

示了医学临床的可能性。当然,在应用之前,还需要改进和完善激光增强极化惰性气体的磁共振成像新技术,以及做人体的临床试验。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Bertram Schwarzschild, *Phys. Today*, June(1995), 17.
- [ 2 ] Antonio Regalado, *Science*, **268**(1995), 640.
- [ 3 ] Zeng Xizhi, Wu Changjun, Zao Mingxin et al., *Chem. Phys. Lett.*, **182**(1991), 538; Liu Zidong, Zao Mingxin, Wu Changjun et al., *Chem. Phys. Lett.*, **194**(1992), 440; Zhao Mingxin, Liu Zidong, Li Liyun et al., *Acta Physica Sinica (Overseas Edition)*, **2**(1993), 15.
- [ 4 ] M. Gatzke, G. D. Cates, B. Driehuys et al., *Phys. Rev. Lett.*, **70**(1993), 690.
- [ 5 ] G. D. Cates, D. R. Benton, M. Gatzke et al., *Phys. Rev. Lett.*, **65**(1990), 2591.
- [ 6 ] N. R. Newbury, A. S. Barton, G. D. Cates et al., *Phys. Rev. A*, **48**(1993), 4411; M. E. Wagshul and T. E. Chupp, *Phys. Rev. A*, **49**(1994), 3854.
- [ 7 ] B. C. Grover, *Phys. Rev. A*, **40**(1978), 398.
- [ 8 ] C. H. Volk, T. M. Kwon and J. G. Mark, *Phys. Rev. A*, **21**(1980), 1549.
- [ 9 ] N. B. Bhaskar, W. Happer and T. McElland, *Phys. Rev. Lett.*, **49**(1982), 25.
- [ 10 ] X. Zeng, E. Miron, W. A. van Wijngaarden et al., *Phys. Lett. A*, **96**(1983), 191; N. Ramsey, E. Miron, X. Zeng et al., *Chem. Phys. Lett.*, **102**(1983), 340; N. D. Bhaskar, W. Happer, M. Larsson et al., *Phys. Rev. Lett.*, **50**(1983), 105.
- [ 11 ] Zeng X., Wu, Z., T. Call et al., *Phys. Rev. A*, **31**(1985), 260; W. Happer, E. Miron, S. Schaefer et al., *Phys. Rev. A*, **29**(1984), 3092.
- [ 12 ] Liu Zidong, Sun Xianping, Zeing Xizhi et al., *Chinese Phys. Lett.*, **7**(1990), 388.
- [ 13 ] C. C. Bouchiat, M. A. Bouchiat and L. C. Pottier, *Phys. Rev.*, **181**(1969), 144.
- [ 14 ] Zeng Xizhi et al., *原子与分子物理学报*, **7**(1990), 1636.
- [ 15 ] M. A. Bouchiat, T. R. Carver and C. M. Varnum, *Phys. Rev. Lett.*, **5**(1960), 373.
- [ 16 ] G. K. Walters, F. D. Colegrove and L. D. Scheerer, *Phys. Rev. Lett.*, **8**(1962), 439.
- [ 17 ] T. E. Chupp, M. E. Wagshul, K. P. Coulter et al., *Phys. Rev. C*, **36**(1987), 2244.
- [ 18 ] D. D. McGregor, *Phys. Rev. A*, **41**(1990), 2631.
- [ 19 ] M. S. Alber, G. D. Gates, B. Driehuys et al., *Nature*, **370**(1994), 199.
- [ 20 ] H. Middleton, R. Black, B. Saam et al., *Magn. Reson. Med.*, **33**(1995), 271.

## 色心晶体及激光研究进展\*

吴季怀

(华侨大学材料物理化学研究所, 泉州 362011)

**摘 要** 色心激光是当前及今后固体可调谐激光领域的主要研究对象之一。该文综合评述了碱卤化物色心晶体及激光的研究发展概况,系统地探讨了色心的结构、光谱性质和色心晶体的制备,客观地分析了F型色心、 $F_2^+$ 型色心的发展、现状及主要激光性能。

**关键词** 色心晶体, 固体可调谐激光, 碱卤化物

色心作为固体缺陷研究,可以追溯到固体物理学发展早期。19世纪,透明碱卤晶体产生颜色就引起科学家的注意,“色心”一词就是当

时从德语 farde zentr(颜色中心)而来。随着实验工作积累与 R. Pohl 和 A. Smakula 等人的大量工作,把色心与晶体微观晶格缺陷联系起来。

