TZBD Time to zero breakdown

Liu Kuncheng

中国科学技术大学

2025年5月30日

Under the supervision of Prof. Zheyang Zheng @ USTC







• 物理原因分析

2 数据处理结果



• V-ramp test 中 V 的 weibull 分布

《曰》 《聞》 《臣》 《臣》 三臣 …

- 缺陷率计算
- 疑问



累积分布函数 (CDF) 为:1

$$F(\mathbf{v},\lambda,\mathbf{k}) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\mathbf{v}}{\lambda}\right)^{\mathbf{k}}\right)$$
(1)

介电击穿的物理本质是最弱环节失效在介电材料中,击穿通常发生在材料的最薄弱处,例如厚度最薄的区域或存在缺陷的部位这种特性使得击穿电压的分布与极值统计(extreme value theory)密切相关,而Weibull 分布正是极值分布的一种(类型Ⅲ极值分布)

¹Weibull <u>1951</u>.



介电材料可以被分成许多小的独立单元(例如微小的体积或面积),每 个单元都有自己的击穿电压 V_i (i = 1,2,3…N) 整个材料的击穿电压 V_{bd} 是所有单元击穿电压的最小值,因为只要有一 个单元击穿,材料就会失效

推导

$$V_{bd} = \min(V_1, V_2, \cdots, V_N) \tag{2}$$

设每个单元的击穿电压 V_i 的累积分布函数为 $F_V(v) = P(V_i \le v)$. 则未 被击穿的概率为 $1 - F_V(v)$ 整个材料未击穿的概率是所有单元都未击穿的概率.(在电压 v 时没有被 击穿)

$$P(V_{bd} > v) = P(V_1 > v, V_2 > v, \cdots, V_N > v) = (1 - F_V(v))^N$$
(3)

・ロト ・ 四ト ・ ヨト ・ ヨト … ヨ

因此,材料击穿的累积分布函数为:

$$F_{bd}(v) = P(V_{bd} \le v) = 1 - P(V_{bd} > v) = 1 - (1 - F_V(v))^N$$
 (4)

推导

根据极值统计理论,N 很大时,最小值 $V_b d$ 的分布取决于 $F_V(v)$ 在 v 趋于最小值 v_0 的行为, 当 $F_V(v)$ 在下限附近具有幂律形式,即

$$F_V(\mathbf{v}) \approx \mathbf{c}(\mathbf{v} - \mathbf{v}_0)^{\mathbf{a}}$$
(5)

2025年5月30日

...

э.

3/28

对于小的 $F_V(v)$ 当 N 很大时

$$1 - F_{V}(v) \approx \exp(-F_{V}(v)) \qquad (1 - x \approx e^{-x})$$
(6)

则代入可得

$$P(V_{bd} > v) = (1 - F_V(v))^N \approx \exp(-NF_V(v))$$
(7)

若 $F_V(v) = \left(\frac{v}{\lambda}\right)^k$ 假设单个单元的 CDF 近似幂律形式则 $P(V_{bd} > v) = \exp\left(-N\left(\frac{v}{\lambda}\right)^k\right)$ (8) $F_{bd} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{\lambda'}\right)^k\right) \qquad \lambda' = \lambda/N^{1/k}$ (9)

推导

物理模型I

- 阳极空穴注入模型(Anode Hole Injection Model)²: 电子碰撞电离 生成空穴,空穴注入氧化层
 - 当施加高电压时,电子会从阴极注入,并通过隧穿或热激发机制进入 氧化层
 - 这些高速电子会与氧化层中的晶格碰撞,产生二次电子-空穴对
 - 被激发出的空穴(holes)会在电场的作用下向阳极迁移,有一部分 会被注入到阳极电极中
 - 注入到阳极的空穴造成氧化层损伤,诱导氧化层中结构的变化,进而 引发陷阱形成或击穿
- 电子陷阱生成模型 Electron Trap Generation Model):电应力作用下生成陷阱,连接成导电通道击穿
 - 随着外部应力(如高电流密度)持续施加,氧化层中会形成越来越多的陷阱
 - 这些陷阱是电子在氧化层中传输时产生的缺陷位置,电子可以被暂时捕获

< ロ > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

物理模型II

• 当这些陷阱在空间上连接形成一条从底部到顶部的连续通路时,就 形成了导电路径,发生击穿 (breakdown)

