

Delta势垒结构对CMOS图像传感器表面暗电流抑制仿真研究

钟荣 闫磊 郝昆

Simulation of Delta barrier structures on surface dark current suppression in CMOS image sensors

ZHONG Rong, YAN Lei, HAO Kun

引用本文:

钟荣, 闫磊, 郝昆. Delta势垒结构对CMOS图像传感器表面暗电流抑制仿真研究[J]. *应用光学*, 2025, 46(3): 689–694. DOI: 10.5768/JAO202546.0304001

ZHONG Rong, YAN Lei, HAO Kun. Simulation of Delta barrier structures on surface dark current suppression in CMOS image sensors[J]. *Journal of Applied Optics*, 2025, 46(3): 689–694. DOI: 10.5768/JAO202546.0304001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0304001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

连续激光辐照背照式CMOS图像传感器实验研究

Experimental study on back-illuminated CMOS image sensor irradiated by CW laser

应用光学. 2024, 45(5): 1072–1078 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0507003>

InAlAs浓度对 $\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}/\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ 红外探测器特性的影响

Influence of InAlAs concentration on $\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}/\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ infrared detector characteristics

应用光学. 2022, 43(2): 317–324 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0204002>

基于双目CMOS图像传感的激光告警技术

Laser warning technology based on binocular CMOS image sensor

应用光学. 2024, 45(6): 1291–1297 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0607002>

具有组分梯度的HgCdTe探测器在激光测量中的潜在应用

Potential application of HgCdTe detector with composition gradient in laser measurement

应用光学. 2024, 45(3): 549–556 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310009>

I型倍增层对异质SAM结构InSb-APD红外探测器性能的影响

Effect of type I multiplier layer on performance of InSb-APD infrared detector with heterogeneous SAM structure

应用光学. 2024, 45(3): 659–664 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0304002>

基于事件相机传感器的时序编码结构光系统设计

Design of temporal coded structured light system based on event-based camera sensor

应用光学. 2024, 45(5): 885–895 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0501002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 03-0689-06

引用格式: 钟荣, 闫磊, 郝昆. Delta 势垒结构对 CMOS 图像传感器表面暗电流抑制仿真研究 [J]. 应用光学, 2025, 46(3): 689-694.

ZHONG Rong, YAN Lei, HAO Kun. Simulation of Delta barrier structures on surface dark current suppression in CMOS image sensors[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 689-694.



在线阅读

Delta 势垒结构对 CMOS 图像传感器表面 暗电流抑制仿真研究

钟 荣¹, 闫 磊², 郝 昆¹

(1. 西北大学 现代物理研究所, 陕西 西安 710127; 2. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘 要: 在 CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) 图像传感器表面形成具有 Delta 结构 (delta-doping) 的势垒可以有效地解决传统 CMOS 图像传感器在辐照环境中的性能变化问题, 势垒宽度、高度参数直接影响 CMOS 图像传感器表面暗电流, 以及表面探测信号的效率。假设电子的总能量和横截隧穿方向满足薛定谔方程, 计算了隧穿概率以及隧穿高度与宽度的关系, 得出 Delta 掺杂势垒的最小宽度应该在 1 nm 以上, 进而设计掺杂结构和掺杂浓度。讨论了 Delta 掺杂的 CMOS 具有高效、稳定和均匀的量子效率, 能够提高低能电子探测, 并在微光成像以及太空探测中做出贡献。

关键词: CMOS; Delta 掺杂; 分子束外延; 暗电流; 量子隧穿

中图分类号: TN223

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0304001

Simulation of Delta barrier structures on surface dark current suppression in CMOS image sensors

ZHONG Rong¹, YAN Lei², HAO Kun¹

(1. Institute of Modern Physics, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Key Laboratory of Low Light Night Vision Technology, Xi'an 710065, China)

Abstract: In complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) image sensors, forming a barrier with a Delta structure (delta-doping) on the surface can effectively resolve the issues of performance changes in traditional CMOS image sensors under irradiation environment. The width and height parameters of the barrier directly affect the dark current on the surface of the CMOS image sensor as well as the efficiency of surface signal detection. It was assumed that the total energy of electrons and the cross-sectional direction of tunneling satisfied the Schrodinger equation, calculating the probability of tunneling and the relationship between the tunneling height and width, and resulting in the conclusion that the minimum width of the Delta-doped barrier should be above 1 nm, thereby designing the doping structure and doping concentration. It was discussed that CMOS with Delta doping had the feature of high-efficient, stable, and uniform quantum efficiency, which enhanced low-energy electron detection and contributed to low-light imaging and space exploration.

