

## GaN 发光二极管的负电容现象

沈 君<sup>1,2</sup>, 王存达<sup>1,2</sup>, 杨志坚<sup>3</sup>, 秦志新<sup>3</sup>, 童玉珍<sup>3</sup>, 张国义<sup>3</sup>, 李月霞<sup>2</sup>, 李国华<sup>2</sup>

(1. 天津大学 应用物理学系, 天津 300072; 2. 中国科学院半导体研究所半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083;

3. 北京大学 物理学系 人工微结构与介观物理国家重点实验室, 北京 100871)

**摘要:** 采用串联等效电路分析了较大正向电压下半导体二极管的交流电学特性, 由此可以同时测量结电容和串联电阻, 并能判断二极管是否有界面层。首次发现了在较低的测试频率和较大的正向电压下, GaN 二极管的结电容具有负值, 并且测试频率越低, 正向偏压越大, 负电容现象越显著。这种负电容效应可能与大正向电压下强注入造成的电子-空穴复合发光有关。

**关键词:** GaN; 发光二极管; 负电容

中图分类号: O472.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-7032(2000)04-0338-04

## 1 引 言

GaN 是一种新型的半导体材料, 由于它具有宽禁带、直接带隙的特点, 在短波长发光器件、高温大功率电子器件、高频微波器件等方面都有着十分广阔的应用前景。本文测量了 GaN p-n 结蓝色发光二极管在正向偏压下的结电容和电压的关系, 并考虑了串联电阻对测试结果的影响。由于结电容的变化与器件内部的物理过程有着直接关系, 所以对不同频率下的结电容与电压关系曲线的分析, 将有助于更详细地了解器件的结构和性能, 同时为改善器件制备工艺提供有用信息。

## 2 测量原理

一般情况下, p-n 结二极管可以看做是由结电容  $C$ 、结电导  $G$  和串联电阻  $R_s$  组成, 如图 1(a) 所示, 其中串联电阻与体电阻和接触电阻有关。在正向偏压下, 结电导主要是微分电导, 它可以由电流-电压( $I$ - $V$ ) 测量求得, 它随电流增加而增加; 而结电容由耗尽层电容和扩散电容组成, 它通常随测试频率和电压变化。

通常人们采用并联等效电路测量二极管的结电容<sup>[1]</sup>, 测试中忽略了二极管的串联电阻的影响, 此时测得的表观电容等于结电容。这种方法在反向偏压下通常能得到很好的近似, 但在正向

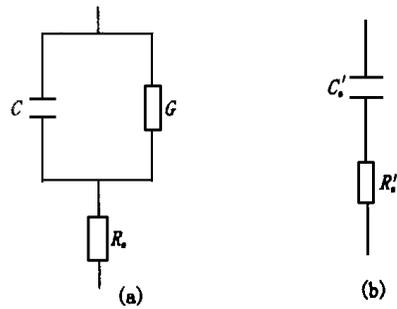


图 1 (a) 二极管的等效电路 (b) 串联模式的测量电路  
Fig. 1 (a) The equivalent circuit of a diode, (b) Serial measurement circuit.

偏压下会带来很大的测试误差。我们发现, 在正向偏压下采用如图 1(b) 所示的串联等效电路常常是更方便的, 其中  $R_s'$  为表观串联电阻,  $C_s'$  为表观电容。比较图 1(a) 和 1(b), 可以得到以下关系

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

$$C_s' = \frac{G^2 + (\omega C)^2}{\omega^2 C} \quad (2)$$

其中  $\omega$  是圆频率。在大正向偏压下, 当  $G \gg \omega C$  时, 方程(1) 可以简化为

$$R_s' = \frac{1}{G} + R_s \quad (3)$$

即表观电阻与频率无关。进而, 当  $1/G \ll R_s$  时, 有  $R_s' \cong R_s$ , 即表观电阻随偏压的增加而趋近于串联电阻。

收稿日期: 2000-01-28; 修订日期: 2000-06-26

基金项目: 本工作得到北京大学人工微结构与介观物理国家重点实验室和中科院半导体超晶格国家重点实验室的支持, 部分由国家自然科学基金资助(69789601; 69876002)。

