



高功率微波信号对 PIN 限幅器温度分布的影响特性*

高铭萱¹, 张 洋¹, 张 军²

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科科学院, 长沙 410073; 2. 国防科技大学 理学院, 长沙 410073)

摘 要: 针对高功率微波波形参数对限幅器温度分布特性的影响, 基于双级 PIN 限幅器的场路协同仿真模型对微波脉冲幅值、频率对温度分布的影响展开了仿真研究。结果表明: 微波脉冲幅值、频率的提升会使双级 PIN 限幅器中 PIN 二极管的高温区域分布向 P 区拓展、高温区域分布范围扩大; 相对而言, 微波脉冲幅值对温度分布的影响更为显著, 频率对温度分布的影响相对较小。

关键词: 高功率微波; PIN 限幅器; 微波效应; 热效应; 温度分布

中图分类号: TN385

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202436.230236

Influence of high-power microwave signal on temperature distribution of PIN limiter

Gao Mingxuan¹, Zhang Yang¹, Zhang Jun²

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A field-circuit co-simulation model of a two-stage PIN limiter was built to explore the influence of high-power microwave signal parameters on the temperature distribution of the limiter. The simulation results indicate that the increase in microwave pulse amplitude or frequency can expand the PIN diode's high-temperature region inside the two-stage PIN limiter towards the P-region. Compared with the frequency, the amplitude of the microwave pulse has a more significant impact on the temperature distribution of the PIN limiter.

Key words: high power microwave, PIN limiter, microwave effect, thermal effect, temperature distribution

限幅器是一种用于保护微波设备中敏感元器件(如低噪声放大器等)免受外来大功率电磁信号损伤的保护器件, 常用于各类雷达与通讯系统中。虽然限幅器相对而言不易受损, 但当微波信号高于限幅器的承受阈值时限幅器也会失效^[1]。当前, 随着大功率脉冲体制雷达、高功率微波脉冲等技术的进步, 限幅器所要面对的电磁环境更为复杂、微波信号参数更为多样, 有必要对限幅器在复杂高功率微波参数条件下的温度分布及易损位置变化规律进行研究, 从而为限幅器的散热及防护设计提供参考。

限幅器微波效应的研究一直是限幅器研究的热点, 研究者们就此开展了深入的研究工作, 这些研究表明微波幅值或频率的改变会对限幅器内部的温升速度产生影响^[2-4], 微波脉冲串的引入可以使限幅器更容易升温^[5], 限幅器在温升过程中的峰值温度出现在其中 PIN 二极管的 I 区^[6], I 区厚度的改变也会对限幅器的温升过程产生影响^[5, 7], 微波信号及限幅器结构参数的改变也会对限幅器的尖峰泄漏^[8-9]、限幅持续时间^[10]等瞬态特性产生影响。虽然当前研究已经围绕限幅器的微波效应展开了大量的工作, 但并未针对限幅器的温度分布及易损位置受微波参数的影响进行详细研究。为此, 本文建立了双级 PIN 限幅器的场路协同仿真模型, 并利用这一模型对限幅器的温度分布特性随微波幅值、频率的变化规律及机理进行了研究与分析。

* 收稿日期: 2023-07-04; 修订日期: 2023-11-09

基金项目: 湖南省科技创新计划项目(2021RC2065); 国防科技大学学校科研计划项目(ZK22-42); 湖南省自然科学基金项目(2023JJ40675)

联系方式: 高铭萱, 244736581@qq.com。

通信作者: 张 洋, 16103271g@connect.polyu.hk。

1 场路协同仿真模型

本文所使用的双级 PIN 限幅器场路协同仿真模型如图 1 所示。

由于限幅器的工作特性主要由 PIN 二极管决定,且响应过程中的主要温升区域也位于 PIN 二极管,因此该模型中对前后两级 PIN 二极管应用多物理场仿真模型。PIN 二极管的多物理场仿真模型依据限幅器在大信号作用下的特点选取了包括载流子-载流子散射、掺杂引起的迁移率退化、强场作用下的迁移率饱和在内的迁移率模型,以及 SRH 复合、俄歇复合、雪崩在内的复合与电离模型,并考虑了相关参数的温度依赖性,相关物理模型的引入能够对限幅器在极限状态下的工作特性进行表达。两级 PIN 二极管的多物理场模型结构及掺杂情况如图 2、图 3 所示。

