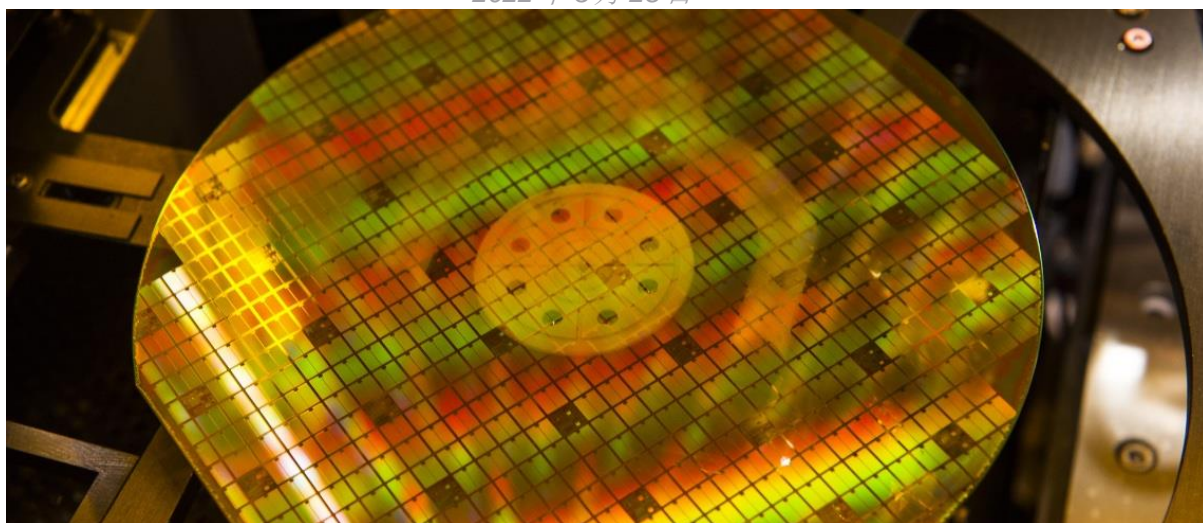


科学家如何在纳米及人类可观测范围下发现 **4H-SiC** 和缺陷之间新关系

March 28, 2022

2022年3月28日



IRPS 2021 年度最佳论文奖

如何才能赢得 IRPS (IEEE 国际可靠性实体研讨会) 2021 年度最佳论文奖？每年有成千上万的科学论文刊登在电气和电子工程领域专门出版物上。然而，是什么使其中一篇论文值得称赞呢？为什么一篇关于 MOSFET 击穿和 4H-SiC 外延缺陷之间相关性的论文 脱颖而出？今年，该论文甚至还将获得认可。随着 IRPS 2022 于 3 月 27 日开幕，其贡献得到研讨会组办方的进一步认可。为了探明究竟，意法半导体博客对该论文的主要作者 Patrick Fiorenza，以及他的一些合著者（Santi Alessandrino, Fabrizio Roccaforte 和 Alfio Russo）进行了访谈。

意法半导体是本年度 IRPS 研讨会的金牌赞助方。我们发表了三篇论文、三张海报、以及一份教程。此外，尽管我们预先录制了大多数演示内容，我们的代表也会出现在会议现场，以便更好地参与关于可靠性的当前讨论。

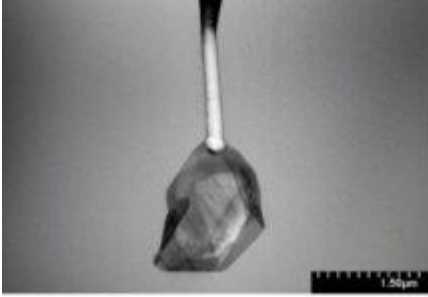
简而言之，该研究揭示了最新发现的某些缺陷与碳化硅功率器件可行性之间的关系。它是意法半导体与意大利国家研究委员会（Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto per la Microelettronica e Microsistemi 或 CNR-IMM）微电子和微系统研究所共同努力的成果。两支团队在意法半导体的意大利卡塔尼亚工厂，共同研究碳化硅和氮化镓等技术。因此，让我们探究他/她们如何写出这篇获奖论文，以及这项研究成果如何影响意法半导体目前正在开发的下一代 SiC 功率器件。

失效 4H-SiC 晶片 为什么谈论 4H-SiC?

研究论文指出了两种缺陷：短期缺陷和长期缺陷。首先，最严重情况是 $t = 0$ 类型，因为它从一开始就是失效。这篇论文的独特之处在于，它首次揭示了 $t = 0$ 4H-SiC 中晶体缺陷和故障率之间的直接关系。正如我们在关于汽车用碳化硅器件的博文中所看到的，4H-SiC 因其物理特性而深受欢迎。它具有比 6H-SiC 更出色的电子迁移率（947

cm²/Vs)，但比 3C-SiC 更容易制造，因为其原子结构是四个双原子层密排成六边形晶格。

是什么导致这一发现？



关于外延层中晶状沉淀的图片

作者解释了他/她们如何通过原子力显微技术和横截面（使用扫描电子显微镜）来观察 $t = 0$ 。他/她们发现了一种晶状沉淀物，或者通俗地说，这是一种看起来像“岩石”的结构，位于外延层的底部，高度约为 **1.90μm**。简而言之，作者们想要了解为什么这些器件“送达时已无用”，这促使他们进行了更深入的研究，从而发现了晶状沉淀物和缺陷率之间的新关系。因此，意法半导体和 CNR-IMM 的论文获得了该奖项，因为它以一种新的方式探索了 SiC 晶片。

