

文章编号: 1001-3806(2011)05-0610-03

## 微波光电导衰减法测量 N 型 4H-SiC 少数载流子寿命

高冬美<sup>1</sup>, 陆绮荣<sup>2\*</sup>, 韦艳冰<sup>1</sup>, 黄彬<sup>1</sup>

(1. 桂林理工大学 机械与控制工程学院, 桂林 541004; 2. 桂林理工大学 现代教育中心, 桂林 541004)

**摘要:** 为了更好地了解 N 型 4H-SiC 的电学特性, 评价其晶体质量, 采用激光技术和微波光电导作为非接触、非破坏性测量半导体特性的一种工具, 描述了其测试原理和实验装置, 并讨论了不同的激发强度下, 其少数载流子寿命的变化。结果表明, 改变入射激光能量(即光子注入水平), 样品电压峰值与激发强度成正比, 对其载流子寿命几乎没有影响。该方法能方便快捷地测量载流子的寿命, 对 SiC 材料性能的研究具有重要意义。

**关键词:** 激光技术; 少数载流子寿命; 微波光电导; 4H-SiC; 注入水平

**中图分类号:** TN304.2      **文献标识码:** A      **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.05.010

## Minority carrier lifetime measurement for N-type 4H-SiC by means of the microwave photoconductivity decay method

GAO Dong-mei<sup>1</sup>, LU Qi-rong<sup>2</sup>, WEI Yan-bing<sup>1</sup>, HUANG Bin<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Control Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. The Center of Modern Education Technology, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** In order to understand the electrical property of N-type 4H-SiC better and evaluate its crystal quality, with laser technique and microwave photoconductivity measurement as a tool of the non-conductive and non-destructive characterization for semiconductors, the measurement principle was described and the experimental equipment was put forward. The dependence of the minority carrier lifetime on the excitation intensity was discussed. The results show that the changing of the laser pulse energy (i. e. the photon injection level) little affect the carrier lifetime of the specimen, its peak voltage is proportional to the excitation intensity. The method of carrier lifetime measurement is convenient and efficient and has a great significance for examination of the property of SiC material.

**Key words:** laser technique; minority carrier lifetime; microwave photoconductivity; 4H-SiC; injection level

### 引言

SiC 是 IV-IV 族二元化合物, 每个原子被 4 个异种原子所包围, 通过定向的强四面体  $SP^3$  键结合在一起, 具有强的共价键结构, 使它具有高的硬度、高熔解温度、高的化学稳定性和抗辐射能力。由于其突出的化学和热稳定性, 优良的热电导率和高击穿场, SiC 突破了以硅为基础的技术理论局限性, 已成为高功率微波器件和高压开关设备的重要物质基础。SiC 晶体结构具有同质多型的特点, 现在已经发现 SiC 的同质多型体约有 200 多种, 其中 3C-SiC, 6H-SiC 和 4H-SiC 是这种材料族中比较成熟的宽带隙半导体。由于 4H-SiC 的优良性能, 所以在所有的 SiC 多型体中, 4H-SiC 引

起了人们的广泛关注, 国外有不少文献中报道了对其性能的研究<sup>[1-3]</sup>。

由于少数载流子寿命是半导体材料和半导体器件的一个重要参量, 直接反映了材料的质量以及器件的特性是否符合要求。对于主要是依靠少数载流子输运(扩散为主)来工作的双极型半导体器件, 为了保证少数载流子在基区的复合尽量少(以获得很大的电流放大系数), 要求基区的少数载流子寿命越长越好。而对 IGBT 开关器件, 则寿命减少的直接效果是使器件拖尾延迟变小, 开关速度提高。目前国内对 SiC 材料和器件的研究正处于起步阶段, 因此, 准确测量 4H-SiC 的少数载流子寿命, 是评价其晶体质量的一个重要方法, 对半导体器件的研制也具有重要的意义。

为了测量少数载流子寿命, 近几十年来发展了数十种测量载流子寿命的方法。各种测量方法都包括了非平衡载流子的注入和检测两部分, 最常用的注入方法是光注入和电注入, 而检测非平衡载流子的方法很多, 不同的注入和检测方法的组合就形成了许多寿命测量方

基金项目: 广西省自然科学基金资助项目(0991253)

作者简介: 高冬美(1981-), 女, 硕士研究生, 现主要从事信号处理、自动测试系统的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: lqr@glite.edu.cn

