

文章编号: 1000-7032(2008)02-0337-05

GaN 发光二极管表观电阻极值分析

谭延亮^{1,2}, 肖德涛², 游开明¹, 陈列尊¹, 袁红志³

(1 衡阳师范学院 物电系, 湖南 衡阳 421008 2 南华大学 核科学技术学院, 湖南 衡阳 421004

3 湖南天雁机械有限公司, 湖南 衡阳 421005)

摘要: 利用正向交流 (ac) 小信号方法对 GaN 发光二极管的电容-电压特性进行测量, 可以观察到 GaN 发光二极管中的负电容现象。利用 LED 串联等效电路对表观电容和表观电阻进行了测量, 表观电阻-正向电压曲线出现了一个极值点。通过对相关文献分析, 提出负电容现象的根本原因是在较高的正偏下微分电容 $\frac{dQ}{dU} < 0$ 推论出 pn 结的微分电容先随正向偏压的增大而急剧增大, 当出现复合发光后随正向偏压的增大而减小, 直到随正向偏压的增大而出现负值; 正向偏置电压较大时, 结电导电流的变化率根据 $I-V$ 特性曲线取极大值, 此时微分电容由于强复合效应已快速变小, 表观电阻有极大值, 得到了表观电阻极大值表达式。表观电阻与正向电压曲线的极值点与理论模型相吻合, 证明了该理论模型的正确性。

关键词: GaN 发光二极管; 表观电阻; 正向交流 (ac) 小信号方法; $I-V$ 特性曲线

中图分类号: O482.3; TN312.8

PA CC: 7860

文献标识码: A

1 引 言

发光二极管 (LED) 是最常用的电子器件, 发光二极管中存在负电容 (NC) 现象, 国内外在这方面进行了广泛而深入的研究^[1~8]。大量的可重复实验证明: 各种 LED 无一例外地普遍存在 NC, 这是 LED 本身的特性, 并非其他外部原因^[2]。文献 [8] 较好的解释了负电容现象, 认为发光二极管 pn 结的结电容在特定的正向电压范围内等效于可变电容, 特定参数的可变电容在测量中表现为负电容。文献 [4] 利用 LED 串联等效电路对表观电容和电阻进行了测量, 表观电阻与正向电压曲线出现了一个极值点。本文提出负电容现象的根本原因是在较高的正偏下微分电容 $\frac{dQ}{dU} < 0$ 推论出 pn 结的微分电容先随正向偏压的增大而急剧增大, 当出现复合发光后随正向偏压的增大而减小, 直到出现负值; 分析发现当结电导 G 电流的变化率根据 $I-V$ 特性取极大值时, 微分电容由于强复合效应快速变小, 导致表观电阻与正向电压曲线出现极值点, 与实验结果吻合。

2 正向交流小信号方法测量 LED 电容-电压特性原理及串联电阻极值现象

pn 结二极管等效电路如图 1 所示, 由结电容 C 、结电导 G 和串联电阻 R_s 组成, 而采用图 2 所示的串联等效电路对二极管进行测量常常是更方便的^[3,4]。其中 R_p 为表观电阻, C_p 为表观电容, 且

$$U(t) = U_Q + U_s(t) \quad (1)$$

$$U_s(t) = a \sin(\omega t) \quad (2)$$

其中 U_Q 为正向直流电压, $U_s(t)$ 为交流小信号电

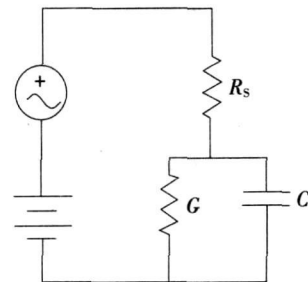


图 1 发光二极管的串联等效电路

Fig. 1 Serial equivalent circuit of LED.

