



宇航级GaN功率电子器件 的应用挑战

高能粒子的辐射损伤

杨涵

2021.12.23

目录

- 1/ 背景介绍
- 2/ 高能粒子辐射损伤机理
- 3/ 抗辐射损伤的加固设计
- 4/ 总结



目录

1/ 背景介绍

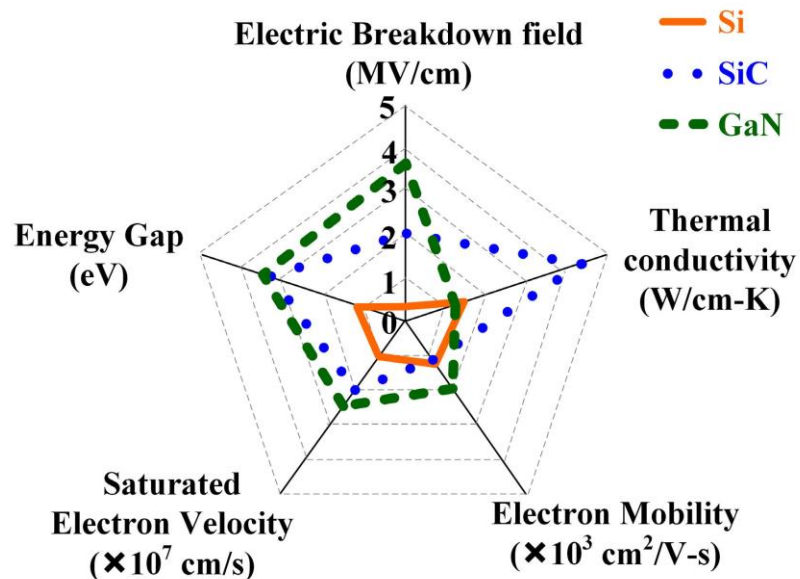
2/ 高能粒子辐射损伤机理

3/ 抗辐射损伤的加固设计

4/ 总结



氮化物宽禁带半导体在宇航应用中具有着巨大的优势和潜力



各个国家关于宇航级氮化物半导体器件的研究

NASA: Electronic Parts and Packaging (NEPP) Program

ESA: Critical Space Technologies for European Strategic Non-Dependence

中国：国家重点研发计划（2023）

第一代产品需求：电推进系统、DC/DC转换电源，300V电压，1MHz频率，15年高可靠性，抗辐射能力

第二代产品需求：次级转换电源、辅助电源，<100V电压，>1MHz频率，15年高可靠性，抗辐射能力



目录

