

砷化镓声电荷输运的二维相互作用模型*

邹英寅

(浙江大学 杭州 310008)

摘要 本文对砷化镓 Schottky-N 结构的埋沟声电荷输运器件中的信号电荷包与声表面波非线性相互作用建立了二维模型. 研究了电荷包的声表面波输运特性, 给出了包内信号电荷密度分布, 电荷包形状及电荷量随器件电荷加载、沟道常数等特性参量的变化特性.

EEACC: 2860C, 2560S, 2560B

1 引言

砷化镓声电荷输运 (Acoustic Charge Transport) 器件自从 1982 年问世以来, 得到了飞速的发展, 它能够得到极高的运算速度和传输效率, 已发展成为新一代的高速信号微处理器, 在通信、电子战、电子对抗等实时信号处理方面有着广泛的应用前景^[1-3].

ACT 器件的结构和工作原理都类似于传统的埋沟型电荷耦合器件 (CCD), 只是由在压电半导体砷化镓中产生的声表面波 (SAW) 行波位阱取代了 CCD 中的多相时钟位阱. SAW 的行波激励提供了一个几乎完全一致的电荷迁移场, 因此不存在因栅结构而引起的沟道电位变化. 虽然对传统的 CCD 电荷输运已有许多理论研究, 但是大部分对 SAW 输运问题是不适用的, 因为限制传输特性的因素是不同的^[4]. 对于埋沟声电荷输运过程, 文献[4]已对 Schottky-N-P 结构的 ACT 器件从场分布角度出发进行了分析. 由于 P 型导电埋层的存在, 对沟道中的 SAW 电位有很强的屏蔽效应^[4,5], 使得行波位阱的幅度减小, 加大了器件的功耗. 因此现在实用的器件已去掉了 P 型导电埋层, 即 Schottky-N 结构的 ACT 器件^[6].

本文从砷化镓中载流子电荷包与 SAW 相互作用角度出发, 建立了 Schottky-N 结构 ACT 器件中的声电荷输运过程的二维行波理论. 对 ACT 器件中声表面波电荷输运过程的分析着重于电荷输运量和传输效率, 这对评价电荷输运的基本特性已足够. 在具体器件的设计中, 由于牵涉到电荷信号的无损检测 (NDS), 因此需要进一步了解包内电荷的分布特性. 本文用该模型研究了在表面波输运过程中信号电荷包的边界形状和二维电荷密度分布随器件结构参数和工作状态的变化, 以及电荷输运量. 典型工作状态下的电荷输运量与文献[4]报道的结果相一致. 同时我们可以看到, 信号电荷包在行波电场的作用下会发生变形.

* 国家教委博士点专项基金资助项目
1992年10月28日收到初稿, 1993年3月14日收到修改稿

2 理论模型

图 1 为一典型的 Schottky-N ACT 器件的结构示意图, 输运沟道由外延生长在半绝缘衬底上的 n 型砷化镓构成, 器件的基本组成是 SAW 叉指换能器、输入端、使沟道耗尽的 Schottky 金属层及输出端等部分. 输运沟道内电荷输运场主要由 SAW 行波场和耗尽电场形成. 由于耗尽电位呈抛物线状分布^[7], 且最大值与 SAW 电位分布最大值重合, 可以预计最大耗尽电位处的电荷密度为最大.

当由 SAW 产生的电位 φ_w 相位变化很小时, 由 Schottky-N 砷化镓输运沟道的耗尽分析^[7]和表面波分析^[5], 空沟道电位的简化表达式与文献[4]类似, 可写成

$$\varphi_c(x, y, t) = -\frac{qN_d}{2\varepsilon}(y - y_m)^2 + |\varphi_w(y)| \cos(kx - \omega t), \quad (1)$$

其中 q 为电子电量, N_d 为 n 型外延层掺杂浓度, ε 为砷化镓介电常数, k 和 ω 分别为 SAW 波数和角频率, y_m 为最大耗尽电位位置. 因为只需考虑空间变化的项, 式中略去了耗尽电位的常数项.

一般在以 y_m 为中心的区域, 耗尽电位 y 方向的梯度比 SAW 电位的要大得多, 横向限制运动电荷的场主要由耗尽电位决定. 在这种情况下, y_m 附近缓慢变化的 SAW 电位可近似为一幅值为 $\varphi_0 = |\varphi_w(y_m)|$ 的平面波. 此时空沟道电位可写成

$$\varphi_c(x, y, t) = -\frac{qN_d}{2\varepsilon}(y - y_m)^2 + \varphi_0 \cos(kx - \omega t). \quad (2)$$

信号电荷注入沟道后, 由于沟道内耗尽电位和 SAW 电位的作用而群聚形成电荷包, 并对沟道电位产生屏蔽作用. 设输运的电荷包密度为 n_s , 则输运沟道内的总电位为

$$\varphi_s = \varphi_c + \varphi_e = \varphi_c + \frac{qn_s}{C_l}, \quad (3)$$

其中 C_l 为系数沟道电容, 定义为单位波长的单位面积沟道等效电容.

