

半导体闪络引起的材料表面破坏现象研究*

赵文彬[†] 张冠军 严 璋

(西安交通大学电气工程学院 电力设备电气绝缘国家重点实验室 西安 710049)

(2007 年 9 月 11 日收到 2008 年 3 月 6 日收到修改稿)

长期以来,沿半导体表面的闪络现象使得很多高功率半导体器件只能工作在相对较低的电场下,限制了它们的发展,而目前对半导体闪络的物理机理尚不明确.开展了冲击高压下 Si 及 GaAs 半导体的表面闪络实验,通过红外摄影观察到闪络过程中半导体表面存在的细丝状电流通道,且发现电极中央区域会出现明显红外辐射集中点.在闪络后的材料表面可以观察到细丝状破坏现象,其中在破坏后的 n100 型 Si 材料表面的细丝通道周围发现了凹坑形结构,凹坑中心存在圆锥状突起.结合电极边缘细丝状的破坏现象,讨论了电极边缘的热注入和内部多数载流子的弛豫特性,提出少子引导的注入模型,强调非平衡载流子通道引起的表面电场增强效应可引起外部气体电离形成电离通道.该模型可很好解释观测到的实验现象.

关键词:半导体,表面闪络,细丝电流,表面破坏

PACC: 5280, 6845

1. 引 言

近些年来,光导半导体开关(PCSS)以其功率大、开关速度快、分散性小和寿命长等优点正逐步在脉冲功率领域得到应用.常规的气体火花开关和闸流管只能工作在 10^3 Hz 的频率条件下,而 PCSS 可以用在 10^6 — 10^9 Hz 及以上的频率范围^[1-4].常用的光导半导体材料有 Ge, Si, GaAs, InP 和 SiC 等,PCSS 的工作原理如图 1 所示.

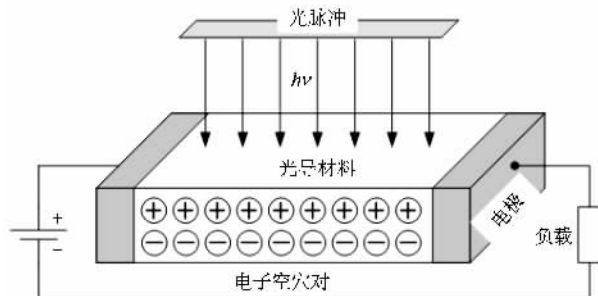


图 1 PCSS 的工作原理示意图

半导体材料在脉冲激光的照射下,发生光致非

平衡载流子的注入现象,由于不同材料的能带结构及对光的吸收不同,使用的激光波长也不尽相同.受到激光照射后,光导材料受光面在一定深度范围内将迅速产生大量电子空穴对,半导体变为导电状态,由于这些光生载流子的产生过程极快,且载流子浓度较大,所以开关速率较快,并可以承担较大的电流.当撤去施加的激光后,电子空穴对迅速复合,半导体导电特性消失.在开关处于导通状态时,载流子充满整个光导材料中,处于一种整体导电状况,所以开关表现出的电感很小.

我国研究者对于 PCSS 研究的最早文献见于 20 世纪 80 年代初^[5],中国科学院上海光学精密机械研究所的研究小组制成了 Si 基的光导开关,能够形成 10^3 V 的皮秒级脉冲.此后,西安交通大学的研究人员也开发成功了半绝缘 GaAs 光导开关^[6,7].虽然 PCSS 有良好的开关性能,但当其工作在较高场强条件下时往往容易在表面上发生闪络放电现象,导致开关的损坏,即使采用了表面钝化和硅橡胶封装的工艺仍然无法完全避免表面闪络现象的发生^[8,9].由于半导体表面闪络现象的存在,使得 PCSS 的工作场强远小于光导材料的本征击穿场强,这极大地限制了 PCSS 在高电压、大功率领域的发展.最近的 20

* 国家自然科学基金(批准号 50107008)教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号:NCET-04-0943)和西安交通大学博士学位论文基金(批准号:DFXJTU2004-03)资助的课题.

