

文章编号: 1000-7032(2009)05-0644-05

发光二极管负电容与复合发光关系

谭延亮^{1,2}, 游开明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 421001; 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管中的负电容现象。通过对复合发光机理和发光二极管 p-n 结进行分析,得到了发光二极管在特定的正向电压范围内,由于发光概率复合急剧变化出现了 $\frac{dQ}{dU} < 0$ 的现象;当 $\frac{dQ}{dU} < 0$ 时,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得到发光二极管表现电容的电流相位落后交流小信号电压相位 $\frac{\pi}{2}$,发光二极管表现电容表现为一个负电容。首次得到了发光二极管负电容与复合发光的关系表达式。

关键词: 发光二极管; 负电容; 正向交流(ac)小信号方法; 复合发光

中图分类号: TN312.8

PACS: 78.60.Fi

PACC: 7860F

文献标识码: A

1 引言

半导体发光二极管在照明、指示、显示和光通讯等领域有着巨大的应用前景,因而受到广泛关注,其光学特性和正向电学特性是研究的重要课题。发光二极管(LED)中存在负电容(NC)现象,国内外在这方面也做了广泛而深入的研究^[1~7]。通过大量的可重复实验证明:各种LED无一例外地普遍存在NC,NC是LED的本身特性,并非其他外部原因所致^[2]。半导体器件的负电容现象的研究可能包含着丰富的物理内容,并有较大的实用价值。相关文献认为负电容现象与强复合效应有关,却没有更深入的分析。通过对复合发光机理和发光二极管pn结进行分析,得到了负电容现象与过剩载流子发光复合概率的关系。

2 正向交流小信号法测量LED电容-电压特性的原理和负电容现象

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测试电路进行^[3],等效测试电路如图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 为表现电导, C_p 为表现电容。利用复阻抗相等就可

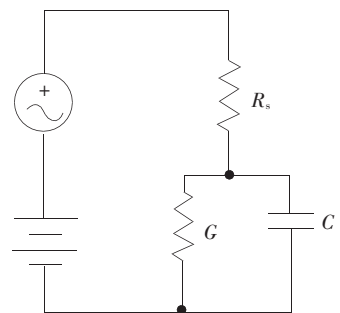


图1 LED的串联等效测试电路

Fig. 1 Equivalent serial circuit for LED measurement

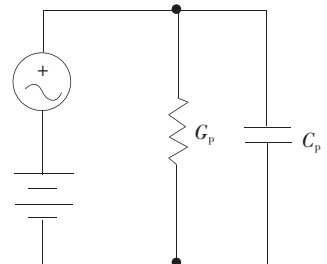


图2 LED的并联等效测试电路

Fig. 2 Equivalent parallel circuit for LED measurement

收稿日期: 2009-01-25; 修订日期: 2009-06-24

基金项目: 衡阳师范学院科研基金(08D04)资助项目

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

E-mail: hytyl@163.com

以由表观电容、表观电导推得结电容、结电导。

典型的结电容测量结果见图3^[4]。从图3看到在较大的正向电压下电容显负值,并且测试频率越低、正向电压越大,负电容现象就越显著。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]。

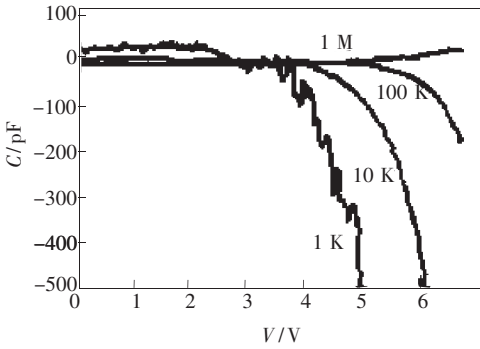


图3 LED样品的结电容

Fig. 3 Junction capacitance of LED

3 理论分析

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。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加而增大。但是由图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。这说明,除了扩散电容机制外,还应该另外对电容有不明贡献的机制存在^[5~7]。

由相关的实验数据可知:NC现象是LED结的固有效应,并非外部原因所致;NC与发光有源区的复合发光有密切关系,发光有源区的强复合是产生NC的基本原因^[6]。

3.1 复合发光效应分析

发光二极管核心是p-n结,因此它具有一般p-n结的特性,即正向导通,反向截止和击穿特性。此外,在一定条件下,它还具有发光特性。在正向电压下,电子由n区注入到p区,空穴由p区注入到n区。进入对方区域的少数载流子(少子)一部分与多数载流子(多子)复合而发光。假设发光是在p区中发生的,那么注入的电子与价

