

文章编号 1000-5013(2005)02-0206-04

# 模拟掺杂和偏压对超晶格纵向输运的影响

李国刚 何礼熊

( 华侨大学信息工程学院, 福建 泉州 362021; 福州大学物理与信息工程学院, 福建 福州 350002 )

**摘要** 结合宏观和微观模型, 超晶格的纵向输运模型可以表达为以时间  $T$  为独立变量的微分方程组. 运用 MATLAB 软件进行模拟计算和优化, 深入研究掺杂浓度和外加偏压的变化, 对 GaAs/AlAs 掺杂弱耦合超晶格自维持振荡频率和振幅的影响. 结果表明, 电流振荡频率随偏置电压的增加而单调减小, 振幅相对偏置电压也有大体上单调的变化. 随着掺杂浓度的增加, 振荡频率有非单调的变化, 而振幅则单调地逐渐减小. 电流振荡频率随偏置电压的变化趋势与已有的实验数据基本一致, 其他模拟计算结果还有待进一步实验的验证.

**关键词** 超晶格, 自维持振荡, 掺杂浓度, 偏压

**中图分类号** O 471.4; TN 304.07

**文献标识码** A

在超晶格纵向输运中, 已观察到的振荡现象可分为两类. 一种由微带输运引起的, 被称为扩展 Gunn 振荡. 其机理是布拉格反射引起的偶极畴, 渡越的偶极畴建立起电流振荡. 它的频率可达 60 GHz, 并且受电压的调谐<sup>[1]</sup>, 这一研究课题有很好的前景. 另一种振荡现象是由弱耦合超晶格中电子通过多阱共振隧穿输运过程引起的, 叫作自维持畴振荡<sup>[2]</sup>. 当外加偏置电压后, 载流子输运是从一个势阱通过势垒隧穿到相邻的势阱, 并弛豫到基态, 失去原来的位相记忆. 由于能级发生共振时隧穿几率最高, 如果外加偏置电压从低到高逐渐增加, 会使相邻阱间的子能级发生从非共振到共振再到非共振的过程. 这样导致了 N 型负阻和电场畴的产生. 实验表明, 掺杂浓度和外加偏压的改变对 GaAs/AlAs 掺杂弱耦合超晶格自维持振荡频率和振幅有重要影响.

## 1 超晶格纵向输运的数学模型简述

为了定量解释超晶格中的纵向输运现象, 自 80 年代末以来在实验成果的基础上提出了一系列理论模型, 诸如电路模型及蒙特卡洛模拟等等. 其中有所突破的是 1994 年, 分别由西班牙的 Bonilla 小组提出的分立-漂移模型<sup>[3]</sup>以及由 Prengel 提出的微观模型<sup>[4]</sup>.

宏观模型的实验依据是电子在量子阱子带间的弛豫时间  $t_{rel}$ , 远小于电子在邻阱间的隧穿时间  $t_{tun}$ . 假设每个量子阱都处于准平衡态. 根据宏观模型, 设  $F_i$  是第  $i$  个垒中心的电场,  $n_i$  是第  $i$  个阱的载流子浓度,  $N_D$  是阱中掺杂浓度,  $d1$  是垒间宽度, 外加时变偏压  $U$ . 经推导得无量纲微分方程组<sup>[5]</sup>为

$$\frac{d}{dt}f_i = \frac{1}{m} \frac{d}{dt}U + \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m V(f_j) \cdot (f_j - f_{j-1} + v) - V(f_i) \cdot (f_i - f_{i-1} + v), \quad (1)$$

其中归一化电场  $f_i = F_i/F_{aa}$  ( $F_{aa}$  是邻阱间发生基态-基态共振时的电场, 其值为  $h/et_{rel}d1$ ), 无量纲掺杂参数  $v = N_D d1 / (eF_{aa})$ . 归一化的电子的有效漂移速度  $V(F)$  随电场变化的关系  $V(f) = V(F)/V(F_{aa})$ , 归一化的时间  $t = T/t_{tun}$ , 而  $t_{tun} = d1/V(F_{aa})$ . 同样, 用无量纲参数描述边界条件和初始条件

$$f_1 = f_0 = vc, \quad (2)$$

$$f_i(0) = \frac{U}{m \cdot d1 \cdot F_{aa}}. \quad (3)$$

收稿日期 2004-10-13

作者简介 李国刚(1973-), 男, 讲师, 主要从事微电子学和集成电路设计的研究. E-mail: lgg@hqu.edu.cn

基金项目 福建省教育厅科技基金资助项目(JA01013)

