

# GaN 转移电子器件的性能与基本设计<sup>\*</sup>

邵贤杰<sup>1</sup> 陆海<sup>1,†</sup> 张荣<sup>1</sup> 郑有焘<sup>1</sup> 李忠辉<sup>2</sup>

(1 南京大学物理学系, 江苏省光电信息功能材料重点实验室, 南京 210093)

(2 南京电子器件研究所单片集成电路与模块国家重点实验室, 南京 210016)

**摘要:** 基于 GaN 转移电子器件最基本的工作模式——畴渡越时间模式, 计算了 GaN 转移电子器件的理想最高振荡频率, 得到该类型微波转移电子器件的最高振荡频率可达 4.7 THz, 接近 GaAs 转移电子器件最高振荡频率 (0.6 THz) 的 8 倍. 从理论上计算出 GaN 转移电子器件的理想最大输出功率, 结果表明 GaN 转移电子器件在功率输出方面具有很大优势. 最后还讨论了 GaN 转移电子器件在畴渡越时间模式下, 能够产生稳定 Gunn 振荡的两个基本条件, 即电子浓度  $N$  与器件有源区长度  $L$  乘积要大于该器件的设计标准 ( $(NL)_0 = 6.3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ) 及有源区的掺杂浓度  $N$  要小于临界掺杂浓度  $N_{\text{crit}}$  ( $3.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ). 本工作揭示出 GaN 转移电子器件在高频率和大功率输出方面都具有重要优势, 作为大功率 THz 微波信号源将具有广阔的应用前景.

**关键词:** GaN; 转移电子器件; 微分负阻效应; 最高频率; 临界掺杂浓度

**PACC:** 7280E; 0660J

**中图分类号:** TN385

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2008)12-2389-04

## 1 引言

转移电子器件 (TED) 的研究始于上世纪 70 年代. 转移电子器件是基于导带中存在双能谷结构的半导体材料在强电场作用下, 导带中的电子从高电子迁移率的中心能谷跃迁到具有低电子迁移率的卫星能谷时, 其电输运过程产生微分负阻效应而制作的微波振荡器件. 目前, 基于直接带隙 GaAs 和 InP 材料的转移电子器件虽已成功地产生产出稳定的毫米波和微波信号<sup>[1,2]</sup>, 但由于这些材料本身能带结构的特点, 使相应的转移电子器件性能受到限制, 不利于在超高频、大功率军用雷达和高速通信等领域的应用. 近年来全球对微波、准微波移动通信系统需求的迅速扩大以及大容量传输和汽车防撞雷达的广泛应用, 造成了微波频率拥挤、频率资源不足的态势. 在上述背景下, 开发基于新型材料的微波发射源器件成为当今的研究热点.

近年来, GaN 作为新型光电材料备受关注: GaN 基蓝光<sup>[3,4]</sup>和白光发光二极管已经实现产业化, 在半导体照明领域中将有广泛的应用前景. 同时, 由于具有较高的电子子带间跃迁阈值电场 ( $150 \text{ kV/cm}$ )<sup>[5]</sup>, 较大的禁带宽度 ( $3.4 \text{ eV}$ )<sup>[6]</sup> 和较高的卫星能谷底与导带底的能量差 ( $\Delta E = 2.1 \text{ eV}$ )<sup>[7]</sup>, GaN 材料还有望用于高性能转移电子器件的制备. 相对于传统的转移电子器件材料, GaN 具有更大电子饱和漂移速度 ( $2 \times 10^7 \text{ cm/s}$ ) 和更短的能量弛豫时间, 相应的转移电子器件可望产生更高的振荡频率. 鉴于 GaN 转移电子器件具有的潜在优势, 近

年来已引起许多学者的关注和研究<sup>[8-10]</sup>.

本文选用了常用纤锌矿结构 (Wurtzite) GaN 的基本参数, 对 GaN 转移电子器件性能和基本设计进行了物理分析和推算, 并对前人的相关结果进行了修正. 在考虑基本的畴渡越时间模式下, 从振荡频率上限和最高输出功率两方面考察了 GaN 转移电子器件的性能, 并且估算了 GaN 转移电子器件产生稳定 Gunn 振荡, 必须要满足的电子浓度  $N$  和器件有源区长度  $L$  的乘积临界值及临界掺杂浓度  $N_{\text{crit}}$  的值. 此外, 作者还计算了 GaAs 和 GaN 转移电子器件在不同频率下  $P_m Z$  的性能对比曲线, 以及这两种器件设计区间的分布曲线, 以便更加清晰、直观地说明相关结论. 本工作的计算结果表明, GaN 转移电子器件在振荡频率和输出功率方面与 GaAs 转移电子器件相比都具有较大的优势, 可望解决现有产品中出现的频率资源不足和输出功率较低等关键问题.

