

纳米材料与器件 期中论文阅读

2019 Top 50 Physics Articles

A vertical silicon-graphene-germanium transistor 垂直结构的硅-石墨烯-锗晶体管

Chi Liu, Wei Ma, Maolin Chen, Wencai Ren, Dongming Sun

杨文曦

School of Microelectronics, F1703901, Shanghai Jiao Tong University

Liu, C., Ma, W., Chen, M. et al. A vertical silicon-graphene-germanium transistor. Nat Commun 10, 4873 (2019).

<https://doi.org/10.1038/s41467-019-12814-1>



摘要Abstract

现有问题

现有石墨烯晶体管普遍采用隧穿发射结
势垒高度限制了晶体管在THz领域工作的性能
失去高速电子器件的优势

测试结果

基区延迟时间缩短1000倍以上
截止频率由约1.0 MHz提升至1.2 GHz
共基极增益接近1 功率增益大于1

解决办法

采用半导体薄膜和石墨烯转移工艺
以肖特基结作为发射结
垂直结构的硅-石墨烯-锗晶体管

前景展望

实现晶体管超高频(THz)领域工作



绪论

Introduction

双极结型晶体管

Bipolar Junction Transistor

截止频率 f_{α}

共基极时偏置频率上限

$$f_{\alpha} = \frac{1}{2\pi \times \text{delay time}}$$

电子作为少数载流子移动形成电流

由于电子迁移率高于空穴，n-p-n BJT更常用



n-p-n BJT Symbol [1]

Alpha截止频率 Alpha Cutoff Frequency

$$delay\ time \begin{cases} \tau_e & \text{发射极充电时间} \\ \tau_b & \text{基极渡越时间(主要限制)} \\ \tau_c & \text{集电极延迟时间} \end{cases}$$

$$\tau_b = \frac{w'_b{}^2}{2 \left[1 + \left(\epsilon_{bi} / \epsilon_0 \right)^{\frac{3}{2}} \right] D_{n,b}} \quad [2]$$

