

1/f 噪声及其在二维材料石墨烯中的研究进展*

刘瑛^{1)2)†} 郭斯琳¹⁾²⁾ 张勇¹⁾²⁾ 杨鹏¹⁾²⁾吕克洪¹⁾²⁾ 邱静¹⁾²⁾ 刘冠军¹⁾²⁾

1) (国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073)

2) (国防科技大学装备综合保障技术重点实验室, 长沙 410073)

(2022 年 6 月 27 日收到; 2022 年 9 月 21 日收到修改稿)

1/f 噪声具有丰富的物理内涵, 既是科学研究的量化工具, 也是电子器件重要性能指标. 本文从通用数学形式和物理背景两个方面归纳总结 1/f 噪声模型. 首先介绍了基于马尔可夫过程和基于扩散过程的 1/f 噪声通用数学模型. 在此基础上, 溯源 1/f 噪声物理模型的发展历程, 总结五类典型物理模型, 包括 Mc Whorter 模型、Hooge 模型、Voss-Clarke 模型、Dutta-Horn 模型、干涉模型以及 Hung 统一模型. 二维材料石墨烯让 1/f 噪声研究重归学术热点, 本文梳理了当前石墨烯 1/f 噪声研究中形成的共识性研究成果, 提出石墨烯低频噪声研究的三层次分类分析模型, 分析了不同层面噪声机理研究代表性成果, 归纳总结了各层面可能的主导机制. 通过比较不同团队报道的石墨烯 1/f 噪声栅极调控特征谱型及测试条件, 分析了复杂多变栅控谱型形成原因. 基于分析结论, 为避免非本征噪声干扰, 提出了石墨烯本征背景 1/f 噪声规范性测量方案, 为厘清和揭示石墨烯 1/f 噪声机制及特性探索可行技术途径.

关键词: 1/f 噪声, 噪声机理, 石墨烯, 特征谱型**PACS:** 73.50.Td, 73.63.-b, 05.40.-a**DOI:** 10.7498/aps.72.20221253

1 引言

1/f 噪声, 又称 pink noise、flicker noise 或者 excess noise, 因噪声功率谱与频率成反比得名, 主要分布在中低频段 (<100 kHz)^[1-3]. 1/f 噪声最早发现于电子管中^[4], 后被证实是自然界中最常见的噪音之一. 人类的语音、乐音以及乐器奏乐的功率谱均呈现 1/f 特征^[5-7]. 几乎对于所有的导电材料^[8,9]、半导体材料^[10], 以及以此为基础的各类型晶体管^[11-14]、隧穿电子器件^[15-17]、集成电路镀膜连接线^[18]等, 其低频噪声均服从 1/f 特征功率谱.

一方面, 1/f 噪声抑制技术在电子产业界需求迫切. 1/f 噪声作为电子器件中低频段噪声源, 是

制约性能的关键因素. 在传感器应用中, 1/f 噪声决定了传感器的分辨率和灵敏度; 在通信系统中, 1/f 噪声可导致高频信号相位噪声; 在计算机系统中, 1/f 噪声会产生伪信号; 在量子信息科学领域, 1/f 噪声能够导致量子比特退相干, 是影响量子器件量子纠缠的主要因素之一^[19,20]. 研究 1/f 噪声机理, 从根源上抑制 1/f 噪声应用价值巨大. 另一方面, 1/f 噪声在纳米物理领域是重要量化研究工具. 噪声无用是长期普遍存在的噪声问题认知误区^[21,22]. 实际上, 噪声是微观物理现象的重要宏观指示, 其背后包含了丰富的物理机制. 早在 1998 年, 介观物理学奠基人之一 Rolf Landauer 就在《自然》撰文提出“*The noise is the signal*”, 并预言噪声将是材料特性以及其他许多未解科学问题的有效量

* 国家自然科学基金 (批准号: 12102461) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liuying@nudt.edu.cn

化研究工具^[23]. 由于 $1/f$ 噪声敏感于电子器件材料缺陷、杂质和污染等, 在微电子、纳米材料等领域 $1/f$ 噪声可以作为研究电子器件内部材料损伤、缺陷动力学特征以及载流子输运的重要表征工具. 同时, $1/f$ 噪声的敏感特性还可被应用于研制生化、气敏传感器.

无论是噪声抑制, 还是作为科学工具, 准确清晰的 $1/f$ 噪声产生机制是研究基础. 主流观点将 $1/f$ 噪声产生机制分为两类: 载流子数涨落和迁移率涨落. 遗憾的是, 在实际材料和器件中, 两种机制如何实际发挥作用以及相互影响仍然复杂多变, 导致 $1/f$ 噪声机理备受争论, 相关研究一度陷入低谷. 石墨烯的出现为 $1/f$ 噪声机理研究提供了绝佳平台. 石墨烯仅单原子厚度, 且可实现层数的原子级操纵; 石墨烯载流子极性和浓度可栅极调控; 裸露外层载流子与晶格缺陷、吸附物等散射中心作用强烈等等. 理论预计, 石墨烯的优异操控特性可减少实验变量, 为揭示 $1/f$ 噪声机理带来曙光.

本文从经典 $1/f$ 噪声理论建模出发, 阐述 $1/f$ 噪声理论模型演变过程, 重点研究分析基于二维材料石墨烯平台开展 $1/f$ 噪声实验的最新研究进展以及存在的关键问题, 为 $1/f$ 噪声机理研究的进一步发展指明必要方向.

2 $1/f$ 噪声理论模型

2.1 通用数学模型

$1/f$ 噪声独特之处在于其幅值谱与 $1/f^\alpha$ 成正比. 一个好的噪声模型必须能够较好地反映 $1/f$ 噪声谱的频谱特点. 目前, 不考虑具体的物理图像, 在纯粹的数学形式上, 存在两种主流数学模型描述 $1/f$ 形式的噪声功率谱: 基于马尔可夫过程的 $1/f$ 数学模型和基于扩散过程的 $1/f$ 数学模型.

2.1.1 基于马尔可夫过程的 $1/f$ 数学模型^[24]

设随机过程 $\{x(t), t \in T\}$ 为马尔可夫过程, 则其自相关函数形式可表示为

$$R_{x_1, x_2} = R_0 e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

其中, R_0 为常系数, $\lambda = \tau^{-1}$, τ 表示随机过程状态转移时间, 也称“特征时间”. (1) 式自相关函数功率谱具有如下所示洛伦兹函数形式 (Lorentzian form):

$$S_x(f) = \frac{4\sigma^2\tau}{1 + (2\pi f\tau)^2}, \quad (2)$$

其中, $\sigma^2 = \overline{(x - \bar{x})^2}$ 表示随机过程方差.

1939 年, 学者 Surdin^[25] 找到一组特征时间 τ 的分布函数形式:

$$D(\tau) \propto \frac{1}{\tau}. \quad (3)$$

在满足该分布条件下, 通过对特征时间 τ 积分, 即得马尔可夫随机涨落下的 $1/f$ 型功率谱密度函数:

$$\begin{aligned} S_x(f) &\propto \int_0^\infty \frac{4\sigma^2\tau}{1 + (2\pi f\tau)^2} D(\tau) d\tau \\ &= \frac{4\sigma^2}{2\pi f} \arctan(2\pi f\tau) \Big|_0^\infty = \sigma^2 \frac{1}{f}. \end{aligned} \quad (4)$$

2.1.2 基于扩散过程的 $1/f$ 数学模型^[26]

设随机过程 $\{x(t), t \in T\}$ 与某空间分布的物理量的密度 $c(r, t)$ 有如下函数形式:

$$x(t) = \int g(\mathbf{r})c(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r}, \quad (5)$$

其中, $g(\mathbf{r})$ 是 x 与 $c(\mathbf{r}, t)$ 的耦合系数.

假设 $c(\mathbf{r}, t)$ 满足扩散方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} c(\mathbf{r}, t) = D\nabla^2 c(\mathbf{r}, t) + f(\mathbf{r}, t), \quad (6)$$

其中, $f(\mathbf{r}, t)$ 是随机驱动项, D 是常数, ∇^2 是对空间坐标的拉普拉斯算子. 在波矢空间, 可求得特征解:

$$c_k(\omega) = \frac{f_k(\omega)}{i\omega - D\mathbf{k}^2}. \quad (7)$$

对应的随机过程功率谱密度函数为

$$S_x(f) = \int g_k^2 \frac{f_k^2(\omega)}{\omega^2 + (D\mathbf{k}^2)^2} d\mathbf{k}. \quad (8)$$

(8) 式虽然没有直接给出 $1/f$ 谱型, 但其形式与 (4) 式相似, 通过合理设计 g_k 和 f_k , 可以得到 $1/f$ 谱型. Richardson^[26] 在研究粗糙表面接触电阻噪声得到了 $1/f$ 谱型; Weissman^[27] 采用类似 Richardson 的方法得到相似结果. 下文即将介绍的 Voss-Clarke 模型正是基于扩散过程的 $1/f$ 噪声物理模型.

2.2 物理模型及演变

前文从数学形式上提出了两种可能生成 $1/f$ 噪声谱的过程, 但没有关联具体的物理过程. 实验中普遍观测到的 $1/f$ 噪声的物理机制和源头仍不清晰, 是学界期望厘清的基本问题. 如图 1 所示, 1957 年, Whorter 课题组^[10] 在锗半导体噪声研究中以介电层缺陷为突破口, 率先提出了一种物理可

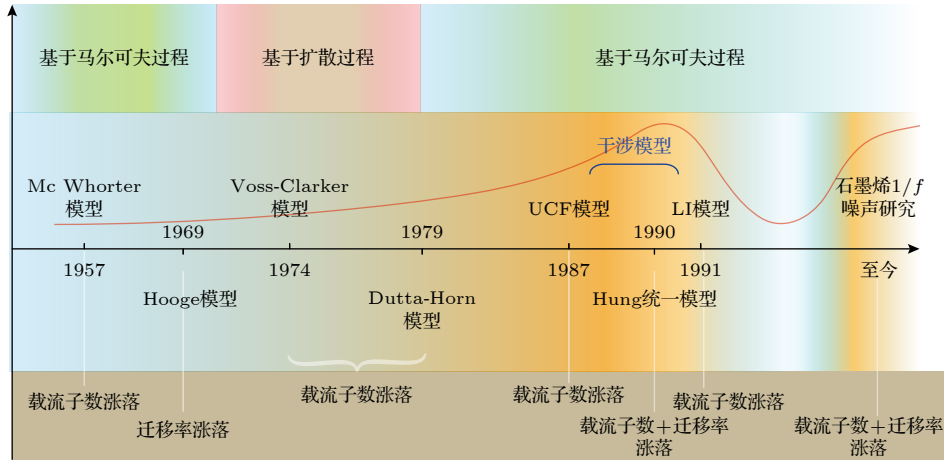


图 1 $1/f$ 噪声模型研究时间线和趋势

Fig. 1. Timeline of the important events in the history of $1/f$ noise model research and its trend.