## 2 理论计算

微分负阻效应在 GaN 半导体材料强场输运过程中的产生主要是由电子谷间散射造成的. 当 GaN 材料外加电场达到电子子带间转移阈值电场  $150 \text{ kV/cm}$  (GaAs 的电子子带间的阈值电场为  $3.5 \text{ kV/cm}$ ) 时, 电子就会发生能谷间的跃迁, 从具有高电子迁移率的中心能谷进入到具有低电子迁移率和较高势量的卫星能谷. 这一过程将导致 GaN 半导体材料的电导率减小, 产生负阻, 从而形成 Gunn 振荡. GaN 的这种能带结构特点

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展规划 (批准号: 2006CB921803), 国家自然科学基金 (批准号: 60721063), 单片集成电路与模块国家重点实验室基金 (批准号: 9140C1401010701) 以及教育部新世纪优秀人才支持计划 (批准号: NCET-07-0417) 资助项目

<sup>†</sup> 通信作者. Email: hailu@nju.edu.cn

2008-06-04 收到, 2008-07-22 定稿

表 1 GaAs 和 GaN 半导体的材料参数及其最高振荡频率

Table 1 Material parameters of GaAs and GaN The last column shows the calculated maximum oscillation frequency.

材料	$E_{th}^{[12]}$ /(kV/cm)	$E_B$ /(MV/cm)	$v_{sat}$ /(cm/s)	$\mu$ /( $cm^2$ ) /( $V \cdot s$ )	$\mu_{ndr}^{[12]}$ /( $cm^2$ ) /( $V \cdot s$ )	$f_m$ /THz
GaAs	3.5	0.4 <sup>[12]</sup>	$1.0 \times 10^7$ <sup>[14]</sup>	8000 <sup>[12]</sup>	$\sim 2500$	0.6
GaN	150	3 <sup>[13]</sup>	$2.0 \times 10^7$ <sup>[12]</sup>	550 <sup>[13]</sup>	$\sim 50$	4.7

可以被用来制备高性能的转移电子器件. 由于频率和输出功率是转移电子器件应用中最重要性能指标, 下面我们在基本的畴渡越时间工作模式下对 GaN 转移电子器件这两方面的性能进行理论估算和讨论.

## 2.1 GaN 转移电子器件理论最高工作频率的估算

在 Gunn 效应中, 因为电子在中心能谷积累能量和向卫星能谷跃迁都需要一定时间, 所以转移电子器件有一工作频率上限.

在畴渡越时间模式的起始阶段, 器件有源区中的偶极畴从阴极开始形成, 一边生长, 一边向阳极漂移. 器件频率达到上限的情况是当偶极畴刚达到稳定时就恰好到达阳极. 此时, 畴的渡越时间可以被认为就是畴生长时间, 即能量弛豫时间  $\tau$ , 其中包括谷间散射弛豫时间  $\tau_1$  和中心能谷谷内散射弛豫时间  $\tau_2$ :

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \quad (1)$$

则转移电子器件振荡最高频率  $f_m$ <sup>[7]</sup> 为:

$$f_m = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_1 + \tau_2} \quad (2)$$

谷间散射指的是电子从中心能谷底获得一定的能量后跃迁到卫星能谷的过程. 谷间散射弛豫时间  $\tau_1$  可视为, 处于中心能谷底部的电子在外场作用下从静止态被加速, 获得的动能等于卫星能谷底与中心能谷底的能量差  $\Delta E$ , 并且跃迁到卫星能谷所需的时间, 即

$$\tau_1 = \frac{\sqrt{2m_{eff}\Delta E}}{qE_{th}} \quad (3)$$

其中 GaN 的  $\Delta E = 2.1eV$ , 电子有效质量  $m_{eff} = 0.2m_0$ <sup>[11]</sup>; GaAs 的  $\Delta E = 0.3eV$ ,  $m_{eff} = 0.063m_0$ . 由表 1 中的参数可计算出 GaN 材料中发生谷间散射的弛豫时间为 0.15ps, 而 GaAs 材料中发生谷间散射的弛豫时间为 1.3ps, GaN 的  $\tau_1$  比 GaAs 的  $\tau_1$  小 10 倍左右.

