

基于重叠栅工艺的硅量子点阵列的制备与调控^{*}

孙中海¹, 王保传^{1†}, 王宁¹, 刘汉伟¹, 曹刚¹, 李海欧¹, 郭国平^{1,2}

1. 中国科学技术大学, 中国科学院量子信息重点实验室, 合肥 230026

2. 本源量子计算科技有限责任公司, 合肥 230093

收稿日期: 2022-04-21; 接收日期: 2022-05-24

【摘要】 利用半导体量子点阵列结构实现近邻耦合是规模化扩展自旋量子比特的主要方案之一。随着量子点数目的增加, 量子点阵列器件的制作工艺及参数调控均愈加复杂。本文介绍了一种重叠栅工艺结构, 利用多层相互重叠且具有不同功能的栅极定义量子点, 制作出结构紧凑、调控性好的量子点阵列器件, 解决了工艺扩展的难题。此外, 本文发展了一套高效可靠的调控方法, 按顺序逐个添加量子点并建立虚拟电极, 实现了对量子点参数的独立控制, 并且能够高效且独立地调控各量子点中的电子数目, 克服了大规模量子点阵列中电压参数配置的困难。这些方法为未来实现大规模自旋比特阵列提供了一种标准化的方案。

关键词: 硅量子点, 量子点阵列, 电容耦合, 虚拟电极

PACS: 03.65.-w, 03.67.Lx, 73.40.Lq

DOI: 10.13380/j.ltpl.2022.03.001

Fabrication and Tuning of Silicon Quantum Dot Array with Overlapping Gates

SUN Zhonghai¹, WANG Baochuan^{1†}, WANG Ning¹, LIU Hanwei¹,
CAO Gang¹, LI Haiou¹, GUO Guoping^{1,2}

1. CAS Key Laboratory of Quantum Information, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Origin Quantum Computing Company Limited, Hefei 230093, China

Received date: 2022-04-21; accepted date: 2022-05-24

【Abstract】 Utilizing semiconductor quantum dot arrays to achieve nearest-neighbor coupling is one of the main approaches for scaling up spin qubits. However, as the number of quantum dots increases, the device design, fabrication, and parameters tuning of the quantum dot array face great challenges. Here, we introduce an overlapping-gates structure, which uses multiple layers of overlapping gates to define quantum dots and provides a promising technique for quantum dots scaling. We successfully fabricate compact and well-tuned quantum dot array devices with this structure. In addition, we develop a tuning method with high efficiency and reliability, which realizes the independent control of quantum dot parameters by establishing virtual gates, and the number of electrons in each quantum dot can be efficiently and independently tuned. These methods overcome the difficulty of parameter configuration in large-scale quantum dot arrays and provide a standardized scheme for realizing large-scale spin qubit array in the future.

^{*} 国家自然科学基金(批准号:12034018)资助的课题.

[†] bchwang@ustc.edu.cn

Keywords: Silicon quantum dot, Quantum dot array, Capacitively coupled, Virtual gate

PACS: 03.65.-w, 03.67.Lx, 73.40.Lq

DOI: 10.13380/j.ltpl.2022.03.001

Reference method: SUN Zhonghai, WANG Baochuan, WANG Ning, LIU Hanwei, CAO Gang, LI Haiou, GUO Guoping, Low. Temp. Phys. Lett. **43**, 0165 (2022)

1 引言

基于硅量子点的自旋量子比特是实现实用化量子计算的重要平台之一^[1-2],近年来自旋比特的操控研究已经取得了重大进展,随着高保真度的单比特和两比特逻辑门的实现^[3-6],研究热点开始聚焦于扩展自旋比特的数量.利用自旋交换相互作用耦合扩展自旋比特^[1]是一种行之有效的方式,而一维^[7-9]和二维^[10-12]量子点阵列是简单可靠的近邻耦合架构,有望成为基于自旋比特量子信息处理器的关键组件.

然而,随着量子点数目的增加,量子点阵列的结构设计、工艺制备以及电学调控测量均变得更加复杂^[13].由于控制量子点阵列的电压参数过多,因此仅通过扫描个别参数获得的整个阵列的电荷稳定相图中难以确定各量子点的电荷占据状态^[14].此外,定义量子点的栅极之间存在电容耦合串扰^[15],也为量子点阵列的调控测量带来极大不便.

本文中,我们基于重叠栅结构便于扩展的特性制备出可调性好的一维四量子点阵列,并介绍了一种高效可靠的调控方法,通过逐个添加量子点并建立虚拟电极,可独立控制各量子点的参数,并将四个量子点均配置为单电子占据状态,用于编码自旋比特.本文介绍的这一调控方法,解决了量子点阵列中电压参数配置的难题,并且具有普适性,可以应用到更大规模的量子点阵列中.

