arXiv:2304.03705v1 [quant-ph] 7 Apr 2023

用于量子计算、采用 FDSOI 技术的量子比特控制射频仿真平台

H. Jacquinot[a,1]、R. Maurand[b]、G. Troncoso Fernandez Bada[b]、B. Bertrand[a]、M. Cass´e[a]、Y. M. Niquet[b]、S. de Franceschi[b]、T. Meunier[c]、M. Vinet[a]

[a] *CEA-Leti, Univ. Grenoble Alpes, F-38000 Grenoble, France*
[b] *Univ. Grenoble Alpes, CEA, IRIG/DEPHY, Grenoble, France*
[c] *CNRS Institut Néel, Grenoble, France*

摘要

本文报告了针对半导体电子自旋量子比特的电子自旋共振（ESR）射频控制线的仿真结果。仿真既包括 ESR 线的特性（几何形状与配置、堆叠结构及材料属性），也包括量子比特附近的电磁（EM）环境，例如栅极和互连网络。通过准确评估磁场和电场的分布，我们发现，量子比特的电磁环境会显著影响 ESR 线的自旋控制效率；该效率以量子比特位置处产生的磁场与电场之比来表征。

关键词：电子自旋共振、电子自旋共振、电子自旋量子比特、量子计算

1. 引言

得益于较长的相干时间以及与先进半导体制造工艺的兼容性，电子自旋量子比特有望为量子计算技术带来突破 [1, 2, 3]。为实现多量子比特演示器的制造，需要开发自旋控制模块，并将其纳入量子比特的完整集成流程。自旋量子比特控制可通过

*通讯作者*Email address:* helene.jacquinot@cea.fr (M. Vinet)

电子自旋共振（ESR） [4]实现。其原理是在量子比特附近的射频线中通入交流电流，产生交流磁场，并将其施加于量子比特，使其达到共振 [5, 6, 7]。

通常，ESR 射频线路的仿真不会考虑量子比特周围环境的电磁（EM）效应，例如互连线、虚设结构和栅极结构。此处的仿真旨在描述一个真实的环境，包括量子比特以及采用 FDSOI 工艺、在低温下运行的真实 BEOL（后端制程） [8, 9]。

2. ESR 线 品质因数

对于量子计算，我们所考虑的 ESR 线的主要品质因数是：

- 磁场，B/E 比值
- 阻抗匹配、耗散功率、转换效率
- 可扩展性、场均匀性

在本文中，我们提出了对ESR线 品质因数的分类（图1），并证明 B/E 比值取决于 ESR线几何结构及配置、堆叠与材料，最终还取决于电磁环境。

对于给定的 ESR 线输入功率，我们将重点关注磁场（B）和磁场与电场之比（B/E），因为交流磁场用于电子自旋共振（与自旋拉比频率成正比），而 E 场则是寄生场，可能会使样品升温并导致量子比特操作不当 [5, 6, 10]。

