集成电荷传感器揭示的InAs纳米线三重量子点中的电荷态、三重点和四重点

Weijie Li,[1,2] Zhihai Liu,[3] Jingwei Mu,[1,2] Yi Luo,[1,4] Dong Pan,[5] Jianhua Zhao,[5] 和 H. Q. Xu[1,3,*1] 北京大学北京市量子器件重点实验室、纳米器件物理与化学重点实验室和电子学院，北京 100871，中国[2] 北京大学前沿交叉学科研究院，北京 100871，中国[3] 北京量子信息科学研究院，北京 100193，中国[4] 北京大学凝聚态与材料物理研究所、物理学院，北京 100871，中国[5] 中国科学院半导体研究所超晶格与微结构国家重点实验室，北京 100083，信箱 912[*] 通讯作者：hqxu@pku.edu.cn（日期：2023年1月30日）关键词：三量子点，电荷传感器，四重点，量子元胞自动机

a

摘要

通过精细指栅技术，在一根砷化铟纳米线上制备出串联三量子点（TQD），并集成了量子点（QD）电荷传感器。通过直接输运测量和电荷传感器探测测量，研究了该器件在少电子区间的复杂电荷态及其独特性质。对由TQD中的一个量子点和传感器量子点构成的电容耦合并联双量子点进行电荷稳定性图测量，结果显示TQD与传感器量子点之间存在明显的电容耦合，表明电荷传感器具有良好的灵敏度。利用电荷传感器测量TQD的电荷稳定性图；测得的电荷稳定性图所呈现的整体特征，与同步测量TQD直接输运电流的结果以及基于有效电容网络模型的模拟结果均高度吻合。利用集成电荷传感器，对TQD在能量简并区的复杂电荷稳定性图进行了详细测量；在该区域，三个量子点均处于或接近共振状态，观测到了四重点的形成以及所有可能的八种电荷态。此外，还展示并讨论了TQD作为量子元胞自动机的运行。

1. 引言

由窄带隙纳米线（如 InAs 和 InSb 纳米线）制成的半导体量子点（QDs），凭借材料本身具有的有效质量小、朗德 g 因子大以及自旋轨道相互作用强等特性，是实现固态量子模拟和量子信息处理[1-6]最具潜力的平台之一[7-13]。如今，已通过全电学方式实现了对 InAs 和 InSb 纳米线双量子点（DQDs）[14,15]中自旋量子比特态的相干操控。研究人员已致力于将双重量子点扩展为纳米线三重量子点（TQDs）[16-21]；这对于实现无退相干的仅交换量子比特操作[22-25] 和相干量子隐形传态[26,27], ，以及理解丰富的物理现象至关重要，例如四重点（QPs）处的基态电荷构型 [16-19]、量子元胞自动机（QCA）[28-30] 操作，以及费米-哈伯德系统中的强量子关联。[5]

要在由三量子点构成的器件中实现精确的量子比特操控和量子模拟，通常需要使每个三量子点工作在少电子、与环境弱耦合的状态下。对这类少电子、与环境弱耦合的三量子点进行实验控制和操控时，一个固有的技术难题是：通过测量流经三量子点的电流，精确检测其中的电荷态跃迁。因为这些电荷态跃迁处的电流通常极小（< lpA），往往低于最先进电子设备的检测限；或者这些电子电荷态之间的跃迁仅涉及三个量子点内部的电荷重排，因此实际上不会有电流流经三量子点。为克服少电子、与环境弱耦合的量子点器件中电荷态跃迁检测所遇到的问题，研究人员已将量子点接触和量子点用作电荷传感器。实验表明，由于量子点电荷传感器中量子态的屏蔽和寿命展宽显著降低，量子点电荷传感器在提高测量灵敏度和信噪比方面具有优势[31,32]。借助集成的量子点接触电荷传感器，研究人员已在由 GaAs/AlGaAs 二维电子气（2DEG）制成的三量子点器件中观察到四重点的形成[16-19]。然而，对于由纳米线制成的三量子点，尚未有研究清晰观测到全部八种可能的电荷态及其对应的八个三重点，也未能直观展示完整而复杂的电荷稳定性图；这很可能是因为尚未集成高灵敏度的电荷传感器。已有多项研究尝试

在基于纳米线的量子点系统中集成电容耦合电荷传感器。早期研究曾尝试通过集成在纳米线量子点正下方、由 GaAs/AlGaAs 二维电子气制成的量子点接触电荷传感器，检测基于纳米线的量子点中的电荷态[33,34]。最近，通过将基于纳米线的量子点电荷传感器集成到纳米线量子点中，研究人员已成功检测到纳米线量子点中的电荷态跃迁[35-40]。为了研究四重点处简并电荷构型的动力学和基于量子点的量子元胞自动机操作，并揭示基于纳米线的三重量子点电荷稳定性图的全部复杂性，在纳米线平台上的三量子点中集成一个灵敏的电荷传感器势在必行。

本文报道了通过精细指栅技术[35-40]，利用单根 InAs 纳米线实现集成量子点电荷传感器的 TQD。在此，我们考虑在单根 InAs 纳米线上将电荷传感器集成到 TQD 中，通过消除借助微操纵[41] 精确放置纳米线或在衬底上进行预图案化[42]的需求，简化器件制备。我们还采用一根细金属线来增强电荷传感器与 TQD 之间的电容耦合，从而提高对 TQD 内部电荷构型重排的传感灵敏度。通过同步测量 TQD 中的直接输运信号和量子点传感器中的检测信号，对集成式 TQD 器件进行了表征，并且这两类测量结果之间取得了极好的一致性。测量了 TQD 的电荷稳定性图，并建立了一个电容网络模型[17-19,43,44]，能够重现测得的电荷稳定性图。借助高灵敏度电荷传感器，我们绘制了能量简并区域内形成的各种电荷态；在该区域中，三个量子点的能级均接近与源极和漏极储库的费米能级发生共振。通过一系列沿三维空间平行方向截取的二维切片，在三维（3D）栅极电压空间中呈现了这些结果。我们观察并分析了 TQD 的显著特性，包括在能量简并区域内形成全部八种电荷态及其相应的八个三重点，以及四重点和基于量子点的量子元胞自动机单元的特性。

2. 结果与讨论

2.1 器件架构与制备

本研究所用的 InAs 纳米线通过分子束外延（MBE）在 Si(111) 衬底上借助 Ag 催化剂生长。[45] 图1(a)展示了一幅代表性制备器件的扫描电子

显微镜（SEM）图像，其中显示了七个用于定义三量子点（TQD）的顶部指栅，标记为 G1 至 G7；三个用于定义量子点（QD）传感器的顶部指栅，标记为 g1 至 g3；以及标记为 CW 的耦合金属线。 三量子点和量子点传感器的漏极接触分别标记为 D 和 d，共用的源极接触标记为 S。图1(b)展示了器件的三维视图示意图。制备器件时，采用干法将 InAs 纳米线转移至重掺杂 p 型硅衬底上，该衬底覆盖有一层厚度为 300 nm 的 SiO_2, ，其表面预先制有金属标记。选取直径为 ~30 nm 且具有纯纤锌矿晶相的 InAs 纳米线，并根据标记确定其位置后，采用标准电子束光刻（EBL）、电子束蒸发（EBE）金属沉积和剥离工艺，制备厚度为 5 nm/90 nm 的 Ti/Au 源极和漏极接触。为去除纳米线表面氧化物并实现表面钝化，在金属沉积前，立即将纳米线的接触区域置于 $(NH_4)_2S_x$ 溶液中进行化学蚀刻。随后，再经过一次电子束光刻（EBL），通过原子层沉积（ALD）和剥离工艺，在纳米线上覆盖一层厚度为 10 nm 的 HfO_2 。最后，采用电子束光刻、电子束蒸发和剥离的组合工艺，制备厚度为 5 nm/25 nm 的 Ti/Au 顶部指栅和耦合金属线。这些顶部指栅和耦合线的宽度为 ~20 nm，并以 ~60 nm 的节距排列成阵列。下文将介绍与图1(a)所示器件类似的器件的测量结果。

2.2 量子点传感器与三量子点之间的电容耦合

量子点传感器与三量子点通过耦合金属线 CW [电容耦合，参见图1(a)]。为研究传感器量子点与三量子点之间的电容耦合强度，我们首先通过同步测量目标量子点（即三量子点中的一个量子点）和传感器量子点的源漏电流 I_{SD} 和 I_{Sd}，考察了由目标量子点和传感器量子点构成的电容耦合并联双重量子点。目标量子点通过将栅极 G2 和 G4 用作势垒栅极（栅极电压分别为 V_{G2} = −0.75 V 和 V_{G4} =−0.81 V），并将 G3 用作柱塞栅来定义。量子点传感器通过将栅极 g1 和 g3 用作势垒栅极（栅极电压分别为 V_{g1} = −0.85 V 和 V_{g3} = −1.1 V），并将 g2 用作柱塞栅来定义。图2(a)显示了偏置电压 V_S=50 μV 下，目标量子点与传感器量子点的叠加电流 $I= I_{SD} + I_{Sd}$ 随栅极电压 V_{G3} 和 V_{g2} 变化的曲线，其中呈现出六边形图案，这是耦合双重量子点系统的特征。电流线具有非零斜率，表明每个量子点都与两个

