

图 1.33 数批二极管的损坏率 (在高 di/dt 条件下)

图 1.33 所示的损坏率可以通过优化而降低。但它是否可以完全避免，仍是一个未知数。

因此，在快速开关的续流二极管领域内，SEMIKRON 不再继续跟踪发射极方案。

1.3.4.2 轴向寿命控制方案

通过在硅片上植入质子或 He^{++} 离子的方法可以使再结合中心产生类似于图 1.34a 和图 1.34b 的走势。还在几年以前，这一技术的实施需要约为 10MeV 的加速器，所以它只是被用于研究的目的。但现在情况有了很大的变化，基础原理研究者的兴趣已经更多地投入到了 GeV 范围，而中等的质子加速器已开始对许多应用场合开放。

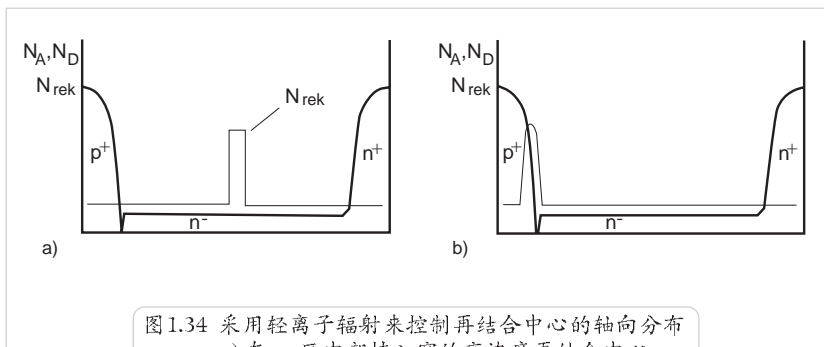


图 1.34 采用轻离子辐射来控制再结合中心的轴向分布
a) 在 n^- 区中部植入窄的高浓度再结合中心
b) 在 pn 结处植入

最初的假设是，一个如图 1.34a 所示的、位于 n^- 区中部的高浓度再结合中心区会提供最佳的性能。这一点已被证实是错误的。将高浓度的再结合中心安排在 pn 结旁，如图 1.34b 所示，则是更为有效的方法 [292]、[293]。

在 [147] 中进一步解释了这一点。将再结合中心靠近 pn 结的作法可以有效地改善反向电流峰值和通态压降的关系。

如果将再结合中心的尖峰直接安排在 pn 结处，则在导通状态下载流子的分布会被颠倒。根据图 1.35 所示的再结合中心的分布可以计算出如图 1.31 所示的载流子分布。

在 CAL 二极管中，如图 1.35 所示，采用 He^{++} 掺杂工艺而形成的再结合中心的尖峰位于靠近 pn 结的 p 区。这使得截止电流较小。 He^{++} 的掺杂过程可以与基本电荷载流子的寿命调节相结合，它可以通过电子束辐射来实现。