\* 国家自然科学基金和国家青年自然科学基金资助项目。  
1995年4月17日收到初稿,1995年11月7日收到修改稿。

1937年, de Bore 在量子力学基础上提出 F 心类氢模型, 得到实验证实, 并成功地解释了色心的光谱性质. 40 年代后, 光谱技术、核磁共振、自旋共振等新技术的应用, 量子力学的引入, 各种理论模型的建立, 使色心物理体系逐步得到完善.

1965 年, 德国 B. Fritz<sup>[1]</sup> 首次用闪光灯泵浦获得  $\text{KCl}(\text{Li}^+) \text{F}_A(\text{II})$  色心激光振荡, 此后色心晶体作为一种激光介质引起人们的兴趣. 1974 年美国 Bell 实验室的 F. L. Mollenauer 等人<sup>[2]</sup> 实现了连续可调谐色心激光, 引起了人们的重视, 从此色心激光研究进展很快.

色心激光之所以引起广泛的兴趣, 其主要原因在于: 波长可调谐范围很宽, 目前能覆盖  $0.6 - 5.0 \mu\text{m}$  波段, 克服染料激光难以扩展的范

围; 激光输出功率较高, 目前已达  $4.8 \text{W}$ , 远超过在其他方面具有很大优点的半导体激光; 较容易实现多种形式的激光输出——脉冲、连续、单模、多模、锁模、孤子, 大大地扩展其应用价值; 光束质量高, 线宽和脉宽均很窄, 经压缩后脉宽已达  $75 \text{fs}$ , 线宽达几百  $\text{kHz}$ . 经过十几年的研究, 色心激光运转的最大困难——色心晶体的稳定性得到显著改善,  $\text{LiF}:\text{F}_2^+$  色心激光可室温运转,  $\text{NaCl}(\text{OH}^-):(\text{F}_2^+)_\text{H}$  色心激光在液氮温度可长期使用, 美国 Berling 公司已有 FCL-10, FCL-20, FCL-100 型商品化激光器问世. 色心激光的这些优异特性, 使它在分子光谱学、化学动力学、污染检测、光纤通信、窄带隙半导体物理学、非线性光学等高科技领域有非常好的应用价值.

