

# AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 高电子迁移率器件外部边缘电容的物理模型\*

刘乃漳 张雪冰 姚若河†

(华南理工大学电子与信息学院, 广州 510640)

(2019年12月20日收到; 2020年1月31日收到修改稿)

AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT 外部边缘电容  $C_{\text{ofd}}$  是由栅极垂直侧壁与二维电子气水平壁之间的电场构成的等效电容. 本文基于保角映射法对  $C_{\text{ofd}}$  进行物理建模, 考虑沟道长度调制效应, 研究外部偏置、阈值电压漂移和温度变化对  $C_{\text{ofd}}$  的影响: 随着漏源偏压从零开始增加,  $C_{\text{ofd}}$  先保持不变再开始衰减, 其衰减速率随栅源偏压的增加而减缓; AlGa<sub>N</sub> 势垒层中施主杂质浓度的减小和 Al 组分的减小都可引起阈值电压的正向漂移, 正向阈值电压漂移会加强沟道长度调制效应对  $C_{\text{ofd}}$  的影响, 导致  $C_{\text{ofd}}$  呈线性衰减. 在大漏极偏压工作情况下,  $C_{\text{ofd}}$  对器件工作温度的变化更加敏感.

**关键词:** HEMT, 外部边缘电容, 沟道长度调制效应, 模型

**PACS:** 73.40.Kp, 73.61.Ey, 71.10.Ca

**DOI:** 10.7498/aps.69.20191931

## 1 引言

AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 高电子迁移率晶体管 (high electron mobility transistor, HEMT) 具有良好的高频和高功率特性, 在射频领域得到了广泛的关注<sup>[1,2]</sup>. Ga<sub>N</sub> HEMT 的  $C$ - $V$  特性是器件的一个重要参数. 其栅极电容可以分为本征电容和二维电子气 (two-dimensional electron gas, 2DEG) 电极边缘电容两部分, 而边缘电容在总的栅极电容中占有相当大的比例, 器件正常工作状态下占 10% 以上, 在弱反型或截止区时甚至达到 90%<sup>[3]</sup>. 边缘电容包括内部边缘电容  $C_{\text{ifs/d}}$  和外部边缘电容  $C_{\text{ofs/d}}$ , 其中  $C_{\text{ofs/d}}$  会受到外部偏置的影响, 特别是漏端一侧的外部边缘电容  $C_{\text{ofd}}$  所受的影响尤为明显.

Pregaldiny 等<sup>[4]</sup> 曾指出 LDD MOSFET 内部边缘电容  $C_{\text{ifs/d}}$  与器件所施加的栅极电压密切相关,

建立了  $C_{\text{ifs/d}}$  对应的物理模型. Bansal 等<sup>[5]</sup> 利用保角映射法对 DGMOS 的外部边缘电容  $C_{\text{ofs/d}}$  进行了物理建模, 该  $C_{\text{ofs/d}}$  模型中的变量由工艺参数决定, 未考虑外加偏压对  $C_{\text{ofs/d}}$  的影响. 之后, Zhang 等<sup>[3]</sup> 推导了 Ga<sub>N</sub> HEMT 包含边缘电容  $C_{\text{ifs/d}}$  和  $C_{\text{ofs/d}}$  的电容模型, 认为边缘电容对 Ga<sub>N</sub> HEMT 器件开关特性有着重要的影响. 最近, Li 等<sup>[6]</sup> 建立了适用于 Ga<sub>N</sub> HEMT 边缘电容的电荷模型, 指出外部边缘电容与施加的漏极偏压相关, 之后 Jia 等<sup>[7]</sup> 对 Ga<sub>N</sub> HEMT 边缘电容模型进行了改进, 在传统  $C_{\text{ofs/d}}$  模型前添加指数修正函数来表述  $C_{\text{ofd}}$  随外加偏压的变化情况. 到目前为止, 由于利用保角映射法推导得到的  $C_{\text{ofd}}$  模型只与工艺参数相关, 常被当作固定值处理. 而实验发现它会受到外加偏置电压的影响, 但目前已报道的研究文献尚未给出  $C_{\text{ofd}}$  关于外加偏压的理论解释及相应的物理模型,  $C_{\text{ofd}}$  关于外加偏压的物理模型有待确立.

\* 国家重点研究计划 (批准号: 2018YFB1802100) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: phrhyao@scut.edu.cn

本文通过分析外部边缘电容的形成机理, 推导出新的  $C_{\text{ofd}}$  的核心模型, 同时利用沟道长度调制效应确定漏端沟道长度, 研究了外加偏压、温度变化及阈值电压漂移对  $C_{\text{ofd}}$  的影响, 建立了相应的  $C_{\text{ofd}}$  物理模型.

## 2 物理模型推导

GaN HEMT 的沟道长度与器件工作状态相关. 以耗尽型 GaN HEMT 为例, 其关断 (OFF) 与开启 (ON) 状态示意图如图 1 所示. 当  $V_g$  低于阈值电压 ( $V_{\text{th}}$ ) 时, 器件处于关断状态, 此时  $V_g$  太小不足以在 AlGaIn/GaN 形成能供 2DEG 运动的势阱, 在栅极下方形成一小区域的耗尽区 [7], 2DEG 沟道被耗尽区隔开为漏端沟道和源端沟道. 同时, 在栅极与漏极之间, 靠近栅极的 AlGaIn 类施主表面陷阱起着“虚栅”的作用 [8], 这个能够俘获电子的虚栅使栅极和漏极之间的等效电位 ( $V_{\text{GD}}$ ) 降低, 把栅极靠近漏端下方的 2DEG 也耗尽 [9], 导致耗尽区向漏端延伸, 漏端沟道长度 ( $L_d$ ) 减小; 当  $V_g$  足够大且稳定时, HEMT 处于开启状态, 栅极下方的耗尽区消失, 同时类施主表面陷阱释放电子, 由虚栅引起的耗尽区也连同消失, 这时漏或源端沟道长度都达到最大值.