2 实验方法

2.1 四量子点的制备与可调性表征

我们利用硅锗异质结^[16-18]基片来制备硅基量子点(Quantum Dot, QD)阵列,基片结构及能带示意图如图 1(a)所示.在电场作用下,硅阱层(Strained Si Layer)中会产生二维电子气(2-Dimensional Electron Gas, 2DEG).当 2DEG 中的载流子浓度为 $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时,电子迁移率可达 $4 \times 10^5 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$.我们开发了重叠栅工艺来制作量子点阵列的栅极,重叠栅工艺十分便于量子点的扩展^[19].量子点的栅极结构如图 1(b)所示,该量子点阵列拥有三层电极.我们采用金属铝作为栅极材料,每层电极之间通过使铝电极在氧等离子体环境下加热进行氧化,形成致密的氧化铝薄膜从而达到绝缘目的.这里每层电极具有特定的功能:底层

为屏蔽电极(Screen Gate, SC),通常始终保持接地状态,通过屏蔽上层栅极产生的电场以防止其正下方的硅阱中积累电子,从而形成三个狭窄的导通沟道,中间 SC0 电极用来隔离上下通道;中间层包含用于调控量子点电势的栓塞电极(Plunger Gate, PG)以及用于形成电子库并连接源漏与量子点的引导电极(Lead Gate, LG);顶层全部为势垒电极(Barrier Gate, BG),用于控制量子点与电子库之间的隧穿率以及相邻点间的耦合大小.图 1(c)展示了我们制备的四量子点器件的核心区电子显微镜照片,该器件包含六个量子点,位于下方的是一维四量子点阵列(QD_{1-4}),额外两量子点被集成在四量子点阵列上方的两侧作为电荷探测器(Charge Sensor)以探测四量子点的电荷占据状态.

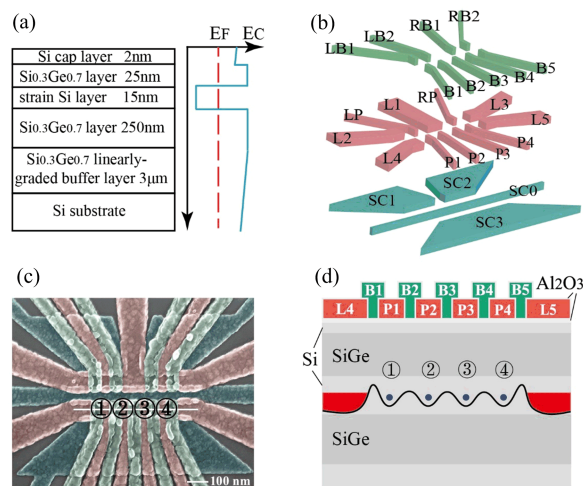


图 1 硅锗异质结衬底及一维四量子点阵列栅极结构. (a)实验中使用到的硅锗异质结衬底的结构参数以及能带示意图;(b)四量子点阵列的三层电极结构示意图;(c)实验中制备的四量子点阵列样品的 SEM 图(已按层进行着色处理);(d)沿图(c)中白色实线的剖面示意图

我们将制备的四量子点器件放置于约 30 mK 温度环境的稀释制冷机中进行测试并表征势垒电极对量子点间耦合强度的调节能力.首先,通过在栅极上施加合适大小的正电压,使沟道导通并形成量子点 QD_{1-2} .我们通过扫描栅极 P_1 、 P_2 的电压,并利用电荷感应技术测量如图 2(a)所示的 QD_{1-2} 的电荷稳定相图.在图中 $(0, 1) - (1, 0)$ 区域附近测量电子占据 QD_2 的概率 $P(0, 1)$ 随 QD_{1-2} 失谐 ϵ (两量子点电势之差)的变化(括号内的数字分别表示 QD_1 与 QD_2 中占据的电子数目),由于 QD_1

与 QD_2 之间存在隧穿耦合 t_c , 电荷态 $(0, 1)$ 、 $(1, 0)$ 产生杂化, 根据测量结果并结合公式 $P_{(0,1)} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\epsilon}{\Omega} \tanh \left(\frac{\Omega}{2kT_e} \right) \right]$, 可拟合出隧穿耦合 t_c 大小^[20]. 其中, k 为玻尔兹曼常数, T_e 为电子温度, 通过测量库伦峰展宽随环境温度的变化可以得到 T_e .

