

文章编号: 0258-2724(2010)01-0023-05 DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2010.01.004

## 太阳能级 P 型硅放电切割电流特性

邱明波<sup>1,2</sup>, 刘志东<sup>1,2</sup>, 汪 炜<sup>2</sup>, 田宗军<sup>2</sup>, 黄因慧<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 江苏 南京 210016; 2. 南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 为了提高太阳能级硅材料放电切割的效率, 基于理论建模的方法, 将硅材料放电切割过程抽象为简单的二极管-电阻电路模型, 在恒压源的作用下分析其放电电流特性. 理论推导发现, 影响回路电流的主要因素是放电端二极管及体电阻的作用, 随着放电温度的升高, 二极管雪崩压降增大, 阻碍了电流流过, 热传导作用体电阻减小, 促进电流流过, 综合作用后, 放电电流呈现出两边高中间平缓的 U 型曲线. 在电火花线切割机床上加工电阻率  $2.1 \Omega \cdot \text{cm}$  的 P 型太阳能级硅, 抓取放电单脉冲电流波形, 结果显示: 放电电流从开始的 4 A 下降到 3.2 A, 到放电结束时, 上升到 5.2 A. 实验结果与理论推导的放电电流特性一致.

**关键词:** 太阳能级硅; 电火花线切割; 放电电流; 雪崩电压; 体电阻

**中图分类号:** TG662; N301.1 **文献标识码:** A

## Current Properties of Wire Electrical Discharge Machining of P-Type Solar Silicon

QIU Mingbo<sup>1,2</sup>, LIU Zhidong<sup>1,2</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>, TIAN Zongjun<sup>2</sup>, HUANG Yinhui<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of wire electrical discharge machining (WEDM) of solar silicon, a diode-resistance (DR) circuit model for P-type solar silicon WEDM was created to analyze the current properties under constant voltage power supply. Theoretical analysis reveals that the circuit current is determined mainly by the diode at the discharge end and the body resistance of silicon. With the discharge continuing, the current is blocked by the increase of avalanche voltage of the diode due to high temperature, but is boosted by the decrease of body resistance due to heat transfer. As a result, a U-type discharge current curve is generated; i. e., the discharge current is high on the both sides and flat in the middle. To verify the theoretical analysis, a P-type solar silicon with resistivity of  $2.1 \Omega \cdot \text{cm}$  was machined by WEDM in experiments, and a single pulse discharge current waveform was picked up. The experimental results show that the discharge current started from 4 A, then dropped to 3.2 A, and rose to 5.2 A at the end of discharge, which confirms the discharge current characteristics of the solar silicon deduced by theoretical analysis.

**Key words:** solar silicon; wire electrical discharge machining; discharge current; avalanche voltage; body resistance

收稿日期: 2008-11-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975142); 江苏省科学技术支撑计划资助项目(BE2009161); 江苏省高技术研究计划项目(BG2007004)