$$with\ \epsilon_0 = \frac{2V_t}{w'_b}$$

采用石墨烯作为基础材料

由于材料厚度, 几乎可忽略 τ_b

高载流子迁移率改善基极电阻

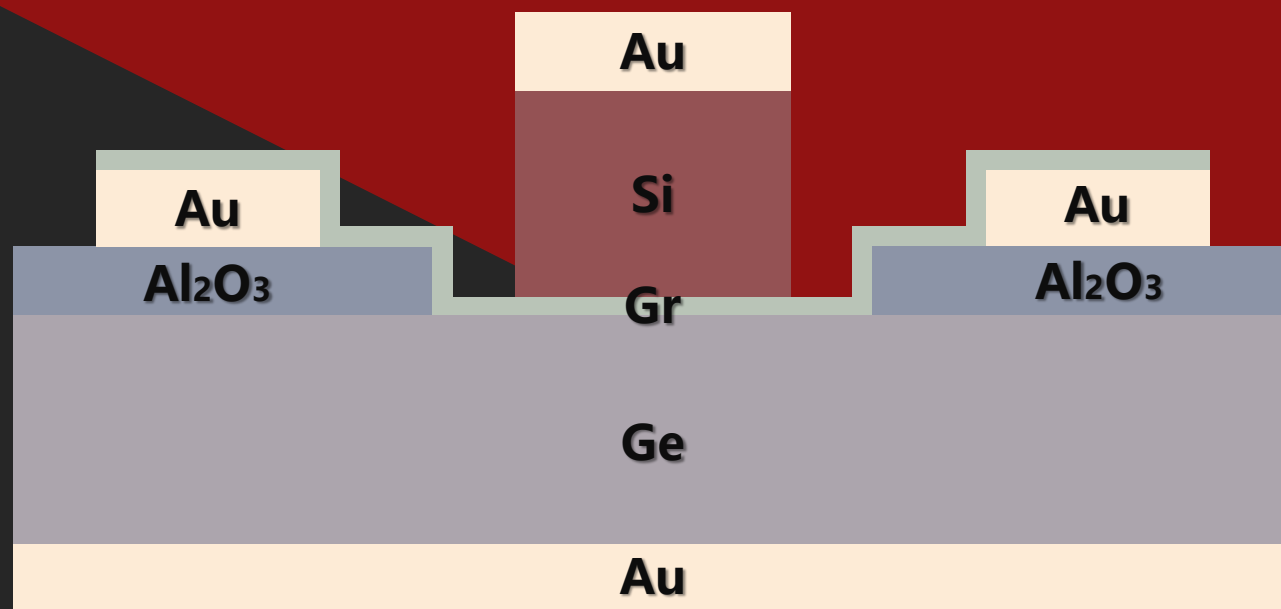


方法

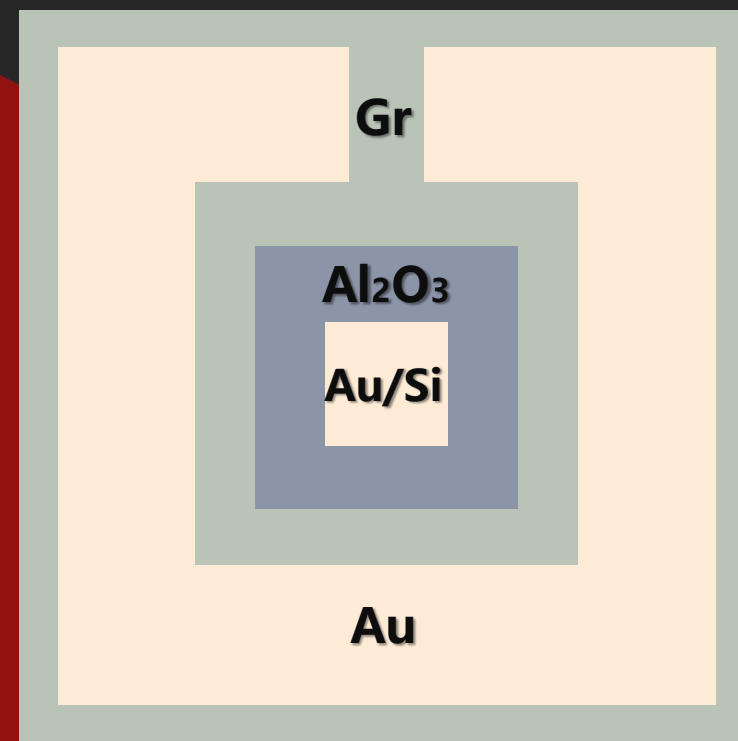
Methods

晶体管结构

Silicon-Graphene-Germanium Transistor



The Cross-Section



Top View



设计和制造

Design and Fabrication

Au

n-Si

SiO₂

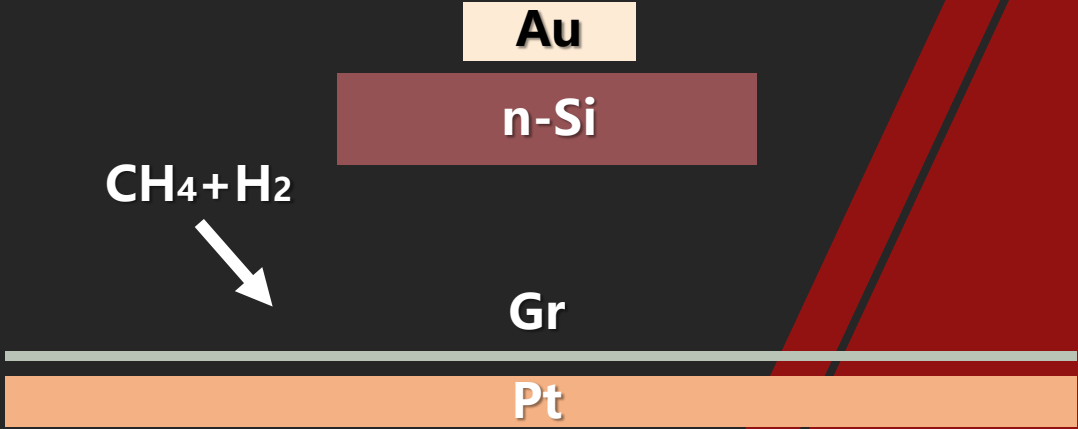
Si

硅膜沉积 (Deposition) 和 硅刻蚀 (Etching)