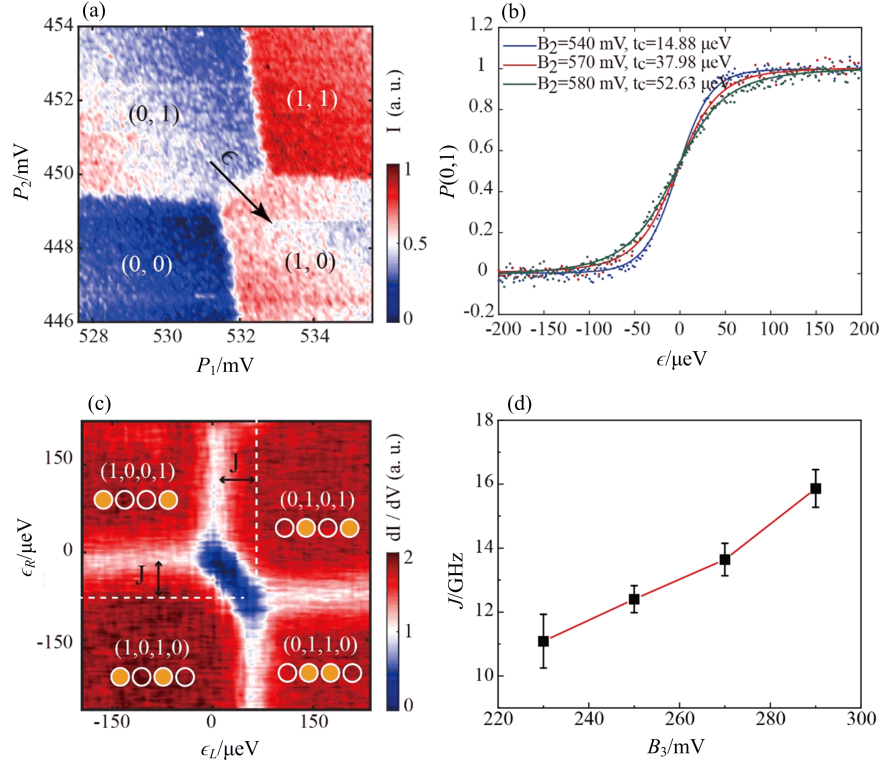


图2 一维四量子点器件可调性表征. (a) 在 $(0, 1)$ – $(1, 0)$ 附近测量电子占据概率 $P(0, 1)$ 随 QD_{1-2} 失谐 ϵ 的变化; (b) 调节栅极 B_2 电压大小, 拟合 QD_1 与 QD_2 的隧穿耦合强度; (c) 根据电荷隧穿线的偏移, 测量两双量子点 QD_{1-2} 与 QD_{3-4} 的电容耦合能; (d) QD_{1-2} 与 QD_{3-4} 电容耦合能 J 随栅极 B_3 电压的变化

进一步地, 我们表征了栅极 B_3 对双量子点 QD_{1-2} 与 QD_{3-4} 之间电容耦合的调控能力. 首先通过调节 B_3 使得 QD_{2-3} 处于弱耦合状态 (隧穿耦合强度大约为 $0 \sim 100 \mu\text{eV}$), 并将 QD_{2-3} 设置在电荷稳定相图中远离反交叉点的位置, 使得 QD_{2-3} 内不发生电子隧穿, 确保 QD_{1-2} 与 QD_{3-4} 之间只存在电容耦合. 这里把 QD_{1-2} 与 QD_{3-4} 等效地看作单电子占据, 当 QD_{1-2} 与 QD_{3-4} 中等效的单电子分别位于四量子点阵列的外侧时, 即电子占据情况为 $(1, 0, 0, 1)$, 此时两个电子的库伦作用最弱. 调节左右双量子点 QD_{1-2} 与 QD_{3-4} 内的失谐 ϵ_L 、 ϵ_R , 当任一双量子点内的电子向内侧量子点发生隧穿时, 两电子库伦相互作用增强, 从而引起另一双量子

点约为 250 mK , $\Omega = \sqrt{\epsilon^2 + 4t_c^2}$ 为杂化电荷态的能级差. 由于栅极 B_2 控制 QD_{1-2} 之间的耦合, 在改变栅极 B_2 电压的同时测量 $P(0, 1)$ 随失谐 ϵ 的变化, 如图 2(b) 所示, 当栅极 B_2 电压增大时, 拟合得到的隧穿耦合 t_c 随之增大, 说明栅极 B_2 对 QD_{1-2} 之间的隧穿耦合有较好的调节能力.

点的电荷隧穿线发生偏移, 隧穿线偏移大小对应 QD_{1-2} 与 QD_{3-4} 之间的电容耦合能 J ^[21]. 栅极 B_3 控制 QD_{1-2} 与 QD_{3-4} 之间的电容耦合大小, 如图 2(d) 所示, 当栅极 B_3 电压增大时, QD_{1-2} 与 QD_{3-4} 的电容耦合能 J 随之增大, 较大的 J 值有助于实现电荷量子比特的两比特门操控. 以上结果表明, 我们基于重叠栅工艺制备的一维四量子点器件拥有良好的耦合调节能力.