这一发现的意义是什么？

自本论文发表以来，意法半导体明白要对我们 **4H-SiC** 器件的外延反应腔和制造工艺进行优化。因此，该研究展示了探究 **4H-SiC** 器件背后物理学原理的强烈愿望如何影响实际应用。事实上，这些研究成果可以帮助意法半导体提高产量，制造出更加经济划算且使用寿命更持久的元器件。反过来，我们可以期待 **4H-SiC** 功率 MOSFET 进入更多的市场和应用场景，从而帮助提高能源效率。因为我们的社会面临能源危机和环境挑战，**设法积极优化**产品的能耗仍然是一个非常重要的目标。

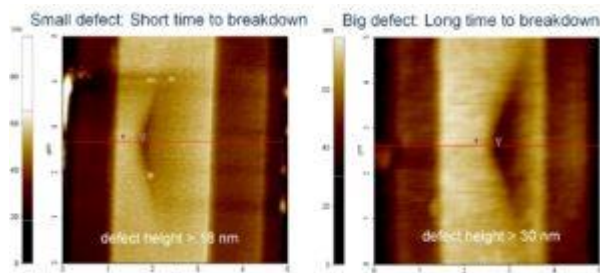
剩余 **4H-SiC** 晶片的应力测试

高温栅极偏压应力测试揭示了什么？

一旦研究人员筛选出 $t = 0$ 晶片样本，他/她们会将功能正常的样本放入封装中，并对其进行应力测试。第一个挑战是高温栅极偏压应力，它提高了栅极氧化层的电场。科技人员**反复测试**这些器件是为了监测它们在正常环境和恶劣条件下的表现。**有趣的是**，他/她们注意到一些器件在 **3 MV/cm** 时已经出现异常表现。为了找到该现象发生的原因，他/她们运用原子力显微镜检查了有问题的晶片，发现栅极氧化层尺寸为 **20 - 30 nm** 的凸起。

该发现标志着一次重大进展，帮助人们挑选那些乍看起来工作正常，其实在生产过程中几乎不可能发现的缺陷的元器件。**研究论文不仅解释了器件出现异常栅极导通现象的原因，还表明了高温栅极偏置测试的重要性。**该研究成果将有助于晶圆厂更好地监控其碳化硅元器件的品质。

高温反向偏置揭示了什么？



关于穿透差排的图片

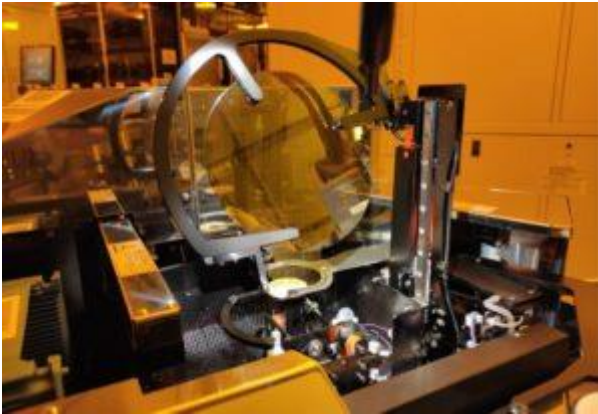
第一次应力测试后，晶片进行了另一项试验：高温反向**偏置**测试。该基准测试持续了三个月，足以模拟几十年的正常使用。简言之，它帮助作者确定所有器件在其整个生命周期中是否都能工作正常。**98%**的器件工作正常，但另外 **2%**的器件显示出异常情况，栅极电流比正常值高 **7 倍**。在实际应用中，这种**现象代表**严重故障。**挑战在于**，这种被称为“沉默杀手”的缺陷虽然一直存在，却只有在正常使用多年后才会显现出来。

作者首先使用了扫描电子显微镜来探寻问题出在何处，但没有发现任何异常。于是，他/她们改用透射电子显微镜，从而发现栅极绝缘体下的半导体中存在缺陷。**为了进一步了解这一缺陷**，作者使用了原子力显微镜，该设备帮助他/她们发现一个高度在 **18 nm - 30 nm** 之间的三角形缺陷，具体高度取决于应力测试的持续时间。此时，他/她

们明白这是从基板到外延层的穿透差排。因此，他们使用扫描式电容显微镜来显示对 MOSFET 器件的物理影响，并解释其**出错的电气原因**。

科技人员使用了如此多的研究技术，所以他/她们才能明白问题之所在。**简单地说，穿透差排影响 4H-SiC 器件的价电子带，使其带隙明显收缩**。正如我们在**博文中多次看到的**，SiC 的宽带隙是器件具有卓越电气性能的原因。因此，任何导致带隙收缩的因素都会对结构产生严重的负面影响。在这种情况下，价电子带增加了约 0.8 eV-1 eV，非常明显。相比之下，SiC 的带隙范围在 2.3 eV-3.3 eV 之间，4H-SiC 的带隙为 3.23 eV。

人员合作取得了什么成就？人员合作为什么重要？



意法半导体卡塔尼亚工厂的 4H-SiC 晶片

作者能够使用如此多的研究工具，直接得益于意法半导体和 CNR-IMM 之间的牢固和深入的合作。因此，除了科学成就，IRPS 2021 年度最佳论文奖也是对这一**人们重大发现**的回报。意法半导体和 CNR-IMM 进行了多年互动，均拥有为行业发展做出重大贡献的愿望，双方共享的不仅仅是办公空间。**因此，我们希望通过本文分享的经验是与研究机构、实验室等合作的重要性**。与附近的大学增强合作。联系研究人员，看看能开展哪些合作。合作可能带来新发现，揭开未解之谜。