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

方程组(1) 与方程(2), (3) 构成一个用数值方法可解的微分方程组. 超晶格纵向运输可以表达为以归一化时间  $t$  为独立变量的微分方程组, 问题归结为求解关于电场  $f_i$  的微分方程组. 很明显, 只要知道有效漂移速度  $V(f)$  的函数表达式, 就能解出任一时刻的  $f_i$  值. 当式(1)中  $dU/dt = 0$  时, 即在固定偏压下, 满足一定的电压范围和掺杂浓度大小就有可能出现自维持振荡<sup>[5]</sup>.

## 2 超晶格自维持振荡的模拟计算和结果分析

运用 MATLAB 软件进行模拟计算和优化<sup>[6]</sup>, 固定偏压下超晶格纵向运输的求解( $dU/dt = 0$ ) 属于低难度方程组的求解, 一般首选 ode45 命令. 模拟计算参考文[7] 中的实验数据, 用到的漂移速度  $V(f)$  与电场的关系由图 1 确定. 模拟计算表明<sup>[5]</sup>, 只有一定的偏置电压范围和掺杂浓度范围才能产生自维持电流振荡. 但是, 文[5] 没有具体探讨掺杂浓度和偏置电压的变化对电流振荡频率和振幅的影响. 通过运用 MATLAB 软件进行模拟计算和优化<sup>[6]</sup>, 详细深入地计算掺杂浓度和偏置电压的变化, 对 GaAs/AlAs 掺杂弱耦合超晶格自维持振荡频率和振幅的影响, 给出具体直观的关系曲线.

图 2 是从上述  $V(f)$  形式和微分方程组(1), (2), (3) 出发, 模拟计算得到的不同掺杂浓度下的电流自维持振荡波形. 可以明显看出, 振荡频率和振幅都与掺杂浓度有关. 随着掺杂浓度的增加, 振荡频率有非单调的变化, 而振幅则单调地逐渐减小. 由于超晶格中的几何参数一旦确定, 畴边界形成稳定畴所需的载流子数量将有一固定值. 当超晶格中的掺杂浓度较高时, 参