[†] E-mail: wenbinz@mailst.xjtu.edu.cn

年,半导体表面闪络现象已成为国际上的一个研究热点,然而时至今日对其内在物理机理还不是很清楚,在实际应用中闪络问题仍然是影响 PCSS 器件性能和寿命的主要因素之一^[10-14]。

本课题组在近期研究中通过实验确定了在半导体闪络过程中存在气体解吸附现象,并讨论了半导体闪络的三阶段现象和丝状电流热效应^[15-17]。本文将从半导体表面的红外分析和表面破坏入手,详细讨论丝状电流的注入和发展过程及其对半导体表面闪络的影响。

2. 实验装置及实验方法

本文的实验中使用了 n100 型 Si 抛光片(电阻率约为 4 Ωcm) p100 型 Si 抛光片(电阻率约为 25 Ωcm)和半绝缘 GaAs 抛光片三种圆片形半导体材料。实验中所用的电极结构如图 2 所示。

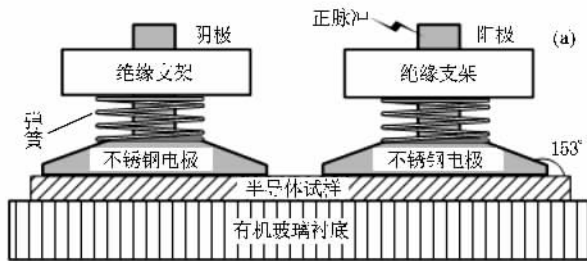


图 2 电极系统结构示意图及实物照片 (a)平面电极系统结构示意图 (b)平面电极系统照片

电极由不锈钢材料制成,其形状为圆台形,底面直径为 20 mm,圆台侧面与底面的夹角约为 153°。这样的电极形状可以确保放电是沿表面发生的,而且便于光学观测,电极通过直径为 4 mm 的圆柱形导杆与绝缘支架连接。绝缘支架是由聚四氟乙烯材料制成的“Π”形结构,并被固定在绝缘衬底上。绝缘衬底由厚度为 5 mm 的有机玻璃板制成,上面留有预定距

离的安装孔,可以确保每次实验的电极间距一致,在大部分实验中电极间距取为 5 mm。绝缘支架与电极间的弹簧处于压缩状态,可以使电极与试样均匀压紧,并使阴极和阳极上压力尽量一致。实验时采用宽约 30 mm 的铜箔作为引线,以尽量减小回路电感。

所有的实验均在避光腔体内进行,由单级 Marx 发生器产生双指数形高压脉冲(波形参数为 0.4/2.5 μs),电压测量采用 Tek P6015A 型高压探头,电流测量采用自制的约为 25.6 mΩ 的无感电阻作为分流器。在图像记录方面,采用 REDLAKE 公司生产的 Motion Pro 系列 HS-4 型 CCD 系统和自行配置的红外滤光镜结合构成红外图像记录平台。实验系统的结构和光谱响应范围如图 3 所示。

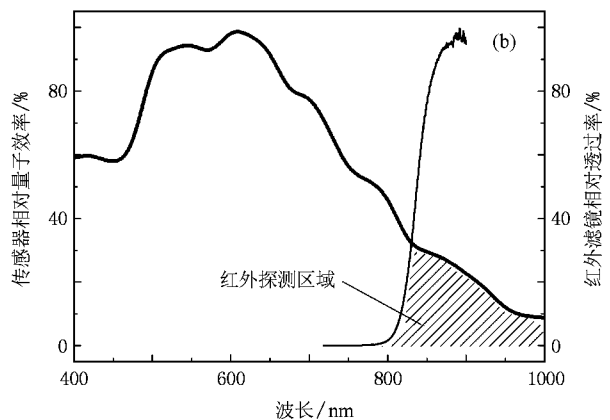
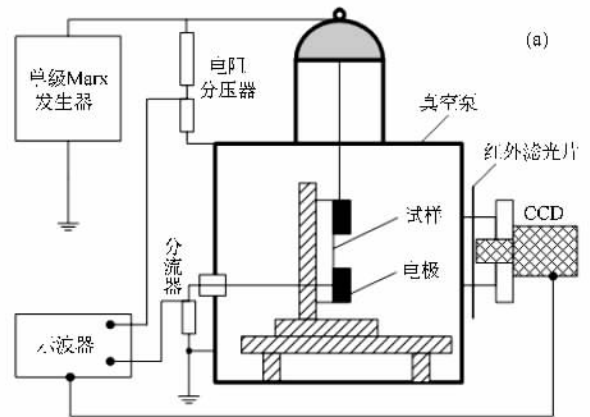