解释 $1/f$ 噪声模型 (Mc Whorter 模型). 随后一直到 2000 年前后, $1/f$ 噪声物理机理建模研究一直颇受关注, 得以快速发展. 但是, 由于 $1/f$ 噪声机理复杂多变, 争论较多, 研究热度逐渐降低. 随着石墨烯为代表的二维材料兴起, 在单个原子层上或者通过操纵原子层数开展实验为 $1/f$ 噪声机理研究提供了全新途径, 掀起了研究的新热潮. 下文首先根据 $1/f$ 噪声模型研究的时间线介绍典型 $1/f$ 噪声模型.

2.2.1 Mc Whorter 模型^[10]

对于晶体管, 其半导体导电通道与顶栅之间有一层氧化介电层, 层中缺陷近似均匀分布. Whorter 课题组^[10] 研究发现, 如果半导体-介电层界面附近载流子与缺陷之间发生隧穿事件, 则该过程可利用马尔可夫过程描述, 且隧穿时间满足 (3) 式描述的特征时间分布, 从而为晶体管 $1/f$ 噪声的形成找到了一种可能的物理机制.

导电通道电子在隧穿效应下到达距离为 s 的缺陷的隧穿时间为

$$\tau = \alpha e^{\beta s}, \quad (9)$$

其中, α, β 为常数. 假设介电层缺陷分布函数为 $X(s)$, 对于均匀分布密度为 $dX/ds = C$. 特征时间常数的分布为

$$D(\tau) = \frac{dX}{d\tau} = \frac{dX}{ds} \frac{ds}{d\tau} = \frac{C}{\beta} \frac{1}{\tau} \propto \frac{1}{\tau}. \quad (10)$$

如图 2(a) 所示, 不同的距离具有不同的特征时间 τ . 单个电子与缺陷之间的隧穿噪声正是 (2) 式所描述的洛伦兹谱型噪声, 如图 2(b) 所示, 其又

被称为 G-R 噪声或者随机电报噪声. 洛伦兹函数对 $D(\tau)$ 积分即可得到 $1/f$ 型功率谱, 正如图 2(c) 所示, 大量 G-R 噪声叠加得到 $1/f$ 形式的包络 (图中黑色虚线).

由于仅考虑电子-介电层库仑缺陷隧穿, 忽略带电库仑缺陷对载流子运动的调制, Mc Whorter 模型属于典型的载流子数涨落机制下的 $1/f$ 噪声模型^[10]. Mc Whorter 模型所描绘的隧穿机制物理图景明晰, 且与实验观测 $1/f$ 谱型相符, 因此被广泛引用.

随着微纳工艺进步, MOS 器件制备从微米进入纳米水平. 在纳米 MOS 晶体管低频噪声特性研究工作中, Kirton 和 Uren^[28] 发现, 随着器件尺寸的显著减小, 尽管晶体管栅氧化层缺陷数目往往为个位数, 但仍可观测到 $1/f$ 噪声. 此时, 晶体管源漏电子隧穿距离仅可取到几个离散值, 不足以形成隧穿时间常数 τ 的宽范围分布. 经研究, 他们引入热激发状态下的缺陷捕获-发射界面修正特征时间常数. 在温度 T 下, 势垒隧穿激发能 ΔE_b 所对应的载流子捕获截面为

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E_b}{k_B T}\right). \quad (11)$$

捕获时间常数, 即修正后的特征时间为

$$\tau = \frac{1}{nv\sigma} = \tau_0 \exp\left(\frac{\Delta E_b}{k_B T}\right), \quad (12)$$

其中, $\tau_0 = 1/nv\sigma_0$, n 表示缺陷数, v 表示载流子平均热运动速度, k_B 表示玻尔兹曼常数. 实测结果表明, σ_0 分布范围跨度近 4 个数量级, $\exp(-\Delta E_b/k_B T)$ 分布范围跨度接近 7 个数量级, 因此俘获截面 σ 宽

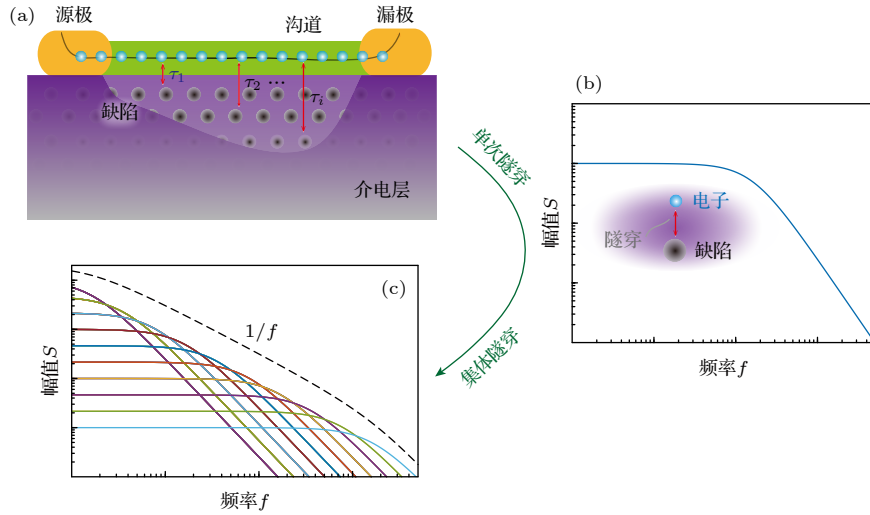

 图 2 (a) 载流子随机隧穿示意图; (b) 单次隧穿产生 G-R 噪声; (c) 集体隧穿形成 $1/f$ 噪声

Fig. 2. (a) The diagram of carrier random tunneling; (b) generation of G-R noise by single tunneling event; (c) $1/f$ type noise formation by collective tunneling events.

范围分布导致俘获时间 τ 同样具有宽范围分布, 分布范围跨度接近 11 个数量级, 满足产生 $1/f$ 噪声所需时间分布.

2.2.2 Hooge 噪声模型

1969 年, Hooge 在提出了一般性的 $1/f$ 噪声描述性模型. 其假设噪声源自于导体内部, 归纳 $1/f$ 噪声模型通用范式如下:

$$S_V(f) = \frac{\alpha_H V^\gamma}{N f^\beta}, \quad (13)$$

其中, V 表示样品两端偏置电压; α_H 表示经验常数, 也称“Hooge 参数”, 对于金属薄膜, 该参数的量级通常在 10^{-3} — 10^{-2} 之间; 指数 γ 和 β 的取值通常分别为 2 和 1.

Hooge 模型描述的噪声机制是, 载流子受晶格声子模散射后, 迁移率 μ_{lattice} 涨落, 从而产生 $1/f$ 噪声. 通常 Hooge 参数与迁移率平方成正比, 即 $\alpha_H \propto \mu_{\text{lattice}}^2$ [29]. Hooge 模型以其简洁形式和通用性, 在噪声分析中被广泛引用.

2.2.3 Voss-Clarker 模型

在 Richardson [26] 扩散理论启发下, 基于热扩散机制, Voss 等 [9,30,31] 提出了热平衡系统中热涨落 (也称, 焓涨落) 下的 $1/f$ 噪声模型.

Voss 等 [9,30,31] 构建了新的时空不相关随机量 $P(\mathbf{r}, t)$, $P(\mathbf{r}, t)$ 驱动扩散系统能量涨落, 且满足:

$$\overline{P(\mathbf{r} + \mathbf{s}, t + \tau) P(\mathbf{r}, t)} \propto \delta(\mathbf{s}) \delta(t).$$

从而, 修改扩散方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} T(\mathbf{r}, t) = D \nabla^2 T(\mathbf{r}, t) + \frac{P(\mathbf{r}, t)}{c}. \quad (14)$$

设扩散系统的尺寸为 $l_1 > l_2 > l_3$, 其自然频率 $\omega_i = D/2l_i^2$ 有. Voss 等 [9,30,31] 求解功率谱发现, 在 $\omega_1 < \omega < \omega_2$ 区域内, 电阻端电压功率谱密度函数具有 $1/f$ 形式:

$$\frac{S_V(f)}{V^2} = \frac{\beta k_B T^2}{C_V [3 + 2 \ln(l_1/l_2)] f}. \quad (15)$$

该模型适用于三维金属材料, 在低维材料中存在较大偏差.

2.2.4 Dutta-Horn 模型 [8,21]

在利用 Voss-Clarker 模型解释 $1/f$ 噪声与样品温度的关系时, Dutta 和 Horn [21] 研究发现: 室温下, Voss-Clarker 模型无法较好拟合金属导体 $1/f$ 噪声与温度关系, 且室温下金属主导噪声随温度涨落. 同 Kirton 和 Uren [28] 一样, 考虑到热激发特征时间常数为激发能函数 $\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{\Delta E_b}{k_B T}\right)$, 以马尔可夫随机涨落数学模型为基础, Dutta 和 Horn [21] 从热激发激活能分布函数 $D(\Delta E_b)$ 出发, 构建新的噪声功率谱 [8,21]:

$$\begin{aligned} S_x(\omega) &\propto \int_0^\infty \frac{\tau}{1 + (\omega\tau)^2} D(E) d\tau \\ &= \int_0^\infty \frac{\tau_0 e^{[\Delta E_b/(k_B T)]}}{1 + \omega^2 \tau_0^2 e^{[2\Delta E_b/(k_B T)]}} D(\Delta E_b) d\Delta E_b. \end{aligned} \quad (16)$$

通过一定程度近似, 该功率谱具有 $1/f$ 谱型:

$$S_x(\omega) \propto \frac{k_B T}{\omega} D(\Delta \tilde{E}_b). \quad (17)$$

如果 $D(\Delta \tilde{E}_b) = \text{常数}$, 功率谱密度函数恰好呈 $1/f$ 谱型率, 且 $S_x \propto T$ 的关系与实验结果一致. Dutta-Horn 模型反映了样品中大量两能级系统 (two-level systems, TLS) 的集体热激发行为. 每一个 TLS 具有不同的激发能, 对应一个特定时间常数的洛伦兹谱型.

2.2.5 干涉模型 [29,32–34]

干涉噪声模型属于迁移率涨落主导的噪声机制. 如图 3 所示, 根据载流子相位纠缠长度 L_φ 与平均自由程 L_{mfp} 的相对大小, 可将干涉模型分为两类 [34,35]: 当待测样品洁净, 且 $L_\varphi \ll L_{\text{mfp}}$, 电子波的干涉仅发生在单个缺陷运动所致的单次散射后, 适用局域干涉模型 (local interference model, LI 模型); 当待测样品杂质较多, 且 $L_\varphi \gg L_{\text{mfp}}$, 电子波的干涉发生在电子与多个缺陷运动所致的多次散射活动中, 适用普适电导涨落模型 (universal conductance fluctuation model, UCF 模型).

