arXiv:2302.01309v1 [physics.ins-det] 2 Feb 2023

使用量子钻石显微镜在多层集成电路中进行高分辨率短路故障定位

P. Kehayias[1], * J. Walraven, [1] A. L. Rodarte, [1] 和 A. M. Mounce[2]† *Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87185, USA* [2] *Center for Integrated Nanotechnologies, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87123, USA*（日期：2023年2月3日）

随着持续不断的制造和设计创新，集成电路（IC）的几何结构和封装日益复杂，电气工程界需要功能越来越强大的失效分析（FA）方法，以应对多层（具有多个金属层）和多芯片组件日益严峻的故障排查挑战。在本研究中，我们探索了一种新的电子故障分析方法，使用量子金刚石显微镜（QDM）对短路故障产生的磁场进行成像。在通过检测多层硅裸片中的短路故障来量化其性能后，我们评估了QDM 检测异质集成（HI）芯片堆叠中的故障的能力。本研究确立了基于 QDM 的磁成像作为电子故障分析领域的一项有竞争力的技术，具有高空间分辨率、高灵敏度和稳健的仪器设备等优势。我们预计，这些优势对于在具有许多金属层、光学不透明层或光散射层的芯片堆叠集成电路中寻找深层故障将尤其有用。

引言

集成电路 (IC) 的特征尺寸持续缩小，以遵循摩尔定律，而电子失效分析 (FA) 技术必须跟上新工艺技术的发展，这一点至关重要 [1, 2]。失效分析技术必须能够识别布局更密集、信号更弱且包含多个堆叠裸片的器件中的缺陷 [3, 4]。平面晶体管（尺寸缩小至 26 nm）、鳍式场效应晶体管（尺寸缩小至 5 nm）和环绕栅极 (GAA) 晶体管（尺寸缩小至 3 nm）的几何尺寸不断缩小，以及“超越摩尔”器件日益增加的复杂性，都带来了新的失效分析难题 [5]。此外，许多现有失效分析方法难以在由多个堆叠裸片构成的组件底层中查找故障。准确掌握器件中的故障数量及其在二维或三维空间（包括深度）中的位置，有助于确定集成电路生产问题的根本原因。这促使人们不断探索新的失效分析方法，以应对日益严峻的挑战，目标是能够以高空间分辨率和较短的测量时间，定位器件深处信号幅度较小的微弱故障。

本文探讨了几种领先的电子故障分析技术，包括扫描光学显微镜方法、热学方法和磁成像方法 [1, 2]。通过磁成像，我们测量器件内部电流路径所产生的磁场。这些磁场指示电流在器件中的流动位置，随后我们利用磁场图定位短路故障。磁成像颇具优势，因为大多数集成电路材料（绝缘体、掺杂半导体和金属）都能透过磁场，从而可以深入观察原本不透明的器件。此外，高性能磁力计能够探测微弱磁场，使我们得以快速检测并定位微弱电流。

在为……选择磁成像技术时

电子故障分析选择磁成像技术时，需要考虑磁灵敏度（噪声底）、信噪比（SNR）、空间分辨率，以及传感器与磁源之间的测量间距。信噪比和空间分辨率与悬空距离密切相关；悬空距离增加通常会导致磁场减弱、空间分辨率变粗 [6]。这表明，理想的磁成像设备应尽量缩短悬空距离，以获得最佳信噪比和空间分辨率。此外，还需要考虑设备的技术细节，包括其工作条件（例如温度）、频率范围和可靠性。扫描式超导量子干涉器件显微镜是磁成像的标准工具 [7]。尽管这是一种成熟的商用仪器，且磁噪声底良好，但其不足之处在于，它需要将低温传感器头扫描经过室温器件，导致空间分辨率较粗（~50-100 μ米），且可靠性较低。

利用金刚石中的氮-空位中心（NV）进行量子磁传感是一种新兴技术，具有高空间分辨率、高磁灵敏度，并可与各种目标集成。该技术的一种实现形式是量子钻石显微镜（QDM） [8–10], ，它克服了上述缺点，也是本研究的重点。将表面带有一层薄薄的磁敏氮空位中心的合成金刚石样品直接放置在器件顶部，用激光照射氮空位层，并通过宽场光学显微镜对NV荧光成像，即可利用相机测量每个像素处的磁场。QDM 的优势包括可将离样距离缩得非常小（~2 μ毫空气间隙 [11]）、微米级空间分辨率、可在环境条件下工作，以及接近 100% 的可靠性。早期研究展示了 QDM 如何对商用集成电路及其他半导体器件产生的磁场成像~2 μ

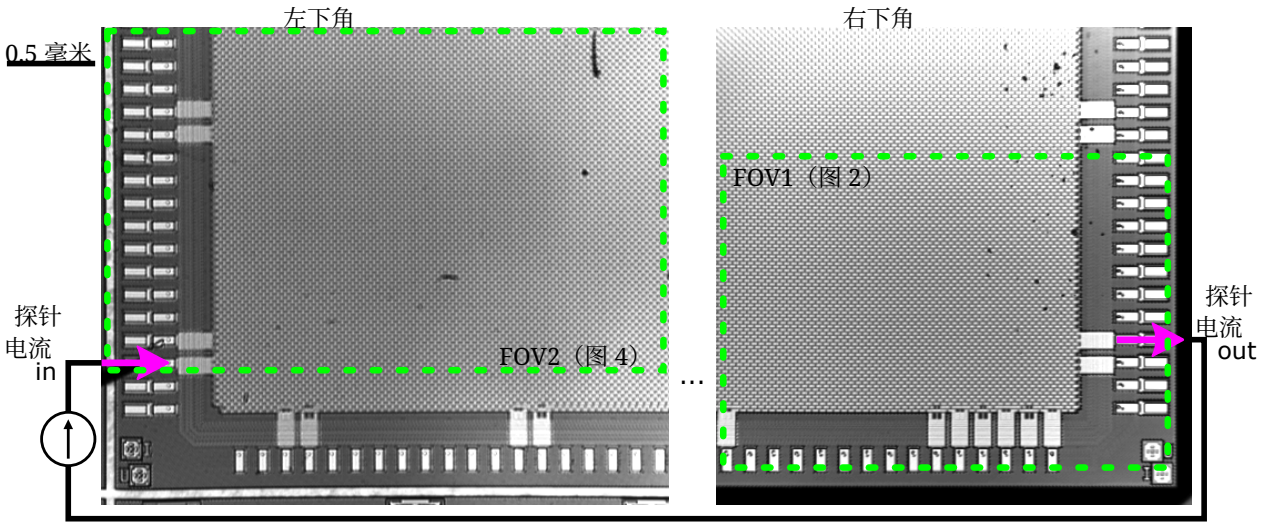


图 1. 本研究中考察的被测器件左下角和右下角的照片。我们将探针电流施加到靠近左下角的焊盘上，电流随后流经被测器件，并从靠近右下角的焊盘引出。绿色方框表示后续图中所示的视场（FOV）。

器件 [12–15]。鉴于 QDM 在测量正常工作的电子器件时已表现出良好性能，并具备上述优势，因此它们很有希望用于定位故障器件中的短路故障。

在本研究中，我们使用 QDM装置定位专用集成电路（ASIC）中两个导电层之间的短路故障。我们展示了在两颗芯片中发现的六处故障，这些故障由两个导电层之间的铜缺陷造成。为了将我们的方法与成熟的（热学）故障分析方法进行比较，我们还使用热致电压变化（TIVA）成像仪器，在同两颗芯片中定位故障 [16, 17]。TIVA 是一种标准的电子故障分析工具，通过激光加热来定位故障。尽管 NV磁成像和 TIVA 成像在技术成熟度、工作原理和局限性方面各不相同，但两种技术都在相同位置检测到了短路故障，证实 QDM 能够进行故障分析。此外，我们发现，与 TIVA 仪器相比，QDM装置能够以 $35\times$ 更高的信噪比检测故障，这意味着 QDM 能以快得多的速度找到更微弱的故障（在相同信噪比下快$1200\times$ ）。我们的 QDM 仪器定位到两处 TIVA 成像未能发现的故障，证实了 QDM 在信噪比方面的优势。本研究确立了 QDM 作为一种高性能短路故障定位装置的地位，并在结尾进一步探讨了 QDM 故障分析工具应如何用于异质集成（HI）器件。