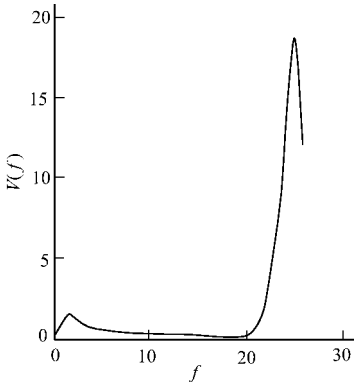


图 1 模拟计算时归一化漂移速度  $V(f)$  与归一化电场强度  $f$  的关系

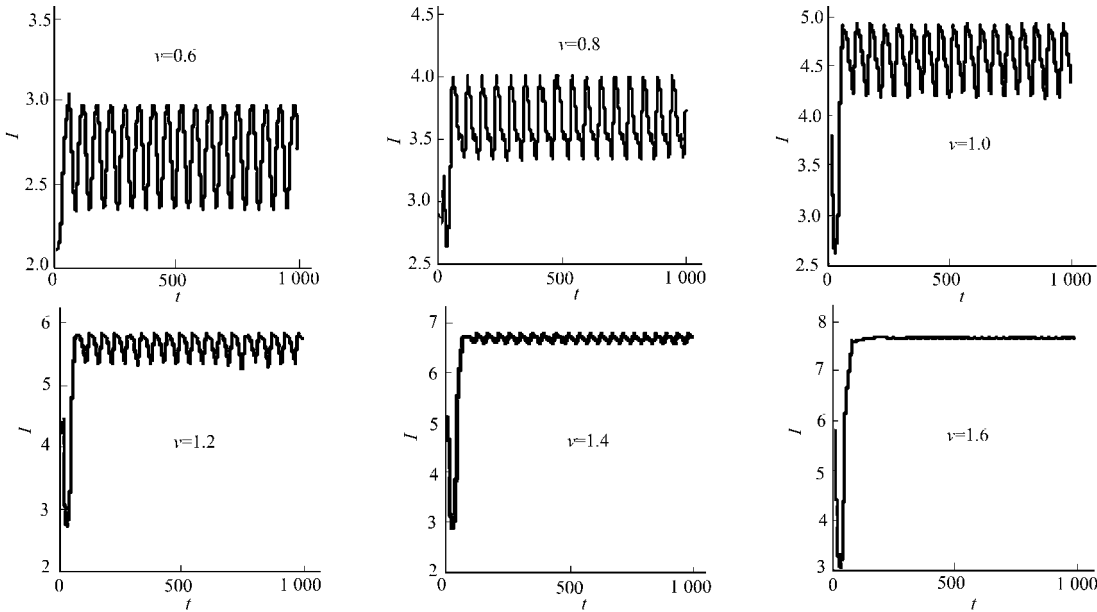


图 2 不同掺杂浓度下模拟计算得到的电流自维持振荡波形

与运输的载流子数目较多, 可在短时间内向畴边界输运载流子. 因此场畴边界仅需跳过较少的几个超晶格周期以满足偏置条件, 电流振荡幅度较小. 当超晶格中的掺杂浓度较低时, 情况刚好相反, 造成电流振荡的振幅较大. 图 3 是模拟计算得到的不同偏置电压下的电流自维持振荡波形, 可以明显看出在不同偏置电压下, 振荡频率和振幅都在变化. 电流振荡频率随偏置电压增加而减小, 振幅相对偏置电压也有大体上单调的变化. 当一外加偏压加到超晶格上时, 基态上的电子会隧穿到邻阱的激发态上去, 这将导致畴的形成和负阻的产生. 随着偏置电压的增加, 参与运输的载流子数目变多, 可在短时间内向畴边界输运载流子. 畴边界仅需跳过较少的几个超晶格周期以满足偏置条件, 因此电流振荡幅度变小.

