

脉冲工况晶闸管扩展速度的影响因素研究*

张 晓,张冠祥,鲁军勇,戴宇峰,武文轩

(海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室,湖北 武汉 430033)

摘要:为研究不同因素对其电流扩展速度的影响,根据晶闸管的结构特点和工作原理,建立晶闸管器件模型及脉冲成形网络等效电路模型并进行了仿真模拟。数值仿真结果表明,当正向阻断电压从3 000 V增加至5 000 V时,扩展速度可增加24.6%;当基区宽度从500 μm 增加至900 μm 时,扩展速度降低了31.7%;当载流子寿命从1 μs 增加至10 μs 时,扩展速度增加了56.9%,而当温度从300 K增加至330 K时,扩展速度仅增加了0.3%,可以看到温度对扩展速度的影响较小。研究结果有助于选择合适参数以保证开通所需的扩展速度,对改进晶闸管器件设计、提高晶闸管工作性能都具有应用价值。

关键词:晶闸管;扩展速度;器件-电路联合仿真;Silvaco

中图分类号:TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2022)02-096-08

Research on influencing factors of thyristor expansion speed in pulse condition

ZHANG Xiao, ZHANG Guanxiang, LU Junyong, DAI Yufeng, WU Wenxuan

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to study the influence of different factors on the current expansion speed of the thyristor during the turn-on process of the pulse condition, the equivalent circuit model of the pulse forming network based on the structural characteristics and working principle of the thyristor was established, and the simulation was carried out. Numerical simulation results show that if the forward blocking voltage increases from 3 000 V to 5 000 V, the spreading speed will increase by 24.6%. If the base width increases from 500 μm to 900 μm , the spreading speed will decrease by 31.7%. If the carrier lifetime increases from 1 μs to 10 μs , the spreading speed will increase by 56.9%. While the temperature increases from 300 K to 330 K, the spreading speed only increases by 0.3%. It can be seen that the temperature has little effect on the propagation speed. The research results are helpful to select appropriate parameters to ensure the expansion speed required for opening, and have application value for improving the design of thyristor devices and improving the performance of thyristors.

Keywords: thyristor; expansion speed; device-circuit joint simulation; Silvaco

功率半导体器件具有耐压高、通流大、功率大、应用灵活、易于控制的特点,在电磁发射、脉冲强磁场、电力电子变换器等高压脉冲功率领域具有广泛应用^[1-4]。在这些系统中,往往需要用到晶闸管的浪涌电流来减少器件并联数量,满足体积质量小型化需要。相应地,在这些系统中晶闸管开关在开通过程中需要承受的电流上升率 di/dt 比常规稳态运行工况要高得多,晶闸管更易失效。主要原因在于,晶闸管刚刚开始导通时,如果电流上升率 di/dt 过大,而其从触发区域向周围的扩展速度过慢,则电流只能从很小的面积上流过,会引起局部温度过高,甚至导致晶闸管失效。

在对脉冲工况应用损坏的器件解剖分析中,70%以上都是由于过大的 di/dt 导致器件损坏^[5]。因而,保证脉冲工况晶闸管在横向扩展过程中具有足够快的扩展速度是脉冲应用晶闸管设计 and 应用必须解决的关键问题。

已有文献主要采用探针测量或红外观测的方法,从试验角度针对该问题开展了研究。Longini等^[6]对晶闸管开通后的横向扩展过程进行了研究,发现撤掉门极触发电流后,远离门极的区域仍会逐渐导通,因此认为这一现象与器件的已开通区域有关。Dodson等^[7]、Matsuzawa^[8]通过设计矩形条状晶闸管来直接观察器件内部开通后的横向

* 收稿日期:2020-09-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51925704; 51877214; 51607187; 51907203); 中国博士后特别基金资助项目(2019T120972); 湖北省自然科学基金资助项目(2019CFB371; 2019CFB373)

作者简介:张晓(1983—),女,河南新乡人,研究员,博士,E-mail:zhangxia01@163.com;

张冠祥(通信作者),男,陕西西安人,硕士研究生,E-mail:1353188931@qq.com

扩展过程,发现门极触发电流的大小和宽度不影响开通后的扩展速度,而负载电流、基区宽度等因素对扩展速度影响明显,并通过实验测量得到扩展速度与电流的 n 次幂成比例。Ruhl^[9]、Song等^[10]发现电流的横向扩展与横向电场有关,从横向偏压的角度提出了横向偏置模型,并通过电探针、红外探测技术等实验方法观察开通后的扩展过程,验证了在一定的电流密度下横向偏置模型的正确性。Bergman^[11]通过在晶闸管的 P 基区加探针进行实验,对阴极区域的扩展速度进行了观察,发现扩展是在近似均匀的速度下进行的,并给出了扩展速度与上升时间(低阳极电压下)的关系。文献[12]研究了晶闸管阀开通暂态、关断暂态中电压电流的影响因素和时变机理;文献[13]对串联晶闸管开通过程进行了分析;文献[14]研究了不同条件下晶闸管触发开通特性,寻求改善其开通性能的方法。

