Nuclear Science and Technology 核科学与技术, 2025, 13(4), 185-192
Published Online October 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/nst
https://doi.org/10.12677/nst.2025.134019

Hans汉斯

半导体探测器信号成形中弹道亏损的影响因素探究

陈华旻*，易典洪，康艺洁，肖海瑞#，张　南

成都工业学院电子工程学院，四川 成都

收稿日期：2025年9月4日；录用日期：2025年9月16日；发布日期：2025年10月13日

摘　要

半导体探测器信号成形过程中，成形网络中电容的充放电会导致信号幅度出现弹道亏损，影响系统的能量分辨率和测量精度。根据探测器输出信号特性与信号成形电路特点，系统探究了弹道亏损的影响因素及内在机制。结果表明，弹道亏损不仅受信号成形电路参数(时间常数、级数)的制约，还与探测器外加电压、几何构型及材料特性密切相关。在实际应用中，可通过增加成形电路RC级的数目、提高探测器的外加电压和载流子迁移率来减小信号在成形网络中的弹道亏损。此外，探测器几何形状也是影响弹道亏损的关键因素，在同等条件下，选用厚度较小的探测器有助于降低信号的弹道亏损。本研究阐明了各因素间的耦合关系及其对弹道亏损的影响，为优化半导体探测器及其读出电子学设计、最小化弹道亏损效应并最终提升探测器系统性能提供了理论依据和实践指导。

关键词

半导体探测器，弹道亏损，影响因素

Exploration of Factors Influencing Ballistic Deficit in Semiconductor Detector Signal Shaping

Huamin Chen*, Dianhong Yi, Yijie Kang, Hairui Xiao#, Nan Zhang

School of Electronic Engineering, Chengdu Technological University, Chengdu Sichuan

Received: September 4, 2025; accepted: September 16, 2025; published: October 13, 2025

*第一作者。
#通讯作者。

文章引用: 陈华旻, 易典洪, 康艺洁, 肖海瑞, 张南. 半导体探测器信号成形中弹道亏损的影响因素探究[J]. 核科学与技术, 2025, 13(4): 185-192. DOI: 10.12677/nst.2025.134019

Abstract

The charging and discharging of capacitors in the shaping network during the signal shaping process in semiconductor detectors would lead to a ballistic deficit in signal amplitude, which adversely affects the system's energy resolution and measurement accuracy. This study systematically investigated the influencing factors and underlying mechanisms of ballistic deficit by analyzing the characteristics of the detector output signals and the features of the signal shaping circuits. The results demonstrate that the ballistic deficit is not only constrained by shaping circuit parameters (time constant, number of stages) but also related to the detector's applied bias voltage, geometric configuration, and material properties. In practical applications, ballistic deficit within the shaping network can be reduced by increasing the number of RC shaping stages, the detector's applied bias voltage, and the carrier mobility. Furthermore, the detector geometry is also a critical influencing factor. For a given condition, a detector with thin thicknesses is more helpful in reducing the ballistic deficit than a thick one. This research elucidates the coupling relationships among these factors and their impact on ballistic deficit, providing a theoretical foundation and practical guidance for optimizing semiconductor detector and readout electronics design, minimizing the ballistic deficit effect, and ultimately enhancing detector system performance.

Keywords

Semiconductor Detector, Ballistic Deficit, Influence Factor

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

通常，半导体探测器的输出信号幅度较小，需要经过前置放大、滤波成形等处理才能进行进一步分析处理，以提取入射辐射的相关信息。然而，成形网络中的电容效应会不可避免地造成信号幅度亏损，这种亏损即被称为弹道亏损[1]。弹道亏损通常定义为：