图 3 实验系统结构示意图及红外探测的光谱范围 (a)实验系统结构示意图 (b)红外图像的光谱范围

CCD 系统采用高灵敏灰度探测器,分辨率为 512 × 512,探测器的中心波长为 600 nm,量子效率最高为 44%。红外滤镜的波长范围在 850 nm 以上,最高透过率大于 91%。滤光片和 CCD 光谱特性的交叉区域即为本研究中红外探测的光谱范围,如图 3(b)中的阴影区所示,此范围属于近红外区域(800—2500 nm)。

3. 实验结果

3.1. 半导体表面闪络的红外分析

实验试样为 p100 型 Si 片,在电极接触区域采用蒸镀 Al 膜方法进行金属化,并镀 Au 以防止表面氧化.电极制作完毕后进行了退火处理,退火温度为 450 °C,退火时间为 30 min.实验时,升高电压至能可靠发生贯穿性闪络,拍摄了闪络时发光的红外照片.拍摄到的图像中有两种现象应值得注意,一种是闪络的丝状通道,另一种是在两电极之间区域的中心位置能够观察到明显的红外发光点,实验结果如图 4 所示.

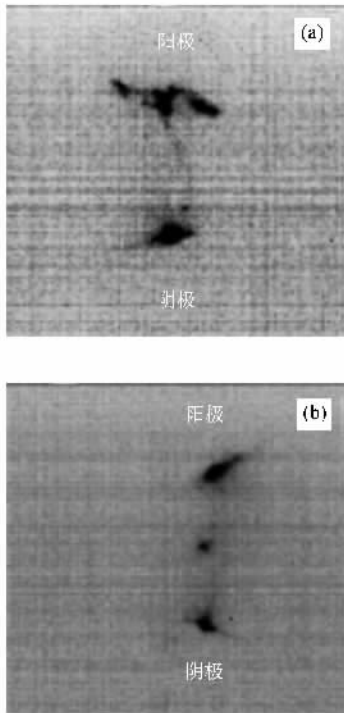


图 4 真空条件下 p100 型 Si 片表面闪络的红外图像
(a) 丝状闪络通道 (b) 通道中间的发光点

利用可见光拍照时,真空中的半导体闪络通道往往呈现弥散形^[18],但是当采用红外滤镜滤除可见光后,可以发现除了电极边缘存在较强的红外辐射外,电极间还存在一条贯穿性的细丝通道,这在图 4 中能够明显观察到.更值得注意的是,闪络发生时电极间的试样表面常常能够发现有明显的发亮点,如图 4(b)所示,这可以作为载流子复合现象的证据,即电子空穴在此处发生复合,复合过程会伴随着较为强烈的红外辐射.

3.2. 表面闪络后电极边缘处材料的破坏现象

真空中 p100 型 Si 片经多次闪络后,将发生闪络后的样品置于 Olympus BX-51 型光学显微镜下,观察阴极和阳极附近的表面状况,表面的微观形貌照片如图 5 所示.从图 5 可以明显地看到,电极附近区域存在丝状破坏现象.

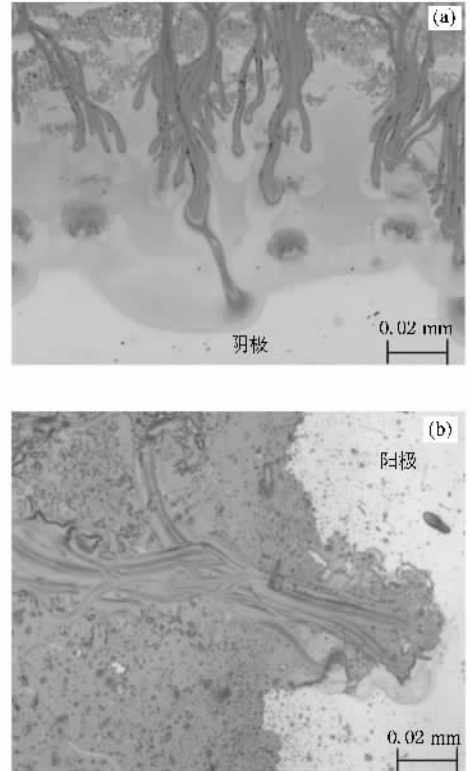


图 5 p100 型 Si 片表面闪络后电极边缘的丝状破坏现象
(a) 阴极处的丝状破坏现象 (b) 阳极处的丝状破坏现象

3.3. 表面闪络后电极间材料表面的破坏现象

采用 n100 型 Si 抛光片样品,接触区用溅射的方法制作了 Au 膜电极,试样在空气中发生多次闪络后,利用上海光学仪器厂生产的 XJXZ 型金相显微镜拍摄了 Si 片表面破坏现象的照片,如图 6(a)所示.从图 6(a)可以看出,在电极之间的区域存在近乎贯穿电极间的连续凹坑破坏现象,值得注意的是,在凹坑分布的中间区域存在一条贯穿性的线状通道.