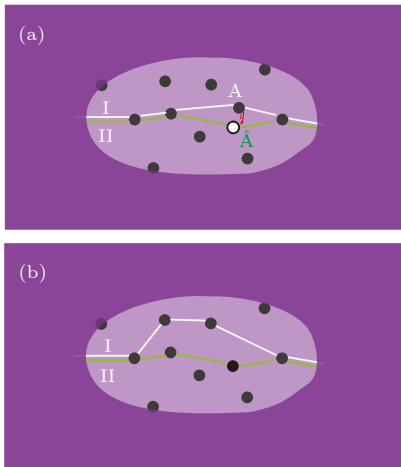


图 3 载流子干涉示意图 (a) 局域干涉; (b) UCF 干涉
Fig. 3. schematic of carrier interference: (a) local interference effect; (b) the universal-conductance-fluctuation interference effect.

对于 LI 模型, 所有缺陷或杂质散射截面涨落所致噪声幅值可表述如下:

$$\frac{S_R}{R^2} \propto \frac{\langle \Delta R^2 \rangle}{R^2} = \frac{1}{N} \frac{n_m}{n} (n l_{\text{mfp}} \beta_c \sigma)^2 \quad (18)$$

其中, n_m 为可动散射中心的密度; N 是样品总原子数; $n = N/V$ 表示原子密度; σ 表示散射截面均值; β_c 为各向异性参数, 表示不同缺陷的有效“散射功

率 (scattering power)”. LI 噪声模型反映了电子-声子强烈相互作用.

对于 UCF 模型, 所有缺陷或杂质所致噪声幅值可表述如下:

$$\frac{S_R}{R^2} \propto \frac{\langle \Delta R^2 \rangle}{R^2} = \frac{1}{N} \frac{n_m}{n} \sigma (m^*/h)^2 (v_F^7 \tau_{\text{in}}^3 / 27 l_{\text{mfp}}^3)^{1/2}, \quad (19)$$

其中, m^* 表示电子有效质量, v_F 表示费米速度, τ_{in} 表示非弹性散射时间常数.

2.2.6 Hung 统一噪声模型 [36]

上述噪声模型要么依据载流子数涨落推导, 要么依据迁移率涨落推导. 关于 $1/f$ 模型的研究, 学界希望能够找到一种模型, 能够同时包含载流子数涨落和迁移率涨落. 1990 年, Hung 等 [13,37] 综合考虑载流子数噪声和表面迁移率噪声影响机理, 提出新的统一 $1/f$ 噪声模型:

$$S_{I_d}(f) = \frac{k_B T I_d^2}{\gamma f W L} \left[\frac{1}{n} + \alpha \mu \right]^2 N_t(E_{\text{fn}}), \quad (20)$$

其中, T 表示绝对温度, γ 表示波函数在空间的衰减系数, L, W 分别为样品长宽, n 表示载流子浓度, $N_t(E_{\text{fn}})$ 表示在费米面附近的有效“杂质陷阱”密度, μ 表示载流子有效迁移率. 根据 Natthiessen 准则, 可得:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_B} + \frac{1}{\mu_{\text{sr}}} + \frac{1}{\mu_{\text{ph}}} + \frac{1}{\mu_{\text{Cit}}} = \frac{1}{\mu} + \alpha n_t, \quad (21)$$

其中, $\mu_{\text{Cit}} = 1/(\alpha n_t)$ 表示受到 SiO_2/Si 界面陷阱电荷库仑散射的载流子的迁移率; $\mu_B, \mu_{\text{sr}}, \mu_{\text{ph}}$ 分别表示受到带电杂质散射的载流子迁移率、受到表面粗糙度散射的载流子迁移率和受到声子散射的载流子迁移率. 参数 α 是载流子浓度的函数, 反映了载流子和陷阱中被囚禁电荷的库仑作用强度.

研究发现, 由于屏蔽效应, MOSFET 中 μ_{Cit} 随着反转层载流子浓度的增大而增大. Koga 等 [37] 报道 $\mu_{\text{Cit}} \propto \sqrt{n}/n_t$. Vandamme 和 Vandamme [38] 从库仑散射制约的迁移率的相关研究中进一步导出:

$$\mu_{\text{Cit}} = \mu_{\text{C0}} \frac{\sqrt{n}}{n_t},$$

其中, μ_{C0} 的典型值为 $5.9 \times 10^8 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$. 此时:

$$S_{I_d}(f) = \frac{k_B T I_d^2}{\gamma f W L} \left[\frac{1}{n} + \frac{\mu}{\mu_{\text{C0}} \sqrt{n}} \right]^2 N_t(E_{\text{fn}}). \quad (22)$$

上述噪声模型中显式包含载流子浓度 n 和迁移率 μ , 同时, 还引入了费米面附近的有效“杂质陷

阱”密度 $N_t(E_m)$, 其是进行低频噪声分析的有利工具.

国内庄奕琪教授团队在纳米 MOS 晶体管 $1/f$ 噪声特性和机理方面开展了持续且深入的研究工作, 对 $1/f$ 噪声机理与统一模型方面提出了独到的见解, 对最新的基于二维材料石墨烯的 $1/f$ 噪声机理研究有指导意义. 该团队张鹏博士^[39] 提出将纳米 MOS 晶体管低频噪声成分分解为 3 类: 背景 $1/f$ 噪声、类 $1/f$ 噪声和 RTS 噪声. 其中, RTS 噪声源于栅氧化层陷阱对载流子的捕获-发射; 类 $1/f$ 噪声是不同陷阱 RTS 噪声的叠加; 背景 $1/f$ 噪声则源自载流子迁移率涨落. 在大多数情况下, RTS 噪声以及类 $1/f$ 噪声强烈, 掩模背景 $1/f$ 噪声, 只有通过改善器件质量, 将载流子数涨落导致的 RTS 噪声和类 $1/f$ 噪声尽可能抑制, 背景 $1/f$ 噪声及其背后的载流子迁移率涨落机制才能占主导, 并被观测到.

可推断, 大量的关于 $1/f$ 噪声机制研究实际证实 $1/f$ 噪声物理机制不唯一, 实测器件低频噪声是不同机制下的多源噪声集合, 器件材料、结构、环境、测试条件等不同将导致噪声形成的主导机制不同, 反映为低频噪声“变化多端”的特性. 特别值得指出的是, 庄奕琪教授团队关于低频噪声分解分类分析思想对于厘清不同 $1/f$ 噪声机制极具价值, 近年来, 国际上关于石墨烯 $1/f$ 噪声机制研究逐渐朝着这一方向演进.

3 基于石墨烯平台的 $1/f$ 噪声研究进展

针对石墨烯开展 $1/f$ 噪声特性研究是当前逐渐兴起的研究热点. 一方面, 借助石墨烯良好的可操控特性, 便于开展 $1/f$ 噪声机理探索研究, 厘清争论; 另一方面, 摸清石墨烯新材料噪声特性, 有助于提升石墨烯基电子器件性能. 比如, 对于石墨烯传感器, $1/f$ 噪声水平制约其灵敏度; 对于石墨烯高频电子器件, $1/f$ 噪声与高频信号耦合, 导致高频信号相位噪声. 不同于白噪声, $1/f$ 噪声不可通过长时平均消除, $1/f$ 噪声水平高低对石墨烯器件性能影响突出. 石墨烯 $1/f$ 噪声机理及特性仍有诸多问题不明, 是当前学界研究的重点.

3.1 主要课题组

关于石墨烯 $1/f$ 噪声研究报道最早可追溯到

2008 年 Lin^[40] 的研究工作. 由于石墨烯二维晶格和外层裸露电子为溯源 $1/f$ 噪声的发生机制提供了绝佳平台, 石墨烯 $1/f$ 噪声研究逐渐受到关注, 并生长为研究热点. 目前, 开展石墨烯 $1/f$ 噪声研究的主要课题组包括加州大学 Alexander A. Balandin 课题组、印度科学院 Ghosh Arindam 课题组、芬兰阿尔托大学 Pertti Hekonen 课题组、意大利比萨大学 B Pellegrini 课题组等等. 中国科学院微电子研究所金智课题组以及中国科技大学郭国平课题组也涉足了相关研究.

3.2 共识性研究结论

石墨烯 $1/f$ 噪声频率范围约为 1—100 kHz^[41–43]. 与传统半导体器件噪声特性类似, $1/f$ 噪声幅值与电流的平方成正比^[44], 表明在石墨烯中, 偏置电流不会带来额外的噪声, 仅放大噪声, 让噪声更可见. 有研究表明, 石墨烯器件中金属接触所致 $1/f$ 噪声远小于石墨烯材料自身 $1/f$ 噪声^[45]. 石墨烯 $1/f$ 噪声与石墨烯层数相关. 由于外层电子对环境的屏蔽作用, 双层石墨烯 $1/f$ 噪声小于单层石墨烯噪声^[40]. 随着石墨烯层数的增加, $1/f$ 噪声逐渐减小. 当层数小于 7 层时, 石墨烯 $1/f$ 噪声表现为表面效应; 当层数大于 7 层时, 表现为体效应^[46]. 较之常规半导体材料, 石墨烯具有更低的 $1/f$ 噪声水平^[47,48]. 若以 $A = (1/N) \sum_{i=1}^N f_i S_i / I_i^2$ 定义 $1/f$ 噪声幅值, 微米级尺寸石墨烯样品噪声幅值 A 常在 10^{-9} — 10^{-7} 范围内^[45].

3.3 基于石墨烯平台的 $1/f$ 噪声模型研究进展

石墨烯具有高迁移率、载流子浓度栅极可调、表面洁净度可控、厚度原子级精准控制等诸多优异特性, 为 $1/f$ 噪声机理研究提供了良好的观测平台, 但 $1/f$ 噪声产生的物理机制不唯一, 笼统讲“石墨烯 $1/f$ 噪声机制或模型如何”既不严谨, 也难以给出清晰且合理的解释. 与传统材料 $1/f$ 噪声研究类似, 在石墨烯 $1/f$ 噪声早期研究工作中往往出现一些模糊不清、存有争议的实验结果, 这一点在下文介绍的石墨烯 $1/f$ 噪声栅极调控特征谱型中表现尤为明显. 随着认识的逐步深入以及实验设计的进步, 笔者总结发现石墨烯 $1/f$ 噪声机制及特性研究事实上出现分化, 本文受庄奕琪教授团队关于低频

噪声分解分类分析思想启发, 提出石墨烯低频噪声研究的三层次分类分析模型, 从 3 个层面梳理归纳石墨烯 $1/f$ 噪声产生机制: 本征背景 $1/f$ 噪声、类 $1/f$ 噪声和洛伦兹类噪声.