3. 电磁仿真平台

3.1. 方法论

在本研究中，我们开发了一个电磁仿真平台，用于准确评估 ESR 线的品质因数。仿真采用 Ansys 的 HFSS

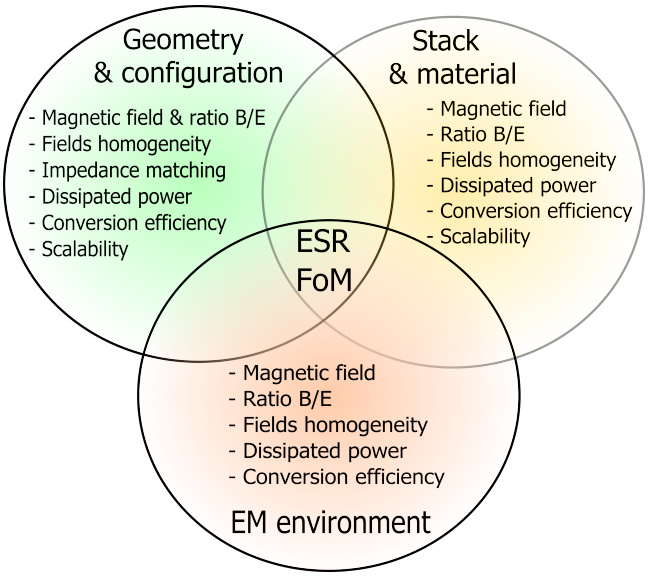

图 1：ESR 品质因数分类：取决于 ESR 线几何结构和配置、堆叠与材料以及电磁环境。

和 Dassault System 的 CST 实现。这两款有限元电磁求解器可满足 ESR 与量子点（QD）的协同设计以及多尺度仿真需求。ESR 线/量子点协同仿真能够描述量子点附近真实的电磁环境，同时考虑互连线以及材料和工艺的特性；多尺度电磁（EM）仿真则涵盖从纳米级的单个量子比特到毫米级的接入线互连。随后，我们可以使用该电磁仿真平台，根据图 1 提出的分类研究 B/E 比值品质因数。

模拟结构如图 2 和图 3 所示。

3.2. ESR 线配置的影响

ESR 线的传输线配置通常采用共面带状线（CPS）、共面波导（CPW），或通过巴伦实现的共面波导至带状线转换（CPW-to-CPS） [6], ，并在量子比特量子点附近以短路端接，此处磁场 B 和比值 B/E 需要最大化。图 4 比较了不同 ESR 线配置的品质因数，并指出

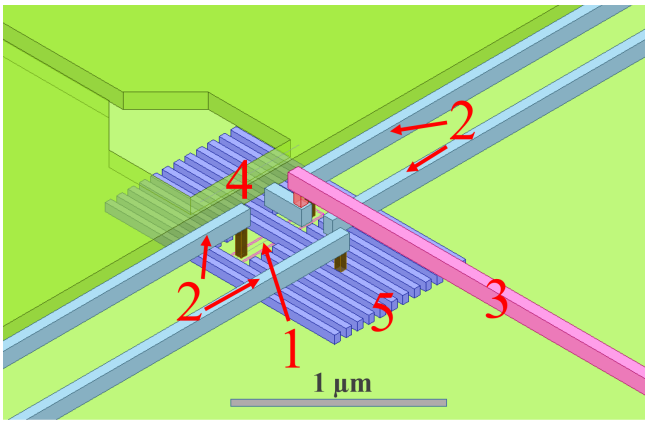

图 2：用于三维电磁（EM）仿真的结构，以评估使用电子自旋共振（ESR）进行自旋操控时的射频性能：1) 硅有源区、QD，2)栅极和储库，3)顶栅，4)M1层中的电子自旋共振线纳米天线，5) 多晶硅栅极和虚设结构，插图来自 [8]。

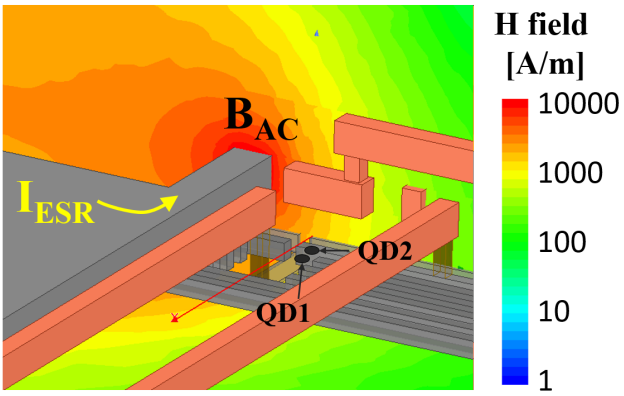

图3：在 $10\,GHz$、输入功率为 $-7\,dBm$ 时，ESR 线与两个量子点产生的磁场在硅量子点2平面上的横截面视图，插图来自 [8]。

最大 B 场与最大 B/E 比值之间的权衡。若 E 场是一个问题，则应选择共面波导配置。不过，这种配置的缺点是 B 场会减半，因为它有两条电流回流路径，而另外两种配置则没有这一情况（图 4）。