柱塞栅极 G3 和 g2 电容耦合。还可以看到，当属于不同量子点的电流线相交时，电流线会发生明显偏移。图2(b)显示了仅流经传感器量子点的电流I_{Sd}曲线，其中电流线的明显偏移（以白色虚线圆圈标示）更为清晰可见。如上所述，这两个量子点共同构成一个具有有限点间电容耦合、且没有隧穿耦合的并联双重量子点。点间电容C_I可由电流线偏移量 $\Delta V_{G3}{}^m$ ($\Delta V_{g2}{}^m$) 与间距 ΔV_{G3} (ΔV_{g2}) 的比值确定，如图2(a)所示；单个量子点的总电容$C_{\Sigma g2}$ ($C_{\Sigma G3}$)为：

$$C_I = \frac{\Delta V_{G3}^m}{\Delta V_{G3}} C_{\Sigma g2} = \frac{\Delta V_{g2}^m}{\Delta V_{g2}} C_{\Sigma G3}. \quad (1)$$

将从图2(a)所示测量中提取的数值 $\Delta V_{G3}{}^m/\Delta V_{G3} \sim 0.049$ 和 $\Delta V_{g2}{}^m/\Delta V_{g2} \sim 0.042$ [，以及从单个量子点的库仑菱形测量中提取的数值 $C_{\Sigma g2} \sim 35$ 阿法拉和 $C_{\Sigma G3} \sim 39$ 阿法拉[（见补充信息第一部分）代入式（1），得到 $C_I \sim 1.7$ 阿法拉。如此大的点间电容表明，量子点传感器与三量子点之间的电容耦合足够强，能够使量子点传感器探测到三量子点中的电荷态跃迁。为进一步证实这一点，我们还对三量子点结构内定义的双重量子点中的电荷态跃迁进行了同步电荷探测和直接输运电流测量，两种测量结果高度吻合（更多详情见补充信息第二部分）。

2.3 三量子点中电荷态跃迁的检测

在成功展示了量子点传感器出色的检测灵敏度后，我们现在转向对图 1(c) 示意定义的三量子点进行同步电荷探测和直接输运电流测量。在此，三量子点由栅极 G1 、 G3 、 G4 和 G6 作为势垒栅极，以及栅极 G2 、 G5 作为柱塞栅极来定义。如图 1(c) 所示，三个定义出的量子点以红色椭圆表示，并分别标记为量子点1、量子点2和量子点3。这里需要指出的是，量子点2仅由栅极 G3 和 G4 定义。图 3(a) 显示了在 $V_S = 70\ \mu V$ 时，通过三量子点进行直接输运测量得到的源漏电流 I_{SD} ，其随栅极电压 V_{G3} 和 V_{G4} 的变化关系。图 3(a) 中可以辨认出三组平行电流线，分别以三种不同颜色的虚线标出。这些有限电流线的出现可归因于共隧穿过程：当三个量子点中任意一个的能级与源极和漏极储库的费米能级共振时，便会发生此类过程

。电流线的斜率主要取决于相应量子点与扫描栅极 G3 和 G4 之间的耦合强度，而耦合强度由相应量子点与这两个扫描栅极之间的相对距离决定。因此，几乎 垂直的绿色虚线所标示的电流线，对应于三量子点中量子点1能级的共振输运，因为量子点1与栅极 G3 强耦合、与栅极 G4 弱耦合。同样，几乎水平的蓝色虚线所标示的电流线，对应于三量子点中量子点3能级的共振输运。倾斜的白色虚线所标示的斜率为 $dV_{G4}/dV_{G3}\sim-1$ 的电流线，对应于三量子点中量子点2能级的共振输运，因为量子点2与两个扫描栅极 G3 和 G4 的耦合几乎相同。

图3(b)展示了通过量子点传感器获得的三量子点电荷稳定性图，具体方法是将量子点传感器工作在库仑电流峰的陡峭斜率处（即，将V_{g2}=设置为0.108 V，使其处于库仑电流峰的下降斜率处）。具体而言，在与图3(a)相同的 V_{G3} 和V_{G4} 范围内，测量量子点传感器中响应两个扫描栅极电压调制的电流I_{Sd}，并将量子点传感器的跨导 dI_{Sd}/dV_{G4} 显示于图3(b)中。图3(b)中的稳定性图呈现出具有三种不同斜率的明亮跃迁线（即近乎垂直、倾斜和近乎水平的线），这与三量子点的预期相符，并且与图3(a)所示通过直接输运电流测量获得的电荷稳定性图良好一致。三量子点中三个单个量子点的电荷态跃迁检测信号表现为具有正跨导的明亮线（dI_{Sd}/dV_{G4}）。 这是因为，随着V_{G4} 增大，从储库向三量子点中加入一个电子会产生正跨导dI_{Sd}/dV_{G4}，因为量子点传感器被设置在库仑电流峰的下降斜率处。图3(a)和图3(b)所示实验测得的电荷稳定性图的主要特征，可以通过采用电容网络模型进行模拟而得到良好再现。图3(c)展示了我们三量子点的等效电路图，图3(d)则展示了模拟得到的稳定性图，其与实验结果吻合良好（见补充信息中的第三部分）。

2.4 复杂电荷稳定性图、四重点和量子细胞自动机过程

为了探索三个量子点的能级彼此共振时三量子点丰富的电荷态构型物理特性，我们通过量子点电荷传感器测量电荷稳定性图，考察其随三个栅极电压 V_{G2}、V_{G3}

和 V_{G4} 的变化，并以一系列平行的二维电荷稳定性图呈现，这些图截取自三维栅极电压空间。图4(a)-4(e)展示了三量子点的电荷稳定性图（如图3所示）随栅极电压 V_{G2}变化的情况，该电压主要控制量子点1的静电势。此处，量子点传感器的工作条件设为V_{g2}= 0.108 V [，与图3(b)相同]；测量量子点传感器的跨导 dI_{Sd}/dV_{G4} 随V_{G3} 和V_{G4} 的变化，其中V_S = 70 μV，并取不同的V_{G2}。由于存在有限的静电点间耦合强度，不同组电荷态跃迁线的所有交点均发生回避交叉，从而形成成对的三重点，并由电荷守恒电荷态跃迁线连接。在这些跃迁线上，电荷从一个量子点转移到另一个量子点，而三量子点中的总电荷数保持不变。这些电荷守恒电荷态跃迁线呈现为暗线而非亮线。这是因为，当V_{G4} 越过暗色电荷守恒电荷态跃迁线增大时，电子电荷会从量子点1转移到量子点2，或从量子点2转移到量子点3，因此跨导dI_{Sd}/dV_{G4}为负值；这是因为在我们的器件几何结构中，量子点传感器与量子点1（量子点2）之间的耦合强度大于其与量子点2（量子点3）之间的耦合强度。这些暗线的长度与相应两个量子点之间的静电点间耦合强度成正比。从图3(b)可以看出，相邻量子点之间的静电点间耦合强度远大于量子点1与量子点3之间的耦合强度，这与器件几何结构相符，因为量子点1和量子点3被量子点2隔开。

在一个能量简并区内，三个量子点的能级彼此共振或接近共振，三个量子点的电荷跃迁线在此相交，从而产生 2^3=8 种可能的三量子点电荷态。图 4(c) 所示的传感器探测电荷稳定性图中观察到了这八种电荷态。与这八种电荷态相伴的是八个三重点，即四对三重点，每对三重点均由一条暗色的电荷守恒电荷态跃迁线连接。为清晰描述这一结果，我们将图 4(c) 左下区域的三量子点电荷态简单标记为 (0, 0, 0)，并将其他区域中观察到的稳定电荷态表示为 (N_1, N_2, N_3)，其中 N_i=0 或 1 对应于量子点 i 中额外的电子数。我们再次明确强调，测得的三量子点器件处于少电子区间，而非单电子区间，且三量子点器件中的确切电子占据数尚不清楚。因此，本文下文中的 N_i 均应视为相对于量子点 i 中测得的额外电子占据数

，其参照值为图 4(c) 左下栅极电压区域中的电子占据数。观察到的八个三重点是三种不同电荷态的简并点，以白点标出，并在图 4(c) 中标记为 A–H。借助半导体纳米线量子点器件制备技术的最新进展，我们在测得的三量子点电荷稳定性图中观察到了全部八种可能的电荷态及其对应的八个三重点。