本征背景 $1/f$ 噪声层面指, 仅考虑石墨烯材料和器件结构, 排除测试条件、器件环境等干扰因素, 接近理想实验条件下的石墨烯 $1/f$ 噪声产生机制研究. 此处所述器件环境因素包括石墨烯表面污染物、基底缺陷态等. 退火清洁悬空石墨烯以及高质量氮化硼包覆石墨烯具有极高洁净度, 是观测本征背景 $1/f$ 噪声的优异平台. 目前, 越来越多实验证据支持, 石墨烯本征背景 $1/f$ 噪声可能源于迁移率涨落. 如果载流子数涨落是 $1/f$ 噪声产生的主导机制, 根据 Huang 统一模型公式 (22), 噪声幅值理论上与载流子浓度的平方 (n^2) 成反比, 即在狄拉克点附近噪声幅值最高, 这与当前大部分实验结果不符.

如图 4 所示, Zhang 等 [47] 在退火清洁后的悬空石墨烯中观测到噪声幅值与载流子浓度呈正相关, 且狄拉克点附近噪声幅值最低. 这证明石墨烯本征背景 $1/f$ 噪声可能不是源自载流子数涨落, 而是迁移率涨落. 同样, 根据 Hooge 模型公式 (13) 推断, 本征背景 $1/f$ 噪声应与石墨烯中载流子总数 N 成反比, 即与载流子浓度呈反比, 因此此处观测到的石墨烯本征背景 $1/f$ 噪声也与 Hooge 模型不符合. 笔者在狄拉克点附近区域及远离狄拉克点区域分别拓展了 Hooge 模型. 在狄拉克点附近区域, 电子运动主要受库仑散射作用, 借鉴石墨烯电子-空

穴 puddle 串并联电阻网络模型, 狄拉克点电子-空穴对基本平衡时, 噪声出现局部极小值; 随栅极电压增大, 电子-空穴对失衡, 噪声逐步增大. 在远离狄拉克点区域, 笔者认为洁净石墨烯载流子迁移率主要受短程无序散射机制 (包括晶格缺陷、边界缺陷等) 影响, 库仑散射源为代表的长程散射中心 (如带电杂质等) 量少可忽略, 原 Hooge 模型中系数修正为

$$\frac{\alpha_H}{N} \propto \left(\frac{1}{\mu_s}\right)^\delta / N \propto V_g^{\delta-1}, \quad (23)$$

其中, $\delta > 1$. 该模型可解释实测本征背景 $1/f$ 噪声幅值随栅压增大而增大现象.

Hossain 等 [49] 于 2013 年研究低能量电子辐照对石墨烯 $1/f$ 噪声影响时, 发现噪声幅值随辐照的增大而减小, 并推测主因在于辐照增加散射中心, 导致电子平均自由程减小, 引起石墨烯迁移率变化. 为了证实该猜想, Rehman 等 [50] 于 2022 年实施了氮化硼包覆石墨烯几何磁阻低频噪声测试实验, 发现噪声幅值随磁场强度非单调变化特性且在接近 $\mu_0 B = 1$ 处出现噪声低谷现象, 如图 5 所示. 这是验证迁移率涨落为洁净石墨烯本征背景 $1/f$ 噪声主导机制的直接证据.

2015 年, Hakonen 教授团队 [51] 在退火清洁后的带状悬空双层石墨烯中观测到极低 $1/f$ 噪声 (如图 6 所示) 可能是被忽视的本征背景 $1/f$ 噪声. 但其栅极调控特征谱型对载流子浓度变化几乎不敏感, 如图 6(c) 蓝色数据点所示, Hakonen 等人将其归因于电极接触电阻噪声.

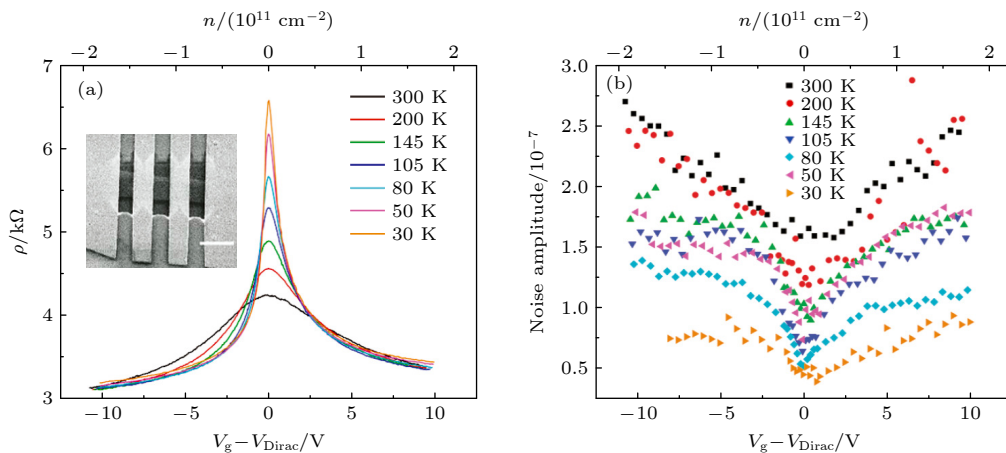


图 4 (a) 不同温度下悬空石墨烯电阻栅极调控特性曲线; (b) 不同温度下石墨烯 $1/f$ 噪声栅极调控特征谱型

Fig. 4. (a) Resistivity vs. gate voltage in suspended device at different temperatures; (b) noise amplitude vs. gate voltage in suspended device at different temperatures.

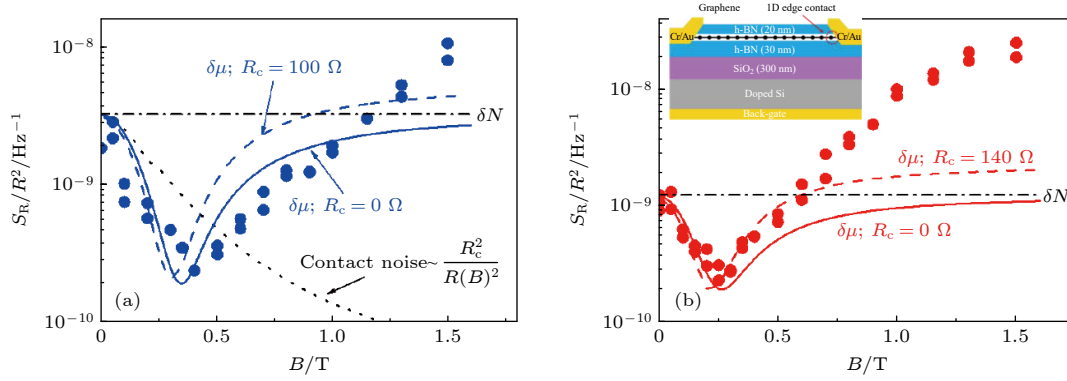


图 5 (a) 300 K 下石墨烯噪声谱密度磁场调控特性; (b) 200 K 下石墨烯噪声谱密度磁场调控特性

Fig. 5. (a) Relative noise spectral density as a function of the magnetic field at $T = 300\text{ K}$; (b) relative noise spectral density as a function of the magnetic field at $T = 200\text{ K}$.

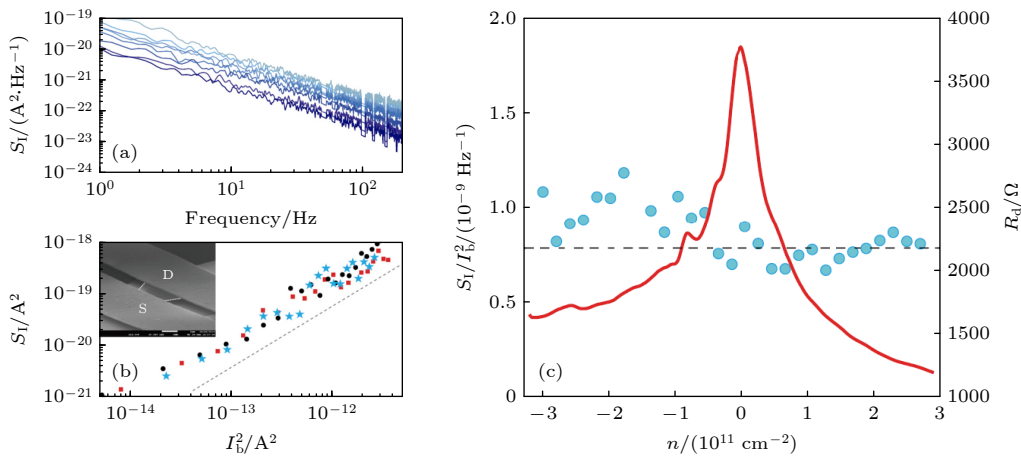


图 6 (a) 不同偏置电流下的石墨烯 $1/f$ 噪声; (b) 石墨烯噪声幅值与电流关系; (c) 噪声幅值 (蓝色) 及电阻 (红色) 与载流子浓度关系

Fig. 6. (a) $1/f$ noise in graphene under different current bias values; (b) the relation between noise power and bias current; (c) resistance and low frequency noise characteristics with respect to charge carrier density.

类 $1/f$ 噪声层面指, 在本征背景噪声基础上, 源自环境因素的大量洛伦兹类噪声线性叠加所致 $1/f$ 噪声产生机制研究. 除 Xu Du 课题组 Yan Zhang 博士等以及 Balandin 课题组 Rehman Adil 博士等的实验工作外, 绝大部分关于非洁净石墨烯 $1/f$ 噪声研究工作可能划归为类 $1/f$ 噪声层面的研究更为合理. 在类 $1/f$ 噪声层面, $1/f$ 噪声机理主要取决于环境因素, 载流子数涨落与迁移率涨落两种机制可能兼而有之, 环境因素复杂多变导致实验观测中噪声特性变化多端. 印度理工学院 Ghosh 教授团队^[52] 在该层面的研究工作比较富有创见. 该团队将石墨烯 $1/f$ 噪声栅极调控作为与石墨烯能带特性紧密联系的本征特性, 提出将非洁净石墨烯 $1/f$ 噪声分为配置噪声 (configuration noise, N_{con}) 和交换噪声 (charge exchange noise, N_{ex})

两类, 即:

$$\frac{S_{\sigma}(f)}{\sigma^2} = N_{\text{ex}} + N_{\text{con}},$$

$$N_{\text{ex}} = A \left(\frac{d\sigma}{dn} \right)^2,$$

$$N_{\text{con}} = BN_{\text{c}}(n), \quad (24)$$

其中, 配置噪声源自于二氧化硅基底缺陷囚禁的电荷在不同缺陷之间的迁移、表面吸附物的迁移扩散引起的散射截面涨落, 交换噪声源自石墨烯载流子向基底缺陷随机隧穿. Ghosh 团队^[52] 构造配置噪声采用了前文的“局域干涉模型 (LI 模型)”, 即 $N_{\text{c}}(n) \propto (l\sigma)^2$; 构造交换噪声结合了 Mc Whorter 模型以及统一噪声模型, 考虑载流子数涨落及载流子隧穿后散射截面变化引起的迁移率涨落. 但通过计算, Ghosh 团队^[52] 认为配置噪声中的载流子数

涨落部分以及载流子-迁移率联合涨落部分量级远小于迁移率涨落部分, 可忽略. 因此上述模型实际上主要描述了 $1/f$ 噪声的迁移率涨落机制, 其中配置噪声及交换噪声与载流子浓度的变化关系见图 7(a). 基于该模型, 在二氧化硅基底上的非洁净单层石墨烯样品中, 分离得到的配置噪声量级远高于交换噪声, 如图 7(d) 所示.