结果

被测器件

我们的被测器件（DUT）是一颗硅基专用集成电路裸片[18]。其尺寸为 27.45×26.05 毫米^2，外围一圈布有焊盘。被测器件内部有多个导电层，初步测试已知第 4 层和第 5 层的电源平面之间存在短路故障（相关焊盘之间的电阻为 2–10 Ω）。然而，故障的数量和位置均未知先验地。我们的任务是测试能否使用 QDM 装置定位短路故障，将其与使用 TIVA 成像装置定位的故障位置进行比较，并比较这两种仪器的性能。

图1 显示了被测器件左下角和右下角的光学图像，我们在这些区域寻找短路故障。我们展示了两颗芯片的结果。图中标出了分别对芯片 1 和芯片 2 成像的视场，标记为 FOV1 和 FOV2。我们使用探针尖端在两个焊盘之间施加测试电流，然后利用 NV 磁成像和 TIVA 成像寻找短路故障。

在氮-空位中心磁成像实验中，我们使用定制的量子钻石显微镜装置，其内置探针尖端操纵器，可向相关焊盘施加电流。磁场图像显示了沿金刚石 [111] 晶向测得的磁场分量（B_{111}），该方向与平面成 $\sim$35°角。对于 TIVA 测量，我们使用了配备 1342 nm 探测激光器的商用系统。装置的详细信息和示意图见补充材料[18]。

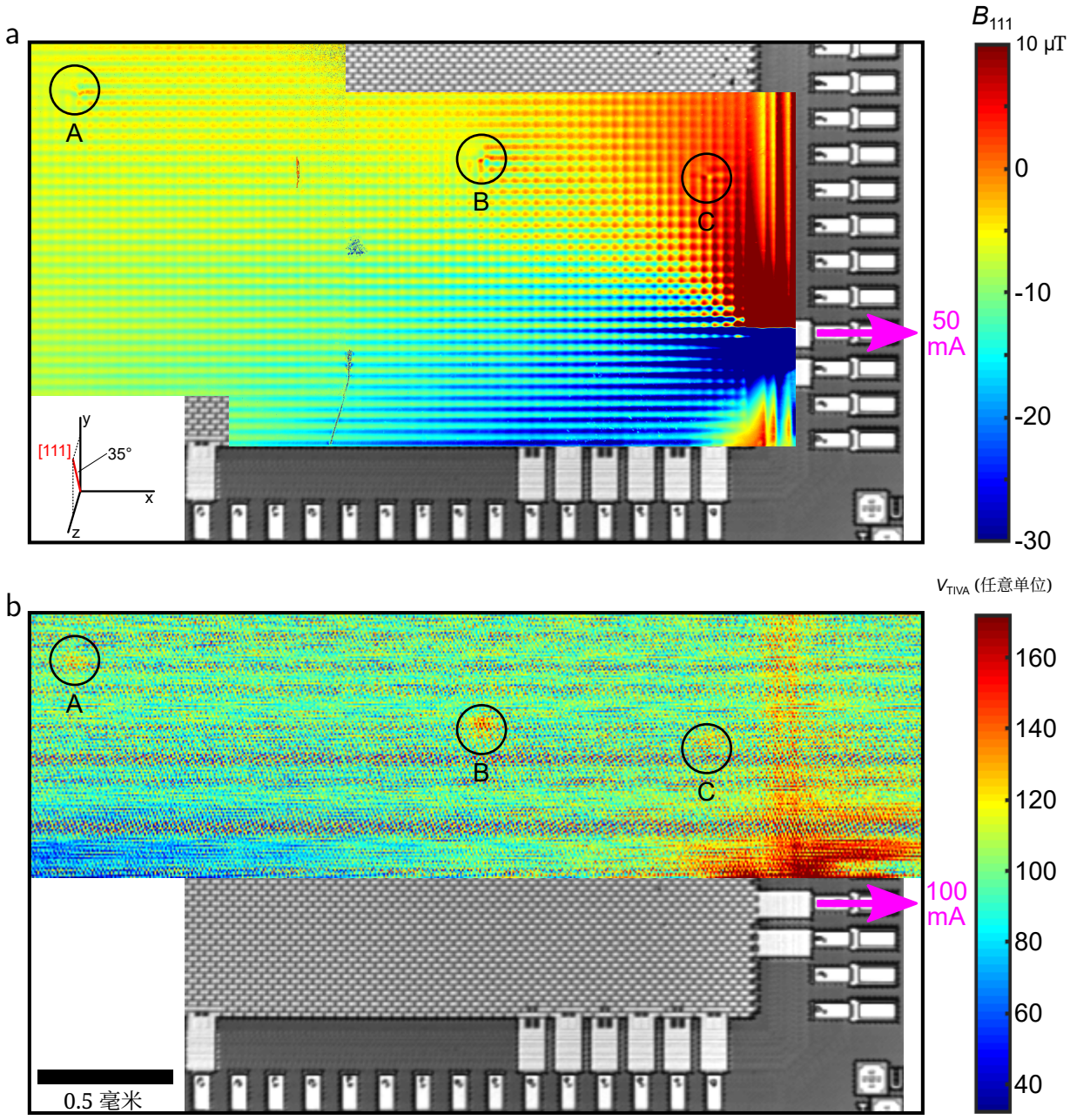


图 2. (a) 施加 50 毫安测试电流时的氮-空位中心磁图像，故障 A-C 已用圆圈标出。额外的划痕是由金刚石表面的缺陷造成的。(b) 施加 100 毫安测试电流时的 TIVA图像，显示了位于相同位置的故障 A-C。

FOV1 的 QDM 成像和 TIVA 成像

图 2展示了芯片右下角附近（FOV1）的两幅叠加的 NV 磁图像和一幅 TIVA 图像。在氮-空位中心磁成像实验中，我们施加了 50 毫安测试电流；在 TIVA 成像实验中，则施加了 100 毫安测试电流。施加电流从输入焊盘分散开，并朝输出焊盘汇聚，在磁图像中形成了与第 4 层和第 5 层网格图案相似的网格图案。该网格图案包含由沿 z- 轴在第 4 层和第 5 层之间流动的电流，表明存在短路故障（标记为故障 A、B 和 C）。作为比较，TIVA 图像中的故障呈现为叠加在近乎均匀背景上的圆形特征（故障位置的激光加热会改变电阻）。

这些初步结果证实，NV磁成像能够定位出与 TIVA 成像相同的故障，而 TIVA 成像是一种成熟的失效分析技术。这一点尤其令人振奋，因为这两种方法利用不同的现象来检测故障；NV磁成像感测器件内部的

