

F₂/H₂ 链反应脉冲化学 激光器简化模型计算

陈锡荣 王忠诚 葛树杰 张存浩

(中国科学院大连化学物理研究所)

李 木 李中渊

(中国科学院沈阳计算技术研究所)

提要: 列出了补偿 Kerber 简化模型缺陷的光引发 F₂/H₂ 链反应脉冲激光器的简化模型。解决了振转跃迁光通量方程与动力学速率方程之间时间坐标的相容性问题。采用 Gear 自动积分法获得满意的数值计算结果。列出 F₂/H₂ 预反应生成的 HF(O)、混合物中 O₂ 含量、光引发剂等对激光性能影响的定量结果。

Numerical modeling of pulsed F₂/H₂ chain reaction lasers

Chen Xirong, Wang Zhongcheng, Ge Shujie, Zhang Cunhao

(Dalian Institute of Chemical Physics, Academia Sinica)

Li Mu, Li Zhongyuan

(Shenyang Institute of Computation Science, Academia Sinica)

Abstract. A simple model for photoinitiated F₂/H₂ chain reaction lasers is presented, which replenishes some deficiencies of Kerber's model. The compatibility of time coordinates between the laser flux equations of V-R transitions and the kinetic rate equations has been solved. By using Gear's automatic integration method, satisfactory numerical results have been obtained. The effects of prereaction of F₂/H₂ mixtures, of O₂ content and of photoinitiator on pulsed HF laser performances are presented.

一、引 言

七十年代初期, G. Emanuel 等^[1]对 F₂/H₂ 化学激光的综合模型计算进行了许多工作。在此基础上, 近年来脉冲化学激光的模型计算工作大体上按下述几个方面发展: (1)

补充和改进各种基元过程速率系数值, 包括高阶激发态粒子的脱活速率, 从而使计算与实验结果更为接近; (2) 考虑转动能级非平衡分布的影响^[2]; (3) 考虑激光谱线各种展宽效应对激光器性能的影响; (4) 简化模型, 使计

收稿日期: 1981年11月4日; 修改稿收到日期: 1982年7月19日。

算时间缩短而结果却与综合模型逼近^[3]。

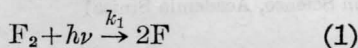
但到目前为止,对于 F₂/H₂ 链反应脉冲化学激光性能至关重要的 O₂ 含量和 F₂/H₂ 预反应等对激光性能的影响,尚无系统的定量结果发表。

本文是光引发 F₂/H₂ 链反应脉冲化学激光的简化模型。与 Kerber^[3] 的简化模型相比,本模型计入了:(1)引发强度随时间变化;(2)腔的瞬变效应;(3)O₂ 和预反应量 ([HF(O)]_{t=0});(4)V-V 弛豫;(5)转动热分布等对激光性能的影响。在 Kerber 的模型中,发生激射的转动量子数是固定的 [$P_v(J=5)$],故其不能预示激光输出的时间分辨光谱。本模型考虑了转动量子态 HF(*v*) 粒子浓度热分布随时间的变化,受激辐射总是发生在具有最大增益 $[\alpha(v, J)]_{\max}$ 的转动态上。因此,本模型可预言激光输出的时间分辨光谱,并且计算所得结果与实验测定结果基本一致。

二、简化模型

1. 反应方程

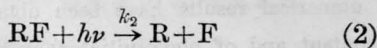
链引发:



$$k_1 = k_i t \exp[-t/t_0] \quad (\text{秒}^{-1})$$

*t*₀: 引发光源脉冲宽度(秒)

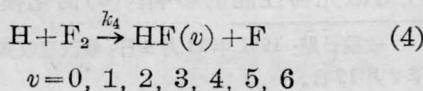
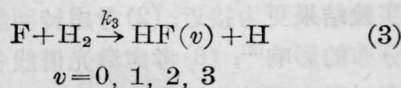
*k*_i: 表征引发光源强度的量(秒⁻²)