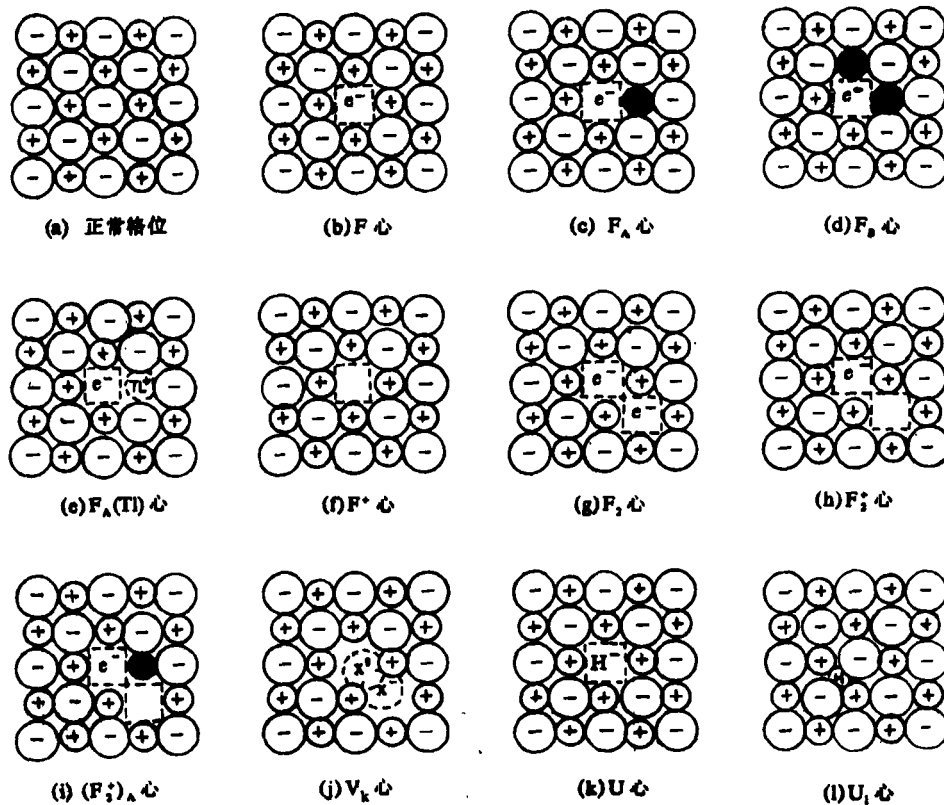


图 1 几种色心的构型(100 面)

# 1 色心的结构和光学性质

## 1.1 色心的分类和命名

碱卤晶体中的色心, 根据其结构特征可分为本征型色心和杂质型色心. 本征型色心又可分为俘获电子型和俘获空穴型两种. 杂质型色心如在掺氢的晶体中, 一个占据填隙位置的  $H^-$  构成  $U_0$  心, 占据阴离子格位构成  $U_1$  心, 等等. 俘获空穴型色心, 如两个沿  $\langle 110 \rangle$  相邻的卤离子  $X^-$  共用一个自陷空穴构成  $V_K$  心. 激光活性心基本上是俘获电子型. 常见的几种色心结构(100面)如图 1 所示. 这套分类命名规则是 1972 年 Sonder-Sibey 提出的, 已被普遍采纳.

## 1.2 光学性质

具有激光活性的色心主要在碱卤晶体中. 它是典型的离子晶体, 属立方晶系, 键合能大 ( $\sim 200\text{kCal/mol}$ ), 熔点较高 (约  $1000\text{K}$ ). 图 2 是碱卤晶体吸收谱示意图. 图中  $E_G^0$  对应于带隙吸收,  $E_X$  对应于激子吸收, 在紫外与红外之间存在很宽的透明区, 而色心的吸收和发射就在这一波段内. 色心在晶体的禁带能隙间引入一些新的跃迁能, 这些能态与周围晶格强烈地耦合, 产生特有的光吸收和光发射, 从而构成四能级光泵浦循环, 其电子-声子耦合和光泵浦循环如图 3 所示. 图中电子基态能级为  $m$ , 激发态为  $k$ , 相应的振动态为  $\eta$  和  $\gamma$ . ( $m, \eta$ ) 态与 ( $k, \gamma$ ) 态间的光学跃迁取决于能量守恒、跃迁选律及  $\eta$  和  $\gamma$  的交叠. 当势能曲线较陡, 且  $R_E$  与  $R_G$  相距较远时为强电-声耦合. 此时 Stokes 位移较大, 无辐射跃迁几率较大, F 型色心即是此种情况. 而当势能曲线较平坦,  $R_E$  与  $R_G$  相距较近时为弱电-声耦合. 此时 Stokes 位移较小, 两势能曲线无相交趋势, 无辐射跃迁几率较小,  $F_2^+$  型色心即是这种情况. 其光泵浦循环可表述为: 电子受激由基态  $A$  跃迁至激发态  $B$ , 通过电-声耦合由激发态  $B$  进入弛豫激发态  $C$ , 态  $C$  发射光子跃迁至弛豫基态  $D$ , 态  $D$  通过电-声耦合回到态  $A$ , 完成一个循环. 由

