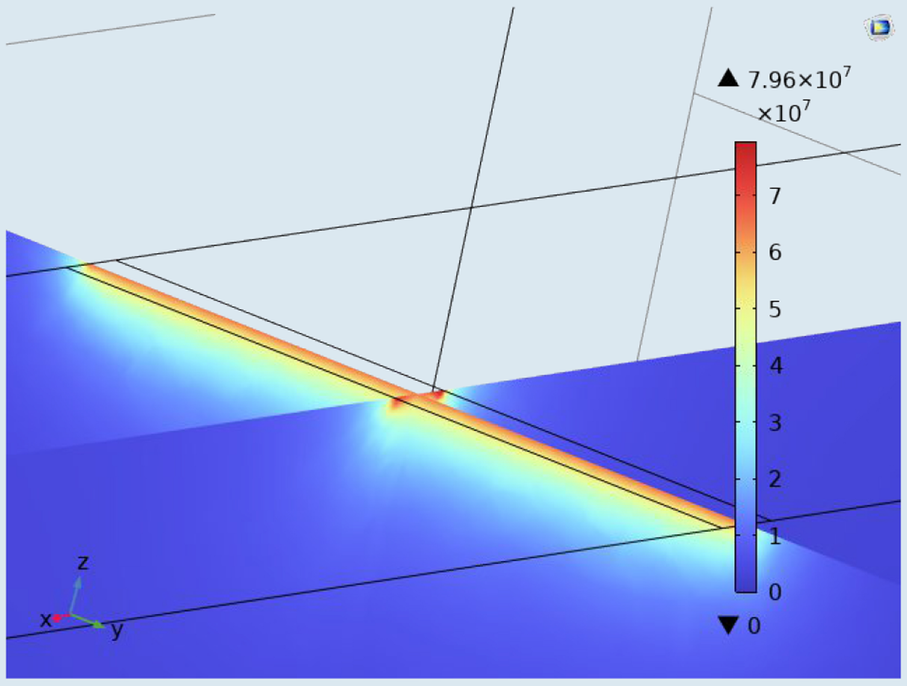


Josephson Junction RCSJ 模型中三维寄生电容对本征频率的修正研究

3D Parasitic-Capacitance Correction to the Eigenfrequency of a Josephson Junction RCSJ Model

利用 COMSOL Multiphysics 建立 JJ的三维电磁模型，并通过暂时去除集总结电容、保留 Josephson 电感的方式，单独识别三维结构形成的电磁模态及等效几何电容。摆脱了原先的固定共振，获得最低候选模态及其对应等效几何电容。

作者：罗天宇

研究背景 Introduction

Josephson Junction 通常用 RCSJ 模型描述，但真实器件中结两侧超导电极、衬底和周围介质会引入额外的三维分布寄生电容。若直接在三维模型中预设并联 LC 参数，本征频率容易被集总 LC 共振主导，难以区分结本身参数与几何环境的贡献。

本研究暂时去除集总结电容 C_j，仅保留 Josephson 电感 L_j，通过三维电磁特征频率分析识别最低候选模态，再由其反推候选等效几何电容 C_{geom}，并回代 RCSJ 模型估计频率修正。后续以电场分布与静电电容计算独立验证模态性质。