Key words: CMOS; delta doping; molecular beam epitaxy; dark current; quantum tunneling

收稿日期: 2024-04-17; 修回日期: 2024-06-03

基金项目: 国家自然科学基金 (12275214, 12247103, 12047502); 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2021JCW-19, 2019JQ-107)

作者简介: 钟荣 (2000—), 男, 硕士, 主要从事 CMOS 成像相关技术研究。E-mail: 2983745567@qq.com

通信作者: 闫磊 (1986—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事微光夜视、微光像增强等技术研究。Email: 13572495775@163.com

郝昆 (1984—), 男, 研究员, 主要从事量子可积模型研究。Email: haoke72@163.com

引言

随着 CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) 电路制造工艺技术的发展以及设计水平的不断提高,在综合考虑系统功耗、体积、质量、成本等因素后,CMOS 图像传感器在空间任务中得到了广泛应用,如在遥感相机、星敏感器、辅助着陆等领域,实现了星图采集、监控成像和导航等功能。但是,恶劣的空间辐射环境会导致 CMOS 图像传感器的性能严重退化^[1-2]。

Goiffon 研究小组对 0.18 μm 工艺的 CMOS 图像传感器进行 γ 射线辐照实验,证实了氧化物缺陷电荷是引起暗电流增大的主要原因,且和界面态引起暗电流相比,氧化物缺陷电荷引起的暗电流要高出两个数量级^[3]。

传统 CMOS 图像传感器表面采用氧化物作为钝化层,实现表面暗电流抑制^[4]。针对上述所述 γ 射线辐射引起氧化层变性问题,1970 年,史密斯等人通过在硅表面引入浅层离子注入技术,对传统氧化层表面钝化结构进行了改进。该技术能够在硅表面下方形成宽度约为 3 nm 的势垒结构,其势垒分布呈现出类似于数学 Delta 函数的特征。2009 年,美国国家航空航天局(NASA)在 CMOS 图像传感器制造工艺中创新性地采用离子注入结合激光退火技术,通过在器件背表面制备高掺杂薄硅层,成功构建了具有 Delta 掺杂特性的表面结构,实现太空环境下 COMS 图像传感器高稳定性要求^[5]。根据上述报道,在 CMOS 表面形成具有 Delta 结构势垒,可有效解决传统 CMOS 图像传感器表面钝化层在辐射环境下,表面特性变化造成的 CMOS 图像传感器性能变化问题。NIKZAD S 等人证明了通过 Delta 掺杂化 CMOS 成像仪、Delta 掺杂 EMCCD (electron-multiplying charge coupled device) 和 Delta 掺杂控制 CCD (charge coupled device),直接检测 100 eV~5 000 eV 范围内的电子^[3,6-7]。

综上所述,本文拟基于量子力学直接隧穿基础理论,构建 Delta 势垒结构,并通过数值计算方法计算不同特征参数 Delta 掺杂结构时的电子隧穿概率,并根据仿真计算结果,提出势垒高度与势垒宽度最佳组合参数。该研究可为太空探测用 CMOS 图像传感器表面结构设计提供理论指导。

1 传统 CMOS 图像传感器基本结构

1.1 背照式 CMOS 图像传感器基本结构

如图 1 所示分别为前照式 CMOS 和背照式

CMOS 示意图。背照式 CMOS 传感器允许光线从基底(背面)进入,使得光线能直接进入感光区域,无需穿越传感器的电路层;前照式 CMOS 传感器则是光线通过传感器的前面,即电路层,才能到达感光区域。背照式由于入射光路径更短,遮挡更小,光敏区可占据更大比例像素,从而提升光电转换效率,因而在低光环境下展现出更优越的成像性能。

