

1. 保护环终端器件

保护环终端采用场限环（Field Ring）加沟道截断环（Channel Stop Ring）的横向变掺杂结构，典型应用于体硅高压二极管或横向扩散金属氧化物半导体（LDMOS）器件。其版图为同心环状布局，包含六层关键掩膜。

代码和图如下：

```
import gdsfactory as gf

from gdsfactory.component import Component

import numpy as np

gf.gpdk.PDK.activate()

# 图层定义（与工艺步骤对应）

LAYER = {

    "ACTIVE": (1, 0), # 有源区

    "PPLUS": (2, 0), # P+注入（阳极+场限环）

    "NPLUS": (3, 0), # N+注入（截断环）

    "CONTACT": (4, 0), # 接触孔

    "METAL": (5, 0), # 金属

    "PAD": (6, 0), # 钝化开口

}

def guard_ring_process_flow(

    main_radius: float = 50,

    ring_width: float = 5,
```

```
ring_spacing: float = 10,  
n_rings: int = 3,  
nplus_distance: float = 80,  
nplus_width: float = 8,
```

```
) -> Component:
```

```
"""保护环终端完整版图（包含所有掩膜层）"""
```

```
c = Component("guard_ring_PROCESS")
```

```
# 1. 有源区（N型衬底上开口区域）
```

```
active_size = 2 * (nplus_distance + nplus_width + 20)
```

```
c << gf.components.rectangle(  
    size=(active_size, active_size),  
    layer=LAYER["ACTIVE"],  
    centered=True,  
)
```

```
# 2. P+注入层：中心阳极圆 + 多个保护环
```

```
c << gf.components.circle(radius=main_radius, layer=LAYER["PPLUS"])
```

```
for i in range(n_rings):
```

```
    r = main_radius + ring_spacing * (i + 1) + ring_width/2
```

```
    c << gf.components.ring(  
        radius=r, width=ring_width,  
        angle_resolution=2.5, layer=LAYER["PPLUS"],  
    )
```

```
# 3. N+注入层：最外侧截断环
```

```
c << gf.components.ring(  
    radius=nplus_distance, width=nplus_width,  
    angle_resolution=2.5, layer=LAYER["NPLUS"],  
)
```

```
# 4. 接触孔（阳极区开孔）
```

```
c << gf.components.ring(  
    radius=main_radius * 0.7, width=2,  
    layer=LAYER["CONTACT"],  
)
```

```
# 5. 金属层（阳极电极及场板）
```

```
c << gf.components.circle(  
    radius=main_radius + 10, layer=LAYER["METAL"]  
)
```

```
# 6. 钝化开口
```

```
c << gf.components.circle(  
    radius=main_radius + 15, layer=LAYER["PAD"]  
)
```