收稿日期: 2010-09-28; 收到修改稿日期: 2010-10-18

法。目前,对于少数载流子寿命的测量常采用光电导衰减法、表面光电电压法、开路电压衰减法、时间分辨光致发光、瞬态自由载流子吸收法等。在众多测试方法中,光学技术是无损的、不需要制作电极等设备结构,使之对测试材料性能具有吸引力。因为其不仅能在现场使用,而且能避免接触式带来的影响,而接触式常常是不方便的。由于 SiC 的载流子寿命比较短(一般在  $10^{-7}$  s ~  $10^{-9}$  s),一些硅、锗中常用的方法已不适用。随着激光和微波技术的飞速发展,将激光作为光源应用在半导体材料测试中,使得载流子寿命的测试更加方便快捷,测试底限能达到纳秒级甚至更小。作者即采用微波光电导衰减法(microwave photoconductivity decay method,  $\mu$ -PCD)测试了 4H-SiC 的少数载流子寿命。

## 1 测试方法

### 1.1 理论基础

少数载流子寿命即 P 型半导体中的电子或者 N 型半导体中的空穴在导带停留的平均时间。处于热平衡状态的半导体,在一定温度下,载流子浓度是一定的。当半导体受外界(光或电)作用,热平衡状态被破坏,载流子浓度发生变化,产生非平衡载流子。外界作用消失后,非平衡载流子逐渐消失,也就是原来激发到导带的电子又回到价带,电子-空穴对又成对消失。直至最后,载流子浓度恢复到平衡时的值,半导体又回到了平衡状态。由于相对于非平衡多数载流子,非平衡少数载流子的影响处于主导、决定性的地位,因而非平衡载流子的寿命常称为少数载流子寿命。

由于半导体内的非平衡载流子浓度是按指数规律衰减,即  $\Delta p(t) = \Delta p_0 \exp(-t/\tau)$ ,所以非平衡载流子浓度减小到初始值的  $e^{-1}$  所经历的时间即为少数载流子寿命。如图 1 所示, $\tau$  即为少数载流子的寿命<sup>[4]</sup>。由于载流子浓度变化与半导体材料的电压变化成正比,一般地,为了方便测量,将测量载流子浓度转化为测量半导体材料的电压变化,这样将能更直观方便地把电压变化趋势通过示波器等实验器材显示。

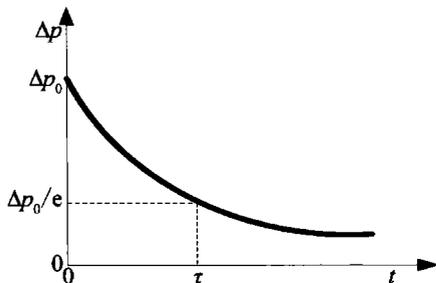


Fig. 1 Diagram of non-equilibrium carrier concentration decay

### 1.2 测试原理

$\mu$ -PCD 测试少数载流子寿命是在直流光电导衰

减、高频光电导衰减基础上发展而来的,原理与之相似。主要包括激光注入载流子和微波探测信号变化两个过程。用一束能量大于半导体禁带宽度的激光脉冲照射半导体,半导体中非平衡载流子会发生变化,产生过剩载流子。半导体中与微波场相关的过剩载流子,导致了吸收微波功率和相位的变化。因此,由过剩载流子决定的光电导,可以通过微波功率的变化或在光照下微波的相位移动与在黑暗中的情况对比来决定。相移检测对时间分辨测量相当不便,也会引起由于非指数过剩载流子弛豫的问题<sup>[5]</sup>。因此,一般通过透射和反射测量微波功率的变化,优先考虑吸收微波功率的监测。因为微波反射信号不易受样品形状和尺寸的影响,所以,通过监测由光照引起的反射功率的变化来进行测量方便可行。

由于产生的过剩载流子使样品的电导发生变化,而入射微波的反射率是材料电导的函数,即反射微波的能量变化也反映了过剩载流子浓度的变化。当一束脉冲光与一高频电磁波(微波)同时辐射到半导体样品上时,样品的电导率变化会影响被测微波场。测量微波的入射波和反射波的功率变化,即可测定样品电导率的变化<sup>[6]</sup>。当光照结束后,随着过剩载流子的逐渐衰减,微波的反射也越来越弱;通过分析反射微波曲线的指数因子,可求得测试样品中的有效少数子寿命。