两者关系

空穴通量 $Q_p \rightarrow$ 诱导结构破坏 \rightarrow 生成电子陷阱 \rightarrow 最终形成击穿通道 空穴注入氧化层后与氧原子反应,引发结构缺陷 (如 Si-O 键破坏),这 些缺陷成为电子陷阱的起源。阳极空穴注入模型中,

$$J_{p} = J_{n} \cdot \alpha \Rightarrow Q_{p} = Q_{n} \cdot \alpha \tag{10}$$

 J_p , J_n are the hole and electron current density and α is the probability that an injected electron generates a hole 可以得到 Q_p , Q_n are the hole and electron fluence

$$\Delta N_{ot} = \mathcal{A}(\mathcal{Q}_n \cdot \alpha)^{0.6} \tag{11}$$

²Degraeve et al. 1995.



Fig. 1 : The creation of electron traps (occupied at 8 MV/cm), ΔN_{ot} , as a function of hole fluence, Q_p , for electric fields between 9.5 and 12 MV/cm, oxide thicknesses between 8.9 and 13.8 nm, and constant current as well as constant voltage stressing. A unique curve is found, independent of oxide thickness, oxide field and stress type.

不同的 stress conditions and oxide thicknesses 分别有不同的电子陷阱-空穴通量 Q_p 关系

7/28



Fig. 2 : Schematic illustration of the new spheres model for intrinsic oxide breakdown simulation based on trap generation and conduction via traps. A breakdown path is indicated by the shaded spheres.

使用 Monte-Carlo 模拟,electron traps are generated at random positions 导通条件: 陷阱在空间上连接形成一条从底部到顶部的连续通路时

8/28

结果服从 weibull 分布



Fig. 4 : The normalised Q_{BD} -distributions for different oxide thicknesses. The Weibull slope decreases with decreasing oxide thickness.

2025年5月30日 9/28

æ

イロト イヨト イヨト イヨト

数据处理结果





2

<ロ> <問> <問> < 回> < 回> 、

数据处理结果



2

イロト イロト イヨト イヨト

数据处理结果



Э.

イロト イロト イヨト イヨト

V-ramp test⁴

"We discuss the methodology of time independent measurement of the breakdown voltage (TZDB, Time Zero Dielectric Breakdown) employing the Weibull statistics for data evaluation"³ 击穿条件: $I_{BD} = 10I_{exp}$



³Harmatha, Valent, and Racko 2010.

⁴JEDEC Solid State Technology Association 2001.

Liu Kuncheng (USTC)

2025年5月30日 13/28

Fowler-Nordheim 隧穿模型

在具有热氧化 SiO₂ 的 MOS 结构中,氧化层中的电荷传输遵循 Fowler-Nordheim 隧穿机制,电流密度可写为

$$J_{FN} = A_{FN} E_{ox}^2 \exp\left(-\frac{B_F N}{E_{ox}}\right)$$
(12)

3

< 日 > < 同 > < 回 > < 回 > < □ > <

不同缺陷原因

- Extrinsic breakdown: 由制造过程中引入的缺陷(如金属杂质、空位、簇团)引起
- Intrinsic breakdown 则源于热氧化过程中不可避免地产生的原生缺陷。



Fig. 2 The Weibull graph for sample G00T28

V-ramp test 中 V 的 weibull 分布





Liu Kuncheng (USTC)

2025年5月30日 16/28

æ

イロト イヨト イヨト イヨト





Liu Kuncheng (USTC)

2025年5月30日 17/28

æ

イロト イヨト イヨト イヨト





D 表示单位面积上的平均缺陷数, A_G 是器件的面积, 那么面积为 A_G 的 区域中"恰好存在 k 个缺陷"的概率, 正好由泊松分布给出:

$$P(k) = rac{(\lambda)^k}{k!} e^{-\lambda},$$

其中参数 λ 就是该区域的平均缺陷数:

$$\lambda = A_G D.$$

因此带入即可得

$$P(k) = \frac{(A_G D)^k}{k!} \exp(-A_G D).$$

Liu Kuncheng (USTC)

2025年5月30日 18/28

< 日 > < 同 > < 回 > < 回 > < □ > <

缺陷率计算

缺陷率计算 II

无缺陷(即 k = 0)的概率为

$$\boldsymbol{P}(\boldsymbol{k}=0) = \exp\left(-\boldsymbol{A}_{\boldsymbol{G}}\boldsymbol{D}\right)$$