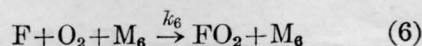
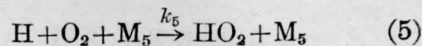
$$k_2 = k_1 \sigma_{RF} / \sigma_{F_2}$$

σ_{RF} 、 σ_{F_2} 分别为光引发剂 RF 和 F₂ 的光吸收截面(厘米²)。

链传递:

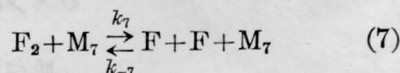


断链反应:



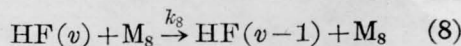
$$M_5 = M_6 = He$$

解离-重合:



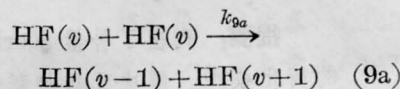
M₇ 代表所有粒子

能量交换:

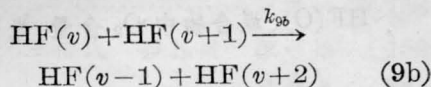


$$M_8 = HF(0), He, H, F, H_2, F_2, O_2$$

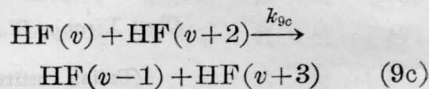
$$v = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$$



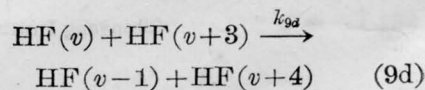
$$v = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$



$$v = 1, 2, 3, 4, 5$$

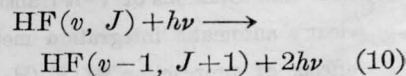


$$v = 1, 2, 3, 4$$



$$v = 1, 2, 3$$

受激辐射:



$$\left\{ \begin{array}{l} v = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \\ J = 0, 2, 3, \dots, 12 \end{array} \right.$$

2. 动力学方程

上述(1)~(10)过程可用下列动力学方程来描述:

$$\frac{dn_M}{dt} = \sum_i W_M^i - \sum_j R_M^j \quad (11)$$

$$\frac{d[HF(v)]}{dt} = \sum_k W_{HF(v)}^k + D_{v+1, v} - D_{v, v-1} + X_v - X_{v-1} \quad (12)$$

v : 振动量子数 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

n_M : 组份 M 的浓度(克分子/厘米³)

M = F, F₂, H, H₂, O₂, RF, HO₂, FO₂

W_M^i : 生成 M 的第 i 反应的速率(克分子/厘米³·秒)

R_M^j : 消耗 M 的第 j 反应的速率(克分子/厘米³·秒)

$D_{v+1, v}$: HF 分子从 $v+1$ 态脱活至 v 态的速率

$D_{v, v-1}$: HF 分子从 v 态脱活至 $v-1$ 态的速率

X_v : HF($v+1$) 受激辐射跃迁至(v)的速率

X_{v-1} : HF(v) 受激辐射跃迁至($v-1$)的速率
气体温度 T 随时间变化可用 (13) 式表示:

$$\begin{aligned} \sum_M n_M C_{vM} \frac{dT}{dt} &= k_3 [F] [H_2] \Delta H_1 \\ &+ k_4 [H] [F_2] \Delta H_2 \\ &+ \{k_{-7} [F]^2 - k_7 [F_2]\} [M_7] \\ &- P_L - h_i \sum_{v=1}^7 v \frac{d[HF(v)]}{dt} \end{aligned} \quad (13)$$

(13) 式中,

C_{vM} : 组分 M 的等容比热(卡/克分子·K)

$\Delta H_1 = 31.7$ (千卡/克分子)

$\Delta H_2 = 98$ (千卡/克分子)

$h_i = 11$ (千卡/克分子)

P_L 为单位体积的激光功率,

$$P_L = h c N_A \sum_{v=0}^5 \sum_{J=1}^{13} \omega_c(v, J) f(v, J) \times \alpha(v, J)$$

h : 普朗克常数;