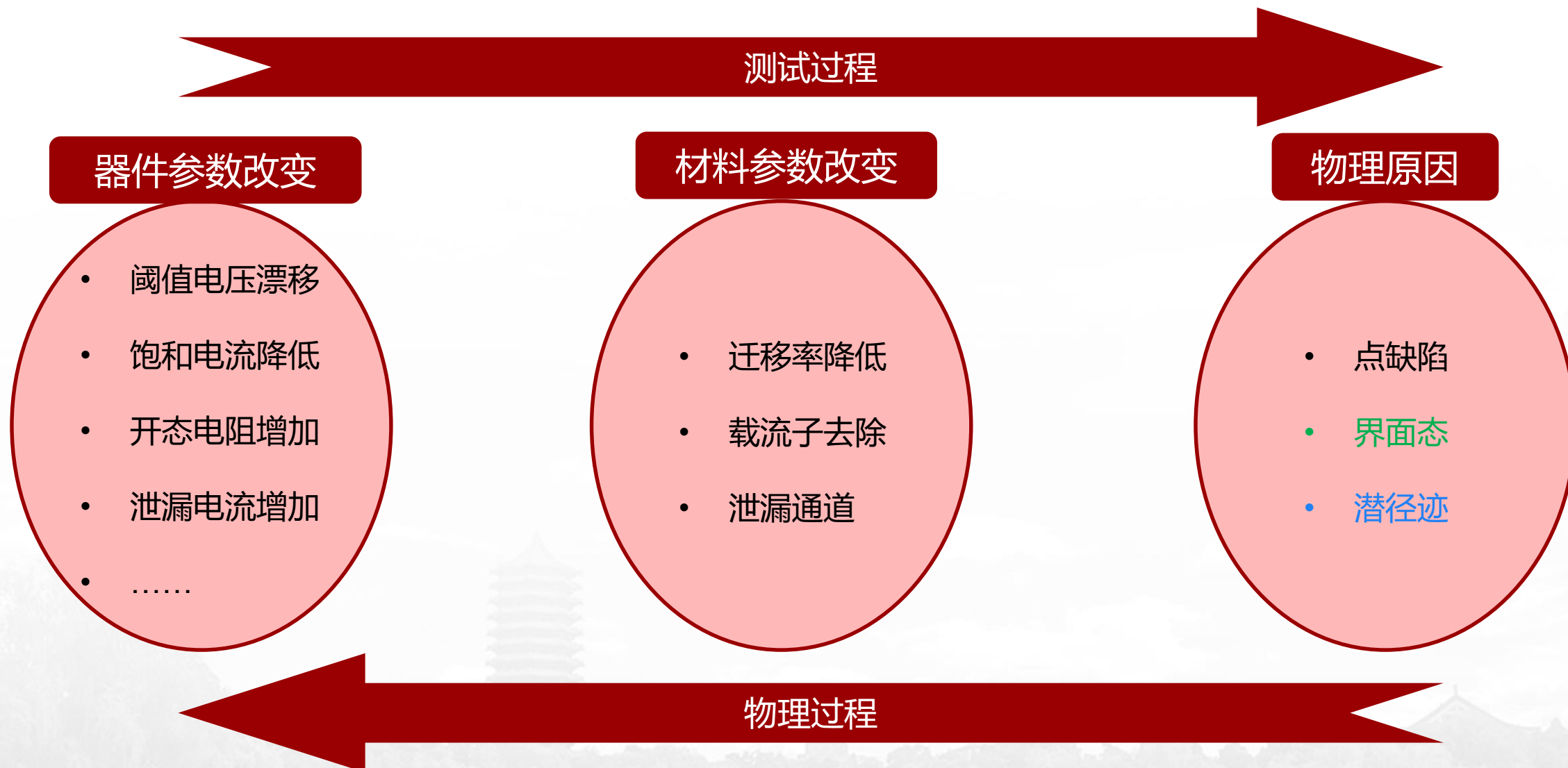
1/ 背景介绍

2/ 高能粒子辐射损伤机理

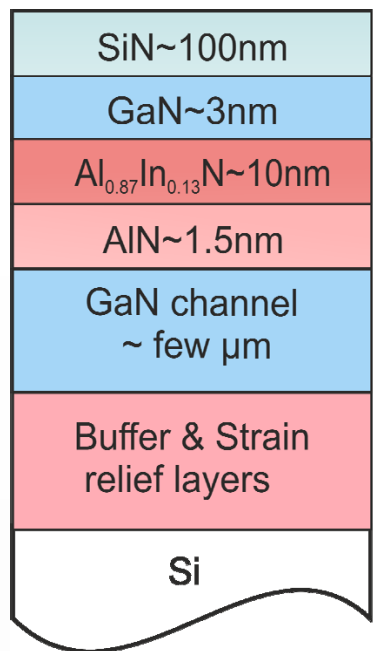
3/ 抗辐射损伤的加固设计

4/ 总结

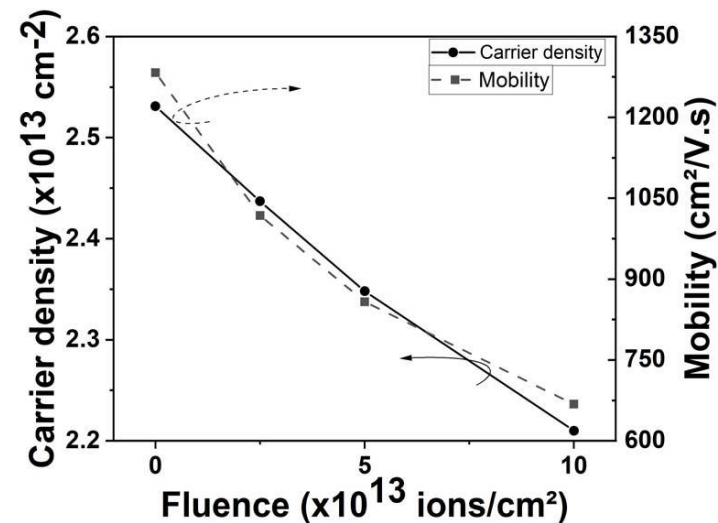
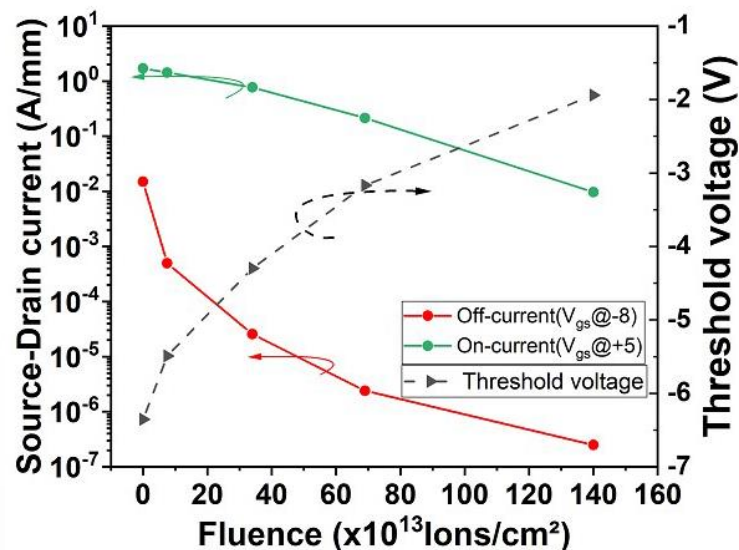




点缺陷和界面态的产生及其影响



75 MeV S 离子辐照

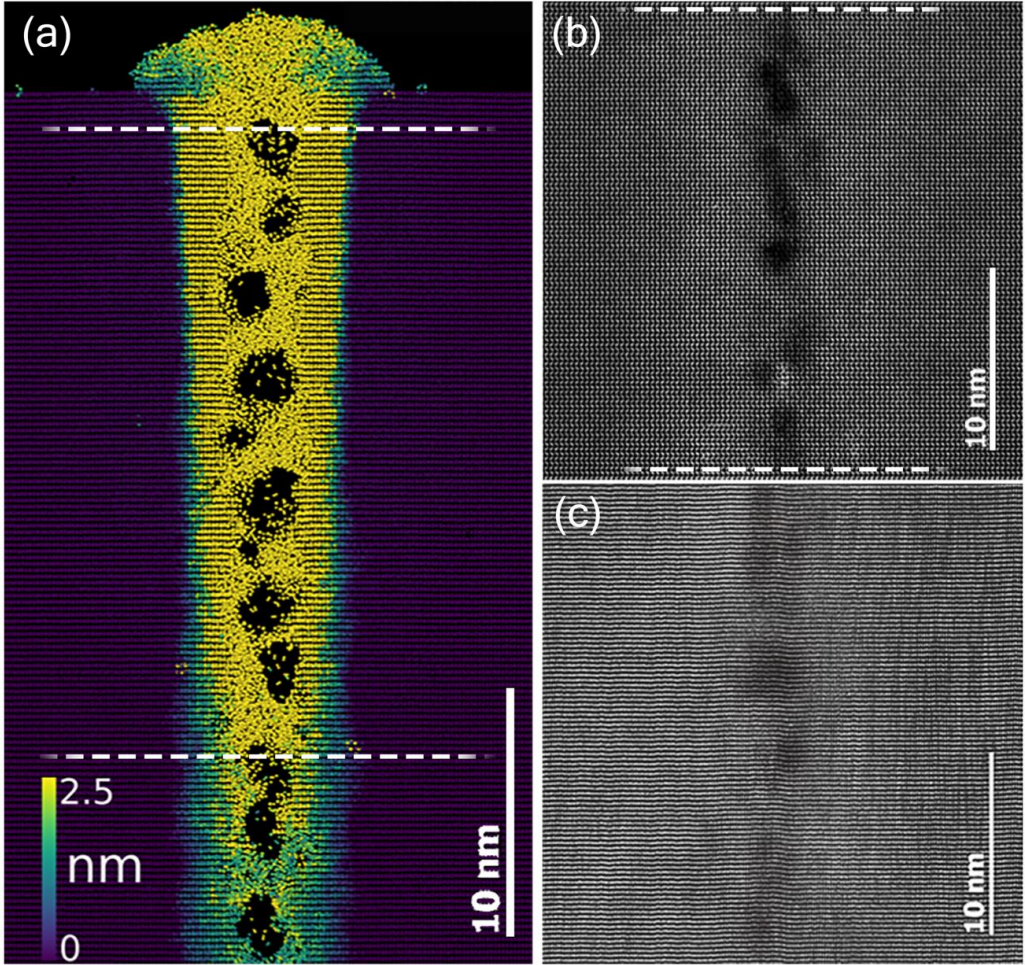


- 辐照过后，开、关态电流均有降低；阈值电压正偏；迁移率和载流子密度均降低。
- 沟道层中产生的 V_{Ga} 是类受主缺陷，与背景载流子补偿，使关态电流降低。
- V_{Ga} 拉低了费米能级，若达到临界密度之上，费米能级将被钉扎在缺陷能级附近，在2DEG和费米能级之间的类受主态缺陷由于能带弯曲而电离，形成俘获中心，导致阈值电压正偏、迁移率和载流子密度降低。
- 异质结中间、钝化层与GaN之间的界面态产生的效果类似。哪一部分的贡献更大，仍有争议。