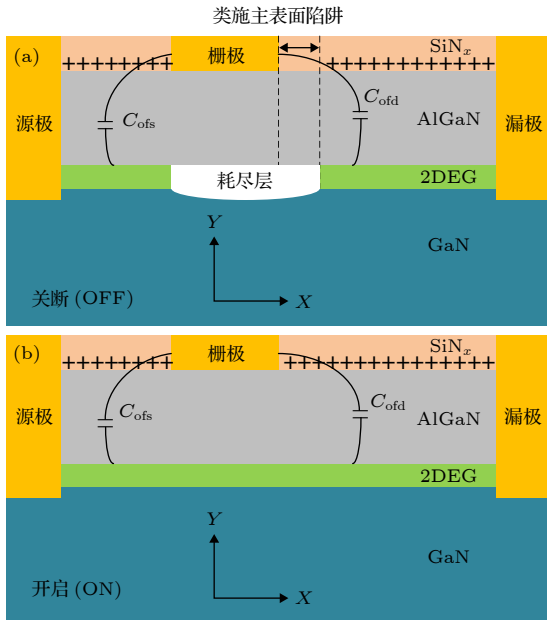


图 1 GaN HEMT 不同工作状态下外部边缘电容示意图 (a) 处于关断状态; (b) 处于开启状态

Fig. 1. Schematic of GaN HEMT outer fringing capacitances in different state: (a) In the OFF-state; (b) in the ON-state.

$C_{\text{ofs/d}}$  是由栅极垂直侧壁与漏 (源)2DEG 水平壁之间的电场构成的等效电容, 该电容与沟道长度密切相关. 而由于  $L_d$  同时受沟道长度调制效应和表面陷阱变化的影响,  $C_{\text{ofd}}$  随外部偏压变化情况比  $C_{\text{ofs}}$  更复杂.

### 2.1 $C_{\text{ofd}}$ 核心模型

图 2 是与  $C_{\text{ofd}}$  相关电场的示意图,  $T_g$  是栅极的厚度,  $T_{\text{AlGaIn}}$  是 AlGaIn 势垒层的厚度,  $L_{\text{dep,d}}$  是类施主表面陷阱对 2DEG 的耗尽长度,  $L_d$  是不考虑沟道长度调制效应时的漏端沟道长度.

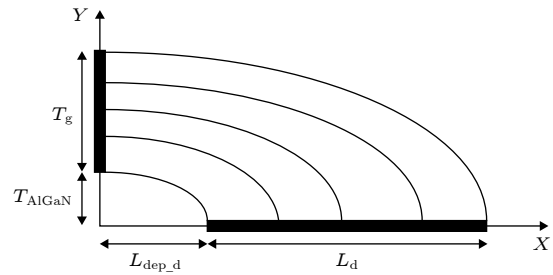


图 2 栅极侧壁与 2DEG 之间的电场示意图

Fig. 2. Schematic of normal electric field between the side wall of the gate and the 2DEG.

求解  $C_{\text{ofd}}$  需要先将电场转换成共焦电场, 以最里面的电场线作为参考, 它的焦点是

$$f = \sqrt{L_{\text{dep,d}}^2 - T_{\text{AlGaIn}}^2} \quad (L_{\text{dep,d}} \geq T_{\text{AlGaIn}}). \quad (1)$$

假设其外部的共焦电场表达式为

$$\frac{x^2}{(L_{\text{dep,d}} + L_{\text{cd}})^2} + \frac{y^2}{(T_{\text{AlGaIn}} + T_{\text{cg}})^2} = 1, \quad (2)$$

结合 (1) 式可以求出外部电场与内部电场共焦时  $T_{\text{cg}}$  应当满足的条件:

$$T_{\text{cg}} = \sqrt{L_{\text{cd}}^2 + 2L_{\text{dep,d}}L_{\text{cd}} + T_{\text{AlGaIn}}^2 - T_{\text{AlGaIn}}}. \quad (3)$$

共焦后的电场示意图如图 3(a) 所示, 令  $L_{\text{cd}} = L_d$  后电场示意图如图 3(b) 所示.

求出共焦电场后利用转换函数将共焦电场转换成平板电容模型, 转换函数如下:

$$v = \cosh^{-1} \left[ \frac{x^2 + y^2 + 1 \pm \sqrt{(x^2 + y^2 + 1)^2 - 4x^2}}{2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4a)$$

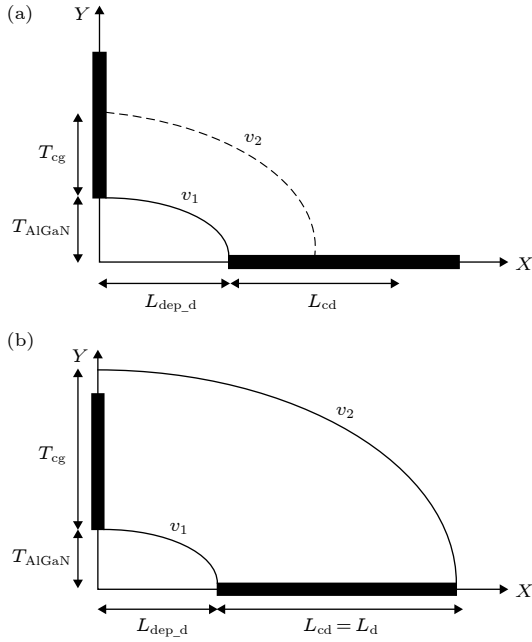


图3 (a) 共焦后的电场示意图; (b)  $L_{cd} = L_d$  时的共焦电场  
Fig. 3. (a) Electric field lines after transforming the nonconfocal elliptical system to the confocal system; (b) the confocal system with  $L_{cd} = L_d$ .

$$u = \sin^{-1} \left[ \frac{x^2 + y^2 - 1 \pm \sqrt{(x^2 + y^2 - 1)^2 + 4y^2}}{2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4b)$$

其中,  $x$  和  $y$  都是  $X$ - $Y$  坐标系对  $f$  归一化后的数值,  $u$  表示电势,  $v$  表示电场. 把  $v_1$  和  $v_2$  与  $Y$  轴的交点  $(0, T_{AlGaN}/f)$  和  $(0, (T_{AlGaN} + T_{cg})/f)$  分别代入 (4a) 式可以求出  $v_1$  与  $v_2$ ,

$$v_1 = \ln \left( \frac{L_{dep\_d} + T_{AlGaN}}{f} \right),$$

$$v_2 = \ln \left( \frac{T_{cg} + T_{AlGaN} + \sqrt{L_{dep\_d}^2 + T_{cg}^2 + 2T_{AlGaN}T_{cg}}}{f} \right).$$