收稿日期: 2007-08-17 修订日期: 2008-01-07

作者简介: 谭延亮 (1969-), 男, 湖南衡阳人, 硕士, 副教授, 主要从事电子、通信、自动控制方面的教学和科研工作。

E-mail: hyy@163.com

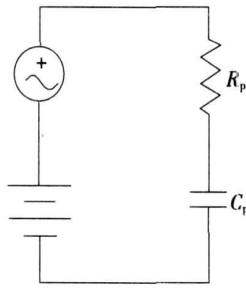


图 2 发光二极管的并联等效测试电路

Fig 2 Serial equivalent circuit of LED for measurement

压,文献[4]中 I[#]样品表观电容和电阻与电压关系见图 3^[4]。

由图 3 可以清晰的看到负电容现象。在出现发光现象之后负电容现象出现之前区间,表观电阻随着偏压的增大而急剧增大然后急剧减小,表观电阻出现了一个极大值。

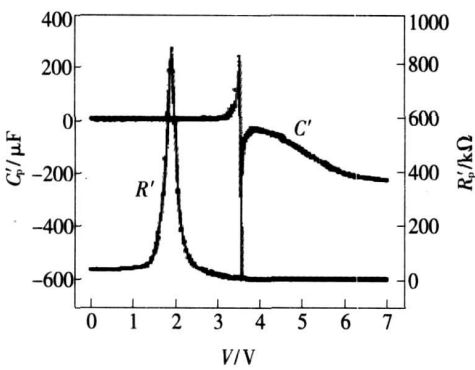


图 3 I[#]样品表观电容和电阻与电压关系

Fig 3 Apparent capacitance resistance-voltage curves of Sample I#.

3 发光二极管 pn 结特性分析

在正向偏压下, pn 结呈现的电容通常是由耗尽层空间电荷产生的电容和注入到结的两侧中性区的少数载流子产生的扩散电容组成的,在较大的正向偏压下,后者远大于前者,它应该随着正向偏压的增大而急剧增大。即对于结电容 C 有:

$$i_c(t) = \frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{dU_C} \frac{dU_C}{dt} \approx$$

$$\frac{dU_C}{dt} \frac{dQ}{dU_C} \Big|_{U=U_{QC}} = K_1 \frac{dU_C(t)}{dt} \quad (3)$$

$$K_1 = \frac{dQ}{dU_C} \Big|_{U=U_{QC}} \quad (4)$$

$$U_Q = (1 + R_s G) U_{QC} \quad (5)$$

U_{QC} 为正向直流电压 U_Q 在电容上的分压, $U_C(t)$

为 $U_s(t)$ 在 C 上的分压, U_C 为结电容上的电压。

K_1 也应该随着正向偏压的增大而急剧增大,不应该出现负电容现象。文献[8]认为发光二极管 pn 结的结电容出现极大值后将与电压成反比关系,在小信号作用下,可以进行线性近似,即:

$$C = C_Q - K U_C(t) \quad (6)$$

K 为一与 U_{QC} 有关并且大于零的常数。

结电容的电流:

$$i_c(t) = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(CU)}{dt} =$$

$$C \frac{dU_C(t)}{dt} + [U_{QC} + U_C(t)] \frac{dC}{dt} \approx$$

$$(C_Q - K U_{QC}) \frac{dU_C(t)}{dt} \quad (7)$$

根据文献[8]的结论,由于 $C_Q - K U_{QC} < 0$ 导致负电容现象。比较式(3)、(4)可知,出现负电容现象的根本原因在于 $K_1 = \frac{dQ}{dU_C} \Big|_{U=U_{QC}} < 0$ 那么在出现复合发光之前, K_1 应该随着正向偏压的增大而急剧增大;出现复合发光之后, K_1 应该先随正向偏压的增大而急剧增大,然后 K_1 由于强复合效应快速变小,直到小于零,出现负电容现象。

对于结电导电流 $i_c(t)$ 可线性近似为:

$$i_c(t) = i_{c0} + K_2 U_C(t) \quad (8)$$

i_{c0} 为正向直流电压为 U_Q 时的结电导电流。

根据图 4^[4] I-V 特性曲线可知:在出现复合发光之前, K_2 应该随着正向偏压的增大而急剧增大;出现复合发光之后, K_2 应该先随正向偏压的增大而急剧增大,然后出现拐点, K_2 随正向偏压的增大而快速变小,但不会小于 0。

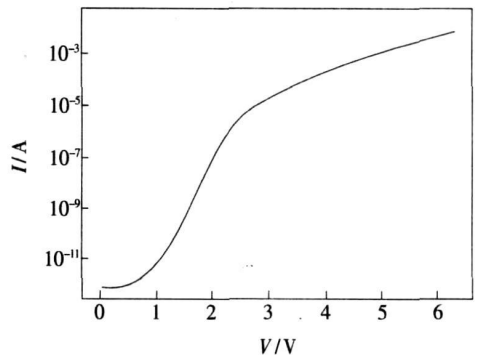


图 4 I[#]样品电流与电压关系

Fig 4 Current-voltage curve of Sample I#.