作者简介: 邱明波(1982-), 男, 博士研究生, 研究方向为特种加工、半导体放电加工, E-mail: qiumingbo@nuaa.edu.cn

目前用于制作太阳能电池的硅片大都采用多线锯切割,其加工原理是通过 600~800 km 长的金属丝高速运动把粒度 10~15  $\mu\text{m}$  的 SiC 或者金刚石的浆料带入硅锭加工区域研磨,最终将硅锭切割成薄片<sup>[1]</sup>. 目前只有少数几个发达国家(瑞士、意大利、日本等)掌握其中的关键技术. 我国相关设备目前完全依赖进口. 由于加工机理属于机械加工范畴,要减薄硅片切割厚度,对机床的动刚度、磨料质量及尺寸控制均有较高的要求,在切割运动过程中,金属丝对脆性硅材料产生机械冲击作用. 目前多线切割硅片的最小厚度仍然在 200  $\mu\text{m}$  左右,如果要进一步降低切割厚度难度很大. 电火花线切割(wire electrical discharge machining, WEDM)是一种与晶向无关、非接触、宏观加工力很小的加工方式,理论上采用 WEDM 切割,工件厚度可以切到很薄. 作为光伏电池的主要原料太阳能级硅片,掺杂浓度比较高,电阻率在 0.1~10  $\Omega\cdot\text{cm}$  范围内,利用 WEDM 加工比较适合<sup>[2]</sup>. 利用 WEDM 技术加工太阳能级硅片具有低损耗、低成本、大厚度等优点. 近年来随着光伏产业的迅猛发展,该项技术的研究受到了大量国内研究人员的关注<sup>[3-7]</sup>. 硅材料在放电加工过程中,由于接触势垒、体电阻等不利因素的存在,钳制放电回路的加工电流,影响了太阳能级硅材料 WEDM 技术的商业化应用. 半导体物理及电火花技术经过了半个多世纪的发展,在硅材料能带、PN 结性质、火花放电通道等方面形成了许多经典理论基础,对于半导体材料的加工国内外的研究比较少见,特别是对半导体材料的放电加工缺乏研究. 硅材料放电加工过程中,由于放电端形成类似  $\text{PN}^+$  单边突变结的结构反向偏置加在回路中,造成一定的压降,半导体具有一定的体电阻限制了放电电流,造成半导体电火花线切割加工的困难. 本文将基于  $\text{PN}^+$  单边突变结和放电通道的雪崩电离击穿理论,研究太阳能级 P 型硅负极性放电切割的电流特性.

## 1 电火花线切割原理

WEDM 的加工原理是利用运动电极丝和工件两端所加的脉冲电压在工件和工具两极之间产生放电,并将瞬时释放的大量放电能量转化成极间物质及加工工件的热能,使工件表面的材料熔化、气化,同时伴随着极间介质气化产生的爆炸力将工件材料蚀除,形成放电凹坑,达到加工的目的.

硅材料的放电切割原理如图 1 所示. 利用负极

性加工,硅材料接电源负极,两极之间加上直流脉冲电压. 在进电端,金属夹具与硅材料直接靠压接触进电. 为提高回路电流,可以增大接触压力,或者在硅材料表面涂镀金属导电层<sup>[4]</sup>,以提高进电面与硅材料的有效接触面积. 在放电端,电极丝垂直纸面运动,与工件间在伺服系统的控制下维持正常放电. 为限制电流过大烧毁功率器件需要在回路中串联限流电阻  $R_L$ ,  $R_L = 10 \sim 30 \Omega$ , 本文取  $R_L = 10 \Omega$ .

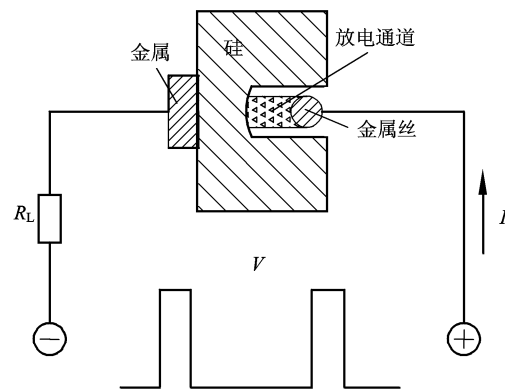


图 1 负极性加工 P 型硅材料原理图  
Fig. 1 Schematic diagram of reversed polarity machining of P-type silicon

图 1 的原理可以用二极管和电阻 DR (diode-resistance) 模型简化, DR 模型电路原理如图 2 所示. 图 2 中,  $D_{SM}$  为进电端的金属夹具与硅材料的接触形成的二极管结构,回路中处于正向偏置状态;  $R_S$  为半导体加工过程中的体电阻,与接触面积以及环境温度密切相关;  $D_{SC}$  为放电通道与半导体形成的接触结构,是处于反向偏置的稳压二极管;  $D_C$  为放电通道的电路模型,是反向偏置的稳压二极管. 相对于电火花加工金属材料的过程,  $D_{SM}$ ,  $R_S$  和  $D_{SC}$  均不存在或者可以忽略.