同时把 (3) 式代入到  $v_2$  中可以得到  $v_2$  关于  $L_{cd}$  的表达式,

$$v_2 = \ln \left( \frac{L_{dep\_d} + L_{cd} + \sqrt{L_{cd}^2 + 2L_{dep\_d}L_{cd} + T_{AlGaN}^2}}{f} \right). \quad (5)$$

同理, 也把两个交点代入 (4b) 中可以求得  $u_1$  和  $u_2$  的表达式:  $u_1 = 0$ ,  $u_2 = \pi/2$ . 然后利用平板电容的公式,

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{\Delta E}{\Delta u} \varepsilon_1 = \frac{v_2 - v_1}{u_2 - u_1} \varepsilon_1 \quad (6)$$

把  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $u_1$ ,  $u_2$  全部代入到 (6) 式中可以计算出共焦电场的等效边缘电容  $C_{ofd}$ ,

$$C_{ofd} = \frac{2\varepsilon_x W}{\pi} \times \ln \left( \frac{\sqrt{L_{cd}^2 + 2L_{dep\_d}L_{cd} + T_{AlGaN}^2} + L_{dep\_d} + L_{cd}}{L_{dep\_d} + T_{AlGaN}} \right). \quad (7)$$

其中:  $\varepsilon_x$  是介于钝化层  $SiN_x$  与  $AlGaN$  势垒层之间的等效介电常数<sup>[3]</sup>, 这是因为电场线同时穿过钝化层  $SiN_x$  和  $AlGaN$  势垒层;  $W$  表示器件宽度.

如图4所示, 因为在计算共焦电场时, 作出了  $L_{cd} = L_d$  的假设, 所以得出的外部共焦电场其实比原本的最外部的电场大, 需要在  $L_{cd}$  前添加修正函数  $\eta$ , 最终得到的  $C_{ofd}$  表达式如下,

$$C_{ofd} = \frac{2\varepsilon_x W}{\pi} \times \ln \left( \frac{\sqrt{(\eta L_{cd})^2 + 2\eta L_{cd}L_{dep\_d} + T_{AlGaN}^2} + L_{dep\_d} + \eta L_{cd}}{L_{dep\_d} + T_{AlGaN}} \right), \quad (8)$$

其中:

$$\eta = \exp \left( \frac{\tau T_g^3 - \sqrt{L_{cd}^2 + 2L_{dep\_d}L_{cd} + T_{AlGaN}^2} + T_{AlGaN}}{aT_g^2 + bT_g + c} \right);$$

$\tau$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  为拟合参数.

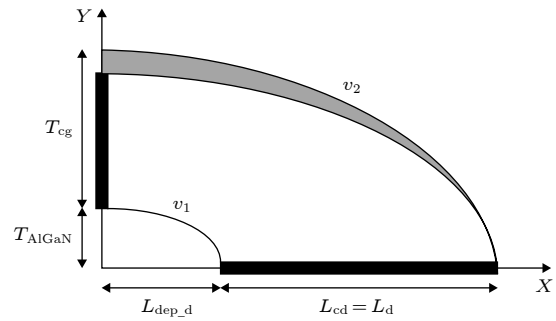


图4  $L_{cd} = L_d$  所引入的误差  
Fig. 4. Error in the confocal system with  $L_{cd} = L_d$ .

## 2.2 沟道长度调制效应

当  $V_{ds}$  较大时漏端沟道长度因为沟道长度调制效应而减小, 假设沟道长度变化量为  $\Delta L$ , 漏端实际沟道长度  $L_{cd}$  为:

$$L_{cd} = L_d - \Delta L, \quad (9)$$

$$\Delta L = p \sinh^{-1} \left( \frac{V_{ds} - V_{dse}}{pE_{sat}} \right), \quad (10)$$

$$V_{dse} = \frac{V_{ds}}{\left( 1 + \left( \frac{V_{ds}}{V_{dsat}} \right)^m \right)^{\frac{1}{m}}}, \quad (11)$$

其中,  $p$ ,  $m$  为拟合参数,  $E_{sat}$  为饱和电场,  $V_{dse}$  为渐变沟道末端的电位,  $V_{dsat}$  为夹断点电势. (11) 式中  $V_{dsat}$  可以通过以下方式确定.

当势垒层 AlGa<sub>x</sub>N 中的载流子被完全耗尽后, 2DEG 沟道内电子浓度  $n_s$  表达式可以写成<sup>[10]</sup>,

$$n_s = \frac{\varepsilon}{qd} (V_g - V_{th} - \varphi_s), \quad (12)$$

$$\varphi_s = V_c + E_f, \quad (13)$$

其中,  $d$  是 AlGa<sub>x</sub>N 层的厚度 ( $d = T_{AlGaN}$ ),  $\varphi_s$  表示表面势,  $V_c$  表示不同沟道位置处的电势. 由于位于漏端附近的沟道受到栅极电压的控制相对较弱, 因此当  $V_d$  升高时, 靠近漏端的势阱先消失形成耗尽区. 耗尽区内电子很少, 与 2DEG 沟道内的电子浓度相比可以忽略, 假设沟道和耗尽区交界的夹断点处  $n_s = 0$ , 此时  $V_c$  就是夹断点电势  $V_{dsat}$ , 稍作修正后表达式为

$$V_{dsat} = \frac{(V_g - V_{th})}{(\xi_1 - \xi_2 E_f)} - E_f, \quad (14)$$

其中,  $\xi_1$  和  $\xi_2$  是拟合参数;  $E_f$  为费米能级, 是一个与器件工作状态相关的物理量.  $E_f - n_s$  的经验表达式为<sup>[11]</sup>:

$$E_f = k_1 + k_2 n_s^{\frac{1}{2}} + k_3 n_s, \quad (15)$$

$$n_s = \left( \left\{ -k_2 + [k_2^2 + 4k_3'(V_g - V_{th} - k_1)]^{\frac{1}{2}} \right\} / 2k_3' \right)^2, \quad (16)$$

其中,  $k_3' = k_3 + qd/\varepsilon$ ;  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  是拟合参数, 在  $T = 300$  K 下分别为:  $k_1 = -0.0802$  V,  $k_2 = 1.039 \times 10^{-9}$  V·m,  $k_3 = 1.0454 \times 10^{-18}$  V·m<sup>2</sup>.