设计和制造

Design and Fabrication

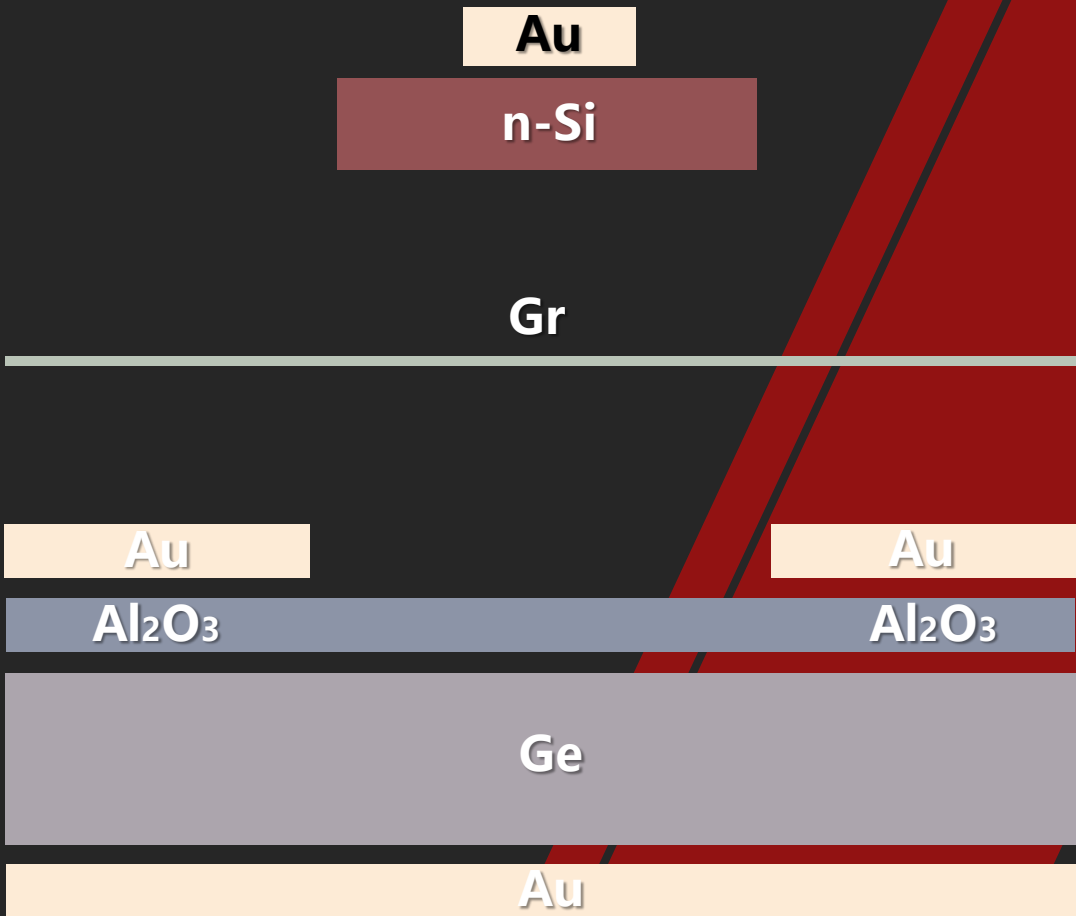


铂若羰基配合物多
溶解在乙醇中
转移至石墨片上
形成Pt箔



设计和制造

Design and Fabrication



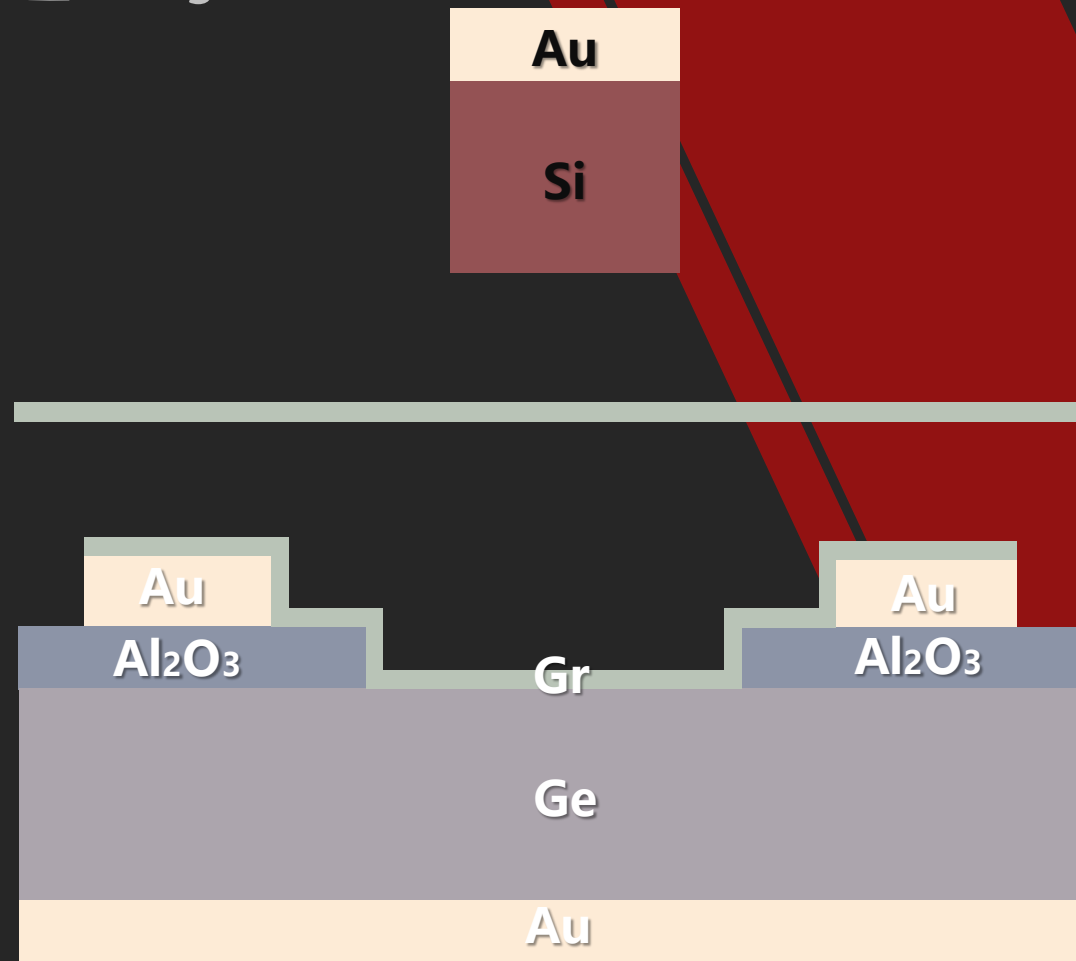