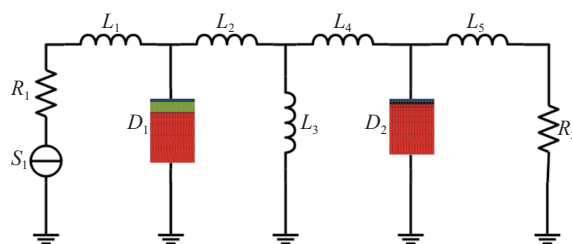


Fig. 1 Field-circuit collaborative simulation model of two-stage PIN limiter

图 1 双级 PIN 限幅器场路协同仿真模型

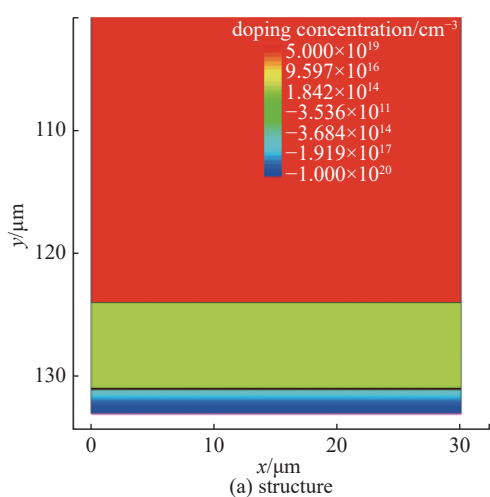


Fig. 2 Structure and doping concentration of the first stage PIN diode

图 2 第一级 PIN 二极管结构及掺杂情况

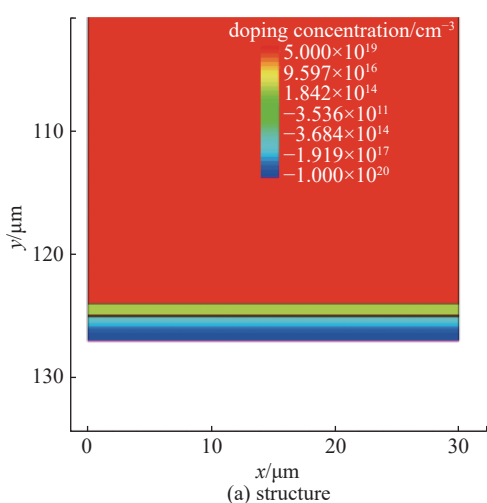


Fig. 3 Structure and doping concentration of the second stage PIN diode

图 3 第二级 PIN 二极管结构及掺杂情况

两级 PIN 二极管的 P 区厚度均为 $2\ \mu\text{m}$, N 区厚度均为 $124\ \mu\text{m}$, P 区均为峰值浓度 $1 \times 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$ 的高斯型掺杂, N、I 区的掺杂浓度均分别为 $5 \times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ 和 $2.5 \times 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$ 。第一级、第二级 PIN 二极管的不同之处在于二者的 I 区的厚度,由于更靠近输入端的第一级 PIN 二极管要承受更大的功率,其 I 区厚度为 $7\ \mu\text{m}$,而第二级 PIN 二极管为了使限幅器有更高的灵敏度,其 I 区厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 。综合考虑本研究所涉及到的较小时间尺度以及实际限幅器中 PIN 二极管的主要散热通道,此处使用上、下两电极恒温 ($T=300\ \text{K}$) 和四周绝热的热边界条件。

而对于限幅器中的电感、电阻, 由于这些电路元件并不是高功率微波效应研究中的重点, 且研究所涉及到信号参数范围内的信号也并未引起以上元器件的损伤, 因此在场路协同仿真模型中对这些元件采用 SPICE 模型。场路协同仿真模型能够在提高仿真计算效率的同时实现对限幅器高功率微波效应的精准仿真, 模型中对易损 PIN 二极管的多物理仿真计算也可为器件的微波效应分析提供支撑。

2 微波参数对温度分布及易损位置的影响

令信号源输出频率 6 GHz、幅值 1000 V 的微波脉冲信号, 得到双级 PIN 限幅器内最高温度达到 Si 熔点(1680 K)时刻前后两级 PIN 二极管的内部温度分布曲线如图 4 所示。可以看到: 限幅器的主要产热位置处于第一级 PIN 二极管的 I 区, 对于该微波参数组合, 易损位置位于 P⁺N 结下方约 2 μm 处。限幅器内部最高温度达到 Si 熔点时, 第二级 PIN 二极管内最高温度仅上升到约 343 K, 最高温度出现位置同样位于 I 区附近, 这一温升不足以对第二级 PIN 二极管的正常工作产生明显影响。