2.2 量子点阵列的调控

实验上, 一般通过电荷稳定相图来确定量子点中的电子数目, 并将其配置为单电子 (或特定数量的多电子) 占据状态用于自旋比特编码. 在构成相图的电压参数空间中, 量子点中占据不同电子数目的电

压区域由电荷隧穿线分割,每一组相互平行的电荷隧穿线代表着某个量子点的电荷填充变化^[15],如图3(a)中所示.随着量子点阵列的规模扩大,电压参数也随之增加,仅通过扫描其中的个别参数无法获取阵列中所有量子点的电子占据情况.由于控制目标电压参数的栅极对远离其位置的量子点调控能力弱,因而较远量子点的电荷隧穿线开始变得平行而不能区分^[14],而且很难判断该量子点中的电子数目.此外,由于量子点的数目增多,不同量子点的电荷隧穿线相互交叉,使得量子点阵列中占据特定电子数目的电压区域变得狭窄、拥挤而难以分辨^[8,14].

因而,对于多量子点阵列,精确控制各个量子点内电子占据数目较为困难.

为了解决这个问题,我们发展了一套高效快速的调控方法并应用于四量子点阵列中.量子点阵列的调控过程从阵列最左侧的双点开始,根据 QD_{1-2} 的电荷稳定相图,我们可以确定 QD_1 及 QD_2 内的电子数目.如图3(b)所示,这时如果调低 B_4 的电压将 QD_3 引入,由于存在电容耦合串扰,在调节 B_4 、 P_3 的电压控制 QD_3 的形成以及电子占据数目时会改变 QD_{1-2} 的电化学势,从而可能引起 QD_{1-2} 内电子数目的变化.

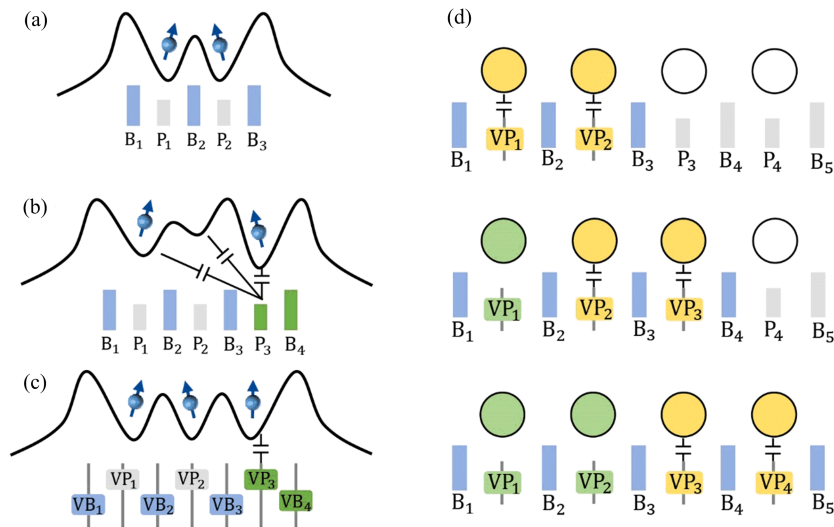


图3 (a)仅引入 QD_{1-2} ,并将其配置在单电子占据区域;(b)在 QD_1 与 QD_2 配置好后,如果直接调节 P_3 、 B_4 电压将 QD_3 引入,由于存在耦合串扰,改变 P_3 、 B_4 电压的同时会导致已配置好的 QD_1 与 QD_2 的状态发生变化;(c)利用虚拟电极可以独立地控制 QD_3 ,而不改变 QD_1 与 QD_2 的工作状态;(d)多量子点阵列调控流程示意图.首先引入 QD_{1-2} ,建立虚拟电极 VP_1 、 VP_2 .固定 VP_1 保持 QD_1 处于单电子占据状态,然后调节 B_4 电压引入 QD_3 ,并建立虚拟电极 VP_3 ,利用电荷稳定相图 VP_2-VP_3 将 QD_2 、 QD_3 配置在单电子占据状态.最后,固定 VP_2 保持 QD_2 处于单电子占据状态,调节 B_5 电压引入 QD_4 ,并建立虚拟电极 VP_4 ,利用电荷稳定相图 VP_3-VP_4 将 QD_3 、 QD_4 配置在单电子占据状态.