本文提出的  $C_{ofd}$  模型中,  $E_f$  以及阈值电压  $V_{th}$  都与温度相关<sup>[12]</sup>, 而由于  $E_f$  随温度变化对  $C_{ofd}$  的贡献相对于  $V_{th}$  来说要小得多, 在 300—500 K 条件下由  $E_f$  引起  $C_{ofd}$  的变化比由  $V_{th}$  引起的变化少 3 个数量级, 因此对  $C_{ofd}$  进行温度仿真时可以近似认为  $E_f$  与温度无关. 阈值电压关于温度的关系表达式为<sup>[13]</sup>

$$V_{th}(T) = V_{th} + V_{temp} \left( \frac{T}{T_{NOM}} - 1 \right), \quad (17)$$

其中,  $V_{temp}$  是  $V_{th}$  的温度依赖系数,  $T_{NOM}$  表示器件的温标, 可由实验数据拟合得到.

阈值电压  $V_{th}$  与 AlGa<sub>x</sub>N/GaN HEMT 内部参数相关, 经典  $V_{th}$  表达式为<sup>[14]</sup>:

$$V_{th} = \phi_b(x) - \Delta E_c(x) - \frac{qN_D d_d^2}{2\varepsilon} - \frac{\sigma_{AlGaN} (d_d + d_i)}{\varepsilon}, \quad (18)$$

其中:  $x$  表示 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 中 Al 的组分,  $N_D$  是 AlGa<sub>x</sub>N 势垒层的施主杂质的掺杂浓度,  $d_d$  表示 AlGa<sub>x</sub>N 势垒层的厚度,  $d_i$  表示本征隔离层的厚度,  $d = d_d + d_i$ ,  $\phi_b$  是 AlGa<sub>x</sub>N 表面肖特基接触势垒高度, 它关于  $x$  的表达式为<sup>[15]</sup>

$$\phi_b = 1.3x + 0.84. \quad (19)$$

$\sigma_{AlGaN}$  表示 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 极化感生电荷密度,  $a$  是 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 晶格常数,  $e_{31}$  和  $e_{33}$  表示压电常数,  $c_{13}$  和  $c_{31}$  表示弹性常数,  $P_{sp}$  表示 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 自发极化强度<sup>[16]</sup>,

$$\sigma_{AlGaN} = 2 \left( \frac{a(0) - a(x)}{a(x)} \right) \left( e_{31}(x) - e_{33}(x) \frac{c_{13}(x)}{c_{33}(x)} \right) + P_{sp}(x) - P_{sp}(0), \quad (20)$$

其中,  $a = (-0.077x + 3.189) \times 10^{-10}$ ,  $P_{sp} = -0.052x - 0.029$ ,  $e_{31} = -0.11x - 0.49$ ,  $e_{33} = 0.73x + 0.73$ ,  $c_{13} = 5x + 103$ ,  $c_{33} = -32x + 405$ .

$\Delta E_c$  是 AlGa<sub>x</sub>N/GaN 异质结界面的导带阶, 它关于  $x$  的表达式为<sup>[17]</sup>:

$$\Delta E_c(x) = 0.63(E_g^{AlGaN}(x) - E_g^{GaN}), \quad (21)$$

$$E_g^{AlGaN}(x) = xE_g^{AlN} + (1-x)E_g^{GaN} - x(1-x). \quad (22)$$

### 3 模型仿真与分析

为了验证所推导的模型, 采用表 1 的器件参数进行仿真验证.

#### 3.1 $C_{ofd}$ 核心模型验证

GaN HEMT 从关态转变为开态并处于稳定时,  $L_{dep\_d}$  会逐步转变为零. 对  $C_{ofd}$  的核心公式 (8) 式进行仿真,  $L_{dep\_d}$  扫描范围设置为 0 到 0.6  $\mu\text{m}$ , 同时把仿真结果与文献 [7] 的实验数据进行对比, 结果如图 5 所示, 仿真结果与实验数据有较好的拟合度, 而相比以往的  $C_{ofd}$  模型, 本文提出的模型包含了  $L_{cd}$  项, 可进一步研究外加偏压对  $C_{ofd}$  的影响.

表 1 模型仿真的器件参数值  
Table 1. Model parameters in this paper.

参数	定义	数值
$\epsilon_x$	有效介电常数	$7.65\epsilon_0$
$E_{\text{sat}}/\text{V}\cdot\mu\text{m}^{-1}$	饱和电场	15
$L_d/\mu\text{m}$	漏端沟道长度	1
$T_g/\mu\text{m}$	栅极厚度	0.3
$T_{\text{AlGaN}}/\text{nm}$	AlGaN层厚度	22
$E_g^{\text{AlN}}/\text{eV}$	AlN禁带宽度	6.13
$E_g^{\text{GaN}}/\text{eV}$	GaN禁带宽度	3.42
$V_{\text{temp}}$	$V_{\text{th}}$ 的依赖系数温度	0.1689
$T_{\text{NOM}}/\text{K}$	器件温标	300
$\xi_1$	拟合参数	1.1
$\xi_2$	拟合参数	0.24
$m$	拟合参数	1.2
$p$	拟合参数	0.307
$\tau$	拟合参数	3.2
$a$	拟合参数	1.497
$b$	拟合参数	1.9
$c$	拟合参数	0.31

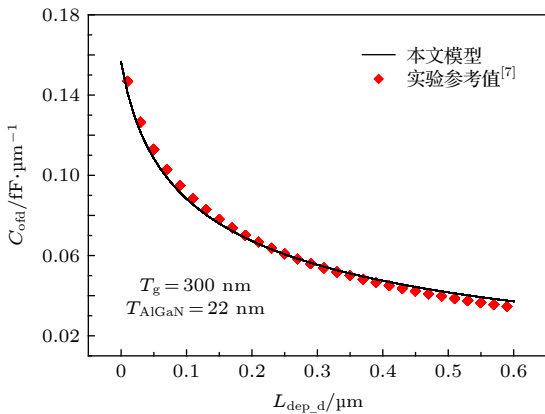


图 5 2DEG 沟道被类施主表面陷阱耗尽的长度对  $C_{\text{ofd}}$  的影响关系图

Fig. 5.  $C_{\text{ofd}}$  versus the extended depletion length induced by donor-like surface traps.