$$k = 1 - \frac{V_1}{V_0} \tag{1}$$

式中，k 表示弹道亏损，V_1 为半导体探测器输出信号经过成形电路后的幅度，V_0 是相同电荷的冲激信号经过成形电路后的幅度。

弹道亏损不仅造成能量测量结果偏低，还因引入额外统计涨落而显著降低系统能量分辨率。因此，系统研究弹道亏损的影响因素与内在机制，对揭示物理本质及优化能量测量精度具有重要理论意义。一般来说，弹道亏损在半导体探测器中尤为显著。基于此，以半导体探测器信号成形过程中的弹道亏损为依托来展开相关工作。鉴于探测器输出信号在滤波成形前必须经过前置放大，因此在讨论信号成形过程中的弹道亏损时，将前置放大电路与成形电路视为整体进行分析。在探测器输出信号的前置放大电路中，电荷灵敏前置放大电路因其良好的低噪声性能和较强的抗电容变化能力，已成为前置放大电路的主流选择。而对于信号成形，目前已发展起多种可选方案，如 CR-(RC)^n 成形[2]、梯形成形[3]、尖顶成形[4]等，可根据成形网络的噪声抑制需求、弹道亏损容忍度以及计数率要求等进行权衡选择。本研究选用 CR-(RC)^n 成形电路来完成相关分析，因其结构简洁、性能可预测，且是高分辨率能谱测量中应用最广泛的成形方案。

2. 理论基础

2.1. 弹道亏损

以金刚石半导体探测器为例，其信号成形电路结构如图 1 所示。入射辐射在探测器内沉积能量并产生电子－空穴对，这些电子－空穴对在外加电压 U 的作用下定向迁移形成电流信号，电荷灵敏放大电路将该电流信号放大并转换为电压信号。图 1 中，电荷灵敏放大电路反馈回路上并联的泄放电阻 R_F (用于泄放 C_F 上的累积电荷)与 C_F 构成的电路在功能上等效于 CR-(RC)^n 成形电路中的 CR 电路。因此，在后续的成形电路中仅需集成(RC)^n 电路即可实现信号成形。(RC)^n 电路中的运算放大器 A_1-A_n 主要用于级间隔离，消除各级 RC 电路相互干扰，通常认为这些运放是理想的电压放大器且放大倍数为 1。

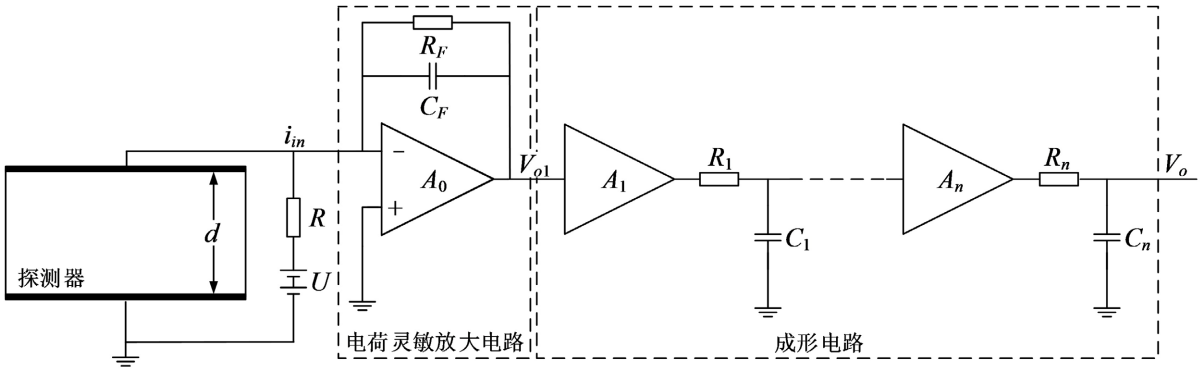

Figure 1. Structure of the signal shaping circuit for semiconductor detectors
图 1. 半导体探测器的信号成形电路结构

在信号成形过程中，电容上存储的部分电荷会不可避免地通过电阻泄放，导致信号幅度下降。这种幅度损失可以表示为：

$$k=1-\frac{V_1}{V_0}=1-\frac{\left[i_{in}(t)*h(t)\right]_{\max}}{\left[Q_h(t)\right]_{\max}} \tag{2}$$

式中，$i_{in}(t)$为探测器输出的电流信号，$h(t)$为成形网络的单位冲激响应，$Q_h(t)$是当探测器输出电荷量为 Q 的理想冲激电流时，成形网络的输出响应，满足 $\int_0^{\infty} i_{in}(t)\mathrm{d}t=Q$。

