

## 激光与光电子学进展

## 垂直腔面发射激光器中位错形成及扩展特性分析

张玉岐<sup>1,2</sup>, 左致远<sup>1</sup>, 赵佳<sup>1\*</sup><sup>1</sup>山东大学信息科学与工程学院激光与红外系统集成技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266237;<sup>2</sup>厦门市三安集成电路有限公司, 福建 厦门 361000

**摘要** 垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 具有成本低、速率高、功耗低和易于集成等优点, 在短距离数据通信等领域具有广泛的应用。随着使用寿命、失效率等要求的不断提高以及器件应用需求的不断增大, VCSEL 的可靠性受到了人们的广泛关注。研究发现, VCSEL 失效的主要原因与位错的产生和扩展有关。为了提高器件的可靠性, 对 VCSEL 内位错形成的原因进行分析, 并系统介绍了位错扩展的动态特性和内在机理。

**关键词** 激光器; 垂直腔面发射激光器; 可靠性; 位错; 形成原因; 扩展特性

中图分类号 TN365

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213162

## Analysis of Dislocation Formation and Expansion Characteristics in Vertical Cavity Surface Emitting Lasers

Zhang Yuqi<sup>1,2</sup>, Zuo Zhiyuan<sup>1</sup>, Zhao Jia<sup>1\*</sup><sup>1</sup>School of Information Science and Engineering, Key Laboratory of Laser & Infrared System, Shandong University, Qingdao 266237, Shandong, China;<sup>2</sup>Xiamen Sanan Integrated Circuit Co., Ltd., Xiamen 361000, Fujian, China

**Abstract** Vertical cavity surface emitting lasers (VCSEL) have the advantages of low cost, high rate, low power consumption, and easy integration, making them widely used in fields such as short-range data communication. With the increasing requirements of lifetime and failure rate as well as the growing demand of device applications, the reliability of VCSEL has received a lot of attention. It has been found that the main cause of VCSEL failure is related to the formation and expansion of dislocations. In this paper, the causes of dislocation formation in VCSEL are analyzed, and the dynamic characteristics and intrinsic mechanism of dislocation expansion are systematically introduced to contribute to the reliability of the devices.

**Key words** lasers; vertical cavity surface emitting lasers; reliability; dislocation; formation reasons; expansion characteristics

## 1 引言

垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 具有低成本、低阈值、高速率、低功耗和易于集成等优点, 在数据通信、消费电子、激光显示和激光传感等领域具有非常广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。随着应用需求的不断增大、使用寿命和失效率要求的不断提高, 可靠性作为半导体激光器的一个关键指标, 引起了人们的极大关注<sup>[3-4]</sup>。研究发现, 半导体激光器失效的主要原因是产生了位错, 即暗线缺陷 (DL) <sup>[5-8]</sup>。VCSEL 作为半导体激光器的一个重要

分支, 材料体系和结构设计等因素导致 VCSEL 更容易产生位错失效。Honeywell 和 AOC 等公司发现, VCSEL 的最终失效机制很可能与位错的存在或产生有关<sup>[9-10]</sup>。因此, 有必要对半导体激光器尤其是 VCSEL 中位错的产生原因和扩展特性进行研究, 深入了解激光器的失效机理, 进而提高半导体激光器的可靠性。

本文首先分析和总结了与 VCSEL 设计和结构相关的位错产生机理, 然后系统阐述了位错形成后的动态扩展特性, 包括位错的扩展过程、存在的微观形状、

收稿日期: 2021-12-07; 修回日期: 2022-01-12; 录用日期: 2022-01-18; 网络首发日期: 2022-01-28

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFA0209001, 2018YFA0209002, 2018YFB2200700)

通信作者: \*zhaojia@sdu.edu.cn

移动的速度、空间生长方向性和生长模式等,最后对 VCSEL 中位错特性的研究进行总结和展望。

## 2 位错形成的原因及分析

位错指晶体材料内原子局部不规则排列引起的微观缺陷,从几何形态上看,位错是一种线缺陷,包括刃型位错、螺型位错和混合位错类型。位错的形成和运动是涉及原子键断裂和重新结合的物理过程,位错的运动大致可分为滑移和攀移两种类型,如图 1 所示。滑移指位错线沿着滑移面的移动,攀移则指位错线垂直于滑移面的移动<sup>[11-12]</sup>。

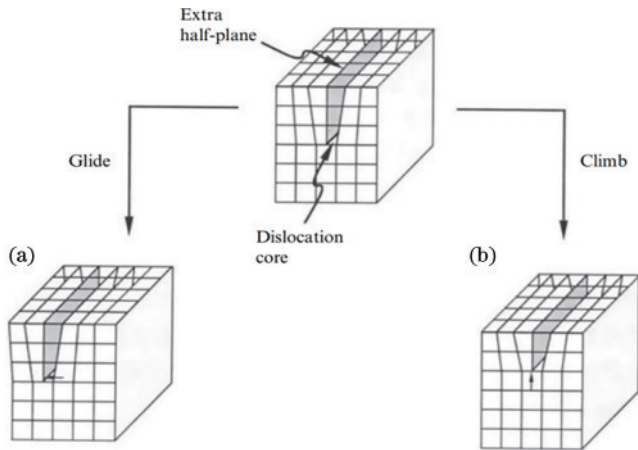


图 1 位错滑移和攀移运动的示意图<sup>[5]</sup>。(a)滑移;(b)攀移  
Fig. 1 Schematic diagrams of dislocation glide and climb motion<sup>[5]</sup>. (a) Glide; (b) climb

位错形成和运动需要一定的能量才能完成,所有可为该过程提供能量或降低阻碍该过程能量的因素都可能是位错形成的原因,包括温度、原子间的结合能、内部晶格失配应力、热应力或外延材料热膨胀系数不同引起的应力、缺陷引起的非辐射复合等<sup>[13-15]</sup>。目前大量商业化应用的 VCSEL 通常采用 GaAs 为衬底的氧化型结构<sup>[16]</sup>,如图 2 所示。其中,DBR 为分布布拉格

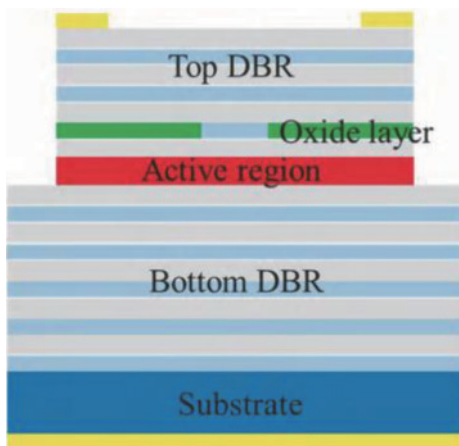


图 2 氧化型 VCSEL 的结构<sup>[2]</sup>  
Fig. 2 Structure of the oxide VCSEL<sup>[2]</sup>