潜径迹的产生过程

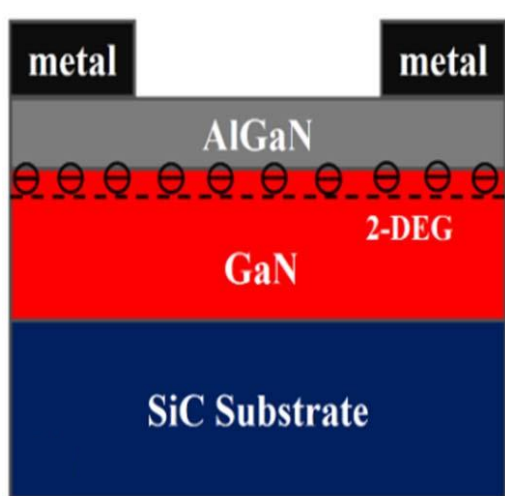
- 快重离子（SHI）与材料中的电子发生非弹性碰撞，将能量传递给电子；
- 电子通过电-声耦合作用，将能量传递给晶格；
- 晶格迅速升温，达到熔点，熔化后再结晶，形成无定形的非晶化区域。
- 潜径迹是永久性的结构损伤

GaN的能损阈值 (keV/nm)	参考文献
30-34	S. O. Kucheyev, H. Timmers, et al (2004)
15	M. Sall, I. Monnet, et al (2015)
22.8-28.3	S. Mansouri, P. Marie, et al (2008) M. Karlusic, R. Kozubek, et al (2015)
~ 23	P. P. Hu, J. Liu, et al (2018)



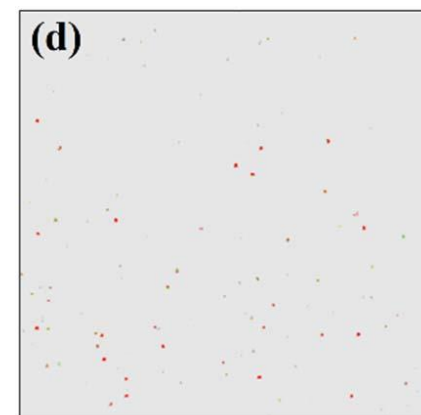
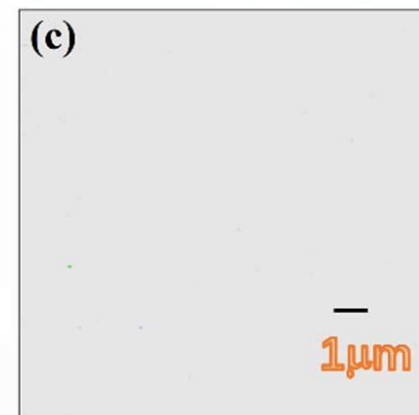
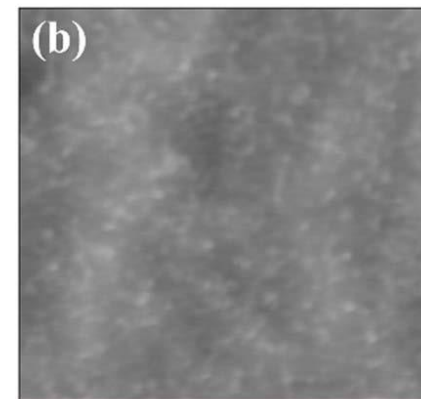
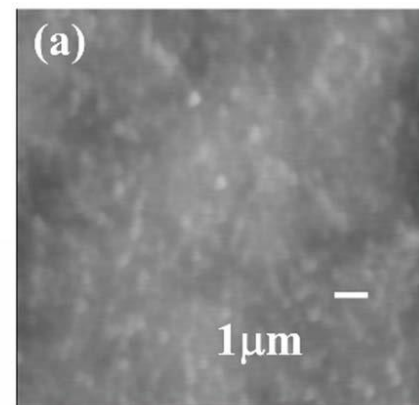
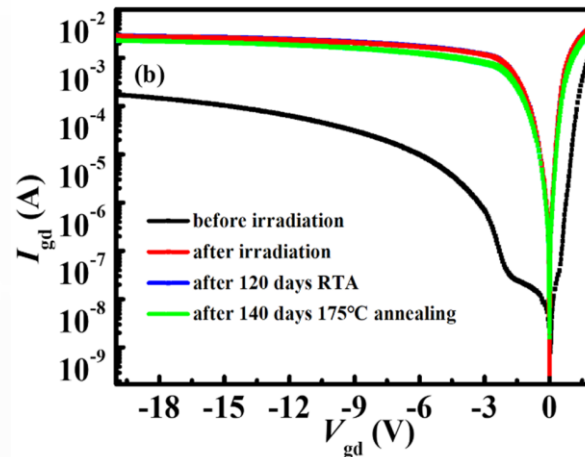
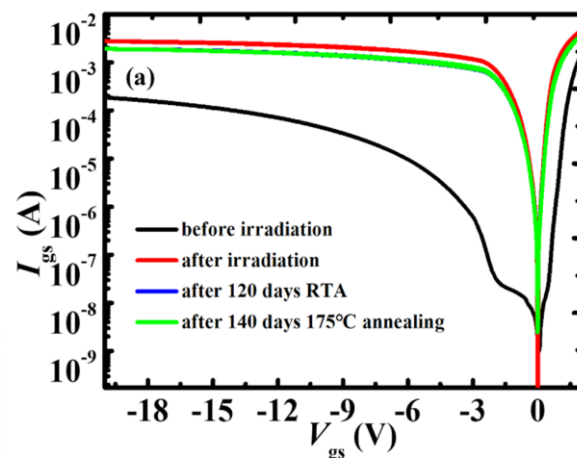
185 MeV Au离子辐照