"有缺陷、导致击穿"的概率,也就是从测试中观察到的击穿比率 F,自 然是

$$F = 1 - P(k = 0) = 1 - \exp(-A_G D)$$

这样

$$ln(1-F) = -A_G D$$

缺陷率计算

缺陷率计算 Ⅲ



2

・ロト ・ 四ト ・ ヨト ・ ヨト

疑问



• V-ramp 中 V=rt 成线性关系

$$Q = \int I(t) dt = \int I(V) k \ dV$$

若器件面积为 AG, 则总电流

$$I(V) = J_{\rm FN}(V) A_G.$$

在 V-Ramp 测试中, 电压以线性速率 r = dV/dt 上升。击穿累积电 荷定义为从测试开始 (V = 0) 到击穿点 ($V = V_{BD}$) 间流过的总电 荷:

$$Q_{\mathrm{BD}} = \int_0^{t_{\mathrm{BD}}} I(t) \,\mathrm{d}t = \int_0^{V_{\mathrm{BD}}} \frac{I(V)}{r} \,\mathrm{d}V.$$

代入 *I*(*V*):



$$Q_{\rm BD} = \frac{A_G A_{\rm FN}}{r t_{\rm ox}^2} \int_0^{V_{\rm BD}} V^2 \exp\left(-\frac{B_{\rm FN} t_{\rm ox}}{V}\right) \mathrm{d}V.$$

疑问

Tektronix,Keithley Model 4200-SCS 半导体特性分析系统进行氧化物可靠性测试⁵

<ロ> <問> <問> < 回> < 回> 、

2025年5月30日

3

22/28

疑问





Figure 1. V-Ramp Flow chart

Extracted V-Ramp measurement parameters include the breakdown voltage (V_{BD}) and the charge to breakdown (Q_{BD}).

• 冲击测试?

э

疑问



- 厚薄不均引起缺陷?
- 拟合优度检验



<ロト < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > . э 2025年5月30日

24/28

Liu Kuncheng (USTC)







⁵Tektronix 2002.

Liu Kuncheng (USTC)

2025年5月30日 25/28

疑问

References I

Degraeve, R. et al. (1995). "A consistent model for the thickness dependence of intrinsic breakdown in ultra-thin oxides". en. In:

Proceedings of International Electron Devices Meeting. Washington, DC, USA: IEEE, pp. 863–866. ISBN: 978-0-7803-2700-9. DOI: 10.1109/IEDM.1995.499353. URL: http://ieeexplore.ieee.org/document/499353/ (visited on 05/27/2025).

Harmatha, Ladislav, Peter Valent, and Juraj Racko (June 2010). "Dielectric Properties and Breakdown of the Gate Oxide in the MOS Structure". en. In: *Communications - Scientific letters of the University of Zilina* 12.2, pp. 5–9. ISSN: 13354205, 25857878. DOI: 10.26552/com.C.2010.2.5–9. URL: http://komunikacie. uniza.sk/doi/10.26552/com.C.2010.2.5–9.html (visited on 05/25/2025).

э

・ロト ・ 四ト ・ ヨト ・ ヨト

疑问

References II

- JEDEC Solid State Technology Association (Apr. 2001). Procedure for the Wafer-Level Testing of Thin Dielectrics. JEDEC Standard JESD35-A. Revision of JESD35. JEDEC Solid State Technology Association. URL: https://www.jedec.org/standards-documents/docs/jesd35-a.
 Tektronix (2002). Evaluating Oxide Reliability Using V-Ramp and
 - Tektronix (2002). Evaluating Oxide Reliability Using V-Ramp and J-Ramp Techniques. Application Note. Accessed: 2025-05-29. URL: https://www.tek.com/en/documents/application-note/evaluating-oxide-reliability.

< 日 > < 同 > < 回 > < 回 > < □ > <

疑问

References III

Weibull, Waloddi (Sept. 1951). "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability". en. In: Journal of Applied Mechanics 18.3, pp. 293–297. ISSN: 0021-8936, 1528-9036. DOI: 10.1115/1.4010337. URL: https://asmedigitalcollection.asme.org/ appliedmechanics/article/18/3/293/1106672/A-Statistical-Distribution-Function-of-Wide (visited on 05/27/2025).

3

イロト 不得 トイヨト イヨト