

发光二极管负电容与角频率的关系

谭延亮^{1,†} 游开明¹ 陈列尊¹ 袁红志²

(1 衡阳师范学院物电系, 衡阳 421008)

(2 湖南天雁机械有限公司, 衡阳 421005)

摘要: 利用正向交流(AC)小信号方法对发光二极管(LED)的电容-电压特性进行测量,可以观察到发光二极管中的负电容现象.提出了测量到的负电容现象是表象,不存在负电容;发光二极管 p-n 结的结电容在特定的正向电压范围内等效于可变电容.分析可变电容对交流小信号响应得到:特定参数的可变电容使电流的相位移相 π ,使得在测量中表现为负电容;得到了发光二极管负电容与角频率的关系表达式.

关键词: 发光二极管; 负电容; 正向交流小信号方法; 可变电容; 角频率

EEACC: 4260

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)05-0741-04

1 引言

1982年,Sandoval等人^[1]发现在GaAsP材料制成的发光二极管(LED)中存在着负电容(NC)现象,他们认为NC是由寄生电感造成的.国内在这方面也做了广泛而深入的研究,通过大量的可重复实验证明:各种LED普遍存在NC,NC是LED的本身特性,并非其他外部原因^[2].但是负电容的概念难以让人接受,也难以用现代物理学理论解释.根据相关文献对负电容测量的方法进行研究;对p-n结的结电容变化进行分析研究,发现发光二极管p-n结的结电容在特定的正向电压范围内等效于可变电容,分析可变电容对正向交流小信号响应得到:特定参数的可变电容使电流的相位移相 π ,使得在测量中表现为负电容;发光二极管负电容与角频率成反比.

2 正向交流小信号方法测量发光二极管的电容-电压特性

一般来说,p-n结二极管的等效电路可以看作由结电容、结电导和串联电阻组成, C 、 G 和 R_s 的测量可以采用串联等效电路进行^[3],等效电路如图1所示.但大部分测量二极管的测量仪器都采用如图2所示的并联等效测试电路,其中 G_p 为表观电导, C_p 为表观电容.由于电源有内阻,二极管的管脚和测量导线都有电阻,图1更加接近发光二极管实际电路.比较图1和图2两个电路,利用复阻抗相等,

可得出如下关系:

$$G_p = \frac{G(1 + R_s G) + R_s (\omega C)^2}{(1 + R_s G)^2 + (\omega R_s C)^2} \quad (1)$$

$$C_p = \frac{C}{(1 + R_s G)^2 + (\omega R_s C)^2} \quad (2)$$

其中 ω 是测试时所加的交流小信号角频率.(1)和(2)式表示测量得到的表观电导、表观电容与实际电导、实际电容的换算关系.

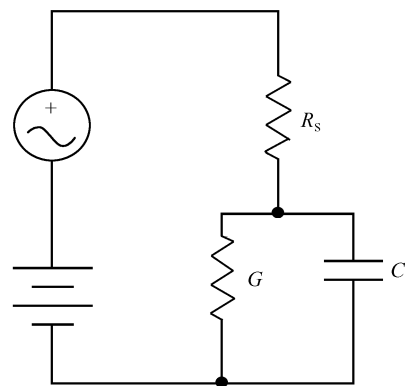


图1 串联等效测试电路

Fig.1 Equivalent serial circuit of measurement

典型的表观电容和结电容测量结果如图3所示^[4].

图3示出了在1kHz~1MHz频率范围内样品的表观电容-电压(C_p-V)和结电容-电压($C-V$)特性.可以看到,在较大的正向电压下电容为负值,并且测试频率越低正向电压越大,负电容现象就越显著.从图中还可看出,只要电压足够大,在测试频率

