

AlGaAs/InGaAs/GaAs 异质结构中扩散噪声和扩散系数的蒙特卡罗研究*

吴 渊 牛国富 阮 刚

(复旦大学电子工程系 上海 200433)

摘要 本文用蒙特卡罗法研究了 AlGaAs/InGaAs/GaAs 异质结构中二维电子气的扩散噪声和扩散系数。同 AlGaAs/GaAs 异质结构的情况一样, 平行速度相关函数呈现振荡, 但不同的是振幅随电子密度变化很小。另外, 振幅在 InGaAs 层厚度增加时下降。用单个电子的相关函数和一组电子的位移方差两种不同方法计算了扩散系数。

PACC: 7855, 7865

1 引言

AlGaAs/InGaAs/GaAs MODFET 是目前工作速度最高的三端半导体器件之一, 且噪声低, 在微波领域和超高速逻辑电路中很有应用前景^[1]。扩散噪声是高频时的主要噪声源。从本质上讲, 是决定器件能否高频工作的因素。鉴于这一原因, 它的研究一直受到广泛重视^[2]。本文的目的在于用蒙特卡罗法研究 AlGaAs/InGaAs/GaAs 异质结构中二维电子气的扩散噪声和扩散系数。

2 蒙特卡罗模拟

所研究的 AlGaAs/InGaAs/GaAs 异质结构如图 1 所示。首先, 用自洽迭代法求解薛定谔方程(1)和泊松方程(2)^[3~5]:

$$\frac{\hbar^2}{2m} \cdot \frac{d^2 F_n(z)}{dz^2} + [E_n - V(z)] F_n(z) = 0 \quad (1)$$

$$V(z) = -q\varphi(z) - \Delta E_c(z)(z)$$
$$\frac{d^2 \varphi(z)}{dz^2} = -\frac{q}{\epsilon} [N_d^+(z) - N_a^-(z) - \sum_n |F_n(z)|^2 N_n]$$
$$N_n = \frac{kTm}{nh^2} \ln \left[1 + \exp \left(\frac{E_f - E_n}{kT} \right) \right] \quad (2)$$

* 国家自然科学基金资助课题

吴 渊 男, 1959 年生, 电子学博士, 从事半导体输运特性的蒙特卡罗模拟

牛国富 男, 1971 年生, 博士生, 正进行锗硅器件物理和平行算法的应用等研究

阮 刚 男, 1935 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为半导体器件物理及 IC TCAD 技术

1995 年 7 月 3 日收到初稿, 1996 年 2 月 10 日收到修改稿

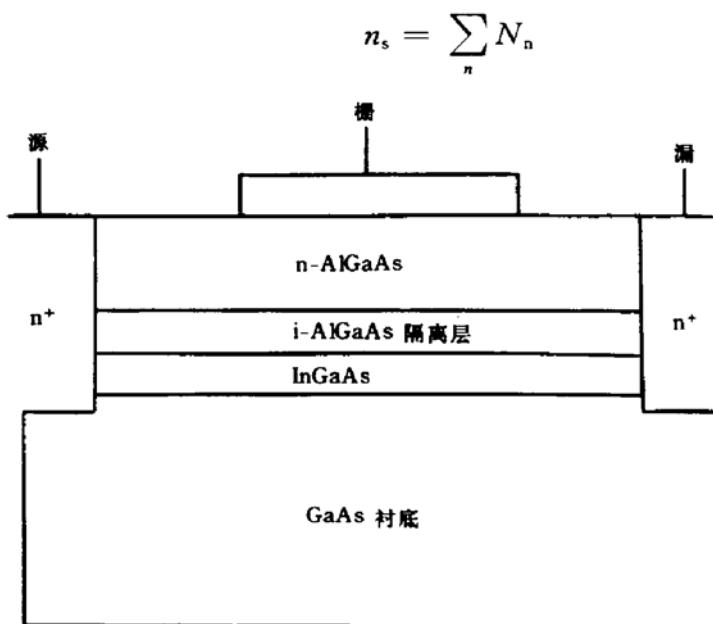


图 1 AlGaAs/InGaAs/GaAs MODFET 结构示意图
通过用蒙特卡罗法计算一个载流子的速度相关函数 $S(\theta)$ 得到^[7]:

$$S(\omega) = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} S(\theta) e^{-i\omega\theta} d\theta \quad (3)$$

$$S(\theta) = \frac{1}{[V(t)V_d][V(t+\theta) - V_d]} \quad (4)$$

其中 V_d 是漂移速度, 扩散系数则可由下式得到:

$$D = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} S(\theta) d\theta \quad (5)$$