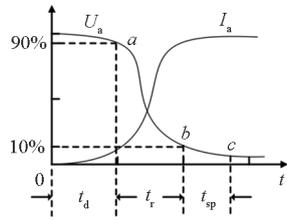
综上所述,现有的晶闸管扩展速度的研究都是针对方形脉冲或者直流下进行的,而对具有高电压、大电流特点的脉冲工况来说,由于过大的电流上升率 di/dt ,晶闸管开通过程中存在触发前沿扩展问题,可能会使晶闸管局部过热而导致热失效。在阴极触点上刻蚀小的圆形沟槽或者设置观察孔等试验方法,对于目前生产的封装好的大功率晶闸管来说,也是很难实现的。本文从晶闸管的内部机理出发,建立器件-电路模型,仿真分析晶闸管的开通机理以及扩展速度的影响因素,研究基区载流子寿命、基区宽度、温度和正向阻断电压等因素对脉冲工况晶闸管扩展速度的影响,对应用于脉冲工况下晶闸管的设计和选型具有指导意义。

1 晶闸管的横向扩展

晶闸管的开通时间可分为延迟时间(t_d)、上升时间(t_r)和扩展时间(t_{sp})三部分^[15],如图1(a)所示。最初是延迟时间,此时器件上的外加电压基本没有随门极脉冲发生变化,电压下降到10%时所需的时间称为上升时间,从局部开通到完全开通所用的时间称为扩展时间。

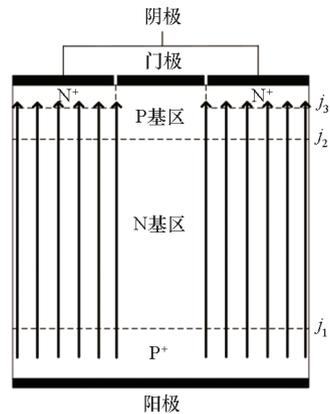
在对晶闸管的门极施加触发电流后, j_3 结的少子注入电流增大,电子在强电场作用下会被抽出到N基区,并穿越N基区,引起空穴的再注入,此时器件的 j_1 和 j_3 结处于正向偏置状态, j_2 结仍处于反向偏置状态。随着载流子的不断积累, j_2 结上靠近门极的阴极边缘区域变为正向偏置,此

时器件局部开通,存在局部导通电流。当局部导通电流足够大时,已开通的区域会渐渐扩展,直至晶闸管完全开通,如图1(b)所示。



(a) 电压、电流示意

(a) Diagram of voltage and current curve



(b) 电流分布示意

(b) Current distribution diagram

图1 晶闸管开通过程示意

Fig. 1 Schematic diagram of thyristor opening process

其中,扩展时间由于等离子体扩展速度的局限性,通常在开通过程中的持续时间最长^[16],对晶闸管的耐 di/dt 、抗浪涌电流、开通损耗等性能影响较大^[10]。例如,当器件的开通区域较小时,过高的 di/dt 很可能导致器件的局部温度过高而发生热击穿,甚至引起损坏。

对于解释晶闸管的等离子体扩展现象,主要有两个不同的理论:一是基于载流子扩散模型,认为扩散作用是主要的影响因素^[17-18];二是基于P基区的横向电场提出的横向偏置模型,认为电场作用才是主要的影响因素^[9,19]。无论是载流子扩散模型还是横向电场偏置模型,对于晶闸管局部开通后的扩展速度影响因素,两种理论是一致的。

其中,等离子体的扩展速度主要与晶闸管中已导通部分的局部电流密度、基区宽度、基区载流子寿命以及温度有关^[8,20]。 N^+ 发射区短路点的密度对扩展速度也会有影响,短路点会在局部位置上起作用,使P基区横向电流在该处疏散,从而减慢等离子体的扩展速度。

2 晶闸管器件 - 电路模型

本文在 Silvaco 软件的 Atlas 模块中建立了晶闸管二维器件模型,如图 2 所示,所选择的物理模型包括迁移率模型、复合寿命模型、电离模型等^[21],具体如表 1 所示。由于晶闸管器件结构为轴对称的,因此在开通扩展过程中,向两侧的扩展情况是完全相同的,故后文在分析相关参数对扩展速度的影响时,将只针对向右侧扩展的情况进行分析。