于  $\tau_R$  和  $\tau_C$  比  $\tau$  的时间小几个数量级, 因而粒子只存在于  $A, C$  态上, 易于实现粒子数反

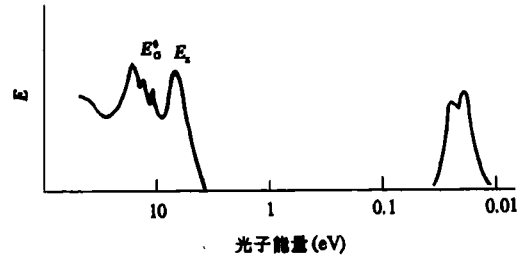


图 2 碱卤晶体吸收谱示意图

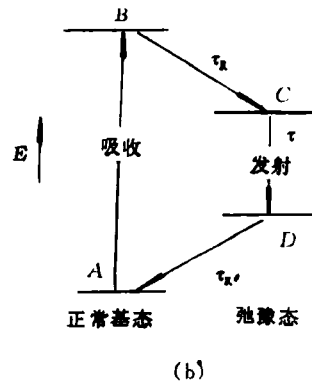
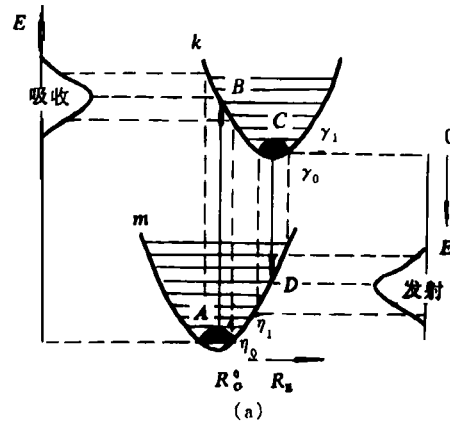


图 3 电-声子耦合和光泵浦循环  
(a) 电-声子耦合位形曲线;  
(b) 光泵浦循环图

转, 构成理想的四能级循环. 由于电-声耦合

均匀加宽色心的吸收谱和发射谱,为实际应用带来益处.这里  $E_{A-B}$  与  $E_{C-D}$  的能级差即为 Stokes 位移,代表给予晶格的能量.对不同晶体,不同色心,其势能曲线不同,就显示不同的激光性能.

并非所有的色心均能作为激光工作心,除须具备一定的浓度和稳定性外,还必须做到:(1)弛豫激发态距导带有一定的距离,避免电子吸收光子或受热激发而进入导带;(2)介质中其他色心的吸收不能与激光工作心的发射相近,以避免自吸收;(3)荧光振子强度要足够大;(4)Stokes 位移要恰当,太大时激光效率低,太小时又会发生自吸收.

## 2 色心激光晶体的制备

### 2.1 单晶生长

色心激光晶体的制备一般要通过三个步骤:(1)单晶生长,生长出掺质均匀、适量分布、光学质量高的单晶;(2)着色,在晶体中产生浓度较高、分布均匀的基础色心(F心等);(3)转型,通过光热反应使基础心变为激光工作心.

对碱卤晶体而言,熔点均在  $1000^{\circ}\text{C}$  以下,除 CsI, CsBr, CsCl 为面心立方晶系外,其余均为体心立方晶系.晶体对称性高,生长习性良好.采用 Czochralski 提拉法和 Bridgman 坩埚下降法易于从熔体生长出化学纯度高、光学质量好的单晶.对色心激光晶体,关键是杂质离子的排除和掺质离子均匀适量地进入晶体.

事实上,在目前使用的碱卤晶体中,常含一定量的阴阳离子杂质,这些非故意掺入的离子有些为几个 ppm,有的甚至在几十 ppm 以上.而有些杂质起作用的浓度就在此量级,因而杂质的排除显得尤为重要.杂质的排除<sup>[3]</sup>要考虑原料、坩埚、生长气氛、籽晶带入的杂质和生长时发生的反应等方面的原因.除去杂质常用 RAP 法、重结晶法、多次回炉法等.另外对无害杂质,除去的要求不必很高.

要使掺质离子均匀、适量和有效地进入晶格,必须根据掺质与基质的固液平衡相图,根据

互溶、部分互溶、不溶等关系,设计相应的生长工艺.如对互溶体系,可使晶体生长处于准平衡状态,以较慢速度进行,这样掺质较易均匀进入晶格;而对不互溶体系,可使晶体生长前沿处于频率很短的周期性过冷状态下,迫使掺质以包裹复相形式进入晶体,通过后续处理使掺质在晶体中均匀化.掺质在晶体中的分布在一定条件下服从分凝系数规则.

### 2.2 晶体着色

晶体着色是使晶体产生基础色心.着色的方法有附加蒸气、辐射损伤和电解三种.附加蒸气着色法是将晶体置于相应的碱金属(或卤素)蒸气中并加热使之产生色心的方法.在此过程中,晶体中的阴离子向外扩散,在晶体表面与金属蒸气形成新的晶层.而晶体中的阴离子空位俘获电子而形成 F 心.详细机理可参考文献[3].