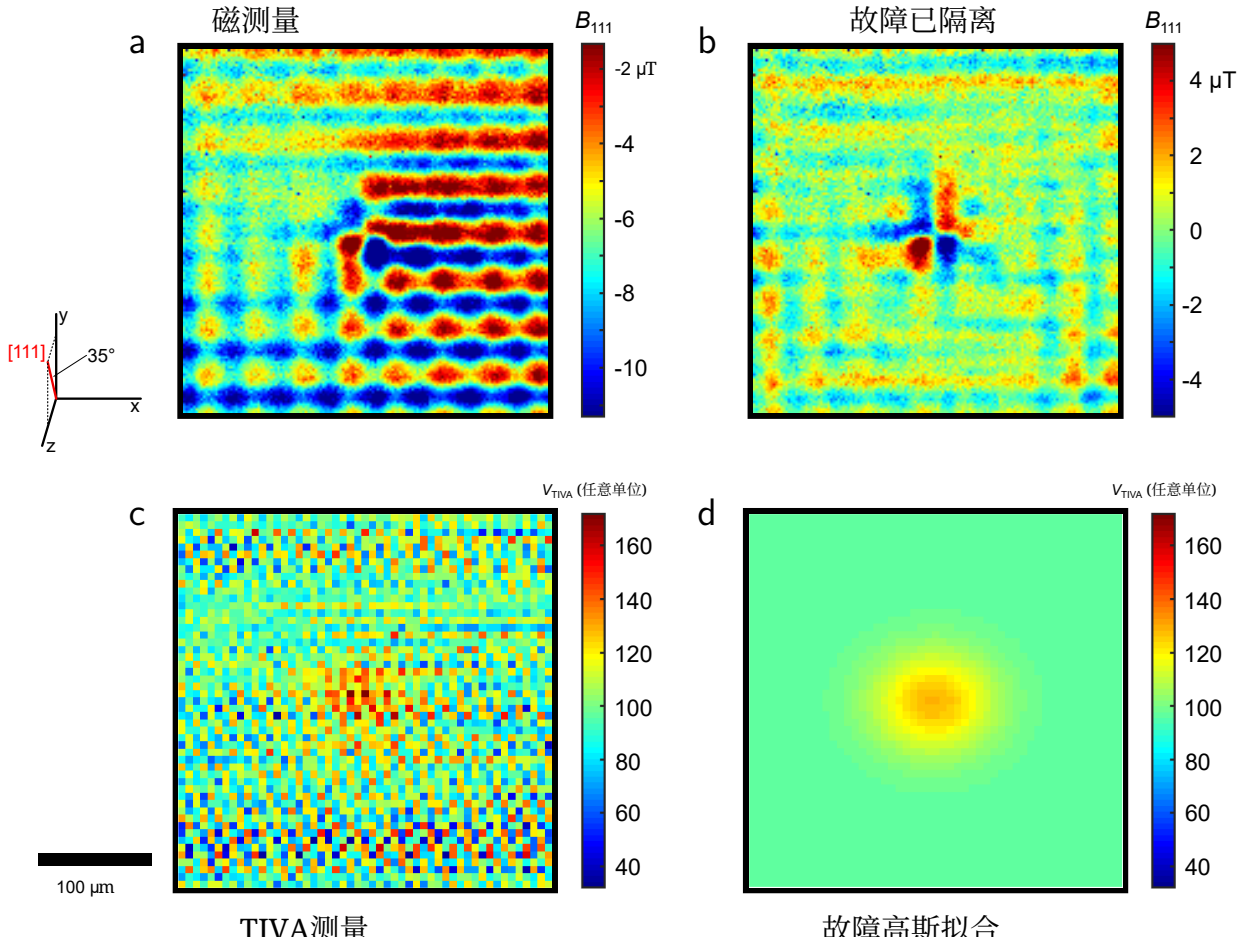


图3. (a) 故障B的QDM磁图像。(b) 抑制背景磁场、通过傅里叶变换去除网格图案并去除二次背景场后的磁图像。根据此图像，在施加 50 毫安测试电流时，我们提取出 $B_{\mathrm{fault}} \approx 7.7$ μT 的故障幅度。(c) 故障B的TIVA图像。(d) TIVA图像的二维高斯拟合，据此我们提取出在施加 100 毫安测试电流时故障幅度和噪声底的数值 $V_{\mathrm{fault}} = 32$ 和 $\delta V = 19$ 。请注意，两种方法的实验时长均为 20 分钟，但 TIVA成像实验采用了大 $2\times$ 的测试电流、大 $\sim 3\times 3$ 的像素，以及近乎大 $4\times$ 的面积。

电流（包括预期和非预期的电流路径），而 TIVA 成像则检测被测器件功耗需求的变化；激光加热电流路径中的金属缺陷会导致电阻增大，从而引起功耗需求变化，这些缺陷可能是短路故障的成因。为了评估 NV磁成像在该器件上的表现与 TIVA 成像相比如何，我们现在比较这两种技术在故障B上的信噪比和空间分辨率。

信噪比评估

QDM成像信噪比表示为

$$\mathrm{SNR}_{\mathrm{QDM}} = \frac{B_{\mathrm{fault}}}{\delta B}.$$

此处 B_{fault} 表示与故障相关的磁场幅值（归一化至 1 A 测试电流），而 δB 表示测得磁场的标准差，归一化至 1 s 测量时长和一个1×1 μ毫^2 像素尺寸。 δB 由相机收集的氮-空位中心荧光的光子散粒噪声决定；其随像素面积线性改善，并随测量时长的平方根成比例改善。我们发现，$\delta B = 30$ μT。尽管 δB 在我们早期的工作中最多好 4-8$\times$ 倍， [13]，但在此我们降低了激光功率，以尽量降低杂散光损坏被测器件或改变其内部电流的风险。最后，如果被测器件中的电流流经电阻网络，那么 B_{fault} 与测试电流成正比。

在图 3a-b 中，我们评估了 B_{fault} 故障B。这项评估并不简单，因为我们必须将B_{fault} 幅度与叠加在故障上的网格图案分离开来，而两者的幅度相当。为将它们分离，我们对图 3a 进行了傅里叶变换，并将频率分量的幅度

对应网格图案的分量设为零。计算傅里叶逆变换（抑制网格图案）后，我们去除了二次背景磁场。这些故障隔离步骤得到的孤立故障磁场图如图 3b 所示。故障B在使用 50 毫安测试电流时的幅度为 7.7μT，这对应于信噪比$_{\mathrm{QDM}} = 5.1$ （测试电流为 1 A、测量持续时间为 1 s，且 1×1 μm^2 像素尺寸）。

同样，TIVA 成像的信噪比为

$$\mathrm{SNR}_{\mathrm{TIVA}} = \frac{V_{\mathrm{fault}}}{\delta V}.$$

其中， V_{fault} 是与故障相关的 TIVA 电压（归一化至 1 A 测试电流）， δV 是视场内测量电压的标准差，归一化至 1 s 测量时长和 1×1 μm^2 像素尺寸。这里假设噪声为不相关白噪声，这意味着 δV 随像素面积线性增加，并与测量时长的平方根成正比。此外，由于 TIVA 成像是一种栅格扫描测量，对于给定的像素尺寸，δV与图像面积的平方根成正比。我们将 TIVA 扫描区域归一化至 QDM 图像面积（1.31 mm × 2.09 mm = 2.74 mm^2）。最后， V_{fault} 很可能随电流变化。如果被测器件的总电阻（R_0）与第 4 层和第 5 层之间低电阻故障的电阻成正比，那么激光加热会使电阻变为 $R_0 + \Delta R$，其中 $\Delta R = R_0 \alpha \Delta T$， α 是温度系数，ΔT 是温度变化。在恒流工作条件下，$V_{\mathrm{fault}} = \Delta V = I \Delta R$，因此 V_{fault} 应与施加电流和探测激光功率成正比。

在图 3c-d 中，我们评估 V_{fault} 和 δV故障 B。我们用二维高斯函数拟合故障图像，以求得$V_{\mathrm{fault}} = 32$ 和 $\delta V = 19$ 以任意单位表示的数值。应用相应的归一化因子后，我们得到信噪比$_{\mathrm{TIVA}}$ =0。15，测试电流为 1 A、测量时长为 1 s、1×1 μ毫^2 米像素尺寸，图像面积为 2.74 毫米^2 。

比较信噪比$_{\mathrm{QDM}} = 5.1$ 和信噪比$_{\mathrm{TIVA}} = 0.15$后，我们发现信噪比$_{\mathrm{QDM}}$ 对于 35×故障B更高。这表明使用NV磁成像具有显著的灵敏度优势，使我们能够在更短的测量时间内发现更微弱的故障。请注意，这种信噪比比较未必能推广到被测器件中的所有故障。尽管两种技术都对缺陷中的电流敏感，信噪比$_{\mathrm{TIVA}}$ 还取决于其他不会影响信噪比$_{\mathrm{QDM}}$的因素，例如有多少邻近金属参与散热。尽管存在这一细节，我们的信噪比评估使我们确信，NV磁成像能够定位比TIVA 成像更微弱的故障。为证实这一发现，我们研究了第二个芯片（图 1中的FOV2），其中存在较弱的故障；如下文所述，这些故障可通过NV磁成像检测到，但在正常工作条件下无法通过TIVA 成像检测到。

空间分辨率比较

空间分辨率有多种定义，包括点扩散函数线宽、光学衍射极限，或两个特征在变得无法区分之前的最小间距。在本分析中，我们将空间分辨率定义为故障定位不确定性，即我们能够在$\{x, y\}$ 平面内对孤立故障进行定位的精确程度；这是与电子故障分析相关的空间分辨率指标。

对于 NV 磁成像，图 3 中十字形的宽度表明，故障 B 的位置不确定度为几微米。3b。请注意， $\{x, y\}$ 位于 8 μ毫×8 μ米的第 4 层和第 5 层走线重叠区域内的故障，会产生截然不同的磁图像。对这一现象进行模拟，并与实验磁图像比较，可以得出远小于这些导电层 16 μ米周期的故障位置不确定度。对于 TIVA 图像，图 3d 中二维高斯分布的标准差为34 μ米。该标准差可用于估算空间分辨率，不过，只要信噪比足够高，质心不确定度就能任意降低。总的来说，我们认为量子钻石显微镜的空间分辨率 ∼10× 优于 TIVA 成像的空间分辨率，不过，通过进一步的硬件改进和后处理，两者都能得到提升。