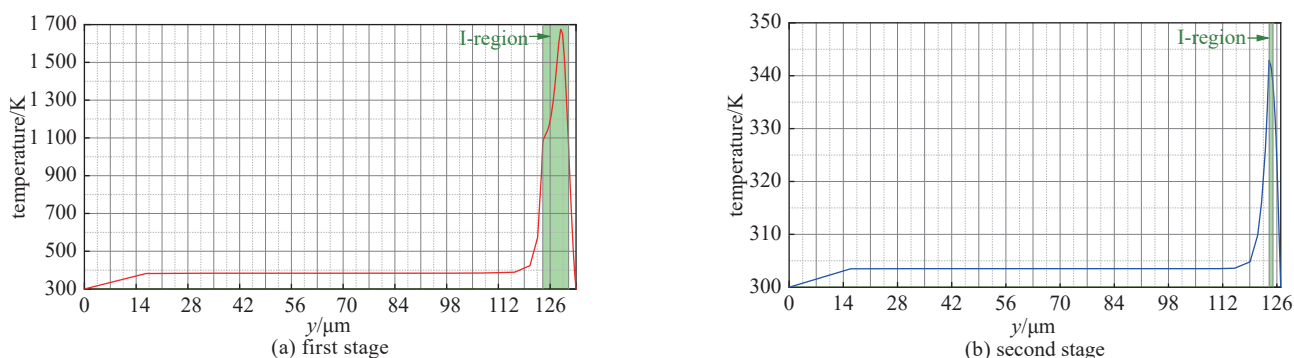


Fig. 4 Curve of the two PIN diodes' temperature distribution inside the limiter at the moment its maximum temperature reaches the melting point of silicon

图 4 限幅器达到 Si 熔点时刻前后两级 PIN 二极管内部温度分布曲线

由于限幅器中的主要温升区域及易损位置处于第一级 PIN 二极管, 因此接下来针对第一级 PIN 二极管进行研究。固定信号源输出频率为 6 GHz 的微波信号, 得到双级 PIN 限幅器中第一级 PIN 二极管在不同电压幅值信号作用下达到 Si 熔点时刻的 I 区温度分布情况如图 5 所示。在信号频率 6 GHz 条件下, 温度极值点的产生位置随着信号电压幅值的增加从 400 V 时对应的 P⁺N 结下方约 4.8 μm 逐步向 P 区靠近, 当电压为 1000 V 时温度极值点的产生位置处于 P⁺N 结下方 2.2 μm 。

进一步以温度 800 K 为例, 认为器件内温度超过 800 K 的范围为高温区域, 不同电压幅值信号作用下器件内部的高温区宽度如表 1 所示, 结合表 1 与图 5 可以看出, 第一级 PIN 二极管内部的高温区分布范围随着电压幅值的提升逐步扩大。

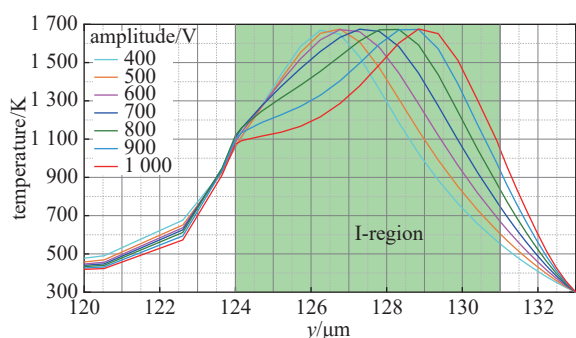


Fig. 5 Temperature distribution under different amplitude (local)

图 5 不同电压幅值下温度分布情况(局部)

表 1 不同电压幅值信号作用下的热区分布范围

voltage/V	width of high-temperature area/ μm
400	6.6
500	6.9
600	7.3
700	7.6
800	7.9
900	8.1
1000	8.3

固定信号源输出电压幅值分别为 400 V 和 1000 V 的微波信号, 得到限幅器在不同频率信号作用下达到 Si 熔点时刻的温度分布情况如图 6 所示。由图 6(a), 对于电压幅值为 400 V 的信号, 温度极值点的产生位置随着频率的提升向 P 区发生了微小的移动, 当频率从 4 GHz 提升至 9 GHz, 温度极值点的产生位置仅移动了约 0.5 μm ; 而对于图 6(b)所示的电压幅值 1000 V 的信号, 频率对温度极值点产生位置的影响几乎可以忽略。由此可以看到, 相比