4 GaN 发光二极管表观电阻极值分析

对于图 2 所示的等效电路,表观电容有:

$$i(t) = C_p \frac{dU_C(t)}{dt} \quad (9)$$

$$a \sin(\omega t) = R_p i(t) + U_C(t) = R_p C_p \frac{dU_C(t)}{dt} + U_C(t) \quad (10)$$

初始条件: $U_C(0) = 0$ 解得:

$$U_C(t) = \frac{a[\sin(\omega t) - C_p R_p \omega \cos(\omega t)]}{1 + C_p^2 R_p^2 \omega^2} \quad (11)$$

$$i(t) = C_p \frac{a\omega[\cos(\omega t) + C_p R_p \omega \sin(\omega t)]}{1 + C_p^2 R_p^2 \omega^2} \quad (12)$$

对式 (11)、(12), 当 $\omega t = 2n\pi$, $\omega t = 2n\pi + \frac{\pi}{2}$ 分别

求得 $i(2n\pi)$ 、 $\left\{ 2n\pi + \frac{\pi}{2} \right\}$, 进一步可解得:

$$R_p = \frac{a \left\{ 2n\pi + \frac{\pi}{2} \right\}^2}{i(2n\pi)^2 + \left\{ 2n\pi + \frac{\pi}{2} \right\}^2} \quad (13)$$

$$C_p = \frac{i(2n\pi)^2 + \left\{ 2n\pi + \frac{\pi}{2} \right\}^2}{a i(2n\pi)\omega} \quad (14)$$

对于图 2 所示的发光二极管等效电路列 KCL、KVL 方程:

$$i(t) = i_c(t) + i_g(t) \quad (15)$$

$$U_Q + a \sin(\omega t) = R_s i(t) + U_C(t) + U_{QC} \quad (16)$$

将式 (3)、(8) 代入式 (15) 得:

$$i(t) = K_1 \frac{dU_C(t)}{dt} + i_{gc} + K_2 U_C(t) \quad (17)$$

将式 (17) 代入式 (16) 式整理得:

$$a \sin(\omega t) = (1 + R_s K_2) U_C(t) + R_s K_1 \frac{dU_C(t)}{dt} \quad (18)$$

解得:

$$U_C(t) = a \frac{(1 + R_s K_2) \sin(\omega t) - K_1 \omega R_s \cos(\omega t)}{(1 + R_s K_2)^2 + K_1^2 \omega^2 R_s^2} \quad (19)$$

将式 (19) 代入式 (17) 式得:

$$i(t) = i_{gc} + a \frac{(K_1^2 \omega^2 R_s + K_2 + R_s K_2^2) \sin(\omega t) + K_1 \omega R_s \cos(\omega t)}{(1 + R_s K_2)^2 + K_1^2 \omega^2 R_s^2} \quad (20)$$

将直流部分舍弃, 得到:

$$i(2n\pi) = a \frac{K_1 \omega R_s}{(1 + R_s K_2)^2 + K_1^2 \omega^2 R_s^2} \quad (21)$$

$$\left\{ 2n\pi + \frac{\pi}{2} \right\} = a \frac{K_1^2 \omega^2 R_s + K_2 + R_s K_2^2}{(1 + R_s K_2)^2 + K_1^2 \omega^2 R_s^2} \quad (22)$$

将式 (21)、(22) 代入式 (23) 式得:

$$R_p = \frac{(K_1^2 \omega^2 R_s + K_2 + R_s K_2^2) [(1 + R_s K_2)^2 + K_1^2 \omega^2 R_s^2]}{a [(K_1 \omega R_s)^2 + (K_1^2 \omega^2 R_s + K_2 + R_s K_2^2)^2]} \quad (23)$$

令 $A = K_1 \omega R_s$, $B = (1 + R_s K_2)$

$$R_p = \frac{R_s (A^2 + B^2 - B) (A^2 + B^2)}{a [R_s^2 A^2 + (A^2 + B^2 - B)^2]} \quad (24)$$