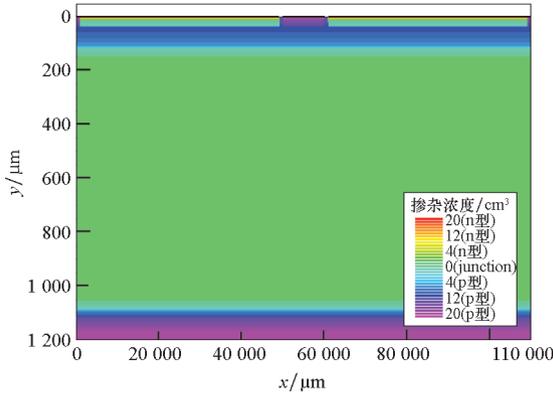


图 2 晶闸管器件模型的横截面

Fig. 2 Cross section of thyristor device model

表 1 晶闸管物理模型

Tab. 1 Modeling formula of thyristor model

物理模型	公式
Klaassen	$\mu_{n0}^{-1} = \mu_{nL}^{-1} + \mu_{nD}^{-1} + \mu_{nA}^{-1} + \mu_{np}^{-1}$
低场迁移率模型	$\mu_{p0}^{-1} = \mu_{pL}^{-1} + \mu_{pD}^{-1} + \mu_{pA}^{-1} + \mu_{pn}^{-1}$
饱和速度模型	$\mu_n(E) = \mu_{n0} [1 + (\mu_{n0} E V_{SATN}^{-1})^{\beta_n}]^{-\beta_n^{-1}}$ $\mu_p(E) = \mu_{p0} [1 + (\mu_{p0} E V_{SATP}^{-1})^{\beta_p}]^{-\beta_p^{-1}}$
Klaassen	$\tau_n^{-1} = (\tau_{0,n}^{-1} + C_{SRH,n} N) (300 T_L^{-1})^{\delta_n} + (C_{Aug,n} p^2) (T_L/300) \xi_n$
复合模型	$\tau_p^{-1} = (\tau_{0,p}^{-1} + C_{SRH,p} N) (300 T_L^{-1})^{\delta_p} + (C_{Aug,p} n^2) (T_L/300) \xi_p$
禁带变窄模型	$\Delta V_{g0} = V_1 [\ln(NN_0^{-1}) + \sqrt{(\ln(NN_0^{-1}))^2 + C}]$
碰撞电离模型	$\alpha_n(E) = A_n e^{(-\beta_n E^{-1})}$ $\alpha_p(E) = A_p e^{(-\beta_p E^{-1})}$
晶格自加热模型	$C \frac{\partial T_L}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T_L) + H$

图 2 中的晶闸管模型为中心门极型,并包含短路发射点,A、K、G 分别为晶闸管的阳极、阴极

以及门极。N⁺发射区以及 N 基区均为 N 型掺杂,掺杂元素为硼;P⁺发射区和 P 基区为 P 型掺杂,掺杂元素为磷。

上述物理模型中涉及的变量及参数所代表的含义如表 2 所示,未在表中列出的参数均为实常数。

表 2 物理模型参数及相关符号

Tab. 2 Thyristor parameters and related symbols

符号	物理意义	单位
$\mu_{n0}(\mu_{p0})$	低场电子(空穴)的总迁移率	$\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$
$\mu_{nL}(\mu_{pL})$	晶格散射引起的电子(空穴)迁移率	$\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$
$\mu_{nD}(\mu_{pD})$	施主散射引起的电子(空穴)迁移率	$\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$
$\mu_{nA}(\mu_{pA})$	受主散射引起的电子(空穴)迁移率	$\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$
$\mu_{np}(\mu_{pn})$	空穴(电子)散射对电子(空穴)迁移率的影响	$\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$
E	局部电场	V/cm
$V_{SATN}(V_{SATP})$	电子(空穴)的饱和速度	cm/s
$\tau_n(\tau_p)$	依赖于浓度的电子(空穴)寿命	s
$\tau_{0,n}(\tau_{0,p})$	电子(空穴)的固有寿命	s
$n(p)$	电子(空穴)的浓度	cm^{-3}
$C_{SRH,n}(C_{SRH,p})$	电子(空穴)SRH 复合系数	cm^3/s
$C_{Aug,n}(C_{Aug,p})$	电子(空穴)的俄歇复合系数	cm^6/s
T_L	结温	K
N	总掺杂浓度	cm^{-3}
ΔV_{g0}	禁带宽度	mV
$\alpha_n(E)(\alpha_p(E))$	电子(空穴)电离率	cm^{-1}
C	单位体积的热容	J/K
λ	热导率	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
H	热生成率	W/m^3

为了模拟晶闸管在脉冲大电流下的开通过程,建立了器件串联电阻、电感以及电容脉冲成形

网络的等效电路模型,如图3所示,对晶闸管模型进行器件-电路联合仿真。

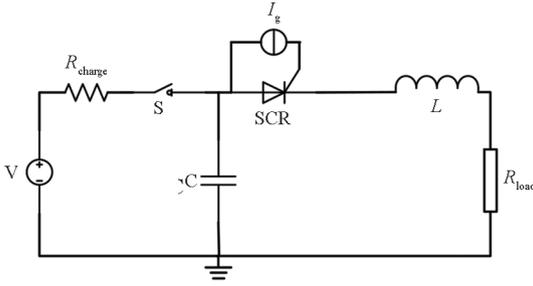


图3 脉冲成形网络的等效电路模型

Fig.3 Equivalent circuit model of pulse forming network

图3中, V 为充电装置, R_{charge} 为限流电阻, S 为充电开关, C 为储能元件电容器, SCR 为开关元件晶闸管, L 为调波电感, I_g 为门极触发电流, R_{load} 为负载。当给门极通入触发电流 I_g 后,晶闸管开始导通,此时脉冲成形网络可以产生一个快速上升的大电流脉冲,从而可以分析脉冲工况下载流子寿命、基区宽度等参数对晶闸管扩展速度的影响。

3 参数分析

对于N基区的宽度以及掺杂浓度等参数,由一些理论公式及经验参数所设计,见表3。关于P基区的参数,一次扩散表面浓度控制在 $8 \times 10^{16} \sim 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,二次扩散的结深约为 $15 \sim 25 \mu\text{m}$,二次扩散浓度控制在 $2 \times 10^{20} \sim 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 。

表3 晶闸管模型的建模公式

Tab.3 Modeling formula of thyristor model

参数	表达式
a	0.75
c	100
n	4~6
A	5.29×10^{-5}
q	1.60×10^{-19}
L_p	$D_p \tau_p$
V_B	φ_n^a
V_{BF}	$V_B (1 - \alpha_1)^{n-1}$
ρ_n	$(2anc^{-0.5n} L_p A^{-1} V_{BF}^{0.5(n-1)})^{2(an+1)^{-1}}$
$X_{m(N1)}$	$A(\rho_n V_{BF})^{0.5}$
$W_{n(N1)}$	$X_{m(N1)} [1 + (an)^{-1}]$
N_n	$(\rho_n \mu_n q)^{-1}$