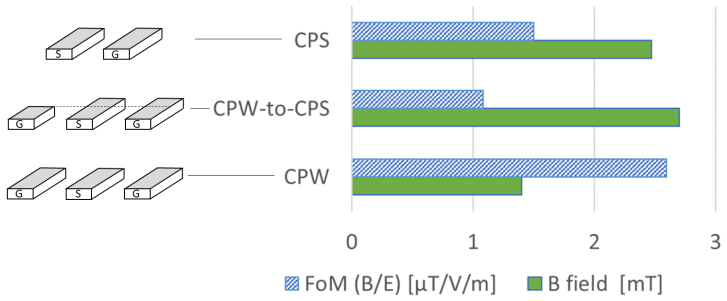

图 4：ESR 线配置及其对品质因数、量子点位置处平均场的影响，$Pin{=}{-}7\,dBm$。底部刻度对所有量均相同。

3.3. 堆叠结构的影响

研究了设计 ESR 线时堆叠结构的影响，考虑了两种情况：在栅极层或第一金属化层 M1（图 5）制作共面带状线。结果的解释很直接：使用 M1 层时，B/E 的下降是由于 B 场减弱，这是因为量子点与纳米天线之间的距离更大。

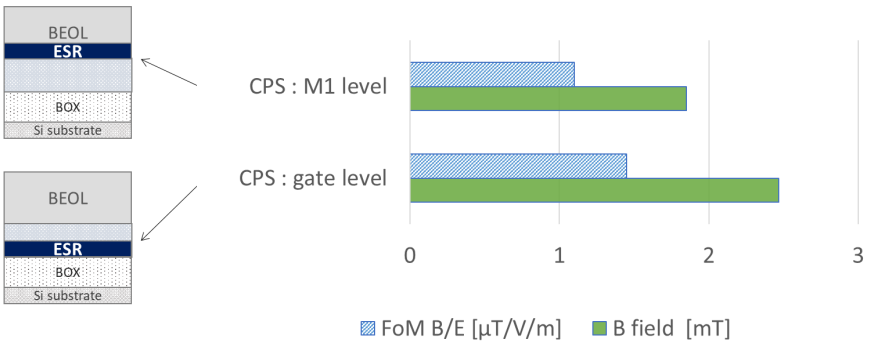

图 5：后端工艺堆叠及其对 ESR 线品质因数、量子点位置处平均场的影响，$Pin{=}{-}7\,dBm$。底部刻度对所有量均通用。

3.4. 电磁环境与定位影响

仿真结果表明，考虑所有导电层、介电层、多晶硅栅极和虚设结构会对电场产生显著影响，使其沿线的分布更加不均匀，这与通常仿真的简单 ESR线几何结构评估相反。

通常会添加虚设图形，因为需要满足一定的金属密度要求，以符合代工厂的密度设计规则检查。其主要目的是提高制造过程中的平坦度。在先进技术中，它们还可以解决与应力、快速热退火和刻蚀相关的问题。

对于图2所示的ESR线，几纳米厚的多晶硅栅极和虚设结构凭借其屏蔽效应，最多可将 E 电场降低75%。反之，量子点的互连网络会在局部增强电场，并降低 B/E。当以面对面配置通过交换栅极连接量子点时， [11], 额外的栅极互连可能导致额外的 E 电场。因此，为了进行准确的优值评估，必须在仿真平台中，将器件及其电磁环境的精确多尺度描述添加到常规的 ESR 独立器件评估中，如图 6 所总结。

4. 与实验数据的比较

采用专用的先进 CMOS FD-SOI 技术设计的“ESR 线/量子比特”协同设计器件 [11] 已完成制造，并使用配备标准校准和片上校准的矢量网络分析仪，在室温和低温下进行了表征。对于 28FDSOI 导电层，我们根据 $4\,K$ 实验结果采用了其 RRR（残余电阻率比）值，并将 M1 中纳米天线部分（图 2）的电导率调整为 $3.10^7\,S/m$。

图 7 展示了 ESR 线的整体电阻以及 ESR 线中去嵌入纳米天线部分的仿真和实验结果。ESR 线中纳米天线的电阻部分通过专用射频去嵌入测试结构获得，其占总电阻的比例高于 60%，直至 $10\,GHz$，这表明接入线电阻的影响较小。因此，