为了确保在配置新引入的量子点参数时,已经配置好的量子点状态不受影响,我们引入虚拟电极以补偿电容耦合串扰.在理想状态下,量子点的单个栅极被设计为调节特定参数,如电化学势或隧穿势垒的大小.由于存在电容耦合,某一栅极电压的变化不仅会改变目标参数,还会改变附近其他量子点的电化学势等参数,且相距越近影响程度越大.这种不利的电容耦合串扰可以通过建立虚拟电极补偿.所谓的虚拟电极即是通过将多个实际物理电极进行线性组合^[8,22],当改变某个栅压调控对应的参数时,通过对其他栅极施加反向的电压补偿由该栅压引起的

其他量子点参数的变化,从而使得虚拟电极只会调节其对应的参数(如图3(c)所示).我们以三量子点为例,只考虑BG对PG、以及PG之间的耦合串扰,则虚拟电极与实际物理电极之间的关系可表示为

$$\begin{pmatrix} VP_1 \\ VB_1 \\ VP_2 \\ VB_2 \\ VP_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & 1 & a_{34} & a_{35} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1 \\ B_1 \\ P_2 \\ B_2 \\ P_3 \end{pmatrix},$$

其中, VP_i 、 VB_i 分别是利用耦合矩阵建立的用于独立控制 QD_i 的电化学势及势垒的虚拟电极.并且,

上式中的 P_i 、 B_i 分别表示施加到对应电极的电压值,而 VP_i 、 VB_i 的值是对 P_i 、 B_i 的线性组合,并没有实际的物理意义. 耦合系数 $a_{ij} = \Delta N_i / \Delta M_j$, 代表着由于电容耦合串扰, 电极 M_j 电压的变化对于电极 N_i 的影响程度, 需要通过实验测得. 将所有的耦合系数测出并组建耦合矩阵 $\mathbf{A} = (a_{ij})$, 即可将实际物理电极组合为虚拟电极. 实验上, 我们在扫描虚拟电极时, 电压是施加在相关的物理电极上的, 为了得到扫描虚拟电极时实际施加的物理栅极电压, 我们可以通过对耦合矩阵 $\mathbf{A}$ 取逆得到物理栅极电压值相对于虚拟电极的比例.

首先, 我们来建立 QD_{1-2} 的虚拟电极. P_1 和 P_2 之间的耦合系数可以直接在 QD_{1-2} 电荷稳定相图的最后一个电子区域附近提取. 如图 4(a) 所示, 在扫描 P_2 过程中, P_2 电压值的变化 ΔP_2 导致 QD_1 的电荷隧穿线的位移 ΔP_1 , 比率 $\Delta P_1 / \Delta P_2$

即耦合系数 a_{31} . 同样的, P_1 电压值的变化 $\Delta P_1'$ 导致 QD_2 的电荷隧穿线的位移 $\Delta P_2'$, 比率 $\Delta P_2' / \Delta P_1'$ 即耦合系数 a_{13} . 我们用上述同样的方法分别扫描 $B_1 - P_1 / P_2$, $B_2 - P_1 / P_2$, $B_3 - P_1 / P_2$ (如图 4(c) 所示), 测得 $B_1 \sim B_3$ 分别对 P_1 及 P_2 的耦合系数. 将测得的所有耦合系数组建耦合矩阵 $\mathbf{A}_1$, 从而建立双点的虚拟电极. 对 $\mathbf{A}_1$ 取逆, 我们就得到了扫描 VP_1 、 VP_2 时应该对 $P_1 \sim P_2$ 及 $B_1 \sim B_3$ 施加的实际电压值, 并获得图 4(b) 所示的以虚拟电极 VP_1 和 VP_2 为参数的电荷稳定相图. 图中的电荷隧穿线相互垂直, 说明我们可以通过 VP_1 (VP_2) 独立控制 QD_1 (QD_2) 的电化学势以及电子数目, 而不会对其他 QD 状态造成影响. 需要说明的是, 由于我们仅在 QD_{1-2} 的最后一个电子区域附近测得的耦合系数, 因此所建立的虚拟电极仅在该区域附近有较好的效果.