氢氟酸刻蚀和
氮化硅沉积

Etching



设计和制造

Design and Fabrication



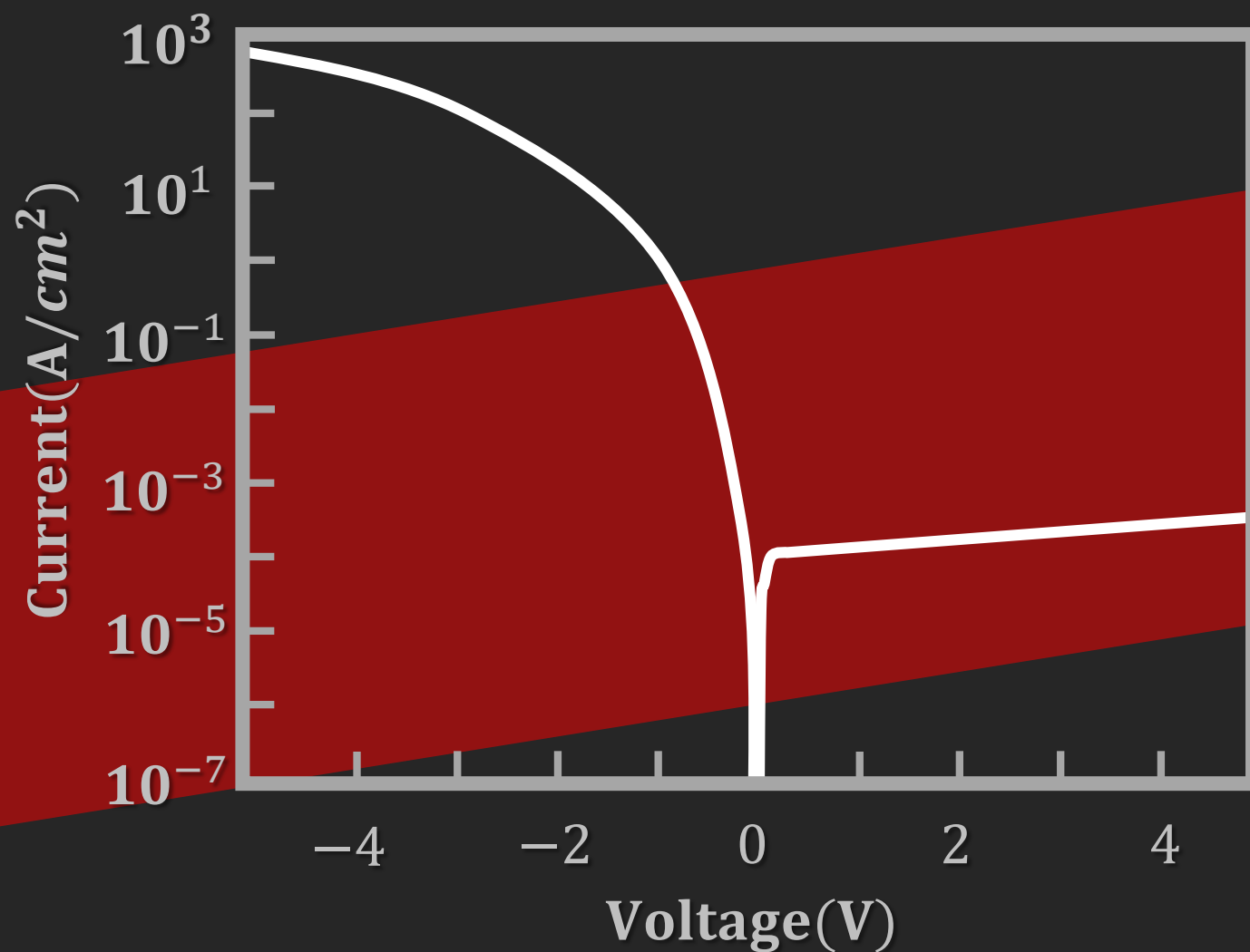


结果

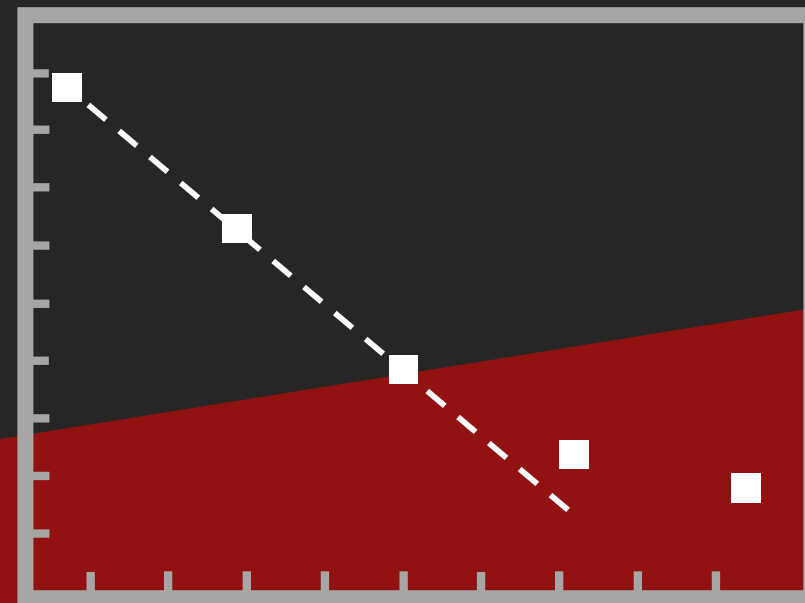
Results

特性曲线