为简化计算，对式(2)中相关参数进行归一化处理，则：

$$k=1-\left[i_{in1}(t)*h_1(t)\right]_{\max} \tag{3}$$

式中，$i_{in1}(t)$为归一化电流信号，有 $\int_0^{\infty} i_{in1}(t)\mathrm{d}t=1$；$h_1(t)=\dfrac{h(t)}{\left[h(t)\right]_{\max}}$ 为归一化单位冲激响应。直接根据电流信号和单位冲激响应来求解式(3)比较复杂，因此，采用以下方法来进行简化计算，具体如下：

1) 电流信号矩形近似

根据探测器电荷收集特性可知，探测器输出信号的持续时间为 t_d 的值通常较小。因此，将信号 $i_{in1}(t)$ 近似为一个矩形脉冲信号，即 $i_{in1}(t)=\dfrac{1}{t_d}\left[u(t)-u(t-t_d)\right]$。代入式(3)得：

$$k=1-\left[i_{in1}(t)*h_1(t)\right]_{\max}=1-\frac{1}{t_d}\int_{t_1-t_d}^{t_1} h_1(t)\mathrm{d}t \tag{4}$$

根据卷积特性可知，$i_{in1}(t)*h_1(t)$ 的最大值在冲激响应 $h_1(t)$的峰值附近，且满足 $h_1(t_1)=h_1(t_1-t_d)$。由

于该响应已进行归一化，其最大值为 1，$\frac{1}{t_d}\int_{t_1-t_d}^{t_1} h_1(t)\mathrm{d}t$ 的最大值为 1。因此，式(4)可改写为：

$$k=\int_{t_1-t_d}^{t_1}\left[1-h_1(t)\right]\mathrm{d}t \tag{5}$$

2) 单位冲激响应抛物线近似

由于 t_d 的值较小，可将 $h_1(t)$在峰值附近 t_d 范围内的值用泰勒展开至二阶项来近似。鉴于 $h_1(t)$在峰值处的一阶导为 0，其二阶导小于 0，其泰勒展开式为：

$$h_1(t)\approx 1-\frac{1}{2}\left|h_1''(t)\right|\left(t-t_m\right)^2 \tag{6}$$

式中，t_m 表示 $h_1(t)$达到峰值时 t 的值。由式(6)可知，$h_1(t)$的近似结果为一条抛物线，则有：$t_1=t_m+\frac{1}{2}t_d$，$t_1-t_d=t_m-\frac{1}{2}t_d$。再代入式(5)及式(6)得：

$$k\approx\int_{t_m-\frac{1}{2}t_d}^{t_m+\frac{1}{2}t_d}\frac{1}{2}\left|h_1''(t)\right|\left(t-t_m\right)^2\mathrm{d}t=\frac{1}{24}\left|h_1''(t)\right|t_d^2 \tag{7}$$

至此，得出了弹道亏损的理论计算公式[1]。可以看出，信号在成形网络中的弹道亏损与电路系统的单位冲激响应和信号的持续时间密切相关。为深入探究成形网络中弹道亏损的影响因素及内在机制，对冲激响应和信号持续时间开展进一步讨论。

2.2. 成形网络的单位冲激响应

为简化分析计算，将图 1 中的运算放大器均看作是理想运算放大器。则有：

$$\frac{V_{o1}}{V_{in}}=-A_1 \tag{8}$$

式中，V_{in} 和 V_{o1} 分别是运放 A_1 的输入电压和输出电压，A_1 为电荷灵敏放大电路中运放的直流增益。根据基尔霍夫电流定律，电荷灵敏放大电路有：

$$i_{in}(s)=sC_TV_{in}(s)+\frac{1+sR_FC_F}{R_F}\left[V_{in}(s)-V_{o1}(s)\right] \tag{9}$$

式中，C_T 表示探测器的电容。将式(8)代入式(9)得：

$$\frac{V_{o1}(s)}{i_{in}(s)}=-\frac{A_1R_F}{sR_FC_T+sR_FC_F\left(1+A_1\right)+1+A_1} \tag{10}$$