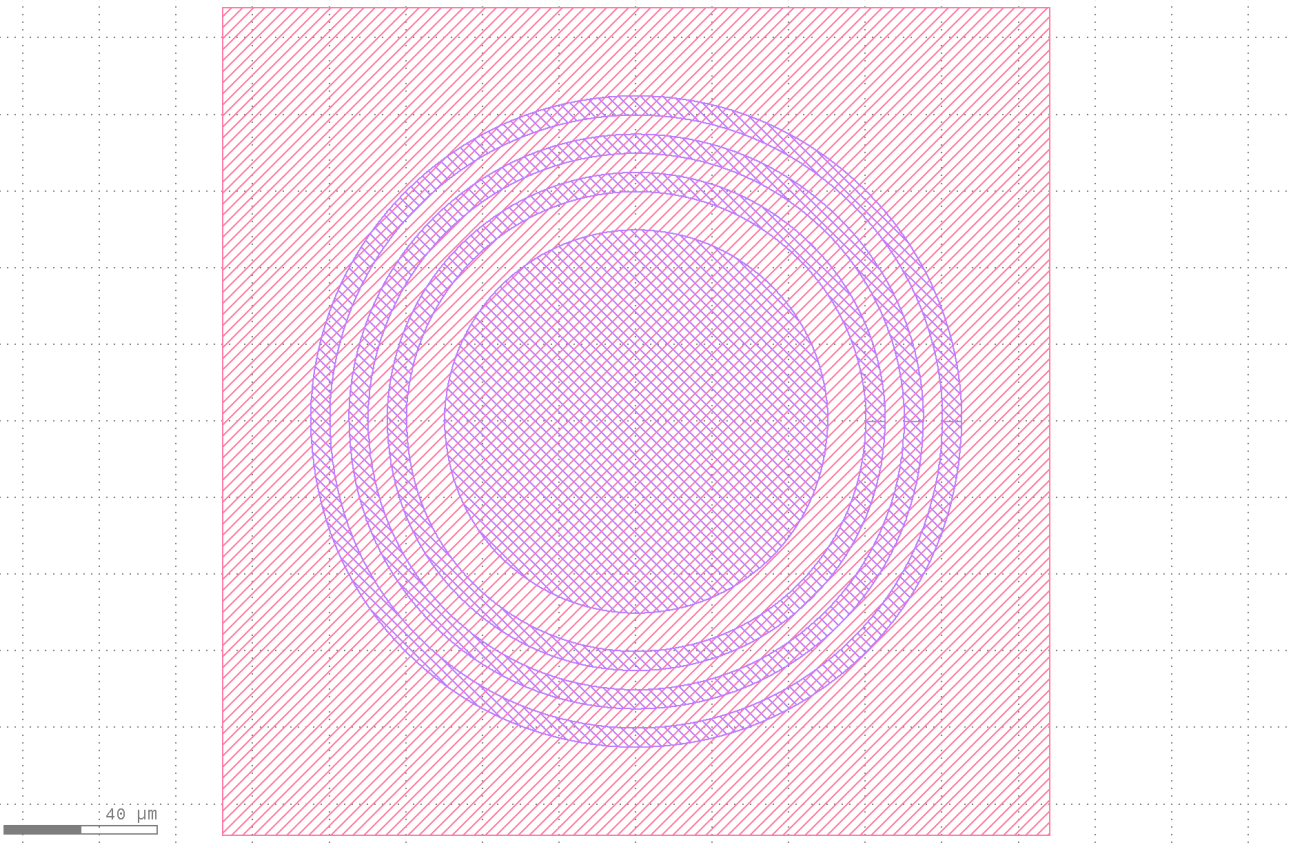
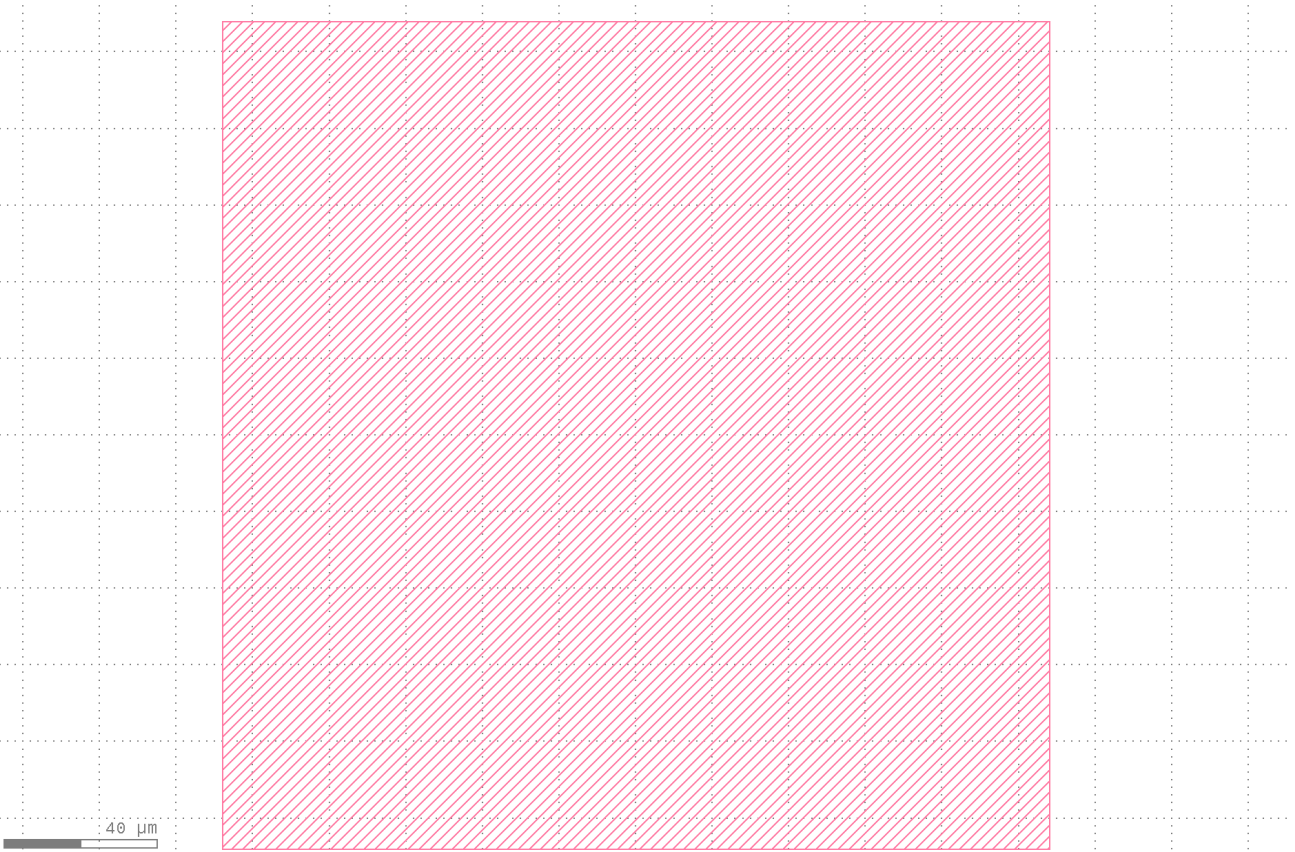
```
return c
```

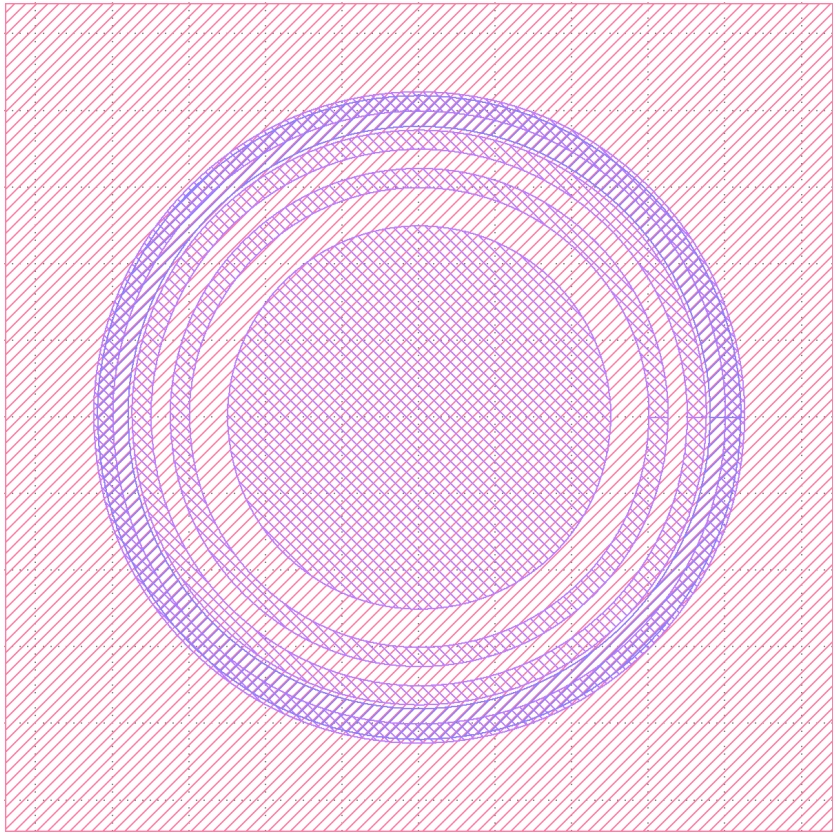
```
# 生成并保存完整版图
```

```
c = guard_ring_process_flow()
```