反射镜。器件设计、衬底制备、外延生长、工艺制造和现场应用等环节中导致 VCSEL 产生位错的原因有很多,但与其他类型半导体激光器不同,氧化型 VCSEL 中产生的位错主要是由材料体系、氧化层和器件台面结构导致的。

### 2.1 材料体系

目前应用广泛的氧化型 VCSEL 结构衬底一般为 GaAs 材料,DBR 为含有不同 Al 含量的 AlGaAs 材料交替生长而成,有源区材料一般为 GaAs/AlGaAs 组成的多量子阱(MQW)。研究发现,GaAs/AlGaAs 化合物半导体材料容易形成位错,这可能是由材料的能带间隙、晶体原子结合力、原子尺寸等参数决定的<sup>[17-18]</sup>。一般来说,能带间隙能越大,材料越容易产生位错(如 GaAs 和 GaP),而带隙能较小的材料则不会(如 InGaAsP),原因是能带间隙越大,可提供给缺陷形成的能量就越大,缺陷也越容易产生和运动。但这并不能完全解释位错形成的原因,如 InP 材料具有较大的能带隙能,但却不容易产生位错,因此还有其他机理有待进一步研究<sup>[18-19]</sup>。同时,GaAs 原子间的重建能量相对较弱,导致 GaAs 中位错运动的活化能较低,且重组容易受杂质影响,因此容易形成位错缺陷<sup>[19]</sup>。

### 2.2 氧化层

在氧化限制型 VCSEL 的结构中,氧化层起到限制电流和光场的作用,使器件具有高速率、低阈值和圆形光斑等特性,但氧化层形成后会有较大的机械应力,并且氧化孔边缘是应力集中区域,是导致 VCSEL 失效的主要因素。图 2 的氧化型 VCSEL 结构中,氧化层位于靠近有源区的 p-DBR 区域,厚度一般为 15~30 nm,氧化层是由 AlAs 或含有极少量 Ga 的 AlGaAs 层经过水汽氧化形成氧化铝( $Al_2O_3$ )得到的,AlAs 材料氧化形成  $Al_2O_3$  时体积最大约有 20% 的收缩<sup>[20-21]</sup>,从而在氧化层尤其尖端形成较大的应力。此外,氧化后形成的氧化铝和 DBR 半导体材料的性质差别很大,如氧化层和周围材料之间的热特性不匹配会导致热应力积累在氧化边缘。此外,材料的晶格失配会导致晶体结合力较弱。氧化工艺控制不当很容易在两者界面之间形成分层或裂纹<sup>[22]</sup>,这是位错缺陷的主要形成因素。Herrick 等<sup>[23]</sup>研究了 GaAs 基 VCSEL 位错产生的机理,认为器件内的线位错起源于氧化物尖端后再传播到有源区内,最终导致器件失效,其透射电子显微镜(TEM)图像如图 3 所示。

VCSEL 是一种静电敏感器件,其氧化孔直径较小(一般为 6~12  $\mu\text{m}$ ),使 VCSEL 容易受到静电放电(ESD)或电过应力(EOS)等外界应力的影响,进而导致 VCSEL 失效<sup>[24-27]</sup>。受不同模式的 ESD 冲击后,VCSEL 的损伤位置和大小等失效特征都和氧化层有关<sup>[24]</sup>,图 4 为受到 ESD 冲击后的 TEM 截面图。可以发现,氧化物尖端和有源区域形成了明显位错,损伤总是先发生在氧化物的边缘附近,原因是边缘附近的电



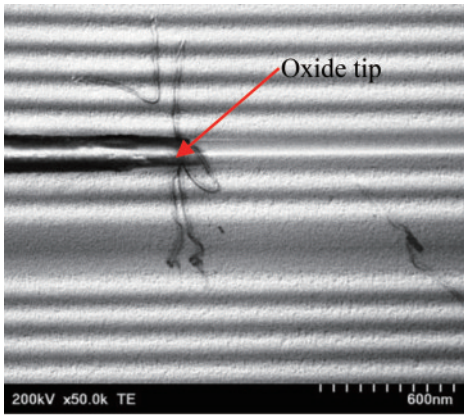


图 3 VCSEL 氧化尖端的横截面 TEM 图像<sup>[23]</sup>

Fig. 3 Cross-section TEM image of the VCSEL from oxide tip<sup>[23]</sup>

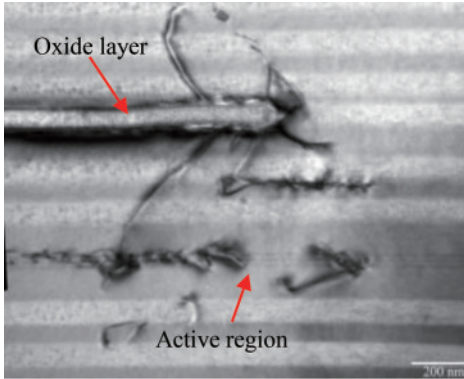


图 4 氧化物 VCSEL 受到 ESD 损伤的 TEM 截面图<sup>[28]</sup>

Fig. 4 Cross-section TEM image of oxide VCSEL damaged by ESD<sup>[28]</sup>

流密度最高<sup>[27]</sup>。

考虑到成本和应用要求,在数据通信中应用的 VCSEL 一般采用非气密封装,而位错是湿热条件下最为常见的一种失效模式。Xie 等<sup>[29-30]</sup>研究发现位错的发生与氧化层有关,而在质子注入 VCSEL 中没有观察到这种失效模式。Dafinca 等<sup>[31]</sup>和 Herrick 等<sup>[23]</sup>研究了湿气腐蚀导致 VCSEL 失效的机理,如图 5 所示。可以发现,湿气腐蚀在氧化尖端附近发生,导致氧化层和周围材料开裂,氧化尖端附近的开裂导致位错向下移

