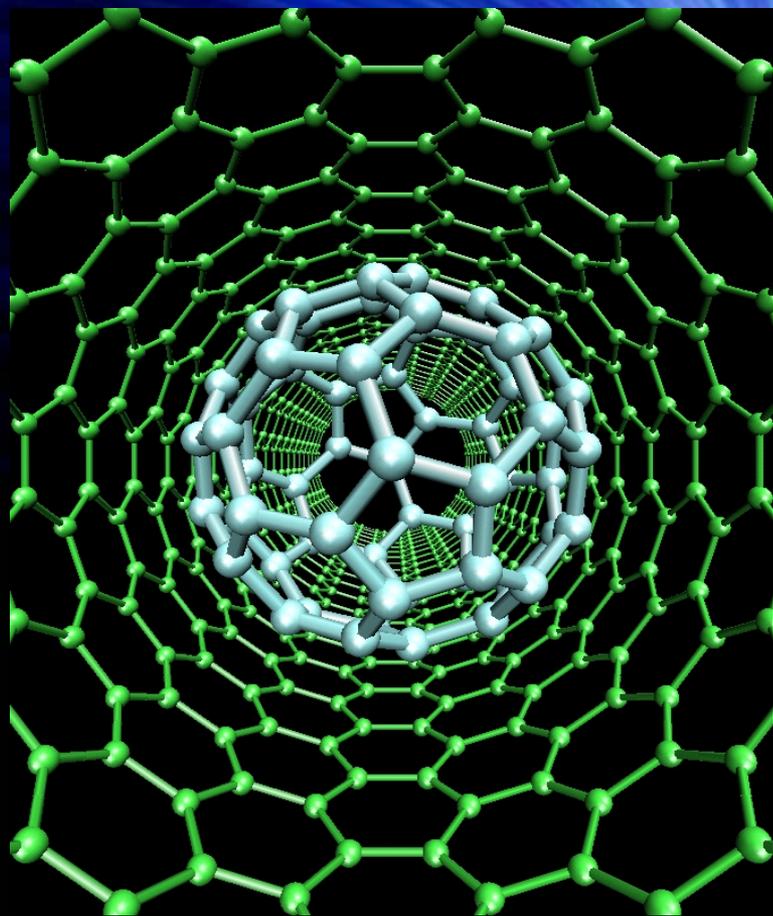


用电场屏蔽方法封装量子 单元逻辑器件



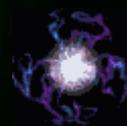
指导老师：叶邦角

02级物理一班

黄亮

PB02203151

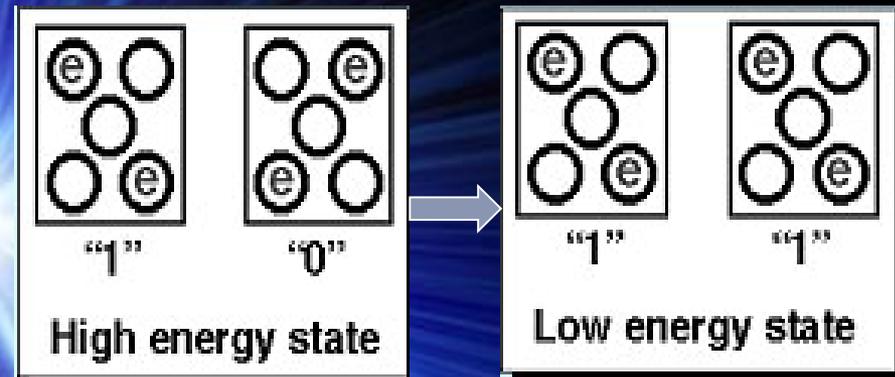
目 录



- ❖ 一、QCA简介
- ❖ 二、QCA做逻辑器件的优点
- ❖ 三、用QCA做逻辑器件的现状
- ❖ 四、QCA做出实用的逻辑器件所面临的五大挑战
- ❖ 五、解决信号干扰问题的模型
- ❖ 六、结论
- ❖ 参考文献
- ❖ 致谢