由于运放增益 $A_1\gg 1$，且探测器电容 C_T 通常小于反馈回路电容 C_2，则有：$sR_FC_F\left(1+A_1\right)\gg sR_FC_T$。因此，式(10)化简为：

$$\frac{V_{o1}(s)}{i_{in}(s)}\approx-\frac{A_1R_F}{sR_FC_F\left(1+A_1\right)+1+A_1}=\frac{1}{C_F}\frac{\tau}{s\tau+1} \tag{11}$$

式中，$\tau=R_FC_F$ 为电荷灵敏放大电路的时间常数。

对于$(RC)^n$成形电路，其输入与输出满足：

$$\frac{V_o(s)}{V_{o1}(s)}=\frac{1/sC_1}{R_1+1/sC_1}\cdots\frac{1/sC_n}{R_n+1/sC_n} \tag{12}$$

式中，$R_1C_1=\cdots=R_nC_n=\tau$，则：

$$\frac{V_o(s)}{V_{o1}(s)}=\frac{1}{s\tau+1}\cdots\frac{1}{s\tau+1}=\frac{1}{(s\tau+1)^n} \tag{13}$$

由式(13)和式(11)得出成形网络的传递函数：

$$H(s)=\frac{V_o(s)}{i_{in}(s)}=\frac{1}{C_F}\frac{\tau}{s\tau+1}\frac{1}{(s\tau+1)^n} \tag{14}$$

进而得出成形网络的单位冲激响应为：

$$h(t)=\frac{1}{n!C_F}\left(\frac{t}{\tau}\right)^n\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \tag{15}$$

2.3. 探测器信号的持续时间

Nakhostin [5]指出，载流子在电场中迁移所产生的感应电荷可以用载流子迁移前后的加权电势及载流子密度来定量描述：

$$Q=\int_{x_0}^{x_1}\rho(x)\left[\varphi(x_0)-\varphi(x_1)\right]\mathrm{d}x \tag{16}$$

式中，$\rho(x)$表示 x 处的载流子密度，$\varphi(x_0)$表示初始位置 x_0 处的加权电势，$\varphi(x_1)$表示终点位置 x_1 处的加权电势。对于图 1 所示的平板结构探测器，其加权电势 $\varphi(x)=x/d$。

假设入射辐射在探测器中产生的电子－空穴对数为 N，且载流子沿电场方向均匀分布。则：

$$\rho(x)=\frac{Ne}{d} \tag{17}$$

式中，e 表示基元电荷量。将其代入式(16)得：

$$Q_e=\int_{x_0}^{x_1}-\frac{Ne}{d}\left[\varphi(x_0)-\varphi(x_1)\right]\mathrm{d}x=\int_0^t-\frac{Ne}{d}\left[\frac{v_e t}{d}-1\right]\mathrm{d}v_e t=-\frac{Nev_e^2}{2d^2}t^2+\frac{Nev_e}{d}t \tag{18}$$

$$Q_h=\int_{x_0}^{x_1}\frac{Ne}{d}\left[\varphi(x_0)-\varphi(x_1)\right]\mathrm{d}x=\int_0^t\frac{Ne}{d}\left[\frac{d-v_h t}{d}-0\right]\mathrm{d}v_e t=-\frac{Nev_h^2}{2d^2}t^2+\frac{Nev_h}{d}t \tag{19}$$

式中，Q_e 和 Q_h 分别表示电子和空穴迁移引起的感应电荷，v_e 表示电子的漂移速度，v_h 表示空穴的漂移速度。

电子和空穴的漂移速度为[6]：

$$v=\mu E=\frac{\mu_0 E}{1+\mu_0 E/v_s} \tag{20}$$

式中，μ 为载流子的迁移率，E 表示电场强度，μ_0 为低电场下载流子的迁移率，v_s 为载流子的饱和漂移速度。

因此，探测器中的电荷信号为[7]：

$$Q=Q_e+Q_h=\frac{NeU}{d^2}(\mu_e+\mu_h)t-\frac{NeU^2}{2d^4}(\mu_e^2+\mu_h^2)t^2 \tag{21}$$