N_A : 阿佛加德罗常数;

$\omega_c(v, J)$: 下能级为(v, J)的 P 支振转跃迁的中心波数(厘米⁻¹);

c : 光速;

$\alpha(v, J)$ 为 P 支跃迁的增益系数,

$$\alpha(v, J) = \frac{h N_A}{4\pi} w_c(v, J) \phi_c(T, v, J)$$

$$\times B_{\text{吸}}(v, J) (2J+1) \left\{ \frac{[HF(v+1)]}{Q_r^{(v+1)}} \right.$$

$$\times \exp\left[\frac{-hc}{kT} E(v+1, J-1)\right]$$

$$\left. - \frac{[HF(v)]}{Q_r^{(v)}} \exp\left[\frac{-hc}{kT} E(v, J)\right] \right\},$$

式中 $\phi_c(T, v, J)$ 为谱线 Voigt 展宽线型函数的中心值^[4]; $B_{\text{吸}}(v, J)$ 为爱因斯坦吸收系数^[4]; $E(v, J)$ 为(v, J)能级能量;

$$Q_r^{(v)} = \sum_J (2J+1) \exp\left[\frac{-hc}{kT} E(v, J)\right],$$

$f(v, J)$ 为下能级(v, J)的 P 支受激跃迁的光通量(克分子/厘米²·秒), 由(14)式得到,

$$\frac{df(v, J)}{dt} = c \left(\frac{l}{L}\right) [\alpha(v, J) - \alpha_{\text{thr}}] f(v, J) \quad (14)$$

式中, L 为激活介质长度(厘米); l 为光腔长度(厘米); α_{thr} 为光腔阈值增益(厘米⁻¹), $\alpha_{\text{thr}} = \frac{1}{2L} \ln(R_0 R_L)$, R_0, R_L 分别为输出镜和反射镜的反射率。

激光输出能量 E (焦耳/厘米³) 由下式得到,

$$E = \int_0^{t_0} P_L dt \quad (15)$$

t_0 为激光脉冲持续时间(秒)。

三、几个主要参量对激光性能的影响

1. 氧的影响

作为 F₂/H₂ 混合物的稳定剂, O₂ 对激光器性能起着重要作用。我们的实验结果指出, 当不添加氧时, 由于 F₂/H₂ 混合物的预反应, 有时竟完全无激光输出。而若加氧量过大, 则激光输出能量也显著下降。1980 年前的模型计算工作^[1, 3, 5], 都还没有对 O₂ 量影响作系统的定量研究。与我们模型计算工作进行的同时, R. L. Taylor^[6] 研究了 O₂ 对

脉冲 HF 化学激光性能的影响, 指出: 激光期间, 在 O_2 参与的反应中, 生成 H_2O 的速率较慢。故我们的简化模型只考虑了生成 HO_2 和 FO_2 两个反应, 速率常数 k_5 和 k_6 的取值见本文附录。 O_2 对激光性能影响的计算结果示于图 1。

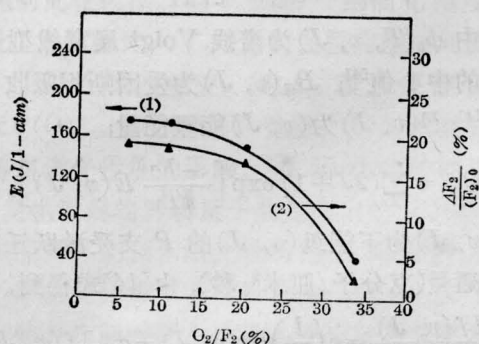


图 1 氧对激光器性能的影响

$F_2:H_2:O_2:He=1:0.33:x:2.7$, $P_0=1.54$ 大气压, $300K$, $\alpha_{th}=0.0106$ 厘米⁻¹, $t_0=1 \times 10^{-6}$ 秒, $\eta=0.5\%$ (光解离度)