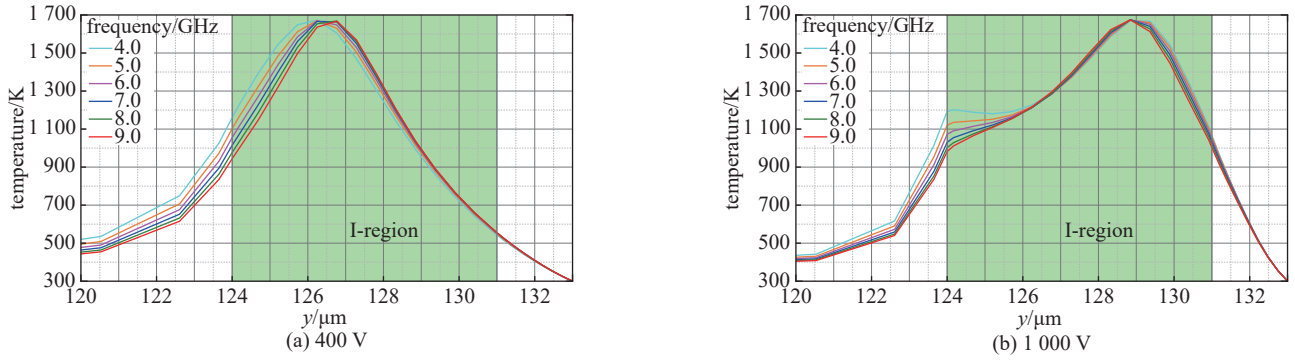


Fig. 6 Temperature distribution under different frequency (local)

图 6 不同频率下的温度分布情况(局部)

于电压幅值对温度分布的影响, 频率对温度分布的影响相对较小, 且频率对大电压幅值信号作用下的温度分布影响更不明显。

3 机理分析

PIN 二极管在微波信号作用下的温度升高可以归结为其功率耗散, 耗散功率密度可以表示为

$$Q = J \cdot E \quad (1)$$

式中: E 表示电场强度; J 为漂移电流, 可表示为

$$J = e(\mu_n n + \mu_p p)E \quad (2)$$

式中: p 、 n 分别为空穴、电子浓度; μ_p 与 μ_n 分别表示空穴与电子的迁移率; e 为单位电荷量。

图 7 给出了当限幅器内部最高温度在不同电压幅值信号作用下达到 Si 熔点时 I 区内的归一化耗散功率分布情况, 结合式(1)可以看到, 器件内耗散功率的分布情况和器件内温度的分布情况具有较高的一致性。

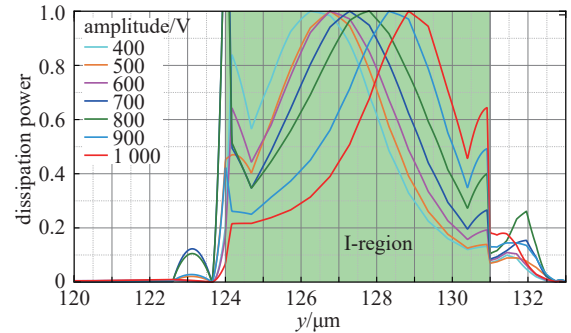


Fig. 7 Normalized dissipation power distribution under the action of signals with different amplitude at the moment the limiter's maximum temperature reaches the melting point of silicon (local)

图 7 不同幅值信号作用下达到 Si 熔点时刻的归一化耗散功率分布(局部)

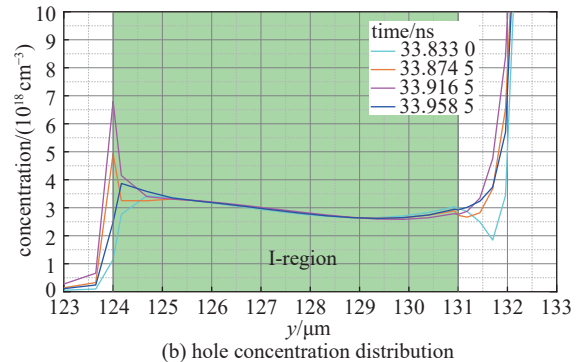
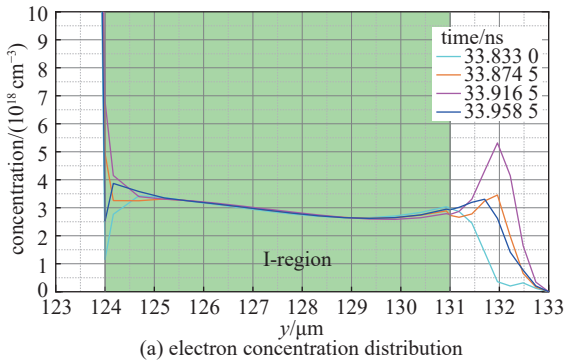