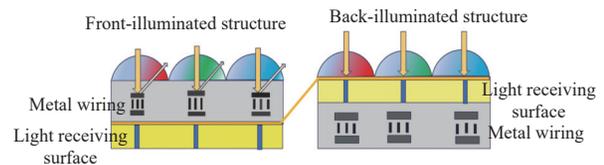


图 1 CMOS 结构图

Fig. 1 Structure diagram of CMOS

虽然背照式 CMOS 图像传感器显著提高了光的吸收效率,很大程度上改善了低光照下的成像质量,它在低照度条件下的对焦能力和画质相比于传统的 CMOS 传感器有质的提升^[8-10],但是 CMOS 图像传感器在低照度以下的表现仍然不好,无法直接应用于微光夜视系统,因此提升低照度下 CMOS 图像传感器的性能对微光夜视系统性能的提升具有重要意义。

1.2 钝化层基本结构及作用

图 2 为 4T-APS (4-transistor active pixel sensor) 像素传感器中前照式 (front-side illumination, FSI) 和背照式 (back-side illumination, BSI) 结构的示意图,该结构通过 4 个晶体管构成的像素单元来实现高效的光电转换和信号读取。该像素结构中,入射光先穿过钝化层,这层的作用是降低表面反射和保护器件不受外界环境的影响。光线接着进入 P 型外延层,在这里,光子的能量被吸收,产生电子空穴对。这些由光子激发产生的电子空穴对随后被位于像素单元中的光电探测器 (pinphotodiode, PPD) 收集。电荷的积累是图像捕获过程的第一步,随后需要将这些电荷转换为可读取的电信号。在读取信号的过程中,系统总线控制传输栅 (transfer transistor, TX) 的开启或关闭。TX 的作用是控制电荷从 PPD 转移到 FD (floating diffusion) 节点,FD 是一个电荷转换区,它将电荷转换为电压信号。电荷转移完成后,通过源极跟随器 (source follower, SF),对 FD 节点的电压信号进行缓冲读出。SF 是一种放大器,它能够读取并放大 FD 节点的电压信号,且不会引入额外的电荷。行选通管 (select transistor, SEL) 的作用是控制哪一行

像素被读取, 确保信号的正确传输。复位晶体管 (reset transistor, RST) 通过控制信号, 将 FD 节点的电压恢复为供电电压 (voltage drain to drain, VDD), 准备下次读取。4T-APS 像素的一个显著特点是它能够实现相关双采样 (correlated double sampling, CDS), 这是一种减少读出噪声的技术。通过 CDS, 可以在信号读取之前和之后分别采样, 通过比较这两个采样值, 有效消除信号读取过程中由像素电路和读出电路引入干扰噪声, 从而大幅提高了图像的质量。这种技术使得 4T-APS 像素在低光照条件下, 也能够提供高质量的图像^[4]。

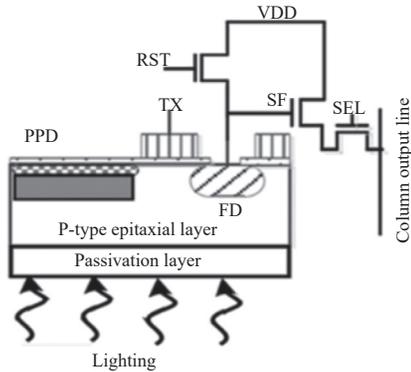


图 2 FSI 和 BSI 结构图像传感器^[9]

Fig. 2 FSI and BSI structured image sensors

钝化层主要有两方面作用: 1) 通过化学钝化可减少表面复合中心; 2) 固定负电荷对表面电子具有排斥作用, 形成场钝化效应, 使得表面光电子能被有效收集。钝化层可以包覆在 CMOS 感光电荷转化区的表面, 有效地减少暗电流的产生^[4]。图像传感器工作时, 存在一些非理想因素, 比如散射光、反射光等, 这些都会损害图像质量。采用钝化层就可以减弱这些因素对感光电荷的影响, 如图 3(a) 所示。