另一种求扩散系数的方法是通过计算一组载流子的位移方差^[7]:

$$D_x = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\text{Var } x(t)}{2t} \quad (6a)$$

$$D_y = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\text{Var } y(t)}{2t} \quad (6b)$$

$$\text{Var } x(t) = \langle x(t) - \langle x(t) \rangle \rangle \quad (7a)$$

$$\text{Var } y(t) = \langle y(t) - \langle y(t) \rangle \rangle \quad (7b)$$

模拟中, 电场平行于异质结界面(x 方向). 这里只研究电场较低的情况, 能谷间的散射和实空间中的迁移(real space transfer)不存在, 电子定域在量子阱中, 高场的情况将在下一篇文章中述及.

3 结果

图 2(a)和(b)分别给出了电场等于 200 和 500V/cm 时平行和垂直于电场方向的速度相关函数. 结构剖面为: 40nm N 型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ /10nm 未掺杂 $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ /p 型 GaAs 衬底, 电子面密度为 $10^{11}/\text{cm}^2$, 温度为 77K. 随着相关时间的增加, 垂直相关函数同三维情况一样^[7]按指数规律下降, 而平行相关函数呈现振荡, 其振幅随时间下降.

低场时, 极性光学波散射占主导地位. 这是一个各向异性的散射机制, 接近于 0 的散射角的概率远大于其反散射角. 如果只有这一散射机制的话, 那么电子在电场作用下持续加

其中 m^* 为 InGaAs 中电子有效质量; z 为垂直于界面方向坐标; n 为子带序号; $F_n(z)$ 、 E_n 和 N_n 为 z 处对应第 n 个子带的波函数、带底能量和电子面密度; $\varphi(z)$ 为 z 处电位; ΔE_c 是界面导带底能量差; $u(z)$ 是单位阶梯函数 n_s 是各子带电子面密度之和. 其他符号具有通常的意义. 这里没有考虑量子阱内外有效质量的不同. 而后, 由得到的子能级和波函数用 Price 模型^[6]计算了二维电子气的极性光学波散射和声学波散射率.

扩散噪声的功率频谱 $S(\omega)$ 可以通

速,一旦能量大于极性光学声子的能量 $\hbar\omega_0$,很可能发射一个声子,电子在电场中重新加速,电子再发射声子。这一机制导致平行相关函数振荡。振荡的伪周期 T 同电场成反比。而其他散射机制的存在使这一散射机制被扰乱。在三维情况下,声学波散射将这一机制完全扰乱,致使平行相关函数不呈现振荡^[7]。

在二维情况下,声学波散射率是常数,不同于三维情况,声学波散射只部分扰乱这一振荡机制。因此,平行相关函数的振荡现象只存在于二维系统。平行相关函数的振荡使功率频谱在谐振频率 $1/T$ 处