采用此方法所获得的 F 心是 Schottky 缺陷,比较稳定、均匀,可在大部分晶体中应用,是最常用的方法.但对 LiF 和 NaF 等晶体,或含有  $\text{Tl}^+$ ,  $\text{Ga}^+$ ,  $\text{In}^+$ ,  $\text{Ag}^+$  等掺质晶体,由于小离子的扩散和竞争使着色过程复杂化,甚至难以形成 F 心<sup>[4]</sup>,这时应采用其他方法着色.

辐射损伤法是通过射线激发晶体中的电子进入导带,而后电子在与自陷空穴复合中把能量传给阴离子,形成 F 心和间隙原子<sup>[5]</sup>.此方法使用温度可从液氮温度到几百度.辐照源包括 UV 光、 $\gamma$  射线、X 射线、质子、中子、电子束. UV 光和  $\gamma$  射线能量较小,需要较长时间.而 X 射线、中子、质子束仅在晶体表面产生.在较短时间有较大穿透深度的是电子束.此方法简单实用.但所形成的是 Frankel 缺陷(即 F 心与间隙原子共存),较不稳定,一旦条件允许,间隙原子易于回位,使用受到一定限制.

电解着色法是把晶体加热至可产生空位和电导的温度(一般低于熔点  $50-100^{\circ}\text{C}$ ),在晶体的两端加上电压,使之产生色心的方法.此方法较少使用.

### 2.3 色心的转型

着色产生的色心往往不是激光活性心,还

必须通过色心的光、热反应获得,此过程称为转型.热反应<sup>[3,5]</sup>的根据是晶体中的各种色心存在着相互反应的趋势,存在着动态化学平衡,而且这些反应和平衡是温度的函数.把晶体加热至一定温度,使反应进行,达到对激光活性心形成有利的平衡,迅速冷却,使各种色心迅速“冷冻”,从而减少或除去有害色心,而获得较多的对激光活性心有用的色心.热反应进行的关键是温度、时间、冷却速度的选择及其控制.

光反应的种类比较多,其反应机理也不同.或者是在光作用下发生光电离,如  $F_2 \rightarrow F_2^+$ ,  $(F_2)_A \rightarrow (F_2^+)_A$ , 或者发生构型重取向,如  $(F_2^+)_{H1} \rightarrow (F_2^+)_{H2}$ ,  $(F_2^+)_{HA1} \rightarrow (F_2^+)_{HA2}$ , 或者发生更复杂的过程,即发生色心电离、迁移、俘获电子等过程,如  $F + A \rightarrow F_A$ ,  $F + Tl \rightarrow F(Tl)$  等,从而形成激光活性心<sup>[4]</sup>.要使光反应有效进行,关键是光源的选择、时间的控制和温度的确定.

### 3 F型色心与激光性能

#### 3.1 F色心

最简单也是最重要的色心是碱卤晶体中的F心,其结构模型如图1(b)所示,由一个阴离子空位俘获一个电子构成,类似于氢原子结构.但F心无激光活性,其主要原因是C态(见图3)电子云扩散,与D态重叠少,荧光跃迁(C→D)振子强度小( $f \sim 0.01$ ),产生的增益小;其二是C态距导带很近,易于吸收其荧光或受热激发而进入导带.由于荧光增益小又有强吸收,故不易获得产生激光振荡的净增益.

#### 3.2 $F_A$ 色心

$F_A$ 色心是1965年和1974年首先获得激光运转的工作介质<sup>[1,2]</sup>,其结构如图1(c)所示.具有激光活性的 $F_A(II)$ 心稳定性好,处理方便,易于保存,但只能在KCl和RbCl晶体中产生,调谐范围只限于2.5—3.1 $\mu\text{m}$ <sup>[6]</sup>.且由于Stokes位移大,使原来不高的荧光效率进一步下降,且随温度上升而下降.1.6K时荧光效率

为50%,300K时趋于零. $F_A(II)$ 心最大理论效率为10%,输出功率也不大,到目前KCl( $Li^+$ ): $F_A(II)$ 心最大激光功率为240MW,Cl( $Li^+$ ): $F_A(II)$ 激光功率为100mW<sup>[4]</sup>.