半导体中的电流方程为

$$\mathbf{J} = qn_s \mu_n \mathbf{E} + qD_n \nabla n_s, \quad (4)$$

μ_n 和 D_n 分别为砷化镓中电子的迁移率和扩散系数. 在以声速 v_s 运动的坐标系内, 稳态输运时有

$$\mathbf{J} = J_y \hat{y} + J_x \hat{x} = -qn_s v_s \hat{x}. \quad (5)$$

而

$$\begin{cases} E_x = -\frac{\partial \varphi_s}{\partial x} \\ E_y = -\frac{\partial \varphi_s}{\partial y} \end{cases} \quad (6)$$

将(5)、(6)代入(4), 得

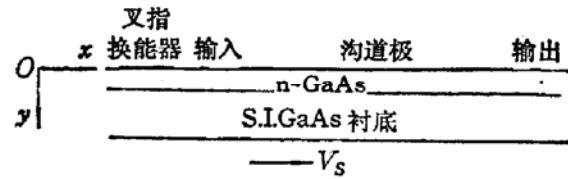


图 1 声电荷输运器件示意图

$$\mathbf{J} = qn_s\mu_n\left(-\frac{\partial\varphi_s}{\partial x}\hat{x} - \frac{\partial\varphi_s}{\partial y}\hat{y}\right) + qD_s\left(\frac{\partial n_s}{\partial x}\hat{x} + \frac{\partial n_s}{\partial y}\hat{y}\right) = -qn_s v_s \hat{x}. \quad (7)$$

由于只需考虑在行波参照系中某一独立时刻的相互作用, 因此可以用归一化空间变量

$$\begin{cases} \theta_x = kx - \omega t \\ \theta_y = ky, \end{cases} \quad (8)$$

进行变换. 当忽略扩散时^[4], 有

$$\begin{aligned} & \left\{ n_s \mu_n k \left[\varphi_0 \sin \theta_x - S \frac{\partial n_s}{\partial \theta_x} \right] + n_s v_s \right\} \hat{x} \\ & + \left\{ n_s \mu_n k \left[\frac{qN_d}{\varepsilon k^2} (\theta_y - \theta_{ym}) - S \frac{\partial n_s}{\partial \theta_y} \right] \right\} \hat{y} = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $S = q/C_1$, $\theta_{ym} = ky_m$.

解方程(9)可得电荷密度为

$$n_s(\theta_x, \theta_y) = \frac{\varphi_0 C_1}{q} \left[\frac{\rho_d}{2\rho_\omega} (\theta_y - \theta_{ym})^2 + (\cos \theta_0 - \cos \theta_x) - A(\theta_0 - \theta_x) \right], \quad (10)$$

其中 $\rho_d = qN_d$ 为耗尽电荷密度

$\rho_\omega = \varepsilon k^2 \varphi_0$ 为峰值波极化电荷密度

$A = \frac{v_s}{\mu_n k \varphi_0}$ 为同步参数

$\theta_0 = \cos^{-1}(\cos \theta_s - \varphi_{cl}/\varphi_0)$

φ_{cl}/φ_0 为归一化电荷负载

$\theta_s = \sin^{-1}(-A)$ 为声同步角.