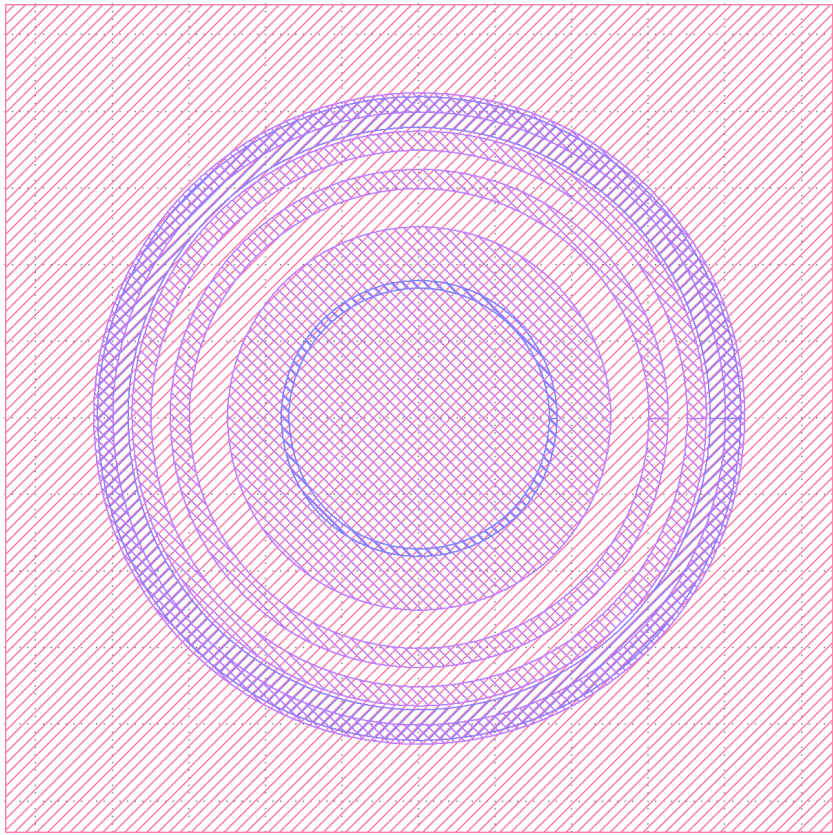
```
c.write_gds("guard_ring_all_layers.gds")
```

```
print("完整版图已保存: guard_ring_all_layers.gds")
```