### 3.2 偏置条件对 $C_{\text{ofd}}$ 的影响

#### 3.2.1 $V_{\text{dsat}}$ 与 $V_g$ 的关系

由 (15) 式和 (16) 式得到的  $E_f$ - $n_s$  与  $V_g$  关系如图 6 所示, 由图可得当  $V_g = -3 \text{ V}$  时, 已经存在浓度高达  $10^{11} \text{ cm}^{-2}$  的 2DEG, 这些电子主要来源于类施主表面陷阱和 AlGa<sub>N</sub>/GaN 的极化效应 [15]; 当  $V_g$  处于 I 区时, HEMT 工作中在中反型区 [18],  $V_g$  增大使势阱加深, 此时由 AlGa<sub>N</sub>/GaN 极化效

应产生的极化电场  $E_{\text{AlGaN}}$  较强, 该电场把 AlGa<sub>N</sub> 层被表面陷阱俘获的电子和内部杂质电离的价电子扫向势阱 [19], 势阱内的电子浓度急剧增加导致  $E_f$  往远离导带底部的方向移动,  $E_f$  迅速增加; 当  $V_g$  处于 II 区时, HEMT 工作在强反型区, 此时由 AlGa<sub>N</sub> 层扫向势阱的电子已经相对较多, 这些电子与留在 AlGa<sub>N</sub> 层的电离施主杂质和表面陷阱共同形成电场  $E_{2\text{DEG}}$ , 该电场与极化电场  $E_{\text{AlGaN}}$  方向相反, 抑制 2DEG 浓度  $n_s$  的继续增加, 并且随着  $n_s$  的增加其抑制作用逐渐增强, 导致  $n_s$  的增量减缓,  $E_f$  趋向线性变化。

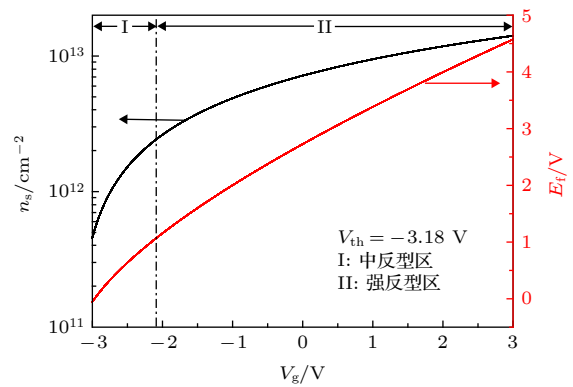


图 6  $V_g$  与 2DEG 浓度  $n_s$  和  $E_f$  的关系曲线

Fig. 6. The curve of the density  $n_s$  of 2DEG and  $E_f$  versus  $V_g$ .

基于该  $E_f$  模型得到的  $V_{\text{dsat}}$  与  $V_g$  关系如图 7 所示, 结果与实验数据进行对比, 实验数据来源于文献 [20]. 分析图 7 发现, 新  $V_{\text{dsat}}$  模型与实测数据拟合度较高,  $V_{\text{dsat}}$  与  $V_g$  呈微弱的非线性关系, 这是由  $E_f$  随  $V_g$  的非线性变化引起的, 而准确的  $V_{\text{dsat}}$  是分析 HEMT 沟道调制效应的关键。

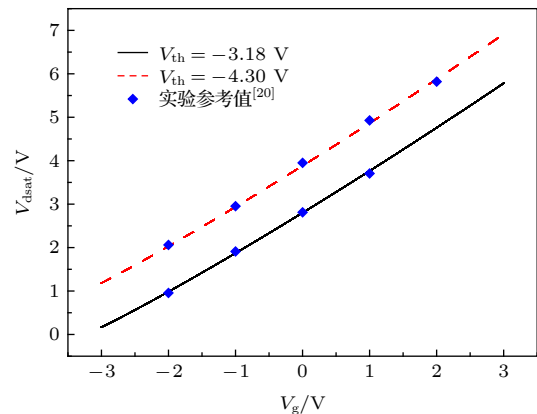


图 7  $V_g$  与  $V_{\text{dsat}}$  的关系曲线

Fig. 7. The curve of  $V_{\text{dsat}}$  versus  $V_g$ .

### 3.2.2 沟道长度调制效应对 $C_{\text{ofd}}$ 的影响

给栅极施加足够大的偏压使 HEMT 工作在开启状态,  $V_{\text{ds}}$  变化范围设置为 0 到 60 V, 图 8 是  $C_{\text{ofd}}$  与  $V_{\text{ds}}$  的关系图, 上 3 条曲线是本文  $C_{\text{ofd}}-V_{\text{ds}}$  的仿真结果, 下 3 条曲线是在  $C_{\text{ofd}}$  传统模型前添加修正函数后的仿真结果, 对比模型来源于文献 [7] 中给出的  $C_{\text{ofd}}-V_{\text{ds}}$  模型. 由新  $C_{\text{ofd}}$  模型曲线可知: 当  $V_{\text{ds}} < V_{\text{dsat}}$  时, 由于不存在沟道长度调制效应,  $L_{\text{cd}}$  保持在最大值, 此时  $C_{\text{ofd}}$  不受  $V_{\text{ds}}$  变化的影响, 对  $V_{\text{g}}$  的变化也不敏感; 当  $V_{\text{ds}} \geq V_{\text{dsat}}$  且  $V_{\text{ds}}$  不断增加时, 沟道长度调制效应作用增强, 夹断点不断往源端移动,  $C_{\text{ofd}}$  因为  $L_{\text{cd}}$  的减小而衰减; 当  $V_{\text{g}}$  升高时  $C_{\text{ofd}}$  曲线衰减速率减慢, 这是因为  $V_{\text{g}}$  与  $V_{\text{dsat}}$  呈非线性正相关关系,  $V_{\text{g}}$  的升高会导致  $V_{\text{dsat}}$  相应增加, 更高的  $V_{\text{dsat}}$  意味着  $L_{\text{cd}}$  受沟道长度调制效应调制作用所消耗的  $V_{\text{ds}}$  变大,  $C_{\text{ofd}}$  衰减起点被延后, 曲线整体衰减速率减缓.