潜径迹对栅极泄漏电流的影响



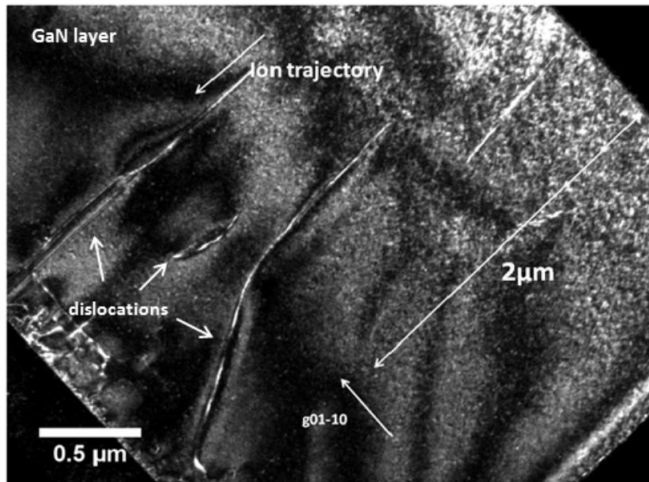
800 MeV Bi 离子辐照

栅极泄漏电流剧烈增长，即使长时间退火也难以消除



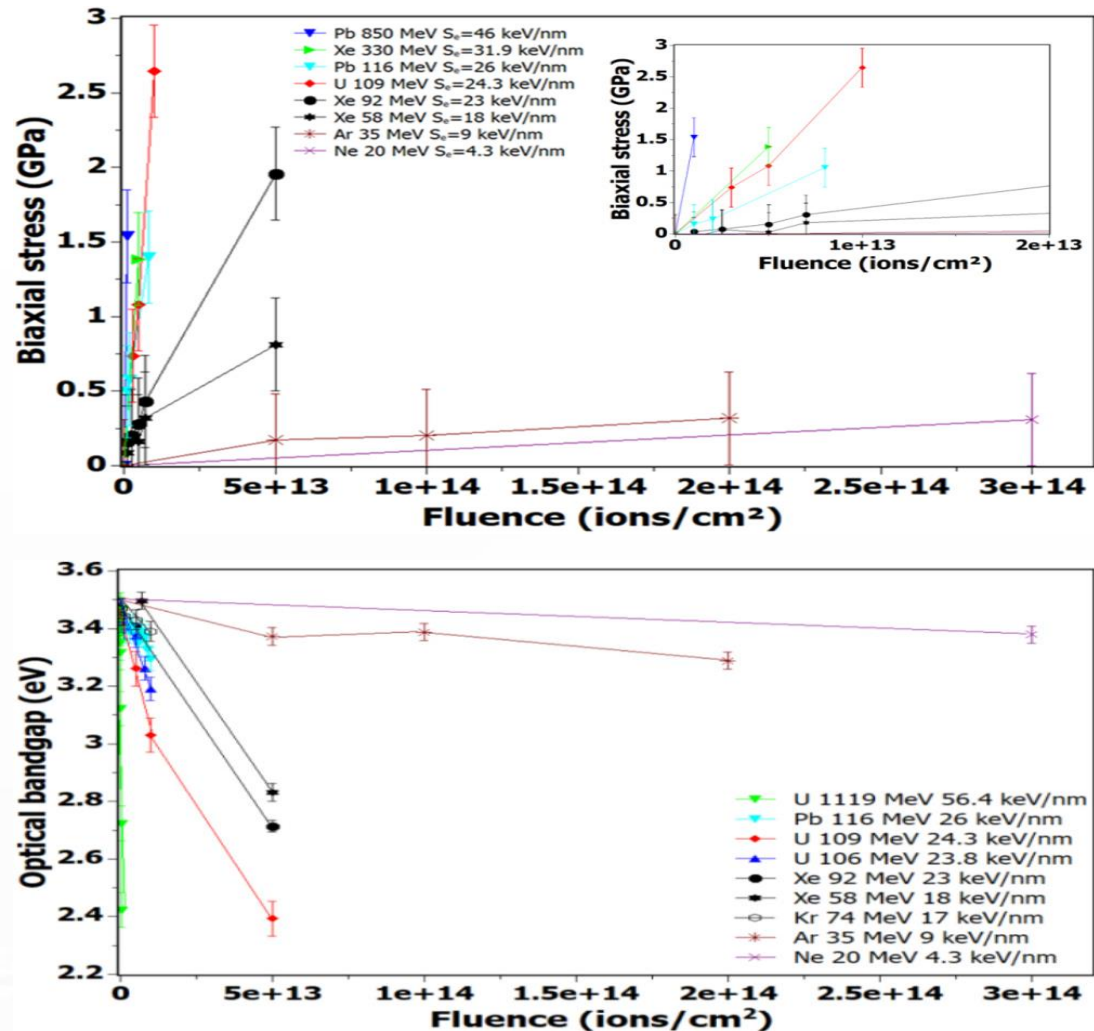
- 电流热点的总通量与入射粒子的总剂量相同，总电流与栅极漏电流几乎一致。
- 栅极泄漏电流几乎由重离子产生的潜径迹导致，潜径迹可作为新的泄漏通道。