在电荷包边界上, 有 $n_s(\theta_{xb}, \theta_{yb}) = 0$, 由式(10)可得

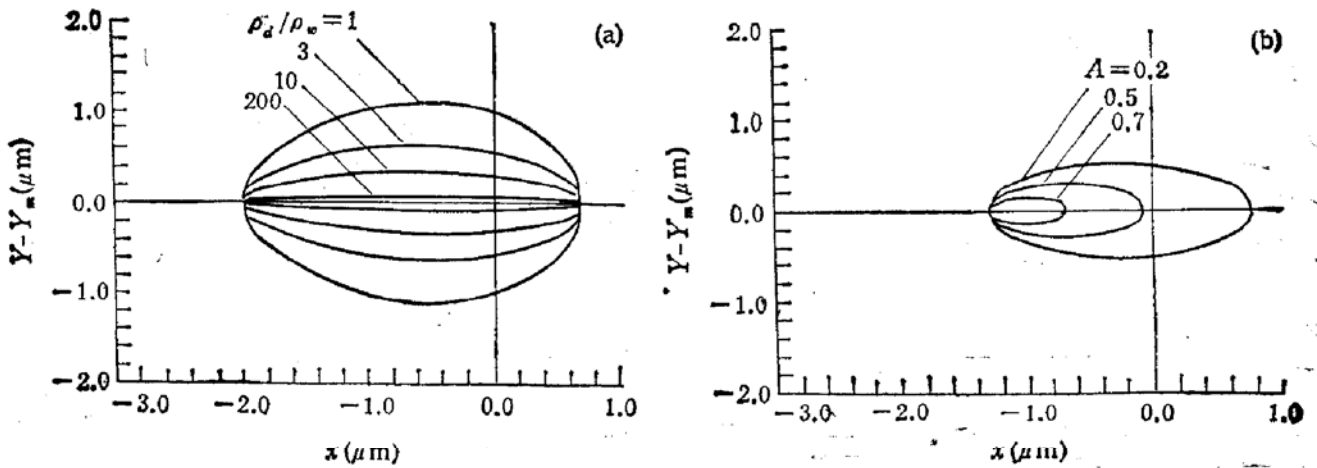
$$\theta_{yb} - \theta_{ym} = \pm \left\{ \frac{2\rho_\omega}{\rho_d} [(\cos \theta_0 - \cos \theta_{xb}) + A(\theta_{xb} - \theta_0)] \right\}^{1/2}. \quad (11)$$

每个电荷包单位束宽的电子数定义为由式(11)确定的电荷包边界内的电荷密度积

$$\text{分, 即} \quad N = \frac{1}{k^2} \iint_{\mathcal{R}} n_s d\theta_x d\theta_y = \frac{1}{k^2} \int_{\theta_0}^{\theta_1} \int_{-\theta_{yb} + \theta_{ym}}^{\theta_{yb} + \theta_{ym}} n_s d\theta_x d\theta_y. \quad (12)$$

3 结果和讨论

图 2(a) 为不同沟道常数下的电荷包形状, 图 2(b) 为不同同步参数 A 下的电荷包形状. 由图 2 可见, 在一般情况下, 电荷包的形状是非对称的, 电荷包有“拖尾”现象发生. 当 A 值变小时, 电荷的“溢出”趋势减小, 电荷包的对称性变好. 当 A 为零时, 电荷包是完全对称的, 此即文献[4]中的无穷迁移率近似. 该现象的物理意义是很明显的, 因为 A 值是同步场 $-V_s/\mu_n$ 与行波场 $k\varphi_0$ 的比值, 当 A 变小时, 对应于同步场对电荷的影响变小, 使得电荷包内电荷在移动坐标系中迁移更加困难, 在运动方向电荷分布主要由 SAW 行波场所规定. 沟道常数 ρ_d/ρ_ω 的值影响电荷包的宽度. 对大的沟道常数(相当于大的耗尽场), 电荷包被“压扁”而给出近椭圆的边界. 在沟道常数变得很大时, 由于耗尽场的强大



(a) $\varphi_{ci}/\varphi_0 = 1, A = 0.4$ 时电荷包形状 (b) $\rho_d/\rho_w = 3, \varphi_{ci}/\varphi_0 = 0.5$ 时电荷包形状
图 2 电荷包边界