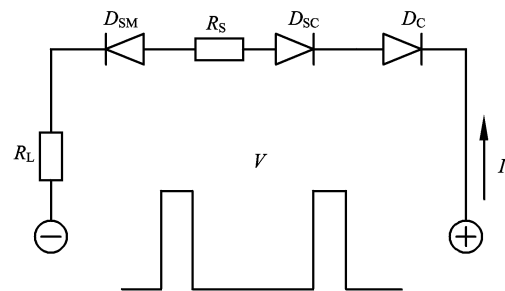


图 2 硅电加工 DR 电路原理图  
Fig. 2 Diode-resistance (DR) circuit schematic of WEDM for silicon

## 2 电路模型

### 2.1 放电通道模型

由电火花放电理论可知,当电极丝与硅材料距离很远时,极间电阻很大,电路两端的电压几乎全部加在电极上,整个回路处于断开状态.当电极丝与硅材料的距离在伺服系统的控制下变得足够小时,阴极表面电场强度增加到  $1 \times 10^6$  V/cm,产生场致电子发射,在  $10 \sim 100$  ns 内,经雪崩电离击穿极间物质,形成放电通道,间隙电阻减小到几分之一欧姆,间隙电压则下降到火花放电的维持电压  $V_{RC}$  ( $20 \sim 25$  V)<sup>[8]</sup>.此时,相当于在理想的稳压管反向接在回路中,稳压时  $V_{RC} = 20$  V.

### 2.2 进电端接触模型

进电端与 P 型硅材料接触后,由于金属材料的功函数与硅不同,产生接触势垒,相当于形成了金属半导体的肖特基整流接触.负极性加工时,进电端金属接的是电源负极,因此,  $D_{SM}$  的物理模型可简化为处于正偏状态下的肖特基二极管.对于一般金属与 P 型硅材料形成的肖特基二极管的正向压降通常低于 1 V,取  $V_{RSM} = 1$  V.

### 2.3 放电端接触模型

极间介质在极短的时间内经过雪崩电离形成放电通道后,带负电的电子及带正电的离子大致相等,电子的浓度变得很大,相当于重掺杂的 N 型材料,与 P 型硅材料接触形成类似  $PN^+$  单边突变结.因此,  $D_{SC}$  的模型可简化为一个  $PN^+$  型单边突变结构成二极管,在电路中处于反向偏置状态.反向截止偏压一般为它的雪崩击穿电压,半导体材料的单边突变结雪崩击穿电压的经验公式为<sup>[9]</sup>:

$$V_B \approx 60 \left( \frac{E_G}{1.1} \right)^{3/2} \left( \frac{N_0}{10^{16}} \right)^{-3/4}, \quad (1)$$

其中:  $E_G$  为半导体材料的禁带宽度,硅的禁带宽度  $E_G = 1.1$  eV;  $N_0$  为轻掺杂一侧的杂质浓度,即硅材料的空穴浓度.本文实验所用的太阳能级硅的电阻率  $\rho = 2.1 \Omega \cdot \text{cm}$ ,  $N_0 = 5.95 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ <sup>[10]</sup>,代入式(1),计算得  $V_B = 88.5$  V.

式(1)仅适用于室温,一般  $V_B$  随着温度的升高会相应的增大,具有正温度系数.当放电通道形成后,硅材料表面温度随之上升,  $V_B$  也增大<sup>[9]</sup>.