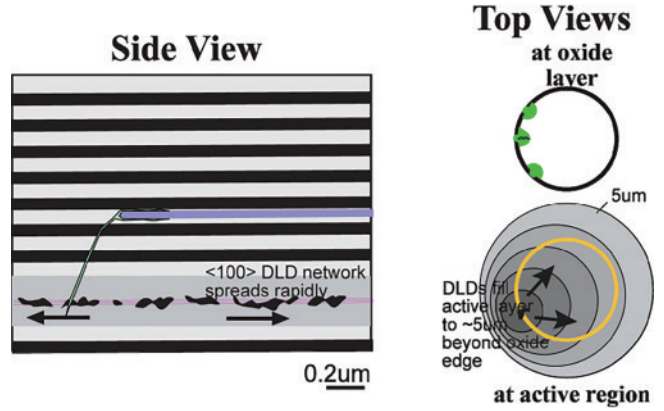


图 5 VCSEL 腐蚀失效机制的示意图<sup>[31]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of VCSEL corrosion failure mechanism<sup>[31]</sup>

动到活性区域,这通常需要数年时间才能生长。但位错渗透到有源区域后,有源区域的 DLD 网络就会迅速增长,并在几分钟内使器件完全失效<sup>[31]</sup>。

### 2.3 台面结构

氧化型 VCSEL 在选择湿法氧化工艺时,需要蚀刻出一个台面柱状(mesa)结构,然后再进行氧化工艺,该结构的设计是导致器件失效的主要因素。首先,器件台面制作过程中涉及蚀刻、清洗、氧化和钝化等工序,台面制作完成后还涉及转运、测试、解离、封装等步骤,加工及使用过程中一种或多种不利因素的组合导致台面边缘附近出现细微的机械损伤。其次,DBR 是由低 Al 含量和高 Al 含量 AlGaAs 材料交替生长而成的,高 Al 含量的材料通常是  $Al_{0.92}Ga_{0.08}As$ ,在实际氧化过程中也会有部分被氧化,一般会向器件内部氧化  $4\mu m$  左右,且 DBR 有很多层,累积应力非常高,应力足够高时会引起分层或裂纹,位错会从氧化物的边缘向有源区移动<sup>[5]</sup>。Helms 等<sup>[32]</sup>和 Herrick<sup>[33]</sup>对失效的 VCSEL 分析发现,台面氧化物的边缘会引起 VCSEL 失效,其 TEM 和扫描电子显微镜(SEM)图像如图 6 所示。可以发现,位错可疑的起点在靠近台面氧化物的边缘,并逐渐向发光区传播,失效的根本原因可能是 DBR 氧化物收缩引入的机械应力。

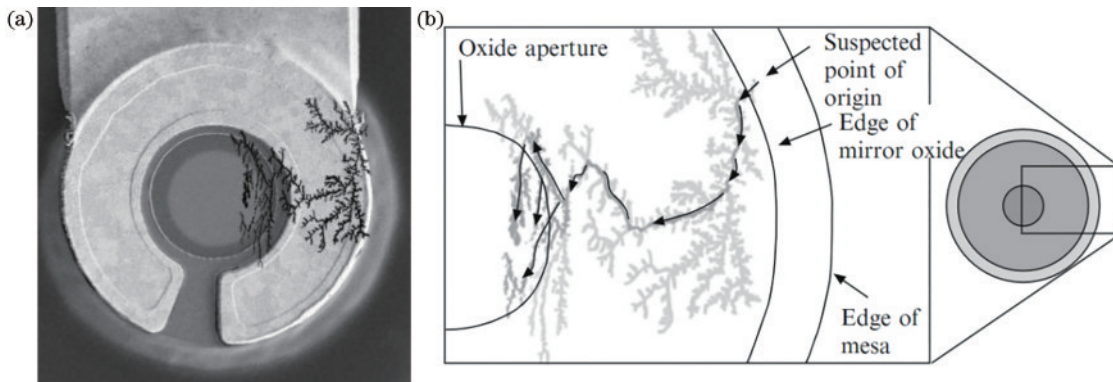


图 6 台面氧化物边缘导致的 VCSEL 失效。(a)失效 VCSEL 的位错图像<sup>[32]</sup>; (b)位错的平面 TEM 图像<sup>[33]</sup>

Fig. 6 VCSEL failure due to mesa oxide edges. (a) Dislocation image of a failed VCSEL<sup>[32]</sup>; (b) plane-view TEM image of dislocation<sup>[33]</sup>

氧化型 VCSEL 快速退化失效的过程分为两个步骤,如图 7 所示。非辐射复合增强位错滑移(REDG)发生在积累一定的应力区域,如 P 电极的金属化 a、氧化物孔径的边缘 b、腐蚀台面的氧化侧壁的裂纹 c、腐蚀台面

的边缘 d。当位错遇到有源区时,通过非辐射复合增强位错攀移(REDC)生成位错网络<sup>[18,34]</sup>。其中,关于非辐射复合增强作用背后的具体机制还没有完全阐明,很多争论都是基于推测的,这将是今后研究的主要课题<sup>[18]</sup>。

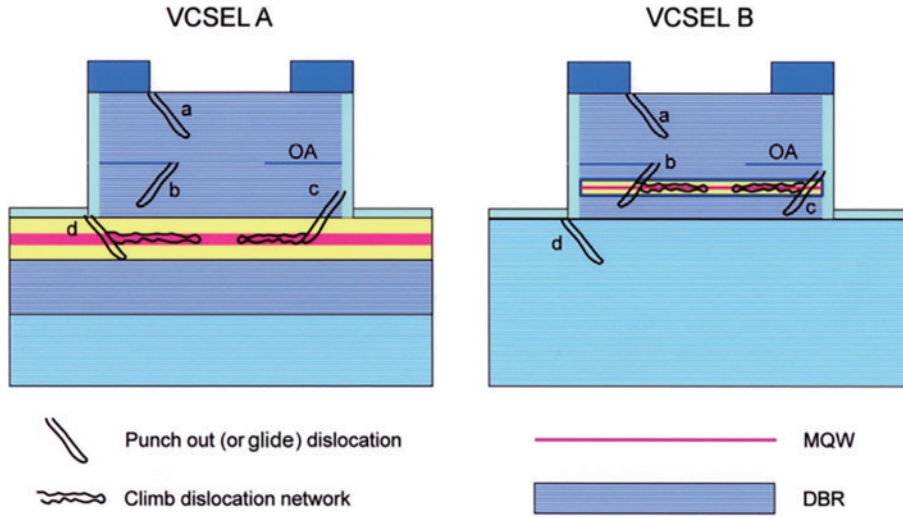


图 7 VCSEL 的两步退化模式<sup>[18]</sup>  
Fig. 7 Two-step degradation mode of the VCSEL<sup>[18]</sup>