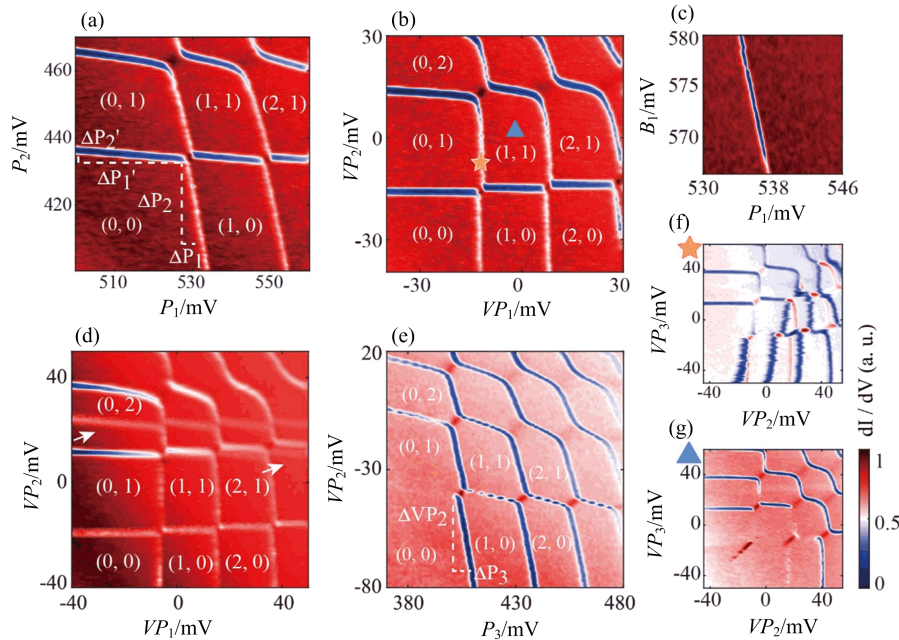


图 4 (a) 电荷稳定相图 $P_1 - P_2$; (b) 电荷稳定相图 $VP_1 - VP_2$; (c) 提取栅极间耦合系数; (d) 逐渐减小 B_4 , 当 QD_3 被引入, 电荷稳定相图 $VP_1 - VP_2$ 出现 QD_3 的电荷隧穿线(箭头所示); (e) 扫描电荷稳定相图 $P_3 - VP_2$ 将 QD_3 配置在最后一个电子占据状态, 并提取 VP_2 对 P_3 的耦合系数; (f) 将 VP_1 电压配置在 QD_1 电荷隧穿线附近((b)中五角星位置)时的电荷稳定相图 $VP_2 - VP_3$; (g) 将 VP_1 电压配置在远离 QD_1 电荷隧穿线((b)中三角形位置)时的电荷稳定相图 $VP_2 - VP_3$.

成功建立 QD_{1-2} 的虚拟电极之后, 我们减小 B_4 的电压将 QD_3 引入. 在减小 B_4 电压的同时, 扫描 $VP_1 - VP_2$, 一旦 B_4 达到合适的电压使得 QD_3 形成后, $VP_1 - VP_2$ 的电荷稳定相图中出现 QD_3 的电荷隧穿线(如图 4(d) 中的白色箭头所示). 这时我们调节 VP_1 将 QD_1 配置在单电子占据

状态, 并保持不变. 然后扫描 $VP_2 - P_3$ 得到 QD_{2-3} 的电荷稳定相图, 并将 QD_2 、 QD_3 配置在单电子占据状态. 为了建立三个点的虚拟电极, 可以分别测量 VP_2 、 VB_{2-3} 以及 B_4 对 P_3 的耦合系数 (VB_1 、 VP_1 距离 P_3 较远, 其耦合系数约为 0, 因而忽略不计), 其中 VP_2 与 P_3 的耦合系数可直接在

电荷稳定相图 VP_2-P_3 的最后一个电子区域附近提取(如图 4(e)所示). 把这些系数填充到单位矩阵中对应 P_3 的行列, 将其定义为 A'_2 . A'_2 相当于在 QD_{1-2} 的虚拟电极基础上建立的虚拟电极 VP_3 . 令 $A_2 = A'_2 A_1$, 我们就完成了三量子点虚拟电极的建立. 重复上述步骤继续添加 QD_4 , 建立虚拟电极 VP_4 与耦合矩阵 $A_3 = A'_3 A_2$, 使得 VP_4 单独调控 QD_4 的电化学势而不改变其他量子点状态. 将阵列中的量子点全部引入并建立虚拟电极后, 便可以实现对各量子点参数的独立控制.

3 结果与讨论

上述调控方法的基本流程如图 3(d)所示, 首先引入 QD_{1-2} , 建立虚拟电极 VP_1 、 VP_2 , 固定 VP_1 将 QD_1 配置在单电子占据状态, 然后调节 B_4 电压引入 QD_3 , 并建立虚拟电极 VP_3 , 利用电荷稳定相

图 VP_2-VP_3 将 QD_2 、 QD_3 配置在单电子占据状态. 重复这样的步骤, 逐个地将阵列中的所有量子点全部添加进来, 同时建立虚拟电极. 当所有量子点被引入后, 利用虚拟电极可测得如图 5(a)~(c)所示的三组电荷稳定相图. 相图中的电荷隧穿线相互垂直表明上述虚拟电极稳定可靠, 并且可以利用该虚拟电极独立调节对应量子点中电子数目. 根据图 5(a)~(c), 我们可将四量子点均配置在单电子占据状态. 此外, 我们这里为了简化, 并没有考虑 PG 对 BG、以及 BG 之间的耦合, 在后续实验中, 必须将这些栅极与 BG 的耦合系数添加在耦合矩阵中, 从而建立虚拟电极 VB_i , 实现对点间耦合大小的独立调控而不影响量子点的电化学势^[23]. 另外, 还可以将电荷探测器的 PG 电极添加进来, 以确保在调控量子点阵列的栅极电压时, 电荷探测器始终工作在敏感区.