### 1.3 测试设备

微波光电导技术是通过测试从样品表面发射的微波功率随时间变化曲线来记录光电导的衰减,其测试系统示意图如图 2 所示。

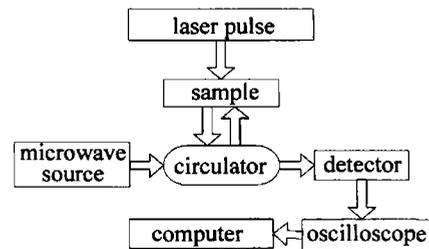


Fig. 2 Test system diagram of microwave photoconductivity decay method

系统包括激光脉冲光源、微波源(10GHz 的 Gunn 二极管)、环形器(将微波反射功率从入射的微波功率中分离)以及一个检测器和显示装置。YAG 激光抽运源作为样品的注入光源,可在半导体材料中激发过剩载流子,改变样品的导电性;微波源给出探测信号,检测半导体材料的光电导,微波经样品反射后进入检测器。微波反射探测器检测是通过波导环行连接,微波反射强度转换为电信号,以便在示波器输出电压的变化曲线。

在微波经过充满空气的波导管传输到探测器的过程中,相对小的功率损失不会影响反射功率的变化。假设当样品电导率从  $\sigma$  变化到  $\sigma + \Delta\sigma$  时,微波反射信

号将改变  $\Delta P$ 。则:

$$\frac{\Delta P}{P_{in}} = \frac{P(\sigma + \Delta\sigma) - P(\sigma)}{P_{in}} = \frac{R(\sigma + \Delta\sigma) - R(\sigma)}{P_{in}} \quad (1)$$

式中,  $P_{in}$  是微波入射强度,  $P(\sigma)$  是微波反射强度,  $R(\sigma)$  是反射率。

在电导率变化量很小的情况下, (1) 式可以用泰勒级数展开式表示, 即:

$$\frac{\Delta P}{P_{in}} = \left[ \frac{\delta R(\sigma)}{\delta\sigma} \right]_{\sigma} \Delta\sigma \quad (2)$$

在实验中, 由于测量微波反射信号的强度相对方便, 则上式可转变为:

$$\frac{\Delta P}{P(\sigma)} = A\Delta\sigma \quad (3)$$

一般在测试时, 输出信号是电压变化量而不是微波反射率的变化量, 而电压  $V$  与微波反射信号的关系式为<sup>[4]</sup>:

$$P = \text{const}V^n \quad (4)$$

因此, 当微波信号发生微小变化时, 将导致输出电压产生微小变化  $\Delta V$ , 两者是线性关系, 即:

$$\Delta P/P = n(\Delta V/V) \quad (5)$$

这样就可以通过电压变化趋势来间接反映少数载流子变化趋势<sup>[4]</sup>。

### 2 实验与结果讨论

实验中, 10GHz 的 Gunn 二极管作为微波源, 其探测功率为 10mW; 波长为 355nm 的 YAG 激光器作为激发光源; 样品为 1cm<sup>2</sup> 的 N 型 4H-SiC 晶圆。先用脉冲

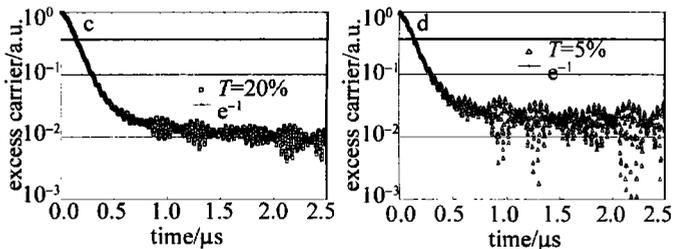
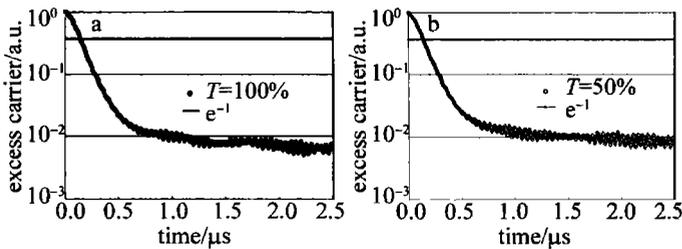


Fig. 4 The excess carrier decay curves for different excitation intensity

50%, 20% 和 5% 时, 其载流子浓度的衰减趋势。在图 4 中纵坐标采用了归一化处理, 将电压幅值最大时的非平衡载流子浓度设定为 1, 其余各时间浓度相对最高点的比率依次落在 0 ~ 1 区间。在较低的载流子浓度区域, 随着激光强度的减小, 缓慢衰减的尾巴越突出, 这可能是由于少数载流子被材料中的陷阱俘获。随着注入水平的增加, 缓慢衰减部分在一定载流子浓度时达到饱和。载流子的缓慢衰减可能会影响带间的载流子释放, 而不是实际寿命<sup>[7]</sup>。因此, 会得到如表 1 所示的实验结果。