一、QCA简介

量子单元自动操作 (quantum cellular automata), 简称QCA。在这种结构中, 每个单元保持两个电子, 构成一个电容器, 它们有两种极化状态, 分别表示“0”和“1” (如右图)。相邻的单元之间以库仑力相互作用, 而且无需以其他方法连接, 这种单元的列阵可以用来传输二进制信息, 能够应用布氏原理进行操作, 模拟复杂的功能, 显示了制造超大规模集成电路的前景。



图解:

当相邻的两个单元状态分别为“1”和“0”时, 系统处于高能态, 这时状态为“0”的单元将变为状态“1”, 以使系统处于低能态。把一系列这种量子单元有序的排列起来就可以不通过电流而实现二进制信息的传递。

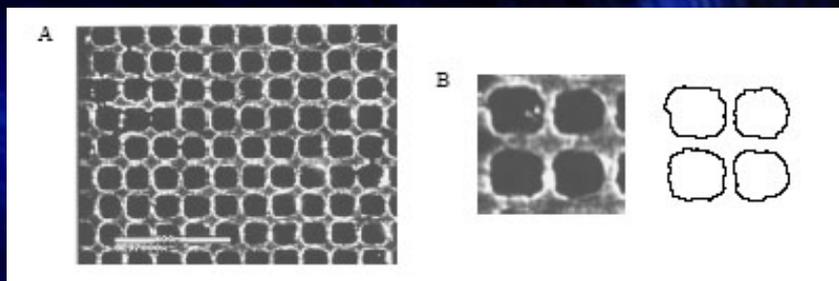
二、QCA做逻辑器件的优点

- ❖ 高集成度（High functional density）；
在本文的结论中，QCA逻辑器件的尺寸可以控制在250nm。而目前，在传统的半导体工业中，仅是逻辑器件中一个CMOS场效应管要做到250nm的尺寸就已经很难了，要作出一个有特定逻辑功能的逻辑器件则尺寸比QCA器件大一到二个数量级，甚至更多。即QCA器件比CMOS器件的体积小3~6个数量级，可见QCA逻辑器件的前景十分广阔。
- ❖ 信号传导无需导线（No interconnect in signal path）；
- ❖ 高速，低功耗（Fast and low power）。



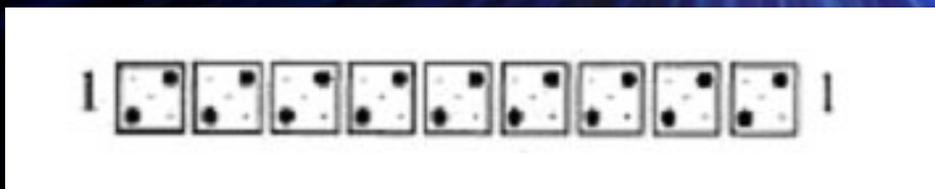
三、用QCA做逻辑器件的现状

- ❖ QCA逻辑器件的几大优点正是当前微电子技术的所亟待解决的几大难题，因此很多科学家纷纷把目光转向这种新的逻辑器件制作方法。
- ❖ 目前，在理论上已经可以构造出代替导线的QCA“导线”和与门、或门、反向器等逻辑电路所需的基本逻辑门，甚至能构造出较复杂的逻辑电路。
- ❖ 下面以图片的形式列出几种典型的QCA逻辑器件和由这些逻辑器件组成的二进制全加器。