Characteristic Curves: Si-Gr Emitter



$\ln(I/T^2)$



$T(\text{K})$

形成肖特基势垒

明显的整流行为

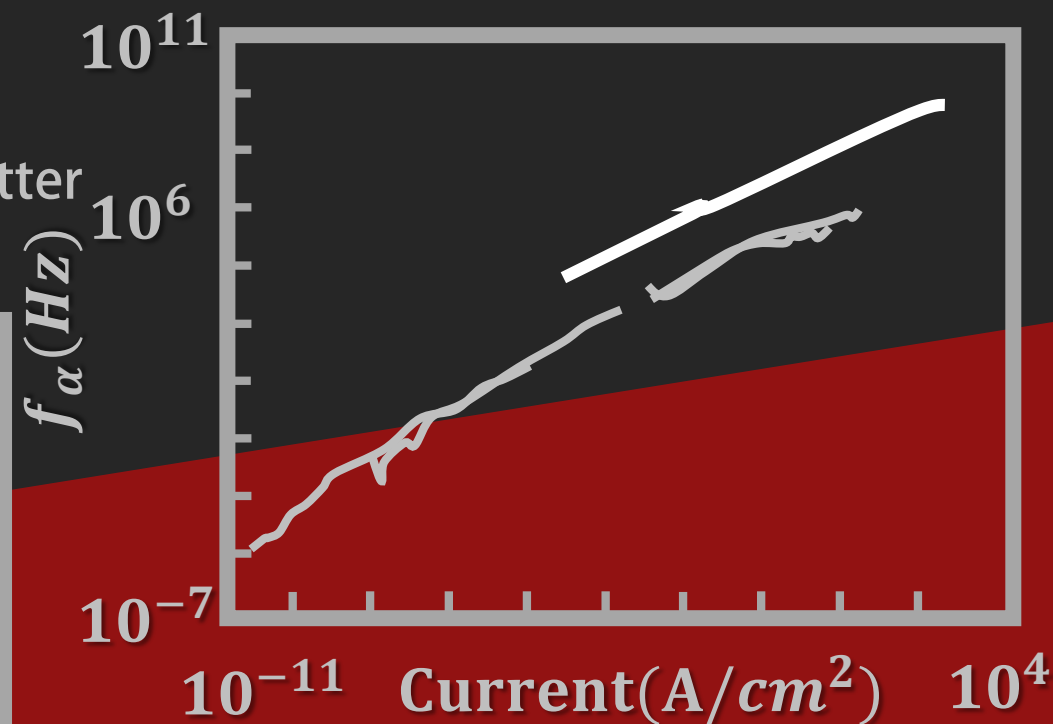
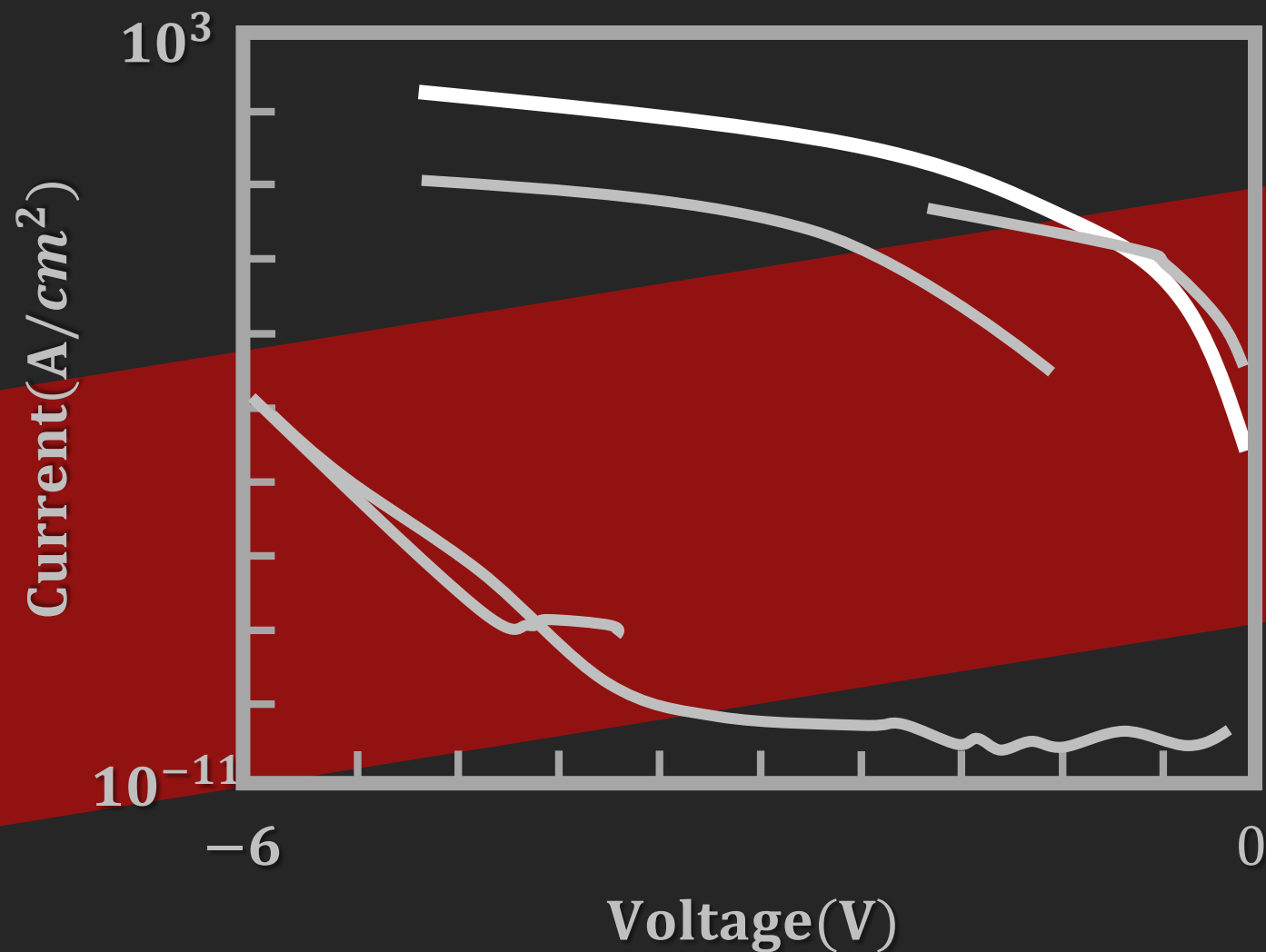
电流的温度依赖性