### 2.4 体电阻模型

进电端与放电端之间的材料为半导体,具有一定的电阻率,其间的  $R_S$  与普通金属导体材料不同,需要计算,进电面为  $D_{SM}$  和  $D_{SC}$  的阳极.  $D_{SM}$  阳极进

电状态比较简单,温度基本恒定,面积等于夹具与硅材料的接触面积,可视为面接触.  $D_{SC}$  阳极进电状态相对比较复杂,与放电点的电阻率、接触面积有关.距离放电点越近的地方,材料的温度越高.对于半导体硅,当温度升高到一定值后,电阻率会显著降低<sup>[10]</sup>.因此,可以忽略放电点附近高温时硅材料的体电阻.对于温度较低 ( $200$  °C 以下) 的地方,可以认为电阻率基本保持不变.通常认为 1 次放电,只能形成 1 个放电通道,并且放电通道的直径非常小,中心温度极高,可以达到  $10 \times 10^3$  °C 以上,随着远离中心距离的增加,材料温度逐渐降低.将放电点附近温度为  $200$  °C 的等温面(称为等效接触面)视为  $D_{SC}$  的阳极.假定等温面为半球面,对应的半径(称为等效接触半径)为  $r_d$ ,该面积相对  $D_{SM}$  阳极接触面积小很多,可以视为点接触.

点-面接触的  $R_S$  计算式为<sup>[11]</sup>:

$$R_S = \frac{\rho}{\pi r_d}. \quad (2)$$

式(2)表明体电阻与等效接触半径成反比,该半径远远大于放电点半径,与材料放电的能量、温度、持续时间有关,取决于等效接触面的位置.通常很难精确的计算  $r_d$ ,需要利用实验方法估算.

## 3 放电电流计算

在图 2 的 DR 模型上加脉冲电压,电路开始工作,脉冲电压  $V$  加上后,整个回路的电压几乎全部落在极间介质上,介质击穿后形成放电通道,其电流为  $I$ .根据基尔霍夫电压定律可知:

$$V = I(R_S + R_L) + V_{RSM} + V_{RSC} + V_{RC}, \quad (3)$$

$$I = \frac{V - V_{RSC} - V_{RC} - V_{RSM}}{R_S + R_L}. \quad (4)$$

式(4)决定了加工回路电流,在整个放电过程中,  $V$ ,  $V_{RSM}$ ,  $V_{RC}$  和  $R_L$  基本保持不变,  $V_{RSC}$  和  $R_S$  随着放电产生的持续而变化.放电通道形成后,放电点的温度在电流的作用下持续升高,一方面放电端二极管的雪崩电压随温度的升高而升高,即高温使  $V_{RSC}$  增大,对电流有阻碍作用;另一方面放电点获得的能量向周围传递,高温低电阻率材料的范围逐渐增大,  $r_d$  增大,  $R_S$  减小,即热传递使  $R_S$  减小,对电流有促进作用.放电开始时材料表面加热,温度上升很快,热量来不及传递,放电对电流的阻碍作用明显,电流会有所下降.随着放电的继续进行,表面材料的温度达到气化点,很难继续升高,热传递经过一段时间可渗透到硅材料内一定深度,放电对

电流产生促进作用明显,电流会持续上升.在两种作用综合下,放电电流呈现出放电开始之后就逐渐减小,然后保持恒定,接着电流持续上升,最后随着脉冲电压的中止,放电结束,极间介质材料抛出,电流下降到零.

## 4 实验

为了验证上述理论的正确性,利用高速走丝电火花线切割机床对P型太阳能级硅进行放电切割,工艺参数见表1,使用记忆示波器截取电源输出的单脉冲放电电压、电流波形如图3所示,用扫描电子显微镜(SEM)观察了硅片切割的表面微观形貌如图4所示.