上述公式中涉及的变量及参数所代表的含义

如表4所示。

表4 晶闸管参数及相关符号

Tab.4 Thyristor parameters and related symbols

符号	物理意义	单位
L_p	空穴的扩散长度	cm
D_p	空穴的扩散系数	cm^2/s
τ_p	空穴的寿命	s
V_B	PN结的雪崩击穿电压	V
α_1	P^+NP 区域的电流放大系数	
V_{BF}	正向转折电压	V
ρ_n	基区的电阻率	$\Omega \cdot \text{cm}$
$X_{m(N1)}$	在N基区的空间电荷区展宽	cm
$W_{n(N1)}$	N基区的宽度	cm
N_n	N基区的掺杂浓度	cm^{-3}
μ_n	电子的迁移率	$\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$
q	一个电子的电荷量	C

为了简化计算,定义在晶闸管导通区域的扩展是一个匀速扩展,扩展速度方程可表示为:

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: v 为晶闸管电流横向扩展速度,单位为 mm/s ; Δl 为在 Δt 时间内扩展的距离,单位为 mm ; Δt 为扩展时间,单位为 s 。

3.1 正向阻断电压

固定脉冲成型网络中的元件参数不变,图4为改变正向阻断电压对放电结果的影响情况,可看出正向阻断电压 U 从 $2\,000\text{ V}$ 增加至 $5\,000\text{ V}$ 时,放电电流峰值从 19.62 kA 增加到了 49.21 kA 。

晶闸管初始的开通位置为靠近门极的阴极区域,在 0 ms 时,向门极通入触发电流,经过短暂的延迟时间及上升时间后,约在 x 为 $60\,000\ \mu\text{m}$ 处开始向右侧扩展。图5(a)为 $3\,000\text{ V}$ 正向阻断电压下,晶闸管在 0.57 ms 时的电流密度分布情况,可以看到此时扩展到了 $90\,588\ \mu\text{m}$ 处。而在 $5\,000\text{ V}$ 正向阻断电压下,晶闸管在 0.57 ms 时扩展到了 $98\,105\ \mu\text{m}$ 处,如图5(b)所示。图5(c)是对不同电压下 $y = 600\ \mu\text{m}$ 处的电流密度进行对比,可以看到随着正向阻断电压的增加,晶闸管的扩展速度明显加快。由扩展速度方程可得, U 从 $3\,000\text{ V}$ 增加至 $5\,000\text{ V}$ 时,扩展速度 v 从 $53\,663\text{ mm/s}$ 增加到 $66\,851\text{ mm/s}$,增加了 24.6% 。

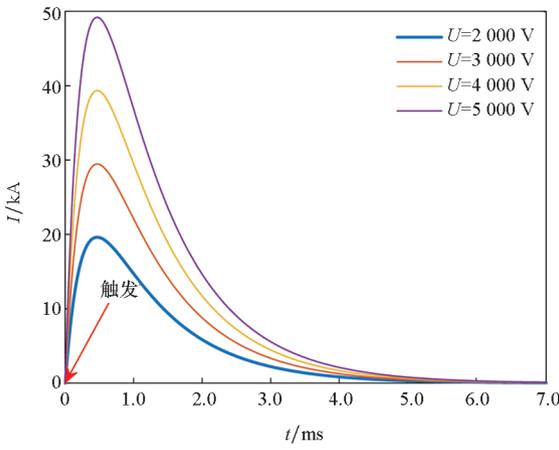
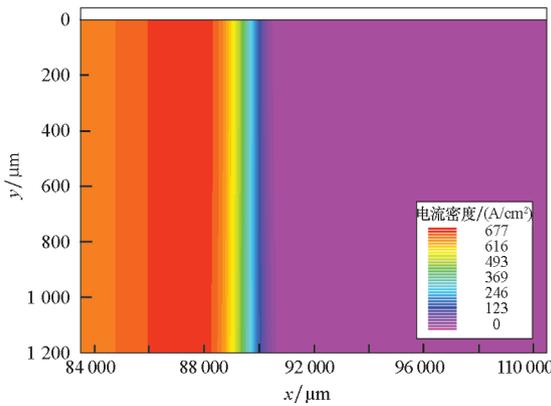


图 4 不同电压下的放电特性曲线

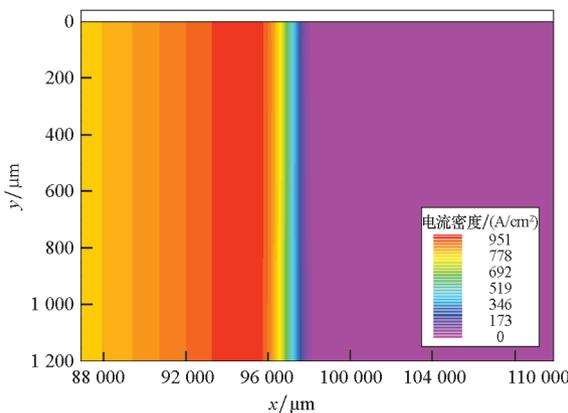
Fig. 4 Discharge characteristic curve under different voltage

经分析,扩展速度加快的主要原因为:放电电流的增大会导致晶闸管扩展过程中局部电流密度的增加,而扩展速度会随着局部电流密度的增大而提高,因此扩展速度会随着电压的升高而加快。