进一步利用美国 Veeco 公司生产的 An509robe/CP-kescarc 型原子力显微镜获得了图 6(a)中线状通道上某一个凹坑的详细结构和尺寸,如图 6(b)所示.

从图 6(b)可以看出,凹坑状痕迹实际上是由圆锥形突起和周围的环形凹陷组成的,而且凹陷区域还以环状的形式向外扩散,发现中等尺寸的凹坑中圆锥形突起的高度可以达到 $1\ \mu\text{m}$ 左右,底面直径略小于 $8\ \mu\text{m}$,中心环形凹陷区的外圆直径约为 $12\ \mu\text{m}$.此外,从图 6(b)还可以明显看出细丝通道穿过凹坑的现象,通道宽度约为 $3\text{--}4\ \mu\text{m}$,且细丝通道低于 Si 材料的表面,深度约为 $0.2\ \mu\text{m}$.

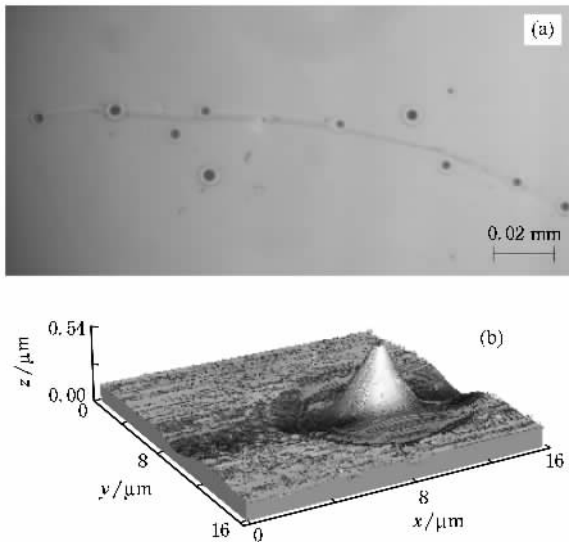


图 6 n100 型 Si 抛光片表面丝状破坏的微观形貌 (a) n100 型 Si 表面的线状破坏与凹坑分布现象 (b) 线状通道周围凹坑的微观结构

针对半绝缘 GaAs 抛光片,分别在真空和空气中进行了闪络实验,多次闪络后利用 Philips 公司生产的 XL-20 扫描电子显微镜得到了材料表面的微观形貌,如图 7 所示.与 Si 材料相比,GaAs 材料在闪络后的表面破坏程度更加严重,且在大气和真空中具有不同的破坏现象.

如图 7(a)所示,在真空中的表面破坏由密布的凹陷区域组成,在凹陷区域中心还有小孔.从图 7(b)则可以发现,在空气中发生闪络后 GaAs 表面能够明显地看出熔化的通道及表面喷溅龟裂的现象,熔化通道宽度可以达到 $20\ \mu\text{m}$,这种表面破坏现象与图 6 中 Si 的表面破坏现象具有一定的相似性.