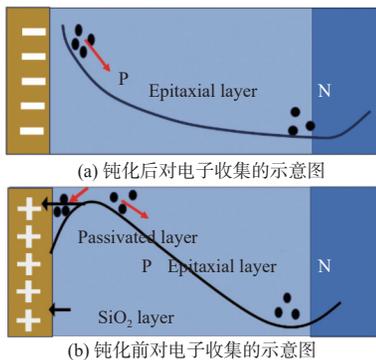


图 3 钝化层的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of passivation layer

当钝化层受到损伤时, 主要包括钝化层正电荷沉积, 氧化层与硅界面缺陷密度增加等。上述缺陷将导致两方面问题: 1) 正电荷引起表面势垒向下弯曲, 使得表面电子收集效率减小; 2) 氧化层与硅界面缺陷密度增加, 导致 CMOS 图像传感器暗电流增加等, 如图 3(b) 所示。它会对图像质量产生影响, 导致出现像素不一致、噪声增加等问题。背照式 CMOS 的钝化层是在感光部件表面涂覆的一种绝缘材料, 可以有效地保护感光元件, 同时也能减小暗电流的产生。主要是通过降低表面态密度, 封锁表面和散布在晶体内部的缺陷和杂质, 减少非辐射复合, 从而降低暗电流。表面态密度的降低意味着在随机热运动下产生电子-空穴对的概率变小, 这样就减少了暗电流的产生^[5]。钝化层还会阻止杂质侵入感光元件, 避免其与硅基底的接触, 进一步改善暗电流性能, 增强其抗泄漏电流能力。

太空环境下, CMOS 图像传感器背表面不可避免地会受到射线等辐射, 造成钝化层损伤, 进而导致 CMOS 图像传感器输出图像质量恶化, 最终使得探测失效^[6]。为提高 CMOS 图像传感器在太空环境下的工作稳定性, 必须寻找新的表面结构。因此, 我们提出了一种外形类似 Delta 函数结构的势垒, 以阻止表面的暗电流。

通过 Delta 掺杂形成的势垒结构可以阻挡表面电子向体内的疏运, 实现暗电流抑制。Delta 掺杂层具有非常高的掺杂浓度, 这意味着在这一区域内部可以形成很强的电场。该电场有助于迅速分离和传输由热振动产生的电子-空穴对, 另外, Delta 掺杂还能有效减少材料表面的缺陷, 降低电子在表面复合, 而这些正是暗电流产生的主要原因。采用 Delta 掺杂形成的势垒减少暗电流, 势垒厚度仅约 3 nm, 因此必须考虑量子隧穿效应, 此时传统的扩散机制已不再完全适用。

1.3 Delta 掺杂的作用

Delta 掺杂创建了一个薄而集中的势垒, 从而使 CMOS 传感器即使在辐射环境下也能保持较好的功能。高浓度的掺杂层也可以作为屏蔽层, 阻挡高能粒子直接击中敏感的硅基质, 减轻辐射对传感器表面及其性能的影响。在 CMOS 元件中加入一个小的 Delta 掺杂势垒, 可以有效减少光电效应产生的电子在像素间的穿越, 降低电学串扰。在这个过程中, 势垒往往会成为影响电荷传输效率的阻碍, 势垒越高、越厚, 电子越难穿。在 CMOS