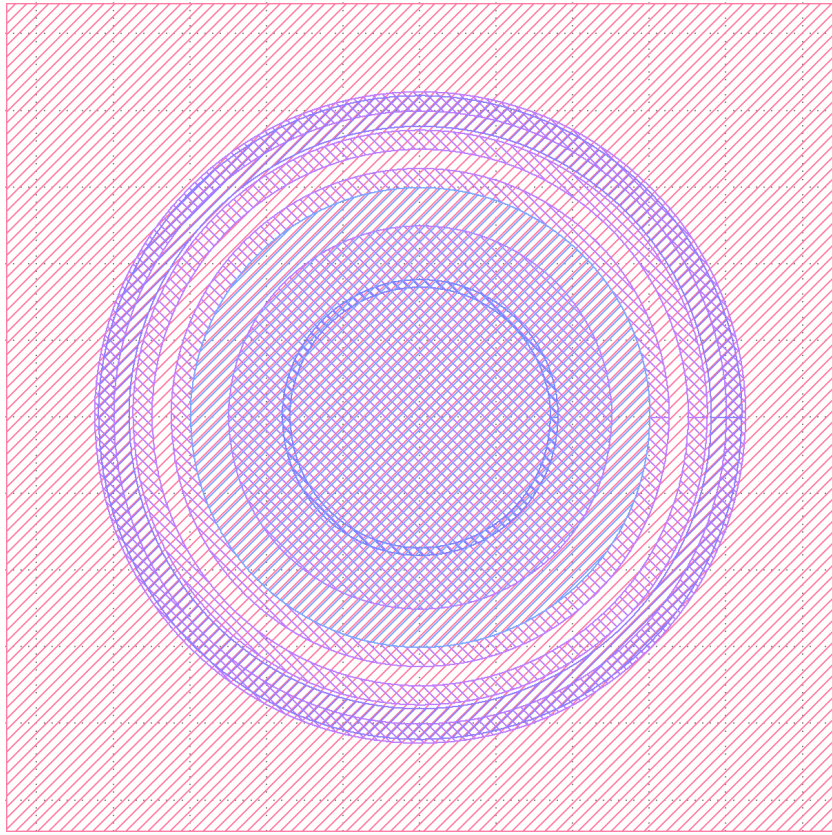


40 μm

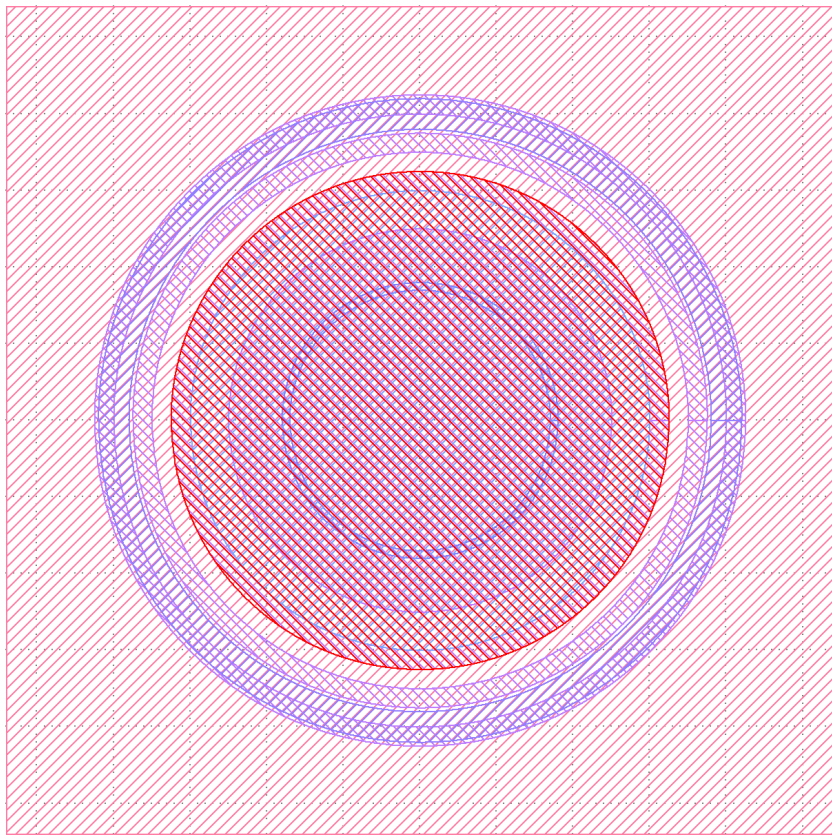


40 μm

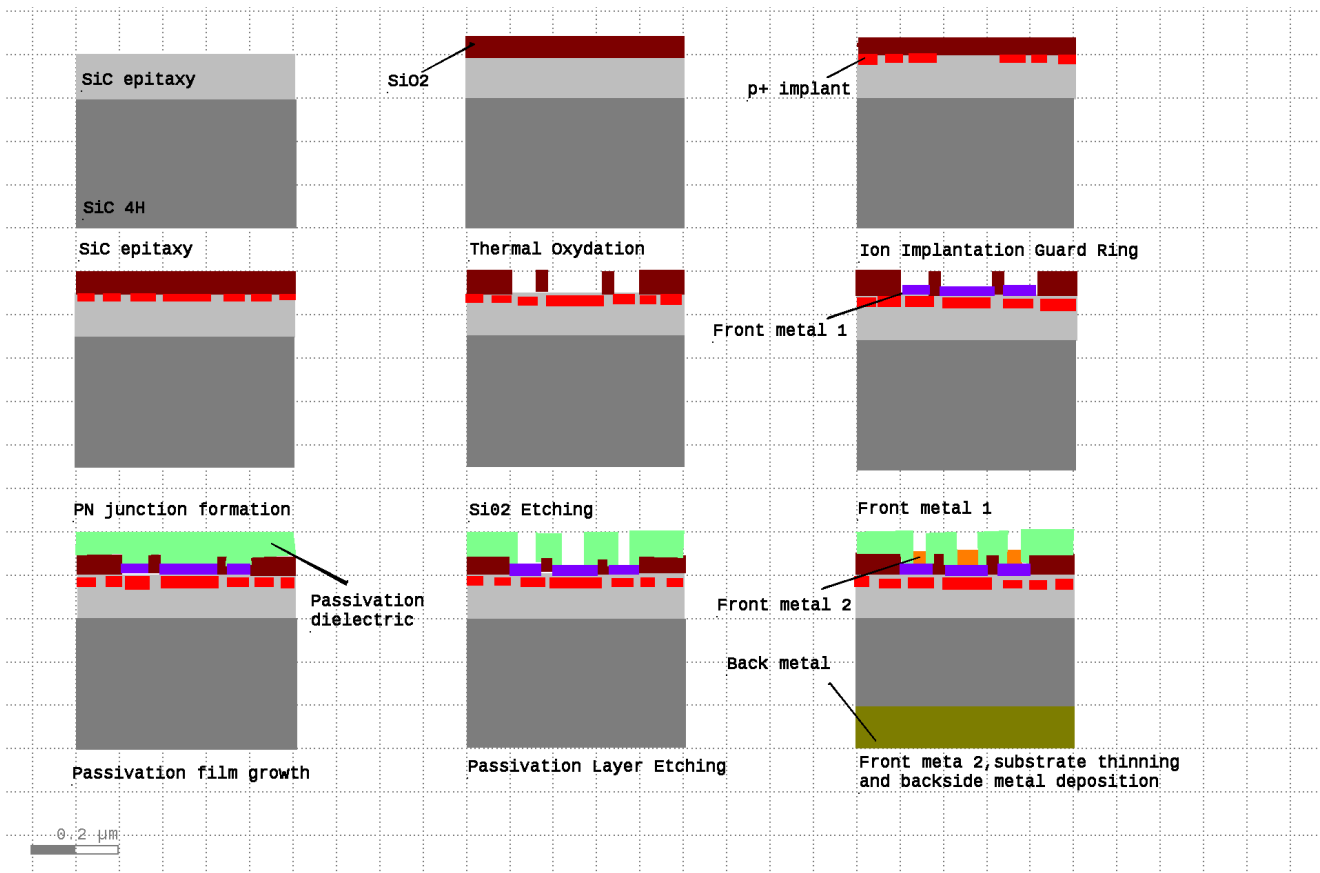
40 μm



40 μm



1.1 工艺步骤 (流片流程图)