#### 3.3 $F_B$ 色心

1977年,德国Hannover大学G. Liftin等人首次获得 $F_B(II)$ 色心激光运转<sup>[7]</sup>. $F_B$ 心的结构如图1(d)所示.具有激光活性的 $F_B(II)$ 心只能在KCl和RbCl基质中产生,掺质仅 $Na^+$ 离子.它具有和 $F_A(II)$ 心相似的优点和不足,而且在 $F_B(II)$ 心晶体中总伴有一定量的 $F_A$ 和 $F_B(I)$ 心,它们的吸收带与 $F_B(II)$ 心有很大部分重叠,使荧光效率进一步下降,斜率效率仅9%. $F_B(II)$ 晶体可在2.2—3.0 $\mu\text{m}$ 提供可调谐激光,KCl( $Na^+$ ): $F_B(II)$ 色心最大激光输出功率为50mW.

#### 3.4 $F_A(Tl)$ 色心

1981年,美国Utah大学W. Gelleman和F. Luty等首次获得该色心激光运转<sup>[8]</sup>.该色心在结构上类似于 $F_A$ 心,但性能上更象一个空位扰动的Tl原子(大约有55%的电子云集中在 $Tl^+$ 上),因而常称之为 $Tl^0(1)$ 心.由于各种原因,目前实际应用的仅KCl: $Tl^0(1)$ 和KBr: $Tl^0(1)$ 心.KBr: $Tl^0(1)$ 心的可调谐范围为1.5—1.7 $\mu\text{m}$ ,KCl: $Tl^0(1)$ 心的调谐范围为1.4—1.63 $\mu\text{m}$ ,输出功率达1W,经锁模产生9ps的脉冲.

### 4 $F_2^+$ 型色心与激光性能

#### 4.1 $F_2^+$ 色心

$F_2^+$ 心是由两个相邻的阴离子空位共用一个电子构成,如图1(h)所示.其结构类似于 $H_2^+$ 分子离子.F. L. Mollenauer用浸于连续介质中的 $H_2^+$ 模型进行理论计算<sup>[9]</sup>,所得结果与实验观测值非常吻合,即

$$E_{F_2^+}(r, K_0) = (K_0)^{-2} E_{H_2^+}(R),$$

式中 $R = r/K_0$ ,  $r$ 是两个空位的间距, $K_0$ 是晶体的介电常数, $F_2^+$ 心具有非常理想的四能

级循环系统(见图3)。它具有较大的振子强度( $f \sim 0.2$ ),使得增益截面较大;量子效率几乎100%,且与温度无关;Stokes位移恰当,既产生高效率又避免自吸收;宽增益带宽和高增益易于实现超短脉冲,最短脉冲已达75fs;输出谱线窄,可达几百kHz;可调谐范围宽,几个基质可覆盖0.8—4.0 $\mu\text{m}$ ;输出功率高,目前已达4.8W。

1974年,Utah大学物理教授F. Luty从理论上分析了 $F_2^+$ 心的良好激光特性,建议Bell实验室的Mollenauer进行研究。果然,1977年Mollenauer等在NaF晶体中制得 $F_2^+$ 心,并实现其激光运转<sup>[10]</sup>。原则上, $F_2^+$ 心可在所有碱卤晶体中获得并产生激光,但实际上能进行有效激光运转的只有LiF: $F_2^+$ 和KF: $F_2^+$ 色心晶体<sup>[11]</sup>。

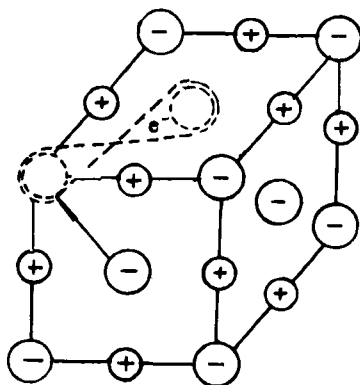


图4  $F_2^+$ 心重取向示意图

$F_2^+$ 心有效激光运转面临两个问题<sup>[12]</sup>:一是难以获得浓度足够大的 $F_2^+$ 心。这是由于 $F_2^+$ 心属正电荷缺陷,易于俘获晶体中的电子而形成 $F_2$ 心,即退电离。解决的途径是在晶体中提供电子陷阱;其二是 $F_2^+$ 心的“滚动”。如图4所示,当受到刺激时,邻位阴离子移到 $F_2^+$ 的一个空位中, $F_2^+$ 心轴旋转 $60^\circ$ ,发生构型重取向,重复进行, $F_2^+$ 心在晶体中“滚动”,当移到其他缺陷附近时,与之结合, $F_2^+$ 心消失。为避免滚动,必须在 $F_2^+$ 心附近引入能“钉”住它的掺质。几年来,人们在解决这两个问题上进