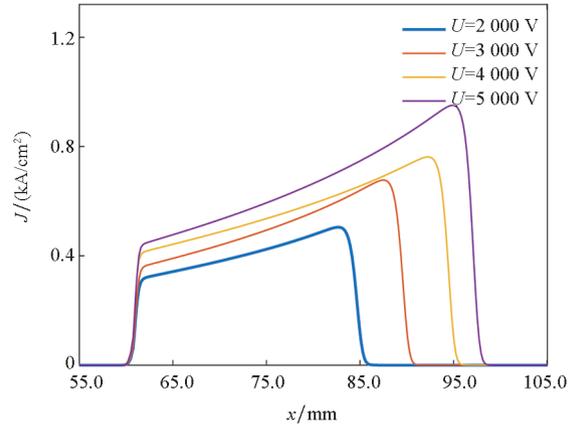
(a) $U=3000\text{ V}, t=0.57\text{ ms}$ 时电流密度分布

(a) Distribution of current density at $U=3000\text{ V}, t=0.57\text{ ms}$



(b) $U=5000\text{ V}, t=0.57\text{ ms}$ 时电流密度分布

(b) Distribution of current density at $U=5000\text{ V}, t=0.57\text{ ms}$



(c) 不同电压下的电流密度对比

(c) Comparison of current density under different voltage

图 5 正向阻断电压的变化对扩展速度的影响

Fig. 5 Influence of forward blocking voltage on spreading speed

3.2 基区载流子寿命

图 6(a)是基区载流子寿命为 $1\ \mu\text{s}$ 时,晶闸管在 0.57 ms 时的电流密度分布情况,可以看到此时扩展到了 $90\ 458\ \mu\text{m}$ 处。图 6(b)是基区载流子寿命为 $10\ \mu\text{s}$ 时,晶闸管在 0.57 ms 时的电流密度分布情况,可以看到此时扩展到了 $107\ 800\ \mu\text{m}$ 处。由扩展速度方程可得,寿命从 $1\ \mu\text{s}$ 增加至 $10\ \mu\text{s}$, v 从 $53\ 435\ \text{mm/s}$ 增加到 $83\ 860\ \text{mm/s}$,增加了 56.9% 。图 6(c)为 $y=600\ \mu\text{m}$ 时不同载流子寿命下的电流密度对比图,可看到随着载流子寿命的增加,晶闸管的扩展速度会显著提高。

扩展速度随载流子寿命的增加而加快的原因是:基区载流子寿命的增加会增大电流放大系数,而随着电流放大系数的增大,晶闸管局部开通的时间会缩短,扩展速度就会变快。式(2)~(5)分别是注入比 γ 、运输系数 β 、电流放大系数 α 以及有效基区宽度 $W_{e(N1)}$ 的表达式,即:

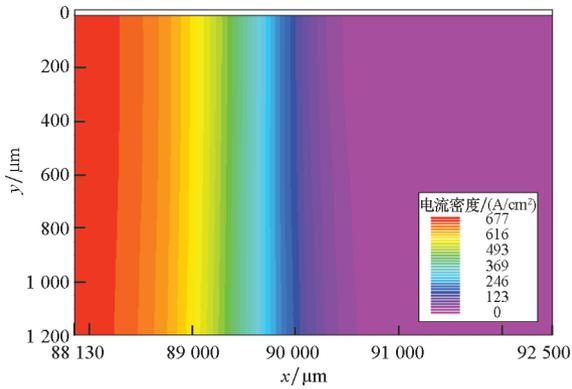
$$\alpha = \beta\gamma \tag{2}$$

$$\beta = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W_{e(N1)}}{L_p} \right)^2 \tag{3}$$

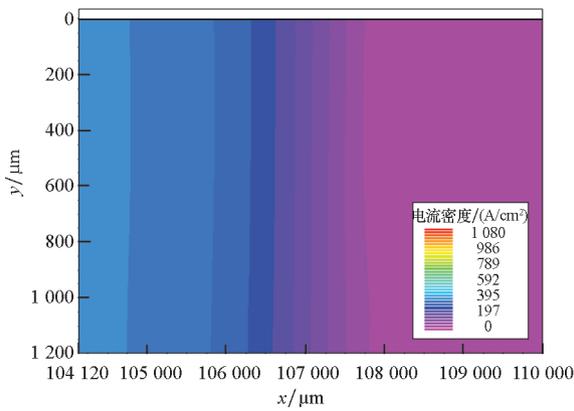
$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{D_n W_{e(N1)} n_{n0}}{D_p L_n P_{p0}}} \tag{4}$$

$$W_{e(N1)} = W_{n(N1)} - X_{m(N1)} \tag{5}$$

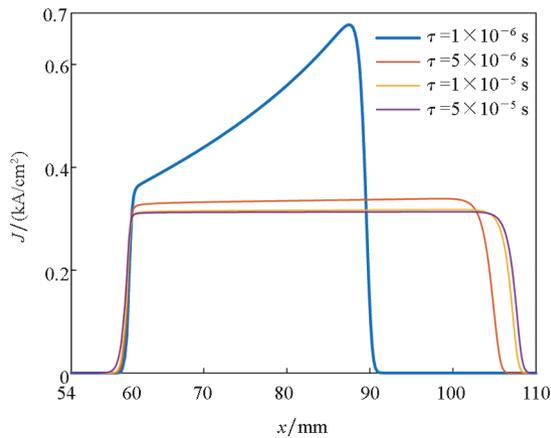
式中: D_n 为电子的扩散系数,单位为 cm^2/s ; L_n 为电子的扩散长度,单位为 cm ; n_{n0} 、 p_{p0} 分别为热平衡下 n 型半导体的电子浓度和 p 型半导体的空穴浓度,单位为 $\text{个}/\text{cm}^3$ 。



