

用电发光法测量碳化硅少数载流子寿命的若干问题^{*†}

虞孝栋 吴道怀 唐福娣 谭浩然

(中国科学院)

提 要

本文介绍一种测量碳化硅半导体少数载流子寿命的方法,叙述有关的原理和测试设备,并就对测试结果有极大影响的谐振干扰、点接触的电学性质和电发光特性等问题进行了试验。提出了若干可以避免谐振干扰、防止触点旁路并控制整流比的有效措施。推荐采用焊锡方法制备低阻接触。指出,为了保证实验结果的可靠性,测试前必须了解样品的发光特性。采用这种方法测定了若干碳化硅单晶的少数载流子寿命,测得值一般低于 4.2×10^{-9} 秒。

一、引 言

根据文献报导,已测得的室温下碳化硅少数载流子寿命的最高值为 10^{-5} 秒^[1],最低值在 10^{-10} 秒以下^[2],一般在 10^{-8} — 10^{-9} 秒范围。这样短的寿命,显然不能采用硅、锗中常用的方法加以测量。对于 III—V 族短寿命半导体,光磁效应法已得到广泛应用,但在碳化硅,迄今为止尚未能观察到光磁效应。因此,为了测定碳化硅中的少数载流子寿命,提出了电发光衰减法^[3]、X射线脉冲法^[2]、饱和电流法^[1,4]等。这些方法,或则设备复杂,或则根据其他材料参数进行计算,可靠性较差。

1961年 Harman 等^[5]提出了一种利用碳化硅点接触注入发光强度对频率的依赖关系,测定少数载流子寿命的方法。稍后,Холуянов^[6]应用此法测得了碳化硅的少数载流子寿命值,与电发光衰减法测得的结果符合。1963年 Ковтонок 从理论上进一步分析了半导体中注入发光及有关现象的频率依赖关系^[7],并采用同样的方法测得了掺铜的硫化锌中非平衡电子的寿命,与其他方法测得的结果一致^[8]。与其他方法比较,此法设备简单,样品无须加工成特定形状,样品表面不必严格处理,测试手续简便,不需要其他材料参数,适合于类似碳化硅的半导体的短寿命测量。另一方面,由于测量是在超高频范围内进行,且涉及样品的电发光特性,因而设备的频率特性、点接触的电学性质和发光特性,均对测试结果有极其重要的影响。可是,在有关的文献中,这些因素都没有得到足够的重视,至于碳化硅点接触的发光特性的影响,则更完全被忽略。因此,在建立这一方法的过程中,我们对上述的重要因素进行了试验。本文介绍方法的原理、测试设备和试验结果。

* 1966年1月26日收到。

† 本文曾在1965年4月第三届全国半导体学术会议上宣读过。

二、原理和测试设备

当在金属-半导体点接触上施加正弦电压时,在正半周期间,少数载流子通过阻挡层注入到半导体内,其中一部分在触点附近辐射复合,产生电发光输出;负半周时,尚未复合的少数载流子被反向电场扫回原注入电极上。这种等幅正半波的注入发光现象,一直保持到所施加的正弦波电压的频率 f 提高到接近 $1/\tau$ 秒为止 (τ 为少数载流子寿命值)。此时,被注入的少数载流子在正半周中来不及复合,就被负半周的反向电场扫回,电发光输出于是急转直下。Harman 等^[5]根据一维系统泡型 (bubble type) 粒子的注入和扫出的简单模型进行了分析,确定电发光强度下降至峰值的 34% 时的频率倒数为寿命值。

测试装置方框图如图 1。使用 RFT 2002 型超高频功率发生器作电源,其频率范围为 20—240 兆周,最高输出电压 6—9 伏。样品电压以 DYC5 型超高频电压表测量。从点接触发出的光用 M12 FQS35 型光电倍增管测定,其输出表示相对发光亮度,由 MG-4 型和 1070 D 型检流计读出。