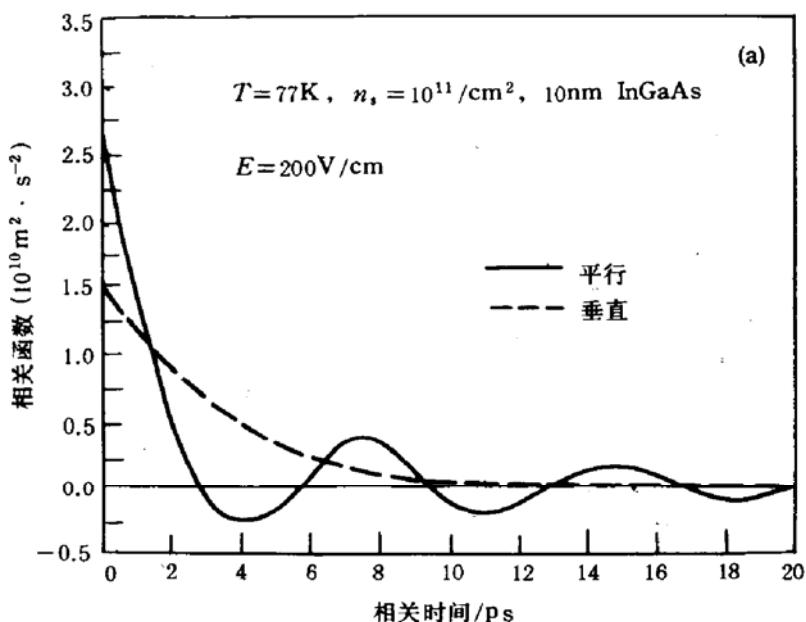


图 2(a) 电场等于 200V/cm 时的平行和垂直速度相关函数

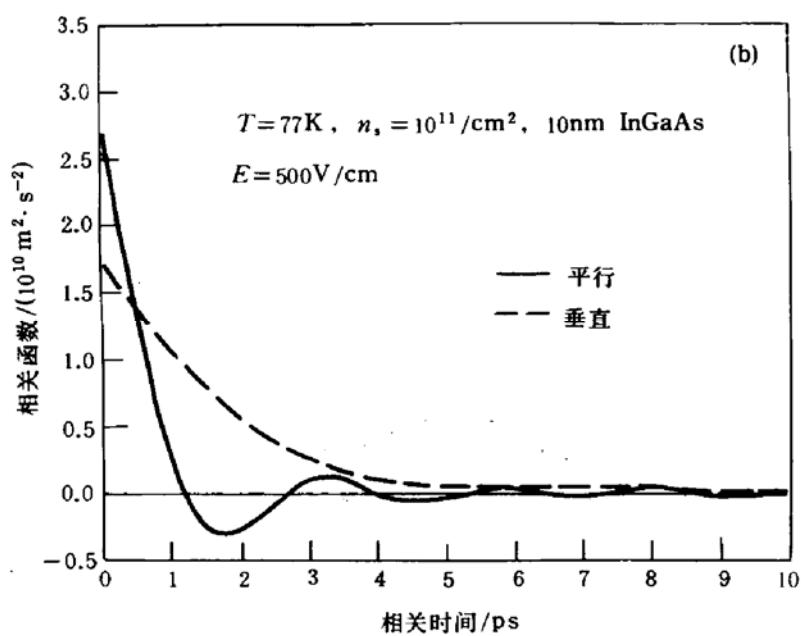


图 2(b) 电场等于 500V/cm 时的平行和垂直速度相关函数

数的振荡振幅下降。而在研究的结构中,由于存在左右两个异质结界面,量子阱的形状随 n_s 的变化相对要小得多,因而子能带能量间隔随 n_s 的变化很小。所以,平行相关函数的振荡振幅对 n_s 的变化不敏感。

InGaAs 厚度的增加同样使平行相关函数的振荡振幅减小,如图 5 所示。增加 InGaAs 厚度使量子阱变宽,子能带间能量间隔减小,从而增加子带间散射,减弱平行相关函数的振荡。同在 AlGaAs/GaAs 异质结构中情况一样,随着温度升高或电场增强,平行相关函数的振荡趋于消失。这是因为在这些条件下,电子能量增大,子带间散射增多,振荡机制被扰乱。

有一极大值,如图 3(a) 和 (b) 所示。

以上描述同在 AlGaAs/InGaAs/GaAs 异质结构中观察到的情况相似^[2]。这是由于共同的电子气的二维性。然而,不同的是,这里平行相关函数随电子面密度的变化很小,如图 4 所示。而在 AlGaAs/GaAs 异质结构中,平行相关函数的振荡振幅随 n_s 的减少明显下降。这是由于在 AlGaAs/GaAs 异质结构中,一侧能带弯曲随 n_s 的减少而趋向平坦,量子阱趋向消失,从而使子带间能量间隔减小,子带间散射增加。于是,振荡机制被扰乱,平行相关函