(a) $\tau_p = \tau_n = 1 \mu\text{s}, t = 0.57 \text{ ms}$ 时的电流密度分布
(a) Distribution of current density at $\tau_p = \tau_n = 1 \mu\text{s}, t = 0.57 \text{ ms}$



(b) $\tau_p = \tau_n = 10 \mu\text{s}, t = 0.57 \text{ ms}$ 时的电流密度分布
(b) Distribution of current density at $\tau_p = \tau_n = 10 \mu\text{s}, t = 0.57 \text{ ms}$



(c) 不同载流子寿命下的电流密度对比
(c) Comparison of current density under different carrier lifetime

图6 基区载流子寿命的变化对扩展速度的影响

Fig.6 Influence of carrier lifetime change in base region on propagation rate

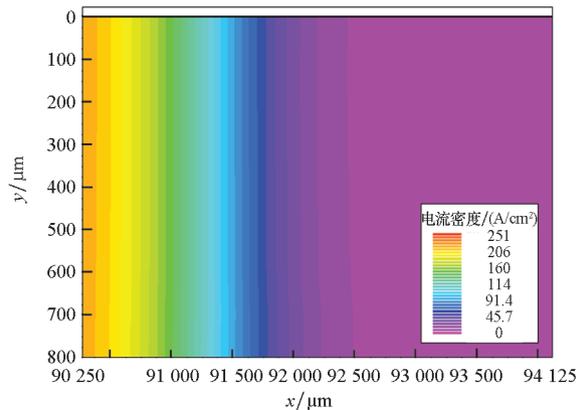
联立式(2)~(5)可得,当固定空穴和电子的扩散系数 D_p 和 D_n 不变,且有效基区宽度 $W_{e(N1)}$ 小于扩散长度 L_p 时,基区载流子的寿命 τ_p 和 τ_n

越长, L_p 和 L_n 越长,注入比 γ 和输运系数 β 就越大,因此电流放大系数 α 也越大,从而扩展速度也就越快。

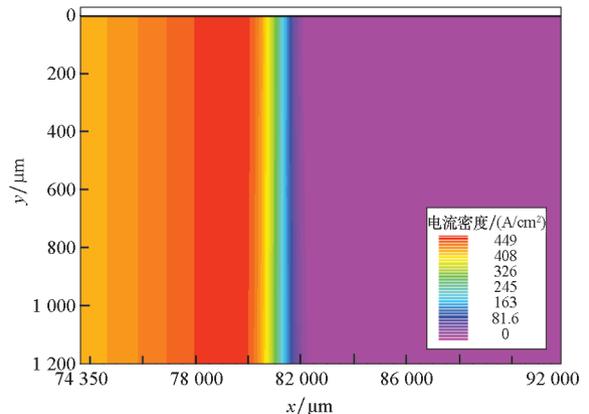
3.3 基区宽度

在其他参数一致的情况下,基区宽度的变化对扩展速度的影响,如图7所示。从图7中可以看到基区宽度的增加会使扩展速度下降,其中基区宽度为 $500 \mu\text{m}$ 的扩展到了 $92\,484 \mu\text{m}$,而基区宽度为 $900 \mu\text{m}$ 的只扩展到了 $82\,191 \mu\text{m}$ 。由扩展速度方程可得,基区宽度从 $500 \mu\text{m}$ 增加至 $900 \mu\text{m}$, v 从 $56\,989 \text{ mm/s}$ 减少到 $38\,932 \text{ mm/s}$, 减少了 31.7% 。

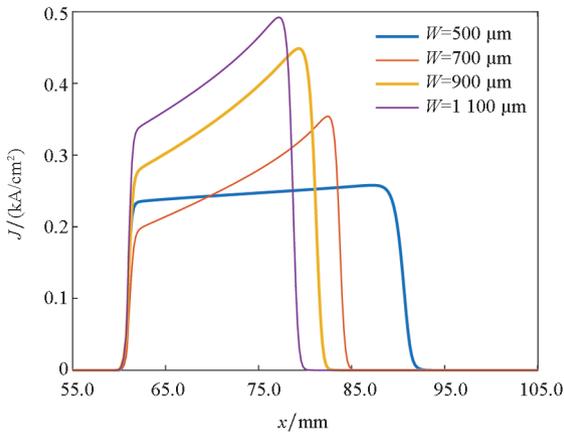
晶闸管的开通,主要是依靠向门极注入触发电流实现的。在门极通入触发电流后,电子首先在门极扩散,穿越空间电荷区,在强电场的作用下,被抽出到N区,会引起空穴的再注入,载流子在晶闸管整个管芯中贯通,直至完全开通^[22]。N基区宽度 $W_{n(N1)}$ 越宽,则载流子需要穿越的距离也会增加,晶闸管的扩展速度也就越慢。