† 通信作者. Email: hytyl@163.com

2006-10-20 收到,2006-11-16 定稿

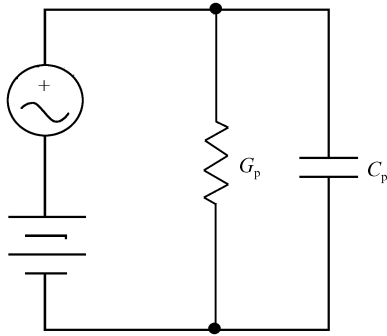


图2 并联等效测试电路

Fig.2 Equivalent parallel circuit for measurement

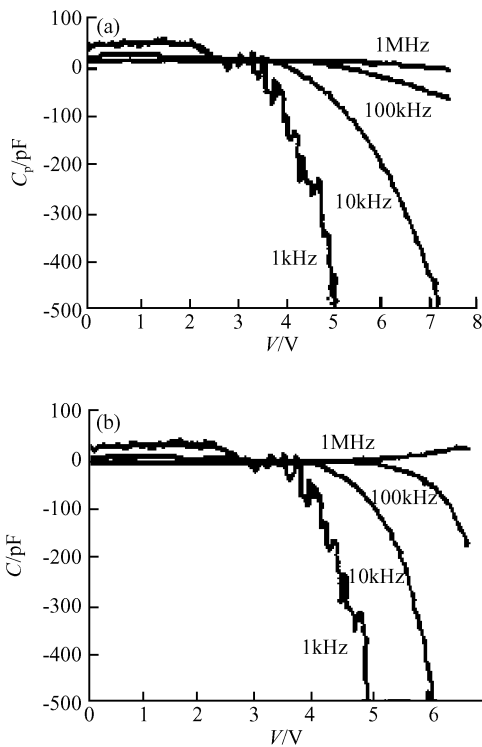


图3 样品的并联表观电容(a)和结电容(b)

Fig.3 Apparent capacitance of parallel circuit (a) and junction capacitance (b)

范围内(1MHz以下),表观电容 C_p 和结电容 C 最终都将变为负值.负电容现象随着频率的提高而减弱,发光二极管的发光强度也随着频率的提高而减小.这种负电容现象是一种结的效应,并且频率越低电压越大,这种结效应就越明显^[4].

3 发光二极管结电容在正向偏压下对交流小信号的响应

在正向偏压下,p-n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.由此可知,在没有其他机制存在的情况下,正向偏压下的结电容主要表现为少数载流子的积累过程引起的扩散电容,它应该随着正向偏压的增大而增大.但是如图3所示,在中低频率下,p-n结的电容常常是随着正向偏压的增大而达到最大值,然后急剧下降,最后变为负值^[5~7].这说明,除了扩散电容机制外,还应该有另外对电容有不明贡献的机制存在.分析图3可知:p-n结的电容过了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 $C = C_Q - KU_C(t)$, K 为与 U_{OC} 有关并且大于零的常数.

$$U(t) = U_Q + U_\delta(t) \quad (3)$$

$$U_\delta(t) = a \sin(\omega t) \quad (4)$$

其中 U_Q 为正向直流电压; $U_\delta(t)$ 为交流小信号.

$$C = C_Q - KU_C(t) \quad (5)$$

其中 C 为 p-n 结电容; U_{OC} 为正向直流电压 U_Q 在电容上的分压; C_Q 为在 U_{OC} 作用下的 p-n 结电容; $U_C(t)$ 为 $U_\delta(t)$ 在 C 上的分压; K 为大于零的常数.

分析发光二极管在正向偏压 U_Q 作用下对交流小信号 $U_\delta(t)$ 的响应如下:

由于:

$$Q = C(U_{OC} + U_C(t)) \quad (6)$$

(6)式两边对 t 求导可得:

$$\frac{dQ}{dt} = C \frac{dU_C(t)}{dt} + (U_{OC} + U_C(t)) \frac{dC}{dt} \quad (7)$$

将(5)式代入(7)式得:

$$i_c(t) = (C_Q - KU_C(t)) \frac{dU_C(t)}{dt} - K(U_{OC} + U_C(t)) \frac{dU_C(t)}{dt} \quad (8)$$

将(8)式整理得:

$$i_c(t) = (C_Q - 2KU_C(t) - KU_{OC}) \frac{dU_C(t)}{dt} \quad (9)$$

由于 $U_\delta(t)$ 极小,约为 10mV ^[5], $U_C(t) < U_\delta(t) \ll U_{OC}$,忽略 $2KU_C(t)$, (9)式可变为:

$$i_c(t) = (C_Q - KU_{OC}) \frac{dU_C(t)}{dt} \quad (10)$$

令 $U_\delta(t)$ 的幅度无限小,则可认为 G 为不变的电导.