两种技术的空间分辨率都受光学衍射极限 $d = \frac{\lambda}{2\,\mathrm{NA}}$ 限制，其中λ 是 QDM/TIVA 仪器的荧光/照明波长，NA 是显微镜物镜的数值孔径。我们的 QDM 装置（$\lambda = 700$ nm，NA $= 0.25$）的空间分辨率为 $d_{\mathrm{QDM}} = 1.4$ μm，而 TIVA 装置（$\lambda = 1342$ nm，NA $= 0.14$）的空间分辨率为$d_{\mathrm{TIVA}} = 4.8$ μm。在 NA 相同的情况下， d_{QDM} 应比 d_{TIVA}好 $1.9\times$。两者都可以通过提高 NA 来改善，不过 NV 磁成像还可以采用超分辨率显微术或原子力显微术（AFM）技术 [19, 20]。实际应用中，支架距离通常限制 QDM 空间分辨率，而热扩散通常限制 TIVA 空间分辨率 [21]。

FOV2 的 QDM 成像和 TIVA 成像

图 4 展示了第二块芯片的磁图像和 TIVA 图像，成像区域更靠近芯片中部，该处电流较弱。在氮-空位中心磁成像和 TIVA 成像实验中，我们均施加了 100 毫安的测试电流，并发现了另外三个短路故障，分别标记为故障D、故障E和故障F。两种技术都检测到了一个明显的短路故障（故障D），尽管它在 TIVA 图像中几乎不可见。此外，NV 磁图像还显示了另外两个故障（故障E和F），其磁场幅值

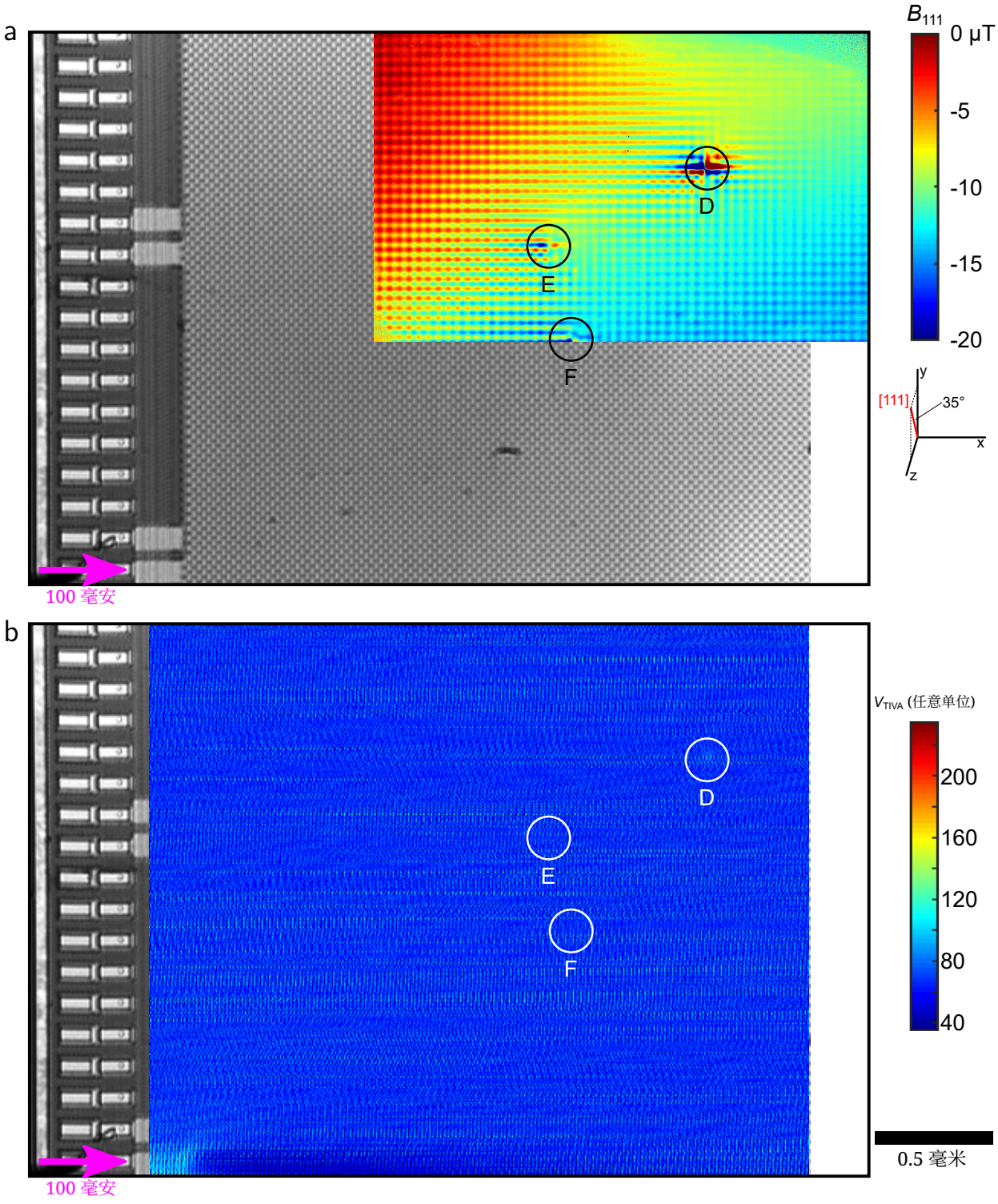


图 4。(a) FOV2的QDM磁图像，显示故障D-F。(b) FOV2的TIVA图像，显示相同的三个故障位置。可以看到故障D，但故障E和F太弱，无法观察到。

~20-40× 比故障D的弱。故障E和F太弱，无法在TIVA 图像中观察到，这证实了我们此前的发现：信噪比$_{QDM}$ 优于信噪比$_{TIVA}$。根据磁图像中获知的故障位置，之后我们经过数次尝试，成功定位了它们TIVA测量的信噪比增强 [18]。

完成量子钻石显微镜（QDM）和 TIVA 成像实验后，我们使用聚焦离子束（FIB）在被测器件的故障位置进行横截面切割，随后使用扫描电子显微镜（SEM）对横截面进行成像——

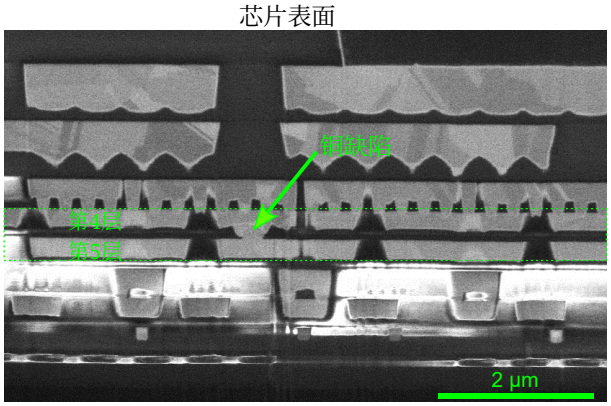


图5. 芯片横截面的扫描光学显微镜（SEM）图像，显示了故障F，该故障由第 4 层和第 5 层之间的铜缺陷造成。

切面。图 5 展示了故障F的横截面，显示了导致导电层之间短路的铜缺陷。

HI器件的磁成像

既然已确认 NV 磁成像是一种有望用于定位短路故障的电子故障分析方法，我们现在来探讨如何将这种方法用于更广泛的器件。对于 NV 磁成像而言，最难测量的器件可能是深层中存在弱电流的器件（即具有多个导电层和堆叠裸片的集成电路），因为悬空距离增加会导致磁场幅值和空间分辨率下降。