一般认为  $\tau_2$  是电子在中心能谷谷内散射的弛豫时间, 大约等于电子速度无规化所需的时间, 可利用电子迁移率及有效质量进行估算:

$$\tau_2 = \frac{m_{eff}\mu}{q} \quad (4)$$

参见表 1 中的参数, 其中 GaN 的低场电子迁移率  $\mu = 550cm^2/(V \cdot s)$ , GaAs 的  $\mu = 8000cm^2/(V \cdot s)$ , 代入 (4) 式, 可计算出 GaN 和 GaAs 的  $\tau_2$  值分别为 0.062 和 0.28ps. 将  $\tau_1$  和  $\tau_2$  的值代入公式 (2) 中, 可得 GaAs 转移电子器件的最大振荡频率  $f_m \approx 0.6THz$ ; 而 GaN 转移电子器件的  $f_m \approx 4.7THz$ , 约为 GaAs 转移电子器件  $f_m$  值的 8 倍. 相比之下, 文献[7]未能明确地给出中心

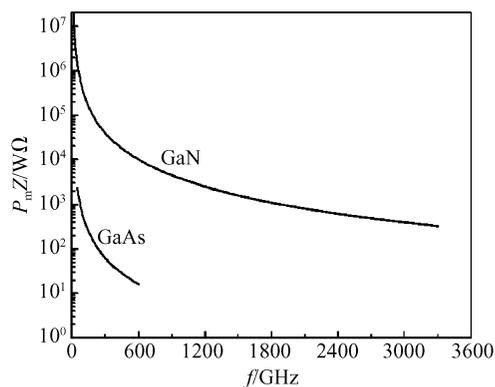


图 1 GaAs 和 GaN 转移电子器件的最大功率和阻抗的乘积  $P_m Z$  与频率  $f$  的关系

Fig.1 Product of maximum output power and load impedance ( $P_m Z$ ) as a function of operation frequency for GaN- and GaAs-based TEDs

能谷谷内散射弛豫时间  $\tau_2$  的计算方法, 而且其计算出的 GaN 转移电子器件的理想最高振荡频率约为 0.74THz.

## 2.2 GaN 转移电子器件的理论最大输出功率

由于 GaN 材料同时具有较大的电子跃迁阈值电场和高击穿电场, GaN 转移电子器件可以在高偏压下工作, 从而可产生较高的输出功率. GaN 转移电子器件可望解决传统转移电子器件功率输出偏低的问题. 转移电子器件的最高输出功率可做如下估算:

在畴渡越时间模式下, 器件有源区的长度  $L$  与器件振荡频率  $f$  关系为:  $f = v_{sat}/L$ , 其中  $v_{sat}$  为电子饱和漂移速度. 由于半导体材料上的外加电场不能无限地增加, 必须小于其击穿电场  $E_B$ , 因此器件上的最大偏压  $V_D$  为:

$$V_D = \frac{E_B v_{sat}}{f} \quad (5)$$

当电路阻抗为  $Z$  时, 电路中的最大电流为:

$$I = \frac{V_D}{Z} = \frac{E_B v_{sat}}{Zf} \quad (6)$$

所以, 转移电子器件的最大输出功率可表示为:

$$P_m = V_D I = \frac{(E_B v_{sat})^2}{Zf^2} \quad (7)$$

即

$$P_m f^2 Z = (E_B v_{sat})^2 \quad (8)$$

这里, 转移电子器件的电抗性质被看成电阻的一部分. 对于一种确定的半导体材料, 其  $E_B$  和  $v_{sat}$  都是常量, 所以器件在高频工作时的最大输出功率受 (8) 式限制. 由于转移电子器件偶极畴中的电场远高于有源区的平均电场, 为避免器件击穿损坏, 总偏压不宜过大, 这就限制了转移电子器件在畴渡越时间模式下的最大输出功率. 由于宽禁带半导体 GaN 材料的临界击穿电场很高, 所以 GaN 转移电子器件可以在高偏压下工作, 从而得到较高的输出功率. 图 1 显示了基于 GaAs 和 GaN 两种材料的转移电子器件在不同频率下  $P_m Z$  的性能对比曲

线.从图中可以看出:在相同工作频率和相同阻抗下, GaN 转移电子器件的最大输出功率可达到 GaAs 转移电子器件的 600 多倍,该结果比前文献<sup>[7]</sup>中的相应结果要高.