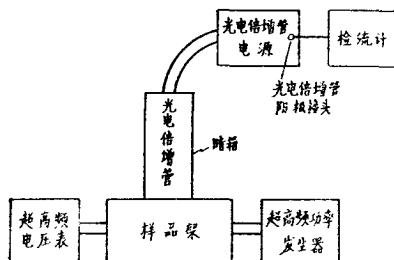


图 1 测试设备方框图

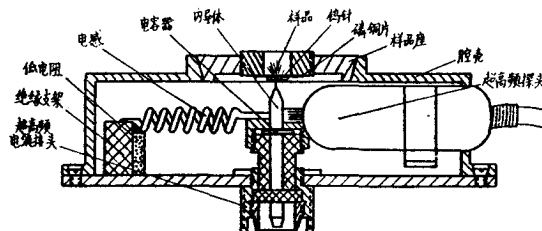


图 2 样品架结构示意图

样品架的结构如图 2。由于须在超高频条件下工作,因此须慎重考虑元件安排的轴对称性、高频接触、屏蔽、迴路和腔体自身的谐振等问题。为了防止杂散电容过大,电压表检波头与样品保持约 1.5 厘米的距离。腔体高度必须远远小于在最高频段工作时所产生的驻波波长的 $1/4$ 。

样品经清洁处理后用钢焊在磷铜片上,然后装到样品架上,与钨针构成整流比较差的接触。

当负载与传输线阻抗不匹配时传输线上的电压、电流即按驻波分布。为了避免由此产生的电压测量误差,我们把发生器至负载的距离缩短到 $1/4$ 波长以下。

三、谐振对发光亮度-频率曲线的影响

在使用发生器原附有的电缆测量碳化硅注入发光亮度的频率响应曲线 ($B-f$ 曲线) 时,测得曲线上波动、波动幅度和宽度视样品阻抗而定。进一步发现点接触附近空间场检波电流的频率响应曲线与 $B-f$ 曲线的峰谷对应。由此判断,波动是由于测试迴路在不同频率上产生串联和并联谐振,从而造成注入电流和发光亮度的波动所致。

为了消除谐振干扰,我们采取了如下的措施: (1)使样品架直接与发生器连接,取消电缆; (2)把样品架中的部件重新安排,使分布电容减少至 10 微微法左右; (3)在样品架内导体上串联一个 12000 微微法的薄片电容,再并联一个约 2 微亨的电感(图 3)。这种补偿

电路可以把谐振频率移至低频波段,而对超高频传输并不发生影响。经过这些改进, $B-f$ 曲线就比较平稳,在 30—220 兆周范围内波动小于 3 分贝。

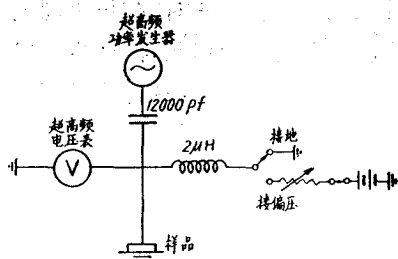


图3 补偿电路原理图

四、接触电学性质的影响与整流比控制试验

为使电压表读数能反映点接触电压,基底欧姆接触应具有尽可能低的接触电阻。对点接触,则要求电容小,整流比低(2:1或更低),以便保证沿阻流方向施加电压时,少数载流子能为电场扫出。

1. 基底接触的选择

从非破坏性测试需要出发,选用了化学镀镍^[9]、真空蒸发钨与焊锡三种接触制备方法,在电阻率分别为 1.47 欧姆·厘米、 2.7×10^{-1} 欧姆·厘米和 5.4×10^{-2} 欧姆·厘米的 n 型碳化硅晶片上进行比较试验。每一晶体经氢氟酸处理后,在其两个 c 面上分别制备三种金属接触,测其接触电阻和伏-安特性。结果表明,钨接触具有最低的接触电阻。对于电阻率在 1 欧姆·厘米以下的样品,焊锡层牢固,性能稳定,接触电阻只数十欧姆,伏-安特性近于线性。