### 3 位错扩展的动态特性

#### 3.1 位错扩展的过程及形状

##### 3.1.1 扩展的受力分析

帮助位错克服阻力越过障碍的动力包括有效应力、温度导致的热激活过程,此外,非辐射复合增强作用可以降低位错的激活能,增加位错运动的能量<sup>[35-36]</sup>。位错运动受到的阻力包括点阵阻力(P-N力),线张力,点缺陷、晶界和其他位错的相互作用力等<sup>[35-36]</sup>。

1)点阵阻力:即使在无任何缺陷情况下,位错运动也需克服滑移面两侧原子间相互作用力(最基本阻力),称为点阵阻力。

2)线张力:位错能量与其长度成正比,当位错受力弯曲,位错线增长,其能量也会相应增高。从能量的角度来看,位错长度会有缩短趋势,从而会产生线张力。线张力是位错的一种弹性性质。

3)晶体中其他缺陷(如点缺陷、其他位错、晶界、杂质)都会与位错发生交互作用,从而引起位错滑移的阻力。

实际晶体中的位错运动受到的应力多且复杂,有长程的应力,如平行位错之间的交互作用,位错网络之间的交互作用,也有位错交截产生的割阶等短程应力,图 8 标识出了晶体内起伏的内应力场。

##### 3.1.2 扩展的过程

当位错能量高于 Peierls 势垒时,会产生位错运动。受能量影响,位错不会整体进行迁移,而是以原子尺度的偏移完成该过程,从而形成扭折(kink)。扭折的形状和长度取决于势垒的大小,如图 9 所示。可以

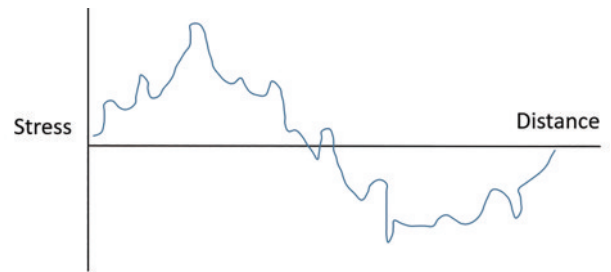


图 8 晶体中内应力场示意图<sup>[36]</sup>  
Fig. 8 Schematic diagram of internal stress field in crystal<sup>[36]</sup>

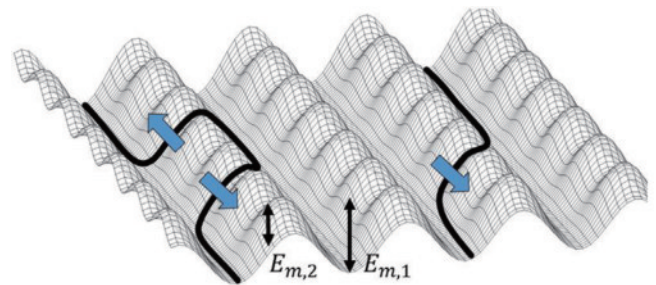


图 9 位错滑移过程形成扭折示意图<sup>[37]</sup>  
Fig. 9 Schematic diagram of kink formed during dislocation glide process<sup>[37]</sup>

发现,双扭结(左位错)和单扭结(右位错)的形成需要在小段内克服主要的 Peierls 势垒( $E_{m,1}$ ),这些扭结的后续扩展或侧向迁移需要克服较小的次级 Peierls 势垒( $E_{m,2}$ )<sup>[37]</sup>。

位错克服 Peierls 势垒产生滑移运动可以通过扭结对形成和扭结迁移这两个连续过程实现,即先在直线位错上形成扭结对,随后生成的扭结沿着位错迁移,



最终整个位错滑移的距离等于伯格斯矢量( $b$ )的大小<sup>[18]</sup>,如图 10 所示。可以发现,半导体中位错的运动是由扭折处强方向键的断裂和重新连接调节的,控制位错速度的活化能由扭结对形成能和扭结迁移势垒组成<sup>[5]</sup>。在无扭折碰撞的情况下,滑移速度与位错长度

成正比。原因是扭结可能在位错的任意一点随机形成,且位错越长,扭结形成的位置越多,位错滑移就会越快。已有报道中,GaAs 中短位错的滑移速度与位错的长度成正比<sup>[38]</sup>,而关于半导体中位错滑移的微观机制还需要更多的工作进一步阐明。

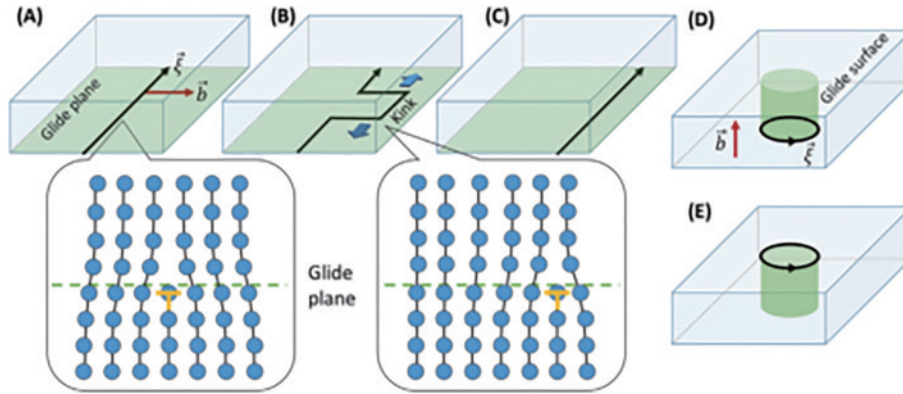


图 10 位错滑移运动的示意图<sup>[18]</sup>

Fig. 10 Schematic diagram of the dislocation glide motion<sup>[18]</sup>

### 3.1.3 扩展的形状

位错扩展的形状和长度是能量和受力相互平衡的结果。从能量角度来看,位错会尽可能地位于势能谷中使能量最低,如图 11 中的 A 所示,但此时位错运动所需的 P-N 力较大。从受力角度来看,位错的线张力使得位错尽可能变短变直,如图 11 中的 B 所示,此时的位错能量较高,但位错运动所需的 P-N 力较小,移动的能量较小。实际位错的形状介于二者之间,会以弯曲的形状存在(扭折),如图 11 中的 C 所示<sup>[39]</sup>。