行了卓有成效的工作,衍生出 $F_2^+$ 型心,并拓展了 $F_2^+$ 心的波长覆盖范围。 $F_2^+$ 型心已成为性能最优、研究最活跃和最有实用价值的色心。

#### 4.2 $(F_2^+)^*$ 和 $(F_2^+)^{**}$ 色心

在 $F_2^+$ 型心发展过程中曾有两个方向:一是用高能射线辐照晶体产生某种缺陷来稳定 $F_2^+$ 心。80年代初,Mollenauer等<sup>[13]</sup>在NaF晶体中分别掺入 $Ni^{2+}$ , $Pr^{2+}$ , $Mn^{2+}$ 和 $OH^-$ ,用电子辐照分别获得 $(F_2^+)^*$ 和 $(F_2^+)^{**}$ 心。Eisele等在NaF晶体中掺入 $Ca^{2+}$ 和 $Mg^{2+}$ 也产生 $(F_2^+)^*$ 心。 $(F_2^+)^*$ 和 $(F_2^+)^{**}$ 心的热稳定性虽比 $F_2^+$ 心有所提高,但其光稳定性尚无法令人满意,在激光振荡时它会衰减。由于采用射线着色,工作心的消失是不可逆的,这种色心由于其应用局限性目前尚没有大的发展,它们的结构目前仍不很清楚。

#### 4.3 $(F_2^+)_A$ 色心

稳定 $F_2^+$ 心的另一种方法是用某种掺质与之结合,使之微扰并钉住 $F_2^+$ 心。这种方法又分为阳离子微扰和阴离子微扰两种。采用阳离子即为 $(F_2^+)_A$ 心,其结构如图1(i)所示。1979年,美国海军研究所I. Schneider首先在KCl( $Na^+$ )晶体中获得 $(F_2^+)_A$ 心,并实现其激光运转<sup>[14]</sup>。目前这类色心已在多种掺质离子、多种晶体中实现激光运转<sup>[14]</sup>,其可调谐波长覆盖1.62—4.0 $\mu\text{m}$ 。 $(F_2^+)_A$ 心具备 $F_2^+$ 和 $F_A$ 心的特性。由于采用蒸气着色,晶体可在室温下储存,在激光运转中不衰减。引入的掺质离子一方面钉住 $F_2^+$ 心;另一方面扰动 $F_2^+$ 心使其光谱性质有所变化,吸收峰有小的红移,发射峰有较大的红移,如果掺质离子愈小,移动越大。现在能稳定地进行激光运转的有KCl( $Na^+$ ): $(F_2^+)_A$ 和KCl( $Li^+$ ): $(F_2^+)_A$ 心,后者的激光输出为1.2W。

#### 4.4 $(F_2^+)_H$ 和 $(F_2^+)_{HA}$ 色心

采用阴离子微扰 $F_2^+$ 心可获得 $(F_2^+)_H$ 心,它是由 $F_2^+$ 心和邻近一个二价阴离子掺质构成。1978年,Lobanoov等在研究LiF: $O^{2-}$ 晶体时首先提出。但真正得到研究和应用是1985

年 J. F. Pinto 等人发现  $\text{NaCl}(\text{OH}^-):(\text{F}_2^+)_\text{H}$ <sup>[15]</sup> 晶体后,当时本文作者也独立地进行过有关研究,取得令人满意的进展<sup>[16,17]</sup>. 此色心用  $\text{O}^{2-}$  扰动  $\text{F}_2^+$ , 既钉住  $\text{F}_2^+$  心,又使整个缺陷显电中性,避免了退电离,克服了  $\text{F}_2^+$  心的两大不足. 此晶体色心浓度大,稳定性好,可室温储存,激光运转不衰减. 目前已在  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{KBr}$  等晶体中实现激光运转,几个基质的可调谐激光波段覆盖  $1.40\text{--}2.9\mu\text{m}$ <sup>[18]</sup>. 1992 年 10 月,法国岗大学获得  $4.8\text{W}$  的  $\text{NaCl}(\text{OH}^-):(\text{F}_2^+)_\text{H}$  最大激光输出<sup>[11]</sup>.