式中，μ_e 和 μ_h 分别表示电子和空穴的迁移率。由于半导体中空穴的迁移率小于电子，故信号的持续时间实际由空穴决定。因此，由式(21)得出信号的持续时间：

$$t_d=\frac{d^2}{U\mu_h} \tag{22}$$

综上，结合式(7)、(15)和(22)得出半导体探测器输出信号在成形网络中的弹道亏损为：

$$k \approx \frac{1}{24n\tau^2}\frac{d^4}{U^2\mu_h^2} \tag{23}$$

由此可知，探测器输出信号在成形网络中的弹道亏损是一个与 RC 电路级数 n、成形网络时间常数 τ、探测器厚度 d、外加电压 U 及材料特性(空穴迁移率 μ_h)有关的量。

3. 研究结果

在 CR-(RC)^n 成形电路中，RC 的级数需根据信号幅度和滤波成形要求来综合确定，通常 RC 电路级数不超过 4 级。因此，本文仅讨论 RC 电路为 1 至 4 级时，级数变化对弹道亏损的影响。图 2 以厚度为 1 mm 的天然金刚石半导体探测器在 10 V 外加电压下工作时的情况为例，对比了不同 RC 电路级数下，给定金刚石半导体探测器中信号弹道亏损随成形网络时间常数的变化关系。

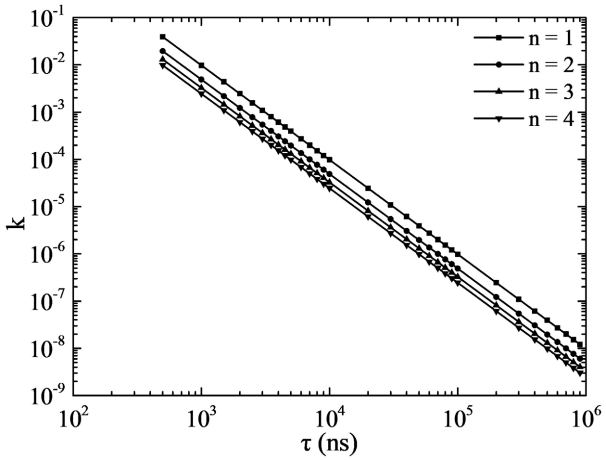

Figure 2. Variation of signal ballistic deficit with the time constant of the shaping network under different RC circuit stages
图 2. 不同 RC 电路级数下，信号弹道亏损随成形网络时间常数变化的情况

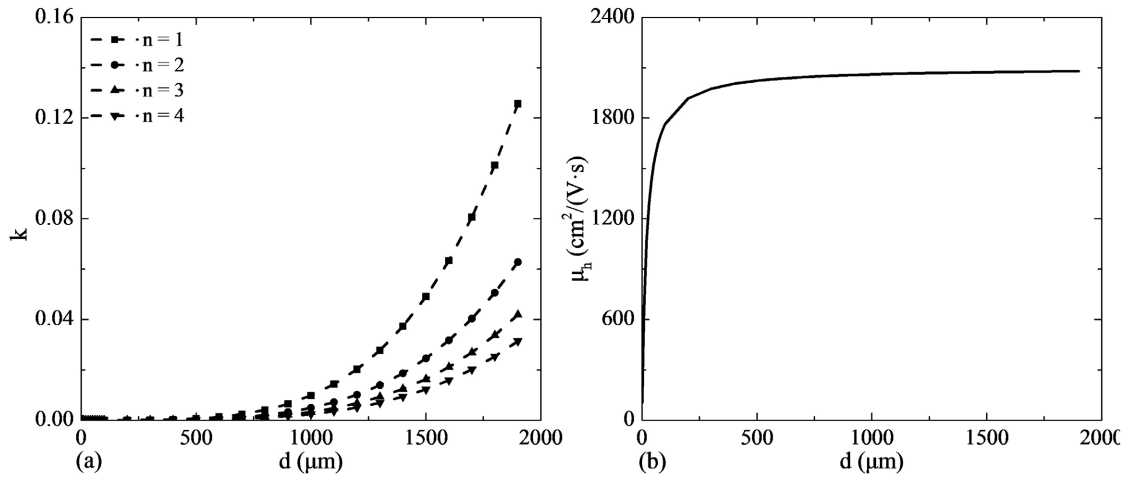

Figure 3. The influence of detector thickness variation on signal ballistic deficit
图 3. 探测器厚度变化对信号弹道亏损的影响