作者简介: 沈 君(1973-), 男, 河北滦县人, 天津大学理学院材料物理与化学专业硕士研究生, 主要从事 GaN 半导体二极管电特性的研究。

由方程(1)和(2),可以推导出结电容的表达式为

$$C = \frac{G}{\omega^2 C_s' (R_s' - R_s)} \quad (4)$$

这样我们可以由(3)和(4)两式,分别测量串联电阻  $R_s$  和结电容  $C$ ,其中用到的微分电导  $G$  由电流-电压( $I-V$ )曲线求出。

若半导体二极管具有电阻较高的界面层(interfacial layer),则此二极管的等效电路不能再用图 1(a)表示,如仍采用图 1(b)所示的串联的测量电路,则表观电阻与频率有关,不能用(3)式表示。在这种情况下,界面层的电阻和电容往往具有非线性的特点,因此二极管的串联电阻也是非线性的<sup>[2]</sup>。

### 3 实验

使用上述方法,我们测量了 GaN 材料  $p-n^+$  结蓝色发光二极管在正向偏压下的交流特性。GaN 材料采用金属有机气相外延(MOVPE)方法生长,其中  $n$ -GaN 厚度为  $2.4\mu\text{m}$ ,载流子浓度为  $2.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ , $p$ -GaN 层厚度为  $0.5\mu\text{m}$ ,载流子浓度为  $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ,在  $800^\circ\text{C}$  的温度下退火激活。 $n$  电极采用了 Ti/Au 金属化方案,并在  $550^\circ\text{C}$  的温度下进行退火处理,退火时间为 10s。 $p$  电极采用了 Ni/Au 金属化方案,并在  $\text{N}_2$  氛围、 $500^\circ\text{C}$ (1# 样品)或  $450^\circ\text{C}$ (2# 样品)的温度下退火处理,退火时间为 3min。二极管的结面积为  $280\mu\text{m} \times 280\mu\text{m}$ 。

正向导纳电压测试使用的仪器为 HP4284A,采用串联模式的测量电路。测试时在直流偏压上叠加  $100\text{mV}$  的交流信号,频率从  $1\text{kHz}$  到  $1\text{MHz}$ 。电流-电压( $I-V$ )测试使用的仪器为 HP4140B。所有测试均在室温下进行。

### 4 结果

1# 样品的  $I-V$  曲线如图 2 所示,由此我们可以得到不同电压下的微分电导  $G$  值。

在  $1\text{kHz}$  的测试频率下,1# 样品的表观串联电阻和电容与电压的关系如图 3 所示。表观电阻在偏压为  $1.9\text{V}$  时出现极大值,对应着  $G = \omega C$  的情况。在较大的电压下,表观串联电阻与频率的关系渐趋一致,利用(3)式,可以求得其串联电阻值是一个基本与电压无关的常数,约为  $84\Omega$ 。对于  $n$ 型 GaN 肖特基二极管,我们曾发现,缺乏  $n^+$

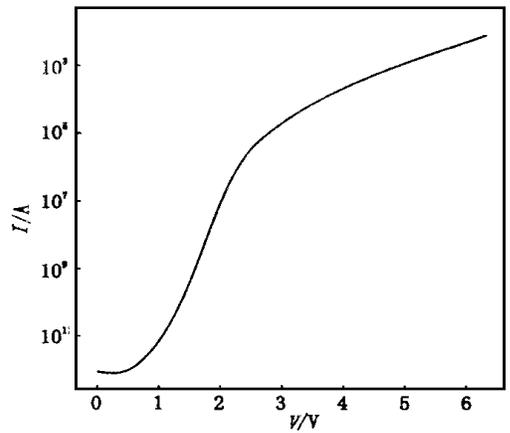


图 2 1# 样品电流与电压的关系

Fig. 2 Current-voltage curve of sample 1#.

层或完成欧姆接触后没有退火,均可以使金属-半导体接触处产生一个具有非线性电阻和电容的界面层,此时大正向电压下表观电阻与频率有关,串联电阻与电压有关。由本文的测量原理和对上述实验结果的比较,可以判断出本实验样品中没有明显的界面层,欧姆接触处的接触电阻基本上是线性的。

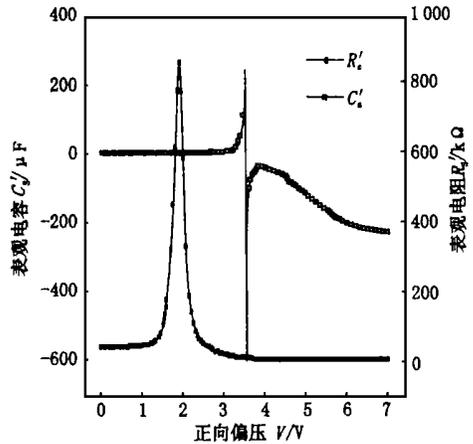


图 3 1# 样品表观电容和电阻与电压关系

Fig. 3 Apparent capacitance and resistance voltage curves of sample 1#.