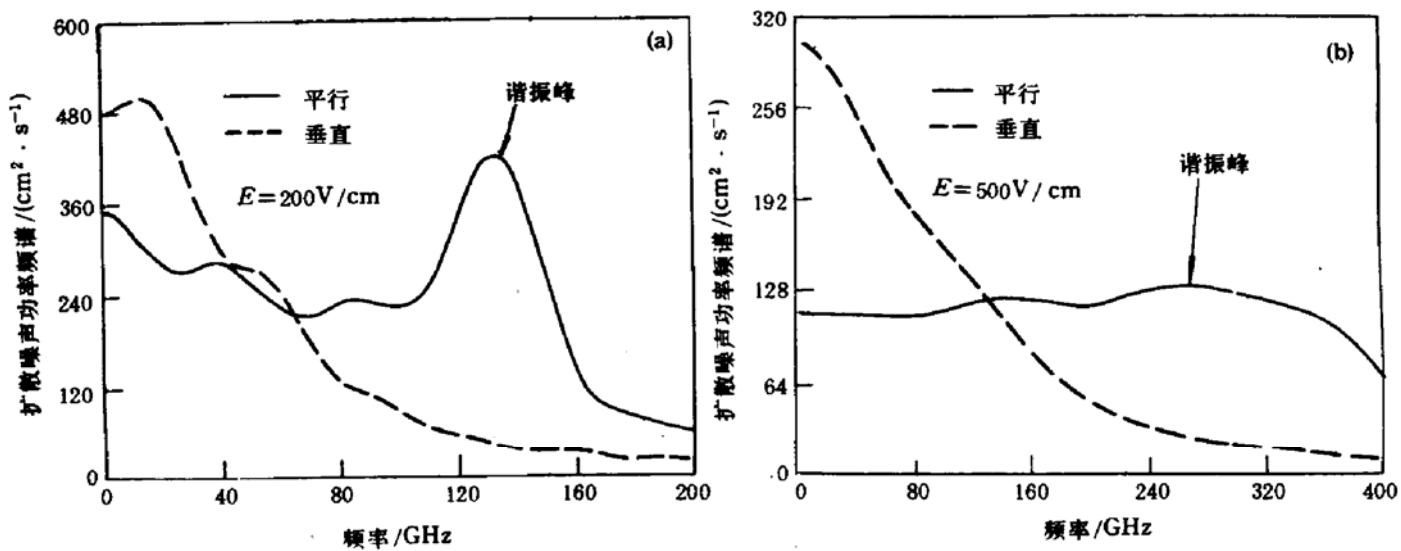
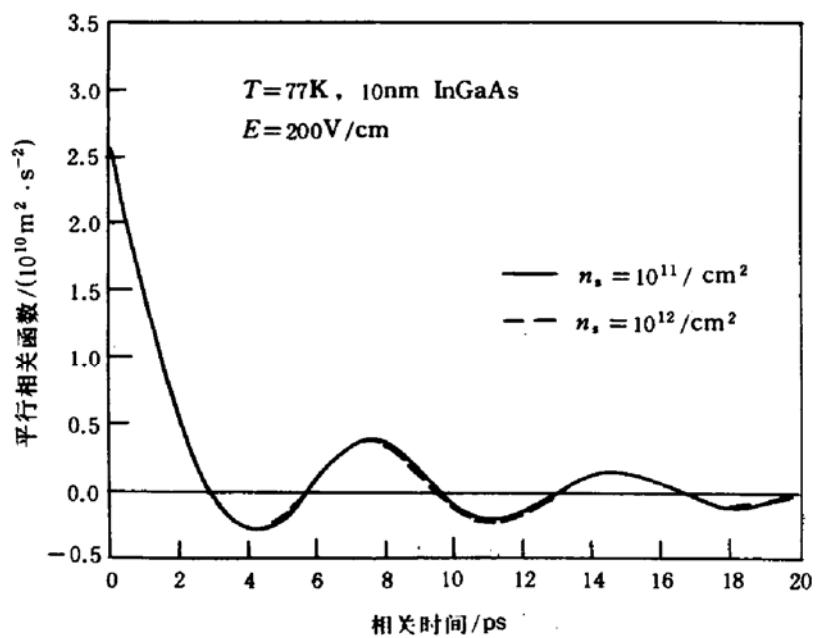