带空穴直接复合而发光,或者先被发光中心捕获后,再与空穴复合发光。除了这种发光复合外,还有些电子被非发光中心(这个中心介于导带、价带中间附近)捕获,而后再与空穴复合,每次释放的能量不大,不能形成可见光。发光的复合量相对于非发光复合量的比例越大,光量子效率越高。

3.2 发光二极管结电容分析

正偏下,类型相反的多数载流子从两边冲入p区、n区,使得多数载流子浓度急剧提高,然后注入pn结对面一侧,使得p区、n区的少数载流子的浓度也急剧提高,p区、n区的少数载流子与多数载流子复合形成复合电流。稳态时,p-n结漂移电流很小,可以认为电源电流、复合电流、扩散电流相等。

① U_Q 小于复合发光的阈值电压,非辐射复合。当发光二极管加上正向偏置电压 U_Q 达到平衡后,令单位少数载流子单位时间的复合概率为 λ ,令单位时间注入少数载流子的电荷为 P ,有:

$$\frac{dQ}{dt} = -Q\lambda + P \tag{1}$$

平衡时有:
$$\frac{dQ}{dt} = 0 \tag{2}$$

解得:
$$Q = \frac{P}{\lambda} \tag{3}$$

P 实际就是 p-n 结正向偏置下的电流。

$$P = Q\lambda = i \tag{4}$$

由式(4)及图4的发光二极管 $I-V$ 特性可知:电流随着正向偏置电压的增加而快速增加,那么少数载流子的积累达到平衡时的 Q 也随着正向偏置电压的增加而快速增加。

② U_Q 高于复合发光的阈值电压。当发光二极管加上正向偏置电压 U_Q 达到平衡后,令单位少数载流子单位时间发光复合的复合概率为 λ_1 ,有:

$$\frac{dQ}{dt} = -Q\lambda - Q\lambda_1 + P \tag{5}$$

平衡时,解得:
$$Q = \frac{P}{\lambda + \lambda_1} \tag{6}$$

$$P = (\lambda + \lambda_1)Q = i \tag{7}$$

根据发光二极管的 $I-V$ 特性,在较高正向偏置电压 U_Q ,将 i 线性近似,有:

$$i = i_0 + K\Delta U \tag{8}$$

即:
$$\left. \frac{di}{dU} \right|_{U=U_Q} = K \tag{9}$$

将式(7)两边分别对 U 求导得:

$$(\lambda + \lambda_1) \frac{dQ}{dU} + Q \frac{d\lambda_1}{dU} + Q \frac{d\lambda}{dU} = K \quad (10)$$

当出现复合发光后,由于发光强度随正向偏置电压的增加而急剧增加,可以认为 $\frac{d\lambda}{dU} \ll \frac{d\lambda_1}{dU}$, 舍去 $Q \frac{d\lambda}{dU}$ 这一项。

将 λ_1 线性近似:

$$\left. \frac{d\lambda_1}{dU} \right|_{U=U_Q} = K_1 \quad (11)$$

将式(10)化简为:

$$\left. \frac{dQ}{dU} \right|_{U=U_Q} = \frac{K - K_1 Q}{\lambda + \lambda_1} \quad (12)$$

当 $K - K_1 Q < 0$ 时会出现 $\frac{dQ}{dU} < 0$ 的现象。该现象出现的条件为: I - V 特性曲线的上升斜率 K 较小;少数载流子的积累达到平衡时的 Q 较大;少数载流子的单位时间发光复合的复合概率 λ_1 对正向偏置电压的变化率 $\frac{d\lambda_1}{dU}$ 较大。发光二极管在较高的正向偏置电压下满足上述所有条件。

当 $\frac{dQ}{dU} < 0$ 时,从根本上来说,是由于随着电压

的提高,多数载流子分别注入 p 区和 n 区后,在电场作用下漂移运动速度,即漂移电流接近饱和(表现为测量到的电源电流缓慢上升),使得扩散到 n 、 p 区的少数载流子缓慢增加。而此时少数载流子发光复合概率急剧提高,少数载流子对于发光复合来说供不应求,少数载流子的积累达到平衡时的 Q 相应减小。此时多数载流子由于扩散“受阻”,出现“堆积”,其浓度继续快速上升。

$\frac{dQ}{dU} < 0$ 时,由于电流仍然增大,非发光复合消耗的少数载流子 $Q\lambda$ 减小,发光复合消耗的少数载流子为 $Q\lambda_1 = i - Q\lambda$ 还是继续增大,即发光继续增强。