受掺氧  $(\text{F}_2^+)_\text{H}$  心的启示,1992 年 Y. Suzuki<sup>[19]</sup> 研究  $\text{NaCl}$  晶体掺硫的  $(\text{F}_2^+)_\text{H}$  心,指出有可能实现室温激光运转. 同年 10 月,法国岗大学获得  $>3\text{W}$  的输出功率<sup>[11]</sup>. 和掺氧的  $(\text{F}_2^+)_\text{H}$  相比,掺硫的  $(\text{F}_2^+)_\text{H}$  晶体室温半衰期为 20 天,而掺氧的  $(\text{F}_2^+)_\text{H}$  心仅 12 天;且单一晶体的可调谐范围为  $1.43\text{--}2.0\mu\text{m}$ ,而掺氧为  $1.45\text{--}1.75\mu\text{m}$ .

最近,Utah 大学 D. Wandt 等人把阴、阳离子扰动结合起来,在  $\text{Na}^+$  和  $\text{O}^{2-}$  双掺的  $\text{KCl}$  和  $\text{KBr}$  晶体中获得  $(\text{F}_2^+)_\text{HA}$  心,并实现激光运转<sup>[19]</sup>. 我们也进行  $\text{NaCl}$  和  $\text{KCl}$  晶体  $(\text{F}_2^+)_\text{HA}$  心研究,取得较好的进展<sup>[5,20]</sup>.  $(\text{F}_2^+)_\text{HA}$  心给  $\text{F}_2^+$  型心家族增添新的成员.

除上述色心外,还有  $\text{F}_\text{H}(\text{CN}^-)$  色心、N 型色心、多电子色心等等,限于篇幅不能一一介绍. 从 1974 年色心激光有效运转<sup>[2]</sup>至今,作为激光工作介质——色心的研究取得长足的发展,显示出强大的生命力. 可以相信,随着时间的推移,基础研究的深入和应用研究的进一步

开展,色心的优异特性将得到更充分的发挥,成为近红外波段难以替代的理想激光源.

### 参 考 文 献

- [1] B. Fritz and E. Menke, *Sol. Commun.*, 3-1(1965), 61.
- [2] F. L. Mollenauer and D. H. Olsen *Appl. Phys. Lett.*, 24-4(1974), 386.
- [3] 吴季怀等,人工晶体学报,22-2(1993), 113; 24-3(1995), 182.
- [4] W. Gellermann, *J. Phys. Chem. Solid*, 52-1(1991), 249.
- [5] 吴季怀等,华侨大学学报,11-3(1990), 222; 11-3(1990), 243; 15-2(1994), 177.
- [6] L. F. Mollenauer, *Color center laser*, Academic Press, New York, (1979).
- [7] F. Lutfun, R. Beigang and H. Wiling, *Appl. Phys. Lett.*, 31-4(1977), 381.
- [8] W. Gellermann, F. Luty, C. R. Pollock et al., *Opt. Commun.*, 39-2(1981), 381.
- [9] L. F. Mollenauer, *Phys. Rev. Lett.*, 43-20(1979), 1524.
- [10] L. F. Mollenauer, *Opt. Lett.*, 2-3(1977), 164.
- [11] 张贵芬,激光与红外,24-1(1994), 38.
- [12] 许承晃,华侨大学学报,11-3(1990), 209.
- [13] L. F. Mollenauer, *Opt. Lett.*, 5-5(1980), 188; 6-7(1981), 342.
- [14] I. Schneider et al., *Opt. Lett.*, 4-8(1979), 390; 5-6(1980), 214; 6-7(1981), 627.
- [15] J. F. Pinto et al., *Opt. Lett.*, 10-8(1985), 384; 11-8(1986), 310.
- [16] 吴季怀等,中国激光, A20-6(1993), 417.
- [17] 吴季怀等,红外与毫米波学报,12-3(1993), 223.
- [18] D. Wandt et al., *J. Appl. Phys.*, 61-8(1987), 864; *Opt. Commun.*, 61-1/2(1987), 405.
- [19] Y. Suzuki et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, 31-3(1992), 809.
- [20] 吴季怀等,功能材料,23-3(1992), 225.