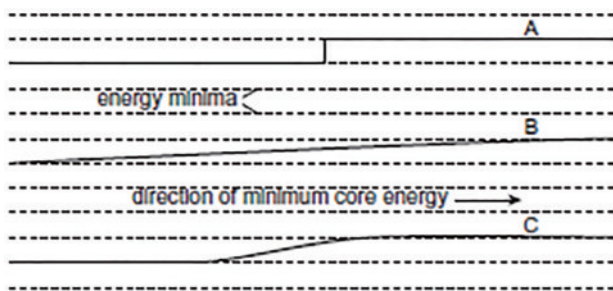


图 11 位错形状示意图<sup>[39]</sup>

Fig. 11 Schematic diagram of the dislocation shape<sup>[39]</sup>

### 3.2 位错扩展速度

位错扩展速度是动态特性的一个关键参数,也是反映原子核重建的一个重要特性,位错速度主要由以下几方面因素决定。

1) 温度、电流和应力会严重影响位错的运动速度。激光器在高温、高电流和高应力驱动下会加速老化,是影响其寿命的主要因素,这些外在驱动应力提供了位错产生以及运动的能量,器件内的位错会在高温、高应力和高电流催化下产生、扩展直至器件失效<sup>[34]</sup>。

Maeda 等<sup>[40-41]</sup>通过实验详细地测量了 GaAs 中  $\alpha$  位

错(As-core)和  $\beta$  位错(Ga-core)速度与测试温度、辐照强度和施加应力的关系。其中,GaAs 中  $\alpha$  位错的速度和温度以及辐照的关系如图 12 所示。可以发现,位错滑移速度和温度呈现指数关系,位错运动在 GaAs 中是一个强烈的热激活过程,在温度 300 K 以下几乎被冻结。

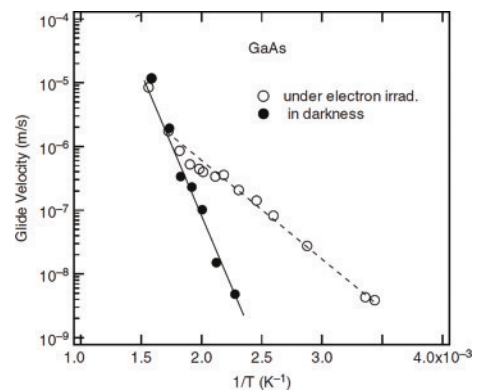


图 12 GaAs 中  $\alpha$  位错速度和温度的依赖关系<sup>[5]</sup>

Fig. 12 Temperature dependence of  $\alpha$  dislocation rate in gallium arsenide<sup>[5]</sup>

DLD 的增长强烈依赖于驱动条件,略微降低电流就会明显减慢 DLD 的增长。研究发现,在没有电流的情况下,将一个新的(很快失效)半导体激光器置于高达 800 °C 温度中,不会诱导位错的生长,从而确认依赖于少量载流子注入的失效机制的作用<sup>[42]</sup>。即:没有电流注入时,在接近结构失效极限的应力下,半导体激光器不会观察到位错生长;没有施加应力时,在高电流注入下也没有缺陷产生;同时施加应力和电流的情况下,退化率对应力和电流的依赖性显著增加。因此,注入即非辐射复合能源和应力对缺陷的快速生长都是必要

的, 电流注入的应用可将位错滑移的应力阈值降低一个数量级<sup>[34,43]</sup>。

2) 扭结形成和迁移的能量: 位错运动会以扭折的形式扩展, 包括扭折的形成和迁移两个过程, 受到晶体的结构和成键能量等影响。

3) 晶体掺杂类型和含量<sup>[19,44]</sup>: 已有研究表明, III-V 材料不同类型位错的速度不同, 且强烈依赖于掺杂, 如 Choi 等<sup>[45]</sup>的研究发现在 n 型和 p 型掺杂 GaAs 中  $\alpha$  位错和  $\beta$  位错运动速度差异迥异。

Maeda 等<sup>[40,46-48]</sup>研究了半导体材料内位错的移动速度和温度、电流、应力以及材料的激活能等关系发现, 位错在晶体中的移动速度上限为晶体中的声速, 温度的影响关系符合 Arrhenius 方程, 电流和应力对位错速度的影响是幂级数的关系<sup>[49]</sup>, 可表示为

$$v = A + B \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right)^m \cdot \left( \frac{I}{I_0} \right)^n \cdot \exp \left( \frac{E_a}{k_B T} \right), \quad (1)$$

式中:  $A$  和  $B$  为比例常数;  $\tau$  为应力;  $I$  为电流密度;  $T$  为温度;  $\tau_0$  和  $I_0$  为归一化常数;  $E_a$  为激活能;  $k_B$  为玻尔兹曼常数;  $m$  和  $n$  为幂指数。

### 3.3 位错生长的方向性和模式

#### 3.3.1 空间方向性

根据晶体材料和器件结构的各向异性, 位错生长具有空间方向性。Petroff 等<sup>[6,41,50]</sup>在对 VCSEL 的可靠性的研究中发现, 位错的空间范围可被认为局限于有源区域, 如图 13 所示。原因是相对于有源区域, 包覆层和 DBR 区域通常处于压缩应变状态, 这不利于超过该界面的位错生长, 且载流子复合大部分局限在有源区内。并且研究发现位错生长速度具有空间位置的选择性, 位错在孔径边缘附近每生长  $1 \mu\text{m}$  需要数十或数百小时, DLD 越靠近发光区, 光泵浦强度就越强, DLD 生长速率迅速提高, 进入光圈后, DLD 只需几分钟就可以生长到  $1 \mu\text{m}$ <sup>[51]</sup>。

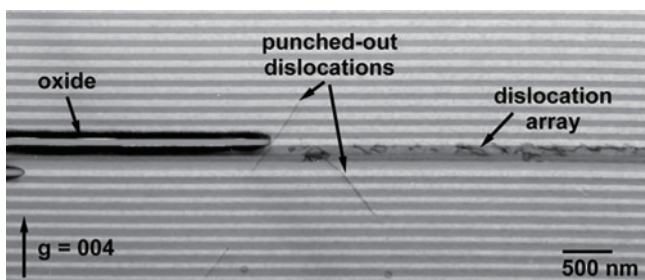


图 13 失效 VCSEL 的 TEM 截面图<sup>[41]</sup>

Fig. 13 Cross-section TEM of failed VCSEL<sup>[41]</sup>

位错空间方向性生长的机理如图 14 所示。Hutchinson 等<sup>[52]</sup>提出了一个简单的模型解释 DLD 通过位错爬升导致  $\langle 100 \rangle$  方向的增长, 如图 14(a) 所示。在 GaAs 外延过程中产生的螺位错通常可用伯格向量  $\mathbf{b} = a/2[011]$  表示, 其所在的爬升平面与向量  $\mathbf{b}$  正交。由于所在区域内少数载流子复合的数量迅速减