由图 3 还可以看到,表观电容随着偏压的增大而增大,当偏压达到  $3.5\text{V}$  时,表观电容发生了突变,由正的极大值变成了负的极大值。随后,表观电容一直为负值,其绝对值随电压先减小、后增大。其它频率下的情况与此类似,只是随着测试频率的增大,表观电容的极值变小,且极值点对应的电压变大。当测试频率为  $1\text{MHz}$  时,在整个测试电压范围内,表观电容都没有出现负值,而是一直随电压的增大而增大。按照方程(4)计算的结电容与电压的关系如图 4 所示。从图中可以看

出,当测试频率为 1kHz 或 10kHz 时,结电容随着正向偏压的增大而由正值变成负值。而测试频率为 1MHz 时,结电容在整个正向偏压范围内总为正值。显然,测试频率越低, p-n 结的负电容现象越明显。

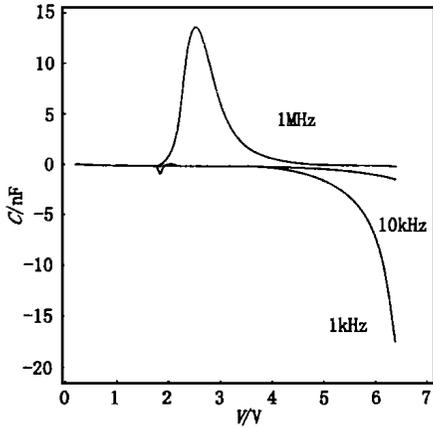


图 4 1# 样品结电容与电压的关系

Fig. 4 Junction capacitance-voltage curves of sample 1#.

图 5 给出了另一样品(2# 样品)不同频率下的结电容-电压关系曲线,这个样品的串联电阻约为 110Ω。即使在 1MHz 的测试频率下,2# 样品的结电容也出现了负值。当正向偏压为 7.5V 时,2# 样品在不同频率下的结电容分别为 -308.8nF (1kHz)、-2.81nF (100kHz) 和 -0.18nF (1MHz),即频率越低,结电容越大。

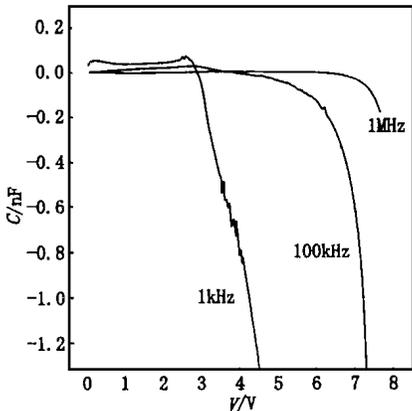


图 5 2# 样品的结电容与电压的关系

Fig. 5 Junction capacitance-voltage curves.

对于半导体 p-n 结的负电容现象,通常认为可能与高能级注入(如内部电场效应)或深能级陷阱的充放电效应有关<sup>[2]</sup>。此外,人们在金属-半导体肖特基二极管<sup>[3,4]</sup>、GaAs/AlGaAs 量子阱红外光检测器<sup>[5]</sup>和 GaAs 同质结远红外检测器<sup>[6]</sup>等电

子器件上也观察到了负电容现象,并提出了不同的解释。但是上述报道的负电容效应远没有这里观察到的这样强烈,因此上述文献中提到的机制都难以解释本文观察到的这样大的负电容效应。