开关电流比

$1.8 \times 10^6 (\pm 5V)$

特性曲线

Characteristic Curves: Si-Gr Emitter



发射极充电时间

更小的电容

更大的电导

更高的 α 截止频率

1MHz→1.2GHz

电气特性

Electrical Characteristics

肖特基势垒高度

0.22 eV

电流增益的提升

重掺杂n⁺ 锗集电极

结处电场增加

界面处隧穿距离减小

发射电子成功集电

$$I_c \propto I_e$$

电流增益

~ 1%

增强的隧穿效应

锗结漏电流随反向偏置增加

增强电流增益随电压变化

$V_c > 3V$

电流增益随 V_e 增大

逐渐增加至近100%

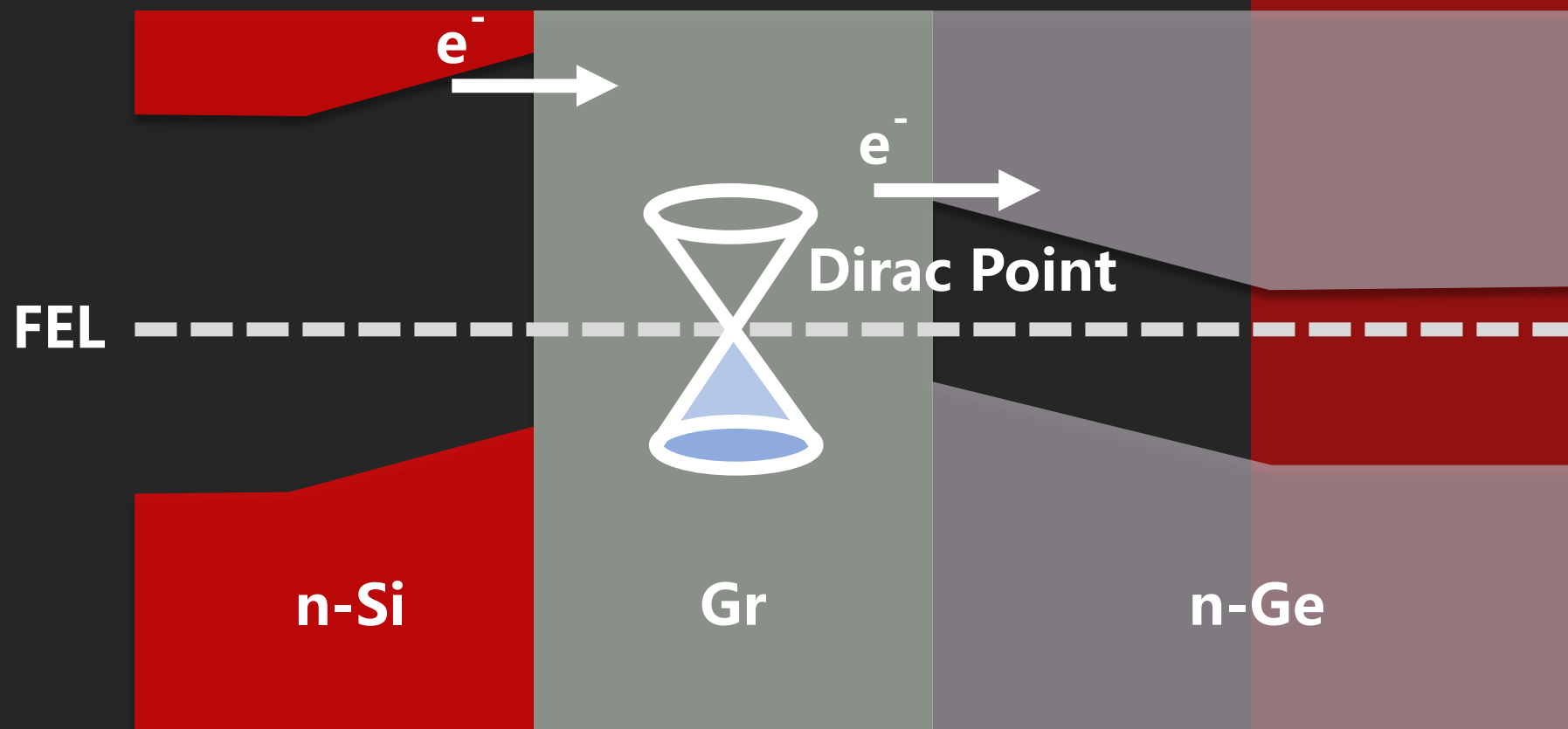


讨论

Discussion

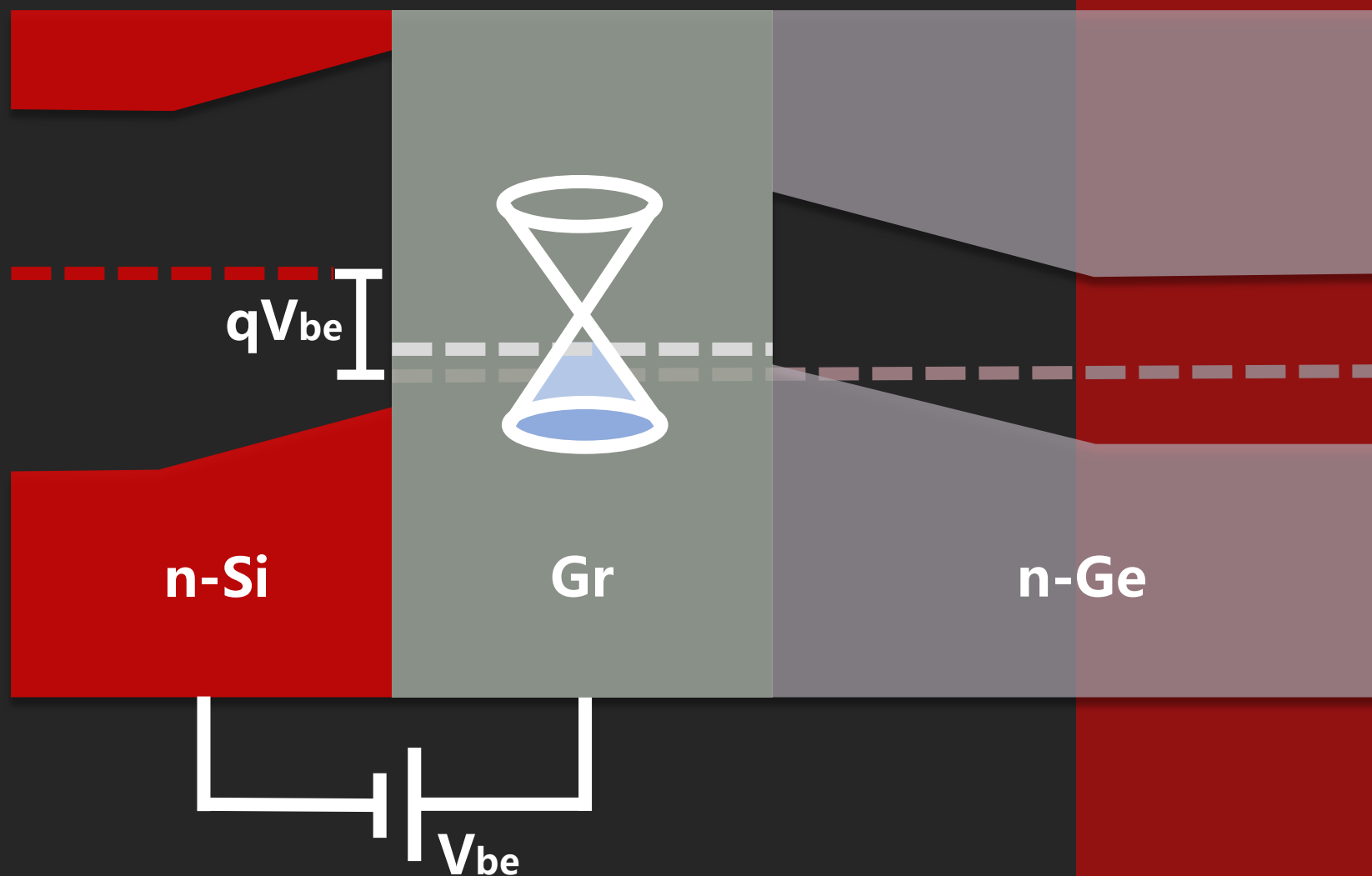
基本工作原理

Basic Operating Principle: No bias is applied



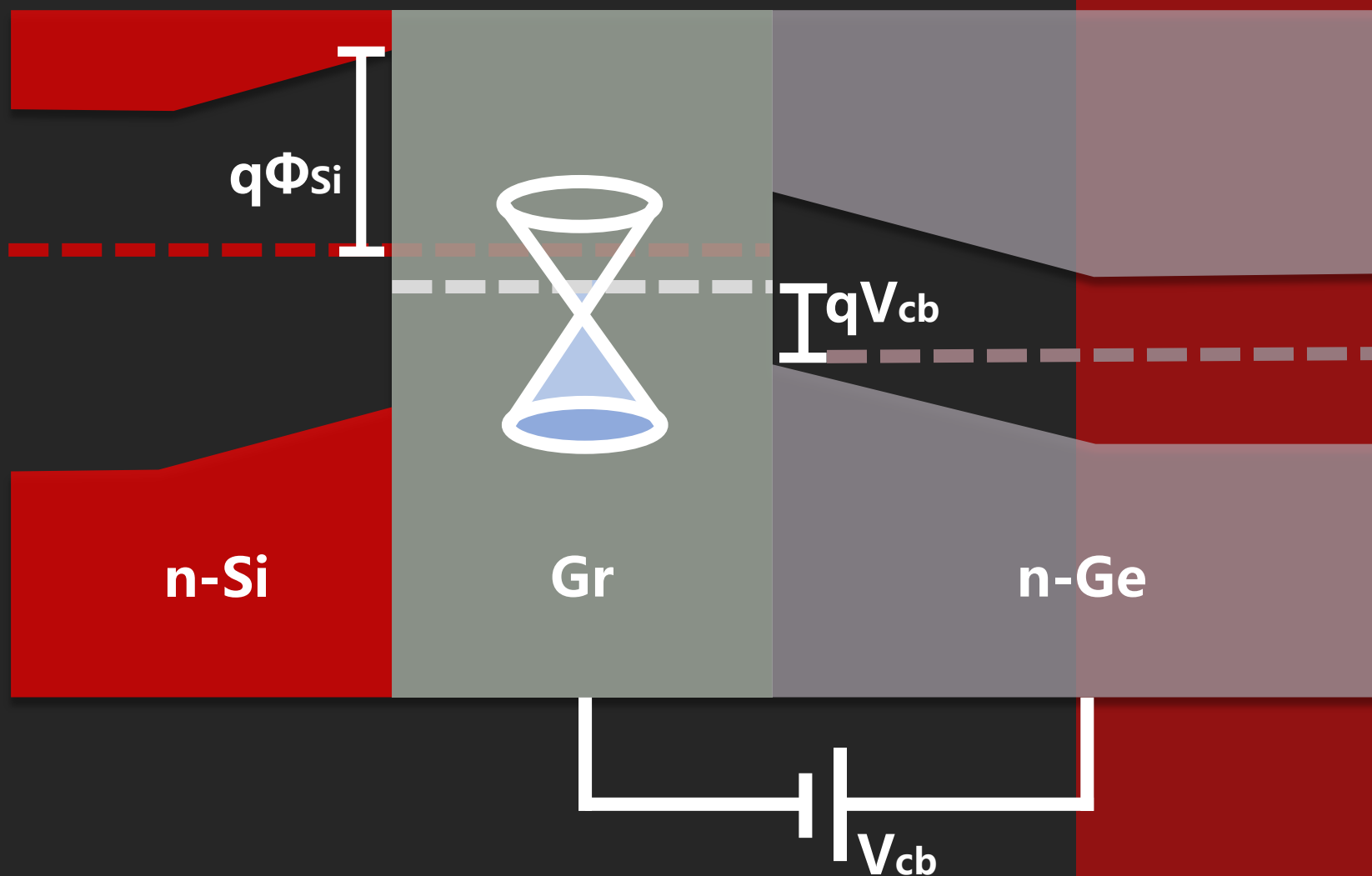