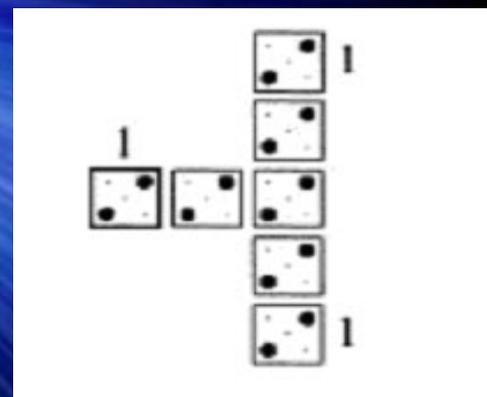


A. 面积为5961 nm²的量子单元组

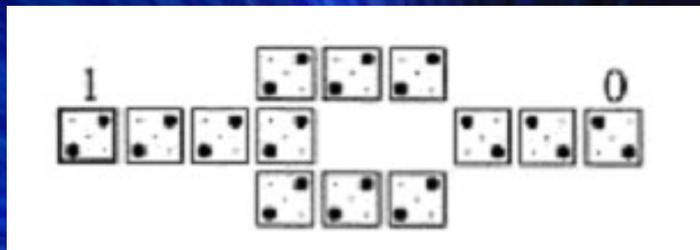
B. 在SEM下的量子单元图像和手工绘制的量子单元轮廓



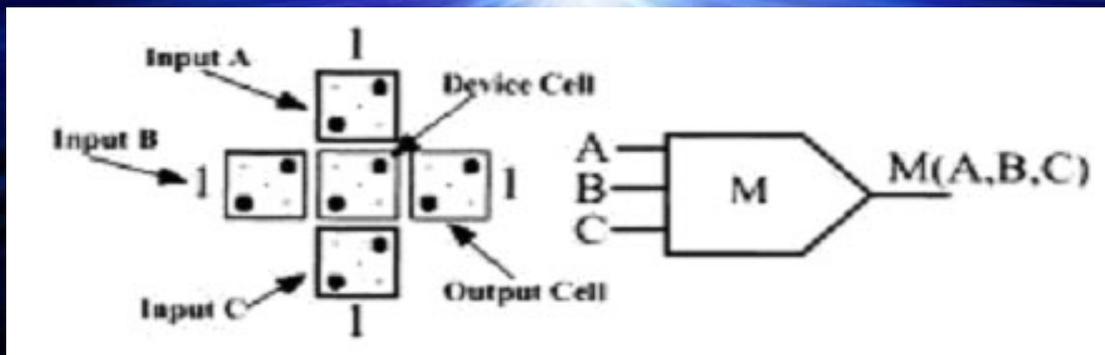
普通QCA“导线”