4. 分析与讨论

4.1. 电极边缘处多子电流的热注入与弛豫过程

图 4 显示了闪络引起的红外辐射现象,这些现

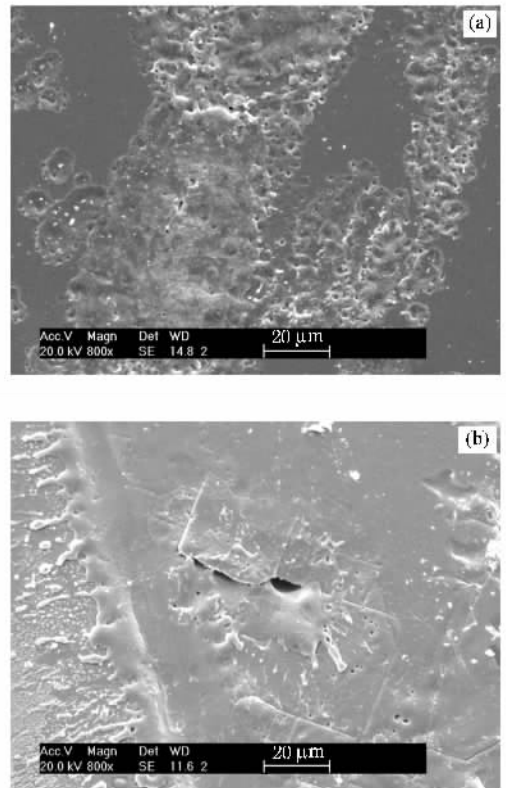


图 7 表面闪络后 GaAs 抛光片的破坏状况 (a) 在真空中 GaAs 闪络后的表面破坏 (b) 在空气中 GaAs 闪络后的表面破坏

象与载流子的作用有密切的联系.实验中所使用的试样为 p100 型 Si 材料,虽然在电极区域作了金属化处理,但是由于受表面态影响,往往会在电极区形成接触势垒.在 Schottky 势垒模型的前提下,从阳极注入 p 型材料的多子(空穴)电流将随施加电压的增大而趋于饱和,考虑到镜像力和隧道效应,施加电压较大时注入的空穴电流值将继续上升.注入电流通过势垒区时会引起损耗,所以随着注入电流的增大接触区域的温度会上升,上升的温度又会使接触区域的载流子浓度增大,反复循环下去必然会导致电极接触区域的热击穿.击穿区会由于本征激发产生电子空穴对,造成接触电阻的降低,本文称这一过程为热注入,其原理如图 8 所示.

对于 p 型材料,热注入的载流子在电极处较强的电场作用下还可能继续与晶格碰撞,产生新的电子空穴对,生成的这些载流子又会再与晶格碰撞.在本文使用的电极结构条件下,电极边缘的电场是极高的,稍微远离电极边缘区域的电场就迅速下降.从图 8 的原理可以知道,p 型材料阳极边缘处由于热注入产生的电子空穴对浓度较高,而电子会迅速进入电极中,造成阳极处空穴浓度较高,这些空穴会在

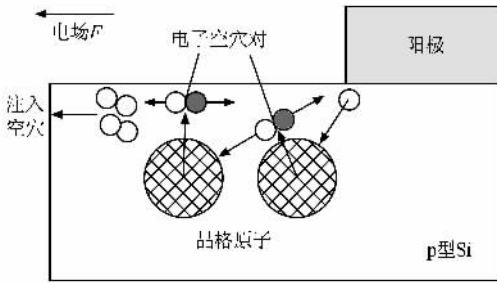


图 8 热注入原理示意图

电场的作用下向体内扩散,在稍微远离电极边缘的区域,碰撞电离的效率也会下降,载流子将会以空穴为主,成为空间电荷特性的注入电流。

对于大多数无机半导体材料,如 Si, Ge 和 GaAs 等,没有外加电压时多子和少子处于热平衡状态。当来自电极的多数载流子注入到半导体中时,会改变其热平衡状态,这种变化只能维持很短的时间,即弛豫时间 τ_d 。

根据文献 [19] 的讨论可以知道,当外加电压 U 小于一个阈值 U_H 时,注入的载流子还没有来得及到达阳极,其空间电荷特性就被平衡掉了,由注入多子引起的表面电场畸变也会很快消失。当外加电压 U 大于 U_H 时,空间电荷性质的多子才能够存在。对于本文所使用的 p 型 Si 材料,认为在室温下杂质全部电离,则热生成多数载流子的浓度 p_0 等于施主杂质浓度,约为 10^{14} cm^{-3} ,取 300 K 时 Si 中空穴迁移率的典型值为 $500 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}$,估算 τ_d 的值约为 10^{-10} s 。对于本文所使用的电极系统,如果电极间距为 5 mm,要使电极中间电场较低的部分也出现非平衡多子,则外加电压必须达到 1000 kV 的水平,而实验中施加的电压峰值大约在 10 kV 左右,显然很难在电极之间电场较低的区域形成空间电荷特性的多子电流。

4.2. 少子性质丝状电流引发的表面电场增强

对于 p 型 Si 材料,当电场较高时会在阴极处发生少子(电子)注入到其表面层的现象,注入的电子能够存在几十微秒甚至更长时间(实测本文所用 p100 型 Si 抛光片的少子寿命约为 $50 \mu\text{s}$),少子电流注入后会破坏半导体内载流子的热平衡状态和电中性条件。由于注入的不均匀性,阴极处会发生丝状注入,在表面层内则会形成空间电荷性质的细丝电流,因而可能造成表面电场的畸变。