将上述波形图 2, 3 的数据进行付里叶变换, 得到不同振幅时对应的频谱关系图. 将图 3 中波形的振

幅和振荡频率与偏置电压的关系用图形表达出来,就得到图 4 和图 5.从图 4 看,振幅相对电压也有大

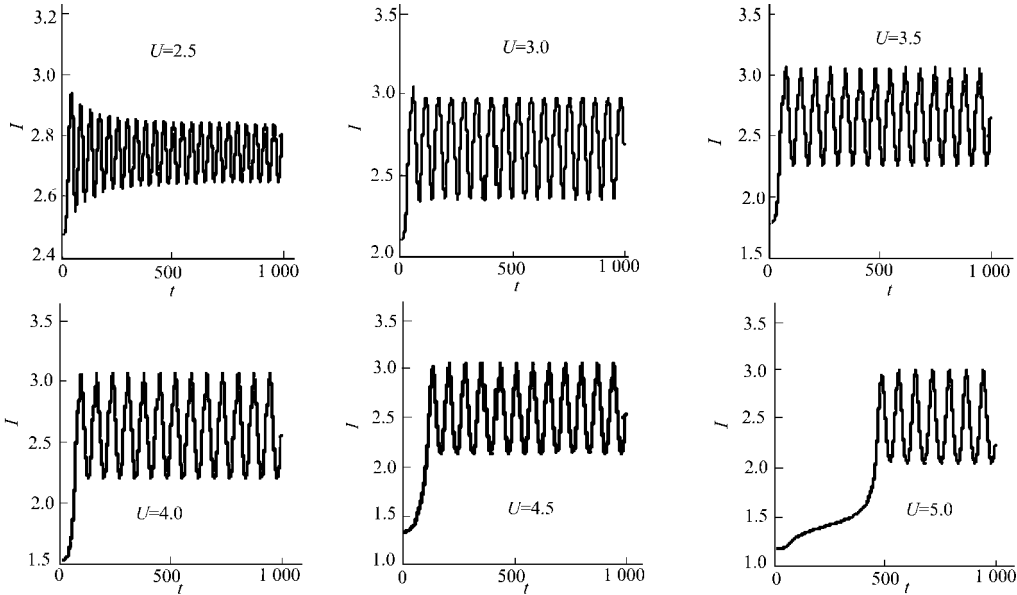


图 3 不同偏置电压下模拟计算得到的电流自维持振荡波形

体上单调的变化,振幅先从 2.5 V 时开始递增,到 3.5 V 时振幅有些回落然后继续地增加.从图 5 就很

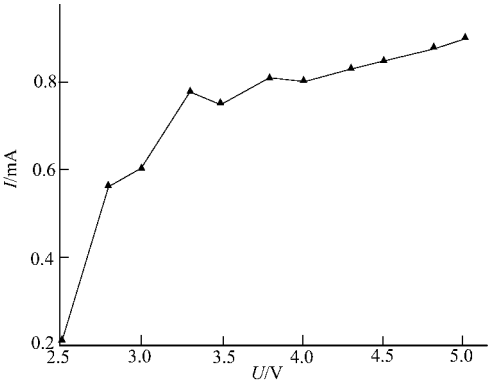


图 4 振幅与偏压关系曲线

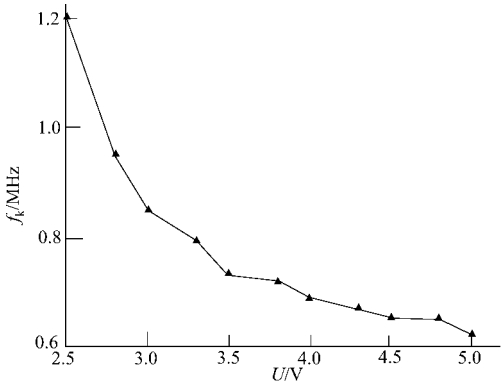


图 5 振荡频率与偏压关系曲线

直观明了地看出电流振荡频率( $f_k$ )随偏置电压的增加而单调减小,这与文[8]电流振荡频率随偏置电压的增加而单调减小的实验数据基本一致.在此基础上可以制做电压调谐的振荡器<sup>[1]</sup>.将图中波形的振幅和振荡频率与掺杂浓度的关系用图形表达出来,就得到图 6 和图 7.从图 6,7 可以看到,随着掺杂浓度

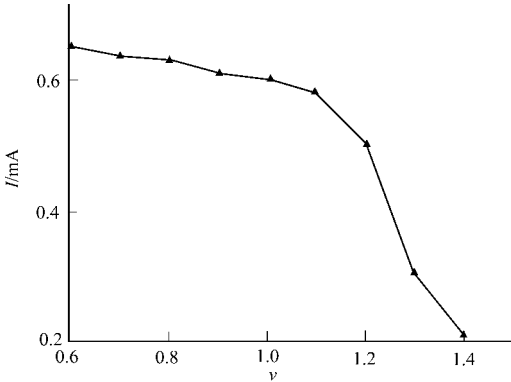


图 6 振幅与掺杂浓度关系曲线

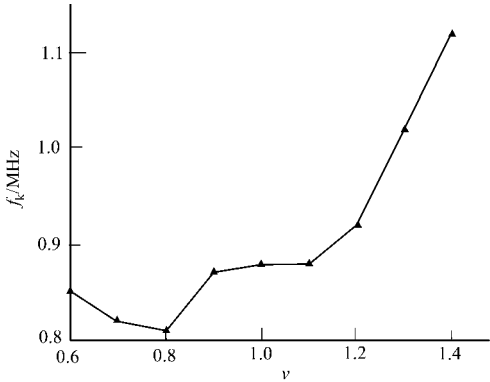


图 7 振荡频率与掺杂浓度关系曲线

的增加,振荡频率有非单调的变化.无量纲掺杂参数为 0.6 至 0.8 范围内,振荡频率先是下降,然后无量纲掺杂参数为 0.8 至 1.4 范围内开始逐步增大.特别是无量纲掺杂参数大于 1.2 后振荡频率增加的幅度也变大,而振幅则单调地逐渐减小.无量纲掺杂参数为 0.5 至 1.1 范围内,其振幅从 0.65 mA 减至