序号	步骤名称	核心操作	主要作用	关键材料 / 结构	图示对应说明
1	SiC 衬底与外延准备	在 4H-SiC 衬底上生长 SiC 外延层	构建器件的 n 型漂移区，提供低缺陷的有源区	4H-SiC 衬底、SiC 外延层	左上角第一个图
2	热氧化 (Thermal Oxidation)	在 SiC 外延层表面生长 SiO ₂ 层	为后续离子注入提供硬掩膜，同时钝化表面	SiO ₂ 层	上排第二个图，表面深红色层为 SiO ₂
3	p+ 离子注入 (主结与保护...)	通过光刻 / 刻蚀定义注入窗口，进行 p+ 离子注入	形成阳极主结和终端保护环结构	p+ 注入区 (红色方块)	上排第三个图，表面红色方块为注入区
4	PN 结与保护环结构形成	注入后退火激活杂质，形成完整 p-n 结与保护环阵列	构建器件核心 p-n 结，同时形成终端保护环，分散边缘电场	p+ 阳极区、p 型保护环阵列	中排第一个图，红色方块为激活后的 p+ 区
5	SiO ₂ 刻蚀 (SiO ₂ Etching)	刻蚀去除多余 SiO ₂ ，仅保留部分区域的氧化层	打开金属接触窗口，为后续金属沉积做准备	刻蚀后的 SiO ₂ 层	中排第二个图，表面部分区域的 SiO ₂ 被去除

序号	步骤名称	核心操作	主要作用	关键材料 / 结构	图示对应说明
6	第一层金属 (Front Metal 1) 沉积与图形化	沉积并光刻刻蚀第一层金属 (如 Ti/Ni/Au)	形成阳极欧姆接触, 同时连接保护环结构	Front Metal 1 (紫色 / 橙色层)	中排第三个图, 紫色 / 橙色层为第一层金属
7	钝化层生长 (Passivation Film Growth)	沉积钝化介质层 (如 SiO ₂ /SiN 复合层)	器件表面绝缘保护, 降低表面漏电流, 提升可靠性	钝化介质层 (绿色层)	下排第一个图, 绿色层为钝化层
8	钝化层刻蚀 (Passivation Layer Etching)	刻蚀钝化层, 打开金属接触窗口	暴露出阳极和保护环的金属区域, 为后续互连做准备	刻蚀后的钝化层	下排第二个图, 绿色钝化层上形成窗口
9	第二层金属沉积、衬底减薄与背面金属沉积	沉积第二层正面金属; 减薄衬底并沉积背面阴极金属	完成正面互连, 同时形成阴极接触, 完成器件制备	Front Metal 2、背面金属 (橄榄绿色层)	下排第三个图, 橙色层为 Front Metal 2, 底部橄榄绿色层为背面金属

1.2 版图结构原理

保护环终端版图呈现同心环特征：中心P⁺阳极被若干等间距的P⁺浮空环包围，环间由N⁻漂移区隔开。当主结反偏时，耗尽层向外扩展，逐一穿通浮空环，使得表面电场被重塑为多个强度较低的峰值，避免单一高电场峰。最外侧的N⁺环通过反偏N⁺-N⁻高低结阻挡载流子横向运动，保证终端边界稳定。金属场板与钝化开口则完成电极引出和保护。该结构完全基于离子注入实现，无需外延生长，与标准互补金属氧化物半导体（CMOS）工艺兼容。

2. 刻蚀终端器件光刻板

刻蚀终端适用于台面型功率器件或需要介质隔离的高压集成电路，例如碳化硅（SiC）肖特基二极管。其核心是在器件周围形成深槽隔离环，利用介质或真空的介电强度承受横向高电场。

代码和图如下：

```
import gdsfactory as gf

from gdsfactory.component import Component

gf.gpdk.PDK.activate() # 激活 PDK
```

```

def etch_termination(

    device_width: float = 200,

    device_length: float = 400,

    trench_width: float = 10,

    trench_distance: float = 60,

) -> Component:

    """刻蚀终端：中心器件 + 深槽隔离环"""

    c = Component("etch_termination")

    # 图层定义（与前面一致，可根据需要调整）

    L_ACTIVE = (1, 0)      # 有源区（器件本体，光刻胶保护）

    L_TRENCH = (2, 0)     # 刻蚀窗口（正胶：透光区，被刻蚀）

    L_METAL = (3, 0)      # 金属

    L_CONTACT = (4, 0)    # 接触孔

    L_PAD = (5, 0)        # 钝化开口

    # 1. 中心器件有源区（矩形，光刻胶覆盖，不被刻蚀）

    active = c << gf.components.rectangle(

        size=(device_width, device_length),

        layer=L_ACTIVE,

        centered=True,

    )

    # 2. 矩形沟槽环（刻蚀窗口） -- 手工构造多边形环

```

```

outer_half_w = device_width / 2 + trench_distance

outer_half_l = device_length / 2 + trench_distance

inner_half_w = outer_half_w - trench_width

inner_half_l = outer_half_l - trench_width

# 环由四个矩形条组成：上、下、左、右

# 上条

top = [[-outer_half_w, inner_half_l], [outer_half_w, inner_half_l],
        [outer_half_w, outer_half_l], [-outer_half_w, outer_half_l]]

# 下条

bot = [[-outer_half_w, -outer_half_l], [outer_half_w, -outer_half_l],
        [outer_half_w, -inner_half_l], [-outer_half_w, -inner_half_l]]

# 左条

left = [[-outer_half_w, -inner_half_l], [-inner_half_w, -inner_half_l],
         [-inner_half_w, inner_half_l], [-outer_half_w, inner_half_l]]

# 右条

right = [[inner_half_w, -inner_half_l], [outer_half_w, -inner_half_l],
          [outer_half_w, inner_half_l], [inner_half_w, inner_half_l]]

for bar in [top, bot, left, right]:

    c.add_polygon(bar, layer=L_TRENCH)

# 3. 金属场板（比有源区稍大，覆盖到沟槽上方）

metal = c << gf.components.rectangle(

    size=(device_width + 20, device_length + 20),