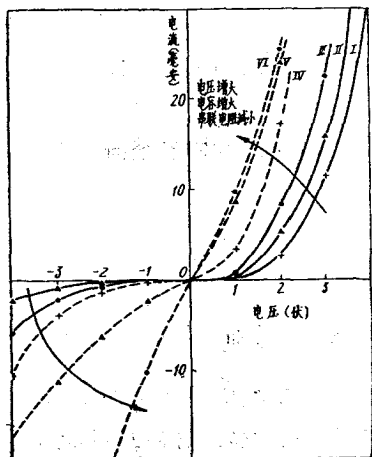


图4 治成条件对点接触伏-安特性的影响

I——治成前； II——50 伏, 0.5 微法, 700 欧姆； III——250 伏, 0.5 微法, 700 欧姆； IV——150 伏, 10 微法, 200 欧姆； V——200 伏, 10 微法, 200 欧姆； VI——250 伏, 32 微法, 200 欧姆。

2. 整流比控制试验^[10]

为寻求控制碳化硅-金属点接触整流比的有效措施,我们以电阻率不同的 n 型晶体,研究了触针材料(钨、磷铜、铍青铜、钨丝上蒸发钨等)、触点面积(触点直径 24、97 和 198 微米)、接触压力(加压 0—5 克)和治成条件对整流比的影响。

实验得出,随着触点面积和接触压力的增大,整流比减小,结果与锗、硅点接触情况相似^[11],相形之下,触针材料的影响则可忽略不计。在治成条件试验中(图4),随着治成电压和治成电容增大以及串联电阻减小,整流比下降,但治成效果则与治成方向和触针材料无关,这是与锗、硅的结果不同的^[11,12]。其原因,可能是杂质在碳化硅中的扩散系数相当小,在治成条件下还不足以引起扩散。

3. 触点电容旁路效应

测量过程中发现,当触点直径小于 100 微米时,接

触面积的改变不致影响 $B-f$ 曲线的形状, 但当触点直径增大至 200 微米左右时, 即使电压表读数保持恒定, 发光亮度从一开始就急剧下降, 改小接触面积, $B-f$ 曲线又趋于平稳 (图 5)。对接触电阻高的样品, 这种效应尤其显著。这一现象可用触点电容旁路效应加以解释。

五、点接触发光特性的影响

本方法以少数载流子注入复合发光作为基本前提, 但如所周知, 碳化硅接触不仅具有正向发光的特性, 而且在反向低电压下亦会发光。一般认为反向发光属于碰撞电离机理, 本质上非少数载流子注入复合效应。因此, 在用本方法进行寿命测量前必须肯定点接触的发光是正向发光。这一点, 在所有关于此法的文献中都被忽视了。

考虑到上述的情况, 我们对碳化硅点接触的发光特性进行了试验, 观测了在直流偏压下正、反向的电压-电流-发光亮度的关系。获得的结果可归纳为以下几点:

1. 绝大部分样品在正向偏压或反向偏压下均发光。正向发光一般发生于 2—4 伏之间, 发光初始电流自数毫安至数十毫安不等, 光点位于触点下面。发光颜色有橙、黄、绿、蓝绿等, 视样品而异, 并随电压上升而逐渐转为蓝白色。这就是 Lossev^[13] 所称的第 II 类发光。反向发光一般发生于 4—6 伏间, 亦有低至 3 伏左右即发光者, 光点亦位于触点下面, 呈蓝绿色。反向发光亦称作第 I 类发光^[13]。

还发现, 在发光亮度可测量的相同偏压下, 反向发光亮度超过正向发光亮度的样品占有相当可观的比例, 且随生长工艺条件不同这一比例有较大的差异。例如, 在初步统计的 67 个工业晶体中, 相同偏压下反向发光亮度大于正向发光亮度的有 57 个, 占 85%。但在

13 个实验室生长的单晶中, 反向发光较大的仅 5 个, 占 38%。

2. 正向发光的亮度-电流关系, 除初始部分以外呈线性 (图 6), 这与 Lehovec 等^[14]报导的碳化硅少数载流子注入复合发光的特性一致。对于不同的样品或同一样品上的不同触点, 尽管发光的初始电流和亮度-电流曲线的斜率相差悬殊, 这一关系总是成立的。