激光来激发样品中的少数载流子, 当光激发快速停止时, 载流子开始复合, 其浓度呈指数衰减。

利用 ND 滤光片对入射激光能量进行调制, 使入射光透过率  $T$  分别为 100%, 50%, 20%, 5%, 从而控制了入射激光的强度。不同激发强度下, 载流子寿命测试结果列于表 1 中, 样品上电压衰减趋势如图 3 所示。通过实验数据可以明显看出: 在小注入条件下, 激发强度(即注入光子数量)对载流子寿命几乎没有影响; 随着入射激光的不断增强, 样品上电压峰值不断增大, 样品上电压变化与激发强度成正比。

Table 1 The carrier lifetime of the different excitation intensity

No.	transmittance of laser pulse/%	carrier lifetime/ $\mu$ s
1	100	0.14
2	50	0.138
3	20	0.137
4	5	0.138

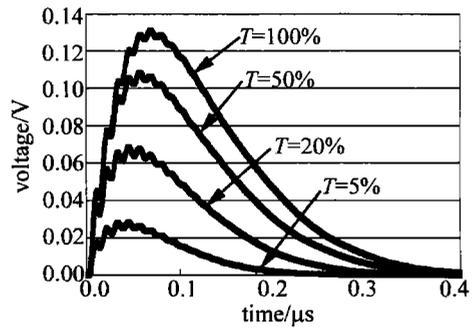


Fig. 3 Voltage decay curves for the different excitation intensity

图 4a ~ 图 4d 为入射激光透过率  $T$  分别为 100%,

### 3 结论

详细说明了用微波反射光电导衰减法测量 4H-SiC 材料中少数载流子寿命的原理。通过应用  $\mu$ -PCD 系统实际测量晶圆中的少数载流子寿命, 说明  $\mu$ -PCD 能达到无接触、非破坏、快速准确地测量非平衡载流子寿命的目的, 是一种简便实用的新方法, 对 SiC 材料和器件的性能研究具有重要的意义。

但是在一些文献中, 测量寿命的差异并不少见, 甚至对同一样品不同测量方法可产生不同的结果, 这源于测量技术和实验条件的差异, 如掺杂水平、温度、表

(下转第 631 页)

可见,在有效区域内,换热面温度分布均匀,温差在 1K 以内,温度升高在 8K 以内。

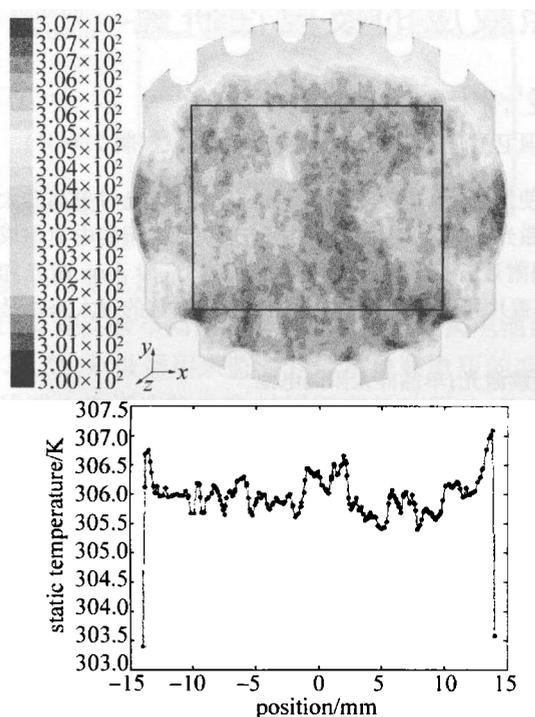


Fig. 4 Temperature distribution on the heat exchange surface

### 3 结论

对大口径端面冷却片状固体激光器的水冷结构进行了设计和数值模拟,数值模拟结果表明,该结构可以得到均匀的传热系数分布和温度分布,传热系数达到  $1.8 \times 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,介质表面温差在 1K 以内,换热效果良好,可用于高功率端面冷却激光器。

(上接第 612 页)

面状况的不同。不同的测量技术经常对不同的物理参量很敏感,从而导致了不同的测量结果。注入水平和温度的变化可以显著影响载流子动力,进而影响载流子寿命<sup>[8-10]</sup>。本文中只研究了室温下、激发强度不同时,4H-SiC 晶圆中少数载流子的寿命,没有涉及到不同温度及掺杂水平下载流子寿命的变化,这将是以后研究的重点。