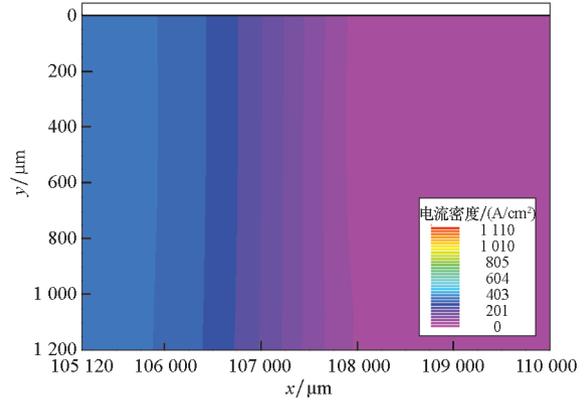
(a) $W = 500 \mu\text{m}, t = 0.57 \text{ ms}$ 时的电流密度分布
(a) Distribution of current density at $W = 500 \mu\text{m}, t = 0.57 \text{ ms}$



(b) $W = 900 \mu\text{m}, t = 0.57 \text{ ms}$ 时的电流密度分布
(b) Distribution of current density at $W = 900 \mu\text{m}, t = 0.57 \text{ ms}$



(c) 不同基区宽度下的电流密度对比
 (c) Comparison of current density under different base width



(b) $T = 330 \text{ K}, t = 0.57 \text{ ms}$ 时的电流密度分布
 (b) Distribution of current density at $T = 330 \text{ K}, t = 0.57 \text{ ms}$

图 7 基区宽度的变化对扩展速度的影响

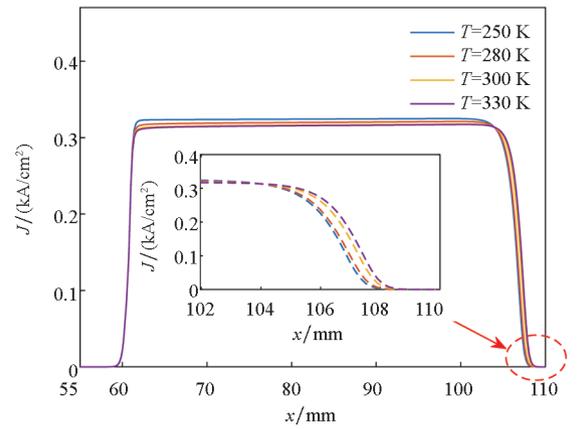
Fig. 7 Influence of base width on the spreading speed

由式(2)~(5)也可得到,当器件的其他参数不变,基区宽度减少时,有效基区宽度会变窄,电流放大系数会增大,从而晶闸管开通后的扩展速度也会增加。

3.4 温度

温度的变化对扩展速度的影响如图 8 所示,在触发后的 0.57 ms,温度为 300 K 时扩展到了 107 800 μm ,而温度为 330 K 时扩展到了 107 950 μm ,随着温度的升高,扩展速度增加得很少。由扩展速度方程可得,温度从 300 K 增加至 330 K, v 从 83 860 mm/s 增加到 84 123 mm/s,仅增加了 0.3%。

温度的升高会提高晶闸管的扩展速度,但是增加得很少,主要是因为随着温度 T 的升高,载流子的扩散系数会由于晶格热运动的加剧而下降,同时载流子的寿命随着 T 的升高有所增加,



(c) 不同温度下的电流密度对比
 (c) Comparison of current density at different temperature

图 8 温度的变化对扩展速度的影响

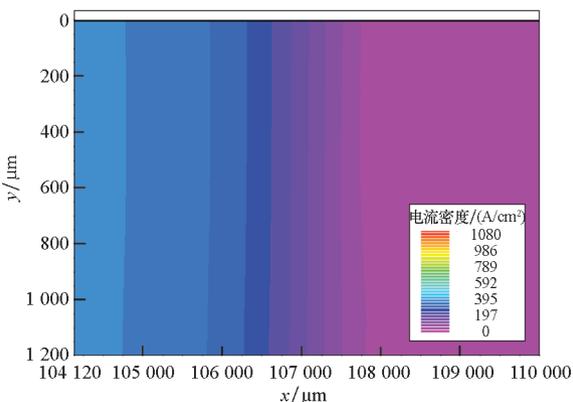
Fig. 8 Influence of temperature change on spreading speed

从而使得载流子的扩散长度仍是有所增加的。由式(2)~(5)可得,当其他参数不变,载流子的扩散长度增加时,电流放大系数也会增加,晶闸管开通后的扩展速度也会增大。

4 结论

本文首先对晶闸管开通过程进行分析,认为在晶闸管开通过程中,扩展速度对其性能有着重要的影响。其次分析了正向阻断电压、基区载流子寿命、基区宽度、温度对扩展速度的影响。最后建立了晶闸管器件和脉冲成形网络等效电路模型,并进行了器件-电路的联合仿真。

分析仿真结果发现:正向阻断电压的增加会影响器件的局部电流密度,从而使扩展速度加快,电压从 3 000 V 提高至 5 000 V 时,扩展速度会增加 24.6%;基区宽度的减少会大大降低载流子穿



(a) $T = 300 \text{ K}, t = 0.57 \text{ ms}$ 时的电流密度分布
 (a) Distribution of current density at $T = 300 \text{ K}, t = 0.57 \text{ ms}$