图 6 中丝状破坏通道的深度约为 $0.2 \mu\text{m}$,宽度约为 $3\text{--}4 \mu\text{m}$ 。文献 [13] 曾经观测到高阻 Si 表面的细丝通道深度约为 $2 \mu\text{m}$,宽度约为 $25 \mu\text{m}$,而文献 [20] 观测到 GaAs 表面丝流的宽度约为 $75 \mu\text{m}\text{--}1 \text{ mm}$ 。实验观察和文献结果都反映出破坏通道的截面为一个扁平的形状,其面积应小于丝状电流通道。在本文中考虑采用图 9 所示的模型来估计细丝电流引起的表面电场畸变。

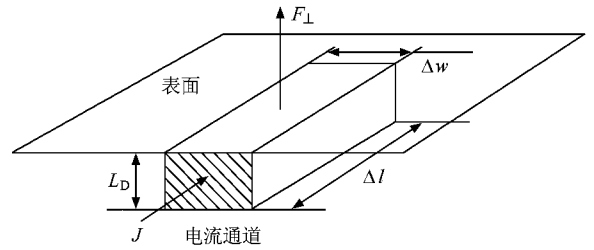


图 9 细丝电流引起的表面电场增强

取电极中间 Si 表面层内宽 Δw 、长 Δl 的一段细丝电流通道建立坐标,设通道内流过的电流密度为 J ,产生的垂直电场 F_{\perp} 的正方向指向外部,丝状通道的深度可以用 Debye 长度进行估计^[21]。

$$L_D = \left(\frac{kT}{q} \frac{\epsilon}{qN} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

式中 L_D 为 Debye 长度, k 为 Boltzmann 常数, T 为绝对温度, q 为电子电荷量, ϵ 为材料的介电常数, N 为载流子密度。对于 p 型材料,可将 N 取为施主掺杂浓度 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$,计算得到 L_D 约为 $0.17 \mu\text{m}$,这与图 6 的实验结果基本一致。

电子电流密度表达式为

$$J_n = q\mu_n \left(n |F_{\parallel}| + \frac{kT}{q} \frac{dn}{dx} \right), \quad (2)$$

式中 J_n 为电子载流子电流密度, μ_n 为电子迁移率, n 为电子载流子浓度, F_{\parallel} 为水平方向电场强度, dn/dx 为电子浓度沿水平分布的梯度。

粗略认为电极中间区域的电子浓度变化不大,因而可以忽略扩散项(梯度项),利用载流子速度 $v_n = \mu_n |F_{\parallel}|$ 的定义式,得到通道中的电子数 N_n 可以表示为

$$N_n = \frac{J_n}{qv_n} \Delta l \Delta w L_D. \quad (3)$$

考虑到电流通道的截面是扁平的形状,近似认为在细丝电流的深度方向上电子的分布是近乎一致

的,所以表面电子电荷密度可以表示为

$$\begin{aligned}\sigma_{ns} &= q \frac{N_n}{\Delta l \Delta w} \\ &= \frac{J_n L_D}{v_n} \\ &= \frac{J_n}{v_n} \left(\frac{kT}{q} \frac{\varepsilon}{qN} \right)^{1/2},\end{aligned}\quad (4)$$

式中 σ_{ns} 为电子电荷密度.

表面垂直方向的电场强度可以表示为

$$\begin{aligned}F_{\perp} &= \frac{\sigma_{ns}}{\varepsilon_0} \\ &= \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{J_n}{v_n} \left(\frac{kT}{q} \frac{\varepsilon}{qN} \right)^{1/2}.\end{aligned}\quad (5)$$

从(5)式中可以清楚地看出,电流密度越大,垂直表面的电场强度也就越大.在本文的实验中发现,发生完全闪络前的电流通常为若干安培.可将闪络前电流按照 1 A 估计,将其平均分布在 100 个电流通道计算,每个通道需要承担 1×10^{-2} A 的电流,丝流通道的几何尺度取深度为 $5 \mu\text{m}$ 、宽度为 $50 \mu\text{m}$,这样每个通道的电流密度约为 $4 \times 10^3 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$.按此电流密度代入(5)式,并考虑室温($T = 300 \text{ K}$)情况,载流子浓度取 p 型材料的受主浓度约为 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$,载流子速率取饱和的电子速率 $10^7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,估算细丝通道引起的表面垂直方向的电场强度可以达到 $80 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$.若考虑在空气中的实验,这已超过了空气电晕的起始场强^[22].如果考虑注入细丝通道的不均匀性,局部场强会更高,在总电流较小的情况下就能够引发细丝通道上方的空气电离,从而形成电离通道.