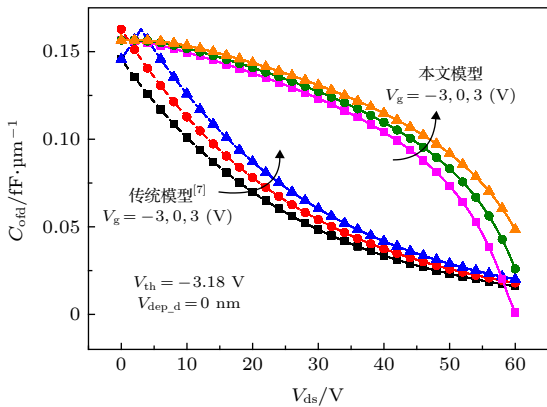


图 8 传统模型和本文模型得到的  $V_{\text{ds}}$  与  $C_{\text{ofd}}$  的关系曲线  
Fig. 8. The curve of  $C_{\text{ofd}}$  versus  $V_{\text{ds}}$  obtained from the traditional model and the model in this paper.

从图 8 下面 3 条曲线可以看出传统  $C_{\text{ofd}}$  模型随  $V_{\text{ds}}$  的变化呈指数级衰减, 衰减速率最大的地方在  $V_{\text{ds}} = 0$  处, 而且在  $V_{\text{ds}} = 0$  时  $C_{\text{ofd}}$  因为  $V_{\text{g}}$  的改变表现出不稳定的问题. 然而从前面分析可知,  $C_{\text{ofd}}$  在  $V_{\text{ds}} < V_{\text{dsat}}$  期间基本不变, 对  $V_{\text{g}}$  的变化也不敏感, 这是传统  $C_{\text{ofd}}$  模型存在的问题. 导致新旧模型变化趋势不一样的原因在于: 本文提出的新模型是从器件内部针对外加偏置的物理建模, 而传统模型忽略了外加偏置对  $C_{\text{ofd}}$  的影响, 只是添加指数函数作为修正项, 然而单纯添加修正函数未能准确地预测  $C_{\text{ofd}}$  随  $V_{\text{g}}$  或  $V_{\text{ds}}$  的变化趋势.

### 3.2.3 阈值电压漂移对 $C_{\text{ofd}}$ 的影响

由于保角映射法是数学几何的建模方法, 建模过程在 2DEG 沟道到栅极之间进行, 因此它考虑到的工艺参数仅限于从栅极到 AlGaIn 势垒层的外部几何参数, 未能进一步研究 AlGaIn/GaN 内部参数对  $C_{\text{ofd}}$  的影响, 包括 AlGaIn 势垒层的掺杂浓度  $N_{\text{D}}$  和 Al 的组分  $x$ . 在本文提出的新模型中, HEMT 的内部参数可以利用  $V_{\text{th}}$  进行表征,  $V_{\text{th}}$  与  $N_{\text{D}}$  和  $x$  的关系如图 9 的内插图所示, Al 组分  $x$  的减小会引起 AlGaIn 势垒层自发极化和压电极化减弱, 更弱的极化效应使势垒层底部的感生极化电荷密度减小, 减弱了电子在 GaN 的积累作用 [15], 2DEG 浓度减小, 阈值电压发生正向漂移. AlGaIn 势垒层掺杂浓度的变化也会对  $V_{\text{th}}$  产生影响, 但是相对  $x$  对  $V_{\text{th}}$  的影响来说要小得多. 由 AlGaIn 内部参数变化引起的阈值电压漂移可以对  $C_{\text{ofd}}$  产生影响. 假设  $V_{\text{th}}$  从 -4 到 0 变化, 固定  $V_{\text{g}} = 0$  保证器件处于开启状态, 得到的仿真结果如图 9 所示. 当  $V_{\text{ds}} = 0$  时, 不存在沟道长度调制效应,  $V_{\text{th}}$  的变化不能影响  $L_{\text{cd}}$ ,  $C_{\text{ofd}}$  保持不变; 当  $V_{\text{ds}}$  大于  $V_{\text{dsat}}$  后,  $V_{\text{th}}$  的正向漂移使势阱内的  $n_{\text{s}}$  减少, 此时要产生相同强度的沟道长度调制效应所需要的  $V_{\text{ds}}$  减小. 如果器件工作在固定的  $V_{\text{ds}}$ , 那么沟道长度调制效应对沟道的调制作用会随着  $n_{\text{s}}$  的减小不断加强, 更强的沟道长度调制效应使  $L_{\text{cd}}$  被耗尽得更快,  $C_{\text{ofd}}$  呈线性衰减. 由图 9 还可以发现, 虽然  $V_{\text{ds}}$  对  $C_{\text{ofd}}$  的影响比  $V_{\text{th}}$  更加显著, 但是随着  $V_{\text{ds}}$  的增加,  $C_{\text{ofd}}$  对  $V_{\text{th}}$  的变化越来越敏感.

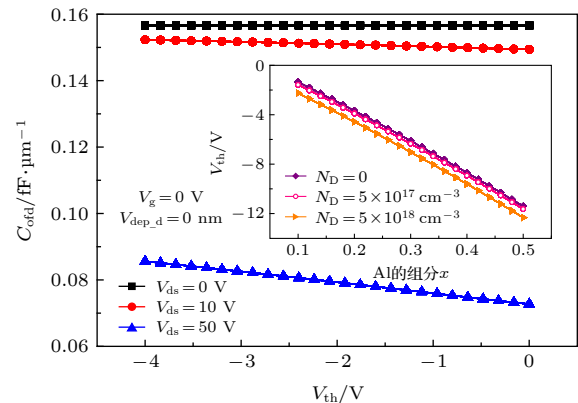


图 9  $V_{\text{th}}$  对  $C_{\text{ofd}}$  的影响关系曲线 (插图为  $V_{\text{th}}$  与 Al 组分  $x$  和掺杂浓度  $N_{\text{D}}$  的关系曲线)

Fig. 9. The curve of  $C_{\text{ofd}}$  versus  $V_{\text{th}}$  (The illustration show the curve of  $V_{\text{th}}$  with Al component and doped concentration).