```

```
        layer=L_METAL,

        centered=True,

    )

# 4. 接触孔

contact = c << gf.components.rectangle(

    size=(device_width * 0.6, device_length * 0.8),

    layer=L_CONTACT,

    centered=True,

)

# 5. 钝化开口

pad = c << gf.components.rectangle(

    size=(device_width + 40, device_length + 40),

    layer=L_PAD,

    centered=True,

)

return c

if __name__ == "__main__":

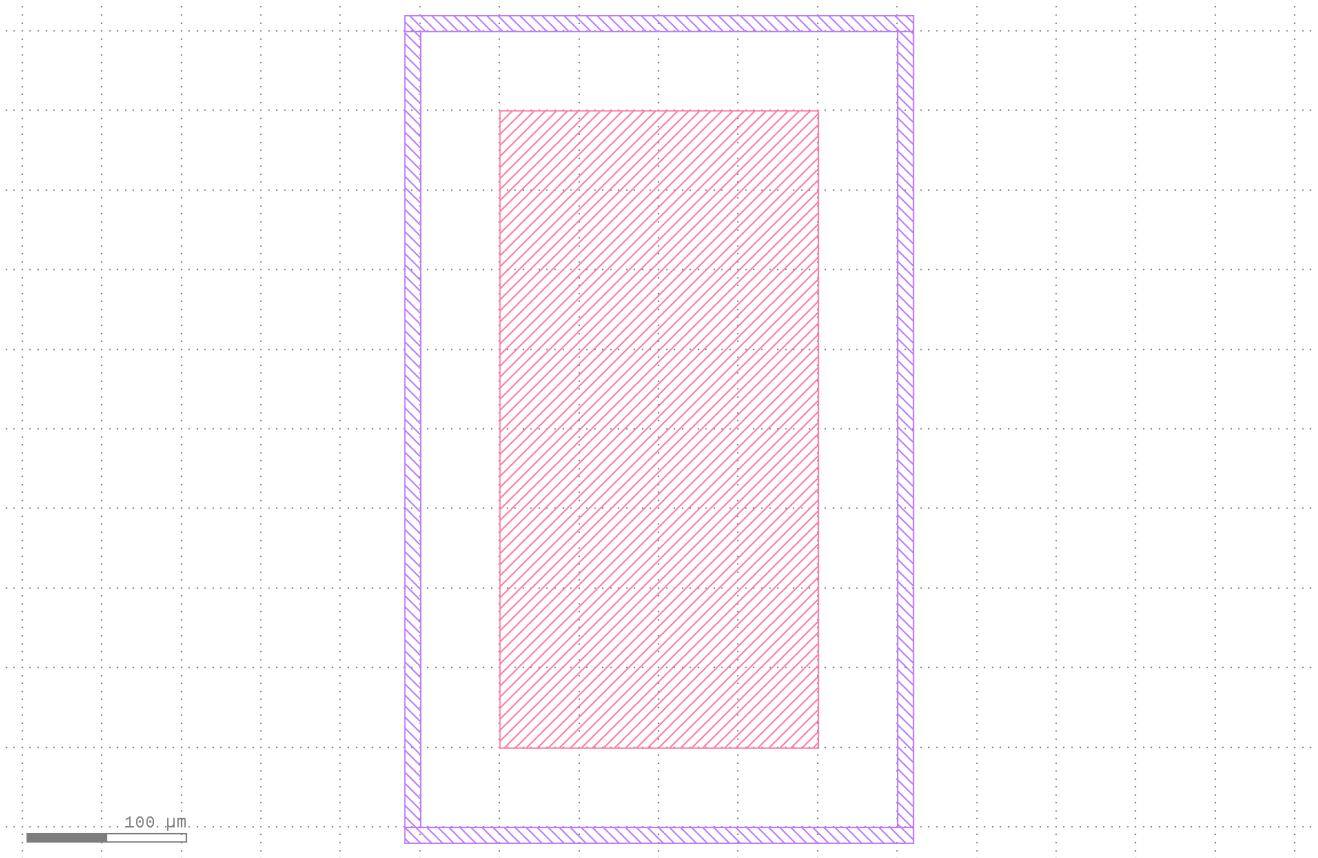
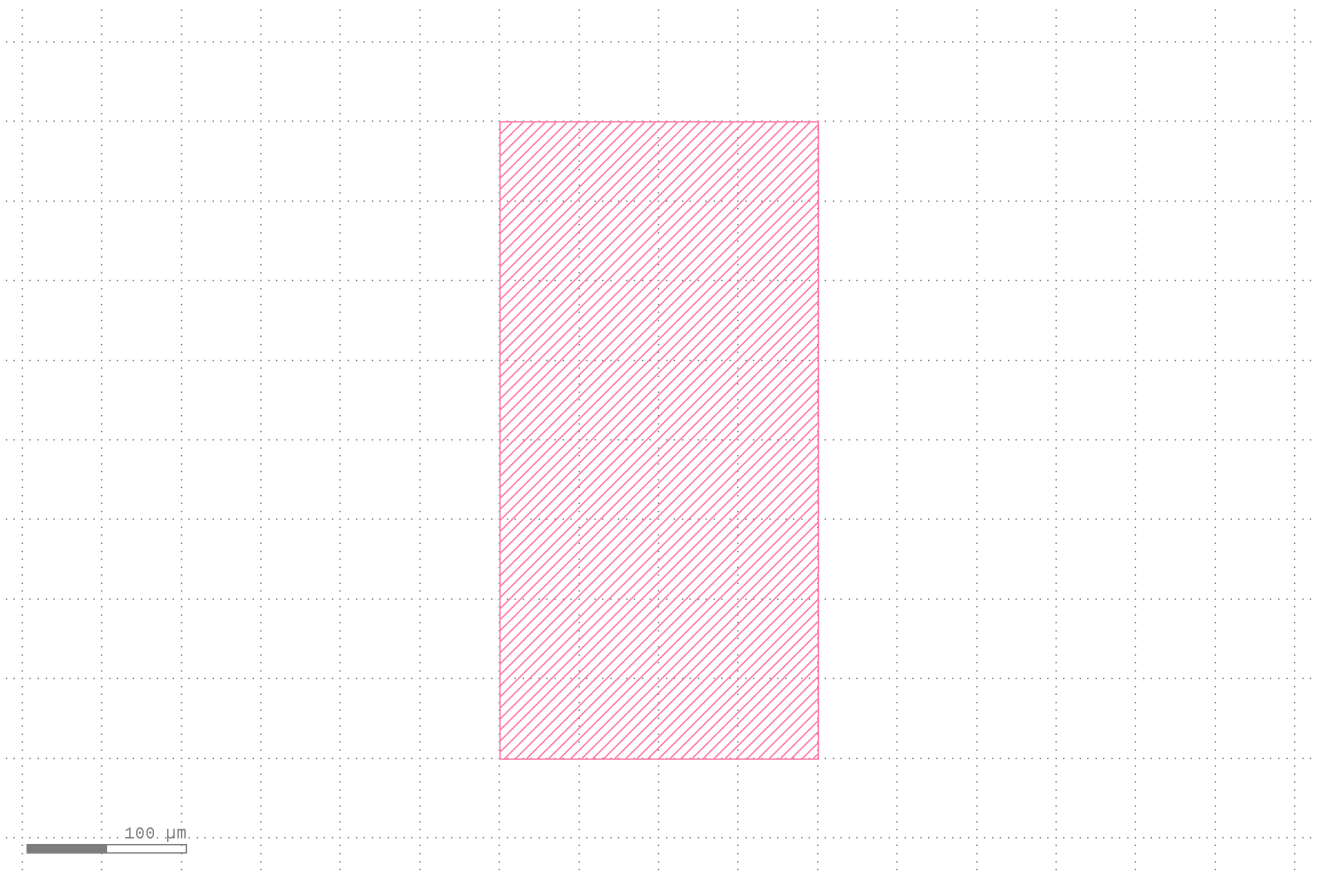
    c_etch = etch_termination()

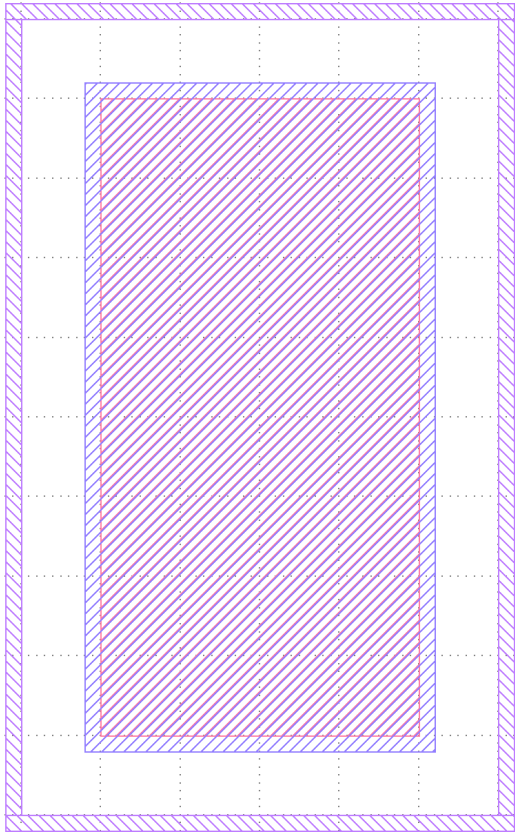
    # 如果弹窗失败, 注释掉 .show()

    # c_etch.show()
```