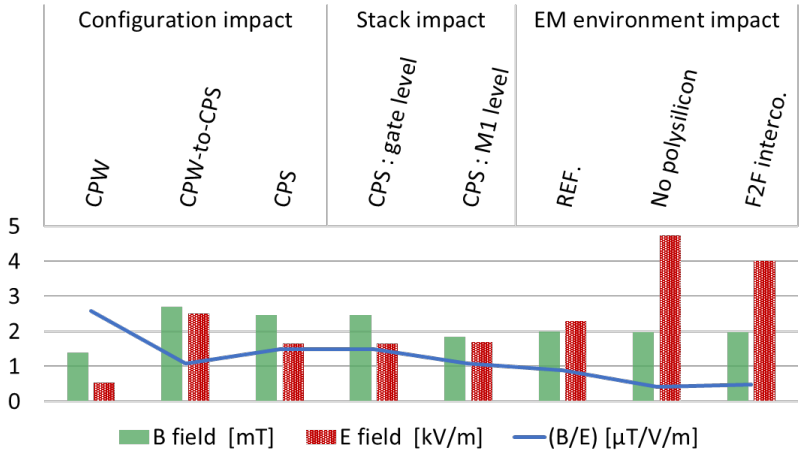

图6：对 ESR线品质因数、量子点位置处平均场的影响总结， $Pin{=}{-}7\,dBm$（参考：M1层的CPW到CPS，带有多晶硅栅极和虚设结构，且不带 F2F 互连）。左侧刻度适用于所有量。

ESR 线中的电阻损耗主要归因于纳米天线的 M1 电阻率。此外，图 7 显示，由于波长与几何长度之比非常高，纳米天线呈现准静态特性（电阻随频率变化基本保持恒定）。

如图 7和图 8所示，CEA-LETI 仿真平台在高达 $20\,GHz$ 的宽频率范围内，使测量结果与仿真结果高度一致。此外，图8中获得的结果显示了 ESR 线的宽带和低损耗特性，并且在低温下，回波损耗参数（S11）得到了显著降低。在低温下 S11参数的降低主要归因于ESR 线 BEOL 的电导率提高，尤其是纳米天线的电导率提高。

5. 结论

使用专用仿真平台评估 ESR 线控制量子点的电磁场。此前的研究仅探讨了 ESR 线几何结构的影响，而本研究还纳入了工艺堆栈和

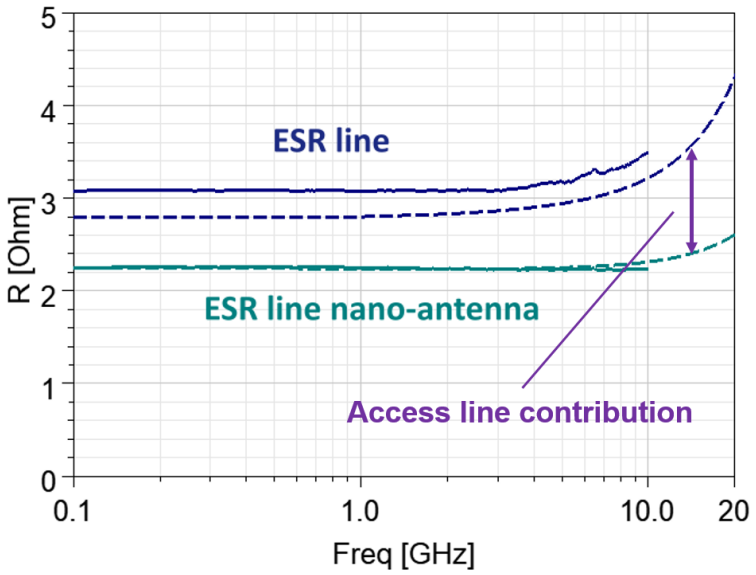

图 7: $[100\,MHz - 20\,GHz]$ 下低温时 ESR 线的总电阻（包括接入线）与 ESR 纳米天线电阻的比较：实验结果（实线）和电磁仿真（虚线）。