图 3(a) 对应图 2(a)的扩散噪声功率频谱

图 3(b) 对应图 2(b)的扩散噪声功率频谱

图 4 不同电子面密度 n_s 时的平行速度相关函数

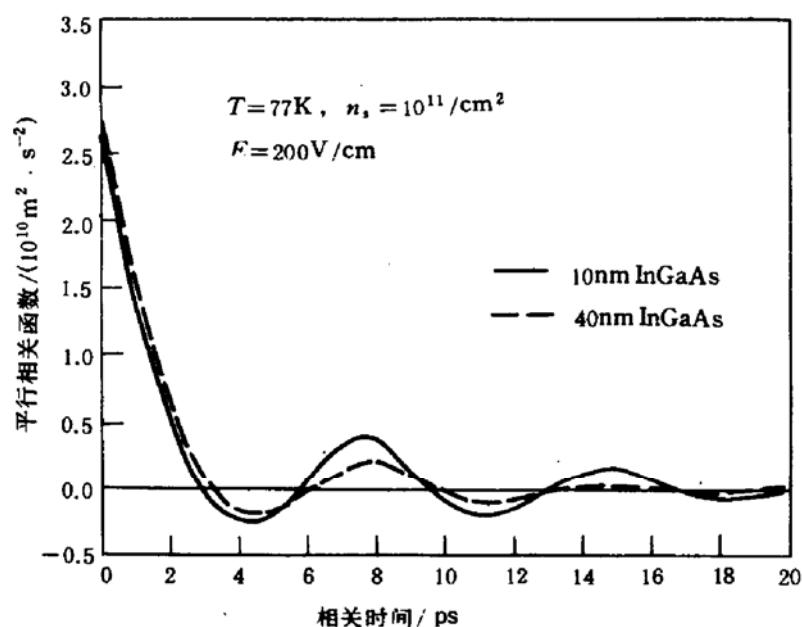
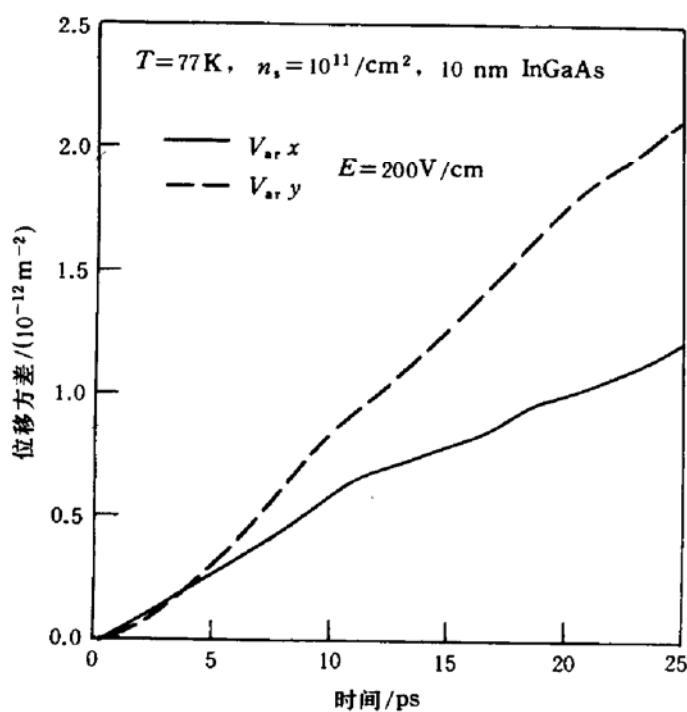
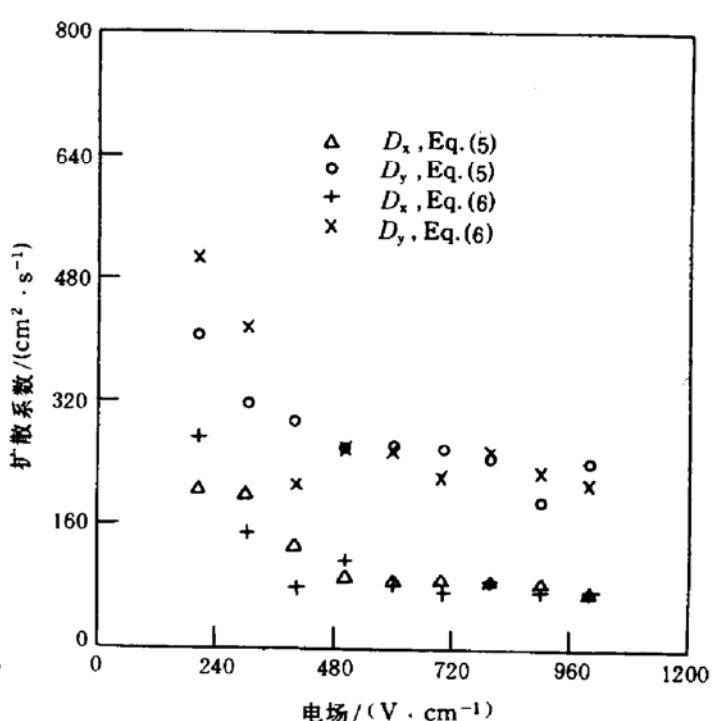