假定,加上直流偏压达到稳态后再加上交流小信号,根据 KVL 和 KCL 方程可得:

$$U(t) = R_S i(t) + U_C(t) + U_{OC} \quad (11)$$

$$i(t) = i_G(t) + i_c(t) = G(U_C(t) + U_{OC}) + i_c(t) \quad (12)$$

将(12)式代入(11)式可得:

$$U(t) = R_S G U_C(t) + R_S G U_{OC} + R_S i_c(t) + U_C(t) + U_{OC} \quad (13)$$

将(10)式代入(13)式可得：

$$U(t) = R_s(C_0 - KU_{oc}) \frac{dU_c(t)}{dt} + (1 + R_s G)U_c(t) + U_0 \quad (14)$$

将(3),(4)式代入(14)式可得：

$$a \sin(\omega t) = R_s(C_0 - KU_{oc}) \frac{dU_c(t)}{dt} + (1 + R_s G)U_c(t) \quad (15)$$

令

$$K_1 = C_0 - KU_{oc} \quad (16)$$

初始条件： $U_c(0) = 0$

解得：

$$U_c(t) = \frac{a(1 + R_s G)\sin(\omega t) - aK_1\omega\cos(\omega t)R_s}{(1 + R_s G)^2 + K_1^2\omega^2 R_s^2} \quad (17)$$

将(17)式代入(10)式得：

$$i_c(t) = K_1 a\omega \frac{(1 + R_s G)\cos(\omega t) + K_1\omega R_s \sin(\omega t)}{(1 + R_s G)^2 + K_1^2\omega^2 R_s^2} \quad (18)$$

将(17),(18)代入(12)式可得：

$$i(t) = \frac{U_0 G}{1 + R_s G} + \frac{K_1 a\omega\cos(\omega t)}{(1 + R_s G)^2 + K_1^2\omega^2 R_s^2} + \frac{(K_1^2\omega^2 aR_s + Ga + aR_s G^2)\sin(\omega t)}{(1 + R_s G)^2 + K_1^2\omega^2 R_s^2} \quad (19)$$

(19)式的第二项表示电容效应产生的电流 i_c^1 ：

$$i_c^1 = \frac{K_1 a\omega\cos(\omega t)}{(1 + R_s G)^2 + K_1^2\omega^2 R_s^2} \quad (20)$$

由于 U_0 较大,可满足 $K_1 < 0$ 条件,将(20)式整理为：

$$i_c^1 = \frac{|K_1| a\omega\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)}{(1 + R_s G)^2 + K_1^2\omega^2 R_s^2} \quad (21)$$

由(21)式可知,结电容电流相位落后交流小信号 $U_s(t) = a \sin(\omega t)$ 电压相位 $\frac{\pi}{2}$,发光二极管结电容表现为一个负容抗. 交流小信号 $U_s(t) = a \sin(\omega t)$ 作用于普通的电容,流过普通电容的电流相位超前交流小信号电压相位 $\frac{\pi}{2}$,由此可见,在较高的正偏下,LED 结电容这种特定参数的可变电容使电流的相位移相 π .

结电容的等效复阻抗 Z 为：

$$Z = j \frac{(1 + R_s G)^2 + K_1^2\omega^2 R_s^2}{|K_1| \omega} = \frac{1}{j\omega C_p^1} \quad (22)$$

发光二极管结电容测量值 C_p^1 为：

$$C_p^1 = - \frac{|K_1|}{(1 + R_s G)^2 + K_1^2\omega^2 R_s^2} \quad (23)$$

当 $K_1 < 0$ 时,由(23)式及图 3 可知：

当电压较高时,出现负电容现象. 此时若 R_s 及 G 较小,而当 ω 较大时, C_p^1 与 ω^2 成反比. 对于在较高正偏下的 LED, R_s 及 G 都较大,由于 $(1 + R_s G)^2$ 的影响,得到了负电容现象随角频率的增大而急剧减小的结论,这些都与实验结果完全符合.