表1 放电加工工艺参数  
Tab.1 Parameters of discharge machining

项目	数值
进电方式	工件接负极
空载峰值电压/V	200
脉宽/ $\mu\text{s}$	64
占空比	1:12
进给速度/ $(\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	15
运丝速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	10

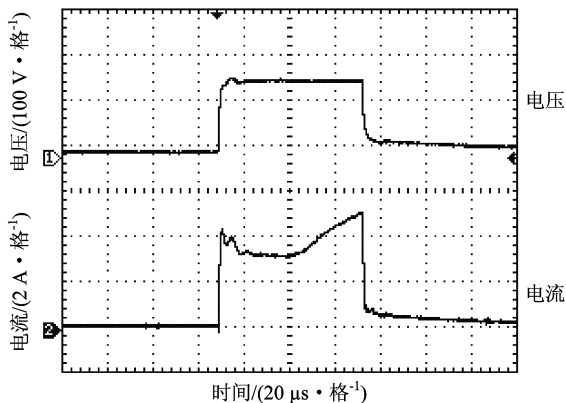


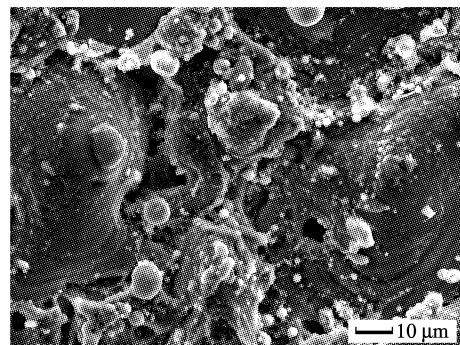
图3 放电加工波形  
Fig.3 Discharge wave form of WEDM

从图3可以看出,由于使用的电源是恒压输出电源,其脉冲放电阶段输出电压基本保持不变.其电流波形随着脉冲放电的进行不断发生变化,放电规律符合上文讨论的规律,即在温度以及热传导的影响下,放电电流自放电通道形成之后达到4 A,然后由于温度上升产生的明显阻碍作用使得电流下降到3.2 A,接下来热传导的促进作用接近阻碍作用,使电流在3.2 A维持一段时间,最后热传导的促进作用越来越明显,电流逐步上升直到放电结

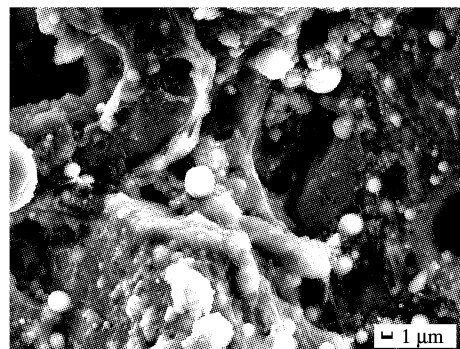
束,达到5.2 A.在 $r_d$ 以内的材料温度很高,其中一部分经过熔化、气化及爆炸力的作用被蚀除离开了基体;另一部分材料仍然留在了基体上受到了热流的辐射,影响着材料的使用性能.因此, $r_d$ 可以用来估测电火花加工的热影响区的大小.根据式(4)可以计算 $r_d$ ,其中各个变量除 $R_s$ 和 $V_{RSC}$ 外,上文均已经得出.常温下 $V_{RC} = V_B = 88.5 \text{ V}$ ,加工过程中 $V_{RBC}$ 越来越大,可以先假定为恒定值 $V_B$ ,代入式(4)得到

$$I = \frac{200 - 88.5 - 20 - 1}{R_s + 10}. \quad (5)$$

由式(5)计算得不同电流下的放电加工的体电阻 $R_s$ ,根据式(2)计算 $r_d$ 并列入表2.由表2,可估算出4 A加工电流对应的热影响区比较大,但并不能说明热影响区都是变质层,仅说明这一部分的材料温度达到较高的温度,并且如果这个范围越大,加工效率提高的越快.本实验的工件加工高度90 mm,在4 A的初始电流的加工下,加工效率可达到 $30 \text{ mm}^2/\text{min}$ 以上.