元件上进行 Delta 掺杂可以有效提高色彩饱和度, 以及消除人们不希望出现的光晕现象。

CMOS 的灵敏度、成像质量及暗噪声比不上 CCD, 但 CMOS 的读出速度快、读出噪声低, 并且 CMOS 使用标准的半导体集成电路工艺, 工艺成熟, 集成度高。一个 CMOS 图像传感器芯片中能包含所有的功能模块, 因而占用的空间小, 成本低, 功耗也极低(毫瓦数量级)^[6]。通过掺杂的 CMOS 性能可与 CCD 性能媲美, 表现为更高的量子效率, 在实际应用中非常有价值, 能为低能电子的检测和成像领域的进步开辟新的机遇。Delta 掺杂的电荷耦合器件在探测低能电子方面展现出巨大的潜在价值, 目前研究表明, Delta 掺杂的电荷耦合器件能对 50 eV 的低能电子响应^[6]。通过在 CMOS 图像传感器表面创建一个 Delta 掺杂层, 可以有效地解决传统 CMOS 传感器在辐射环境下由于钝化层性能变化而造成的图像传感器性能下降问题, 使其在恶劣环境中的应用成为可能^[10]。下面将从量子隧穿角度来计算掺杂厚度的理论最小值。

2 理论模型

2.1 量子隧穿

在经典物理学中, 电子不能越过比自身能量高的势垒, 只有当电子的能量超过势垒的高度时, 电子才能跨过势垒。电子的总能量由其动能和势能组成, 当电子的总能量不足以超越势垒时, 根据经典理论被外界势垒所束缚, 无法穿透。而量子力学的出现, 颠覆了这一物理概念。量子理论认为, 粒子有波粒二象性, 它们的行为可以由概率波函数所描述。在量子框架下, 即使粒子的能量低于势垒, 仍然可以计算出粒子在“经典禁区”存在的概率。这表明波函数在势垒内部拥有非零的值, 同时也表明粒子有一定的穿透势垒的可能, 当粒子能量高于势垒时, 其穿透的概率相对增大。这一量子效应被称为隧穿效应, 它在多个领域内有着广泛应用, 如扫描隧道显微镜、隧道二极管和量子阱探测器^[11]等, 这些装置的工作机制均基于隧穿效应。

2.2 模型简化与理论计算

在研究 Delta 掺杂势垒中的隧穿现象时, 为了简化问题, 假设掺杂层为截断高斯势垒, 以模拟隧穿效应^[11], 选择这种特定的势垒是为了便于比较不同掺杂势垒的隧穿结果。通过在有效质量下近似

并求解薛定谔方程, 可以得出势垒的透射系数及其相关性质:

$$\begin{cases} V = V_0 e^{-\beta^2 x^2}, x \in [-b, b] \\ V = 0, x \in \text{others} \end{cases} \quad (1)$$

式中: V 为当前势垒高度; V_0 为势垒的最大高度; β, b 代表势垒的形状及宽度的参数。粒子的波函数所满足的定态薛定谔方程为

$$\begin{aligned} \frac{-\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi}{dx^2} + V_0 e^{-\beta^2 x^2} \psi &= E \psi \\ \psi'' + \frac{2m(E - V_0 e^{-\beta^2 x^2})}{\hbar^2} \psi &= 0, x \in [0, b] \end{aligned} \quad (2)$$

式中: \hbar 为约化普朗克常数; ψ 为波函数; m 表示粒子有效质量。通过引入无量纲变量 $\xi = \alpha x$, 其中 $\alpha = (2mV/\hbar^2)^{1/2}$, 常数 $\gamma = E/V_0$, 式 (2) 就可以化简为

$$\frac{d^2 \psi}{d\xi^2} - e^{-\beta^2 \xi^2 / \alpha^2} \psi + \gamma \psi = 0, \quad |\xi| < \alpha b \quad (3)$$

这里将波函数按幂级数展开: $\psi = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \xi^n$, a_n 为每一项的展开系数, 得到电子在势垒区域的波函数

$$\begin{cases} Ae^{ikx} + Be^{-ikx}, & x < -b, \\ Cu_c(\alpha x) + Du_o(\alpha x), & |x| < b, \\ Fe^{ikx}, & x > b, \end{cases} \quad (4)$$

式中 u_e, u_o 为波函数奇偶幂级数展开, 即:

$$u_e = \sum_{n=\text{even}} a_n \xi^n = 1 + \frac{(1-\gamma)\xi^2}{2 \times 1} + \frac{[(1-\gamma)^2/2 - (\beta/\alpha)^2]\xi^4}{4 \times 3} + \dots \quad (5)$$

$$u_o = \sum_{n=\text{odd}} a_n \xi^n = \xi + \frac{(1-\gamma)\xi^3}{3 \times 2} + \frac{[(1-\gamma)^2/6 - (\beta/\alpha)^2]\xi^5}{5 \times 4} + \dots \quad (6)$$