Kaverzin 等^[53] 利用二氧化硅基底石墨烯样品开展实验, 在退火和未退火样品中分别观测到 V 型和 M 型噪声栅极调控特征谱型, 在吸附水和吸附后退火样品中分别观测到 M 型和 V 型噪声栅极调控特征谱型. 他们尝试引入散射机制对结果进行了解释, 认为在 V 型样品中, 载流子短程无序散射占主导, 此时, 归一化噪声谱与载流子浓度的平方成正比:

$$\frac{S_R(f)}{R^2} \propto n^2. \quad (25)$$

在 M 型样品中, 载流子长程无序散射占主导, 此时, 归一化噪声谱与载流子浓度的平方成反比:

$$\frac{S_R(f)}{R^2} \propto \frac{1}{n^2}. \quad (26)$$

而狄拉克点附近的噪声局部极小值, 则认为源于电

子-空穴 puddle, 可利用电阻渗流网络模型算出狄拉克点极小值. 其关于非洁净石墨烯噪声机制的定性解释与前文 Xu Du 课题组在洁净悬空石墨烯噪声研究中的思路基本一致, 不同在于载流子浓度项的指数量值.

2021 年, Hakonen 教授团队^[51] 进一步报道了利用洁净的 Corbino 状悬空单层石墨烯平台开展的惰性气体分子 Ne 吸附前后噪声栅控特性研究, 如图 8 所示. 通过蒙特卡洛仿真分析, 他们认为在 $10 \text{ K} < T < 20 \text{ K}$ 时, 解吸附的 Ne 分子在石墨烯表面做扩散运动, 是导致低频噪声显著提升的主导机制. 中性分子 Ne 在石墨烯表面作为短程散射中心, 其扩散运动, 增大样品中散射截面的涨落, 属于迁移率噪声. 笔者团队曾参与该项工作的讨论.

Pellegrini 等^[54-56] 针对文献报道中常见的 Λ 型和 M 型栅极调控特征谱型开展理论分析, 建立基于隧穿机制的载流子数涨落噪声模型:

$$\frac{S_I}{I^2} f^\gamma \propto \left(\frac{1}{n+p} \frac{P-N}{P+N} \right)^2, \quad (27)$$

其中, P, N 分别表示空穴、电子总数, p, n 分别表示两种载流子浓度. 引入石墨烯色散关系后, 可对

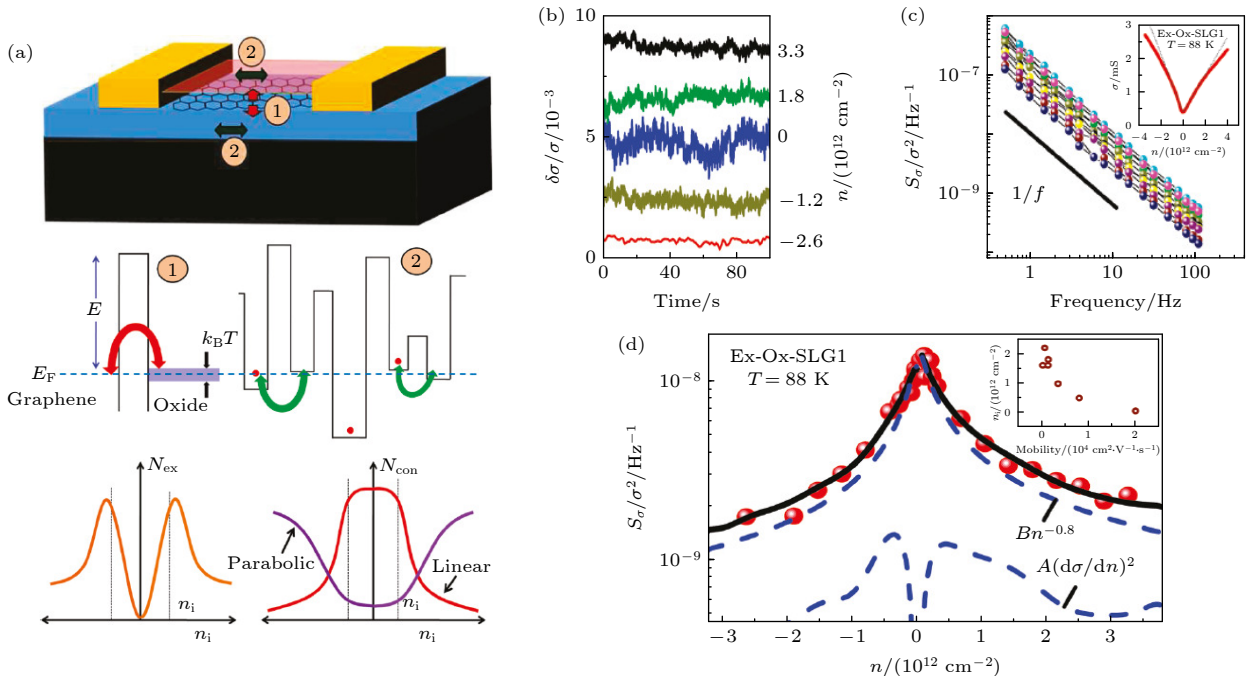


图 7 (a) 石墨烯晶体管及两种噪声机制示意图; (b) 不同载流子浓度下时域电导涨落; (c) 不同栅压下典型电导归一化噪声功率谱; (d) 1 Hz 处噪声幅值的栅极调控特性及模型拟合结果

Fig. 7. (a) Schematic of the GraFET device showing two different charge noise mechanisms; (b) time domain conductivity fluctuations at different carrier densities; (c) typical noise power spectra at various backgate voltages; (d) noise amplitude at 1 Hz vs. density, fitted by the equation.

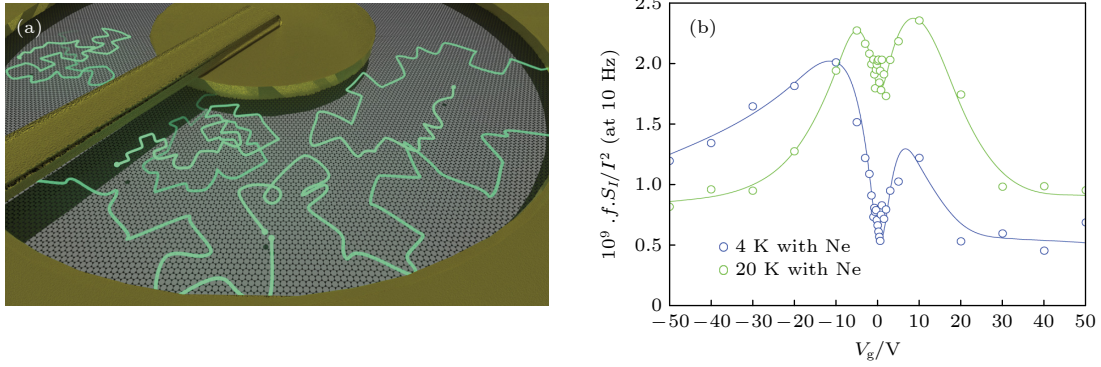


图 8 (a) 悬空单层 Corbino 结构石墨烯; (b) 10 Hz 处归一化电流噪声栅控特性

Fig. 8. (a) Suspended single-layer Corbino graphene sample; (b) noise characteristics with respect to gate voltage.

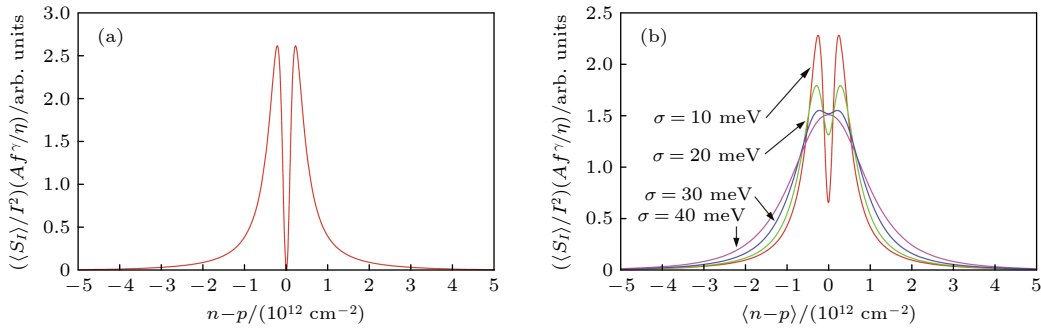

 图 9 (a) 不考虑 puddle 的噪声幅值随 $n-p$ 变化特性曲线; (b) 考虑 puddle 的噪声幅值随 $n-p$ 变化特性曲线

 Fig. 9. (a) Noise characteristics with respect to $n-p$ in the absence of potential disorder; (b) noise characteristics with respect to $n-p$ with various potential disorders.

噪声幅值进行数值计算. 对于单层石墨烯, 若不考虑电子-空穴 puddle 的影响, 其特征谱型整体呈 M 型, 如图 9(a) 所示. 在远离狄拉克点处, 噪声随着载流子浓度增大而减小; 在狄拉克点附近出现局部 V 型底谷, 噪声消失, 其原因是电子-空穴平衡使 $p-n=0$. 若考虑电子-空穴 puddle 的势能涨落, Pellegrini 等^[55] 引入费米面附近服从高斯分布随机势能涨落, 计算噪声特性如图 9(b) 所示. 随着势能涨落方差增大, 狄拉克点附近的噪声低谷逐渐消失, 栅极调控特征谱型从 M 型向 Λ 型变化. 值得注意的是, 根据该模型, 狄拉克点附近噪声低谷源于石墨烯特殊线性色散关系, 属于石墨烯本征特性, 电子-空穴 puddle 抑制甚至掩盖底谷的出现, 这与前文 Yan Zhang 博士的推断完全相反, 该分歧有待进一步实验以证真伪.