3. 反向发光以对数坐标表示的亮度 ($\lg B$) 与电压平方根的倒数 ($V^{-1/2}$) 成直线 (图 7)。这与 Zalm 等^[15]根据碰撞电离机理导出的, 得到广泛采纳的公式

$$B = a \exp\left(-\frac{b}{\sqrt{V}}\right)$$

相符合, 其中 a, b 为常数。在超高频情况下, a 值视样品和触点而异, 同一触点但频率不同时 b 值也有差

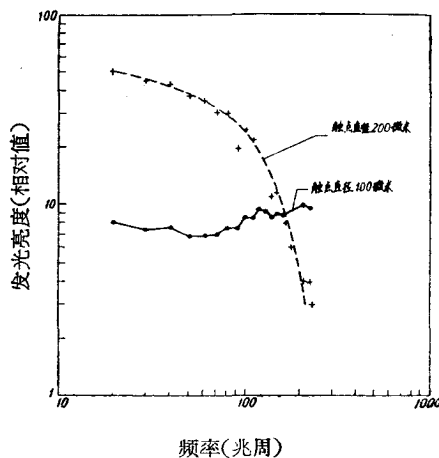


图 5 接触面积过大引起的 $B-f$ 曲线下降

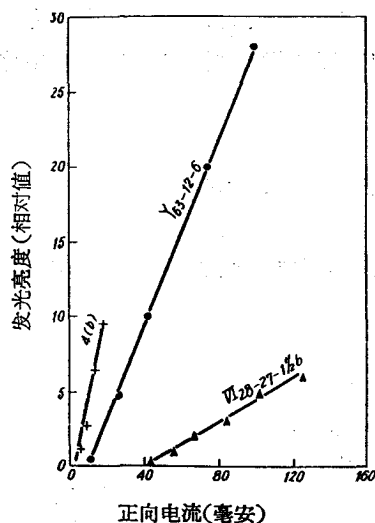


图 6 直流下正向发光的亮度-电流关系

异。

4. 在相同的直流偏压下,反向发光远远超过正向发光的样品,其亮度-频率曲线一般平稳。

由此可见,碳化硅的反向发光是常见的现象,其亮度甚至往往超过正向发光亮度,如果在测试前不首先加以区分,就会与正向发光混淆,以致造成测试上的错误。

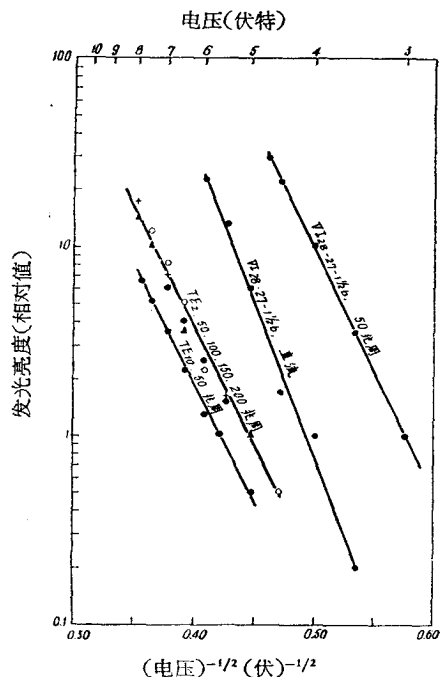


图7 直流和超高频下反向发光的亮度-电压关系

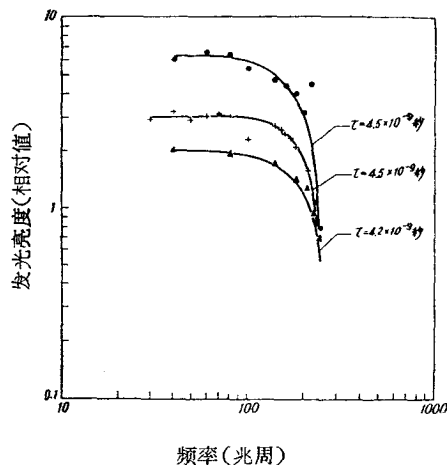


图8 n 型碳化硅单晶 $E_{64-10-12}$ 不同触针位置的亮度-频率曲线(箭头示出强度为最大值的34%时的寿命;测量电压保持6.6伏)