现在我们展示如何将三量子点调谐至四重点。如图 4(c) 至图 4(e) 所示，随着栅极电压V_{G2}从V_{G2} = 0.194 V 增至V_{G2} = 0.1947 V，三重点 A 和 B 逐渐靠近，同时三重点 D 和 F 也逐渐靠近[见图 4(d)]。随着V_{G2}进一步增至V_{G2} = 0.195 V，两个三重点 A 和 B 最终合并形成一个四重点，如白点 Q 所示$_{AB}$ [见图 4(e)]。在四重点Q_{AB}处，四种电荷态 (0, 0, 0)、(1, 0, 0)、(0, 1, 0) 和 (0, 0, 1) 在能量上简并，电子可依次从源储库隧穿至量子点1、量子点2、量子点3，再到漏极库。同时，三重点 D 和 F 也合并形成一个四重点，如图 4(e) 中白点 Q 所示$_{DF}$ 。在此四重点处，四种电荷态 (1, 0, 0)、(1, 1, 0)、(1, 0, 1) 和 (0, 1, 0) 在能量上简并。此处的电子隧穿序列不同于四重点 Q_{AB} 处的序列，电子以如下方式经三量子点传输：从电荷态 (1, 0, 0) 开始，一个电子从漏极库隧穿至量子点3，达到电荷态 (1, 0, 1)，随后从量子点3隧穿至量子点2，达到电荷态 (1, 1, 0)。接着，量子点1中的电子隧穿至源储库，使三量子点处于电荷态 (0, 1, 0)。最后，量子点2中的电子隧穿至量子点1，恢复初始电荷态 (1, 0, 0)。类似地，如图 4(c) 至图 4(a) 所示，当V_{G2}降至V_{G2} = 0.193 V，继而降至V_{G2} = 0.1926 V 时，三重点 G 和 H 以及三重点 C 和 E 逐渐靠近，随后合并形成分别标记为 Q_{GH}和 Q_{CE}的四重点。在四重点 Q_{GH}处，与四重点 Q_{AB}处类似，空穴可按照跃迁序列 (1, 1, 1) ↔ (1, 1, 0) ↔ (1, 0, 1) ↔ (0, 1, 1) ↔ (1, 1, 1)依次隧穿通过三量子点。在四重点 Q_{CE}处，则会发生与四重点 Q_{DF} 处类似的过程，其跃迁序列为 (0, 1, 1) ↔ (0, 1, 0) ↔ (0, 0, 1) ↔ (1, 0, 1) ↔ (0, 1, 1)。

最后，我们证明纳米线三量子点也可以作为量子元胞自动机运行。在这种工作模式下，从储库向一个外侧量子点中加入电子，或将外侧量子点中的电子移至储库，都会自动促使另外两个量子点之间发生电子转移。如图 4(c)所示，当纳米线三量子点跨越三重点 C 和 F 之间的电荷态跃迁线，从电荷态 (0, 1, 0) 调谐至电荷态 (1, 0, 1) 时，

从源储库向量子点1中加入一个电子，将自动促使量子点2中的电子移动到量子点3。在相反的过程中，即当三量子点从电荷态 (1, 0, 1) 调谐至电荷态 (0, 1, 0) 时，将量子点1或量子点3中的一个电子移至储库，会自动使另一个电子有利地留在量子点2中。这些过程利用了三量子点中特殊的库仑相互作用条件，可能有助于构建基于量子点的量子元胞自动机电路。

3. 结论

我们通过精细指栅技术，在单根 InAs 纳米线上实现了高灵敏度量子点电荷传感器与串联三量子点的集成，并研究了纳米线三量子点的复杂电荷稳定性图。借助量子点电荷传感器，我们观测到了三量子点中电荷守恒的电荷态跃迁：此类跃迁不会改变三量子点中的电子总数，因此无法检测到输运电流。这使我们能够在能量简并区域清晰识别全部八种可能的电荷态和八个可能的三重点；在该区域内，三个量子点均处于或接近彼此共振。我们测量了穿过三维栅极电压空间的一系列平行二维电荷稳定性图切片，并详细考察了能量简并区域附近的电荷态演化，从而检测到四重点（此处发生四重电荷态简并），并将三量子点作为量子元胞自动机运行。预计这一集成式纳米线多量子点系统将为基于半导体纳米线的量子逻辑处理器和量子模拟器的研发提供一个多功能平台。然而，要证明三量子点或基于纳米线的多量子点量子比特在这一方向上的潜力，就需要进行实时单次电荷读出测量。遗憾的是，在我们目前研究的器件中，集成式量子点电荷传感器的带宽受现有测量装置限制，不到几千赫兹，因此无法进行此类实时单次读出测量。下一步，我们将开发射频反射测量技术。我们预计，将当前先进的器件制造技术与射频反射测量技术相结合，可实现半导体纳米线量子点量子比特的快速、高保真单次读出。

4. 方法

测量装置：本文所述的所有输运测量均在基温为 ~20 mK 的 He^3/He^4 稀释制冷机中进行。图 1(c) 展示了器件及测量电路装置的截面示意图。三量子点和量子点传感器均采用两端直流测量装置进行测量，偏置电压 V_S 施加于共用源极接触，漏极接触则接地。Si 衬底和 SiO_2 层分别用作全局背栅和栅介质。测量过程中，全局背栅电压 V_{BG} 固定为 6.3 V，以使纳米线保持 n 型导电状态。我们测量了各个指栅的转移特性，发现所有指栅的电流夹断电压均在 −1.1 V 至 −0.7 V 范围内。测量过程中，未参与测量的栅极 G7 始终接地。

致谢

本研究得到国家自然科学基金委员会（项目编号：92165208、91221202、91421303、11874071、92065106 和 61974138）、中华人民共和国科学技术部通过国家重点研发计划（项目编号：2017YFA0303304 和 2016YFA0300601）以及北京量子信息科学研究院（编号：Y18G22）的支持。DP 还感谢中国科学院青年创新促进会的支持（编号：2017156 和 Y2021043）。

利益冲突

作者声明不存在利益冲突。

数据可用性

支持本研究结论的数据可在本文和补充信息中获取，也可在提出合理请求后向通讯作者索取。

参考文献

1. Loss, D. & D. P. DiVincenzo, D. P. 量子点量子计算。《物理评论A》**57**, 120-126 (1998). 2. Burkard, G., Ladd, T. D., Nichol, J. M., Pan, A. & Petta, J. R. 半导体自旋量子比特。预印本，网址：https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.08863 (2022). 3. Georgescu, I. M., Ashhab, S. & Nori, F. 量子模拟。《现代物理评论》**86**, 153- 185 (2014). 4. Byrnes, T., Kim, N. Y., Kusudo, K. & Yamamoto, Y. 半导体量子点阵列中的费米-哈伯德模型量子模拟。《物理评论B》**78**, 075320 (2008). 5. Hensgens, T., Fujita, T., Janssen, L., Li, X., Van Diepen, C. J., Reichl, C., Wegscheider, W., Das Sarma,S. & Vandersypen, L. M. K. 利用半导体量子点阵列对费米–哈伯德模型进行量子模拟。《自然》**548**, 70-73 (2017). 6. Van Diepen, C. J., Hsiao, T. K., Mukhopadhyay, U., Reichl, C., Wegscheider, W. & Vandersypen, L. M. K. 利用栅定义量子点对反铁磁海森堡链进行量子模拟。《物理评论X》**11**, 041025 (2021). 7. Fasth, C., Fuhrer, A., Samuelson, L., Golovach, V. N. & Loss, D. 直接测量双电子InAs纳米线量子点中的自旋-轨道相互作用。《物理评论快报》**98**, 266801 (2007). 8. Csonka, S., Hofstetter, L., Freitag, F., Oberholzer, S., Schönenberger, C., Jespersen, T. S., Aagesen, M. & Nygård, J. InAs纳米线量子点中 g 因子的巨大涨落及栅极控制。《纳米快报》**8**, 3932-3935 (2008). 9. Nilsson, H. A., Caroff, P., Thelander, C., Larsson, M., Wagner, J. B., Wernersson, L. E., Samuelson, L. & Xu, H. Q. InSb纳米线量子点中巨大且依赖能级的g因子。《纳米快报》**9**, 3151-3156 (2009). 10. Wang, J.-Y., Huang, S., Lei, Z., Pan, D., Zhao, J. & Xu, H. Q. 泡利自旋阻塞区间内纯相InAs纳米线双量子点中自旋-轨道相互作用和朗德g因子的测量。《应用物理快报》**109**, 053106 (2016). 11. Wang, J.-Y., Huang, G.-Y., Huang, S., Xue, J., Pan, D., Zhao, J. & Xu, H. Q. InAs纳米线双量子点中的各向异性泡利自旋阻塞效应和自旋-轨道相互作用场。《纳米快报》**18**, 4741-4747 (2018). 12. Iorio, A., Rocci, M., Bours, L., Carrega, M., Zannier, V., Sorba, L., Roddaro, S., Giazotto, F. & Strambini, E. 自旋-轨道相互作用的矢量控制