### 3 GaN 转移电子器件的基本设计

一种具有微分负阻特性的半导体材料在一定偏压下能否形成稳定的 Gunn 振荡,主要取决于该材料的电子浓度  $N$  与转移电子器件有源区长度  $L$  的乘积值和临界掺杂浓度  $N_{crit}$  两方面.

在畴渡越时间模式下,因为畴的生长需要时间,在一定的掺杂浓度下,稳定畴的形成就需要器件具有一个最小的有源区长度.转移电子器件要形成稳定的 Gunn 振荡,器件中畴的形成时间  $3\tau_-$  ( $\tau_-$  为介电弛豫时间)就应当小于畴经过器件有源区的渡越时间,由此可估算这个有源区的最小长度.

具有微分负阻特性的半导体中畴的形成过程如下:现在设定 GaN 转移电子器件的电阻为  $R$ ,电容为  $C$ ,则有

$$R = \rho \frac{L}{s} = \frac{L}{\sigma s} \quad (9)$$

$$C = \frac{\epsilon s}{L} \quad (10)$$

这里  $L$  是 GaN 转移电子器件的长度; $s$  是其截面积.由以上二式可得到介电弛豫时间  $\tau_-$  为:

$$\tau_- = RC = \frac{L}{\sigma s} \times \frac{\epsilon s}{L} = \frac{\epsilon}{q\mu_{ndr}N} \quad (11)$$

其中  $\mu_{ndr}$  称为负微分迁移率,对于 GaN 材料,它的值约为  $50\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ;相对比 GaAs 的  $\mu_{ndr}$  为  $2500\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ .空间电荷的生长可用以下方程表述:

$$\Delta Q = \Delta Q(0)\exp(t/\tau_-) \quad (12)$$

其中  $\Delta Q(0)$  表示在  $t = 0$  时刻的电荷量大小, $\tau_-$  的大小表征了空间电荷生长的快慢,而高场畴(偶极畴)实际形成的时间约为  $3\tau_-$ <sup>[15]</sup>.对于转移电子器件,高场畴在体内渡越的时间一定要大于等于其形成的时间,否则就不能形成稳定的 Gunn 振荡.因此,需满足  $t \geq 3\tau_-$ ,即

$$\frac{L}{v_{sat}} \geq \frac{3\epsilon}{q\mu_{ndr}N} \quad (13)$$

所以

$$(NL) \geq (NL)_0 \equiv \frac{3\epsilon v_{sat}}{q\mu_{ndr}} \quad (14)$$

其中  $(NL)_0$  是形成 Gunn 振荡的  $(NL)$  临界值,被称为转移电子器件的设计标准.图 2 为 GaN 和 GaAs 转移电子器件的  $(NL)_0$  关系图.从图中可以看出, GaAs 的  $(NL)_0$  值远远小于 GaN 的  $(NL)_0$  值(图中每条曲线上方的空间是该器件的  $(NL)$  可取值区间,对应于器件的工作区域).由于 GaN 的  $\mu_{ndr}$  较低,而  $v_{sat}$  较高,所以 GaN 转移电子器件的  $(NL)_0$  更大,大约是 GaAs 转移电子器件  $(NL)_0$  的 100 多倍.即在相同掺杂浓度的条件下, GaN 转移电子器件有源区需要做得更长,这样电子将有充分的时间得到足够的能量跃迁到卫星谷;或在相同的器件有源区长度下, GaN 转移电子器件的掺杂浓

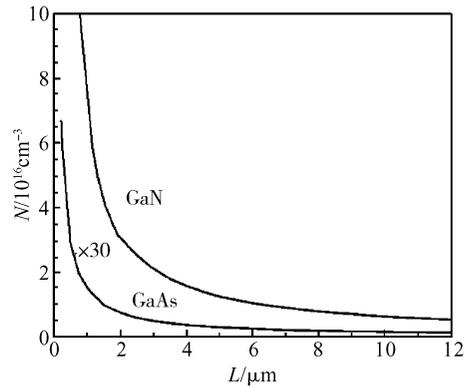


图 2 GaN 和 GaAs 转移电子器件的  $(NL)_0$  的关系  
Fig.2  $(NL)_0$  curves for GaN- and GaAs-based TEDs The region above each curve represents allowable  $(NL)$  values.

度需要更高,这样有更多的电子参与运动,有助于降低介电弛豫时间,从而有利于形成更高的振荡频率.