研究方法 Methodology

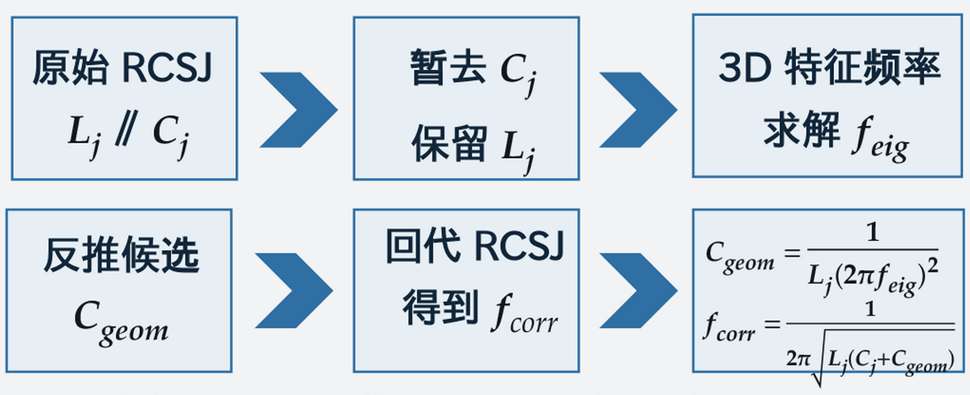


图 1. 研究流程：将三维几何模态从预设 LC 共振中分离，再把候选几何电容作为 RCSJ 修正量。

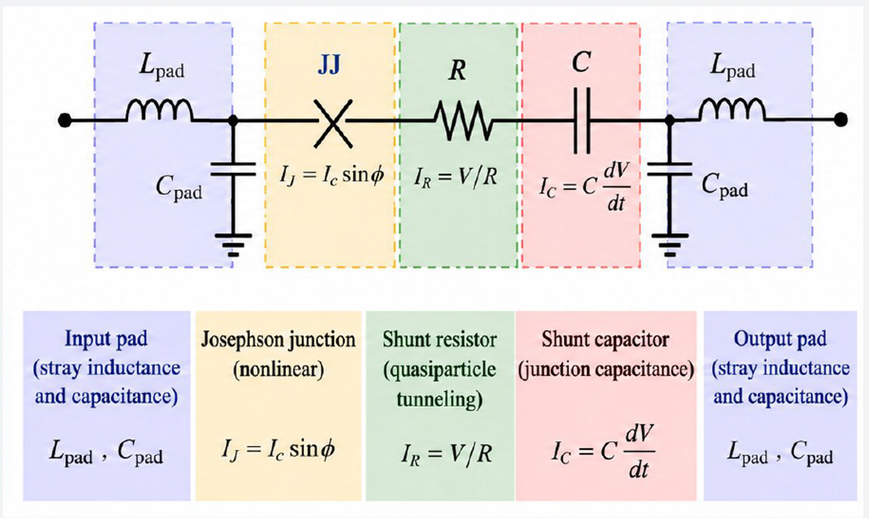


图 2. RCSJ 修正模型电路示意图。

结果 Results

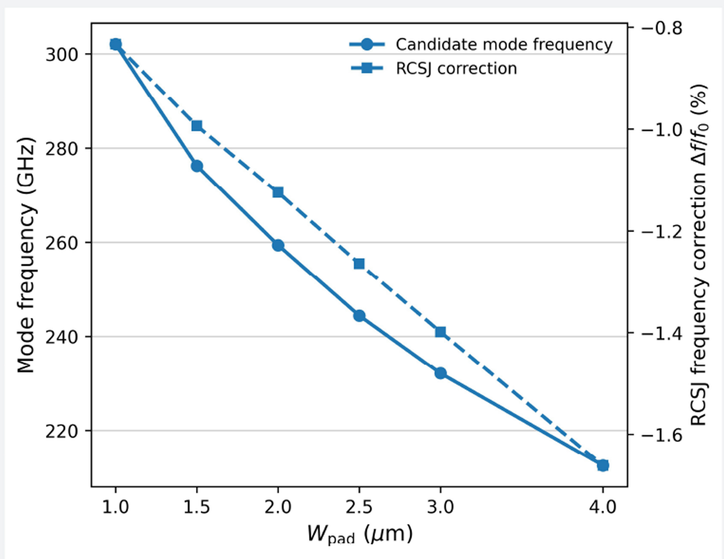


图 3. Pad 宽度对候选模态频率及 RCSJ 修正的影响。随着电极宽度由 1 μm增加至 4 μm，电磁模态频率下降，频率修正由约 −0.83% 增大至 −1.66%。

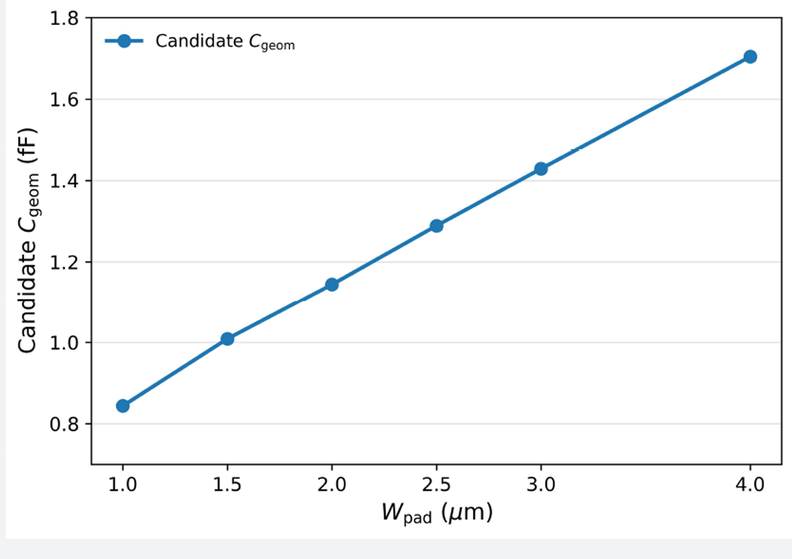


图 4. Pad 宽度对候选几何电容及 RCSJ 修正的影响。随着宽度增大，反推出的候选等效几何电容C_{geom}由约 0.84 fF 增加至 1.70 fF，呈明显的单调增长趋势

结论与展望 Conclusions & Outlook

本研究的主要目的，是对传统 RCSJ 集总模型中未包含的三维几何寄生电容进行修正。通过 COMSOL 三维本征模分析提取候选等效几何电容C_{geom}，并将 RCSJ 模型中的结电容由 C_j 修正为 C_j+C_{geom}，从而将超导电极、衬底及周围介质产生的三维电磁环境纳入 JJ 本征频率计算。Pad width 扫描显示，随着电极宽度增加，候选 C_{geom}由约 0.844 fF 增至 1.704 fF，

并导致修正后的 RCSJ 本征频率进一步下降。结果表明，三维寄生电容可以作为连接理想集总 RCSJ 模型与实际器件几何结构的重要修正量，本方法为将实际三维器件几何效应纳入集总 RCSJ 模型提供了一种可行的参数修正方案。后续工作将进一步研究 C_{geom}与器件几何参数之间的理论关系，并与实验结果进行比较。