洛伦兹类噪声层面指, 去除本征背景噪声、类 $1/f$ 噪声之后, 存在一种或几种环境因素占主导的洛伦兹噪声产生机制研究. 该类噪声表现为叠加在 $1/f$ 噪声上的洛伦兹“鼓包”, 在生化样品特异性检测领域具有较好应用前景. Balandin 课题组^[57]

利用二氧化硅基底上的石墨烯样品开展基于 $1/f$ 噪声气体检测实验, 利用 $1/f$ 噪声中的特征“鼓包”成功检测并区分多种气体分子, 包括乙醇、甲醇、四氢呋喃、氯仿、乙腈、甲苯, 如图 10(a) 所示. 本研究团队与 Hakonen 教授合作, 利用 $1/f$ 噪声监测石墨烯载流子与单一类型缺陷之间的隧穿行为^[17], 图 10(b) 中蓝绿色虚线拟合的“鼓包”对应了一次隧穿行为. 除此之外, 印度科技学院 Kazi Rafsanjani Amin 和 Aveek Bid 开展了甲醇、氯仿、硝基苯、氨气 4 种成分检测实验^[58], 国内 Cui 等^[59] 开展了乙醇、甲醇和水的测实验, 类似工作较多, 在此不一一赘述.

对不同层次石墨烯低频噪声产生的主导机制进行归纳总结, 见表 1. 尽管噪声机制不乏争论, 但求同存异, 可得到以下有益结论: 1) 狄拉克点 (DP) 附近噪声主导机制更可能是长程散射结合 puddle 中电子、空穴失衡状态; 2) 本征背景 $1/f$ 噪声主导机制更可能是短程散射; 3) 类 $1/f$ 噪声主导机制可能是三选一或相互叠加, 需严控实验条件, 才有可能分辨; 4) 洛伦兹类噪声主导机制可三选一. 开展

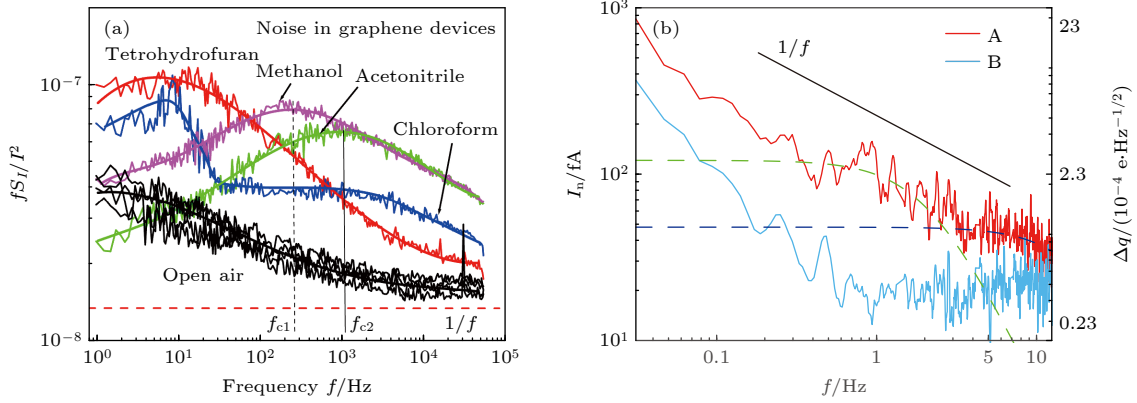


图 10 (a) $1/f$ 噪声应用于生化检测; (b) $1/f$ 噪声应用于电子隧穿监测
Fig. 10. (a) Biosensing application; (b) electron-tunneling monitoring.

表 1 不同研究层次石墨烯噪声主导机制

Table 1. The main noise mechanisms for graphene at different levels.

层次分类		散射截面(迁移率)涨落		载流子数涨落
		短程无序散射	长程无序散射	随机隧穿
本征背景噪声	靠近DP		●(结合电阻网络模型)	
	远离DP	●		
类 $1/f$ 噪声	靠近DP		●(结合电阻网络模型)	
	远离DP	●	●	●
洛伦兹类噪声		●	●	●

噪声机制研究, 首先需要确定研究层次, 分清可能的主导机制, 并针对性的开展实验设计, 排除其他机制干扰.

3.4 石墨烯 $1/f$ 噪声栅极调控特征谱型分析

石墨烯 $1/f$ 噪声栅极调控特征谱型描述了 $1/f$ 噪声幅值随栅极电压的变化关系, 既与石墨烯独特能带结构紧密联系, 也可反映石墨烯内部散射机制以及电荷分布情况, 是揭示石墨烯 $1/f$ 噪声机理的重要分析工具^[47,53,55,60]. 当前, 石墨烯 $1/f$ 噪声栅极调控特征谱型既是研究热点, 同时也是本领域争论的焦点. 已报道石墨烯 $1/f$ 噪声栅极调控特征谱型复杂多变, 主要呈现为 V 型、 Λ 型和 M 型三种类型, 如图 11 所示.

本文对比分析部分重点文献发现, 不同文献所报道结果各有偏差, 甚至互相对立, 如表 2 所示. 未合理定位噪声实验所处研究层面以及未严格控制实验变量, 特别是环境因素, 可能是根本原因所在. Takeshita 等^[61] 在极低温 (<1.7 K)、小偏执电压 (0.6 mV) 下, 于二氧化硅基底单层石墨烯中观

察到微弱 Λ 型特征谱型, 且大偏置电流下观测到 V 型. 基于观测结果, Takeshita 等^[61] 首次提出了偏置电流大小可能影响特征谱型的测量. Arnold 等^[62] 在大偏压下于不同二氧化硅基底 CVD 石墨烯样品中同时观察到 3 种谱型. 其实验结果支持了 Takeshita 等^[61] 的结论, 大偏置电压可能是导致 $1/f$ 噪声实验结果多变的主要原因之一. 尽管 Takeshita 等^[61] 实验条件设置较其他相关研究严格, 但由于采用二氧化硅基底上单层石墨烯样品开展研究, 不能排除二氧化硅基底对测量影响. Kayyalha 等^[63-65] 在氮化硼包覆的洁净石墨烯中稳定观测到 Λ 谱型, 这表明石墨烯洁净度对特征谱型有影响, 在洁净石墨烯样品中开展特征谱型研究能更好地反映石墨烯本征 $1/f$ 噪声特性. Zhang 等^[47] 关于二氧化硅基底上单层石墨烯样品噪声温度特性研究表明, 特征谱型具有温变特性, 实验温度也是影响特征谱型的重要因素. 考虑到低温对实验中无关噪声的抑制作用, 对比不同温度下部分已报道噪声实验可推断, 未对温度严格控制也是导致实验结果多变的原因之一, 低温有利于本征 $1/f$ 噪声测量.

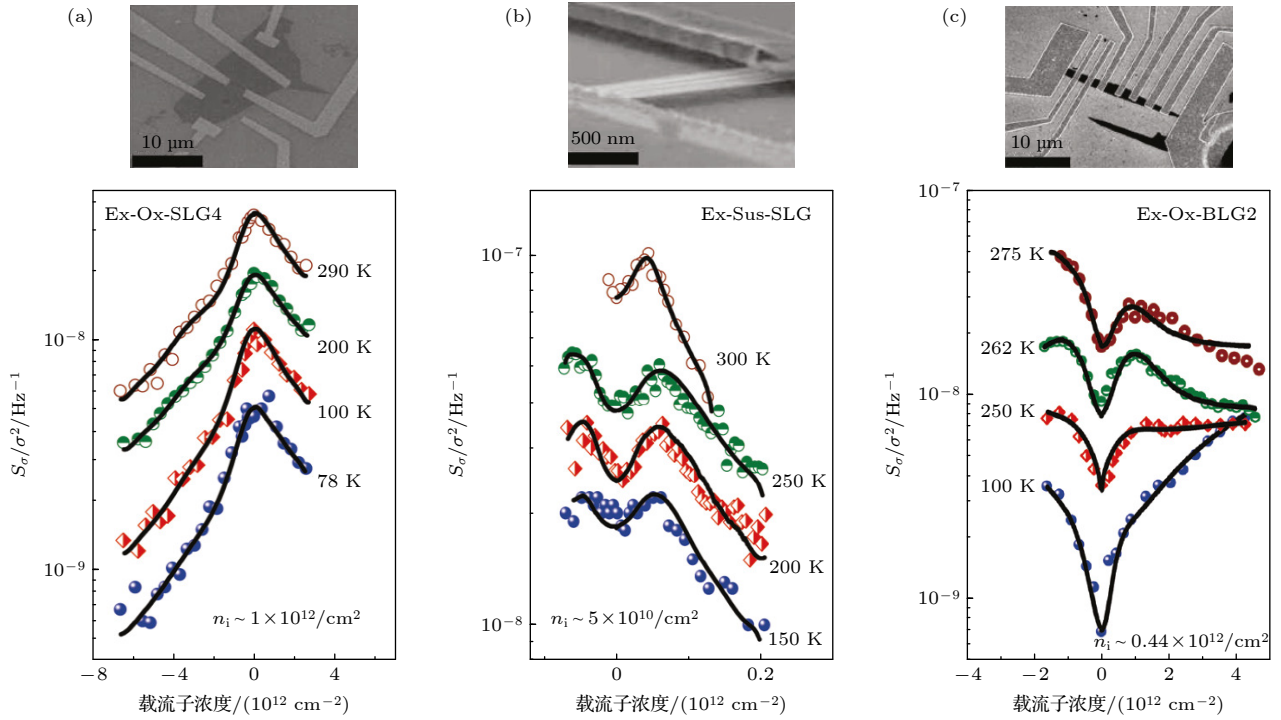

 图 11 石墨烯 3 种典型栅极调控特征谱型 (a) Λ 型; (b) M 型; (c) V 型

 Fig. 11. Three characteristic shape of gate dependence of $1/f$ noise in the graphene: (a) Λ shape; (b) M shape; (c) V shape.

 表 2 石墨烯 $1/f$ 噪声特征谱型对比

 Table 2. comparison of the characteristic shape of $1/f$ noise in graphene.