另一方面,转移电子器件在畴渡越时间模式下产生的振荡频率  $f$  约为:

$$f = \frac{v_{sat}}{L} \quad (15)$$

要想得到更高的频率就要减小  $L$ ,因为有  $(NL)_0$  标准的限制, $L$  减小, $N$  必然要增大,当  $N$  超过临界掺杂浓度  $N_{crit}$  时,就会在有源区阳极附近形成静止畴.寄生静止畴的产生将会导致器件输出功率下降和器件过早地被击穿.

形成静止畴的条件是畴的自我调整时间小于电子渡越该畴宽度所需的时间,畴自我调整时间近似等于  $3\tau_-$ ,而畴的宽度近似等于 3 个德拜长度<sup>[16]</sup>.介电弛豫时间为  $\tau_- = \frac{\epsilon}{q\mu_{ndr}N}$ ,德拜长度为  $L_d = \sqrt{D\tau_-}$ .若要避免形成静止畴,则必须满足  $3\tau_- > \frac{3L_d}{v_{sat}}$ ,即  $\frac{\epsilon}{q\mu_{ndr}n} >$

$\frac{1}{v}\sqrt{\frac{\epsilon D}{q\mu_{ndr}N}}$ ,因此

$$N_{crit} = N < \frac{\epsilon v_{sat}^2}{D\mu_{ndr}q} \quad (16)$$

该处的推导和计算公式与前人文献<sup>[7]</sup>中的结果不同.现将 GaAs 材料中的电子扩散系数  $D = 200\text{cm}^2/\text{s}$ <sup>[14]</sup>,低场迁移率  $\mu_{ndr} = 2500\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ;GaN 材料中的  $D = 15\text{cm}^2/\text{s}$ , $\mu_{ndr} = 50\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ,代入上式,分别得出 GaAs 和 GaN 转移电子器件临界掺杂浓度  $N_{crit}$  的值如表 2 所示.由于阈值电场的区别, GaN 转移电子器件的电子临界掺杂浓度比 GaAs 转移电子器件的值约大 3 个数量级.以上结果非常重要,因为目前可控低掺杂浓度的 GaN 材料还不宜得到,同时,高掺杂浓度也有助于降低介电弛豫时间,从而改善频率特性.此外,我们的计算还表明:要在畴渡越时间模式下形成稳定的 Gunn 振荡, GaAs 转移电子器件有源区的最小设计长度为  $0.22\mu\text{m}$ ,而 GaN 转移电子器件有源区最小长度只需  $0.022\mu\text{m}$ .因此, GaN 转移电子器件在器件结构上有更大的设计空间.

表 2 GaN 和 GaAs 转移电子器件的  $(NL)_0$  值和临界掺杂水平  
Table 2 Minimum  $(NL)$  product and critical maximum doping level for GaN- and GaAs-based TEDs

材料	GaAs	GaN
$(NL)_0/\text{cm}^{-2}$	$4.9 \times 10^{10}$	$6.3 \times 10^{12}$
$N_{\text{crit}}/\text{cm}^{-3}$	$2.25 \times 10^{15}$	$2.88 \times 10^{18}$

以上研究是在畴渡越时间模式下进行的计算. 在转移电子器件的其他工作模式下, 器件的工作频率、输出功率及临界掺杂浓度将会有不同的取值空间, 这些将在以后的工作中继续研究.

## 4 结论

基于 GaN 转移电子器件的畴渡越时间模式, 理论估算了 GaN 转移电子器件的理想最高振荡频率, 得到 GaN 转移电子器件的最高振荡频率约为 4.7 THz, 输出频率达到了 THz 的范围, 说明 GaN 转移电子器件在高频应用领域前景广阔. 同时, 通过计算得到 GaN 转移电子器件在畴渡越时间模式下的  $P_m f^2 Z$  值可达 GaAs 转移电子器件的 600 多倍, 显示出 GaN 转移电子器件在大功率微波发射源应用上有很大优势. 此外, 还计算了 GaN 转移电子器件的设计标准和临界掺杂浓度. 计算结果表明, GaN 转移电子器件与 GaAs 转移电子器件相比有更大的设计空间.