悬空 InAs 纳米线。《纳米快报》**19**，652-657（2019）。13. Mu, J.、Huang, S.、Wang, J.-Y.、Huang, G.-Y.、Wang, X. 和 Xu, H. Q. InSb纳米线量子点中电子各向异性 g 因子的测量。《纳米技术》**32**，020002（2020）。14. Nadj-Perge, S.、Frolov, S. M.、Bakkers, E. P. A. M. 和 Kouwenhoven, L. P. 半导体纳米线中的自旋轨道量子比特。《自然》**468**，1084-1087（2010）。15. Nadj-Perge, S.、Pribiag, V. S.、van den Berg, J. W. G.、Zuo, K.、Plissard, S. R.、Bakkers, E. P. A. M.、Frolov, S. M. 和 Kouwenhoven, L. P. 锑化铟纳米线中的快速自旋轨道量子比特。《物理评论快报》**108**，166801（2013）。16. Gaudreau, L.、Studenikin, S. A.、Sachrajda, A. S.、Zawadzki, P.、Kam, A.、Lapointe, J.、Korkusinski, M. 和 Hawrylak, P. 少电子三量子点的稳定性图。《物理评论快报》**97**，036807（2006）。17. Schröer, D.、Greentree, A. D.、Gaudreau, L.、Eberl, K.、Hollenberg, L. C. L.、Kotthaus, J. P. 和 Ludwig, S. 通过静电定义的、载有少量电子的串联三量子点。《物理评论B》**76**，075306（2007）。18. Rogge, M. C. 和 Haug, R. J. 三量子点稳定性图的三维性。《新物理学杂志》**11**，113037（2009）。19. Granger, G.、Gaudreau, L.、Kam, A.、Pioro-Ladrière, M.、Studenikin, S. A.、Wasilewski, Z. R.、Zawadzki, P. 和 Sachrajda, A. S. 三量子点的三维输运图。《物理评论B》**82**，075304（2010）。20. Wang, J.-Y.、Huang, S.、Huang, G. Y.、Pan, D.、Zhao, J. 和 Xu, H. Q. 由纯相 InAs 纳米线制成的线性三量子点中的相干输运。《纳米快报》**17**，4158-4164（2017）。21. Hiraoka, S.、Horibe, K.、Ishihara, R.、Oda, S. 和 Kodera, T. 金属氧化物半导体结构中物理定义的、载有少量电子的硅三量子点。《应用物理快报》**117**，074001（2020）。22. Taylor, J. M.、Srinivasa, V. 和 Medford, J. 三量子点中的电学保护共振交换量子比特。《物理评论快报》**111**，050502（2013）。23. Medford, J.、Beil, J.、Taylor, J. M.、Rashba, E. I.、Lu, H.、Gossard, A. C. 和 Marcus, C. M. 基于量子点的共振交换量子比特。《物理评论快报》**111**，050501（2013）。24. Eng, K.、Ladd, T. D.、Smith, A.、Borselli, M. G.、Kiselev, A. A.、Fong, B. H.、Holabird, K. S.、Hazard, T. M.、Huang, B.、Deelman, P. W.、Milosavljevic, I.、Schmitz, A. E.、Ross,

R. S.、Gyure, M. F. 和 Hunter, A. T. 同位素增强型三量子点量子比特。《科学进展》**1**，e1500214（2015）。25. Russ, M.、Petta, J. R. 和 Burkard, G. 四极交换唯一自旋量子比特。《物理评论快报》**121**，177701（2018）。26. Qiao, H.、Kandel, Y. P.、Manikandan, S. K.、Jordan, A. N.、Fallahi, S.、Gardner, G. C.、Manfra M. J. 和 Nichol, J. M. 量子点自旋态的条件隐形传态。《自然·通讯》**11**，3022（2020）。27. Kojima, Y.、Nakajima, T.、Noiri, A.、Yoneda, J.、Otsuka, T.、Takeda, K.、Takeda, K.、Li, S.、Bartlett, S. D.、Ludwig, A.、Wieck, A. D. 和 Tarucha, S. 量子点自旋量子比特的概率性隐形传态。《npj量子信息》**7**，68（2021）。28. Lent, C. S.、Tougaw, P. D.、Porod, W. 和 Bernstein, G. H. 量子元胞自动机。《纳米技术》**4**，49-57（1993）。29. Amlani, I.、Alexei, O. O.、Toth, G.、Gary, H. B.、Craig, S. L. 和 Gregory, L. S. 使用量子点元胞自动机的数字逻辑门。《科学》**284**，289-291（1999）。30. Tóth, G. 和 Lent, C. S. 使用量子点元胞自动机进行量子计算。《物理评论A》**63**，052315（2001）。31. Barthel, C.、Kjærgaard, M.、Medford, J.、Stopa, M.、Marcus, C. M.、Hanson, M. P. 和 Gossard, A. C. 利用射频传感量子点快速探测双量子点电荷构型和自旋态。《物理评论B》，**81**，161308（2010）。32. Rössler, C.、Krähenmann, T.、Baer, S.、Ihn, T.、Ensslin, K.、Reichl, C. 和 Wegscheider, W. 用于半导体量子电路的可调电荷探测器。《新物理学杂志》**15**，033011（2013）。33. Wallin, D.、Fuhrer, A.、Fröberg, L. E.、Samuelson, L.、Xu, H. Q.、Hofling, S. 和 Forchel, A. 利用量子点接触探测纳米线量子点中的电荷态。《应用物理快报》**90**，172112（2007）。34. Shorubalko, I.、Leturcq, R.、Pfund, A.、Tyndall, D.、Krischek, R.、Schön, S. 和 Ensslin, K. InAs纳米线量子点的自对准电荷读出。《纳米快报》**8**，382-385（2008）。35. Hu, Y.、Churchill, H. O. H.、Reilly, D. J.、Xiang, J.、Lieber, C. M. 和 Marcus, C. M. 基于锗/硅异质结构纳米线、带有集成电荷传感器的双量子点。《自然·纳米技术》**2**，622-625（2007）。36. Zhou, X. 和 Ishibashi, K. 基于单壁碳纳米管的电容耦合集成单电子晶体管中的单电荷探测。《应用物理快报》。

101，123506（2012）。37. Hu, Y., Kuemmeth, F., Lieber, C. M. & Marcus, C. M. Ge–Si核壳纳米线量子比特中的空穴自旋弛豫。《自然·纳米技术》**7**，47-50（2012）39. Li, W., Mu, J., Huang, S., Pan, D., Zhao, J. & Xu, H. Q. 利用集成式纳米线电荷传感器检测InAs纳米线三重量子点的电荷态。《应用物理快报》**117**，262102（2020）。40. Wang, X., Huang, S., Wang, J.-Y., Pan, D., Zhao, J. & Xu, H. Q. 在相邻的两根InAs纳米线上集成用于可调双重量子点的电荷传感器。《纳米尺度》**13**，1048-1054（2021）。41. Flöhr, K., Liebmann, M., Sladek, K., Günel, H. Y., Frielinghaus, R., Haas, F., Meyer, C., Hardtdegen, H., Schäpers, T., Grützmacher, D. & Morgenstern, M. 以亚微米精度操控砷化铟纳米线。《科学仪器评论》**82**，113705（2011）。42. Lim, J. K., Lee, B. Y., Pedano, M. L., Senesi, A. J., Jang, J.-W., Shim, W., Hong, S. & Mirkin, C. A. 纳米线组装的对准策略：针对亚微米直径纳米线。《Small》**6**，1736-1740（2010）。43. van der Wiel, W. G., De Franceschi, S., Elzerman, J. M., Fujisawa, T., Tarucha, S. & Kouwenhoven, L. P. 双重量子点中的电子输运。《现代物理评论》**75**，1-22（2002）。44. Hanson, R., Kouwenhoven, L. P., Petta, J. R., Tarucha, S. & Vandersypen, L. M. K. 少电子量子点中的自旋。《现代物理评论》**79**，1217-1265（2007）。45. Pan, D., Fu, M., Yu, X., Wang, X., Zhu, L., Nie, S., Wang, S., Chen, Q., Xiong, P., von Molnár, S. & Zhao, J. 通过将直径减小至10 nm，在Si(111)上可控合成纯相InAs纳米线。《纳米快报》**14**，1214-1220（2014）。

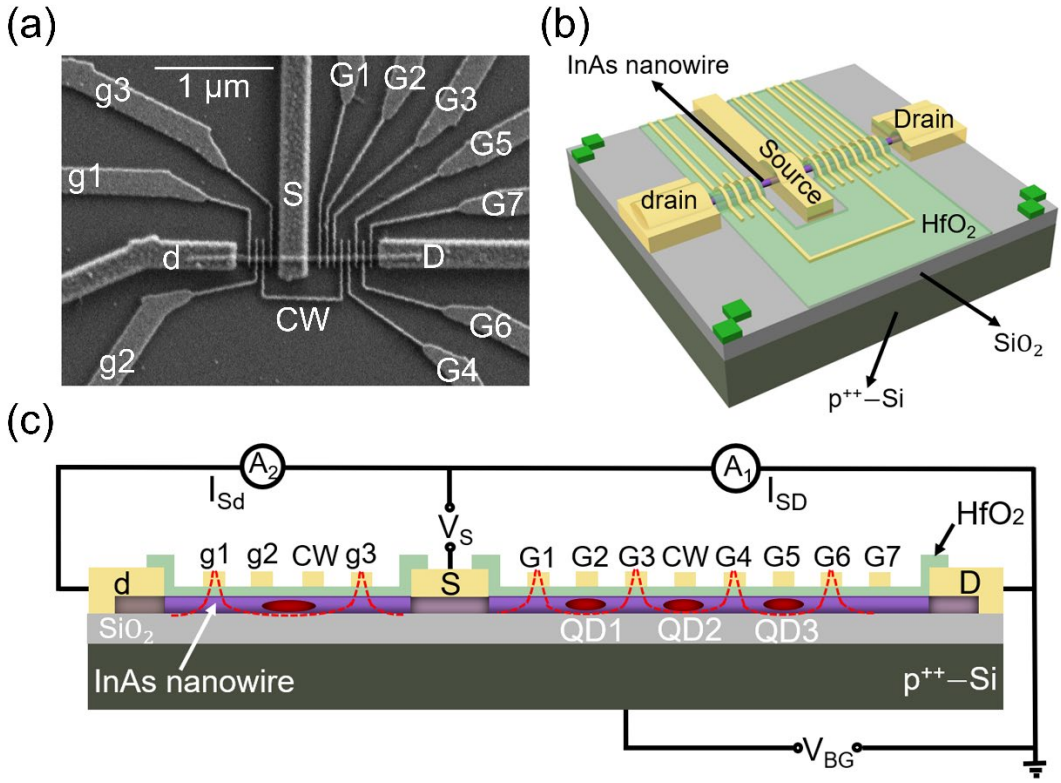

图 1。 (a) 通过精细顶部指栅技术，在一根分子束外延生长的 InAs 纳米线上制备的集成量子点电荷传感器的三量子点器件扫描电子显微镜图像。制作指栅 G1-G7 以定义三量子点，制作指栅 g1-g3 以定义量子点电荷传感器。电荷传感器通过一根细金属线与三量子点耦合，该线在图中标记为 CW。指栅和耦合线的宽度为 ~20 nm，节距为 ~60 nm。(b) 器件三维结构示意图。(c) 器件横截面示意图及测量电路装置。传感器量子点和三量子点中的三个量子点的位置以红色椭圆标出。