图 2 展示了时间常数 τ 在 500 ns 至 1 ms 之间变化时，不同 RC 电路级数下信号的弹道亏损。需要说

明的是，根据探测器的参数配置，由式(22)计算得出信号的持续时间约为 485 ns，由于成形网络的时间常数通常要大于信号持续时间以确保不失真，因此，这里将时间常数下限设为 500 ns。结果显示，增加成形网络的时间常数有助于减小信号的弹道亏损，两者在双对数坐标系中呈现出一条斜率为−2 的直线。此外，RC 电路级数的增加也有助于减小信号的弹道亏损。

图 3 对比了不同厚度天然金刚石半导体探测器在 10 V 外加电压下的弹道亏损，其时间常数 $\tau = 1$ μs。在恒定电压下，探测器厚度变化会改变其内部电场分布。由式(20)可知，电场会影响载流子的迁移率。因此，金刚石探测器中空穴迁移率随探测器厚度的变化情况也在图 3 中给出(见图 3(b))。结果发现，尽管探测器厚度的增加会提高空穴迁移率，但由于弹道亏损是受探测器厚度四次方支配的，最终信号的弹道亏损还是随着厚度的增加而增大。此外，与图 2 的结果一致，增加 RC 电路级数可有效减小信号的弹道亏损。

图 4 显示了电压变化对信号弹道亏损的影响(探测器厚度为 0.1 cm，时间常数 $\tau = 1$ μs)。当探测器厚度恒定时，改变外加电压会导致电场强度的变化，进而影响载流子的迁移率。因此，图 4(b)中也给出了空穴迁移率随电压的变化规律。另外，图 4 还对两种不同金刚石材料(天然金刚石与合成金刚石，其特征参数参见文献[7])中的弹道亏损进行了比较。鉴于图 2 和图 3 已经证明了 RC 电路级数对信号弹道亏损的影响，图 4 仅在级数为 1 和 3 时，对比了不同电压及不同材料中的弹道亏损。结果显示，尽管提高外加电压会降低空穴迁移率，但由于空穴漂移速度显著提升(图 5)，综合效应反而降低了信号的弹道亏损。此外，合成金刚石因具有更高的载流子迁移率，在相同条件下，其弹道亏损始终小于天然金刚石。

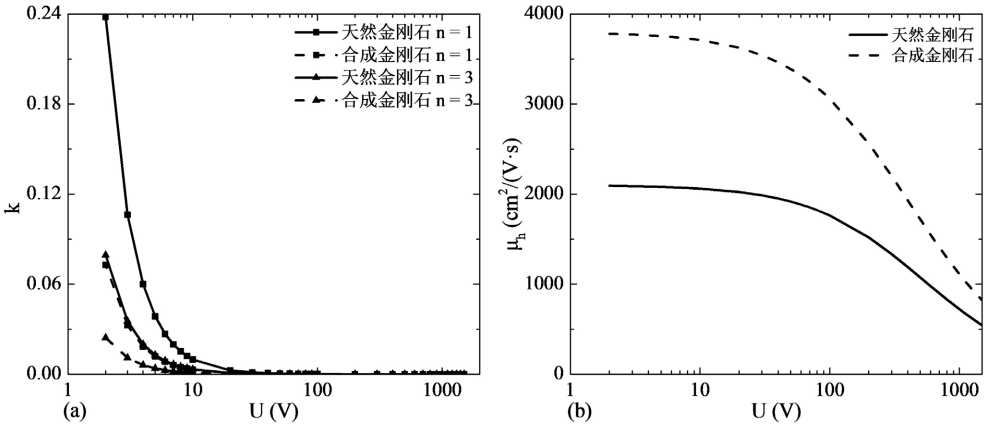

Figure 4. The influence of changes in voltage and detector material properties on signal ballistic deficit
图 4. 电压及探测器材料特性变化对信号弹道亏损的影响