Fig. 8 Electron and hole concentration distribution at different moments in a signal cycle

图 8 一个信号周期中不同时刻的电子、空穴浓度分布

信号源输出频率 6 GHz、幅值 1000 V 的微波信号, 取限幅器内最高温度达到 Si 熔点的温升过程中一个微波信号周期中 4 个时刻(33.8330 ns、33.8745 ns、33.9165 ns、33.9585 ns), 其电子、空穴浓度分布如图 8 所示。该周期中时刻 33.833 ns 与 33.9165 ns 对应了限幅器输入信号的过零点, 33.8745 ns 与 33.9585 ns 分别对应了限幅器输入信号的波峰与波谷。从图 8 可以看到: 电子和空穴浓度在两个 PN 结处发生了较为剧烈的变化, 而 I 区内部的载流子浓度在不同时刻均近似维持稳定。结合式(2)便可知, 电流密度主要取决于电场强度情况。

进一步取该周期中上述时刻(33.8330 ns、33.8745 ns、33.9165 ns、33.9585 ns)器件内部对应的电场强度与电流密度分布情况分别如图 9 与图 10 所示, 对于这 4 个时刻, 第一级 PIN 二极管内部电场强度在限幅器输入信号为波

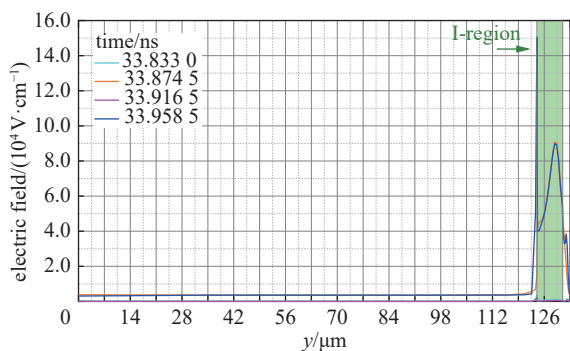


Fig. 9 Electric field distribution at different moment in the signal cycle

图 9 不同时刻的电场强度分布

峰和波谷时较大,这也导致了图 10 所示的波峰和波谷时刻的电流密度较大。

根据图 8 并结合式(2)的理论分析可知,器件中的电流密度主要由电场强度决定,这也与图 9 和图 10 所示的物理图像从不同角度相互印证。由式(1)可知,器件内部的产热位置也主要取决于器件内部电场强度的分布情况。取限幅器内部最高温度达到 Si 熔点时刻 I 区内的电场强度并以除以 I 区内最大场强进行归一化,得到不同幅值微波脉冲作用下限幅器内部最高温度达到 Si 熔点时刻的电场强度分布情况,如图 11 所示。可以看到,电场强度的主要分布位置随电压的提升逐步向 P-N 结靠拢, I 区内电场强度极大值点位置和图 7 所示的耗散功率极值点、图 5 所示的温度极值点的出现位置完全对应,除极值点完全对应外,器件内部的电场强度分布情况和器件内部的耗散功率分布情况、温度分布情况也具有较高的一致性。

4 结 论

本文基于场路协同仿真模型对双级 PIN 限幅器的温度分布情况及易损位置随高功率微波脉冲幅值、频率的变化规律开展了研究。研究表明,双级 PIN 限幅器内部的最高温度产生于第一级 PIN 二极管的 I 区,最高点温度分布位置会随微波幅值或频率的提升向 PIN 二极管的 P 区方向拓展,但频率对温度分布的影响相对较小。另外,限幅器中第一级 PIN 二极管内的热区范围也会随着信号幅值或频率的提升而扩大,但频率对热区范围的影响同样相对较小。机理分析表明,温度极值点产生位置及器件内部温度分布情况主要取决于器件内电场的分布情况,器件内电场分布随微波脉冲参数的变化引起了温度分布的规律性移动。

参考文献:

- [1] Caverly R H, Hiller G. Understanding and modeling the non-monotonic attenuation behavior of PIN limiter diodes[C]//Proceedings of the IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 1998: 849-852.
- [2] 胡凯,李天明,汪海洋,等.多级 PIN 限幅器高功率微波效应研究[J].强激光与粒子束,2014,26: 063015. (Hu Kai, Li Tianming, Wang Haiyang, et al. High power microwave effect of multi-stage PIN limiter[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 063015)
- [3] 赵振国,周海京,马弘舸,等.微波脉冲频率与重频对限幅器热损伤效应的影响[J].强激光与粒子束,2015,27: 103239. (Zhao Zhenguo, Zhou Haijing, Ma Hongge, et al. Influence of frequency and microwave repetition rate on thermal damage process of PIN limiter[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27: 103239)
- [4] 易世鹏,杜正伟,赵景涛,等.频率对 PIN 限幅器微波脉冲热损伤效应的影响[J].电波科学学报,2019,34(4): 479-484. (Yi Shipeng, Du Zhengwei, Zhao Jingtao, et al. The influence of frequency on the thermal burnout effect of a PIN diode limiter[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2019, 34(4): 479-484)
- [5] 王明,马弘舸.组合脉冲内间隔对限幅器热损伤效应的影响[J].强激光与粒子束,2018,30: 063002. (Wang Ming, Ma Hongge. Influence of pulse interval on thermal damage process of PIN limiter[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30: 063002)
- [6] 赵振国,马弘舸,赵刚,等. PIN 限幅器微波脉冲热损伤温度特性[J].强激光与粒子束,2013,25(7): 1741-1746. (Zhao Zhenguo, Ma Hongge, Zhao Gang, et

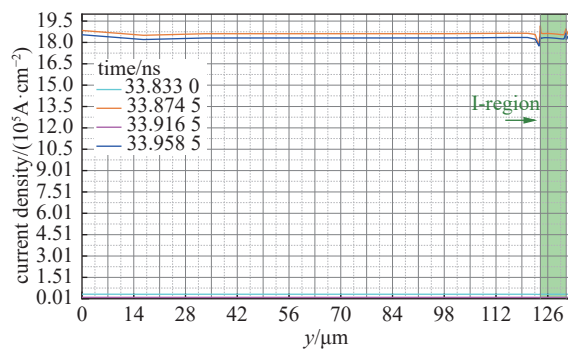


Fig. 10 Current density distribution at different moment in the signal cycle

图 10 不同时刻的电流密度分布

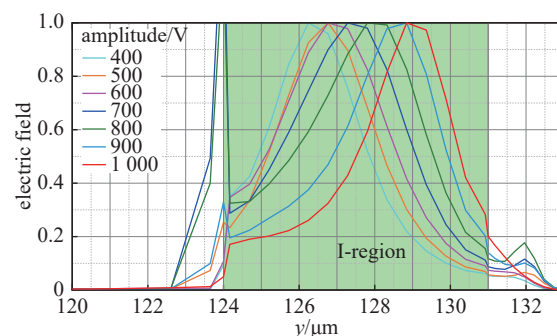


Fig. 11 Normalized electric field distribution under the action of signals with different amplitude at the moment the limiter's maximum temperature reaches the melting point of silicon (local)

图 11 不同幅值信号作用下达到 Si 熔点时刻的归一化电场强度分布(局部)

- al. Characteristics of temperature during PIN limiter thermal damage caused by microwaves[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2013, 25(7): 1741-1746)
- [7] 张永战, 孟凡宝, 赵刚. I 层厚度对限幅器热损伤效应的影响[J]. [强激光与粒子束](#), 2017, 29: 093002. (Zhang Yongzhan, Meng Fanbao, Zhao Gang. Influence of I layer thickness on thermal damage process of PIN limiter[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2017, 29: 093002)
- [8] 陈自东, 秦风, 赵景涛, 等. 高功率微波作用下限幅器尖峰泄漏特性[J]. [强激光与粒子束](#), 2020, 32: 103014. (Chen Zidong, Qin Feng, Zhao Jingtao, et al. Spike leakage characteristic of limiter irradiated by high power microwave[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2020, 32: 103014)
- [9] 李吉浩. 高功率脉冲对 PIN 限幅器的毁伤效应研究[J]. [微波学报](#), 2012, 28(s3): 315-318. (Li Jihao. Research on HPM pulse damage effect of PIN limiter[J]. [Journal of Microwaves](#), 2012, 28(s3): 315-318)
- [10] 袁月乾, 陈自东, 马弘舸, 等. PIN 限幅器的高功率微波单脉冲效应研究[J]. [强激光与粒子束](#), 2020, 32: 063003. (Yuan Yueqian, Chen Zidong, Ma Hongge, et al. High power microwave effect of PIN limiter induced by single pulse[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2020, 32: 063003)