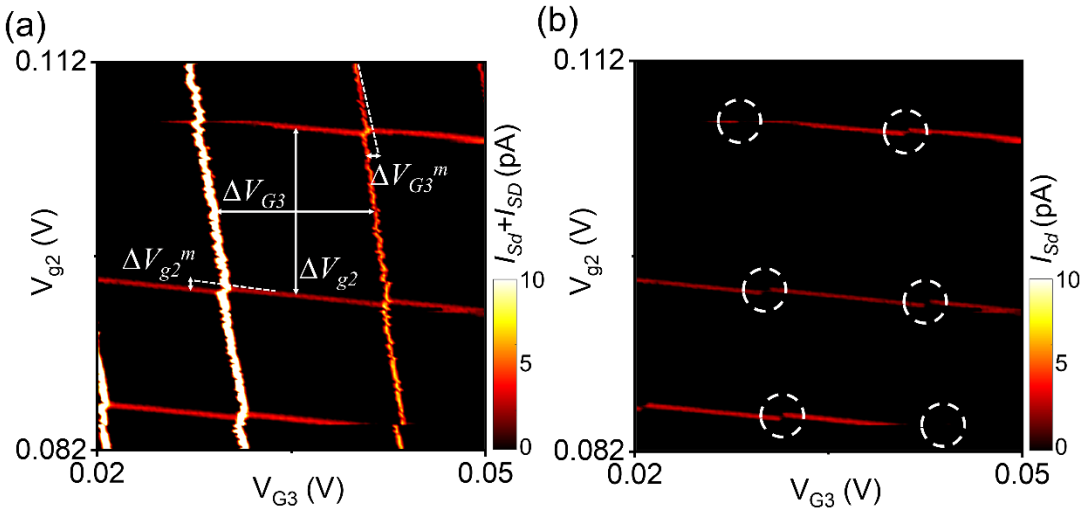

图2。 (a) 在三量子点中定义的单个量子点（目标量子点）与量子点传感器的叠加电流，$I = I_{SD} + I_{Sd}$，随栅极电压V_{G3} 和V_{g2} 的变化关系，测量时的$V_S = 50$ μ为 V；图中显示了电流线偏移ΔV_{G3}^{m} 和ΔV_{g2}^{m} ，以及电流线间距ΔV_{G3} 和ΔV_{g2}。这里，I_{SD} 是流经目标量子点的电流，I_{Sd} 是流经量子点传感器的电流。(b) 与(a)相同，但仅绘出了量子点传感器的电流I_{Sd} 。电流I_{Sd} 线的明显偏移更清晰可见，并出现在白色虚线圆圈标记的区域内。

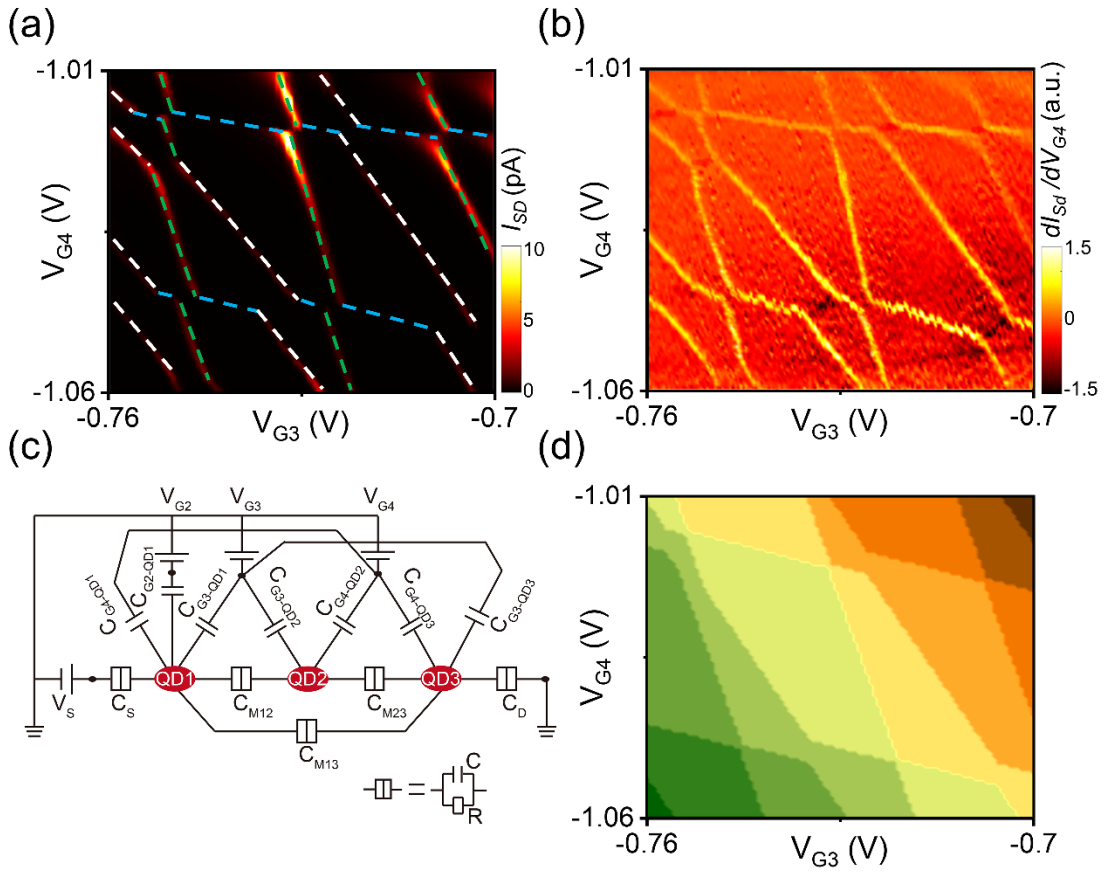

图 3. (a) 在V_S = 70 μV时，三量子点的源漏电流I_{SD} 随栅极电压V_{G3} 和V_{G4} 的变化。通过栅极 G1–G6 定义并操控三量子点（设置为V_{G1}= −0.735 V、V_{G2}= 0.191 V、V_{G5}= 0.2 V 和V_{G6}= −0.91 V）。(b) 将量子点传感器的跨导dI_{Sd}/dV_{G4} 作为V_{G3} 和V_{G4}的函数测得的三量子点电荷稳定性图。这里，(a) 和 (b) 中所示结果为同时测量所得。不同颜色的虚线标示了由不同单个量子点能级上的共振输运产生的电流线（详情见正文）。(c) 用于模拟串联三量子点电荷稳定性图的电容网络模型等效电路图，其中三个量子点以红色椭圆标出。(d) 基于电容网络模型得到的三量子点电荷稳定性图模拟结果。