越基区的时间,也会使扩展速度加快,结果显示基区宽度从 500 μm 增加至 900 μm 时,扩展速度会减少 31.7%;基区载流子寿命的增加、温度的升高都会使扩展速度加快,其中载流子寿命从 1 μs 增加至 10 μs 时,扩展速度增加了 56.9%,而温度从 300 K 增加至 330 K 时,扩展速度仅增加了 0.3%,可以看到温度对扩展速度的影响较小。扩展速度的提高虽然会提高晶闸管的 di/dt 能力,但是并不是越快越好,它和其他许多参数都是矛盾的,如基区宽度的减少会降低器件的耐压能力,正向阻断电压的增加也会要求器件具有更高的耐压和通流能力。因此,要根据提出的指标,选择合适的参数以达到所需的扩展能力,之后设计出满足实际需求的器件。

参考文献 (References)

- [1] ZENG C, DENG L F, LI Z J, et al. Experimental comparison of SiC GTO and ETO for pulse power applications [J]. *Journal of Semiconductors*, 2018, 39(12): 124017.
- [2] GUSEV A, LYUBUTIN S, PATRAKOV V, et al. Fast high-power thyristors triggered in impact-ionization wave mode[J]. *Journal of Instrumentation*, 2019, 14(10): P10006.
- [3] LE D V, GO B S, SONG M G, et al. Development of a capacitor bank-based pulsed power supply module for electromagnetic induction coilguns[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(5): 2458–2463.
- [4] LIEBFRIED O, HUNDERTMARK S, FRINGS P. Inductive pulsed power supply for a railgun artillery system[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(5): 2550–2555.
- [5] 夏吉夫, 潘福泉, 关艳霞. 提高晶闸管 di/dt 能力的研究[J]. *电源技术应用*, 2014(4): 17–22.
XIA J F, PAN F Q, GUAN Y X. Research on enhancement of thyristor di/dt [J]. *Power Supply Technologies and Applications*, 2014(4): 17–22. (in Chinese)
- [6] LONGINI R L, MELNGAILIS J. Gated turn-on of four layer switch[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1963, 10(3): 178–185.
- [7] DODSON W H, LONGINI R L. Probed determination of turn-on spread of large area thyristors[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1966, 13(5): 478–484.
- [8] MATSUZAWA T. Spreading velocity of the on state in high-speed thyristors[J]. *Electrical Engineering in Japan*, 1973, 93(1): 136–141.
- [9] RUHL H J. Spreading velocity of the active area boundary in a thyristor [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1970, 17(9): 672–680.
- [10] SOMOS I, PICCONE D E. Plasma spread in high-power thyristors under dynamic and static conditions [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1970, 17(9): 680–687.
- [11] BERGMAN G D. The gate-triggered turn-on process in thyristors [J]. *Solid-State Electronics*, 1965, 8(9): 757–765.
- [12] 胡秋玲, 刘堃, 陶颖军, 等. 高压直流输电晶闸管阀开关过程的影响因素[J]. *南方电网技术*, 2020, 14(11): 6–13.
HU Q L, LIU K, TAO Y J, et al. Influencing factors for the switching process of thyristor valve in HVDC transmission[J]. *Southern Power System Technology*, 2020, 14(11): 6–13. (in Chinese)
- [13] 王晨, 庄劲武, 张超, 等. 串联晶闸管在大脉冲电流下的开通过程研究[J]. *电机与控制学报*, 2014, 18(3): 14–19.
WANG C, ZHUANG J W, ZHANG C, et al. Research of series thyristor turn-on process with high pulse current[J]. *Electric Machine and Control*, 2014, 18(3): 14–19. (in Chinese)
- [14] 张西应, 任亚东, 唐柳生, 等. 晶闸管触发与开通特性研究[R]. *中国核科学技术进展报告(第四卷)*, 2015: 283–288.
ZHANG X Y, REN Y D, TANG L S, et al. Research on thyristor triggering and turning-on characteristics [R]. *Progress Report on China Nuclear Science & Technology (Vol. 4)*, 2015: 283–288. (in Chinese)
- [15] 项建华, 李漫, 闫志超. 高频晶闸管开通时间的实验研究[J]. *沈阳工业大学学报*, 2005, 27(5): 540–543.
XIANG J H, LI M, YAN Z C. Experimental study on turn-on time of high frequency thyristor [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2005, 27(5): 540–543. (in Chinese)
- [16] LEVINSHTEIN M E, IVANOV P A, AGARWAL A K, et al. On the homogeneity of the turn-on process in high-voltage 4H-SiC thyristors [J]. *Solid-State Electronics*, 2005, 49(2): 233–237.
- [17] EL-SABA M H, ZEKRY A. A fast CAD model of plasma spread in thyristors using a semi-numerical time-domain approach [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1999, 46(9): 1901–1909.
- [18] TENCONI S, ZAMBELLI M. A simple method to evaluate the plasma spreading velocity in high power thyristors [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1980, 1(5): 89–91.
- [19] ADLER M S. Details of the plasma-spreading process in thyristors [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1980, 27(2): 495–502.
- [20] YUFEREV V S, LEVINSHTEIN M E, PALMOUR J W. A model of the turn-on spread in an optically triggered SiC thyristors [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2012, 27(3): 035004.
- [21] SILVACO. ATLAS User's Manual [M]. Santa Clara: SILVACO International Inc., 2012.
- [22] 郭帆, 何小平, 王海洋, 等. 晶闸管触发开通特性[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(10): 2483–2487.
GUO F, HE X P, WANG H Y, et al. Switching characteristics of triggered thyristor [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(10): 2483–2487. (in Chinese)