根据边界条件, 当 $x > b$ 的时候, 不存在反射波, 因为波函数具有连续性, 根据边界条件求解系数 A, F 之间的关系, 即:

$$\frac{F}{A} = -ik\alpha e^{-2ikb} \frac{(u'_o u_e - u'_e u_o)}{(\alpha u'_o - ik u_o)(\alpha u'_e - ik u_e)} \quad (7)$$

式中: u'_o 是 u_o 的一阶导数; u'_e 是 u_e 的一阶导数。透射波概率流密度与入射波概率流密度之比称为透射系数, 用 T 表示。这个比值就是隧穿到 $x > b$ 区域的粒子在单位时间内流过垂直于 x 方向的单位面积的数目, 与入射粒子(在 $x < -b$ 区域)单位时间内流过垂直于 x 方向的单位面积的数目之比。这相当于探测到的电子数除以入射电子数, 不难得出透射系数 T 之间^[11] 的关系, 即:

$$T = \left| \frac{F}{A} \right|^2 = \frac{\gamma}{(u_0^2 + \gamma u_0^2)(u_c^2 + \gamma u_c^2)} \quad (8)$$

相比较这种方法, 一般情况下势垒高度连续变化时我们可以用下面这种方法计算: 当质量为 m 的粒子入射能量为 E 时, 假设势垒的宽度为 x , 势垒的高度为 V_0 , 可以得到粒子能够成功穿过这个势垒的概率为

$$T_1 = \frac{16E(V_0 - E)}{V_0^2} \exp\left(\int -2\sqrt{\frac{2m(V_0 - E)}{\hbar^2}} dx\right) \quad (9)$$

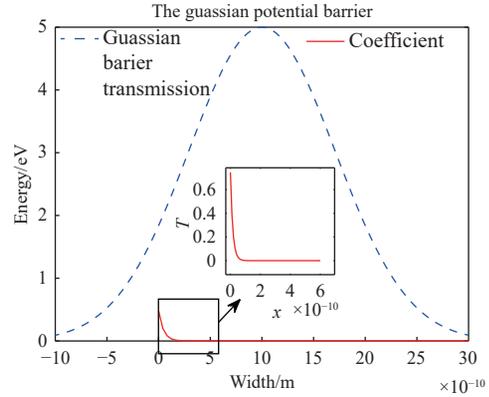
对于形状可以近似认为是三角形的势垒, 若势垒上的电场均匀, 由可得定态薛定谔方程也可以由 WKB(Wentzel-Kramers-Brmouin) 模型进行近似计算^[12]。由式 (8)、式 (9) 可以看出, 隧穿几率不受温度的影响, 主要受粒子的质量、势垒厚度、材料的禁带宽度、粒子入射能量等因素的影响, 减小粒子的有效质量, 减小势垒厚度, 降低禁带宽度, 隧穿几率都会变大^[13-15]。得到隧穿概率, 就可以根据文献 [16] 中的计算方法得出隧穿的电流。