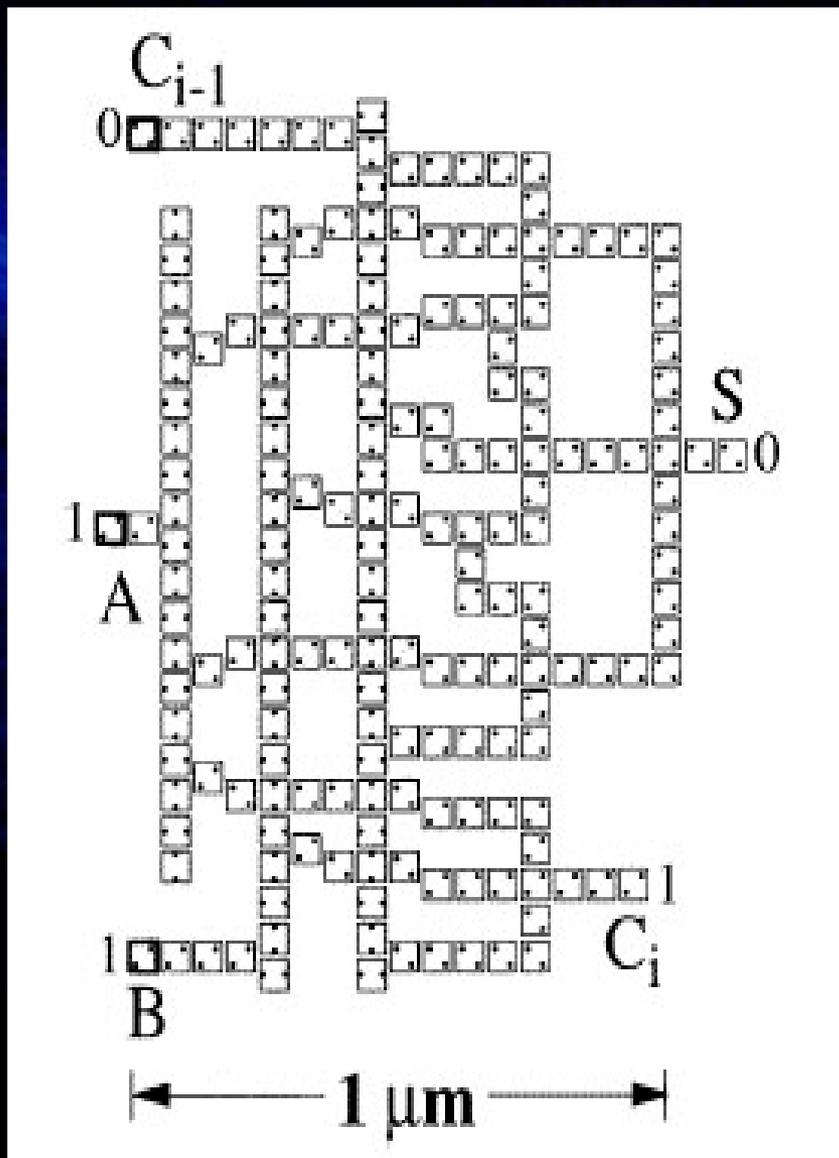
有两个输出端QCA“导线”



QCA反向器



三输入的QCA与门



图解：

该器件由“QCA导线”、反向器和高电平有效的多输入门组成。 C_{i-1} 是向前进位控制端， C_i 是向后进位控制端， S 端输出 A 和 B 全加后的结果。在整个运算过程中无须外界提供任何能量，因此其功耗极低。

完全用QCA单元构造的二进制全加器

四、QCA做出实用的逻辑器件所面临的五大挑战



- ❖ 低扇出数（Limited fan out）；
- ❖ 尺度控制（Dimensional control）；
- ❖ 结构的构造（Architecture）；
- ❖ 有用反馈的引入（Feedback from devices）；
- ❖ 对干扰信号的屏蔽（Background charge）。