## 参考文献

[1] Eisele H, Rydberg A, Haddad G I. Recent advances in the performance of InP Gunn devices and GaAs TUNNETT diodes for the 100 ~ 300-GHz frequency range and above. *IEEE Microw Theory Tech Soc*, 2000, 48(4): 626  
[2] Bulman P J, Hobson G S, Taylor B C. *Transferred electron devices*. London and New York: Academic Press, 1972

[3] Maruska H P, Tietjen J J. The preparation and properties of vapor-deposited single crystal line GaN. *Appl Phys Lett*, 1969, 15(10): 327  
[4] Pankove J I, Miller E A, Berkeyheiser J E, et al. GaN blue light-emitting diodes. *Journal of Luminescence*, 1972, 5(1): 84  
[5] Foutz B E, O'Leary S K, Shur M S, et al. Transient electron transport in wurtzite GaN, InN, and AlN. *J Appl Phys*, 1999, 85(11): 7727  
[6] Wang Xiaoliang, Liu Xinyu, Hu Guoxin, et al. X-band GaN power HEMTs with power density of 2.23W/mm grown on sapphire by MOCVD. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(10): 1865  
[7] Alekseev E, Pavlidis D. GaN Gunn diodes for THz signal generation. *Microwave Symposium Digest 2000 IEEE MTT-S International*, 2000, 3(3): 1905  
[8] Lü J T, Cao J C. Terahertz generation and chaotic dynamics in GaN NDR diode. *Semicond Sci Technol*, 2004, 3(19): 451  
[9] Yilmazoglu O, Mutamba K, Pavlidis D, et al. Measured negative differential resistivity for GaN Gunn diodes on GaN substrate. *Electron Lett*, 2007, 8(43): 408  
[10] Sokolov V N, Kim K W, Kochelap V A, et al. Negative small-signal impedance of nanoscale GaN diodes in the terahertz frequency regime. *Appl Phys Lett*, 2007, 90(14): 142117  
[11] Shur M, Gelmont B, Khan M A, et al. Electron mobility in two-dimensional electron gas in AlGaIn/GaN heterostructures and in bulk GaN. *J Electron Mater*, 1996, 25(5): 777  
[12] Alekseev E, Pavlidis D. Large-signal microwave performance of GaN-based NDR diode oscillators. *Solid-State Electron*, 2000, 44: 941  
[13] Ambacher O, Smart J, Shealy J R, et al. Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGaIn/GaN heterostructures. *J Appl Phys*, 1995, 85(6): 3222  
[14] Murayama K, Ohmi T. Static negative Resistance in highly doped Gunn diodes and application to switching and amplification. *Jpn J Appl Phys*, 1973, 12(12): 1931  
[15] Shur M. *GaAs devices and circuits*. New York and London: Plenum Press, 1987  
[16] Thim H. Stability and switching in overcritically doped GUNN diodes. *Proceedings of the IEEE*, 1971, 9(8): 1285

## Performance and Design of GaN-Based Transferred-Electron Devices\*

Shao Xianjie<sup>1</sup>, Lu Hai<sup>1,†</sup>, Zhang Rong<sup>1</sup>, Zheng Youdou<sup>1</sup>, and Li Zhonghui<sup>2</sup>

(1 *Jiangsu Provincial Key Laboratory of Advanced Photonic and Electronic Materials, Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

(2 *National Key Laboratory of Monolithic Integrated Circuits and Modules, Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, China*)

**Abstract:** Based on the basic transit-time domain operation mode of TEDs, we first calculated the ideal maximum oscillation frequency of GaN-based transferred-electron devices (TEDs), which can be as high as 4.7 THz. This value is nearly 8 times as high as that of GaAs-based TEDs, which is about 0.6 THz. Next, we calculated the maximum output power of GaN-based TEDs indicating that GaN-based TEDs are promising for high microwave power applications. We also discussed the two critical conditions in GaN-based design for generating stable Gunn oscillations in transit-time domain mode. Our calculation indicates that the product of electron concentration and the length of active layer should be higher than a critical value of  $6.3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ; and the doping level of the active layer has to be smaller than a critical level of  $3.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . This study suggests that GaN-based TEDs have significant advantages for high-frequency and high-power microwave generation, which are perspective for high-power THz signal source applications.

**Key words:** GaN; transferred-electron device; negative differential resistance effect; maximum oscillation frequency; critical doping concentration

**PACC:** 7280E; 0660J

**Article ID:** 0253-4177(2008)12-2389-04

\* Project supported by the State Key Program for Basic Research of China (No. 2006CB921803), the National Natural Science Foundation of China (No. 60721063), the Research Fund from the National Key Laboratory of Monolithic Integrated Circuits and Modules (No. 9140C1401010701), and the Program for New Century Excellent Talents in University of China (No. NCET-07-0417)

† Corresponding author. Email: hailu@nju.edu.cn

Received 4 June 2008, revised manuscript received 22 July 2008