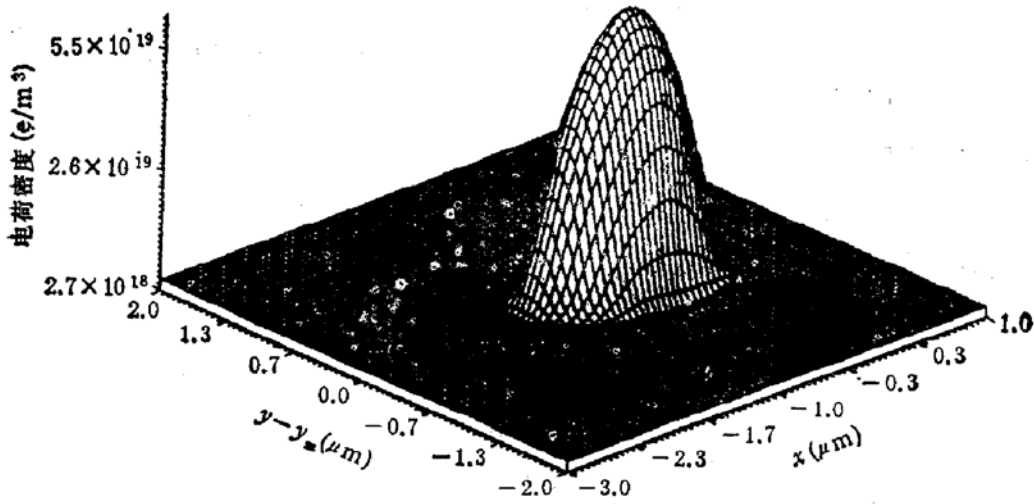


图 3 电荷包内二维电荷密度分布

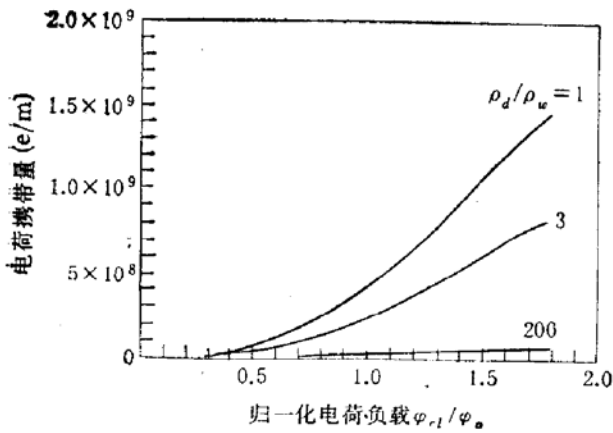


图 4 不同沟道常数下输运电荷量与归一化电荷负载的关系

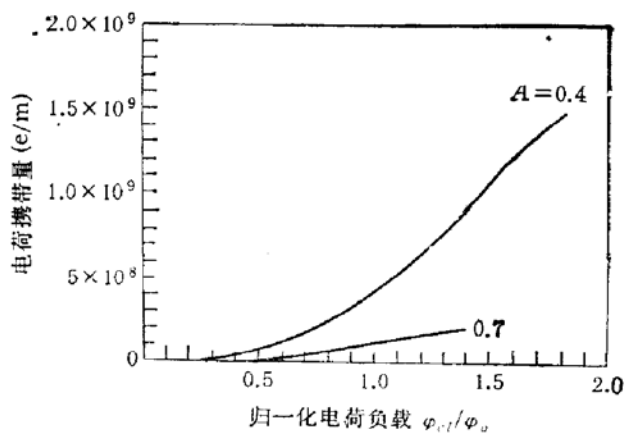


图 5 不同同步参数 A 下输运电荷量与归一化电荷负载的关系

限制,电荷包被压缩成面电荷形状而退化为一维状态。而电荷加载 φ_{ci}/φ_0 对电荷包形状

影响很小,主要是影响电荷包内的电荷量。

图 3 给出了一个典型的电荷包内的电荷密度分布,电荷包内电荷分布关于 $y - y_m$ 对称,密度最大点对应于电荷包的同步角.图 4 为在不同沟道常数下输运电荷量对归一化电荷负载的变化,而图 5 为输运电荷量在取不同 A 值时随归一化电荷负载 φ_{c1}/φ_0 的变化.随着沟道常数和 A 的增大,电荷包携带电荷的能力降低,电荷输运量也减少。

4 结 论

本文建立了砷化镓 Schottky-N 结构声电荷输运器件中信号电荷包与声表面波的二维相互作用模型,分析了信号,包内电荷分布及电荷输运量与器件参数的关系.沟道常数的增大(即耗尽场增强)使电荷包“压扁”,归一化电荷负载增大使电荷包变大,而行波场强的增大使电荷包变形.电荷密度在 y 方向呈现对称分布,对称面为最大耗尽场位置 $y - y_m$ 平面,且在同步角处最大.输运电荷量随电荷加载增大、行波场强增大和沟道常数减小而增大。

因此用该二维分析模型可以比较全面地了解 ACT 器件中信号电荷包在 SAW 输运下的分布特性和形状特性^[8]。

参 考 文 献

- [1] B. J. Hunsinger, 1990 MTT-S Proc., 1990, 1099
- [2] R. J. Kancy, *et al.*, Microwave J., 1988, 31(11); 141.
- [3] 邹英寅等,微波学报,1990,21: 1.
- [4] M. J. Hoskins, *et al.*, J. Appl. Phys., 1984, 55 (2): 413.
- [5] 邹英寅等,浙江大学学报,1992,26(3): 263.
- [6] A. Laundrie, Microwave & RF, 1989, 28(8): 147.
- [7] 邹英寅等,半导体学报,1992,13(1): 42.
- [8] 邹英寅,浙江大学博士学位论文,1992.5.

Two-Dimensional Interaction Model for Acoustic Charge Transport in Gallium Arsenide

Zou Yingyin

(Zhejiang University, Hangzhou 310008)

Abstract A two-dimensional nonlinear interaction model of signal charges and surface acoustic wave (SAW) is developed for Schottky-N GaAs buried channel acoustic charge transport (ACT) devices. The process of a charge packet transported by SAW is studied. The characteristics, such as shape, charge density distribution and charge capacity of a charge packet, varied with channel constant, traveling wave field and normalized charge loading is given.

EEACC: 2860C, 2560S, 2560B