基本工作原理

Basic Operating Principle: Forward bias $V_{be} > 0$ to emitter



基本工作原理

Basic Operating Principle: Reverse bias $V_{cb} > 0$ to collector



权衡

Trade-Off and

轻掺杂集电极
高输出阻抗

如何
兼得

重掺杂集电极
大电流增益

提高界面质量

减少界面散射

材料工程设计

减少集电极结泄漏

总结

Conclusion

发射极充电时间

$\sim 118 \text{ ps}$

石墨烯原子厚度

发射极电容

41 nF/cm^2

α 截止频率

1.2 GHz

发射极充电电流

692 A/cm^2

石墨烯

高载流子迁移率

垂直结构

Si-Gr-Ge晶体管

肖特基技术

高度可行性

参考资料

References

- [1] B. Van Zeghbroeck, Principles of Semiconductor Devices[M], University of Colorado Boulder, Chapter 5.5.2, 2011
- [2] Bipolar junction transistor – Wikipedia[DB/OL] ,https://en.wikipedia.org/wiki/Bipolar_junction_transistor
- [3] 金属所制备出硅-石墨烯-锗高速晶体管, 科研进展-中国科学院[EB/OL], http://www.cas.cn/syky/201910/t20191028_4721690.shtml, 2019-10-29



上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

Thanks for watching.

School of Microelectronics, F1703901, Shanghai Jiao Tong University

Liu, C., Ma, W., Chen, M. et al. A vertical silicon-graphene-germanium transistor. Nat Commun 10, 4873 (2019).

<https://doi.org/10.1038/s41467-019-12814-1>