潜径迹对材料应力的影响



3.5 μm n-GaN, $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

低于能损阈值的重离子不产生潜径迹，阈值附近的重离子产生不连续的潜径迹，高出阈值很多的粒子产生连续的潜径迹

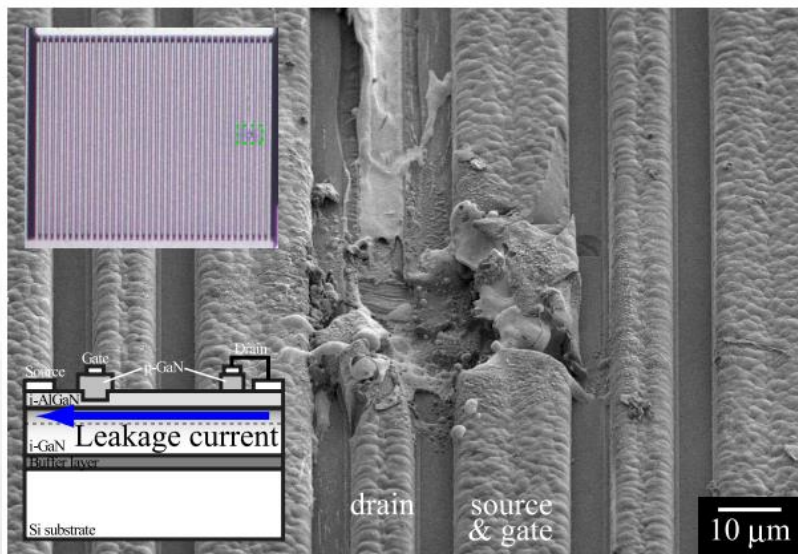


- 辐照引入了GPa量级的压应力，并导致带隙宽度减小。

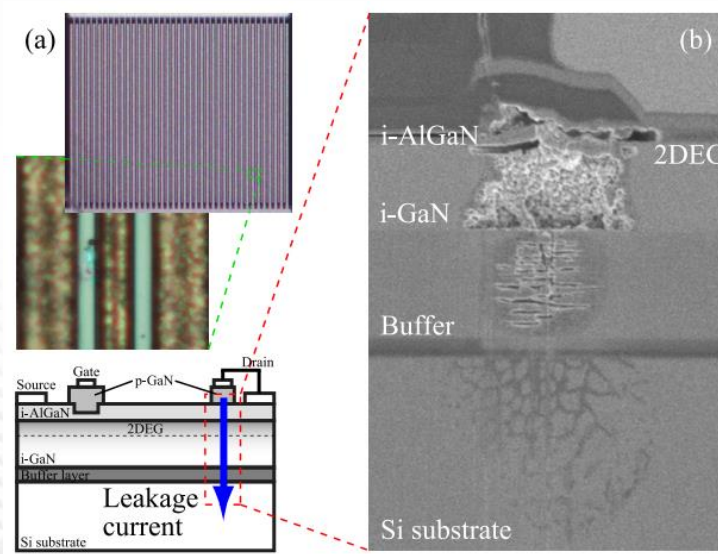
辐射诱发GaN功率器件的失效——单粒子效应

- 重离子碰撞电离出的电子-空穴对，在电场作用下分离，形成瞬态电流。在强电场区域，此瞬态电流将引发**雪崩放大**，造成电极之间的短路，严重时会引起烧毁（burnout）。
- 经过理论计算，**即使只有一个重离子或高能质子入射**，电离产生的电子-空穴对也足以形成强电流脉冲，因此这种现象被称为“**单粒子效应**”。在功率器件中，根据其造成烧毁的后果，也具体称之为“**单粒子烧毁效应**”。在其他器件或电路中，电流脉冲会产生不同的影响。

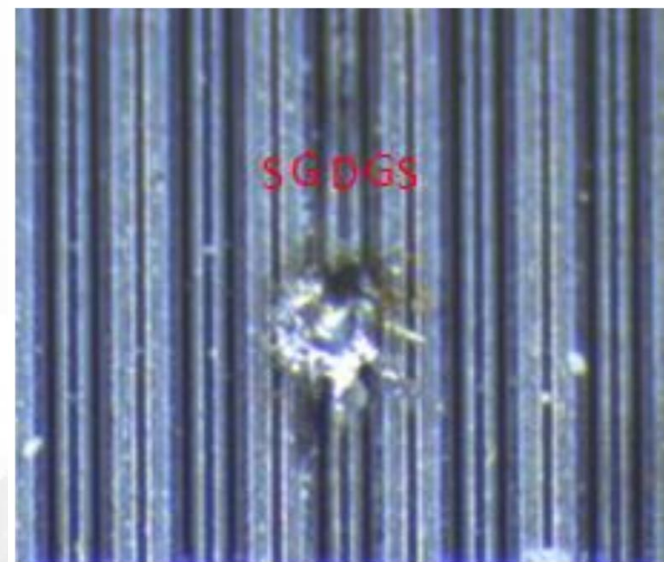
源-漏短路烧毁



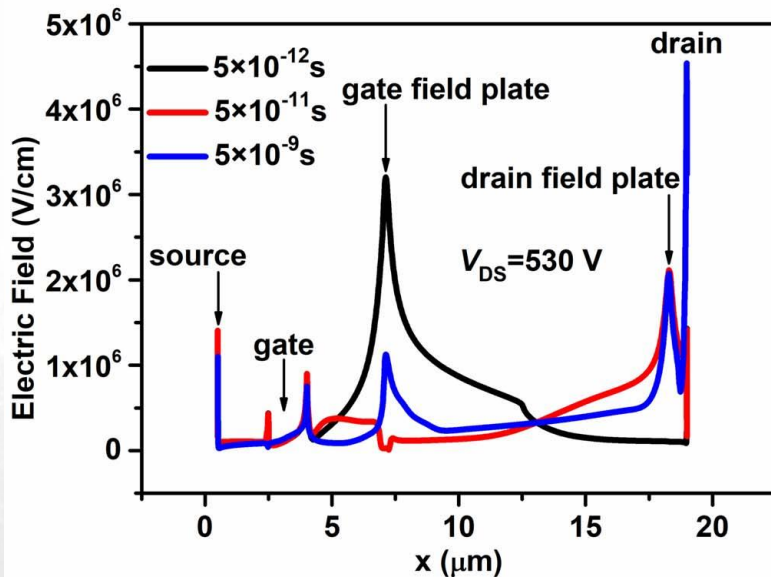
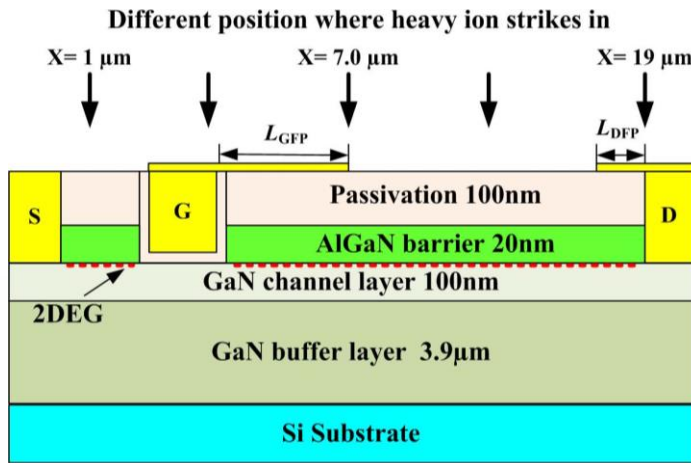
漏-衬底短路烧毁