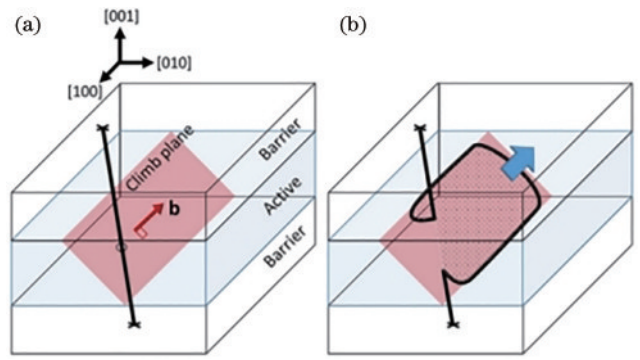


图 14 复合增强位错爬升过程导致位错偶极子的形成<sup>[18]</sup>。

(a) 初始螺位错; (b) 爬升后的位错

Fig. 14 Process for recombination-enhanced dislocation climb leading to the formation of a dislocation dipole<sup>[18]</sup>.

(a) Initial screw dislocation; (b) dislocation after climbing

少, 位错沿该平面向上攀升时, 穿过活性层/势垒界面的位错爬升在屏障之外停止(或显著减慢), 但在有源区域继续, 如图 14(b) 所示。

#### 3.3.2 生长模式

扩展生长模式发生在许多物理系统中, 如金属的电解生长期间。这些生长模式可以按形状分类, 如图 15 所示。根据驱动和环境条件而有所不同, 控制复杂生长模式的机制主要有 3 种, 驱动力的强度、生长界面的不稳定性和材料的各向异性<sup>[34]</sup>。一般来说, 更高的驱动力和更大的各向异性在材料系统会形成更少的分支和更多的拉长图案; 相反, 则会产生稠密且均匀的(径向)图案<sup>[10,53]</sup>。对于位错阵列, 影响生长模式的因素可能包括残余应力场、点缺陷梯度和位错线张力等: 位错形成的条件可能是由于相对较高的残余应力, 且相对各向异性; 位错偶极子的分支性质可能是由于部分非辐射复合增强效应引起的模式生长的不稳定性<sup>[54]</sup>; 长而细的位错臂可能与扩散受限的聚集机制有关。根据位错的生长形态, 树枝状生长和扩散限制聚集(DLA)是退化的 VCSEL 中位错模式最相关的特征。其中, DLA 模型能根据简单的算法生成复杂的图

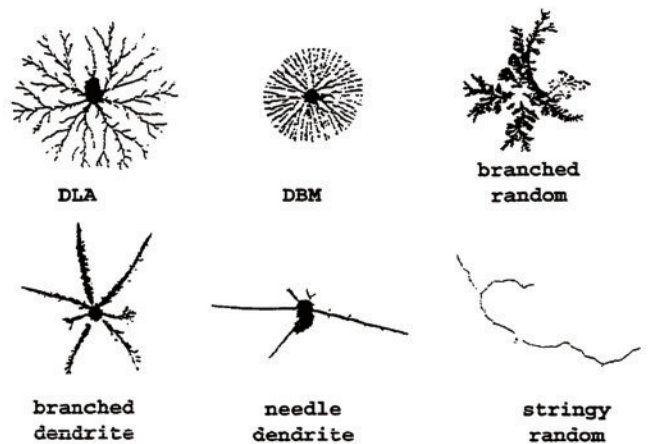


图 15 各种扩展模式增长形状<sup>[34]</sup>

Fig. 15 Growth shapes of various expansion modes<sup>[34]</sup>



案,广泛存在于自然现象中,如电介击穿、溶液薄膜中的晶体生长、电沉积结晶和无规枝蔓状生长过程<sup>[55]</sup>。这种效应产生了一种随机分支模式,是未来模拟位错形貌时可以重点参考的一种模型。

### 3.4 位错扩展的建模与仿真

半导体激光器内位错的形成和生长因素较为复杂,且难以量化,关于位错动态扩展方面的建模与仿真目前报道较少。但在金属塑性变形研究方向有很多关于位错动态模拟的研究,包括关于位错密度的演化动力学方面的理论研究<sup>[56-60]</sup>以及基于分子动力学、离散位错动力学和扩展有限元方法的计算机模拟<sup>[61-65]</sup>。

位错密度的演化动力学就是位错花样的生长与演化,通过分析大量位错的集体变化行为人们提出了很多模型,如Holt模型<sup>[56]</sup>、位错组合模型<sup>[57]</sup>、反应-扩散动力学模型(Walgraef-Aifantis模型<sup>[58]</sup>和Kratochvil模型<sup>[59]</sup>),解决了位错花样演化和材料塑性变形的力学特性。金属材料塑性变形领域的研究通过研究位错-晶界的交互作用获得材料的力学行为和内在机理,在原子尺度上有第一性原理和分子动力学方法<sup>[61-62]</sup>,在微观和介观尺度上通过离散位错动力学方式实现<sup>[63]</sup>,在宏观尺度上有有限元方法等<sup>[64]</sup>。此外,可将晶体中的位错看成一种连续介质内的弹性波进行研究<sup>[66-67]</sup>。

## 4 结 论

半导体激光器的失效模式主要与位错的产生和扩展有关,因此对VCSEL中位错的产生原因及机制和位错产生后扩展的动态性质进行了总结分析。与其他类型半导体激光器不同,氧化型VCSEL中位错形成的主要原因包括材料体系、氧化层应力和台面结构等3个方面。GaAs基VCSEL由于晶体结构和原子间结合力等因素易产生位错缺陷,可通过在量子阱材料中加入适量的钢引入压缩应变和晶格硬化,以阻碍或减缓位错产生。氧化层较大的机械收缩应力及其与周围半导体材料的性质差异会引入器件内部的固有缺陷,是位错产生的主要源头,降低氧化层的体积收缩和应力是降低该方面缺陷的主要措施。VCSEL的台面结构边缘由于氧化应力累积或外界机械损伤是位错形成的主要位置,通过钝化台面边缘或设计无氧化物的台面边缘结构可避免位错形成。关于VCSEL中的位错研究报道主要集中在器件可靠性失效后的现象,但对其产生机理没有很好地阐明,未来还需进行更深入的研究。