图2和图4 中成像的被测器件，旨在作为 HI 器件的一部分，其顶部还将安装一个额外的 30 µm 芯片。为模拟在 HI 器件中测量短路故障时的磁图像，我们计算了预期的磁场图像，额外的 30 µm 悬空距离[6], 如图6所示。我们评估了三种典型故障磁信号幅度下的预期性能：强（故障D）、中（故障 E）和弱（故障 A）。如预期，网格图案和故障特征会变得更弱、更粗糙，但值得庆幸的是，即使增加悬空距离，故障特征仍然可见，尤其是在采用上述故障隔离步骤之后。这表明，尽管悬空距离增加，氮-空位中心磁显微技术仍适用于 HI 器件。然而，随着悬空距离增加，较弱的磁特征会更难从背景磁场中分离出来，因此始终应尽量缩短测量间距。尽管存在这些限制，故障D（其 $B_{\mathrm{fault}} \approx 120$ µT 幅度较大且背景梯度较小）在距离达到 ~150 µm 时仍可见。这表明，磁成像（使用量子钻石显微镜或其他方法）仍可用于检测 HI 器件、堆叠芯片集成电路、采用背面供电的器件，以及其他深层光学可达性有限的器件中的短路故障。

讨论

在定位短路故障时，磁成像和 TIVA 成像各有优势，也各有取舍。对于磁成像，悬空距离越大，磁场幅值和空间分辨率就越差，但故障与传感器之间的任何材料（金属、半导体或绝缘体）都不应阻碍磁信号。对于 TIVA 成像，材料则至关重要：由于金属的不透明性和热导率，难以检测被金属包围的故障。不过，透明的半导体层和绝缘层不应显著影响成像性能（例如透过块体硅衬底背面成像导电层）。尽管对深层信号源的灵敏度较低，磁成像仍可用于检测多层芯片、堆叠芯片器件和 HI器件中的故障。尤其是当故障位于金属化密集、互连密度高且填充有底部填充材料的下层芯片中时，尽管性能会有所牺牲，磁成像仍可能是一种可行的故障分析方案，而 TIVA 成像则可能无法实现。

与其他磁成像方法相比，例如扫描式超导量子干涉器件显微术、扫描式巨磁阻（GMR）显微术、扫描式磁性隧道结（MTJ）显微术和磁力显微术（MFM），NV磁成像具有若干优势 [22–25]。与这些其他技术不同，QDM 可同时采集所有像素的磁信息（而非栅格扫描）。这意味着 QDM 运行时没有移动部件，因此非常适合测试使用探针尖端通电的器件。这也意味着采集过程中的任何漂移都应是所有像素共有的，且易于消除；而栅格扫描实验中的漂移则可能难以消除。最后，QDM 可在环境条件下运行，无需磁屏蔽，可靠性接近 100%，且与其他失效分析工具相比价格低廉。这些特点使 QDM 方法对电子故障分析、电力电子、微电子制造、超大规模集成（VLSI）和多芯片模块（MCM）领域具有吸引力。

对于深度超过 ~50-100 µm 的短路故障，扫描式超导量子干涉器件显微镜在故障检测方面很可能优于量子钻石显微镜，不过量子钻石显微镜是否适用于二维、2.5D 和三维组件，取决于器件的总体厚度。这是因为对于深层故障，

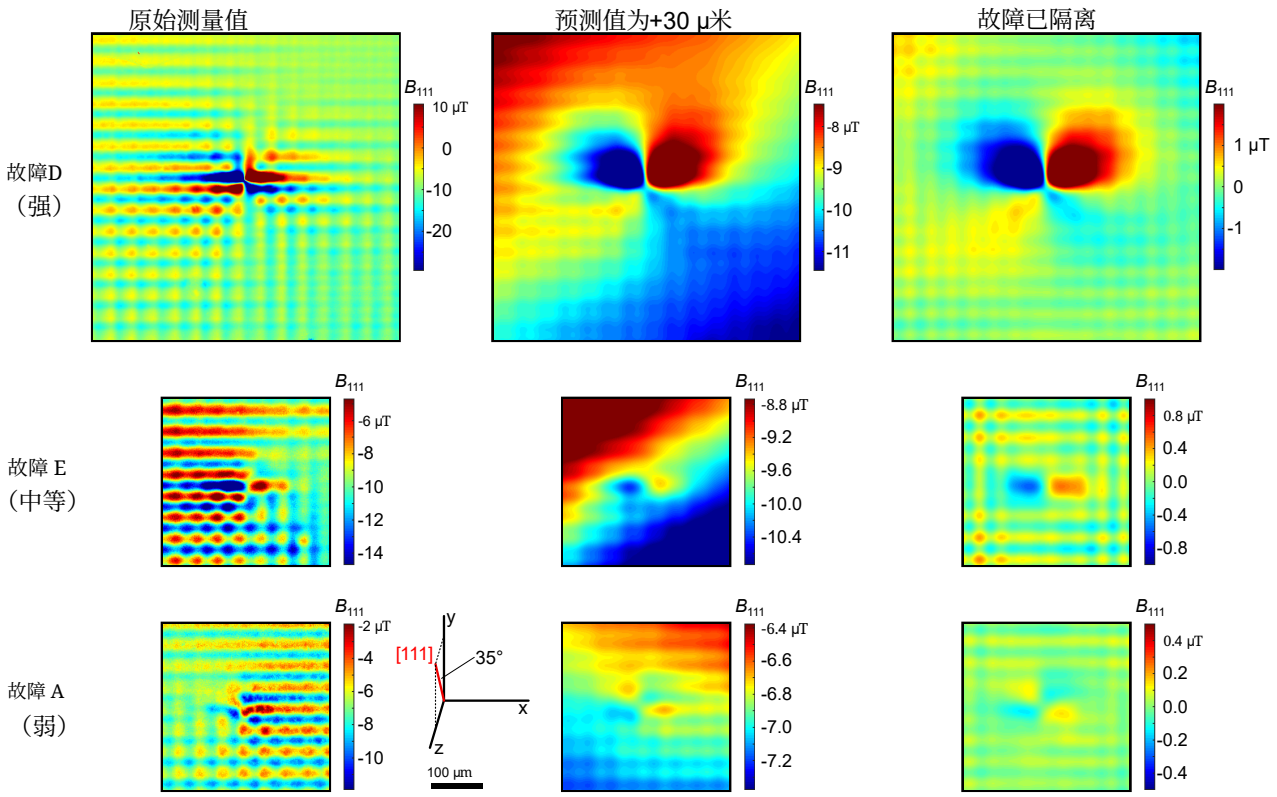


图6。故障D、E和A的磁图像，分别代表强、中、弱幅值故障。根据测得的磁图像（左列），我们模拟了芯片作为HI器件的一部分时的磁图像，并在其上方额外叠加了一层 30 μm芯片（中列）。我们采用与图3 （右列）相同的故障隔离后处理，以去除背景波纹和梯度。

我们无法利用量子钻石显微镜仅有几微米悬空距离这一优势（氮-空位中心与超导量子干涉器件的悬空距离将相近），而扫描式超导量子干涉器件显微镜的磁噪声底应更低（~20 pT/$\sqrt{\text{Hz}}$） [26]。不过，扫描式超导量子干涉器件显微镜测量磁场的 B_z 分量时，无法检测 z 方向上的电流；而量子钻石显微镜提供的矢量磁场信息则可用于深入了解所研究器件内部的电流。最后，用于提升低空间分辨率磁成像仪空间分辨率的任何图像分析技术，也都可应用于量子钻石显微镜图像；此外，预处理后的磁图像具有更短的悬空距离。

结论

在本研究中，我们探讨了如何利用氮-空位磁成像设备，通过定位多层硅ASIC器件中导电电源层之间的短路故障，进行电子故障分析。将NV磁成像与业界标准的TIVA成像技术进行验证后，我们发现NV磁成像的信噪比显著更高（故障B的信噪比高出35× ），这意味着我们能够在更短时间内发现较弱的故障（例如故障E和F；在相同信噪比下快1200× ）。我们还表明，QDM 成像可扩展至HI器件以及采用堆叠裸片制造的集成电路。因此，我们认为本研究确立了QDM作为一种有效的短路故障定位工具。我们预计，进一步探索QDM矢量磁成像、复杂的正演模型和反演模型计算，或利用机器学习算法进行磁图像分析，如何助益故障定位 [27–29]。此外，使用QDM装置对交流磁场成像，也可能为电子故障分析开辟新的可能性 [30]。

致谢

我们感谢 Paiboon Tangyunyong 和 Edward Cole 为稿件提供技术建议，并感谢 William Mook 制作聚焦离子束截面图像。桑迪亚国家实验室是一家多任务实验室，由桑迪亚国家技术与工程解决方案有限责任公司管理和运营；该公司是霍尼韦尔