栅-漏短路烧毁

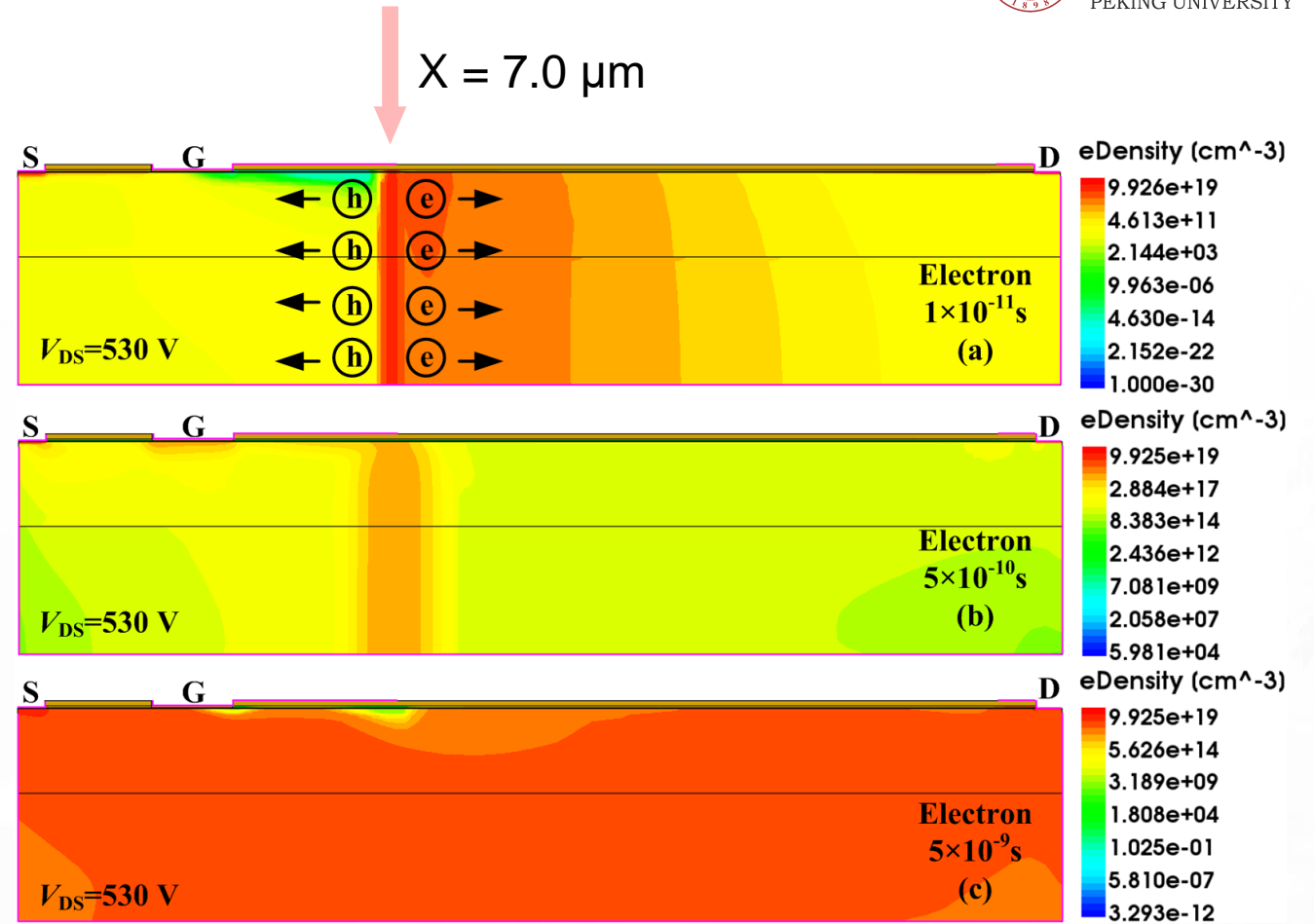


单粒子效应的敏感区域——模拟结果

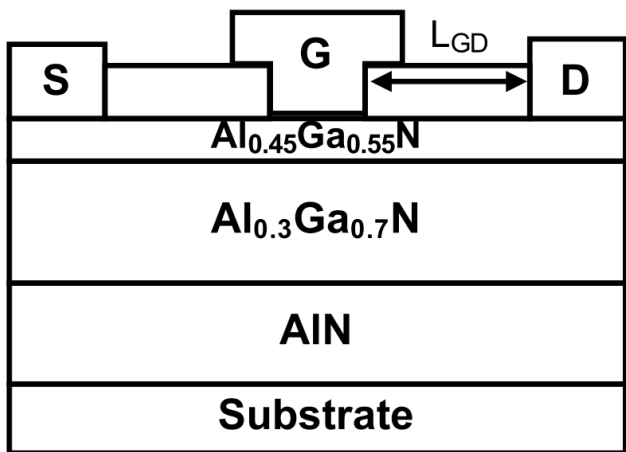


电子分布

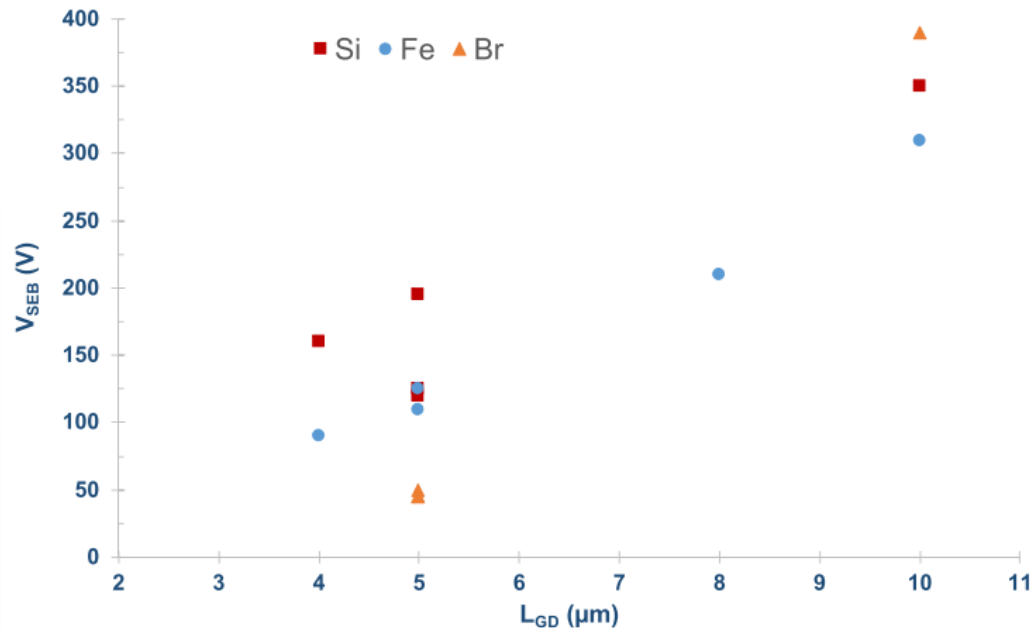
电场分布



- 辐照前，栅极和漏极之间的场板位置具有最高的电场。重离子撞击后，电子在电场作用下向漏极运动，约5 ns后，漏极电场达到峰值。



不同栅漏间距的样品



- 随着栅漏间距的增加，产生单粒子烧毁的阈值电压越来越高，即单粒子烧毁效应的产生越来越困难。当然，器件设计要求栅漏间距不能过大，否则会引入较大电阻。
- 实验上探测不到重离子轰击的具体位置，因此仍缺乏直接证据。
- 对于其他短路模式的烧毁，缺少合理的解释，目前猜测潜径迹引入的新漏电通道可能是影响单粒子烧毁敏感区域的原因之一。