位错形成后的扩展生长受器件内部和外部等因素的影响(内部因素包括晶体结构、原子键能、晶界、杂质和缺陷等,外部因素包括温度、注入电流和应力等),导致位错在受力和能量平衡下以一定的形态存在,扩展生长具有空间方向性和各向异性等特性。关于位错动态扩展的计算模拟目前主要集中在单质均匀材料的塑性变形过程,涉及的计算方法主要是基于原子尺度的

物理第一性模型,模拟解在时间和空间尺度上的计算代价较大,不适用于VCSEL这种具有复杂结构和各向异性材料体系的模拟研究。目前,关于VCSEL中位错的传播扩展、随机形貌等中间动态过程的研究报道相对较少,这将是未来研究的重点方向。通过建立位错随机扩展的物理唯象模型,量化器件结构、材料选型和电流、温度等外界参数的影响,深入了解位错形成的原因、分布和扩展的性质等内在机理,从而对半导体激光器内部产生的位错缺陷进行有效的仿真和预测控制,具有重要的理论与实际意义。

## 参 考 文 献

- [1] 王翔媛,崔碧峰,李彩芳,等.垂直腔面发射激光器横模控制方法的研究进展[J].激光与光电子学进展,2021,58(7):0700008.  
Wang X Y, Cui B F, Li C F, et al. Research progress of transverse mode control for vertical cavity surface emitting lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0700008.
- [2] 刘安金.单模直调垂直腔面发射激光器研究进展[J].中国激光,2020,47(7):0701005.  
Liu A J. Progress in single-mode and directly modulated vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701005.
- [3] 陈良惠,杨国文,刘育衍.半导体激光器研究进展[J].中国激光,2020,47(5):0500001.  
Chen L H, Yang G W, Liu Y X. Development of semiconductor lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500001.
- [4] 孙天宇,夏明俊,乔雷.半导体激光器失效机理与检测分析研究进展[J].激光与光电子学进展,2021,58(19):1900003.  
Sun T Y, Xia M J, Qiao L. Failure mechanism and detection analysis of semiconductor laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1900003.
- [5] Ueda O, Pearton S J. Materials and reliability handbook for semiconductor optical and electron devices[M]. New York: Springer, 2013.
- [6] Petroff P, Hartman R L. Defect structure introduced during operation of heterojunction GaAs lasers[J]. Applied Physics Letters, 1973, 23(8): 469-471.
- [7] Hutchinson P W, Dobson P S, O'Hara S, et al. Defect structure of degraded heterojunction GaAlAs-GaAs lasers [J]. Applied Physics Letters, 1975, 26(5): 250-252.
- [8] Ueda O. On degradation studies of III-V compound semiconductor optical devices over three decades: focusing on gradual degradation[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2010, 49(9): 090001.
- [9] Hawkins B M, Hawthorne R A, Guenter J K, et al. Reliability of various size oxide aperture VCSELs[C]//52nd Electronic Components and Technology Conference 2002. (Cat. No. 02CH37345), May 28-31, 2002, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2002: 540-550.
- [10] Mathes D, Guenter J, Tatum J, et al. AOC moving

- forward: the impact of materials behavior[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 4994: 162-172.
- [11] Cottrell A H. Theory of dislocations[J]. Progress in Metal Physics, 1949, 1: 77-126.
- [12] Hull D, Bacon D J. Introduction to dislocations[M]. Amsterdam: Elsevier, 2011.
- [13] Ueda O, Imai H, Fujiwara T, et al. Abrupt degradation of three types of semiconductor light emitting diodes at high temperature[J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51(10): 5316-5325.
- [14] Mukherjee K, Selvidge J, Jung D, et al. Recombination-enhanced dislocation climb in InAs quantum dot lasers on silicon[J]. Journal of Applied Physics, 2020, 128(2): 025703.
- [15] O'Hara S, Hutchinson P W, Dobson P S. The origin of dislocation climb during laser operation[J]. Applied Physics Letters, 1977, 30(8): 368-371.
- [16] Tatum J A. Evolution of VCSELs[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9001: 90010C.
- [17] Jiménez J. Laser diode reliability: crystal defects and degradation modes[J]. Comptes Rendus Physique, 2003, 4(6): 663-673.
- [18] Herrick R W, Ueda O. Reliability of semiconductor lasers and optoelectronic devices[M]. Amsterdam: Elsevier, 2021.
- [19] Jones R. Do we really understand dislocations in semiconductors? [J]. Materials Science and Engineering: B, 2000, 71(1/2/3): 24-29.
- [20] Twesten R D, Follstaedt D M, Choquette K D, et al. Microstructure of laterally oxidized  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  layers in vertical-cavity lasers[J]. Applied Physics Letters, 1996, 69(1): 19-21.
- [21] Choquette K D, Geib K M, Chui H C, et al. Selective oxidation of buried AlGaAs versus AlAs layers[J]. Applied Physics Letters, 1996, 69(10): 1385-1387.
- [22] Freymann G V, Schoenfeld W V, Rumpf R C, et al. Reliability and manufacturability of 25G VCSELs with oxide apertures formed by *in-situ* monitoring[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10115: 1011519.
- [23] Herrick R W, Dafinca A, Farthouat P, et al. Corrosion-based failure of oxide-aperture VCSELs[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2013, 49(12): 1045-1052.
- [24] Mathes D, Guenter J, Hawkins B, et al. An atlas of ESD failure signatures in vertical cavity surface emitting lasers[C]//ISTFA 2005: Conference Proceedings from the 31st International Symposium for Testing and Failure Analysis, November 6-10, 2005, San Jose, California, USA. Materials Park: ASM, 2005: 336-343.
- [25] Krueger J J, Sabharwal R, McHugo S A, et al. Studies of ESD-related failure patterns of Agilent oxide VCSELs [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4994: 162-172.
- [26] Vanzi M, Mura G, Marcello G, et al. ESD tests on 850 nm GaAs-based VCSELs[J]. Microelectronics Reliability, 2016, 64: 617-622.
- [27] Guenter J K, Tatum J A, Hawthorne R A, et al. VCSELs at Honeywell: the story continues[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5364: 34-46.
- [28] McHugo S A, Krishnan A, Krueger J J, et al. Characterization of failure mechanisms for oxide VCSELs [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4994: 55-66.
- [29] Xie S N, Herrick R W, Chamberlin D, et al. Failure mode analysis of oxide VCSELs in high humidity and high temperature[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(4): 1013-1019.
- [30] Xie S N, Herrick R W, De Brabander G N, et al. Reliability and failure mechanisms of oxide VCSELs in nonhermetic environments[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4994: 173-180.
- [31] Dafinca A, Weidberg A R, McMahon S J, et al. Reliability and degradation of oxide VCSELs due to reaction to atmospheric water vapor[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8639: 152-161.
- [32] Helms C J, Aeby I, Luo W L, et al. Reliability of oxide VCSELs at emcore[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5364: 183-189.
- [33] Herrick R W. Design for reliability and common failure mechanisms in vertical cavity surface emitting lasers[J]. MRS Online Proceedings Library, 2012, 1432(1): 9-20.
- [34] Mathes D T. Materials issues for VCSEL operation and reliability[D]. Virginia: University of Virginia, 2002.
- [35] Mauro J C. Motion of dislocations and interfaces[M]//Materials kinetics. Amsterdam: Elsevier, 2021: 161-176.
- [36] 赵敬世. 位错理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- Zhao J S. Theoretical basis of dislocation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1989.
- [37] Cai W, Bulatov V V, Chang J P, et al. Dislocation core effects on mobility[M]//Dislocations in solids. Amsterdam: Elsevier, 2004: 1-80.
- [38] Vanderschaeve G, Levade C, Caillard D. Dislocation mobility and electronic effects in semiconductor compounds [J]. Journal of Microscopy, 2001, 203(1): 72-83.
- [39] Seeger A, Donth H, Pfaff F. The mechanism of low temperature mechanical relaxation in deformed crystals [J]. Discussions of the Faraday Society, 1957, 23: 19-30.
- [40] Maeda K, Sato M, Kubo A, et al. Quantitative measurements of recombination enhanced dislocation glide in gallium arsenide[J]. Journal of Applied Physics, 1983, 54(1): 161-168.
- [41] Mathes D T, Hull R, Choquette K D, et al. Nanoscale materials characterization of degradation in VCSELs[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4994: 67-82.
- [42] Nannichi Y, Matsui J, Ishida K. Rapid degradation in double-heterostructure lasers. II. semiquantitative analyses on the propagation of dark line defects[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1975, 14(10): 1561-1568.
- [43] Kamejima T, Ishida K, Matsui J. Injection-enhanced dislocation glide under uniaxial stress in GaAs-(GaAl)As double heterostructure laser[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1977, 16(2): 233-240.
- [44] Öberg S, Sitch P K, Jones R, et al. First-principles calculations of the energy barrier to dislocation motion in Si and GaAs[J]. Physical Review B, 1995, 51(19): 13138-13145.



