分段超导,是一种超导态。

那么究竟应该把这一现象归为超导现象还是单电子现象呢?我们认为,这应该是2部分共同作用的结果。因为这里电流很大,达到微安或毫安级,不可能是单电子隧穿,那么这样的现象只能由前述机理决定。前面已解释了似Cooper电子对的形成问题,可以把它归为晶体结晶构造和磁振子所为,两种观点针锋相对,但笔者在此认为,这两种观点的结合才是正确的。在纳米线中,由于晶体振动,其声子模与电子协同共振,使电子成对,而磁振子的观点是由于磁场的加入,尤其是电子自旋作用而导致电子对形成。可以看到,当我们通以电流时,电场作用于纳米线,其上电子在电场作用下产生交变电磁场,在这样的交变电磁场作用下,电子就可能耦合成“堆”。这说明这种材料的结晶构造使晶体声子与电子作用产生自旋的机理是特殊的,这意味着在发生似单电子现象时,发生超导现象可能是直接推论。Cooper对可能是一种电子运动的形式已被多方证明,作为超导产生的必要条件,Cooper对不一定会导致超导的产生,但超导现象的产生一定有Cooper对的作用。

可以进一步推论,当Cooper对产生并进入宏观量子效应产生的岛,必有相同电荷出岛,这时很可能导致超导效应消失,但在特殊情况下,仍然会保持超导态,这一效应出现受到的约束较大,至于什么阶段失去或产生超导现象,需要进一步观察和测量一些纳米线器件或类似器件,以决定其临界电流 I_c 。本器件经实验测试 $I_{on}/I_{off}=10^9$,迁移率为 $21\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,导通电阻为 $R_{ds(on)}=23\text{ m}\Omega$ ^[10,13]。

3 结语

本文针对纳米MOSFET器件的 $I-V$ 特性室温出现大电流量子台阶不合常规性,提出了似单电子库仑阻塞的概念,即在MOSFET中存在似Cooper对,即耦合电子“堆”,增加了充电能,并改写了似单电子隧穿的

充电能公式,解释室温出现宏观量子现象的机理。分析了尽管产生Cooper对但超导不一定产生的机制,同时,认为高导热率的纳米线碳化硅MOSFET符合一定条件时,于室温下产生了超导现象。

参考文献:

- [1] Takahashi Y, Nagase M, Namatsu H, et al. Fabrication Technique for Si Single-Electron Transistor Operating at Room Temperature[J]. Electronics Letters, 1995, 31(2): 136-138.
- [2] Henk W Ch Postma, Tijs Teepen, Zhen Yao, et al. A Room-Temperature Single-Electron Transistor (SET) within a Single Carbon Nanotube[J]. Science, 2001, 293 (5527): 76-79.
- [3] Zhang Hongtao. On Quantum Capacity of Nanowire MOSFET [J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2006, 25(4): 29-31.
- [4] Wilson Stephen D, Dai Pengcheng, Li Shiliang, et al. Resonance in the Electron-Doped High-Transition-Temperature Superconductor $\text{Pr}_{0.88}\text{La Ce}_{0.12}\text{CuO}_{4-\delta}$ [J]. Nature, 2006, 442 (6): 59-62.
- [5] Bardeen J, Cooper L N, Schrieffer J R. Theory of Superconductivity[J]. Phys. Rev., 1957, 108: 1175-1204.
- [6] Cyrot M. Ginzburg-Landau Theory for Superconductors[J]. Rep. Prog. Phys., 1973, 36: 103-158.
- [7] Ivar Giaever. Electron Tunneling and Superconductivity[J]. Rev. Mod. Phys., 1974, 46: 245-250.
- [8] Gray K E. Ginzburg-Landau Equations, Interphase Surface Energy, and the Intermediate State of Superconductors with a Paramagnetic Normal State[J]. Phys. Rev. B, 1983, 27: 4157-4160.
- [9] Lee Jinho, Fujita K, McElroy K, et al. Interplay of Electron-Lattice Interactions and Superconductivity in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ [J]. Nature, 2006, 442 (3): 546-550.
- [10] Seong H K, Choi H J, Lee S K, et al. Optical and Electrical Transport Properties in Silicon Carbide Nanowires[J]. Appl. Phys. Lett., 2004, 15: 1256-1258.
- [11] Zhou W M, Fang F, Hou Z Y, et al. β -SiC Nanowire FET [J]. IEEE Electron Device Lett., 2006, 27: 463-465.
- [12] Lundstrom M S. Fundamentals of Carrier Transport[M]. New York: Addison-Wesley, 2000.
- [13] Konstantinos Rogdakis, Marc Bescond, Edwige Bano, et al. Theoretical Comparison of 3C-SiC and Si Nanowire FETs in Ballistic and Diffusive Regimes[J]. Nanotechnology, 2007, 18: 475715-475719.

(责任编辑:李玉珍)

收稿日期: 2008-12-20

作者简介: 廖友媛(1974-),女,湖南隆回人,湖南工业大学讲师,中南林业科技大学硕士生,主要研究方向为园林植物,

E-mail: yyliao2008@163.com