目录

1/ 背景介绍

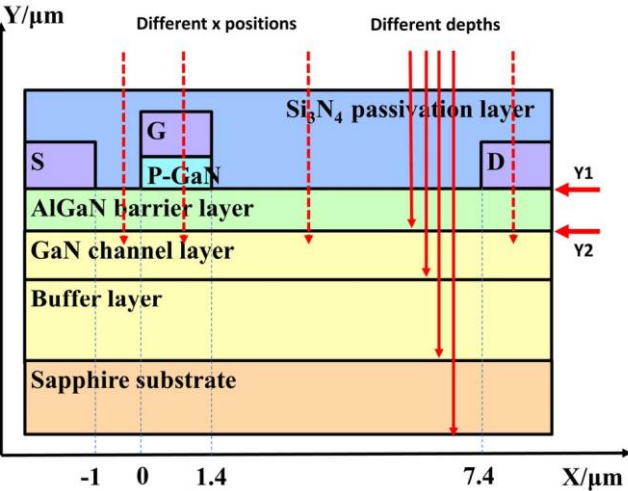
2/ 高能粒子辐射损伤机理

3/ 抗辐射损伤的加固设计

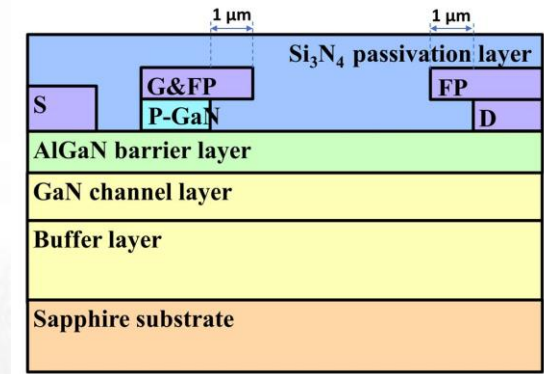
4/ 总结



p-GaN结构加固设计：双场板结构



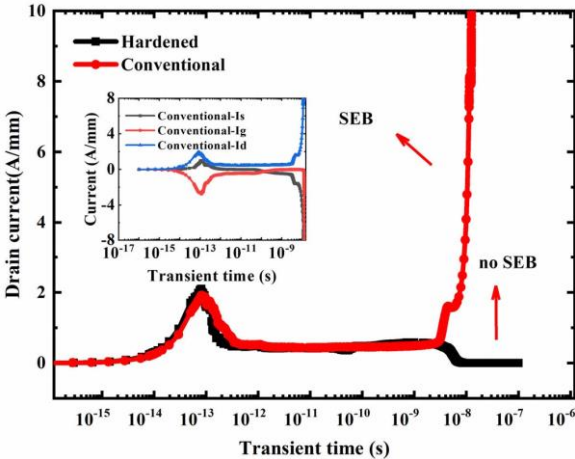
单场板结构
(常规)



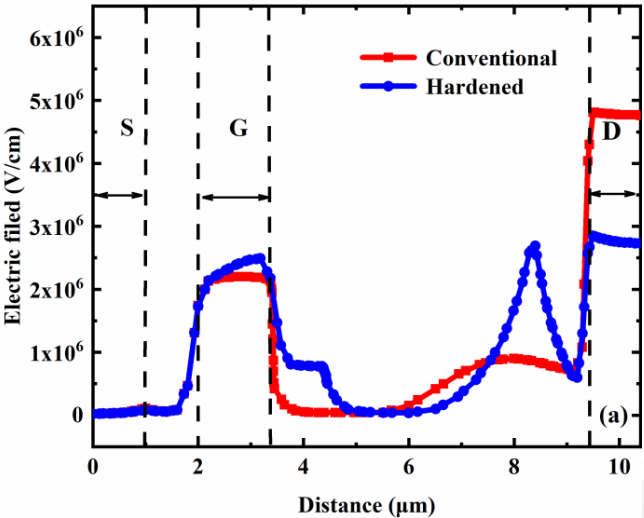
双场板结构
(加固)

离子撞击后的瞬态电流

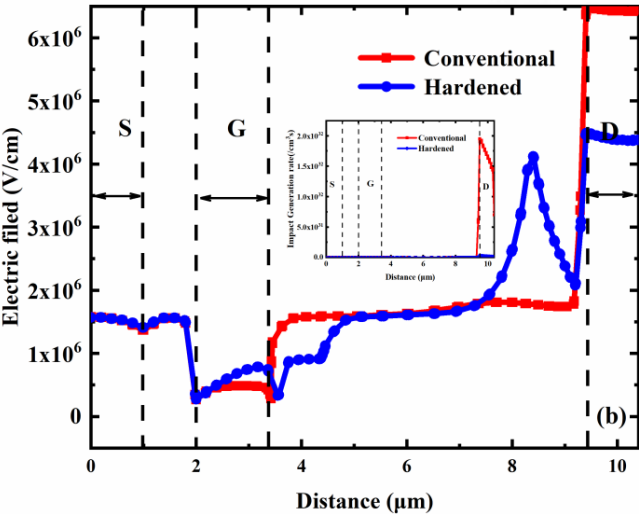
$V_{ds}(\text{单场板}) = 160 \text{ V}$
 \downarrow
 $V_{ds}(\text{双场板}) = 249 \text{ V}$