当 $C_0 - KU_{oc} < 0$ 时,由于 $U(Q) \gg U_s(t)$, $C = C_0 - KU_c(t) > 0$,发光二极管结电容本质为一个正的可变电容.

4 结论

利用正向交流小信号方法对发光二极管(LED)的电容-电压特性进行测量,可观察到发光二极管中的负电容现象. 通过对相关文献的实验数据分析,根据发光二极管 p-n 结的结电容过了极大值后将与电压成反比关系,即 $C = C_0 - KU_c(t)$,其中 $K > 0$,分析发光二极管结电容在正向偏压下对交流小信号的响应可得到:当 $C_0 - KU_{oc} < 0$ 时, $C_p^1 = - \frac{|K_1|}{(1 + R_s G)^2 + K_1^2\omega^2 R_s^2}$,表现为一个负容抗,其本质为一个正的可变电容. 测量到发光二极管 p-n 结的结电容的负电容现象是表象,不存在负电容;得到发光二极管 p-n 结串联等效结电容测量值与 ω 关系表达式. 这些都与实验结果完全符合.

参考文献

- [1] Sandoval F, Lopez C, Munoz E. Forward-bias impedance of GaAs_{1-x}P_x LED's. Solid-State Electron, 1982, 25(5): 355
- [2] Feng Liefeng, Zhu Chuanyun, Chen Yong, et al. Mechanism of negative capacitance in LEDs. Journal of Optoelectronics • Laser, 2006, 1:5 (in Chinese) [冯列峰, 朱传云, 陈永, 等. 发光二极管中负电容现象的机理. 光电子 • 激光, 2006, 1:5]
- [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. IEEE Trans Electron Devices, 2003, 50(4): 1145
- [4] Chen Yong, Feng Liefeng, Zhu Chuanyun, et al. Measurement and judgement on negative capacitance in LEDs. Journal of Hebei University of Technology, 2005, 34(4): 24 (in Chinese) [陈永, 冯列峰, 朱传云, 等. 发光二极管中负电容的测试及判定. 河北工业大学学报, 2005, 34(4): 24]
- [5] Zeng Zhibin, Zhu Chuanyun, Li Le, et al. Study of negative capacitance effect of GaN blue LEDs. Journal of Optoelectronics • Laser, 2004, 15(4): 402 (in Chinese) [曾志斌, 朱传云, 李乐. GaN 蓝光发光二极管的负电容现象研究. 光电子 • 激光, 2004, 15(4): 402]
- [6] Wang Jun, Feng Liefeng, Zhu Chuanyun, et al. The experimental study of negative capacitance in LEDs. Journal of Optoelectronics • Laser, 2006, 17(1): 1 (in Chinese) [王军,

冯列峰,朱传云,等.发光二极管中负电容现象的实验研究.光电子·激光,2006,17(1):1]

[7] Wu X, Ebans H L, Yang E S. Negative capacitance at metal-semiconductor interfaces. *J Appl Phys*, 1990, 68(6): 2845

Relation of Negative Capacitance in LED to Rotational Frequency

Tan Yanliang^{1,†}, You Kaiming¹, Chen Liezun¹, and Yuan Hongzhi²

(1 *Department of Physics and Electronics, Hengyang Normal University, Hengyang 421008, China*)

(2 *Hunan Tyen Machine LPT. Co, Hengyang 421005, China*)

Abstract: Using the forward alternating current (ac) small signal method to measure the capacitance-voltage characteristic of an LED, negative capacitance can be observed. We propose that this phenomenon is a surface phenomenon, and there is no real negative capacitance. We further propose that the capacitance of the p-n junction in an LED is equivalent to the variable capacitance in a certain range of forward voltage. By the corresponding analysis of variable capacitance to the alternating current small signal, we find that the variable capacitance for certain parameters can shift the phase of the current by π , leading to negative capacitance in measurement. Additionally, an expression for the negative capacitance in an LED that relates it to the rotational frequency is obtained for the first time.

Key words: light-emitting diode; negative capacitance; forward alternating current small signal method; variable capacitance; rotational frequency

EEACC: 4260

Article ID: 0253-4177(2007)05-0741-04

[†] Corresponding author. Email: hytyl@163.com

Received 20 October 2006, revised manuscript received 16 November 2006