R_s 较大, 一般为几十欧姆, 根据上一节对 pn 结电容和结电导特性分析, 可知:

(1) 当正向偏置电压极小: 结电导 G 电流的变化率 K_2 极小, 此时 $R_s K_2$ 很小, $B = (1 + R_s K_2)$ 趋近 1, 式 (24) 可变化为:

$$R_p = \frac{R_s (A^2) (A^2 + 1)}{a [R_s^2 A^2 + A^4]} \quad (25)$$

由于 ω 较大, 随正向偏置电压的增大 $A = K_1 \omega R_s$ 的值有以下几种情况。

① $A \ll 1 \ll R_s$ 时, 式 (25) 可变为:

$$R_p = \frac{1}{a R_s} \quad (26)$$

② $1 \ll A \ll R_s$ 时, 式 (25) 可变为:

$$R_p = \frac{A^2}{a R_s} \quad (27)$$

③ $A \gg R_s$ 时, 式 (25) 可变为:

$$R_p = \frac{R_s}{a} \quad (28)$$

由式 (26)、(27)、(28) 可知, 随正向偏置电压的增大, R_p 增大。

(2) 当正向偏置电压较大, 接近和大于发光门槛电压: 结电导 G 电流的变化率 K_2 及微分电容 $K_1 = \frac{dQ}{dU_C} |_{U=U_{QC}}$ 较大, 因此 $B = (1 + R_s K_2)$ 和 $A = K_1 \omega R_s$ 较大; ω 较大, 必有 $A = K_1 \omega R_s \gg R_s$, $K_1 \omega R_s \gg R_s K_2$, $(A^2 + B^2 - B) \gg R_s A$ 成立。

式 (24) 可变化为:

$$R_p = \frac{R_s (A^2 + B^2)}{a [(A^2 + B^2 - B)]} \approx \frac{R_s}{a} \quad (29)$$

(3) 当正向偏置电压更大 (大约为 2 V), 出现复合发光更强, 结电导 G 电流的变化率 K_2 根据 $I-V$ 特性取极大值, 此时 K_1 由于强复合效应快速变小 (复合发光门槛电压约为 1.6 V), 因此 $B = (1 + R_s K_2)$ 较大, $A = K_1 \omega R_s$ 较小, 必有 $K_1 \omega R_s \ll$

$R_s K_2$, $(A^2 + B^2 - B) \ll R_s A$ 成立, 式 (24) 可变化为:

$$R_p = \frac{R_s(A^2 + B^2 - B)(A^2 + B^2)}{a(R_s A^2)} \approx \frac{B^4}{aR_s A^2} = \frac{(1 + R_s K_2)^4}{aR_s (K_1 \omega R_s)^2} \quad (30)$$

当正向偏置电压进一步提高, 根据 $I-V$ 特性, 结电导 G 电流的变化率 K_2 将快速变小, 即 B 快速变小, 微分电容 K_1 即 A 此时也将变小。根据式 (30) 可知, 表观电阻与 K_2 的 4 次方成正比, 与 K_1 的平方成反比, 适当选取 B, A 值导致此时表观电阻出现极大值。

5 结 论

利用正向交流 (ac) 小信号方法对 GaN 发光二极管的电容-电压特性进行测量, 可观察到 GaN

发光二极管中的负电容现象。通过对相关文献的实验数据进行分析, 得到负电容现象的根本原因是在较高的正偏下微分电容 $\frac{dQ}{dU} < 0$ 推论出 pn 结

的微分电容 $\frac{dQ}{dU}$ 先随正向偏压的增大而急剧增大, 当出现复合发光后随正向偏压的增大而减小, 直到随正向偏压的增大而出现负值; 正向偏置电压较大 (大约为 2 V), 结电导 G 电流的变化率 K_2 根据 $I-V$ 特性取极大值, 微分电容 $K_1 = \frac{dQ}{dU}$ 由于强复合效应已快速变小 (复合发光门槛电压约为 1.6 V) 得到了表观电阻极大值表达式 $R_p = \frac{(1 + R_s K_2)^4}{aR_s (K_1 \omega R_s)^2}$ 。表观电阻与正向电压曲线的极值点与理论模型相吻合, 证明了该理论模型的正确性。