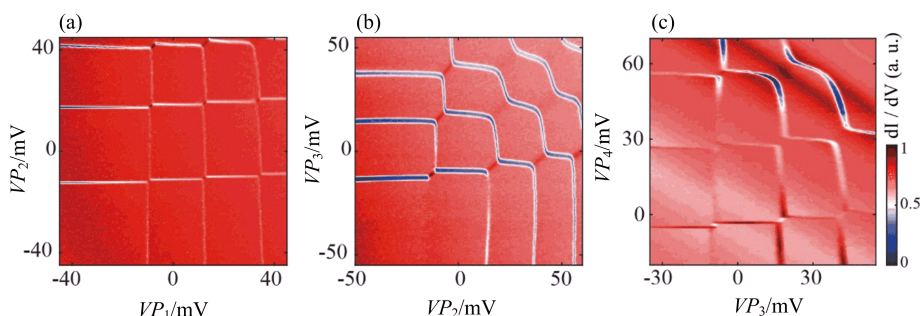


图 5 (a)~(c) 四量子点阵列的虚拟电极建立完毕后, 分别两两扫描虚拟电极的电荷稳定相图

在建立虚拟电极的过程中我们发现, 扫描虚拟电极测量任意两量子点电荷稳定相图时, 如果将与相邻的量子点配置在电荷隧穿线附近, 测得的电荷稳定相图会出现额外的隧穿线, 这会导致选取的量子点工作位置以及虚拟电极参数出现错误. 如图 4(f)所示, 我们将 VP_1 的电压参数配置在 QD_1 的某一隧穿线附近(图 4(b)中五角星位置), 在测得的电荷稳定相图 VP_2-VP_3 上出现了 QD_1 的隧穿线. 而我们将 VP_1 电压参数配置在远离电荷隧穿线的位置后(图 4(b)中三角形位置), QD_1 的隧穿线消失. 因此, 为了确保虚拟电极和量子点参数配置准确, 在利用虚拟电极测量电荷稳定相图时, 必须将相邻量子点配置在远离电荷隧穿线的位置.

4 结论

我们基于重叠栅工艺制备了一维四量子点阵

列, 通过表征栅极对量子点间耦合强度的调控能力, 表明了我们制备的四量子点器件拥有良好的可调性. 此外, 我们发展了一套高效可靠的调控方法, 并应用到上述四量子点阵列上. 基于这种方法, 我们建立的虚拟电极可以独立地调节各个量子点的电化学势而不对其他量子点的状态造成影响, 并将阵列中各量子点均配置成单电子占据状态, 从而编码自旋比特. 这种调控方法不依赖量子点的衬底材料以及栅极结构, 在砷化镓、硅或锗材料的量子点阵列调控中均适用. 此外, 这种方法流程简单、规范, 便于实现自动化测量^[24,25]. 而且, 这种方法不受量子点规模的限制, 可以自然地推广到大规模一维和二维量子点阵列的调控中. 总而言之, 本文介绍的方法解决了大规模量子点阵列调控的瓶颈, 为未来大规模自旋量子比特阵列的精确调控提供了方案.