按照 LED 电子-空穴辐射复合的理论,其复合率 $R = Bnp$,它与电子空穴浓度的乘积成比例, B 是双分子复合系数,与电压无关。以 n 区为例来说,由于 $\frac{dQ}{dU} < 0$,少数载流子浓度 p 下降,但是多数载流子浓度 n 继续快速上升,使得复合率 R 继续增长,发光继续增强。更强的发光复合消耗

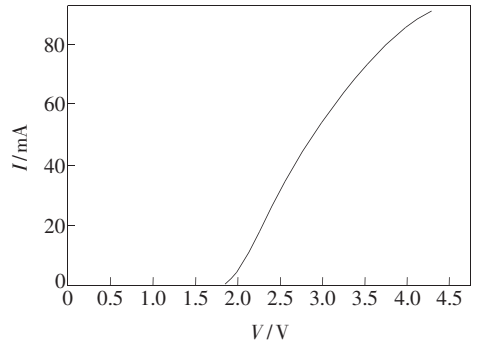


图 4 发光二极管 I - V 特性

Fig. 4 Current-voltage curve of LED (the current grows slower on high forward bias)

的更多的少数载流子由增大的扩散电流提供。

3.3 分析发光二极管在正向偏压 U_Q 作用下对交流小信号 $U_s(t)$ 的响应

$$U(t) = U_Q + U_s(t) \quad (13)$$

$$U_s(t) = a \sin(\omega t) \quad (14)$$

其中 U_Q 为正向直流电压, $U_s(t)$ 为交流小信号。

对于结电容 C 有:

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

$$\left. \frac{dU_c}{dt} \frac{dQ}{dU_c} \right|_{U=U_{QC}} = K_2 \frac{dU_c(t)}{dt} \quad (15)$$

$$K_2 = \left. \frac{dQ}{dU_c} \right|_{U=U_{QC}} \quad (16)$$

U_{QC} 为正向直流电压 U_Q 在结电容上的分压, U_c 为结电容上的电压, $U_c(t)$ 为 $U_s(t)$ 在结电容上的分压。

根据 I - V 特性曲线,在较高的正向偏置电压作用下, G 随电压的变化较小。令 $U_s(t)$ 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,根据图 1 列 KVL、KCL 方程:

$$U(t) = R_s i(t) + U_c(t) + U_{QC} \quad (17)$$

$$i(t) = i_c(t) + i_c(t) = G[U_c(t) + U_{QC}] + i_c(t) \quad (18)$$

将式(18)代入式(17)可得:

$$U(t) = R_s G U_c(t) + R_s G U_{QC} + R_s i_c(t) + U_c(t) + U_{QC} \quad (19)$$

将式(15)代入式(19)可得:

$$U(t) = R_s K_2 \frac{dU_c(t)}{dt} + (1 + R_s G) U_c(t) + U_Q \quad (20)$$

将式(13)、(14)代入式(20)可得:

$$a \sin(\omega t) = R_s K_2 \frac{dU_c(t)}{dt} + (1 + R_s G) U_c(t) \quad (21)$$

初始条件: $U_c(0) = 0$

解得:

$$U_c(t) = \frac{a(1 + R_s G) \sin(\omega t) - \alpha K_2 \omega \cos(\omega t) R_s}{(1 + R_s G)^2 + K_2^2 \omega^2 R_s^2} \quad (22)$$

将式(20)代入式(15)得:

$$i_c(t) = K_2 a \omega \frac{(1 + R_s G) \cos(\omega t) + K_2 \omega R_s \sin(\omega t)}{(1 + R_s G)^2 + K_2^2 \omega^2 R_s^2} \quad (23)$$

将式(22)、(23)代入式(18)可得:

$$i(t) = \frac{U_Q G}{1 + R_s G} + \frac{K_2 a \omega \cos(\omega t)}{(1 + R_s G)^2 + K_2^2 \omega^2 R_s^2} + \frac{(K_2^2 \omega^2 a R_s + G a + a R_s G^2) \sin(\omega t)}{(1 + R_s G)^2 + K_2^2 \omega^2 R_s^2} \quad (24)$$

式(24)的第二项表示电容效应产生的电流 i_c^1 :

$$i_c^1 = \frac{K_2 a \omega \cos(\omega t)}{(1 + R_s G)^2 + K_2^2 \omega^2 R_s^2} \quad (25)$$

当 $K_2 < 0$ 时, 将式(25)整理为:

$$i_c^1 = \frac{|K_2| a \omega \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)}{(1 + R_s G)^2 + K_2^2 \omega^2 R_s^2} \quad (26)$$