4.3. 半导体表面丝状破坏的机理

在较低施加电压下,同时受电极结构造成不均匀电场条件的限制,热注入现象只能局限在电极附近,所以在图 4 中阴极和阳极的边缘均能够观察到明显的红外辐射.本文认为,细丝电流通道形成初期少子注入起一种先导的作用,少子形成的丝状注入电流可以到达对侧电极.随着电压继续提高,注入的少子电流密度将不断增大,通道内的温度也不断提高,多数载流子也会沿此通道向对侧推进.这时就已经形成了细丝状的电流通道,且通道内存在发热和复合发光的现象,所以图 4(a)中能够记录到一条

细丝状的红外通道.对于 p 型材料,空穴从阳极注入到细丝通道后,在热和电场共同作用下会产生电子空穴对,但是由于电子和空穴的迁移率不同,在注入的多子电流的前端空穴浓度会更高,复合发光也更显著,所以在两电极之间的丝状通道上会有明亮的红外发射点,如图 4(b)所示.

有些研究者也报道了半导体表面闪络过程中存在流过表面的丝状电流^[23,24],与本文的实验结果相似.作者认为,图 5—图 7 中的现象与丝状电流的热效应密切相关,当局部电流密度足够大时会引起材料的熔化或气化,导致向外蒸发甚至溅射现象,引起凹坑和突起,最终形成丝状的破坏性通道.当表面形成圆锥突起后,在外加电压的作用下圆锥的尖端会形成较强的电场.在空气介质中,这种结构的破坏会加剧丝状电流通道上方气体介质的电离程度.

根据以上的分析可以知道,在非平衡少子电流的作用下,表面层的电流通道会在垂直表面的方向上形成极高的场强造成通道上方的气体电离,这种电离作用能够发生在通道电流并不是很大的情况下.空气中表面闪络造成的表面破坏痕迹很可能不仅是表面细丝电流的热效应直接所致,也与外部的介质有很大关系.对于图 7 所示的 GaAs 材料,在空气中闪络产生的破坏比真空中更为严重,真空中的表面破坏类似于材料热蒸发,而空气中则有更明显的熔化现象.

5. 结 论

本文通过对半导体材料表面闪络过程中的红外照片以及闪络后被破坏表面形貌照片的研究,给出了空气及真空条件下闪络过程中存在细丝电流通道的证据.基于对热注入和半导体弛豫过程的分析,提出了少子注入引起的表面电场增强以及外部气体电离形成电离通道的理论模型.该模型能够解释实验中观察到的丝状电流通道红外辐射以及表面破坏现象.

在后续工作中,本研究组还将继续讨论有关细丝电流先导引发半导体表面闪络的机制,给出更多的实验证据,并进行更加深入的讨论.