- [45] Choi S, Mihara M, Ninomiya T. Dislocation velocities in GaAs[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1977, 16(5): 737-745.
- [46] Maeda K, Takeuchi S. Enhanced glide of dislocations in GaAs single crystals by electron beam irradiation[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1981, 20(3): L165-L168.
- [47] Yonenaga I, Ohno Y, Taishi T, et al. Recent knowledge of strength and dislocation mobility in wide band-gap semiconductors[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2009, 404(23/24): 4999-5001.
- [48] Churochkin D, Lund F. Coherent propagation and incoherent diffusion of elastic waves in a two dimensional continuum with a random distribution of edge dislocations [J]. *Wave Motion*, 2021, 105: 102768.
- [49] Johnston W G, Gilman J J. Dislocation velocities, dislocation densities, and plastic flow in lithium fluoride crystals[J]. *Journal of Applied Physics*, 1959, 30(2): 129-144.
- [50] Yonezu H, Ueno M, Kamejima T, et al. Lasing characteristics in a degraded GaAs-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As double heterostructure laser[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1974, 13(5): 835-842.
- [51] Waters R G. Diode laser degradation mechanisms: a review[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 1991, 15(3): 153-174.
- [52] Hutchinson P W, Dobson P S. Defect structure of degraded GaAlAs-GaAs double heterojunction lasers[J]. *Philosophical Magazine*, 1975, 32(4): 745-754.
- [53] Cross M, Greenside H. Pattern formation and dynamics in nonequilibrium systems[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [54] Hirth J P, Lothe J, Mura T. Theory of dislocations (2nd ed.) [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1983, 50(2): 476-477.
- [55] Halsey T C. Diffusion-limited aggregation: a model for pattern formation[J]. *Physics Today*, 2000, 53(11): 36-41.
- [56] Holt D L. Dislocation cell formation in metals[J]. *Journal of Applied Physics*, 1970, 41(8): 3197-3201.
- [57] Mughrabi H. Dislocation wall and cell structures and long-range internal stresses in deformed metal crystals[J]. *Acta Metallurgica*, 1983, 31(9): 1367-1379.
- [58] Walgraef D, Aifantis E C. Dislocation patterning in fatigued metals as a result of dynamical instabilities[J]. *Journal of Applied Physics*, 1985, 58(2): 688-691.
- [59] Kratochvil J. Dislocation pattern formation in metals[J]. *Revue De Physique Appliquée*, 1988, 23(4): 419-429.
- [60] Kubin L P. Dislocation patterns: experiment, theory and simulation[M]//Gonis A, Turchi P E A, Kudrnovský J. Stability of materials. NATO ASI series. Boston: Springer, 1996, 355: 99-135.
- [61] Kedharnath A, Kapoor R, Sarkar A. Classical molecular dynamics simulations of the deformation of metals under uniaxial monotonic loading: a review[J]. *Computers & Structures*, 2021, 254: 106614.
- [62] Huo J R, Yang H Y, Wang J, et al. Computational simulation of Al-based alloy surface structure dislocation: the first-principles calculation and atomic pair-potential lattice dynamics calculation[J]. *Modern Physics Letters B*, 2021, 35(08): 2150143.
- [63] Kurunczi-Papp D, Laurson L. Dislocation avalanches from strain-controlled loading: a discrete dislocation dynamics study[J]. *Physical Review E*, 2021, 104(2): 025008.
- [64] Duhan N, Patil R U, Mishra B K, et al. Thermo-elastic analysis of edge dislocation using extended finite element method[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 192: 106109.
- [65] Nguyen K, Zhang M J, Amores V J, et al. Computational modeling of dislocation slip mechanisms in crystal plasticity: a short review[J]. *Crystals*, 2021, 11(1): 42.
- [66] Erofeev V I, Malkhanov A. Nonlinear acoustic waves in solids with dislocations[J]. *Procedia IUTAM*, 2017, 23: 228-235.
- [67] Li P, Zhang Z F. Standing wave effect and fractal structure in dislocation evolution[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 4062.