AlGaIn表面电场分布

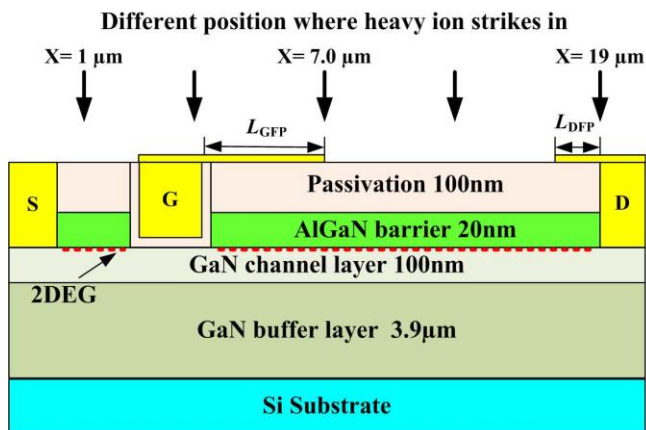


GaN沟道电场分布

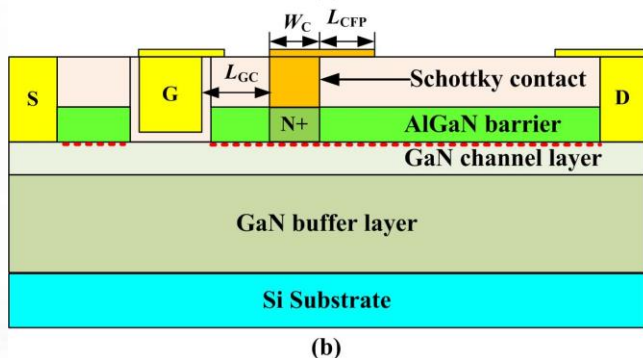


- 双场板结构通过调节电场和减少电子-空穴对产生，一定程度上抑制了单粒子烧毁的发生。

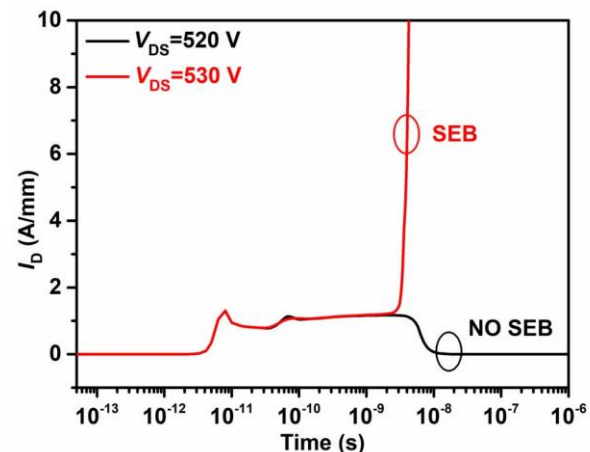
MIS结构加固设计：肖特基接触



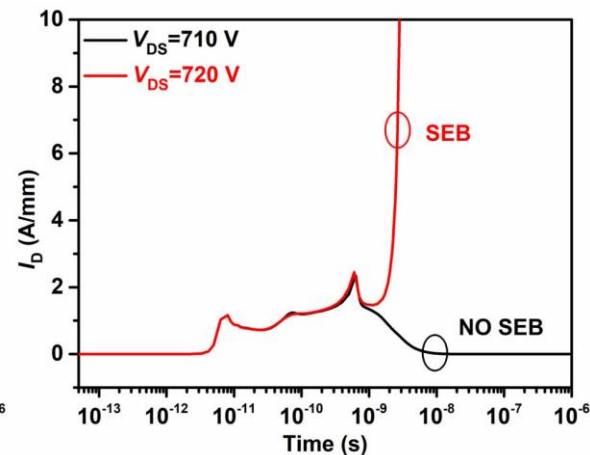
场板结构
(常规)



场板+肖特基接触结构
(加固)



常规结构烧毁阈值



加固结构烧毁阈值

$$V_{ds}(\text{场板}) = 520 \text{ V} \rightarrow V_{ds}(\text{肖特基}) = 710 \text{ V}$$

- 肖特基接触的引入改变了重离子轰击时电子-空穴的分布，从而抑制了单粒子烧毁的发生。

- 美国宜普电源转换公司旗下的EPC Space推出了数款抗辐射eGaN产品，但经测试，烧毁阈值均不超过200 V。

型号	V _{DS} /V	I _D /A	R _{DS(on)} /mΩ	SEE@85LET/V	型号	V _{DS} /V	I _D /A	R _{DS(on)} /mΩ	SEE@85LET/V
FBG10N30	100	30	9	100	IRHNAG7160	100	35	18	100
FBG10N05	200	5	38	100	IRHNAG7230	200	16	130	175
FBG20N18	200	18	26	175	IRHNAG67260	200	56	28	170
FBG10N05	200	5	38	100	IRHNAG7230	200	16	130	170

- 2018年2月，日本瑞萨电子公司（Renesas Electronics Corp）宣布推出抗辐射加固型100V/200V GaN FET低侧驱动器：ISL7023SEH 100V、60A GaN FET和ISL70024SEH 200V、7.5A GaN FET，用于运载火箭、卫星等领域的初级和次级DC/DC转换器。
- 法国泰雷兹·阿莱尼亚空间公司与比利时芯片研究机构IMEC合作，着手研发p-GaN功率转换器件。
- 我国目前仍缺少成熟的抗辐射GaN功率器件制造技术。

目录

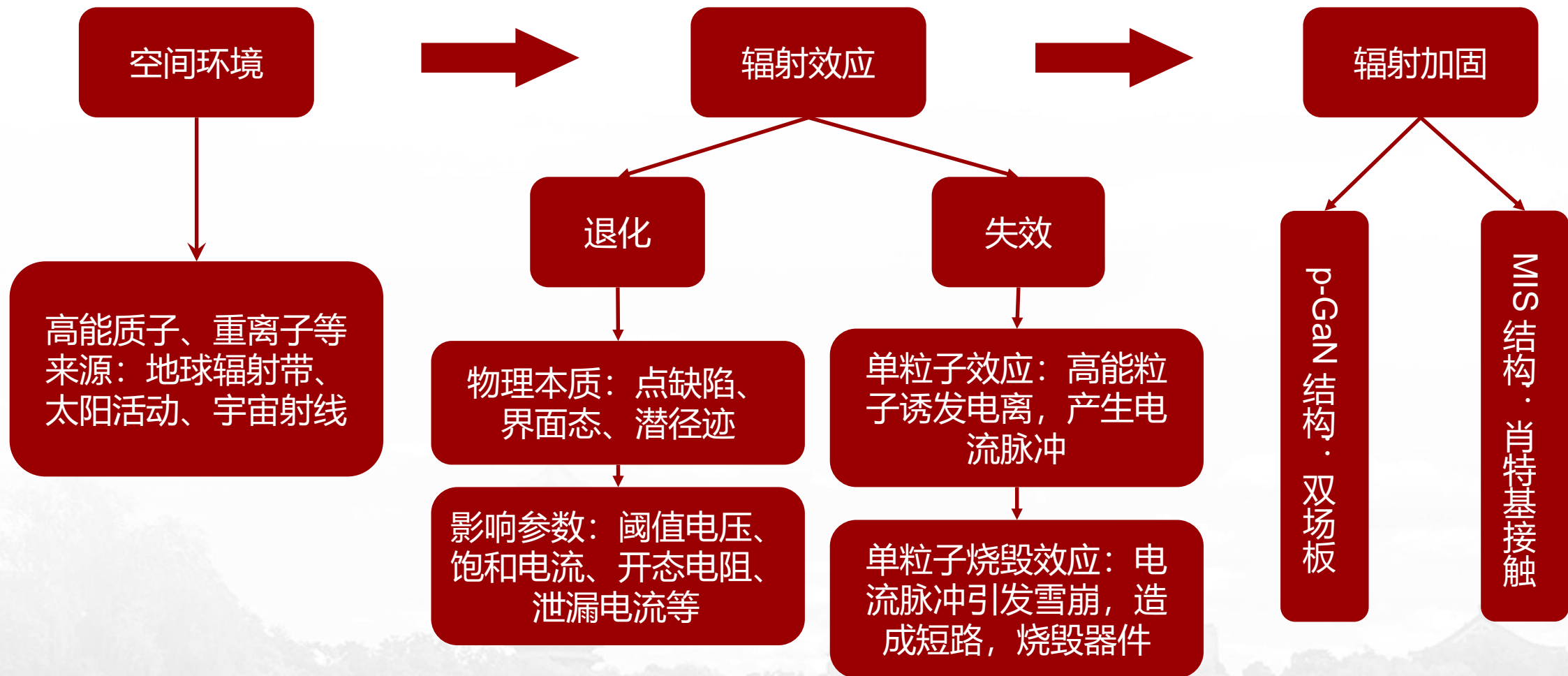
1/ 背景介绍

2/ 高能粒子辐射损伤机理

3/ 抗辐射损伤的加固设计

4/ 总结





Thanks!