(a) 低倍



(b) 高倍

图4 放电切割表面形貌  
Fig.4 Surface morphology of silicon prepared by WEDM

表 2 不同电流下的  $R_s$  和  $r_d$  值  
Tab. 2 Values of  $R_s$  and  $r_d$  under different currents

$I/A$	$R_s/\Omega$	$r_d/\mu\text{m}$
4.0	12.6	531
3.2	18.3	365
5.2	7.4	903

## 5 结 论

(1) 将硅材料放电切割的过程抽象为简单的二极管-电阻电路模型,基于放电通道、单边突变结雪崩效应建立了半导体硅材料放电切割的 DR 电路模型,在恒压源的作用下分析其电流特性.

(2) 受高温提升雪崩电压阻碍电流及热传导增加有效接触半径降低体电阻促进电流双向作用,放电电流呈现出放电开始之后就逐渐减小,然后保持恒定,接着电流持续上升,最后随着脉冲电压的中止,放电结束. 电流特性呈现出两边高中间平的 U 型特征.

(3) 在电火花线切割机床上加工电阻率为  $2.1 \Omega \cdot \text{cm}$  的 P 型太阳能级硅,抓取放电单脉冲电流波形,实验显示:放电电流从开始的 4 A 下降到 3.2 A,到放电结束时,上升到 5.2 A. 实验结果与理论推导的放电电流特性一致.

### 参考文献:

[1] ZHU L, KAO I. Galerkin-based modal analysis on the vibration of wire-slurry system in wafer slicing using a wiresaw[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 283(3-5): 589-620.

[2] 邱明波,黄因慧,刘志东,等. 太阳能硅片制造方法研究现状[J]. 机械科学与技术,2008,8: 1017-1020.  
QIU Mingbo, HUANG Yin-hui, LIU Zhidong, et al. A review of the fabrication methods for solar silicon wafer [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, 8: 1017-1020.

[3] PENG W Y, LIAO Y S. Study of electrical discharge machining technology for slicing silicon ingots[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140: 274-279.

[4] TAKINO H, ICHINOHE T, TANIMOTO K, et al. Cutting of polished single-crystal silicon by wire electrical discharge machining[J]. Precision Engineering-Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, 2004, 28(3): 314-319.

[5] 刘志东,汪炜,田宗军,等. 太阳能硅片电火花电解高效切割研究[J]. 中国机械工程,2008,19(14): 1673-1677.  
LIU Zhidong, WANG Wei, TIAN Zongjun, et al. Research on high efficiency slicing of EDM and ECM on solar wafer slicing[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(14): 1673-1677.

[6] 汪炜,刘志东,田宗军,等. 低电阻率单晶硅电火花/电解复合切割加工表面完整性研究[J]. 电加工与模具,2007(6): 6-9.  
WANG Wei, LIU Zhidong, TIAN Zongjun, et al. Surface integrity of low resistance mono-crystalline silicon in electric discharge-electrolytic combined machining[J]. Electro Machining and Mould, 2007(6): 6-9.

[7] SONG X, REYNAERTS D, MEEUSEN W, et al. A study on the elimination of micro-cracks in a sparked silicon surface[J]. Sensors and Actuators a-Physical, 2001, 92(1-3): 286-291.

[8] 刘晋春,陆纪培. 特种加工[M]. 北京:机械工业出版社,1987: 8.

[9] 刘树林,张华曹,柴常春. 半导体器件物理[M]. 北京:电子工业出版社,2005: 86,89.

[10] 刘恩科,朱秉升,罗晋升. 半导体物理学[M]. 6版. 北京:电子工业出版社,2004: 125-126,223-224.

[11] 邱明波,黄因慧,刘志东,等. 进电方式对太阳能级硅体电阻影响的基础研究[J]. 电加工与模具,2008(4): 24-28.  
QIU Mingbo, HUANG Yin-hui, LIU Zhidong, et al. Basic study on body resistance of solar silicon with different conduction mode[J]. Electro Machining and Mould, 2008(4): 24-28.

(中文编辑:秦 瑜 英文编辑:兰俊思)