五、解决信号干扰问题的模型

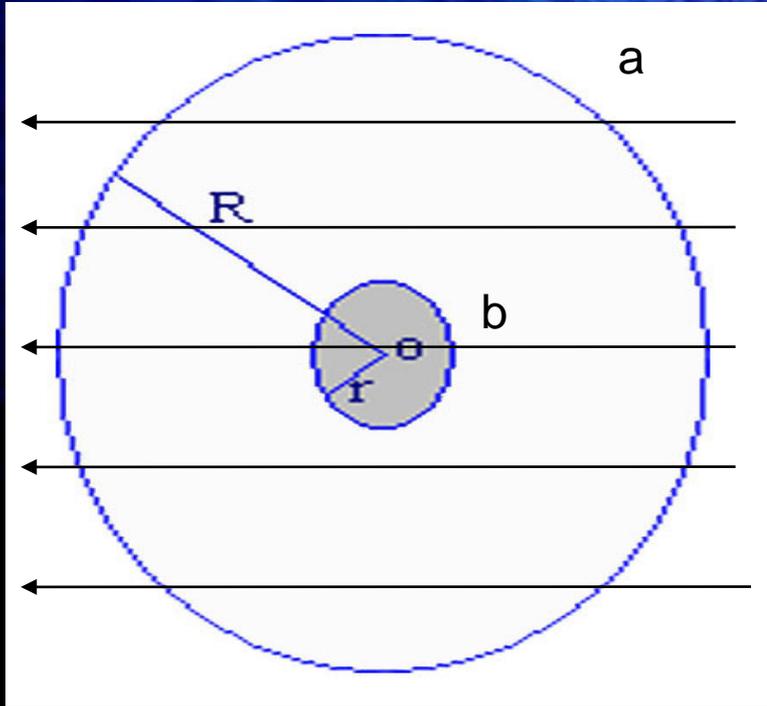


根据计算和实验的结果，若外界干扰信号对QCA单元作用的能量超过QCA单元状态转变所需能量的十分之一，此时干扰是有效的，QCA单元将由一个状态转变为另一个状态。



为避免上述情况发生，我们必须保证干扰信号作用在QCA单元上的能量不超过 0.0022MeV [6]。

为简化计算，现建立一个同心球模型，模型中包括一个半径为 R 的金属球 a 和一个半径为 r 的带电球 b 。 b 是一个QCA逻辑器件， a 是为 b 做的封装。



若满足以下条件，即可认为封装 b 成功的解决了为QCA器件屏蔽干扰信号的问题。

- ▶ 1. 金属球可以把外界的电场屏蔽掉（需要考虑由于金属球过小而不能提供足量的感应电荷）
- ▶ 2. 金属球内壁上的电子打在 b 上时，没有足够的能量改变QCA单元的状态。

I. 先看第一个条件 

设外电场为均匀电场 $E_0=5V$, $R=150nm$, 则静电平衡时, 金属球内部感应电荷产生的电场:

由高斯定理[8]:

$$E' = E_0 = 5V$$

$$\int_s \vec{E}' d\vec{s} = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{2}{\pi} E' R \cos \theta d\theta = Q / \epsilon_0$$

从而

$$Q = 1.328 \times 10^{-17} \text{ 库伦}$$

这相当于的电子数为

$$n = Q / e = 83$$

结论1: 封装中至少要有83个自由电子

II. 再看第二个问题

电子的能量包括四部分：

$$E = m_0c^2 + E_k = m_0c^2 + E_1 + E_2 + E_3$$

(1) 设电子从金属球内壁跑出来消耗的能量为 设球a全部由 $^{12}\text{C}_6$ 构成，
则原子最外层电子的能量[7]：

($\sigma=2*0.85+3*0.35$, $Z=6$, $n=2$)

$$E_1 = 13.6(Z - \sigma)^2 / n^2 = 5.75 \times 10^{-16} \text{ J}$$

①

(2) 设 $R=150\text{nm}$, $r=100\text{nm}$, b中有10个QCA单元，每个单元带电量为 $2e$, 则b的电量 $Q=20e$;

一个电子从a到b克服库伦力所消耗的的能量[8]：

$$E_2 = \int_r^R \frac{eQ}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = 1.53 \times 10^{-20} \text{ J}$$

②

(3) 前面已经论述过：电子打在b，使其中的QCA单元改变状态的临界能量为 $=0.0022\text{MeV}$

$$E_3 = 0.0022\text{MeV} = 3.52 \times 10^{-16} \text{ J}$$

③

(4)电子总能量:

$$E = m_0c^2 + E_k = m_0c^2 + E_1 + E_2 + E_3 \quad (4)$$

由相对论公式[9]

$$E = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (5)$$

得 电子从金属球打在QCA单元上并使其改变状态所需的最小速度:

$$v_{\min} = 4.5 \times 10^7 \text{ m/s} \quad (6)$$

又由麦克斯韦速度分布律, 得电子速度超过的概率[10]:

$$P(v_{\min} - c) = k \int_{v_{\min}}^c e^{-\frac{1}{2}mv^2/kT} v^2 dv \quad (7)$$
$$= -\frac{v ke^{-\lambda v^2}}{2\lambda} \Big|_{v_{\min}}^c + \frac{k}{2\lambda} \int_{v_{\min}}^c e^{-\lambda v^2} dv$$