图 10 是  $C_{\text{ofd}}$  在  $V_{\text{ds}} = 50\text{--}54\text{ V}$  偏置条件下关于温度的仿真结果, 由图 10 可知, 在较大的漏极偏压条件下  $C_{\text{ofd}}$  会因为器件工作温度波动而发生变化, 这是由温度变化引起器件阈值电压漂移造成的. 在众多受温度影响的参数变量中, 肖特基势垒对阈值电压的贡献最显著<sup>[21]</sup>, 当温度升高时, 肖特基势垒高度增大引起  $V_{\text{th}}$  发生正向漂移, 当器件工作在大的  $V_{\text{ds}}$  情况下  $C_{\text{ofd}}$  对阈值电压的漂移会更加敏感, 这时温度的变化会引起  $C_{\text{ofd}}$  发生偏移, 而且这种现象会随着  $V_{\text{ds}}$  的增加而增强.

为了进一步研究不同  $V_{\text{ds}}$  偏压下  $C_{\text{ofd}}$  对温度的敏感程度, 我们将  $C_{\text{ofd}}$  对温度求导得到  $\alpha_i$ , 表征  $C_{\text{ofd}}$  对温度的敏感程度:

$$\alpha_i = \left. \frac{\partial C_{\text{ofd}}}{\partial T} \right|_{V_{\text{ds}}=V(i)} \quad (23)$$

不同  $V_{\text{ds}}$  偏置条件对应的  $\alpha_i$  如图 11 所示, 从图中可以发现在  $V_{\text{ds}} < 40\text{ V}$  的情况下  $C_{\text{ofd}}$  对温度的变

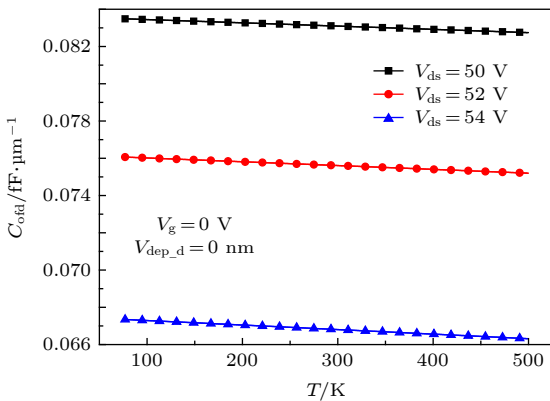


图 10 温度  $T$  对  $C_{\text{ofd}}$  的影响关系曲线

Fig. 10. The curve of  $C_{\text{ofd}}$  versus  $T$ .

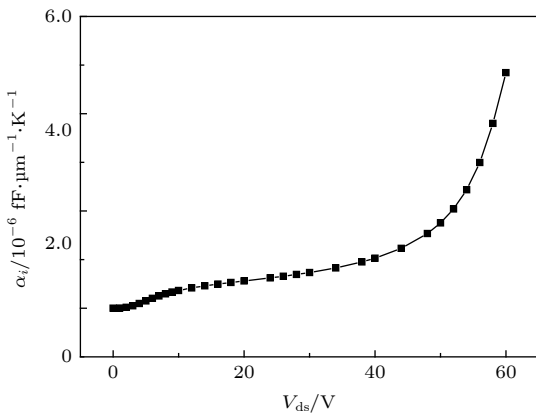


图 11 不同漏极偏压下  $C_{\text{ofd}}$  对温度敏感程度的关系曲线

Fig. 11. The curve of temperature sensitivity of  $C_{\text{ofd}}$  under different drain bias.

化不敏感, 然而随着  $V_{\text{ds}}$  继续增加,  $\alpha_i$  呈现出指数增长的趋势, 这时由器件工作温度波动而引起的  $C_{\text{ofd}}$  偏移会进一步增强. 实际上, 器件在高温工作情况下还存在着组分变化和杂质再分布等问题, 这些都会加强温度波动所造成的阈值电压漂移, 使  $C_{\text{ofd}}$  受温度变化影响进一步加强, 因此在现实应用中, 当器件需要施加大的  $V_{\text{ds}}$  时, 由温度变化对  $C_{\text{ofd}}$  影响就更加不能被忽视.

## 4 结 论

本文基于保角映射法同时考虑沟道长度调制效应, 对  $C_{\text{ofd}}$  进行了物理建模, 新模型考虑了  $V_g$ 、 $V_{\text{ds}}$  和  $V_{\text{th}}$  变化对  $C_{\text{ofd}}$  的影响, 具有较高的精度. 分析研究发现: 当  $V_{\text{ds}} < V_{\text{dsat}}$  时, 不存在沟道长度调制效应, 这时  $C_{\text{ofd}}$  不受  $V_{\text{ds}}$  和  $V_g$  的影响; 当  $V_{\text{ds}} \geq V_{\text{dsat}}$  后,  $V_{\text{ds}}$  的增大会使沟道长度减小引起  $C_{\text{ofd}}$  的衰减, 而衰减速率随  $V_g$  的增加而减缓; AlGaIn 势垒层中掺杂浓度的减小和 Al 组分的减小都可以引起阈值电压的正向漂移, 正向阈值漂移使得势阱内二维电子气浓度减小, 导致器件沟道所受到的调制作用增强, 实际的沟道长度变得更小,  $C_{\text{ofd}}$  随  $V_{\text{th}}$  的正向增加呈线性衰减. 且在大  $V_{\text{ds}}$  工作状态下,  $C_{\text{ofd}}$  对阈值电压漂移会更加敏感, 这时器件工作温度的升高会加强阈值电压的漂移现象, 使  $C_{\text{ofd}}$  因为温度的变化出现偏移. 并且随着漏极偏压的上升,  $C_{\text{ofd}}$  受温度变化波动的也越来越敏感, 在实际大电压应用中这些问题需加以关注.