International, Inc. 的全资子公司。该实验室受美国能源部国家核安全管理局委托运营，合同编号为 DE-NA0003525。本研究部分由实验室指导的研究与开发计划资助，部分工作则在综合纳米技术中心完成。该中心是美国能源部科学办公室运营的科学办公室用户设施。

* pmkehay@sandia.gov

[1] T. Gandhi, *Microelectronics Failure Analysis: Desk Reference* 2019 （ASM International, ）。[2] J. C. Wagner, *Failure Analysis of Integrated Circuits: Tools and Techniques* 494 1999 ，第 卷（施普林格，）。[3] P. Chau，载于 *2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)* 2019 1 1 1 1 1 6 （ ）第 页。—。[4] E. P. DeBenedictis、M. Badaroglu、A. Chen、T. M. Conte 和 P. Gargini，《Computer》50，69（2017）。[5] M. Graef，载于 *2021 IEEE International Roadmap for Devices and Systems Outbriefs* 2021 1 47 （ ）第 — 页。[6] E. A. Lima 和 B. P. Weiss，《地球物理研究杂志：固体地球》114（2009）。[7] C. L. Henderson，《微电子可靠性》53，1171（2013）。[8] D. R. Glenn、R. R. Fu、P. Kehayias、D. Le Sage、E. A. Lima、B. P. Weiss 和 R. L. Walsworth，《地球化学、地球物理学、地球系统》18，3254（2017）。[9] E. V. Levine、M. J. Turner、P. Kehayias、C. A. Hart、N. Langellier、R. Trubko、D. R. Glenn、R. R. Fu 和 R. L. Walsworth，《纳米光子学》8，1945（2019）。[10] S. C. Scholten、A. J. Healey、I. O. Robertson、G. J. Abrahams、D. A. Broadway 和 J.-P. Tetienne，《应用物理学杂志》130，150902（2021）。[11] P. Kehayias、E. Bussmann、T.-M. Lu 和 A. M. Mounce，《应用物理学杂志》127，203904（2020）。[12] M. J. Turner、N. Langellier、R. Bainbridge、D. Walters、S. Meesala、T. M. Babinec、P. Kehayias、A. Yacoby、E. Hu、M. Lonˇcar、R. L. Walsworth 和 E. V. Levine，Physical Review Applied 14，014097（2020）。[13] P. Kehayias、E. V. Levine、L. Basso、J. Henshaw、M. Saleh Ziabari、M. Titze、R. Haltli、J. Okoro、D. R. Tibbetts、D. M. Udoni、E. Bielejec、M. P. Lilly、T.-M. Lu、P. D. D. Schwindt 和 A. M. Mounce，Physical Review Applied 17，014021（2022）。[14] L. Basso、P. Kehayias、J. Henshaw、M. Saleh Ziabari、H. Byeon、M. P. Lilly、E. Bussmann、D. M. Camp- bell、S. Misra 和 A. M. Mounce，《纳米技术》34，015001（2022）。[15] S. Scholten、G. Abrahams、B. Johnson、A. Healey、I. Robertson、D. Simpson、A. Stacey、S. Onoda、T. Ohshima、T. Kho、J. Ibarra Michel、J. Bullock、L. Hollenberg 和 J.-P. Tetienne，Physical Review Applied 18，014041（2022）。[16] E. J. Cole、P. Tangyunyong 和 D. Barton，载于 *IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings* （1998）第129–136页。[17] E. Cole、P. Tangyunyong、D. Benson 和 D. Barton，《微电子可靠性》39，991（1999）。[18] 更多详细信息见补充材料。[19] X. Chen、C. Zou、Z. Gong、C. Dong、G. Guo 和 F. Sun，Light: Science & Applications 4，e230（2015）。[20] P. Maletinsky、S. Hong、M. S. Grinolds、B. Hausmann、M. Lukin、R. L. Walsworth、M. Loncar 和 A. Yacoby，Nature Nanotechnology 7，320（2012）。[21] P. Tangyunyong，《微电子可靠性》43，297（2003）。[22] J. Gaudestad、N. Gagliolo、V. V. Talanov、R. H. Yeh 和 C. J. Ma，载于 *Proceedings of the 20th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA)* 2013 347 350 （），第– 页。[23] F. S. Felt，载于 *International Symposium for Testing and Failure Analysis (ISTFA)* 2005 169 177 （），第– 页。[24] B. D. Schrag、M. J. Carter、X. Liu、J. S. Hoftun 和 G. Xiao，载于 *Conference Proceedings from the 32nd International Symposium for Testing and Failure Analysis (ISTFA)* 2006 13 19 （），第– 页。[25] A. Pu、D. Thomson 和 G. Bridges，微电子工程86，16（2009）。[26] J. R. Kirtley 和 J. P. Wikswo，《材料科学年度评论》29，117（1999）。[27] D. Broadway、S. Lillie、S. Scholten、D. Rohner、N. Dontschuk、P. Maletinsky、J.-P. Tetienne 和 L. Hollenberg，Physical Review Applied 14，024076（2020）。[28] E. V. Levine、M. J. Turner、N. Langellier、T. M. Babinec、M. Loncar 和 R. L. Walsworth，载于 *International Symposium for Testing and Failure Analysis* （2020），第84–90页。[29] S. M. Oliver、D. J. Martynowych、M. J. Turner、D. A. Hopper、R. L. Walsworth 和 E. V. Levine，载于 *International Symposium for Testing and Failure Analysis* （2021），第96–107页。[30] A. Horsley、P. Appel、J. Wolters、J. Achard、A. Tallaire、P. Maletinsky 和 P. Treutlein，Physical Review Applied 10，044039（2018）。

《利用量子钻石显微镜对多层集成电路进行高分辨率短路故障定位》的补充材料

P. Kehayias, [1,] * J. Walraven, [1] A. L. Rodarte, [1] 和 A. M. Mounce[2]1 *Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87185, USA*2 *Center for Integrated Nanotechnologies, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87123, USA*

E实验详情与增强灵敏度 TIVA 结果

被测器件

图 S1 展示了本研究中一个示例芯片的照片。芯片 1 和芯片 2 制作在硅晶圆上，我们在晶圆切割前对被测器件进行了实验。被测器件内部有多层金属层，我们的工作涉及查找第 4 层和第 5 层电源平面之间的短路故障。这些层包含按网格图案排列的正交行和列，如图 S1 插图所示。我们通过放置在相关焊盘上的探针尖端施加测试电流。

QDM装置

我们的 QDM 设置结合了光学荧光显微镜（用于磁成像）和探针台（用于向被测器件施加测试电流），如图 S2a 所示。在 QDM 设置中，我们将一块 $4 \times 4 \times 0.5$ 毫米^{3}金刚石样品（参考文献 [S1]中的样品 A）放置在被测器件上方，其上带有一层 4 μ米厚的磁敏氮空位中心层（图 S2b）。NV 电子基态磁子能级对沿 N-V 轴（ B_{111} 晶体学方向）的磁场 [111] 敏感，因此 $m_s = 0$ 到 $m_s = \pm 1$ 跃迁频率会偏移 $\pm\gamma B_{111}$，其中 $\gamma \approx 28$ GHz/T 是 NV 的旋磁比。我们从显微镜物镜侧面用 532 nm 激光照射氮空位层，使 NV 中心泵浦至 $m_s = 0$子能级。施加共振微波场可驱动 NV 中心从 $m_s = 0$ 子能级跃迁至 $m_s = \pm 1$ 子能级，从而降低 NV 荧光发射强度。通过扫描微波频率并用显微镜对 NV 荧光成像，我们获得显微镜视场中每个像素的光学检测磁共振（ODMR）光谱。通过拟合每个像素的 ODMR 光谱以提取中心频率，我们获得由氮空位层检测到的 B_{111} 磁场[S2]。

在此设置中，我们沿 N-V 轴施加了 1.5 mT 的静态偏置磁场，并将对器件施加大小相等、方向相反的测试电流时采集的磁场图相减，以去除磁图像中除测试电流以外的所有贡献（例如偏置磁场）。我们使用了 200 mW 的激光功率，成像范围为 1.31×2.09 毫米^2，09 μ像素尺寸为 m，典型实验时长为 20 分钟。最后，为防止激光和 NV 荧光在被测器件中产生光生载流子，我们施加了一层保护涂层（5 nm Ti、150 nm Ag 和 150 nm Al_2O_3），以避免杂散光改变被测器件内部的电流 [S3]。