- [1] Nunnally W C 1984 *Appl. Phys. Lett.* **44** 980
- [2] Liu X S 2005 *High Pulsed Power Technology* (Beijing : National Defence Industry Press) p376 (in Chinese) [刘锡三 2005 高功率脉冲技术 (北京 : 国防工业出版社) 第 376 页]
- [3] Shi W , Ma D M , Zhao W 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1716 (in Chinese) [施 卫、马德明、赵 卫 2004 物理学报 **53** 1716]
- [4] Shi W , Zhao W , Zhang X B , Li E L 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 867 (in Chinese) [施 卫、赵 卫、张显斌、李恩玲 2002 物理学报 **51** 867]
- [5] Zhi T T , Chen L R 1983 *Acta Opt. Sin.* **3** 369 (in Chinese) [支婷婷、陈蓝荣 1983 光学学报 **3** 369]
- [6] Liang Z X , Shi W 1998 *Acta Electron. Sin.* **26** 104 (in Chinese) [梁振宪、施 卫 1998 电子学报 **26** 104]
- [7] Shi W , Liang Z X , Xu C X 1998 *J. Xi'an Jiaotong Univ.* **32** 19 (in Chinese) [施 卫、梁振宪、徐传骥 1998 西安交通大学学报 **32** 19]
- [8] Shi W , Tian L Q 2004 *Chin. J. Semicond.* **25** 691 (in Chinese) [施 卫、田立强 2004 半导体学报 **25** 691]
- [9] Zutavern F J , Loubriel G M , Helgeson W D , O 'Malley M W , Gallegos R R 1994 *The International Society for Optical Engineering (SPIE) Optical Activated Switching (IV)* (Bellingham : SPIE Press) p146
- [10] Williams P F , Peterkin F E 1989 *Proc. the 7th IEEE Pulsed Power Conference* (Piscataway : IEEE) p890
- [11] Peterkin F E , Ridolfi T , Buresh L L , Hankla B J , Scott D K , Williams P F , Nunnally W C 1990 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **37** 2459
- [12] Gradinaru G , Sudarshan T S 1993 *J. Appl. Phys.* **73** 7643
- [13] Zhang G J , Yan Z , Liu Y S , Yasuoka K , Ishii S 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 3742
- [14] Shi W , Tian L Q 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 202103
- [15] Zhao W B , Zhang G J , Yan Z 2007 *High Power Laser and Partial Beams* **19** 515 (in Chinese) [赵文彬、张冠军、严 璋 2007 强激光与粒子束 **19** 515]
- [16] Zhao W B , Zhang G J , Zheng N , Yan Z 2005 *Proc. 14th International Symposium on High Voltage Engineering* (Beijing : Tsinghua University Press) p24
- [17] Zhao W B , Zhang G J , Qin G B , Yan Z 2006 *Proc. 16th International Conference on Gas Discharges* (Xi'an : Xi'an Jiaotong University Press) p305
- [18] Zhao W B , Zhang G J , Yang Y , Yan Z 2004 *Asian Conference on Electrical Discharge* (Beijing : Tsinghua University Press) p396
- [19] Kao K C , Huang W 1991 *Electric Transport in Solids* (Beijing : Science Press) p169 (in Chinese) [高观志、黄 维 1991 固体中的电输运 (中译本) (北京 : 科学出版社) 第 169 页]
- [20] Zutavern F J , Baca A G , Chow W W , Hafich J M , Hjalmarsen H P , Loubriel G M , O 'Malley M W , Rosse L D , Vawter G A 2001 *Digest of Technique Papers on Pulsed Power Plasma Science Conference* (Piscataway : IEEE) p289
- [21] Warner R M , Grung B L 1983 *Transistors Fundamentals for the Intergrated-circuit Engineer* (New York : Wiley-Interscience Publication) pp210—224
- [22] Yan Z , Zhu D H 2002 *High Voltage and Insulation Technology* (Beijing : China Electric Power Press) p70 (in Chinese) [严 璋、朱德恒 2002 高电压绝缘技术 (北京 : 中国电力出版社) 第 70 页]
- [23] Hankla B J , Williams P F 1996 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **24** 67
- [24] Gradinaru G , Sudarshan T S 1996 *J. Appl. Phys.* **79** 8557

Investigation on surface damage phenomena induced by flashover across semiconductor^{*}

Zhao Wen-Bin[†] Zhang Guan-Jun Yan Zhang

(*State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment , School of Electrical Engineering , Xi'an Jiaotong University , Xi'an 710049 , China*)

(Received 11 September 2007 ; revised manuscript received 6 March 2008)

Abstract

The flashover across semiconducting materials disables many high power semiconductor devices from their further application under high electric field. Up to now , the physical mechanism of the flashover was still not understood clearly . Surface flashover experiments of silicon and gallium arsenide were performed under pulsed high voltage . The filament current channels on their surface were observed in the infrared photographs , and the infrared radiation bright spot was found in the central region between the electrodes . On the surface of different samples undergone flashover events for several times , the filament damage phenomena were observed , and for the n100 silicon sample , some circular pits were found around the filament channel , with a conical jut in the center of each pit . According to the damage phenomena at the edge of electrodes , the thermal injection and relaxation characteristics of majority carriers were discussed . An injection model induced by minority carriers was proposed , which emphasizes the surface field enhancement by non-equilibrium carrier channel , which possibly leads to the ionization of the ambient gas above the filament channel . The model was consistent with the observed experimental results .

Keywords : semiconductor , surface flashover , filament current , surface damage

PACC : 5280 , 6845

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50107008) , the Program for the New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education , China (Grant No. NCET-04-0943) and the Doctoral Foundation of Xi'an Jiaotong University , China (Grant No. DFXJTU2004-03) .

[†] E-mail : wenbinz@mailst.xjtu.edu.cn