实际上,我们在其它来源的 GaAs、GaInN 和 GaN 的 p-n 结发光管上也观察到了负电容现象,这些现象虽然在细节上彼此有所区别,但是其主要频率特性都是类似的,即频率越低,负电容现象越明显。我们还发现,负电容总是与较强的“出光”同步出现,二者有着明显的相关性。因此,我们推断 p-n 结发光管的负电容效应可能与在大的正向电压下强注入造成的电子-空穴复合发光有关,交流调制信号的频率越低,负电容响应越强,在这一点上很类似于深能级陷阱一些效应的频率特性,而人们确实在 Si 的 p-n 结二极管上看到有类似频率特性的深能级陷阱的负电容现象<sup>[2]</sup>,只不过它远没有我们看到的负电容效应强烈。若上述判断是正确的,无疑将为研究 p-n 结二极管的发光提供全新的实验手段,其价值是不言而喻的。

从我们的经验看,各种半导体器件的负电容效应是存在比较广泛的一类现象。但是由于过去人们对正向偏压结电容的测试比较缺乏信心,即使看到一些新现象也不能得到很好的解释。可以肯定的是,不同半导体器件的负电容现象具有不同的特点,对应着不同的内部输运机制,对他们的研究可能包含着丰富的物理内容,并有较大的实用价值。

## 5 结 论

由于串联电阻等因素的影响,过去通常采用的半导体二极管的正向偏压下的电容测试方法可能存在着较大的实验误差。本文采用串联等效电路分析了较大正向偏压下二极管的交流电学特性,由此可以同时测量结电容和串联电阻,并判断二极管是否有界面层。我们用上述方法测试了采用宽禁带半导体 GaN 材料制备的 p-n 结蓝光二极管的正向电压特性,首次发现,在较低的测试频率和较大的正向偏压下,结电容具有负值,测试频率越低,正向偏压越大,负电容现象越显著,并且负电容的出现与发光有明显的相关性。我们认为,这种负电容效应可能与在大正向电压下强注入造成的电子-空穴复合发光有关,这可能为研究半导体二极管的发光提供全新的实验手段。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] Goodman A M. Metal-semiconductor barrier height measurement by the differential capacitance method—one carrier system [ J ]. *J. Appl. Phys.*, 1963, **34**(2): 329-338.
- [ 2 ] Takashi Noguchi, Masanao Kitagawa, Ichiro Taniguchi. Negative capacitance of silicon diode with deep level traps [ J ]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1980, **19**(7): 1423-1424.
- [ 3 ] Wu X, Yang E S, Evans H L. Negative capacitance at metal-semiconductor interfaces [ J ]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(6): 2845-2848.
- [ 4 ] Champness C H, Clark W R. Anomalous inductive effect in selenium Schottky diodes [ J ]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(12): 1104-1106.
- [ 5 ] Ershov M, Liu H C, Li L, *et al.* Unusual capacitance behavior of quantum well infrared photodetectors [ J ]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(14): 1828-1830.
- [ 6 ] Perera A G U, Shen W Z, Shov M E, *et al.* Negative capacitance of GaAs homojunction far-infrared detectors [ J ]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(21): 3167-3169.

## Negative Capacitance Effect of GaN LEDs

SHEN Jun<sup>1,2</sup>, WANG Cun-da<sup>1,2</sup>, YANG Zhi-jian<sup>3</sup>, QIN Zhi-xin<sup>3</sup>,

TONG Yu-zhen<sup>3</sup>, ZHANG Guo-yi<sup>3</sup>, LI Yue-xia<sup>2</sup>, LI Guo-hua<sup>2</sup>

(1. Department of Applied Physics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. National Laboratory for Superlattices and Microstructures,

Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

3. State Key Lab for Mesoscopic Physics and Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** A new method based on the series equivalent circuit of a diode was introduced to characterize the semiconductor diodes, through which the electrical characteristics such as the series resistance, the junction capacitance at forward bias, and the interfacial layer resistance and capacitance can be evaluated. By using this method, the p-n junction blue light emitting diodes (LEDs) fabricated by the wide-gap GaN semiconductor material were measured and analyzed, and the negative capacitance effect (NCE) of the GaN p-n junction diodes was observed and reported firstly. The negative capacitance appears more noticeable with the lower frequencies and the larger forward bias. It is found that the negative capacitance effect is constantly accompanied by the diode lighting. This phenomenon is explained by considering the electron-hole recombination lighting under high injection with large forward bias. The research on negative capacitance will be valuable for the improvement of the design, fabrication and characterization of the GaN semiconductor LEDs.

**Key words:** GaN; LED; negative capacitance