TIVA 装置

热致电压变化（TIVA）是一种用于定位半导体集成电路中缺陷的技术（图S3）[S4，S5]。用 Nd:YVO_4 连续波单色激光器（1342 nm，0.924 eV）照射被测器件，其光子能量低于硅带隙（1.14 eV），会引起局部加热，并通过温度梯度（塞贝克效应）产生电压梯度，而不会产生电子-空穴对或光电流。对于 TIVA 成像，聚焦激光束引起的局部加热会改变短路故障的电阻，从而导致集成电路功耗需求发生变化。当被测器件处于恒流偏置状态时，可获得更高的灵敏度。随着我们将激光束扫描过被测器件表面，我们记录施加电压和功耗需求的变化，以此指示加热（及故障）位置。

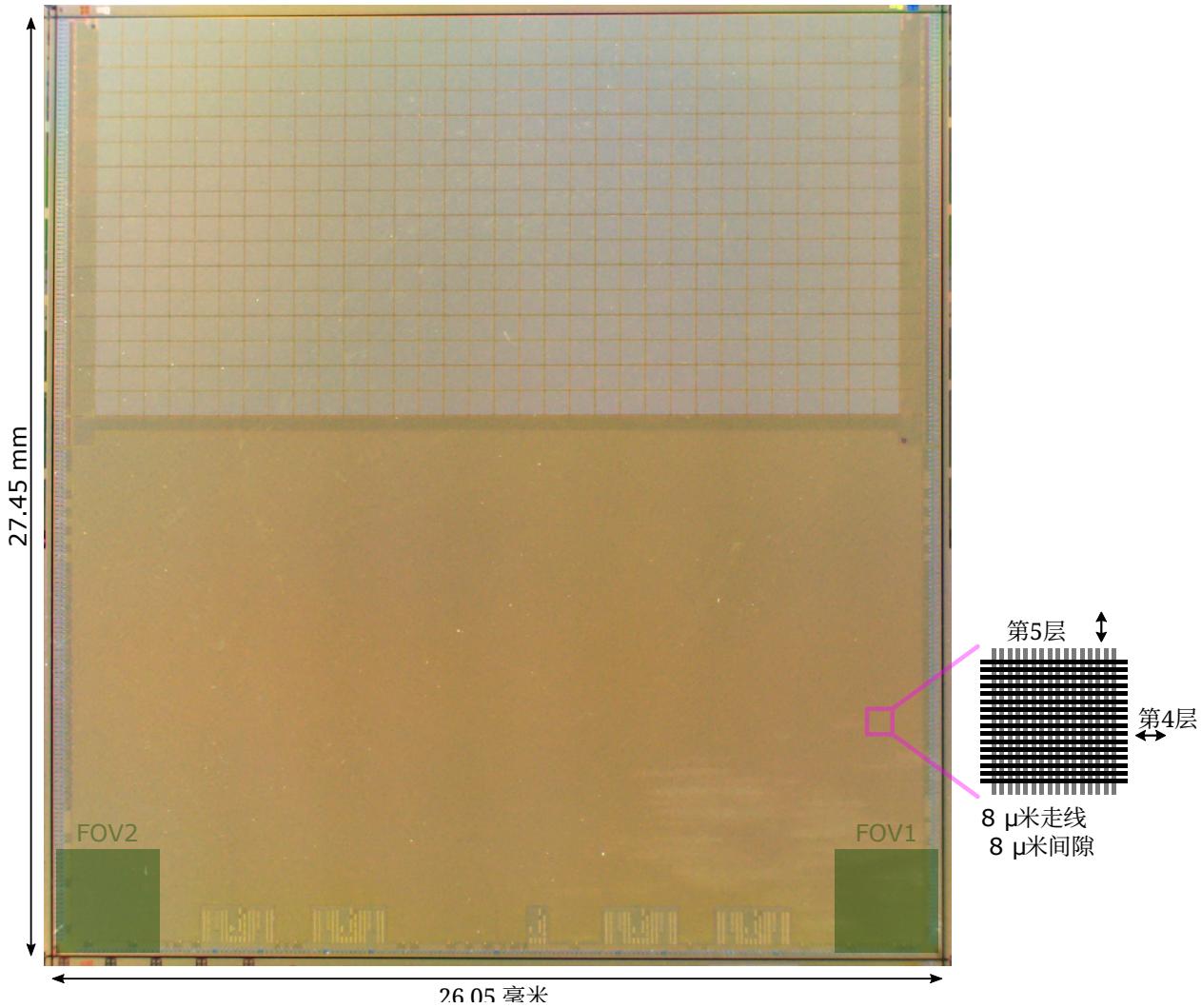
我们使用激光扫描显微镜（Checkpoint InfraScan 400TDM）绘制热诱导电压变化及相应反射激光强度的分布图，从而对缺陷位置进行空间定位。测量时，我们通常使用功率为 140 mW 的 1342 nm 激光、3.21 × 3.21 毫米^2 的扫描区域、6.27 μm 的像素尺寸（512×512 像素），测量时长为 20 分钟。扫描完成后，仪器会提供

激光诱导电压变化图像（归一化为 8 位灰度图像，取值范围为 0 至 255，单位为任意单位）以及反射光强图像，我们将其用于正文中的叠加图。

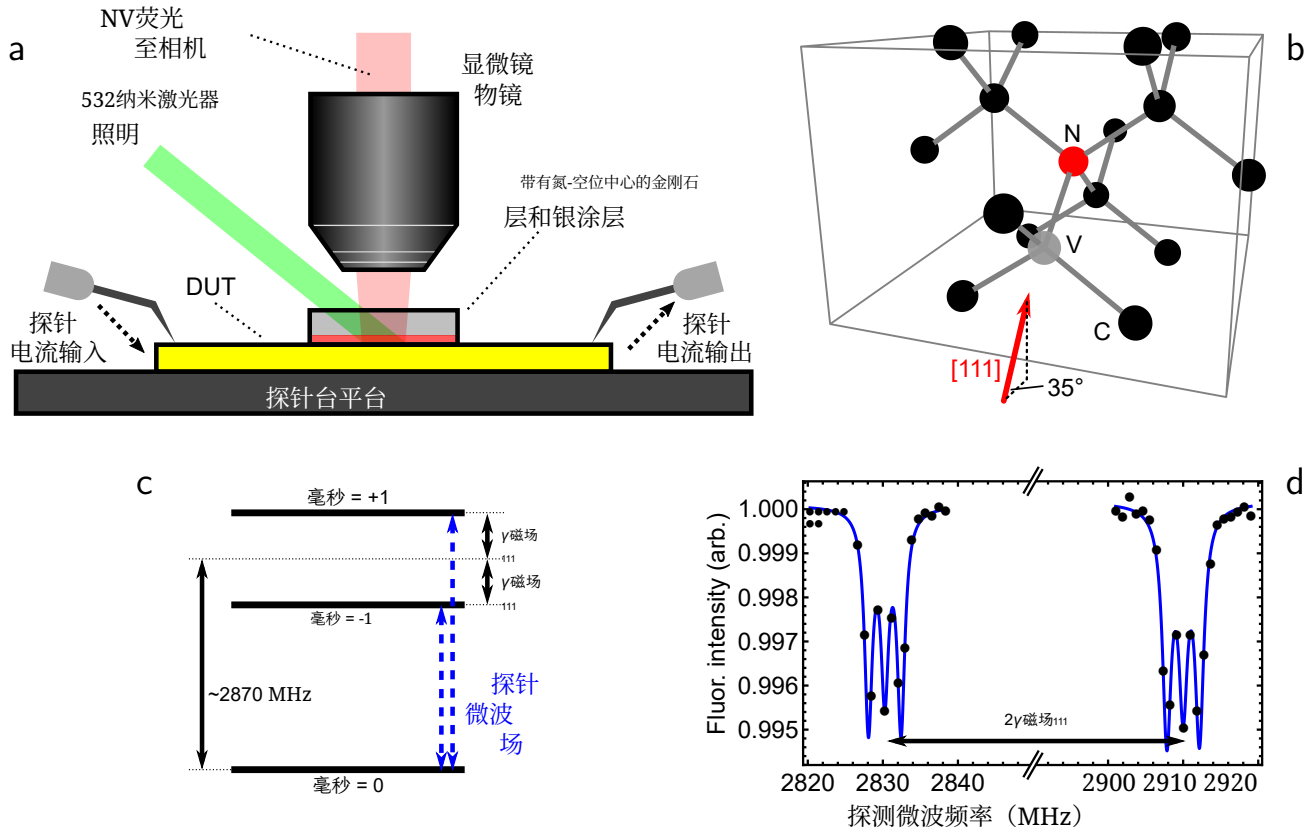
灵敏度提升后的 FOV2 TIVA图像

为确认在 FOV2 中的故障E和F是否能够通过 TIVA 成像实验切实检测到，我们改进了 TIVA 成像实验，以降低噪声底。我们采用了 $4\times$ 更小的扫描区域、 $3\times$ 更长的平均时间，以及 4×4 像素合并，从而实现了 $\sim 14\times$ 信噪比提升。图S4 展示了由此得到的 TIVA图像。尽管进行了这些改进，故障E和F在这幅 TIVA图像中仍几乎不可见。不过，这证实了故障位置与 NV 磁图像（正文中的图 4a）一致。