由式(26)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。

结电容的等效复阻抗 Z 为:

$$Z = j \frac{(1 + R_s G)^2 + K_2^2 \omega^2 R_s^2}{|K_2| \omega} = \frac{1}{j \left(-\frac{|K_2| \omega}{(1 + R_s G)^2 + K_2^2 \omega^2 R_s^2} \right)} = \frac{1}{j \omega C_p^1} \quad (27)$$

发光二极管结电容测量值 C_p^1 为:

$$C_p^1 = \frac{|K_2|}{(1 + R_s G)^2 + K_2^2 \omega R_s^2} \quad (28)$$

根据 $U_Q = (1 + R_s G) U_{QC}$ 将式(16)变化为:

$$K_2 = \frac{dQ}{dU_c} \Big|_{U=U_{QC}} = (1 + R_s G) \frac{dQ}{dU} \Big|_{U=U_Q} \quad (29)$$

将式(9)、(11)、(12)、(29)代入式(28)得:

$$C_p^1 = - \left| \frac{\frac{di}{dU} \Big|_{U=U_0} - Q \frac{d\lambda_1}{dU} \Big|_{U=U_Q}}{\lambda + \lambda_1} \right| / \left\{ (1 + R_s G) \left[1 + \left(\frac{di}{dU} \Big|_{U=U_0} - Q \frac{d\lambda_1}{dU} \Big|_{U=U_Q} \right)^2 \omega^2 R_s^2 \right] \right\} \quad (30)$$

当 $\frac{di}{dU} \Big|_{U=U_0} - Q \frac{d\lambda_1}{dU} \Big|_{U=U_Q} < 0$ 时, 由式(30)可知: 当电压较高时, 由于发光复合的复合概率随电压的变化而急剧变化导致出现负电容现象, 发光复合与负电容现象有直接的因果关系。对于式(30), 由于分母中 ω^2 的影响, 负电容现象随角频率的增大而急剧减小, 这些都与实验结果完全符合。

4 结 论

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进行研究, 通过对复合发光机理和发光二极管 p-n 结进行分析, 得到了负电容现象与少数载流子发光复合概率关系的表达式。当发光二极管在较高的正向偏置电压作用下, $I-V$ 特性曲线的上升斜率较小; 少数载流子的积累达到平衡时较大; 少数载流子的单位时间发光复合的复合概率对正向偏置电压的变化率较大, 就会出现 $\frac{dQ}{dU} < 0$ 现象, 即负电容现象。

参 考 文 献:

[1] Sandoval F, 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 Liefeng, 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] Chen Yong, Feng Liefeng, Zhu Chuanyun, *et al.* Measurement and judgement on negative capacitance in leds [J]. *J. Hebei University of Technology* (河北工业大学学报), 2005, **34**(4):24-27 (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 Liefeng, 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 Yanliang, You Kaiming, Chen Leizun, *et al.* Analysis of the apparent capacitance extremum of GaN light-emitting diode [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2007, **28**(2):237-240 (in Chinese).

Relation of Negative Capacitance in LED to Emitting-recombination

TAN Yan-liang^{1,2}, YOU Kai-ming¹, YUAN Hong-zhi³

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

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

3. Hunan Tyen machine LPT. Co., Hengyang 421005, China)

Abstract: The measurements of forward current-voltage characteristic and forward capacitance-voltage characteristic are the most important methods to study the forward electricity characteristic of light-emitting diodes. Forward alternating current (ac) small signal method can be used to measure the capacitance-voltage characteristic of light-emitting diodes, and negative capacitance can be observed. By analyzing the responds of light-emitting diodes junction capacitance by the alternating current small signal method based on forward direct current, we found that the current phase of apparent capacitance is behind the phase of voltage $\frac{\pi}{2}$ when $\frac{dQ}{dU} < 0$, leading to apparent capacitance being negative capacitance in measurement. Additionally, the expression of the negative capacitance in LED related with the recombination emitting is firstly obtained. By analyzing the responds of variable capacitance to the alternating current small signal, we also found that the variable capacitance for the specific parameter can make the phase of current be behind the phase of voltage, leading to the negative capacitance in measurement. The result of theory analysis tallies with the experiment. It was found the negative capacitance is valuable for study the electrical characteristics of light-emitting diodes and valuable for the knowledge to improve the characteristic and parameter relevant the p-n junction internal structure of light-emitting diodes.

Key words: light-emitting diode; negative capacitance; forward alternating current (ac) small signal method; emitting-recombination

CLC number: TN312.8

PACS: 78.60.Fi

PACC: 7860F

Document code: A