其中

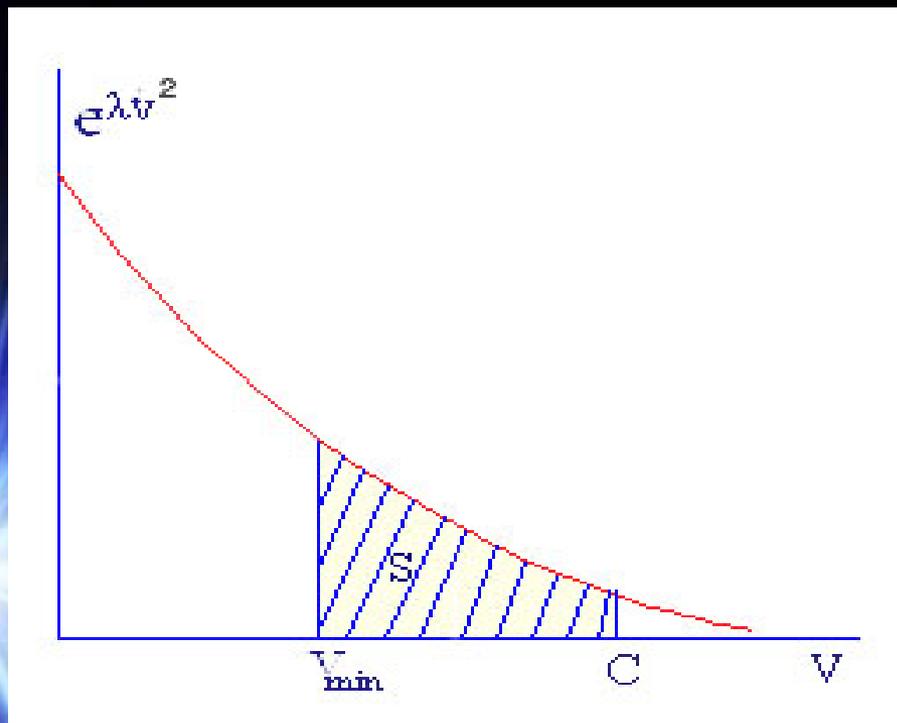
$$k = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} = 2.6 \times 10^{-15}$$

⑦式中的第二项的被积函数的曲线如右图：

则由几何关系得：

$$\int_{v_{\min}}^c e^{-\lambda v^2} dv = S < e^{-\lambda v_{\min}^2} (c - v_{\min})$$

⑧



⑦代入⑧式得：

$$P(v_{\min} - c) < \frac{k}{\lambda} \left[ce^{-\lambda c^2} + \left(\frac{c}{2} - \frac{3v}{2} \right) e^{-\lambda v^2} \right]$$

⑨

设

$$a = \lambda v_{\min}^2 = 2.05 \times 10^5$$

$$b = \lambda c^2 = 9.1 \times 10^6$$

由于运算的数量级超出了普通计算机的运算范围，故采用泰勒展开的方法估算如下：

$$e^{\lambda v_{\min}^2} > 1 + a + \frac{a^2}{2} + \frac{a^3}{6} + \frac{a^4}{24}$$

$$e^{\lambda c^2} > 1 + b + \frac{b^2}{2} + \frac{b^3}{6} + \frac{b^4}{24}$$

$$e^{-\lambda v_{\min}^2} < 3.3 \times 10^{-128}$$

$$e^{-\lambda c^2} < 9.6 \times 10^{-168}$$

⑩

⑩式代入⑨得

$$P(v_{\min} - c) < 10^{-100}$$

结论2：可认为此器件在有限的使用期间内不会被金属球上的电子击中并改变状态。

六、结论

由结论1可以看出要为QCA器件做出有效屏蔽干扰信号的封装需满足材料上的要求，即封装中至少要有83个自由电子。

在得出结论2过程中，一个电子从a到b需要的能量是R和r的函数，且 $E_2(R,r) \ll E_3(\text{QCA翻转能量})$ 故可看出封装对尺寸的要求并不严格，只要封装的半径大到不会与其中的QCA器件发生量子效应即可。因此可以用掺入特定元素而具有金属性质的亚纳米管作为QCA器件的封装。例如：QCA器件的最大半径为100nm,则封装的最小半径取250nm即可。