图 5 不同 InGaAs 厚度时的平行速度相关函数

图 6 给出了位移方差随时间的变化, 曲线有较好的直线性。图 7 给出了由此计算得到的扩散系数。同时也给出了通过相关函数计算得到的扩散系数。除掉统计误差, 用两种不同方法得到的扩散系数很接近。

图 6 位移方差随时间的变化曲线,
电场强度为 200V/cm图 7 由位移方差随时间的变化得到扩散系
数和由通过相关函数得到扩散系数的比较

4 结论

用蒙特卡罗方法探讨了 AlGaAs/InGaAs/GaAs 异质结构中的扩散噪声和扩散系数。同 AlGaAs/GaAs 异质结构中的情况一样，平行速度相关函数呈现振荡现象。但不同的是这里振幅随电子面密度化很小。InGaAs 厚度的增加使振幅下降。

参 考 文 献

- [1] L. Nguyen, L. Larson and U. Mishira, Proc. of IEEE, 1992, **80**(4):492.
- [2] J. Zimmermann, 吴渊, Solid-State Electronics, 1988, **31**(3/4):367.
- [3] B. Vinter, Appl. Phys. Lett., 1984, **44**:307.
- [4] 吴渊, 牛国富, 阮刚, 第八届全国化合物半导体、微波器件和光电器件学术会议, 1994.
- [5] A. Abou-Elnour, K. Schueneman, Solid-State Electronics, 1994, **37** (1):27.
- [6] P. Price, Annl. of Phys., 1981, **133**:217.
- [7] R. Fauquemberg, J. Zimmermann, A. Kasynski and E. Constant, J. Appl. Phys., 1980, **52**(2):1065.

Monte Carlo Study of Diffusion Noise and Diffusion Coefficients in AlGaAs/InGaAs/GaAs Hetero-Structure

Wu Yuan, Niu Guofu and Ruan Gang

(Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433)

Received 3 July 1995, revised manuscript received 10 February 1996

Abstract This paper presents a Monte Carlo study of diffusion noise and diffusion coefficients in AlGaAs/InGaAs/GaAs hetero-structure. As in AlGaAs/GaAs hetero-structure, the parallel velocity correlation function oscillates. But here the amplitude of oscillation is much less sensitive to the sheet density of 2D electron gas. Thicker InGaAs results in smaller oscillation amplitude. Diffusion coefficients are calculated from both the velocity correlation function of a single electron and the mean square displacement of a pulse of electrons.

PACC: 7855, 7865