六、碳化硅少数载流子寿命测定

在上述试验的基础上,用电发光法对来源不同的碳化硅单晶进行了少数载流子寿命测量。由于在直流偏压下反向发光亮度不可忽略的样品占有相当大的比例,使这一方法的应用受到了限制。虽然如此,对于正向发光亮度远远超过反向发光亮度的样品,利用这种方法可以简便地根据 $B-f$ 曲线求得少数载流子寿命。从已测定的样品来看,大多数 n 型碳化硅单晶样品的 $B-f$ 曲线在所测量的频率范围内(30—240 兆周)不下降,这表明少数载流子寿命低于 4.2×10^{-9} 秒。图8示出一少数载流子寿命较高的 n 型单晶测试结果的三条 $B-f$ 曲线分别表示在同一晶片的三个不同触针位置上的测得值;其平均值为 $(4.4 \pm 0.1) \times 10^{-9}$ 秒,相对偏离不到3%。这说明电发光法测定结果的重复性是相当令人满意的。

参 考 文 献

- [1] Patrick, L., Choyke, W. J., Silicon Carbide (Pergamon Press, 1960), 281.
- [2] Van der Does de Bye J. A. W., Philips Res. Repts., 17 (1962), 419.
- [3] Eriksen, W. T., Silicon Carbide (Pergamon Press, 1960), 376.
- [4] Greebe, C. A. A. J., et al., Philips Res. Repts., 15 (1960), 120.
- [5] Harman, G. G., Raybold, R. L., J. Appl. Phys., 32 (1961), 1168.

- [6] Холуянов, Т. Ф., *ФТТ*, **4** (1962), 3170.
- [7] Ковтонюк, Н. Ф., *Оптика и Спектроскопия*, Сборник Статей I, Люминесценция (Изд. АН СССР, 1963), 347.
- [8] Ковтонюк, Н. Ф., *Оптика и Спектроскопия*, **15** (1963), 716.
- [9] 用化学还原法在碳化硅上镀制镍和银接触 (中国科学院硅酸盐化学与工学研究所, 1963).
- [10] 影响 SiC-金属点接触整流比的若干因素 (中国科学院硅酸盐化学与工学研究所, 1965).
- [11] Henisch, H. K., Rectifying Semiconductor Contact (1957), 137.
- [12] Bridgers, H. E., Scaff, J. H., Shive, J. N., *Transistor Technology*, Vol. I (1958), 407.
- [13] Lossew, O. W., *Phil. Mag.*, **6** (1928), 1028.
- [14] Lehovec, K. A., Accardo, C. A., Jamgochian, E., *Phys. Rev.*, **83** (1951), 603.
- [15] Zalm, P., *Philips Res. Repts.*, **11** (1956), 353.

MINORITY CARRIER LIFETIME IN SILICON CARBIDE BY THE ELECTROLUMINESCENCE METHOD

YUI SHOU-DUNG, WOO DAU-WEI, TON FU-DI, TAM HOA-YEN

(*Academia Sinica*)

ABSTRACT

A method for measuring the minority carrier lifetime in silicon carbide semiconductor by the injection electroluminescence at point contacts is presented. The principles involved and measuring equipment used are described. Experiments on some important factors, such as resonance disturbance, electrical properties and electroluminescence characteristics of the point contacts, have been performed. Some feasible precautions that must be taken in order to avoid resonance disturbance and contact by-passing and to control rectification ratios are described. It is shown that in order to ensure reliability of experimental results, a knowledge of the electroluminescence characteristics of the samples should be required before measuring. By means of this method, the minority carrier lifetimes for some silicon carbide single crystals have been measured, and for most crystals these values are found to be smaller than 4.2×10^{-9} sec.