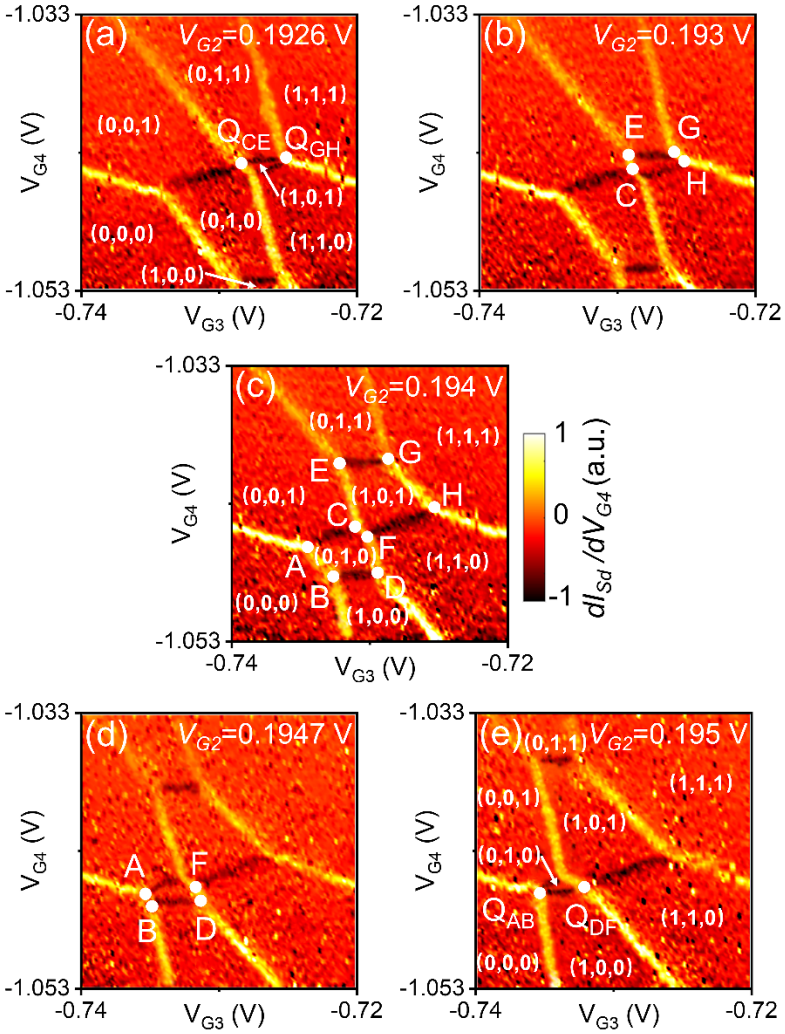

图4. (a)-(e) 在不同V_{G2}下，以V_S = 70 μV处量子点电荷传感器的跨导dI_{Sd}/dV_{G4}为测量量，得到的三量子点电荷稳定性图，其中V_{G3}和V_{G4}为变量。(b)、(c)和(d)中标记为A-H的白点表示三重点，此时三个量子点中任意两个的能级彼此共振，并与源极和漏极储库的费米能级共振。(a)和(e)中标记为Q_{AB}、Q_{DF}、Q_{CE}和Q_{GH}的白点表示四重点，此时三个量子点的能级彼此共振，并与储库的费米能级共振。需要指出的是，我们测量的三量子点处于少电子区间，但每个量子点中的确切电子数未知。为便于说明，我们将(a)、(c)和(e)图左下区域中三量子点的电荷态指定为(0, 0, 0)，并将此处涉及的所有电荷态记为(N_1,N_2, N_3)，其中N_i表示相对于各图左下区域而言，量子点QDi中的电子占据数。

《集成电荷传感器揭示的 InAs 纳米线三重量子点中的电荷态、三重点和四重点》的补充信息 Weijie Li,[1,2] Zhihai Liu,[3] Jingwei Mu,[1,2] Yi Luo,[1,4] Dong Pan,[5] Jianhua Zhao,[5] 和 H. Q. Xu[1,3,*] [1] 北京大学北京市量子器件重点实验室、纳米器件物理与化学重点实验室和电子学院，北京 100871，中国 [2] 北京大学前沿交叉学科研究院，北京 100871，中国 [3] 北京量子信息科学研究院，北京 100193，中国 [4] 北京大学凝聚态与材料物理研究所、物理学院，北京 100871，中国 [5] 中国科学院半导体研究所超晶格与微结构国家重点实验室，北京 100083，中国，邮政信箱 912 [*] 通讯作者：hqxu@pku.edu.cn（日期：2023年1月30日）

I. 单量子点的有限偏压谱学测量

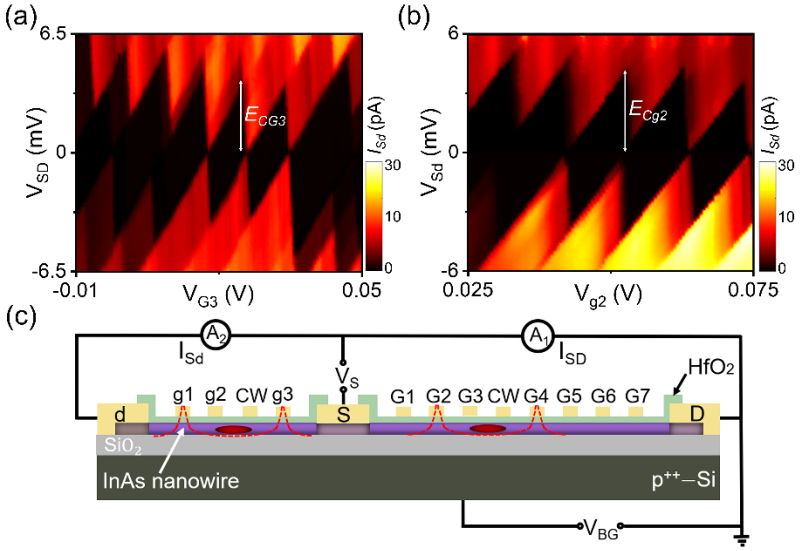

图 S1。 (a) 测得的量子点（目标量子点）源漏电流 I_{SD}，该量子点定义在 (c) 中右侧红色椭圆标记的区域内，其电流随源漏偏置电压 V_{SD}和栅极电压 V_{G3} 的变化关系（目标量子点的电荷稳定性图）。此处，目标量子点通过将施加于栅极 G2 和 G4 的电压分别设为 V_{G2} = −0.75 V 和 V_{G4} =−0.81 V 来定义。(b) 测得的量子点传感器源漏电流 I_{Sd}，该传感器量子点定义在 (c) 中左侧红色椭圆标记的区域内，其电流随源漏偏置电压 V_{SD} 和栅极电压 V_{g2} 的变化关系（传感器量子点的电荷稳定性图）。此处，传感器量子点通过将施加于栅极 g1 和 g3 的电压分别设为 V_{g1} = −0.85 V 和 V_{g3} = −1.1 V 来定义。(c) 目标量子点和集成式传感器量子点的横截面示意图。两个红色椭圆标出两个量子点的位置。

为研究量子点（QD）传感器与三量子点（TQD）之间的电容耦合强度，我们对一个电容耦合的双重量子点（DQD）进行同步测量。该双重量子点由三量子点中的一个量子点（目标量子点）和量子点传感器组成，如图 S1(c) 示意图所示。图 S1(a) 展示了测得的目标量子点电荷稳定性图，该图显示源漏偏置电压 V_{SD} 和施加于柱塞栅 G3 的电压 V_{G3}的函数关系。根据测得的库仑菱形，估算出目标量子点的充电能为 E_{CG3} ~ 4 meV，并提取出目标量子点的总电容为 $C_{\Sigma G3}$ ~ 39 阿法拉。图 S1(b) 展示了量子点传感器的电荷稳定性图，该图显示源漏偏置电压 V_{Sd} 和施加于柱塞栅 g2 的电压 V_{g2}的函数关系。根据测得的库仑菱形，估算出传感器量子点的充电能为 E_{Cg2} ~ 4.5 meV，并提取出传感器量子点的总电容为 $C_{\Sigma g2}$ ~ 35 阿法拉。

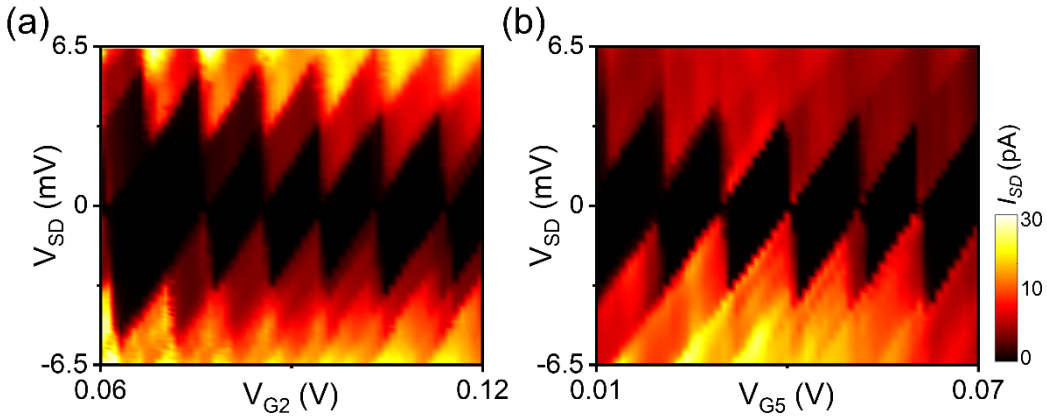

图 S2。 (a) 正文图 1(c) 中定义的量子点1的测得源漏电流 I_{SD} 随源漏偏置电压 V_{SD} 和栅极电压 V_{G2}的变化（电荷稳定性图）。此处，通过将施加于栅极 G1 和 G3 的电压分别设为 V_{G1} = −0.74 V 和 V_{G3} = −0.8 V 来定义量子点1。(b) 正文图 1(c) 中定义的量子点3的测得源漏电流 I_{SD}随源漏偏置电压 V_{SD} 和栅极电压 V_{G5} 的变化（电荷稳定性图）。此处，通过将施加于栅极 G4 和 G6 的电压分别设为 V_{G4} = −1.05 V 和 V_{G6} = −0.92 V 来定义量子点 3。

图 S2(a) 展示了正文图 1(c) 所定义的三量子点中单个量子点（量子点1）的电荷稳定性图，该图以源漏偏置电压V_{SD} 和施加于柱塞栅 G2 的电压V_{G2} 为函数。这里，量子点1由栅极 G1 和 G3 作为两个外侧隧穿势垒栅极定义（栅极电压固定为V_{G1} =−0.74 V 和V_{G3} = −0.8 V），G2 作为柱塞栅定义（其余栅极 G4 至 G7 接地）。规则的库仑菱形，以及相邻库仑菱形之间在零V_{SD} 处观察到的接触点，表明形成了单个量子点（量子点1）。库仑菱形两条边的斜率取决于电容，可表示为 $\frac{C_1-C_{S1}-C_{D1}}{C_1-C_{S1}}$ 和 $-\frac{C_1-C_{S1}-C_{D1}}{C_{S1}}$，其中 C_1、 C_{S1}和 C_{D1} 分别为量子点1的总电容、源极电容和漏极电容。图 S2(b) 展示了另一个单个