## 参考文献

- [1] Jones E A, Wang F F, Costinett D 2016 *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.* **4** 707
- [2] Wang L, Hu W D, Chen X S, Lu W 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5730 (in Chinese) [王林, 胡伟达, 陈效双, 陆卫 2010 *物理学报* **59** 5730]
- [3] Zhang A, Zhang L, Tang Z, Cheng X, Wang Y, Chen K J, Chan M 2014 *IEEE Trans. Electron Devices* **61** 755
- [4] Pregaldiny F, Lallement C, Mathiot D 2002 *Solid-State Electron.* **46** 2191
- [5] Bansal A, Paul B C, Roy K 2005 *IEEE Trans. Electron Devices* **52** 256
- [6] Li K, Rakheja S 2018 *Device Research Conference-Conference Digest, DRC the University of California, Santa Barbara, June 24–27, 2018* p1
- [7] Jia Y, Xu Y, Wen Z, Wu Y, Guo Y 2019 *IEEE Trans. Electron Devices* **66** 357
- [8] Vetryu R, Zhang N Q, Keller S, Mishra U K 2001 *IEEE Trans. Electron Devices* **48** 560

- [9] Guo Y L, Chen Y F, Li S Y, Lei L, Bai C Q 2017 *Chin. J. Lumin.* **38** 1000 (in Chinese) [郭伟玲, 陈艳芳, 李松宇, 雷亮, 柏常青 2017 *发光学报* **38** 1000]
- [10] Cheng X, Wang Y 2011 *IEEE Trans. Electron Devices* **58** 448
- [11] Dasgupta N, DasGupta A 1993 *Solid-State Electron.* **36** 201
- [12] Huque M A, Eliza S A, Ragman T, Huq H F, Islam S K 2009 *Solid-State Electron.* **53** 341
- [13] Ahsan S A, Ghosh S, Sharma K, Dasgupta A, Khandelwal S, Chauhan Y S 2016 *IEEE Trans. Electron Devices* **63** 565
- [14] Rashmi, Kranti A, Haldar S, Gupta R S 2002 *Solid-State Electron.* **46** 621
- [15] Ambacher O, Smart J, Shealy J R, Weimann N G, Chu K, Murphy M, Schaff W J, Eastman L F, Dimitrov R, Wittmer L, Stutzmann M, Rieger W, Hilsenbeck J 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 3222
- [16] Fan L, Hao Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3393 (in Chinese) [范隆, 郝跃 2007 *物理学报* **56** 3393]
- [17] Ambacher O, Majewski J, Miskys C, Link A, Hermann M, Eickhoff M, Stutzmann M, Bernardini F, Fiorentini V, Tilak V, Schaff B, Eastman L F 2002 *J. Phys.-Condes. Matter* **14** 3399
- [18] Khandelwal S, Chauhan Y S, Fjeldly T A 2012 *IEEE Trans. Electron Devices* **59** 2856
- [19] He X G, Zhao D G, Jiang D S 2015 *Chin. Phys. B* **24** 067301
- [20] Li M, Wang Y 2008 *IEEE Trans. Electron Devices* **55** 261
- [21] Alim M A, Rezazadeh A A, Gaquiere C 2016 *Semicond. Sci. Technol.* **31** 125016



# The physics-based model of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high electron mobility transistor outer fringing capacitances<sup>\*</sup>

Liu Nai-Zhang   Zhang Xue-Bing   Yao Ruo-He<sup>†</sup>*(School of Electronics and Information Technology, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)*

(Received 20 December 2019; revised manuscript received 31 January 2020)

## Abstract

With the development of the application of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high electron mobility transistors in the radio frequency field, a capacitance model that can accurately describe the  $C$ - $V$  characteristics of the device has become an important research topic. The gate capacitance of Ga<sub>N</sub> HEMT can be divided into two parts: intrinsic capacitance and fringing capacitance related to two-dimensional electronic gas (2DEG) electrode. The fringing capacitance plays an important part in the switching device. The outer fringing capacitance  $C_{\text{ofs/d}}$  dominates the fringing capacitance and is affected by the bias applied, especially the drain outer fringing capacitance  $C_{\text{ofd}}$ .

In order to establish the  $C_{\text{ofd}}$  model which is related to the bias condition, the physics-based model of  $C_{\text{ofd}}$  is established based on the conformal mapping, including the drain channel length variable. Since the drain channel length is related to the bias applied, the channel length modulation effect can be used to study how bias applied effect the channel, and the relationship between  $C_{\text{ofd}}$  and the bias condition is obtained. In addition, the threshold voltage variable is introduced when the channel length modulation effect is considered, and the threshold voltage drift caused by changes in the internal parameters and temperature of the device is studied using the threshold voltage variable in the model, and the relationship between  $C_{\text{ofd}}$  and threshold voltage and temperature under different bias was obtained.

It is found from the results of the study that as drain bias increases from zero, the channel length modulation effect keeps  $C_{\text{ofd}}$  unchanged at lower drain bias. When the drain bias continues to increase,  $C_{\text{ofd}}$  begins to decay again, and its decay rate slows down with the increase of gate bias. The decrease of donor impurity concentration and Al component in AlGa<sub>N</sub> barrier layer may increase the threshold voltage, which will strengthen the channel length modulation effect on  $C_{\text{ofd}}$ , resulting in linear attenuation of  $C_{\text{ofd}}$ . With the increasing of drain bias, the influence of threshold voltage shift on  $C_{\text{ofd}}$  is enhanced, and the change of device operating temperature will enhance the threshold voltage shift and cause the deviation of  $C_{\text{ofd}}$ . Moreover, with the continuous increase of drain bias,  $C_{\text{ofd}}$  becomes more sensitive to the temperature variation.

**Keywords:** HEMT, outer fringing capacitances, channel length modulation effect, model**PACS:** 73.40.Kp, 73.61.Ey, 71.10.Ca**DOI:** [10.7498/aps.69.20191931](https://doi.org/10.7498/aps.69.20191931)

<sup>\*</sup> Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2018YFB1802100).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [phrhyao@scut.edu.cn](mailto:phrhyao@scut.edu.cn)