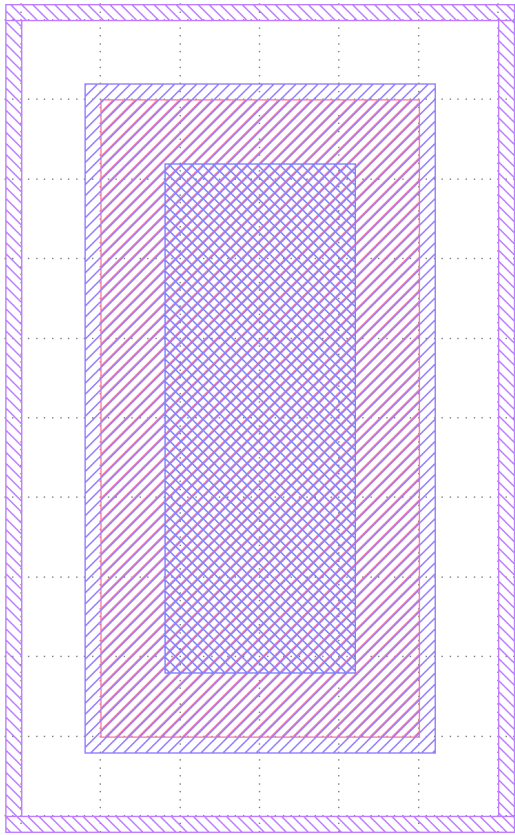
```
c_etch.write_gds("etch_termination.gds")
```

```
print("GDS 文件已生成: etch_termination.gds")
```