0.58 mA, 只是减小较为缓慢. 无量纲掺杂参数超过 1.1 后减小的振幅幅度急剧变大, 振幅从 0.58 mA 迅速减至 0.2 mA. 以上图 4、图 6 和图 7 的模拟计算结果还有待进一步实验的验证.

### 3 结束语

结合宏观和微观模型, 运用 MATLAB 软件对超晶格的纵向输运模型进行模拟计算和优化. 研究掺杂浓度和外加偏压的改变对 GaAs/AlAs 掺杂弱耦合超晶格自维持振荡频率和振幅的影响. 结果表明, 电流振荡频率随偏置电压的增加而单调减小, 振幅相对偏置电压也有大体上单调的变化. 随着掺杂浓度的增加, 振荡频率有非单调的变化, 而振幅则单调地逐渐减小. 其中电流振荡频率随偏置电压的变化趋势与已有的实验数据基本一致. 其他模拟计算结果, 还有待进一步实验的验证.

### 参 考 文 献

- 1 Schomburg E, Blomeier T, Hofbeck K, et al. Current oscillation in superlattices with different miniband[J]. Phys. Rev. (B), 1998, 58: 4 035~ 4 038
- 2 Kastrop J, Grahn H T, Ploog K, et al. Multistability of the current-voltage characteristics in doped GaAs/AlAs superlattice[J]. Appl. Phys. Lett., 1994, 65(1): 808~ 1 811
- 3 Bonilla L L, Galan J, Cuesta J A, et al. Dynamics of electric field domains in superlattices[J]. Phys. Rev. (B), 1994, 50: 8 644~ 8 657
- 4 Prenfel F, Wacker A, Scholl E. Simple model for multistability and domain formation in semiconductor superlattices[J]. Phys. Rev. (B), 1994, 50: 1 705~ 1 712
- 5 史正平, 何礼熊. GaAs/AlAs 弱耦合超晶格自激电流振荡的掺杂和电压条件的模拟计算[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2002, 30(1): 39~ 42
- 6 李国刚, 何礼熊. MATLAB 软件在超晶格纵向输运模拟计算中的应用[J]. 福建电脑, 2002, (12): 42~ 43
- 7 He Lixiong, Sun Baoquan, Wu Jianqing. Vehical transport in GaAs/AlAs superlattice with weak coupling between wells[J]. Chinese Physics Letters, 1998, 15(4): 293~ 295
- 8 孙宝权. 超晶格在电场下的纵向输运和振荡机制的研究[D]: [学位论文]. 北京: 中国科学院半导体研究所, 1997. 47~ 49

## Simulating Effect of Doping Density and Bias Voltage on Frequency and Amplitude of Self Sustained Oscillation of Weakly Coupled GaAs/AlAs Supperlattice

Li Guogang      He Lixiong

( College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China;  
College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, 350002, Fuzhou, China)

**Abstract** combining macroscopic model with microscopic one, the vertical transportable model of superlattice can be expressed as differential equations taking time  $t$  as unique variable. By using MATLAB software, the authors carry out simulation computation and optimization; and study in a deep going way the effect of the change of doping density and external bias voltage on frequency and amplitude of self sustained oscillation of doped GaAs/AlAs superlattice with weak coupling. As shown by the results, the frequency of current oscillation monotonically reduced with the increase of bias voltage, while the amplitude shows also more or less monotonic change in relation to bias voltage; With the increase of doping density, the frequency shows nonmonotonic change while the amplitude decreases gradually and monotonically. In which the trend that the frequency of current oscillation changes with bias voltage agrees basically with experimental data now available; other results of simulation computation remain to be tested and verified by further experiment.

**Keywords** superlattice, self sustained oscillation, doping density, bias voltage