电磁环境，并考虑了量子点附近的虚设结构和互连线；仿真结果清楚地表明，它们会产生显著影响。最后，由于该仿真平台已通过实验验证，因此可将其用作预测工具，协同设计 ESR 线和量子点，并探索超导体等新材料，以优化控制效率。

6. 致谢

我们感谢 Spintec 和 Lateqs 实验室，特别感谢 Laurent Vila 和 C´ecile Grezes 为实验装置提供的技术支持。

7. 资助

这项工作部分由欧盟通过 H2020 QLSI 项目和欧洲研究理事会（ERC）Synergy QuCube 项目提供支持。

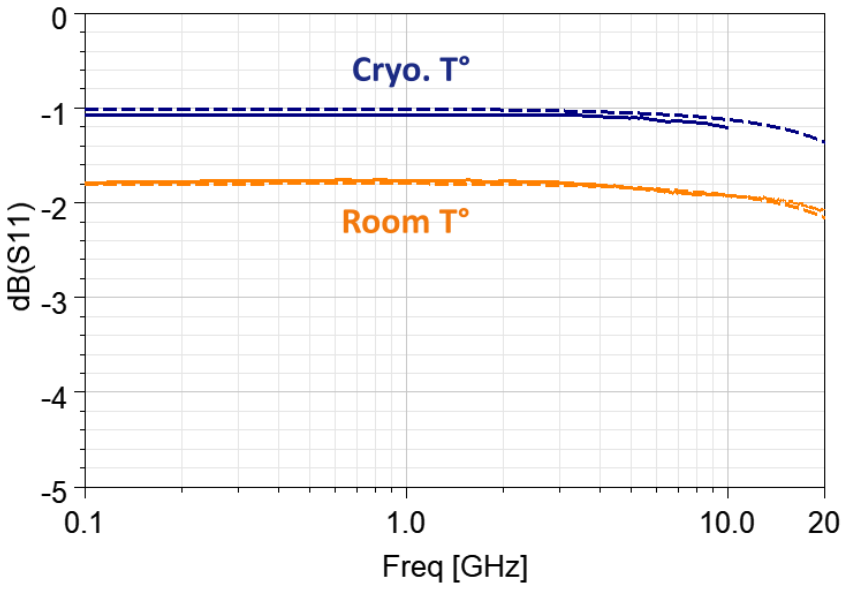

图 8：在采用专用 FEOL 和简化 BEOL 的先进 CMOS FDSOI 技术 28FDSOI 中，使用带交换栅的双量子点实现“ESR 线/量子比特”协同设计的 $[100\,MHz - 20\,GHz]$ 中 S 参数实验结果（实线）与电磁仿真结果（虚线）的比较。

参考文献

[1]R. Maurand, X. Jehl, D. Kotekar-Patil, A. Corna, H. Bohuslavskyi, R. Lavi´eville, L. Hutin, S. Barraud, M. Vinet, M. Sanquer, S. De Franceschi, 一种 CMOS 硅自旋量子比特 7 13575。doi:10.1038/ncomms13575。

[2] M. Vinet, T. B´ed´ecarrats, B. C. Paz, B. Martinez, E. Chanrion, E. Cat- apano, L. Contamin, L. Pallegoix, B. Venitucci, V. Mazzocchi, H. Niebo- jewski, B. Bertrand, N. Rambal, C. Thomas, J. Charbonnier, P.-A. Morte- mousque, J.-M. Hartmann, E. Nowak, Y. Thonnart, G. Billiot, M. Cass´e, M. Urdampilleta, Y.-M. Niquet, F. Perruchot, S. De Franceschi, T. Meu- nier, 《大规模硅量子计算的材料与集成挑战》，载于：2021 年 IEEE 国际电子器件会议（IEDM），第 14.2.1–14.2.4 页，ISSN：2156-017X。doi:10.1109/IEDM19574.2021.9720708。

[3]L. Petit, H. Eenink, M. Russ, W. Lawrie, N. Hendrickx, S. Philips, J. Clarke, L. Vandersypen, M. Veldhorst, 《热硅量子比特中的通用量子逻辑》580（7803）355–359。doi:10.1038/s41586-020-2170-7。