参考文献	特征谱型		
	Λ 型	V 型	M 型
Kaverzin et al. ^[53]	√, $T = 60$ K, $V_b = ?$, D	√, $T = 40$ K, $V_b = ?$, D	√, $T = 40$ K, $V_b = ?$, H_2O 吸附, D
Heller et al. ^[41]	—	√, RT, $V_b < 5$ mV, D	√, RT, $V_b < 5$ mV, D
Lin et al. ^[40]	—	√, RT, $V_b = 100$ mV, Bi, D	√, RT, $V_b = 100$ mV, D
Pal et al. ^[52]	√, $T = 78-290$ K, $I_b = 50$ μ A, D	√, $T = 100$ K, $I_b = 50$ μ A, Bi, D	√, $T = 262-275$ K, $I_b = 50$ μ A, Bi, D
	√, $T = 150-300$ K, $I_b = 50$ μ A, Sus, D	√, $T = 78-90$ K, $I_b = 50$ μ A, Multi, D	
Zhang et al. ^[47]	—	√, $T = 30-50$ K, $V_b = ?$, D	√, $T = 145-300$ K, $V_b = ?$, D
	—	√, $T = 30-300$ K, $V_b = ?$, Sus, C	
Xu et al. ^[60]	—	√, $T = 70-300$ K, $V_b = ?$, Bi, D	√, $T = 90-300$ K, $V_b = ?$, D
Takeshita et al. ^[61]	√, $T = 1.6$ K, $V_b < 0.6$ mV, D	作者认为Heller, Zhang Y, Xu G S, Rumyantsev, Kaverzin, Stolyarov 等实验偏置电压过大	√, $T = 1.6$ K, $V_b > 0.6$ mV, D
Arnold et al. ^[62]	√, RT, $V_b = 0.3$ V, D	√, RT, $V_b = 0.3$ V, D	√, RT, $V_b = 0.3$ V, D
Mavredakis et al. ^[66]	—	—	√, RT, $V_b = 20-60$ mV, D
Kayyalha et al. ^[64]	√, RT, $V_b = 40$ mV, C, BN-encapsulated	—	√, RT, $V_b = 40$ mV, D
Stolyarov et al. ^[65]	√, RT, $V_b = ?$, C, BN-encapsulated	—	√, RT, $V_b = ?$, D,
Pellegrini et al. ^[55]	√	理论仿真模型	√
Karnatak et al. ^[66]	√, $T = 80-300$ K, $I_b = 100$ nA, C, BN-encapsulated	—	—

V_b 表示样品偏置电压, $V_b = ?$ 表示偏置电压未知; I_b 表示样品偏置电流; RT表示室温; Bi表示双层石墨烯, Multi表示多层石墨烯, 其他未标注的均为单层石墨烯; Sus表示悬浮石墨烯, BN-encapsulated表示六方氮化硼(h-BN)包覆的石墨烯, 其他未标注的均为二氧化硅基底上的石墨烯; D表示非洁净石墨烯, C表示洁净石墨烯.

综上所述, 尽管当前关于石墨烯 $1/f$ 噪声栅控特性相关研究较多, 但由于没有合理定位实验所处研究层次并有针对性地严控实验条件, 如石墨烯洁净度、偏置电流、温度等, 致使实验结果复杂多变, 模糊了石墨烯真正的噪声特性, 使学界关于石墨烯 $1/f$ 噪声特性相关问题难以形成一致的结论. 严控实验条件, 在低温条件下, 采用洁净石墨烯, 以合适偏置电压/电流开展石墨烯 $1/f$ 噪声研究可能是揭示石墨烯 $1/f$ 噪声特性的可行途径.

4 石墨烯本征背景 $1/f$ 噪声规范性测量

根据石墨烯低频噪声研究的三层次分类分析模型, 通过对石墨烯噪声机制以及栅极调控特征谱型的梳理, 分析了已有研究中的部分关键性争议问题, 并从中提炼总结了部分结论. 无论是面向基于低频噪声的传感应用, 还是开展石墨烯低频噪声相关基础科学问题研究, 澄清石墨烯本征背景 $1/f$ 噪声机制及特性既是所有研究的起点, 也将为复杂多变的类 $1/f$ 噪声机制及特性研究排除干扰项, 提供清晰、确定的基础支撑.

悬空石墨烯器件中石墨烯不与基底接触, 直接物理隔离诸多环境因素, 再辅以电流退火清洁等技术手段, 可最大程度上抑制非本征噪声干扰, 将石墨烯 $1/f$ 噪声问题的焦点收束到本征背景 $1/f$ 噪声这个根本上, 因此悬空石墨烯可作为观测本征背景 $1/f$ 噪声的优异平台.

考虑本征背景 $1/f$ 噪声对偏置电压或电流的敏感特性, 本文将 $1/f$ 噪声幅值与电流关系曲线划分 3 个区间: 淹没区、 $1/f$ 噪声测试窗口和过热区. 如图 12 所示, 淹没区电流过小, 失去噪声放大作用, $1/f$ 噪声太微弱而与其他噪声混杂一体. 在 $1/f$ 噪声测试窗口, 电流对 $1/f$ 噪声显著放大, 且并不引入其他噪声, 便于 $1/f$ 噪声测试. 过热区电流过大, 石墨烯热效应显著, 进入类似三极管的“饱和区”, 噪声放大作用减弱. 如果随意设置偏置电流, 则测点位置可能落在图中所示任一位置. 测点 A, E 不利于测量; 测点 D 具有较高的噪声放大系数, 恒流模式下可获得良好 $1/f$ 噪声测量效果; 测点 C 特别适用于恒压模式下栅极调控 (栅控) 特征谱型研究. 恒压模式下, 如果在 B 或者 D 附近调控栅极, 由于石墨烯电阻栅控特性, 可能导致噪声测量进入过热区或淹没区.

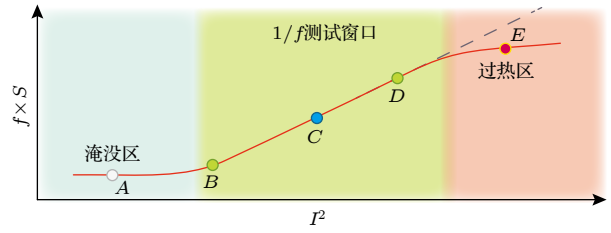


图 12 $1/f$ 噪声测点位置选取
Fig. 12. Selection of possible test points.

综上所述, 本文提出石墨烯本征背景 $1/f$ 噪声规范性研究方案, 如图 13 所示, 方案设计主要包括以下步骤:

- 1) 悬空石墨烯样品准备;
- 2) 过电流退火清除石墨烯表面污染物;
- 3) 测试获取 $1/f$ 噪声幅值-偏置电压/电流关系曲线;
- 4) 测点选择及测试: (a) 典型 $1/f$ 噪声测试, 为获取最好的放大系数, 选取测点 D, 恒定电压或电流模式下, 测量 $1/f$ 噪声; (b) 栅极调控特征谱型测试, 选取测点 C, 在不同栅极电压下测量 $1/f$ 噪声, 获得电流归一化后的特征谱型.

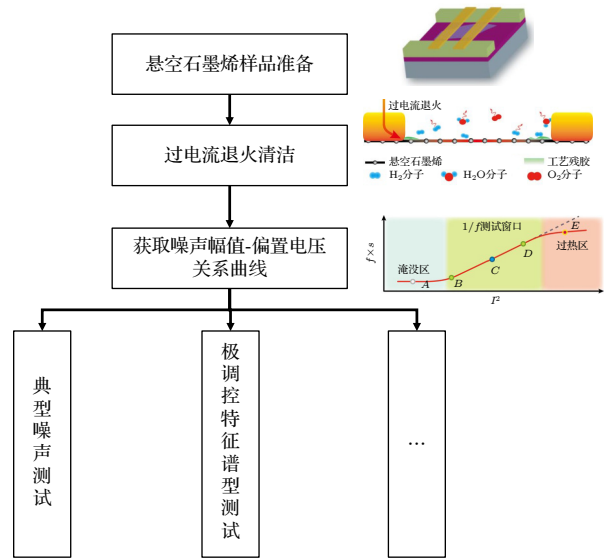


图 13 石墨烯本征背景 $1/f$ 噪声实验研究范式
Fig. 13. Paradigm of experimental research on graphene intrinsic background $1/f$ noise.

5 结论

本文梳理了 $1/f$ 噪声机理建模的发展历程, 重点介绍了 Mc Whorter 模型、Hooge 模型、Voss-

Clarker 模型、Dutta-Horn 模型、干涉模型以及 Hung 统一模型共 5 种典型 $1/f$ 噪声模型。石墨烯作为全新二维材料, 掌握其 $1/f$ 噪声产生机理以及噪声特性在高性能石墨烯基电子器件研制领域需求迫切, 是当前 $1/f$ 噪声研究的热点。本文综述了石墨烯 $1/f$ 噪声研究进展, 归纳总结了当前取得的共识性研究成果, 提出石墨烯低频噪声研究的三层次分类分析模型, 分析了本征背景 $1/f$ 噪声、类 $1/f$ 噪声及洛伦兹类噪声 3 个层面的代表性研究成果, 归纳总结了各层面可能的噪声主导机制。在此基础上, 进一步对比分析了不同团队报道的石墨烯 $1/f$ 噪声栅极调控特征谱型及测试条件, 结果表明洁净度、偏置电流 (电压) 等实验参数未严格控制、测点选择不合理可能是复杂多变栅控特征谱型形成的主要根源。最后, 本文以石墨烯 $1/f$ 噪声幅值与偏置电流关系曲线为基准, 提出了石墨烯本征背景 $1/f$ 噪声实验研究范式, 有望解决噪声测量中的争议问题, 为有效开展石墨烯 $1/f$ 噪声研究提供新方案。