参 考 文 献

- [1] Daniel Loss, David P. DiVincenzo, *Phys. Rev. A*, **57** (1998), 120
- [2] R. Hanson, L. P. Kouwenhoven, J. R. Petta, S. Tarucha, and L. M. K. Vandersypen, *Rev. Mod. Phys.*, **79** (2007), 1217
- [3] Jun Yoneda, Kenta Takeda, Tomohiro Otsuka, Takashi Nakajima, Matthieu R. Delbecq, Giles Allison, Takumu Honda, Tetsuo Kodera, Shunri Oda, Yusuke Hoshi, Noritaka Usami, Kohei M. Itoh, Seigo Tarucha, *Nat. Nanotech.*, **13** (2018), 102
- [4] Akito Noiri, Kenta Takeda, Takashi Nakajima, Takashi Kobayashi, Amir Sammak, Giordano Scappucci, Seigo Tarucha, *Nature*, **601**(2022), 338
- [5] Xiao Xue, Maximilian Russ, Nodar Samkharadze, Brennan Undseth, Amir Sammak, Giordano Scappucci, Lieven M. K. Vandersypen, *Nature*, **601**(2022), 343
- [6] Adam R. Mills, Charles R. Guinn, Michael J. Gullans, Anthony J. Sigillito, Mayer M. Feldman, Erik Nielsen, Jason R. Petta, *Sci. Adv.*, **8**(2022), eabn5130
- [7] A. R. Mills, D. M. Zajac, M. J. Gullans, F. J. Schupp, T. M. Hazard, J. R. Petta, *Nat. Commun.*, **10**(2019), 1063
- [8] A. J. Sigillito, J. C. Loy, D. M. Zajac, M. J. Gullans, L. F. Edge, J. R. Petta, *Phys. Rev. Applied*, **11** (2019), 061006
- [9] Takafumi Fujita, Timothy Alexander Baart, Christian Reichl, Werner Wegscheider and Lieven Mark Koenraad Vandersypen, *npj Quantum Inf.*, **3**(2017), 22
- [10] Romain Thalineau, Sylvain Hermelin, Andreas D. Wieck, Christopher Bäuerle, Laurent Saminadayar, Tristan Meunier, *Appl. Phys. Lett.*, **101**(2012), 103102
- [11] Uditendu Mukhopadhyay, Juan Pablo Dehollain, Christian Reichl, Werner Wegscheider, Lieven M. K. Vandersypen, *Appl. Phys. Lett.*, **112**(2018), 183505
- [12] Pierre-André Mortemousque, Emmanuel Chanrion, Baptiste Jadot, Hanno Flentje, Arne Ludwig, Andreas D. Wieck, Matias Urdampilleta, Christopher Bäuerle, Tristan Meunier, *Nat. Nanotech.*, **16**(2021), 296
- [13] Masahiro Tadokoro, Takashi Nakajima, Takashi Kobayashi, Kenta Takeda, Akito Noiri, Kaito Tomari, Jun Yoneda, Seigo Tarucha, Tetsuo Kodera, *Sci. Rep.*, **11**(2021), 19406
- [14] C. Volk, A. M. J. Zwerver, U. Mukhopadhyay, P. T. Eendebak, C. J. van Diepen, J. P. Dehollain, T. Hensgens, T. Fujita, C. Reichl, W. Wegscheider, L. M. K. Vandersypen, *npj Quantum Inf.*, **5**(2019), 29
- [15] W. G. van der Wiel, S. De Franceschi, J. M. Elzerman, T. Fujisawa, S. Tarucha, L. P. Kouwenhoven, *Rev. Mod. Phys.*, **75**(2002), 1
- [16] G. Abstreiter, H. Brugger, and T. Wolf, *Phys. Rev. Lett.*, **54**(1985), 2441
- [17] Friedrich Schäffler, *Semicond. Sci. Technol.*, **12** (1997), 1515
- [18] Douglas J. Paul, *Semicond. Sci. Technol.*, **19**(2004), R75
- [19] J. P. Dodson, Nathan Holman, Brandur Thorgrimsson, Samuel F. Neyens, E. R. MacQuarrie, Thomas McJunkin, Ryan H. Foote, L. F. Edge, S. N. Coppersmith, M. A. Eriksson, *Nanotechnology*, **31**(2020), 505001
- [20] L. DiCarlo, H. J. Lynch, A. C. Johnson, L. I. Childress, K. Crockett, C. M. Marcus, M. P. Hanson, A. C. Gossard, *Phys. Rev. Lett.*, **92**(2004), 226801
- [21] Samuel F. Neyens, E. R. MacQuarrie, J. P. Dodson, J. Corrigan, Nathan Holman, Brandur Thorgrimsson, M. Palma, Thomas McJunkin, L. F. Edge, Mark Friesen, S. N. Coppersmith, M. A. Eriksson, *Phys. Rev. Applied*, **12** (2019), 064049
- [22] T. Hensgens, T. Fujita, L. Janssen, Xiao Li, C. J. Van Diepen, C. Reichl, W. Wegscheider, S. Das sarma, L. M. K. Vandersypen, *Nature*, **548** (2017), 70
- [23] C. J. van Diepen, P. T. Eendebak, B. T. Buijtenorp, U. Mukhopadhyay, T. Fujita, C. Reichl, W. Wegscheider, L. M. K. Vandersypen, *Appl. Phys. Lett.*, **113**(2018), 033101
- [24] T. A. Baart, P. T. Eendebak, C. Reichl, W. Wegscheider, L. M. K. Vandersypen, *Appl. Phys. Lett.*, **108** (2016), 213104
- [25] Tim Botzem, Michael D. Shulman, Sandra Foletti, Shannon P. Harvey, Oliver E. Dial, Patrick Bethke, Pascal Cerfontaine, Robert P. G. McNeil, Diana Mahalu, Vladimir Umansky, Arne Ludwig, Andreas Wieck, Dieter Schuh, Dominique Bougeard, Amir Yacoby, Hendrik Bluhm, *Phys. Rev. Applied*, **10**(2018), 054026