量子点（三量子点中的量子点3）的电荷稳定性图，该量子点由正文图 1(c) 定义；图中显示其随源漏偏置电压V_{SD}和施加于柱塞栅 G5 的电压 V_{G5} 的变化。这里，量子点3由栅极 G4 和 G6 作为两个外侧隧穿势垒栅极定义（栅极电压固定为V_{G4} = −1.05 V 和V_{G6} = −0.92 V），G5 作为柱塞栅定义（其余栅极 G1 至 G3 和 G7 接地）。图 S2(b) 所示库仑菱形两条边的斜率可表示为 $\frac{C_3-C_{S3}-C_{D3}}{C_3-C_{S3}}$ 和 $-\frac{C_3-C_{S3}-C_{D3}}{C_{S3}}$，其中 C_3、C_{S3} 和 C_{D3} 分别为量子点3的总电容、源极电容和漏极电容。我们可以从图 S2(a) 和 S(b) 中测得的库仑菱形提取量子点1的源极电容 C_{S1} 和量子点3的漏极电容 C_{D3}，并估算正文图 1(c) 示意定义的三量子点 的源极电容和漏极电容分别为 $C_S \approx C_{S1}$~ 9.80 阿法拉和 $C_D \approx C_{D3}$~ 8.00 阿法拉（见表SI）。

II. 双量子点的同步电荷探测与直接输运测量 **D**

为进一步验证量子点传感器的高灵敏度，我们对砷化铟纳米线中定义的双重量子点（DQD）进行了同步电荷探测和直接输运电流测量，示意图如图 S3(g)所示。该双重量子点采用栅极 G1 和 G5 作为两个外侧隧穿势垒栅极（栅极电压分别固定为 V_{G1} = −0.75 V 和 V_{G5} = −0.81 V），G3 作为点间隧穿势垒栅极，G2 和 G4 作为两个柱塞栅极。图 S3(a)-S3(c)展示了在三个具有代表性的点间耦合强度下，通过对双重量子点进行直接输运电流测量，在 V_S =70 μV 时获得的源漏电流 I_{SD} 随施加于栅极 G2 和 G4 的电压 V_{G2} 和 V_{G4} 的变化。栅极电压为 V_{G3} = 0 V [图 S3(a)], 时，在势垒栅极 G1 和 G5 之间形成了一个较大的单量子点，因为栅极 G3 在纳米线中不应形成隧穿势垒。如图 S1(a)所示，可以观察到清晰的直对角电流线，这与以下事实一致：在栅极 G1 和 G5 之间的纳米线中实际上只形成了一个量子点。将施加于 G3 的电压调至负值 V_{G3} = −0.65 V [图 S3(b)] 后，纳米线中形成了有限的隧穿势垒，因而可在势垒栅极 G1 和 G5 之间形成双重量子点。如图 S3(b)所示，部分测得的电流线出现了明显弯曲。当两个量子点中的独立能级在能量上彼此接近时，就会出现这些弯曲。还可以观察到间距较大的成对拐点，表明所形成的双重量子点处于强点间耦合区。将 V_{G3} 调至 V_{G3} = −0.88 V 后，纳米线中形成了较高的隧穿势垒，并在测得的电流 I_{SD} 随 V_{G2} 和 V_{G4} [变化的关系中获得了定义良好的六边形图案图 S3(c)], , 这表明双重量子点处于弱点间耦合区。图 S1(d)-S1(f)展示了由量子点传感器探测到的三量子点的电荷稳定性图，其中栅极电压 V_{g2} 设定为 V_{g2}= 0.108 V（即传感器量子点库仑电流峰下降斜率处），量子点传感器的跨导 dI_{Sd}/dV_{G4} 在与图 S3(a)-S3(c) 相同的栅极电压区域 V_{G2} 和 V_{G4} 内进行测量。

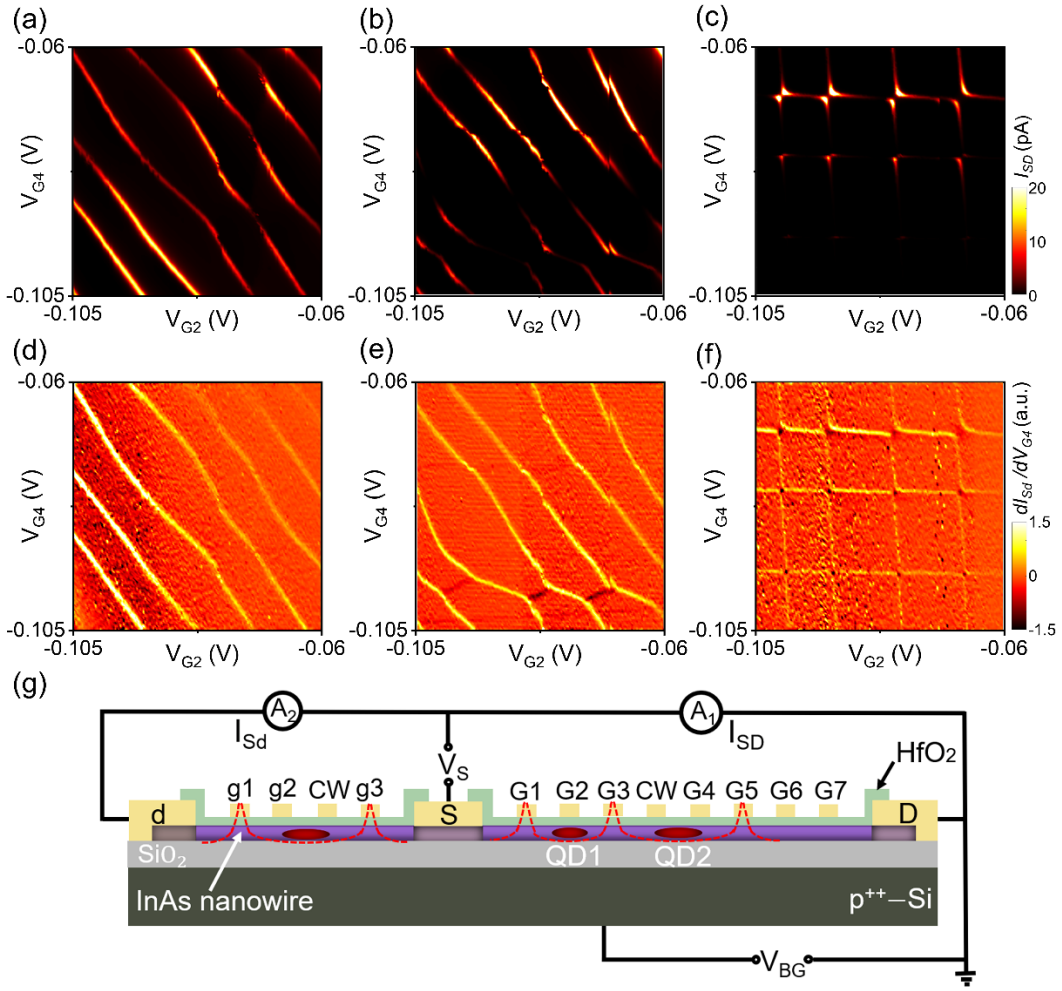

图 S3。 (a)-(c) 在三个不同的V_{G3}下，测得(g)中定义的双重量子点的源漏电流I_{SD}，其中V_S= 70 μV；该电流是V_{G2}和V_{G4}（电荷稳定性图）的函数。(d)-(f) 为量子点电荷传感器通过跨导dI_{Sd}/dV_{G4}测量检测到的双重量子点对应的电荷稳定性图。此处，量子点传感器如(g)所示定义，将V_{g2}= 0设为 0.108 V [，即处于与正文图3(b)中相同库仑电流峰的下降斜坡处]。(a)和(d)中观察到笔直的对角电荷态跃迁线，表明在V_{G3} = 0 V下，栅极 G1 与 G5 之间形成了一个较大的单量子点。(b)和(e)中观察到弯曲的电荷态跃迁线，表明在V_{G3} = −0.65 V下形成了点间耦合较强的双重量子点。(d)和(f)中，将V_{G3} = −0设为 0.88 V，形成了点间耦合较弱的双重量子点，因为观察到了电流线构成的规则六边形图案。(g) 双重量子点器件及集成量子点传感器的横截面示意图。双重量子点由栅极 G1 和 G5 作为外侧隧穿势垒栅极、G3 作为点间隧穿势垒栅极，以及 G2 和 G4 作为两个柱塞栅极来定义。传感器量子点和双重量子点中的两个量子点的位置以红色椭圆标出。

图 S3(a) 至图 S3(c)所示直接输运电流测量中观察到的主要特征，在图 S3(d) 至图 S3(f)所示量子点传感器的跨导测量中得到了准确再现。需要注意的是，在图中

从 S3(d) 到 S3(f)，涉及将电荷从储液库转移到双重量子点的电荷态跃迁线呈亮色，而电荷守恒电荷态跃迁线（其中只发生两个量子点之间的电荷交换）则呈暗色。另请注意，由于双重量子点中存在不透明的隧穿势垒，图 S3(c) 中几乎不可见的直接输运电流线，在图 S3(f) 所示的量子点传感器跨导测量中却清晰可见，这证实了量子点传感器对双重量子点中电荷态跃迁具有出色的检测灵敏度。