参 考 文 献:

- [1] Sandoval E, Lopez C, Munoz E. Forward bias impedance of GaAs_{1-x}P_x LED's [J]. *Solid-state Electronics*, 1982, **25**(5): 355-357.
- [2] Feng Lie-feng, Zhu Chuanyun, Chen Yong *et al* Mechanism of negative capacitance in LEDs [J]. *J. Optoelectronics • Laser* (光电子 • 激光), 2006, **17**(1): 5-8 (in Chinese).
- [3] Wang C D, Zhu C Y, Zhang G Y, *et al* Accurate electrical characterization of forward AC behavior of real semiconductor diode giant negative capacitance and nonlinear interfacial layer [J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2003, **50**(4): 1145-1148.
- [4] Shen Jun, Wang Cunda, Yang Zhijian, *et al* Negative capacitance effect of GaN LEDs [J]. *Chin. J. Lumina* (发光学报), 2000, **21**(4): 338-341 (in Chinese).
- [5] Zeng Zhibin, Zhu Chuanyun, Li Le *et al* Study of negative capacitance effect of GaN blue LEDs [J]. *J. Optoelectronics • Laser* (光电子 • 激光), 2004, **15**(4): 402-405 (in Chinese).
- [6] Wang Jun, Feng Lie-feng, Zhu Chuanyun, *et al* The Experimental study of negative capacitance in LEDs [J]. *J. Optoelectronics • Laser* (光电子 • 激光), 2006, **17**(1): 1-4 (in Chinese).
- [7] Wu X, Ebans H L, Yang E S. Negative capacitance at metal-semiconductor interfaces [J]. *J. Appl Phys*, 1990, **68**(6): 2845-2848.
- [8] Tan Yan-liang, You Kai-ming, Chen Lie-zun *et al* Relation of negative capacitance in LED to rotational frequency [J]. *Chin. J. Semicond.* (半导体学报), 2007, **28**(5): 741-744 (in Chinese).

Analysis of Apparent Resistance Extremum in GaN LED

TAN Yan-liang^{1,2}, XIAO De-tao², YOU Kai-ming¹, CHEN Lie-zun¹, YUAN Hong-zhi³

(1 Department of Physics & Electronics, Hengyang Normal University, Hengyang 421008, China;

2 School of Nuclear Science & Technology, University of South China, Hengyang 421001, China;

3 Hunan Tiyen Machine LPT. Co, Hengyang 421005, China)

Abstract The forward current-voltage characteristic and forward capacitance-voltage characteristic measurements

are the most important methods to study the forward electricity characteristic of GaN light-emitting diodes. We can use the forward alternating current (ac) small signal method to measure the capacitance-voltage characteristic of the GaN light-emitting diodes. Some value of GaN light-emitting diodes parameters can be deduced from capacitance-voltage characteristic. The negative capacitance phenomenon of GaN light-emitting diode can be observed by using this method. Measuring the apparent capacitance and resistance by the serial equivalent circuit of LED for measurement, there is an extremum point in apparent resistor-voltage curve. Propose that the basic reason of negative capacitance is that the differential capacitance less than zero by analyzing relation literature. Inferring that the differential capacitance of pn junction will grow by leaps and bounds follow the voltage of forward bias grows, the differential capacitance of pn junction will lower till less than zero when the forward bias voltage is higher than the threshold voltage of light-emitting diodes begin emitting light. The current change rate of junction conductor will be max base on current-voltage curve when the forward bias voltage is higher than the threshold voltage of light-emitting diodes begin emitting light, and then the differential capacitance of pn junction fall down quickly for radiative-recombination, so apparent resistor is maximum. We obtain the expression of max apparent resistor. We analyze the extreme point of apparent resistor-voltage curve. The result of theory analysis agree with the experiment. That proved the accuracy of this theory model. The research on apparent resistance phenomenon will be valuable for study the electrical characteristics of GaN light-emitting diodes, and will be valuable for the knowledge improvement of the characteristic and parameter relevant the pn junction internal structure of GaN light-emitting diodes. The study of apparent resistance may open research for novel devices and applications.

Key words GaN light-emitting diode; apparent resistance; forward alternating current (ac) small signal method; current-voltage curve