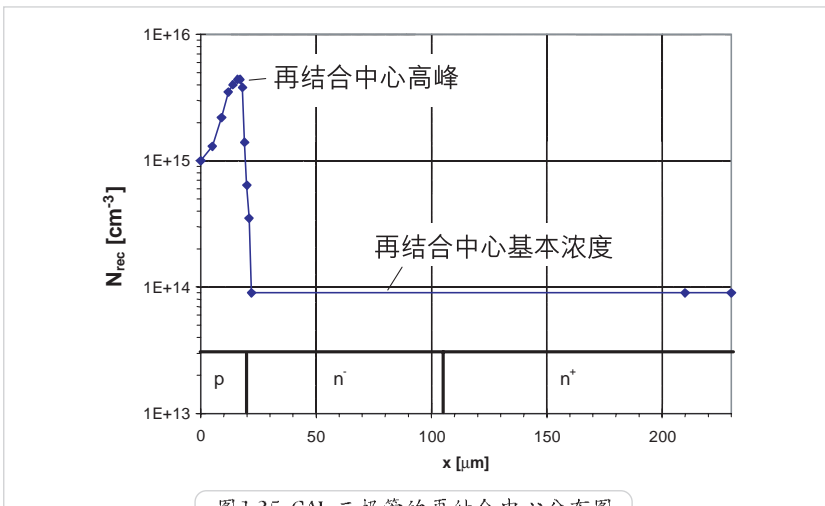


图 1.35 CAL 二极管的再结合中心分布图

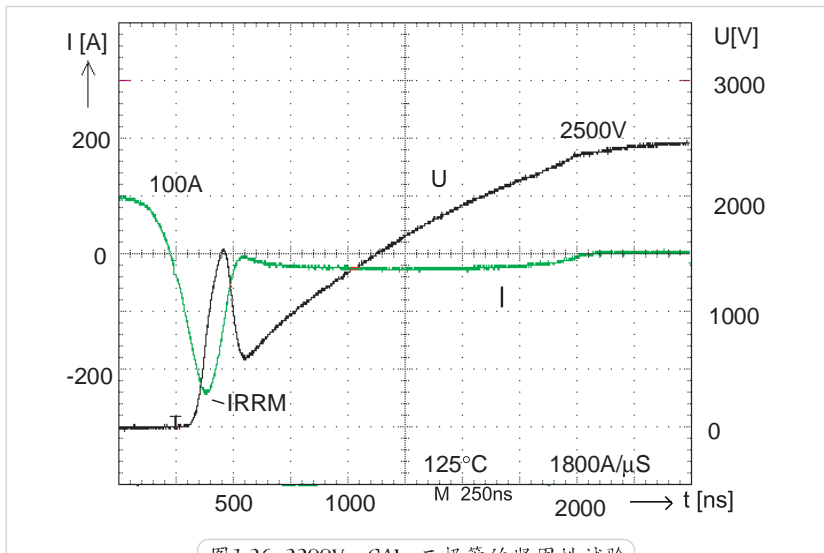
在图 1.24 中，我们已经探讨过 CAL 二极管与 IGBT 共同作用时的特性。通过调节再结合中心的峰值高度（可通过 He^{++} 的注入浓度来调节）可使得反向电流的峰值减小。CAL 二极管的大部分储存电荷出现于拖尾电流中，而拖尾电流本身可以通过控制再结合中心的本征密度来调节。缩短载流子的本征寿命可以使拖尾时间变短，但却增加了二极管的通态压降。通过控制载流子的本征寿命与 He^{++} 的注入浓度这两个参数，可以大幅度地调节恢复特性。因此，人们可以实现一种在所有条件下，特别是在小电流时，具备软恢复特性的二极管。

采用上述方法制造出的 CAL 二极管被证实具备很高的动态坚固性。在实验室条件下，设计耐压为 1200V 和 1700V 的 CAL 二极管承受住了高达 $15\text{kA}/\text{cm}^2\mu\text{s}$ 的 dI/dt 而未导致损坏。

特别是在如图 1.33 所示的应用条件下, CAL 二极管不会被损坏。这一事实被迄今为止所生产的超过 2600 万个的 CAL 二极管所证实。

图 1.36 显示了一个 3.3kV 的 CAL 二极管的坚固性试验。在图 1.35 所示的测量中, 一个附加的、约 $0.5\mu\text{H}$ 的寄生电感使二极管所受的考验更为严峻。这个电感在换流结束后直接感应了一个高达 1500V 的电压尖峰。

和其它二极管不同的是, CAL 二极管即使在上述的电压范围内仍可以运行在高 dI/dt 条件下 (这里为 $2000\text{A}/\text{cm}^2\mu\text{s}$)。



在 CAL 二极管中, 基极的宽度 w_B 可以设计地相对较小, 接近在公式 1.10 和 1.11 所给定的 PT 方案的设计值。因此, 这导致了相对较低的通态压降或在开关特性和导通特性之间较好的折衷。 w_B 还对二极管的导通特性有着重要的影响。正向恢复电压 V_{FR} 随 w_B 增加而增加。对于 1700V 或以上的元件来说, 在 IGBT 关断时的 dI/dt 可以在续流二极管中产生数百伏的 V_{FR} 。与传统的二极管相比较, 1700V 的 CAL 二极管的 V_{FR} 可以降低 50% 以上 [106]。

最新的发展显示, 用于 IGCT 的续流二极管以及缓冲二极管也采用了 CAL 方案, 原因是:

1. 动态坚固性是最重要的要求之一;
2. 这一接近于 PT 设计的方案还改善了抗辐射的稳定性;
3. 该方案可以较好地实现通态压降和开关特性之间的折衷;
4. 在缓冲二极管中正向恢复电压可达最低;
5. 与传统的金扩散方法相比较, 它可以实现较低的截止漏电流。