参考文献

- [1] Vandamme L, Hooge F 2005 *Phys. B Condens. Matter* **357** 507
- [2] Wilamowski B M, Irwin J D 2011 *Fundamentals of Industrial Electronics: The Industrial Electronics Handbook* (1st Ed.) (CRC Press) p11
- [3] Liu G, Stillman W, Rumyantsev S, Shur M, Balandin A A 2011 *Int. J. High Speed Electron. Syst.* **20** 161
- [4] Johnson J B 1925 *Phys. Rev.* **26** 71
- [5] Voss R F, Clarke J 1975 *Nature* **258** 317
- [6] Daniel A 2015 *Ph. D. Dissertation* (Nottingham: The University of Nottingham)
- [7] Zhuang Y Q, Ma Z F, Du L 1999 *World Sci-Tech R. D.* **21** 69 (in Chinese) [庄奕琪, 马中发, 杜磊 1999 世界科技研究与发展 **21** 69]
- [8] Dutta P, Dimon P, Horn P 1979 *Phys. Rev. Lett.* **43** 646
- [9] Clarke J, Voss R F 1974 *Phys. Rev. Lett.* **33** 24
- [10] Burstein E, McWhorter A L, Miller P H, Stevenson D T, Weisz P B 1957 *Semiconductor Surface Physics* (University of Pennsylvania Press) p207
- [11] Hooge F, Kleinpenning T, Vandamme L 1981 *Rep. Prog. Phys.* **44** 479
- [12] Hooge F 1972 *Physica* **60** 130
- [13] Hung K K, Ko P K, Hu C, Cheng Y C 1990 *IEEE Trans. Electron Devices* **37** 1323
- [14] Peransin J, Vignaud P, Rigaud D, Vandamme L K J 1990 *IEEE Trans. Electron Devices* **37** 2250
- [15] Pellegrini B 1988 *Phys. Rev. B* **38** 8279
- [16] Dmitriev A P, Levinshtein M E, Rumyantsev S L, Shur M S 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 123706
- [17] Liu Y, Tan Z, Kumar M, Abhilash T S, Liu G J, Hakonen P 2018 *APL Mater.* **6** 091102
- [18] Du L, Zhuang Y Q, Xue L J 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2836 (in Chinese) [杜磊, 庄奕琪, 薛丽君 2002 物理学报 **51** 2836]
- [19] Song X X, Li H O, You J, Han T Y, Cao G, Tu T, Xiao M, Guo G C, Jiang H W, Guo G P 2015 *Sci. Rep.* **5** 8142
- [20] Paladino E, Galperin Y M, Falci G, Altshuler B L 2014 *Rev. Mod. Phys.* **86** 361
- [21] Dutta P, Horn P 1981 *Rev. Mod. Phys.* **53** 497
- [22] Macdonald K C, Lindsay R B 1963 *Phys. Today* **16** 74
- [23] Landauer R 1998 *Nature* **392** 658
- [24] Kogan S 2008 *Electronic Noise and Fluctuations in Solids* (Cambridge University Press) pp24
- [25] Surdin M 1939 *J. Phys. Radium* **10** 188
- [26] M. Richardson J 1950 *Bell Syst. Tech. J.* **29** 117
- [27] Weissman M B 1975 *Phys. Rev. Lett.* **35** 689
- [28] Kirton M J, Uren M J 1989 *Adv. Phys.* **38** 367
- [29] Hooge F N 1994 *IEEE Trans. Electron Devices* **41** 1926
- [30] Voss R F, Clarke J 1976 *Phys. Rev. Lett.* **36** 42
- [31] Voss R F, Clarke J 1976 *Phys. Rev. B* **13** 556
- [32] Hershfield S 1988 *Phys. Rev. B* **37** 8557
- [33] Raychaudhuri A K 2002 *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* **6** 67
- [34] Pelz J, Clarke J 1987 *Phys. Rev. B* **36** 4479
- [35] Ralls K S, Buhrman R A 1991 *Phys. Rev. B* **44** 5800
- [36] Hung K K, Ko P K, Hu C, Cheng Y C 1990 *IEEE Trans. Electron Devices* **37** 654
- [37] Koga J, Takagi S, Toriumi A *Proceedings of 1994 IEEE International Electron Devices Meeting*, San Francisco, USA 11-14 Dec. 1994 pp475-478
- [38] Vandamme E P, Vandamme L K 2000 *IEEE Trans. Electron Devices* **47** 2146
- [39] Zhang P 2010 *Ph. D. Dissertation* (in Chinese) [Xi'an: Xidian University] 张鹏 2010 博士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)
- [40] Lin Y-M, Avouris P 2008 *Nano Lett.* **8** 2119
- [41] Heller I, Chatoor S, Männik J, Zevenbergen M A, Oostinga J B, Morpurgo A F, Dekker C, Lemay S G 2010 *Nano Lett.* **10** 1563
- [42] Liu G, Stillman W, Rumyantsev S, Shao Q, Shur M, Balandin A 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 033103
- [43] Chen Z, Lin Y M, Rooks M J, Avouris P 2007 *Phys. E (Amsterdam, Neth.)* **40** 228
- [44] Kumar M, Laitinen A, Cox D, Hakonen P J 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 263505
- [45] Rumyantsev S, Liu G, Stillman W, Shur M, Balandin A A 2010 *J. Phys. Condens. Matter* **22** 395302 7
- [46] Liu G X, Rumyantsev S, Shur M S, Balandin A A 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 093111
- [47] Zhang Y, Mendez E E, Du X 2011 *ACS nano* **5** 8124
- [48] Cheng Z, Li Q, Li Z, Zhou Q, Fang Y 2010 *Nano Lett.* **10** 1864
- [49] Zahid Hossain M, Rumyantsev S, Shur M S, Balandin A A 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 153512
- [50] Rehman A, Delgado Notario J A, Salvador Sanchez J, Meziani Y M, Cywiński G, Knap W, Balandin A A, Levinshtein M, Rumyantsev S 2022 *Nanoscale* **14** 7242
- [51] Kamada M, Laitinen A, Zeng W, Will M, Sarkar J, Tappura K, Seppä H, Hakonen P 2021 *Nano Lett.* **21** 7637
- [52] Pal A N, Ghatak S, Kochat V, Sneha E, Sampathkumar A, Raghavan S, Ghosh A 2011 *ACS Nano* **5** 2075
- [53] Kaverzin A A, Mayorov A S, Shytov A, Horsell D W 2012 *Phys. Rev. B* **85** 075435 5
- [54] Macucci M, Marconcini P 2020 *J. Sens.* **2020** 2850268
- [55] Pellegrini B, Marconcini P, Macucci M, Fiori G, Basso G

- 2016 *J. Stat. Mech. Theory Exp.* **2016** 054017
- [56] Pellegrini B 2013 *Eur. Phys. J. B* **86** 373
- [57] Rumyantsev S, Liu G X, Shur M S, Potyrailo R A, Balandin A A 2012 *Nano Lett.* **12** 2294
- [58] Kazi R A, Aveek B 2014 *Curr. Sci. India* 107 430
- [59] Cui Y, Liu Y M, Yu J C, Hayasaka T, Li X Q, Cai W H, Liu H L, Lin L W 2017 *Ieee 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems* Taiwan China pp246–249
- [60] Xu G, Torres C M, Jr., Zhang Y, Liu F, Song E B, Wang M, Zhou Y, Zeng C, Wang K L 2010 *Nano Lett.* **10** 3312
- [61] Takeshita S, Matsuo S, Tanaka T, Nakaharai S, Tsukagoshi K, Moriyama T, Ono T, Arakawa T, Kobayashi K 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 103106
- [62] Arnold H N, Sangwan V K, Schmucker S W, Cress C D, Luck K A, Friedman A L, Robinson J T, Marks T J, Hersam M C 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 073108
- [63] Kayyalha M, Chen Y P 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 113101
- [64] Stolyarov M A, Liu G, Rumyantsev S L, Shur M, Balandin A A 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 023106
- [65] Karnatak P, Sai T P, Goswami S, Ghatak S, Kaushal S, Ghosh A 2016 *Nat. Commun.* **7** 13703
- [66] Mavredakis N, Garcia Cortadella R, Bonaccini Calia A, Garrido J A, Jiménez D 2018 *Nanoscale* **10** 14947

Review on $1/f$ noise and its research progress in two-dimensional material graphene*

Liu Ying^{1)2)†} Guo Si-Lin¹⁾²⁾ Zhang Yong¹⁾²⁾ Yang Peng¹⁾²⁾
 Lyu Ke-Hong¹⁾²⁾ Qiu Jing¹⁾²⁾ Liu Guan-Jun¹⁾²⁾

1) (College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

2) (Science and Technology on Integrated Logistics Support Laboratory, Changsha 410073, China)

(Received 27 June 2022; revised manuscript received 21 September 2022)

Abstract

Noise is a signal. Low-frequency noise with a $1/f$ -type spectral density ($1/f$ noise) has been observed in a wide variety of systems. There are plenty of physical processes under the $1/f$ noise phenomenon. It is not only a useful tool for scientific research, but also a quantitative probe for the performance of electronic devices. In this paper, the $1/f$ noise models are summarized from the general mathematical forms to physical processes. Based on Markov process and diffusion process, two general mathematical models of $1/f$ noise are introduced respectively. On this basis, tracing the development history, several typical physical models are described, including Mc Whorter model, Hooge model, Voss-Clarker model, Dutta-horn model, interference model and unified Hung model. The advent of the two-dimensional material graphene offers unique opportunities for studying the mechanism of $1/f$ noise. In the fact of the cloudy and even contradictory conclusions from different reports, this paper combs the consensus accepted widely. An analysis model based on three-level classification for the graphene low-frequency noise study is built, which divides the noise into intrinsic background $1/f$ noise, $1/f$ -like noise and Lorentz-like noise. Typical research on the related mechanism at each level is analyzed, and the dominant mechanisms are summarized. Further, we focus on the gate-modulated characteristic spectrum shape of $1/f$ noise from different reported experiments, which may be a key to the material internal scattering mechanism and charge distribution. The experimental measurements show that the characteristic shape is variable, and mainly exists in three forms: V-type, Λ -type and M-type. Through the comparative analysis of graphene cleanliness, bias current (voltage) and other experimental parameters, the possible causes of the complexity and variability of the characteristic shape are analyzed, showing that the main reason may be that the experimental parameters are not strictly controlled, and the selection of measuring point is unreasonable. In order to capture the accurate noise characteristics and reveal the noise mechanism clearly, a standard $1/f$ noise measurement paradigm is proposed in this work to guide the effective research on graphene $1/f$ noise and the distinction between intrinsic noise and extrinsic noise. The standard paradigm includes three processes. The first process is to prepare suspended graphene samples, the second one is to remove the surface contamination by using the methods such as current annealing, and the third one is to test the curve of the $1/f$ noise amplitude versus the bias voltage or current. Based on this curve, suitable test points can be selected for different measurement schemes. The proposed standard intrinsic background $1/f$ noise measurement paradigm may be expected to clarify and reveal the characteristics of graphene $1/f$ noise.

Keywords: $1/f$ noise, noise mechanism, graphene, characteristic spectrum shape

PACS: 73.50.Td, 73.63.-b, 05.40.-a

DOI: 10.7498/aps.72.20221253

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12102461).

† Corresponding author. E-mail: liuying@nudt.edu.cn



1/f噪声及其在二维材料石墨烯中的研究进展

刘瑛 郭斯琳 张勇 杨鹏 吕克洪 邱静 刘冠军

Review on 1/f noise and its research progress in two-dimensional material graphene

Liu Ying Guo Si-Lin Zhang Yong Yang Peng Lyu Ke-Hong Qiu Jing Liu Guan-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 017302 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221253

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221253>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

扭转双层石墨烯物理性质、制备方法及其应用的研究进展

Review of fabrication methods, physical properties, and applications of twisted bilayer graphene

物理学报. 2018, 67(24): 246802 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181432>

石墨烯谐振式力学量传感器研究进展

Research progress of electromechanical graphene resonant sensors

物理学报. 2022, 71(12): 126801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220215>

光纤1/f热噪声的实验研究

Experimental study on 1/f intrinsic thermal noise in optical fibers

物理学报. 2019, 68(5): 054205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181838>

石墨烯莫尔超晶格体系的拓扑性质及光学研究进展

Topological properties of graphene moiré superlattice systems and recent optical studies

物理学报. 2019, 68(22): 220303 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191317>

新型机械解理方法在二维材料研究中的应用

Applications of new exfoliation technique in study of two-dimensional materials

物理学报. 2018, 67(21): 218201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181636>

金刚石晶界辅助石墨烯沉积的成核机理仿真

Simulation research on nucleation mechanism of graphene deposition assisted by diamond grain boundary

物理学报. 2022, 71(8): 086103 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211981>