III. 正文所研究三量子点的电容网络模型

正文所研究三量子点的电荷稳定性图基于静电电容网络模型进行模拟。在该模型中，三量子点被描述为由隧穿电阻和电容器构成的网络。正文图 3(c) 所示的等效电路图包含三个量子点（量子点1、量子点2 和量子点3）、三个在测量中调节的栅极（G2、G3 和 G4），以及源极和漏极电极的节点。在模拟中，我们考虑三类主要互电容：(1) 量子点C_{Mij} 之间的电容（量子点i 和量子点j （i、j = 1、2、3 和 $j \neq i$）；(2) 量子点i（i = 1、2、3）与测量中扫描的栅极 G3 和 G4 之间的电容（$C_{G3\text{-}QDi}$ 和 $C_{G4\text{-}QDi}$）；以及 (3) 量子点1与栅极 G2 之间的电容 $C_{G2\text{-}QD1}$，该电容经过调节，可使三量子点进入不同的目标工作区间。每个节点上的总电荷记为Q_{QDi} （i = 1、2、3），静电势记为V_i （i 表示量子点1、量子点2、量子点3、G2、G3、G4、S 或 D）。根据经典理论，每个量子点上的总电荷可由相关栅极电压和电容确定：

$$\begin{aligned} Q_{QD1} &= C_S(V_{QD1}-V_S)+C_{G2-QD1}(V_{QD1}-V_{G2})+C_{G3-QD1}(V_{QD1}-V_{G3}) \\ &\quad +C_{G4-QD1}(V_{QD1}-V_{G4})+C_{M12}(V_{QD1}-V_{QD2})+C_{M13}(V_{QD1}-V_{QD3}), \\ Q_{QD2} &= C_{M12}(V_{QD2}-V_{QD1})+C_{G3-QD2}(V_{QD2}-V_{G3})+C_{G4-QD2}(V_{QD2}-V_{G4}) \\ &\quad +C_{M23}(V_{QD2}-V_{QD3}), \\ Q_{QD3} &= C_{M23}(V_{QD3}-V_{QD2})+C_{G4-QD3}(V_{QD3}-V_{G4})+C_{M13}(V_{QD3}-V_{QD1}) \\ &\quad +C_{G3-QD3}(V_{QD3}-V_{G3})+C_D(V_{QD3}-V_D). \end{aligned} \tag{1}$$

定义这些向量，

$\hat{V}_{QD}=\{V_{QD1},V_{QD2},V_{QD3}\}^T, \hat{V}_G=\{V_S,V_{G2},V_{G3},V_{G4},V_D\}^T, \hat{Q}_{QD}=\{Q_{QD1},Q_{QD2},Q_{QD3}\}^T$，

Eq. (1) can be written as,

$$\hat{Q}_{QD}=\boldsymbol{\mathcal{C}}_{QD}\cdot\hat{V}_{QD}+\boldsymbol{\mathcal{C}}_{QD-G}\cdot\hat{V}_G, \tag{2}$$

其中矩阵 $\boldsymbol{\mathcal{C}}_{QD}$ 和 $\boldsymbol{\mathcal{C}}_{QD-G}$ 为

$$\boldsymbol{\mathcal{C}}_{QD}=\begin{pmatrix} C_1 & -C_{M12} & -C_{M13} \\ -C_{M12} & C_2 & -C_{M23} \\ -C_{M13} & -C_{M23} & C_3 \end{pmatrix}, \tag{3}$$

$$\boldsymbol{C}_{QD-G}=\begin{pmatrix}-C_S & -C_{G2-QD1} & -C_{G3-QD1} & -C_{G4-QD1} & 0\\ 0 & 0 & -C_{G3-QD2} & -C_{G4-QD2} & 0\\ 0 & 0 & -C_{G3-QD3} & -C_{G4-QD3} & -C_D\end{pmatrix}, \tag{4}$$

其中

$$\begin{gathered}C_1=C_S+C_{G2-QD1}+C_{G3-QD1}+C_{G4-QD1}+C_{M12}+C_{M13},\\ C_2=C_{M12}+C_{G3-QD2}+C_{G4-QD2}+C_{M23},\\ C_3=C_{M23}+C_{G3-QD3}+C_{G4-QD3}+C_{M13}+C_D.\end{gathered} \tag{5}$$

然后，可以计算出量子点的电势:

$$\hat{V}_{QD}=\boldsymbol{C}_{QD}^{-1}\left(\hat{Q}_{QD}-\boldsymbol{C}_{QD-G}\cdot\hat{V}_G\right), \tag{6}$$

量子点的静电能可由下式求得:

$$\begin{aligned}E&=\frac{1}{2}\hat{V}_{QD}^T\cdot\boldsymbol{C}_{QD}\cdot\hat{V}_{QD}=\frac{1}{2}\hat{V}_{QD}^T\left(\hat{Q}_{QD}-\boldsymbol{C}_{QD-G}\cdot\hat{V}_G\right)\\ &=\frac{1}{2}\left(\hat{Q}_{QD}-\boldsymbol{C}_{QD-G}\cdot\hat{V}_G\right)^T\left[\boldsymbol{C}_{QD}^{-1}\right]^T\left(\hat{Q}_{QD}-\boldsymbol{C}_{QD-G}\cdot\hat{V}_G\right).\end{aligned} \tag{7}$$

由于 $Q_{QDi}=-eN_i\,(i=1,2,3)$，单个量子点中的化学势 μ_i 为

$$\begin{gathered}\mu_1(N_1,N_2,N_3,V_{G3},V_{G4},V_{G5})=E(N_1,N_2,N_3,V_{G3},V_{G4},V_{G5})-\\ E(N_1-1,N_2,N_3,V_{G3},V_{G4},V_{G5}),\\ \mu_2(N_1,N_2,N_3,V_{G3},V_{G4},V_{G5})=E(N_1,N_2,N_3,V_{G3},V_{G4},V_{G5})-\\ E(N_1,N_2-1,N_3,V_{G3},V_{G4},V_{G5}),\\ \mu_3(N_1,N_2,N_3,V_{G3},V_{G4},V_{G5})=E(N_1,N_2,N_3,V_{G3},V_{G4},V_{G5})-\\ E(N_1,N_2,N_3-1,V_{G3},V_{G4},V_{G5}).\end{gathered} \tag{8}$$

通过调节势垒栅极和/或柱塞栅极的电压，可以操控三个量子点的电子占据数。当量子点i的占据数从 N_i 增加到 N_i+1时，栅极 Gj上的电压变化可根据下式推导得出:

$$\mu_i\left(N_1,V_{Gj}\right)=\mu_i\left(N_1+1,V_{Gj}+\Delta V_{Gj-QDi}\right). \tag{9}$$

因此，利用方程（7）和（8），可以计算扫描栅极 G3 和 G4 上电压的相应变化量:

$$\begin{aligned}\Delta V_{G3-QD1}&=\frac{e}{C_{G3-QD1}+\frac{C_{M12}}{C_2}C_{G3-QD2}+\frac{C_{M13}}{C_3}C_{G3-QD3}},\\ \Delta V_{G4-QD1}&=\frac{e}{C_{G4-QD1}+\frac{C_{M12}}{C_2}C_{G4-QD2}+\frac{C_{M13}}{C_3}C_{G4-QD3}},\\ \Delta V_{G3-QD2}&=\frac{e}{C_{G3-QD2}+\frac{C_{M12}}{C_1}C_{G3-QD1}+\frac{C_{M23}}{C_3}C_{G3-QD3}},\\ \Delta V_{G4-QD2}&=\frac{e}{C_{G4-QD2}+\frac{C_{M12}}{C_1}C_{G4-QD1}+\frac{C_{M23}}{C_3}C_{G4-QD3}},\\ \Delta V_{G3-QD3}&=\frac{e}{C_{G3-QD3}+\frac{C_{M13}}{C_1}C_{G3-QD1}+\frac{C_{M23}}{C_2}C_{G3-QD2}},\end{aligned}$$

$$\Delta V_{G4-QD3} = \frac{e}{C_{G4-QD3} + \frac{C_{M13}}{C_1} C_{G4-QD1} + \frac{C_{M23}}{C_2} C_{G4-QD2}}. \quad (10)$$

根据图 S2(a)–S2(b) 所示的单量子点库仑菱形测量结果，可以估算电容 C_S 和 C_D 。根据正文图 3(a) 和图 3(b) 所示的电荷稳定性图，可以得到ΔV_{Gj-QDi} 的值，分别为 ΔV_{G3-QD1}= 0.0228 V、 ΔV_{G4-QD1}= 0.075 V、 ΔV_{G3-QD2} =0.0245 V、 ΔV_{G4-QD2}= 0.0277 V、 ΔV_{G3-QD3}= 0.143 V 和 ΔV_{G4-QD3}= 0.0285 V。将这些电压变化量代入方程（10），并考虑到$C_{i=1,2,3} \gg C_{Mij}$ (*ij*=12, 13, 23)，即可提取其余所有电容。正文图 3(d) 展示了用于获得三量子点模拟电荷稳定性图的所有电容参数，列于表 S1 中。

表 S1。 用于模拟正文图3(b)所示三量子点电荷稳定性图的电容值，单位为阿法拉。正文图3(d)展示了三量子点器件的模拟电荷稳定性图。

C_S	C_D	C_{G3-QD1}	C_{G4-QD1}	C_{M12}	C_{M13}
9.80	8.00	6.98	2.12	1.28	0.32
C_{G3-QD2}	C_{G4-QD2}	C_{M23}	C_{G3-QD3}	C_{G4-QD3}	C_{G2-QD1}
5.80	3.76	1.60	0.63	5.28	4.80