2.3 数值计算

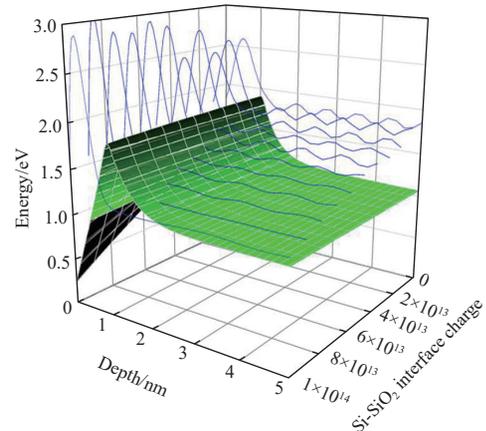
由上述计算结果可知, 温度对隧穿概率的影响并非直接相关。然而, 温度的变化可以通过多种方式间接地影响隧穿概率, 温度对隧穿的效应一般会在二阶效应下显现出来。例如影响能量分布的变化、晶格振动、势垒宽度和形状、电子分布的变化。值得注意的是: 以上效应通常只在较高温度下显著, 在常温下通常不太明显。这里我们只考虑了常温 300 K 下的电子热能。掺杂浓度增加, 势变深变陡, 电子密度分布的峰值变高, 掺杂层厚度增加, 势阱变浅, 变宽, 电子密度分布变宽, 峰值减小, 这样电子就不易穿过势垒^[17]。通过控制掺杂厚度以及掺杂浓度, 可以很好地调制隧穿概率, 从而实现器件高效地开关。隧穿波函数和隧穿概率随着掺杂厚度指数下降, 如图 4 所示。

图 4(a) 绘制了高为 5 eV 的高斯势垒的透射系数随着势垒宽度的变化趋势。可以看出, 透射系数 T 随着宽度急剧减小。其中, 红色线条表示透射系数 T , 蓝色线条表示了一个约 5 eV 高的势垒。可以看出, 透射系数在 0.5 nm~0.6 nm 处下降到接近 0。相对于势垒高度, 宽度的影响更为显著, 宽度在一个原子线宽量级隧穿概率约 10^{-1} 量级。当宽度增加到 1 nm 时, 隧穿概率约 10^{-10} 量级, 几乎可以忽略。图 4(b) 为 Delta 掺杂表面示意图^[18], z 轴表示能带高度, 蓝色线条绘制了在势垒区域的波函数, 不同高低的波函数代表能量不同, 能量越

高, 波函数距离势垒底端位置就越大。按照简并的 p-n 微扰理论计算, 将掺杂浓度为 10^{21} cm^{-3} 的重掺杂带入相关公式, 计算出耗尽区宽度仅为 0.53 nm, 这与上述计算结果一致。综上所述, 掺杂厚度约 1 nm 就能很好地抑制隧穿效应。



(a) 隧穿几率随Delta势垒宽度变化



(b) Delta掺杂探测器的仿真能带结构

图 4 Delta 掺杂波函数和隧穿概率

Fig. 4 Diagram of delta-doped wave function and tunneling probability

3 结论

在异质结构或势垒区域中施加 Delta 掺杂, 能提高势垒的高度, 阻碍跨过势垒的载流子, 从而有效减少暗电流的产生, 减少耗尽区宽度, 提高器件的性能。在硅材料表面形成一个高浓度的掺杂层, 以产生浅表面势垒, 这个势垒选择性地掺入杂质离子(如磷或硼), 这种高掺杂浓度的杂质层虽然只有 2 nm 的厚度, 但足以在半导体表面形成一个具有显著电势差的区域, 这个浅表面势垒可以有效减少暗电流的产生。浅表面势垒的存在可以减弱载流子的量子隧穿效应, 这种效应在薄栅氧层的 CMOS 器件中尤为显著。增加穿越势垒所需

的能量,还可以减少隧穿效应导致的暗电流,以及光生电子产生的串扰,可以大大提高成像性能。本文仅讨论了经典电子的隧穿现象,未涉及电子自旋对隧穿的影响。但通过隧穿概率来预测隧穿电流的关系,能够找到最佳的势垒宽度和势垒高度组合,为半导体掺杂设计提供重要指导。

参考文献:

- [1] 郑然,刘超,刘晗,等. 辐射环境下 CMOS 图像传感器的暗电流幅值分布预测方法[J]. 微电子学与计算机, 2018, 35(4): 144-148.
ZHENG Ran, LIU Chao, LIU Han, et al. Methods for prediction dark-current distribution of CMOS image sensor in radiation environment[J]. *Microelectronics & Computer*, 2018, 35(4): 144-148.
- [2] 马林东,郭旗,李豫东,等. 电子辐照导致 CMOS 图像传感器性能退化[J]. 现代应用物理, 2018, 9(4): 76-79.
MA Lindong, GUO Qi, LI Yudong, et al. Degradation of CMOS image sensor irradiated by electrons[J]. *Modern Applied Physics*, 2018, 9(4): 76-79.
- [3] JACQUOT B C, HOENK M E, JONES T J, et al. Direct detection of 100 eV-5 000 eV electrons with delta-doped silicon CMOS and electron-multiplying CCD imagers[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2012, 59(7): 1988-1992.
- [4] 乔凯,王生凯,程宏昌,等. 表面钝化膜对 BCMOS 传感器电子敏感特性影响的实验研究[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(4): 0418002.
QIAO Kai, WANG Shengkai, CHENG Hongchang, et al. Experimental study on the electron sensitivity of BCMOS sensor influenced by surface passivation film[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(4): 0418002.
- [5] NIKZAD S, YU Q M, SMITH A L, et al. Direct detection and imaging of low-energy electrons with delta-doped charge-coupled devices[J]. *Physics Letters*, 1998, 73(23): 3417-3419.
- [6] 周彦平,谢小龙,刘洋,等. CMOS 图像传感器电子辐照实验的研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(5): 520006.
ZHOU Yanping, XIE Xiaolong, LIU Yang, et al. Electron radiation experiment of CMOS image sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 520006.
- [7] 温佳起,卞进田,李欣,等. 激光干扰和损伤 CMOS 图像传感器研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(6): 379-393.
WEN Jiaqi, BIAN Jintian, LI Xin, et al. Research progress of laser dazzle and damage CMOS image sensor (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(6): 379-393.
- [8] GOIFFON V, ESTRIBEAU M, MAGNAN P. Overview of ionizing radiation effects in image sensors fabricated in a deep-submicrometer CMOS imaging technology[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, 56(11): 2594-2601.
- [9] HOENK M E, JONES T J, DICKIE M R, et al. Delta-doped back-illuminated CMOS imaging arrays: progress and prospects[C]//*Infrared Systems and Photoelectronic Technology IV*. San Diego, CA: SPIE, 2009: 187-201.
- [10] NODA K, TATSUMI T, UCHIDA T, et al. A 0.1 μm delta-doped MOSFET fabricated with post-low-energy implanting selective epitaxy[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1998, 45(4): 809-814.
- [11] AGHANDEH H, ZIABARI S A S. A study of barrier penetration in quantum mechanics[J]. *American Journal of Physics*, 1988, 56(1): 29-32.
- [12] MILLER S C, GOOD R H. A WKB-type approximation to the Schrödinger equation[J]. *Physical Review*, 1953, 91(1): 174-179.
- [13] AGHANDEH H, ZIABARI S A S. Gate engineered heterostructure junctionless TFET with Gaussian doping profile for ambipolar suppression and electrical performance improvement[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2017, 111: 103-114.
- [14] VAIDYA R G, SANKESHWAR N S, MULIMANI B G. Barrier penetration effects on thermopower in semiconductor quantum wells[J]. *AIP Advances*, 2014, 4(1): 017107.
- [15] SEABAUGH A C, ZHANG Q. Low-voltage tunnel transistors for beyond CMOS logic[J]. *IEEE*, 2010, 98(12): 2095-2110.
- [16] SAHOO S, DASH S, MISHRA G P. An extensive simulation study of Gaussian drain doped heterojunction double gate TFET[C]//2018 IEEE Electron Devices Kolkata Conference. Kolkata, India: IEEE, 2018: 283-287.
- [17] 杨双波. 掺杂浓度及掺杂层厚度对 Si 均匀掺杂的 GaAs 量子阱中电子态结构的影响[J]. 物理学报, 2013, 62(15): 403-409.
YANG Shuangbo. Effect of doping concentration and doping thickness on the structure of electronic state of the Si uniformly doped GaAs quantum well[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(15): 403-409.
- [18] NIKZAD S, JEWELL A D, HOENK M E, et al. High-efficiency UV/optical/NIR detectors for large aperture telescopes and UV explorer missions: development of and field observations with delta-doped arrays[J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2017, 3(3): 036002.