[4] C. P. Poole, 《电子自旋共振：实验技术综合论述》，纽约：Interscience Publishers。URL http://archive.org/details/electronspinreso0000pool

[5] F. H. L. Koppens, C. Buizert, K. J. Tielrooij, I. T. Vink, K. C. Nowack, T. Meunier, L. P.Kouwenhoven, L. M. K. Vandersypen，量子点中单电子自旋的驱动相干振荡 442 (7104) 766。doi:10.1038/nature05065。

[6] J.P. Dehollain, J. J.Pla, E. Siew, K. Y. Tan, A. S. Dzurak, A. Morello，用于自旋量子比特控制的纳米级宽带传输线 24 (1) 015202。doi:10.1088/0957-4484/24/1/015202。

[7] C. Jones, M. A. Fogarty, A. Morello, M. F. Gyure, A. S. Dzurak, T. D. Ladd，半导体量子点线性阵列中的逻辑量子比特 8 (2) 021058. doi:10.1103/PhysRevX.8.021058.[8] Y. M. Niquet, L. Hutin, B. M. Diaz, B. Venitucci, J. Li, V. Michal, G. T. Fern´andez-Bada, H. Jacquinot, A. Amisse, A. Apra, R. Ezzouch, N. Piot, E. Vincent, C. Yu, S. Zihlmann, B. Brun-Barri`ere, V. Schmitt, E. Dumur, R. Maurand, X. Jehl, M. Sa nquer, B. Bertrand, N. Rambal, H. Niebojewski, T. Bedecarrats, M. Cass´e, E. Catapano, P. A. Mortemousque, C. Thomas, Y. Thonnart, G. Billiot, A. Morel, J. Charbonnier, L. Pallegoix, D. Niege- mann, B. Klemt, M. Urdampilleta, V. E. Homsy, M. Nurizzo, E. Chanrion, B. Jadot, C. Spence, V. Thiney, B. Paz, S. d. Franceschi, M. Vinet, T. Meunier，自旋量子比特建模的挑战与展望，载于：2020年IEEE国际电子器件会议 (IEDM)，第 30.1.1–30.1.4 页，ISSN：2156-017X。doi:10.1109/IEDM13553.2020.9371962。

[9] L. Hutin、B. Bertrand、H. Niebojewski、P.-A. Mortemousque、M.Cass´e、G. Billiot、X. Jehl、R. Maurand、M. Urdampilleta、Y.-M. Niquet,

S. De Franceschi、T. Meunier、M. Vinet，量子计算用 MOS 技术：最新进展与扩展前景，载于：2021 年器件研究会议（DRC），第 1–2 页，ISSN：2640-6853。doi：10.1109/DRC52342.2021.9467200。

[10]A. M. J. Zwerver、T. Kr¨ahenmann、T. F. Watson、L. Lampert、H. C. George、R. Pillarisetty、S. A. Bojarski、P. Amin、S. V. Amitonov、J. M. Boter、R.Caudillo、D.Corras-Serrano、J. P.Dehollain、G.Droulers、E.M. Henry、R. Kotlyar、M. Lodari、F. Luthi、D. J. Michalak、B. K. Mueller、S. Neyens、J. Roberts、N. Samkharadze、G. Zheng、O. K. Zietz、G. Scap-pucci、M. Veldhorst、L. M. K. Vandersypen、J. S. Clarke，《通过先进半导体制造工艺制造的量子比特》。网址：http://arxiv.org/abs/2101.12650

[11]T. B´ed´ecarrats, B. C. Paz, B. M. Diaz, H. Niebojewski, B. Bertrand, N. Rambal, C. Comboroure, A. Sarrazin, F. Boulard, E. Guyez, J.-M. Hart- mann, Y. Morand, A. Magalhaes-Lucas, E. Nowak, E. Catapano, M. Cass´e, M. Urdampilleta, Y.-M. Niquet, F. Gaillard, S. De Franceschi, T. Meunier, M. Vinet，《采用 40 nm 有效控制间距的新型 FDSOI 自旋量子比特平台》，载于：2021 年 IEEE 国际电子器件会议（IEDM），第 1–4 页，ISSN：2156-017X。doi:10.1109/IEDM19574.2021.9720497。