- 说明：
- 1.亚纳米管指尺寸略大于纳米尺度的管子。
 - 2.在对第一个条件进行计算时，我把封装等效成了一个金属球。在做实际的封装时由于尺度过小，不能采用金属做封装，但考虑到在碳纳米管中掺入一些特定的元素后可以使纳米管具有金属的性质，故模型仍然适用。

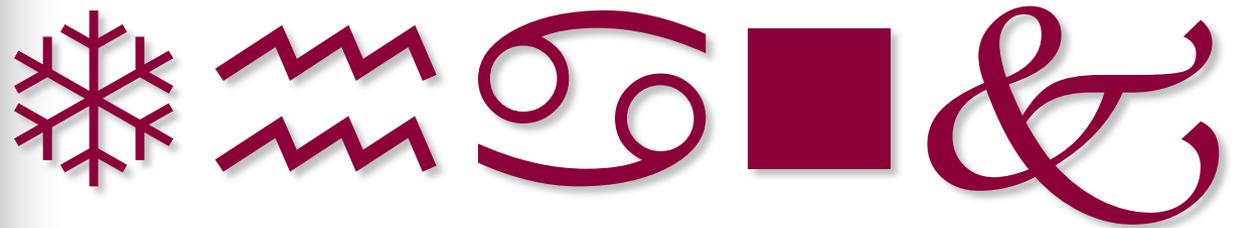
参考文献

- [1] Lee, H. Depley, L. J. Hong, H. G. Mallouk. T. E. J. Am. Chem. Soc. 1988, 110: 618
《国外纳米材料技术进展与应用》朱 屯 王福明 王习东等编著 化学工业出版社
2002年6月第1版
- [2] 图片来自《纳米尺度的电磁现象》 叶邦角讲座
- [3] Evaluation of the effect of fabrication tolerances on the ground-state energy of electrostatically defined quantum dots M. MACUCCI, G. IANNACCONI Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università degli studi di Pisa, Via Diotisalvi 2, I-56126 Pisa, Italy C. VIEU, H. LAUNOIS, Y. JIN Superlattices and Microstructures, Vol. 27, No. 5/6, 2000
- [4] Tougaw P D and Lent C S W 1994 *J. Appl. Phys.* **75** 1818
Quantum Cellular Automata: The Physics of Computing with Arrays of Quantum Dot Molecules Craig. S. Lent, P. Douglas Tougaw, and Wolfgang Porod Department of Electrical Engineering, University of Notre Dame, Notre Dame, IN 46556]
- [5] Nanoelectronics--Outlook, Challenges and Vision Dr. Rational You IEK/ITRI 2002/10/1
- [6] 同[3]
- [7] 《无机化学（上册 第三版）》 武汉大学等校编 曹锡章 宋天佑 王杏乔 修订
- [8] 《电磁学》胡友秋 程福臻 刘之景 编 高等教育出版社 1994年5月第1版
- [9] 《力学》杨维宏编 中国科学技术大学出版社 2002年4月第1版
- [10] 《热学》张玉民编 中国科学技术大学出版社 2000年5月第1版

致谢

- 感谢叶邦角老师对我的指导；
- 感谢朝夕相处的同学：蔡洪冰、曲建涛、涂镭、张银、廖昭亮等参与讨论；
- 感谢所有关心和帮助过我的朋友和师长！





you!



Happy Christmas!