#### 参考文献

- [1] GALECKAS A, LINNROS J, FRISCHHOLZ M, *et al.* Investigation of surface recombination and carrier lifetime in 4H/6H-SiC[J]. *Materials Science and Engineering*, 1999, B61/62: 239-243.
- [2] GALECKAS A, LINNROS J, LINDSTEDT M. Characterization of carrier lifetime and diffusivity in 4H-SiC using time-resolved imaging spectroscopy of electroluminescence[J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, B102(1/3): 304-307.
- [3] MASASHI K, MASAHIKO K, TATSUHIRO M, *et al.* Excess carrier lifetime in a bulk P-type 4H-SiC wafer measured by the microwave

#### 参考文献

- [1] SIEBOLD M, HEIN J, WANDT C, *et al.* High-energy, diodepumped nanosecond Yb:YAG MOPA system[J]. *Optics Express*, 2008, 16(6):3674-3679.
- [2] ARMSTRONG J P, BAYRAMIAN A J, CAMPBELL R W, *et al.* High energy hybrid fiber-Yb:SFAP laser with dynamic spectral and temporal pulse shaping[C]//The Conference on Laser and Electro-Optics/The Quantum Electronics and Laser Science. San Jose, USA: OSA, 2008: CThFF5 1-2.
- [3] YAO Zh Y, JIANG J F, TU B, *et al.* 1.5kW laser diode-pumped Nd:YAG disk laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(1): 35-38 (in Chinese).
- [4] YU H W, XU M J, DUAN W T, *et al.* Research progress of laser drivers for inertial fusion energy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006(9): 55-62 (in Chinese).
- [5] BAYRAMIAN A. Mercury project/Petawatt update[EB/OL]. (2009-06-16) [2009-11-06]. [http://www.Hzdr.de/db/Cms? pNid = \\* &pOid = 29542](http://www.Hzdr.de/db/Cms? pNid = * &pOid = 29542).
- [6] CHATAIN D, PERIN J P. A cryo-loop for polaris crystal amplifier [EB/OL]. (2009-06-16) [2009-11-06]. [http://www.Hzdr.de/db/Cms? pNid = \\* &pOid = 29573](http://www.Hzdr.de/db/Cms? pNid = * &pOid = 29573).
- [7] ERTEL K, HERNANDEZ-GOMEZ C, MUSGRAVE L, *et al.* Concept for a kJ-class DPSSL amplifier[EB/OL]. (2009-06-16) [2009-11-06]. [http://www.Hzdr.de/db/Cms? pNid = \\* &pOid = 29568](http://www.Hzdr.de/db/Cms? pNid = * &pOid = 29568).
- [8] BOURDET G L, YU H W. Longitudinal temperature distribution in an end-pumped solid-state amplifier medium: application to a high average power diode pumped Yb:YAG thin disk amplifier[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(23): 6033-6041.
- [9] BAHBAH S, ALBACH D, CHANTELOUP J C, *et al.* Gain & thermal distortion investigation on the Yb:YAG diode pumped Lucia oscillator[C]//The Conference on Lasers and Electro-Optics/The Quantum Electronics and Laser Science. San Jose, USA: OSA, 2008: CFQ3 1-2.
- [10] DUAN W T, JIANG X Y, JIANG D B, *et al.* 10Hz joule-class laser diode end-pumped V-shape water-cooled Yb:YAG oscillator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(1): 44-48 (in Chinese).

photoconductivity decay method[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, 46(8A): 5057-5061.

- [4] YANG D R. Testing and analysis of semiconductor materials[M]. Beijing: Science Press, 2010: 60-74 (in Chinese).
- [5] CITARELLA G, VON AICHBERGER S, KUNST M. Microwave photoconductivity techniques for the characterization of semiconductors[J]. *Materials Science and Engineering*, 2002, B91/92: 224-228.
- [6] LIU Zh C. Measurement of the minority carrier lifetime in HgCdTe by the microwave photoconductivity decay method[J]. *Nondestructive Testing*, 2004, 26(1): 28-29 (in Chinese).
- [7] GRIVICKS P, GALECKAS A, LINNROS J, *et al.* Carrier lifetime investigation in 4H-SiC grown by CVD and sublimation epitaxy[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2001, 4(1/3): 191-194.
- [8] ZHANG J, STORASTA L, BERGMAN J P, *et al.* Electrically active defects in N-type 4H-silicon carbide grown in a vertical hot-wall reactor[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(8): 4708-4714.
- [9] KLEIN P B. Carrier lifetime measurement in N-4H-SiC epilayers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(3): 033702/1-033702/14.
- [10] KLEIN P B, SHANABROOK B V, HUH S W, *et al.* Lifetime limiting defects in 4H-SiC[J]. *Materials Science and Technology*, 2008, 3: 173-174.