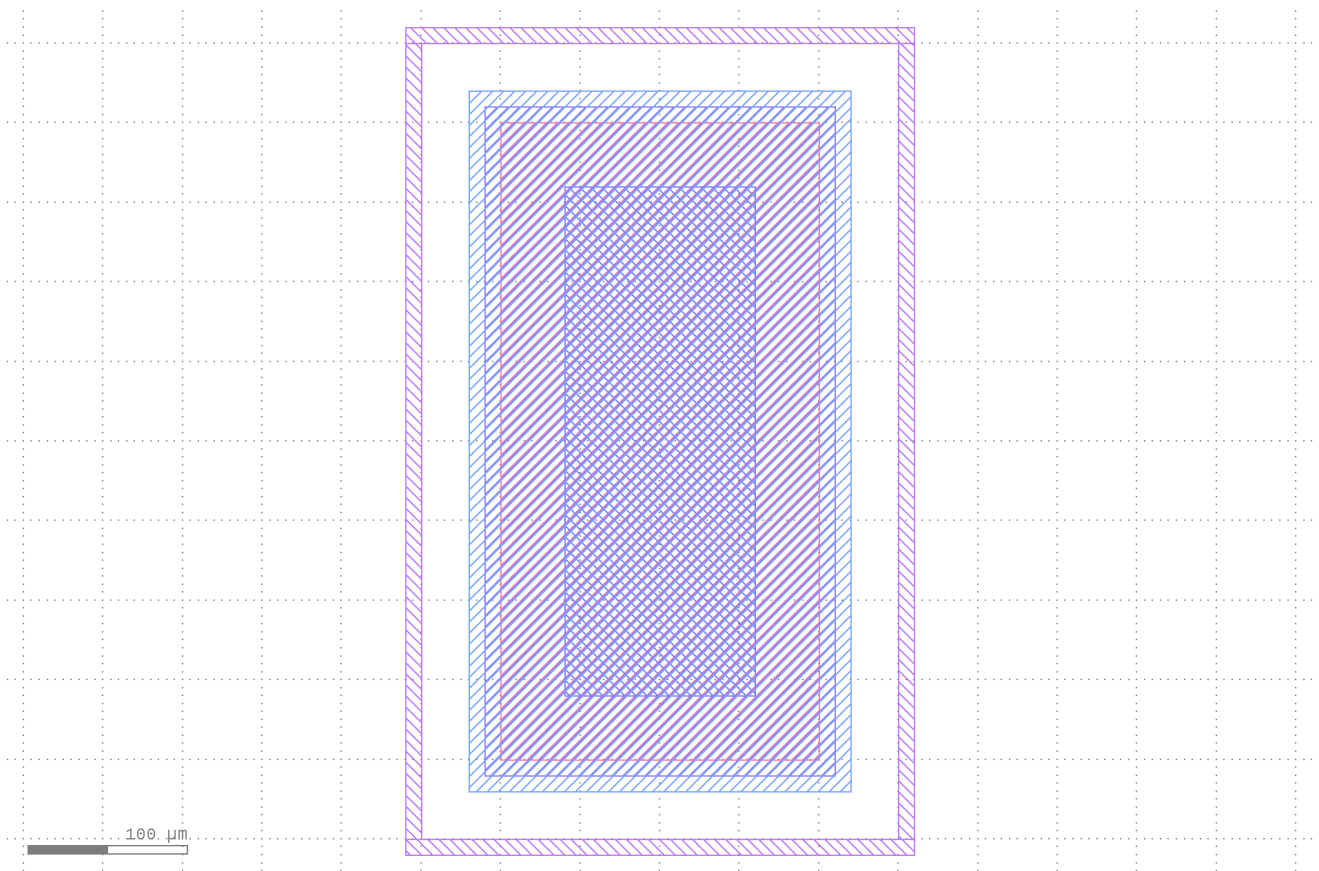




100. μm



100. μm



2.1 掩膜层定义与工艺步骤

掩膜层	图层编号	对应工艺	图形描述	功能说明
ACTIVE	(1,0)	有源区保护光刻	中心矩形	光刻胶覆盖的器件本体区域，在后续沟槽刻蚀中受保护不被侵蚀，保留完整的硅台面。
TRENCH	(2,0)	深槽刻蚀掩膜	矩形环	该层为刻蚀窗口，光刻后暴露硅表面，通过干法刻蚀（如感应耦合等离子体反应离子刻蚀）形成深度数微米至数十微米的隔离槽。
METAL	(3,0)	金属淀积与光刻	略大于ACTIVE的矩形	覆盖器件并延伸至沟槽边缘，兼作场板，调制沟槽侧壁电场分布，抑制边缘过早击穿。
CONTACT	(4,0)	接触孔刻蚀	ACTIVE内矩形	在器件有源区开孔，形成欧姆接触。
PAD	(5,0)	钝化开口	大于METAL的矩形	打开钝化层，定义键合区。

2.2 光刻板图形特征

光刻板的最关键图形是TRENCH层——一矩形环状透明区（正性光刻胶），环宽等于设计沟槽宽度。该图形直接决定深槽的位置和宽度。ACTIVE层为不透光区，确保有源硅台面不受

刻蚀。后续金属、接触和钝化层则依次叠加。与保护环终端相比，刻蚀终端用物理沟槽替代了注入浮空环，终端长度可显著缩短，并适合宽禁带半导体材料的高电场耐受要求。

3. 工艺整合与对比

两种终端均可采用离子注入工艺实现，无需依赖外延层生长。保护环终端利用P⁺/N⁺注入形成横向变掺杂分布，工艺步骤相对简单，但需精确控制注入剂量与退火条件以优化环间穿透。刻蚀终端则增加了一步深槽刻蚀及可能的介质填充，工艺流程稍复杂，但终端占用面积更小，耐压效率更高。在掩膜版设计上，保护环表现为系列同心圆环，刻蚀终端表现为矩形嵌套环，二者共同体现了通过版图结构调控表面电场的核心设计思想。