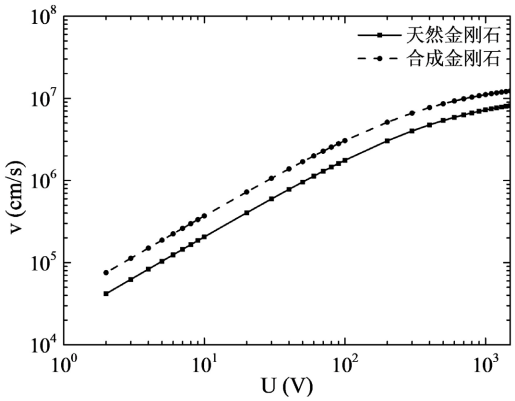

Figure 5. The effect of applied voltage on hole drift velocity in different diamonds
图 5. 不同金刚石中外加电压对空穴漂移速度的影响

综上，半导体探测器输出信号在成形网络中的弹道亏损与相关参量有如下关系：

1) 弹道亏损与 RC 电路级数呈负相关关系，增加 RC 电路级数有助于减小信号的弹道亏损。然而，需要指出的是，级数增加会导致输出信号的幅度衰减(式(15))，因此，在通过增加 RC 电路级数来降低弹道亏损时，需综合考虑其对信号幅度的影响，谨慎选择 RC 电路的级数。

2) 增大成形网络的时间常数可有效抑制弹道亏损。不过，时间常数的增加会降低信号的处理速率，影响测量系统的计数率。因此，在选择利用成形网络时间常数来调节信号弹道亏损时，需综合系统计数率要求来确定最佳时间常数。

3) 改变探测器的几何形状也会改变载流子在电场方向上的漂移路径，研究显示，这与弹道亏损呈正相关关系。这也是大体积探测器的弹道亏损不容忽视的本质原因。

4) 提高探测器的外加电压可有效降低信号的弹道亏损。理论上，该优化方法仅受限于半导体材料的击穿电压，因此可作为系统设计中的优选项。

5) 优化探测器的材料特性(载流子迁移率)有助于降低信号的弹道亏损。因此，提高半导体材料性能也是降低信号弹道亏损的有效途径之一。

4. 结语

探测器输出信号在成形过程中的弹道亏损不仅会影响到能量测量的准确性，而且因其与信号持续时间的固有涨落密切相关，还会造成弹道亏损本身的统计涨落，这种复合涨落会导致测量系统的能量分辨率降低，影响最终测量的准确性和精度。本文在现有理论的基础上，通过深化弹道亏损的定量理论推导，系统解析了探测器物理参数与成形网络电子学参数对弹道亏损影响的内在物理机制。该项工作不仅揭示了弹道亏损与信号成形过程的动态耦合关系，更为探测器结构优化及实时信号处理算法设计提供了理论依据和实践指导。

基金项目

大学生创新创业训练计划项目(202411116013)。

参考文献

[1] 高德喜. 锗探测器脉冲弹道亏损和能量分辨率[J]. 核电子学与探测技术, 1986(4): 193-198.

[2] Nakhostin, M. (2011) Recursive Algorithms for Real-Time Digital CR-(RC)^n Pulse Shaping. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **58**, 2378-2381. https://doi.org/10.1109/tns.2011.2164556

[3] 肖无云, 魏义祥, 艾宪芸. 数字化多道脉冲幅度分析中的梯形成形算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005(6): 810-812.

[4] 杨剑. 高纯锗数字多道脉冲幅度分析系统的研制[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2017.

[5] Nakhostin, M. (2013) Charged Particle Response of Transmission Diamond Detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*: *Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **703**, 199-203. https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.11.093

[6] Pernegger, H. (2006) High Mobility Diamonds and Particle Detectors. *Physica Status Solidi* (*A*), **203**, 3299-3314. https://doi.org/10.1002/pssa.200671404

[7] Yu, S., Wang, D., Zhong, X., Zhu, H. and Chen, W. (2023) A Theoretical Comparison of Silicon and Diamond in Microdosimetry. *Journal of Instrumentation*, **18**, P01032. https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/01/p01032