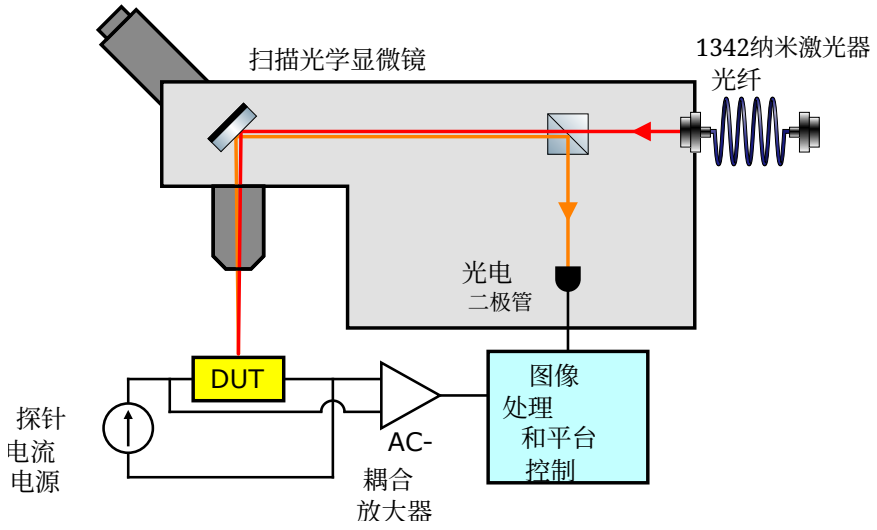
* pmkehay@sandia.gov[S1] P. Kehayias、E. Bussmann、T.-M. Lu 和 A. M. Mounce，《应用物理学杂志》127，203904（2020）。[S2] D. R. Glenn、R. R. Fu、P. Kehayias、D. Le Sage、E. A. Lima、B. P. Weiss 和 R. L. Walsworth，《地球化学、地球物理学、地球系统》18，3254（2017）。[S3] L. Basso、P. Kehayias、J. Henshaw、M. Saleh Ziabari、H. Byeon、M. P. Lilly、E. Bussmann、D. M. Campbell、S. Misra 和 A. M. Mounce，《纳米技术》34，015001（2022）。[S4] E. J. Cole、P. Tangyunyong 和 D. Barton，载于 *IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings*（1998），第129–136页。[S5] E. Cole、P. Tangyunyong、D. Benson 和 D. Barton，《微电子可靠性》39，991（1999）。[S6] M. Steiner、P. Neumann、J. Beck、F. Jelezko 和 J. Wrachtrup，《物理评论B辑》81，035205（2010）。



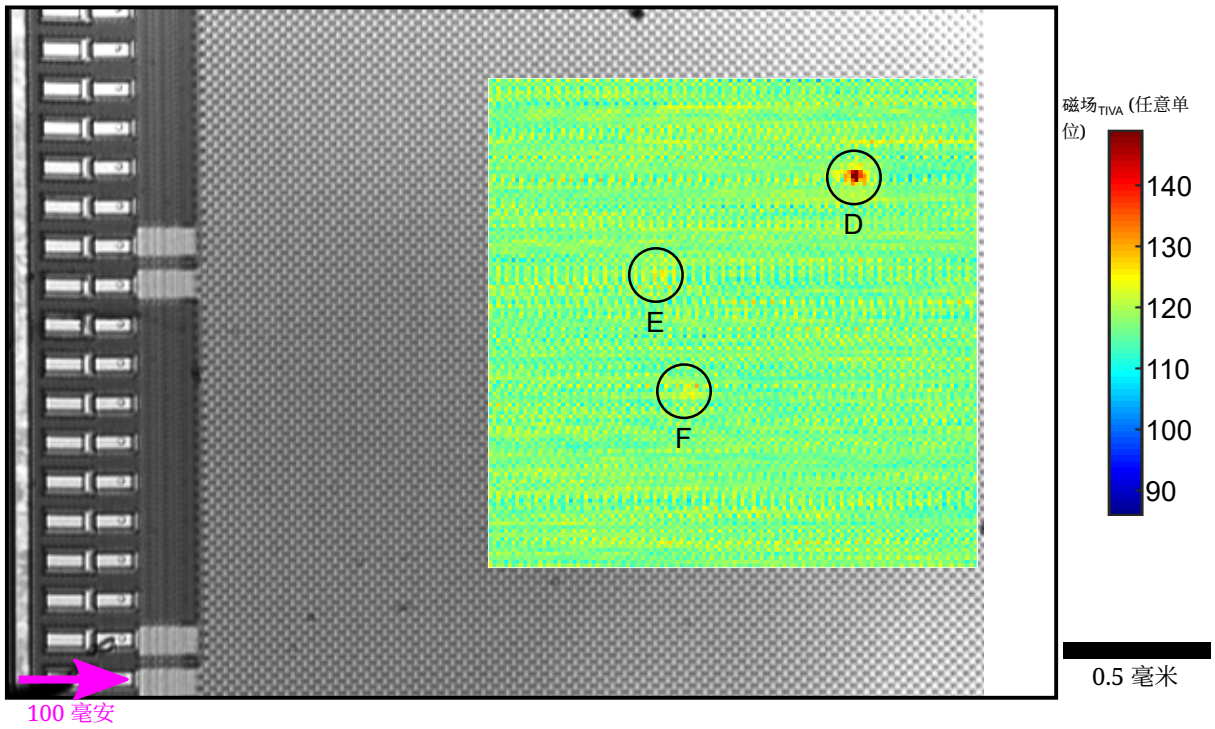
补充图 S1. 本研究使用的被测器件（DUT）图像，该器件为具有多个导电层的专用集成电路。图中以绿色突出显示了本研究考察的视场（FOV1 和 FOV2），插图展示了相关导电层（第 4 层和第 5 层）的网格布局。



补充图 S2。（a）用于测量被测器件（此处为一块 ASIC 裸片）的 QDM/探针台组合装置示意图。将带有表面 NV 层（红色条纹）的金刚石样品放置在被测器件上方，以 532 nm 激光照射，并通过显微镜对 NV荧光成像。图中未显示微波导线和偏置 B_{111} 磁场。（b）金刚石碳晶格中的 NV 中心，箭头表示其 [111] 晶体学方向。（c）NV 基态磁子能级的能级图，展示了 $\pm\gamma B_{111}$ 塞曼效应和零场分裂（~2870 MHz）。（d）单像素光探测磁共振谱示例；由于 ^{14}N 超精细相互作用 [S6]。



补充图 S3。我们的热诱导电压变化分析装置示意图。我们用 1342 nm 激光（红色光束）照射被测器件，并用光电二极管测量反射光（橙色光束）。向被测器件施加恒定电流的同时，还会记录被测器件两端的电压。扫描光学显微镜装置在被测器件表面移动，逐像素成像反射光强和 TIVA 电压。



补充图 S4. 噪声底得到改善的FOV2 TIVA图像（4× 扫描区域更小， 3× 平均时间更长， 4 × 4 像素合并）。尽管进行了这些改进，故障E和F（在NV 磁图像中清晰可见）仍几乎不可见，这表明NV磁成像能够比TIVA 成像更快地发现更弱的故障。