R. L. Taylor^[6] 指出: 在总压为 1 大气压时, 激光输出比能与 O_2 浓度几乎成直线下降。但从我们计算结果看到, 并不是单纯的直线关系。当 $O_2/F_2 < 10\%$ (即 O_2 占总压 2%) 左右时, O_2 量对激光比能的影响约只有 5% 左右。我们的实验表明, 对于 $F_2:H_2:He=2:1:4$ 的混合物, O_2 含量必须增至 $O_2/F_2 > 30\%$ 才能对预反应有所抑制。而从图 1 看到, 随 O_2 量增加, 激光输出比能几乎成直线下降。 $O_2/F_2=40\%$ 时, 激光比能下降到只有原来的 1/5 左右。

从图 1 的曲线 (2) 可看到, 它与曲线 (1) 几乎成平行关系。当 $O_2/F_2=34\%$ 时, F_2 的转化率 $\Delta F_2/[F_2]_0=2.4\%$, 约只有原来的 1/8。这说明, 激光输出比能下降的主要原因, 是由于 F_2/H_2 链反应被 O_2 所阻滞而使 F_2 的转化程度 $\Delta F_2/[F_2]_0$ 下降所致。

2. HF($v=0$) 的影响。

F_2/H_2 混合物在被引发的预反应是影响激光器性能很关键的因素。在相近的实验

条件下, 各不同实验室的 F_2/H_2 链反应激光性能往往相差颇大^[5], 其中最重要的原因之一是对预反应控制程度不同。预反应影响激光性能, 主要是通过它生成的基态 HF(0)。HF(0) 对振动激发态 HF(v) 有较高的 $V \cdot T$ 脱活速率, 与 $H+F_2$ 热反应速率相当。

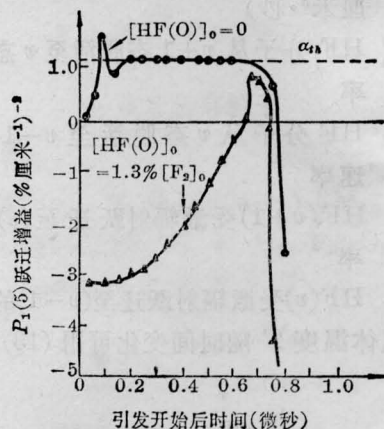


图 2 HF(0) 对 $P_1(5)$ 跃迁增益的影响

$F_2:H_2:O_2:He=3:1:0.33:8$
 $P_0=1.13$ 大气压, $T_0=300K$
 $t_0=1 \times 10^{-6}$ 秒, $\eta=0.5\%$

从图 2 我们可以看到, 当 F_2/H_2 链反应激光体系引发前预反应生成基态 HF(0) 占 F_2 量的 1.3% 时, $P_1(5)$ 跃迁的增益绝大部分时间是负值, 而未能达到阈值。当 HF(0) 占 F_2 量的 3.5% 时, 计算结果表明, $P_1(5)$ 的增益始终是很大的负值。因此 HF(0) 对激光器性能的影响是至关重要的。

到目前为止, 还未见到有 HF(0) 对 F_2/H_2 链反应脉冲激光器性能影响的定量数据发表。图 3 是预反应对激光输出光谱的影响。

由图 3 可见, 当预反应消耗的 F_2 量为 $\Delta F_2/[F_2]_0=2.5\%$ (即 $[HF(0)]_0/[F_2]_0=5\%$) 时, 激光输出光谱中已失去 $v=1 \rightarrow v=0$ 谱带; 当 $\Delta F_2/[F_2]_0=5\%$ 时, 失去 $v=6 \rightarrow v=5$ 谱带; 当 $\Delta F_2/[F_2]_0=7.5\%$ 时, 失去 $v=6 \rightarrow v=5$ 、 $v=5 \rightarrow v=4$ 、 $v=4 \rightarrow v=3$ 三个谱带。由此可见, 预反应生成的 HF(0) 不但影响 $v=1 \rightarrow v=0$ 谱带, 也影响高振动态之间

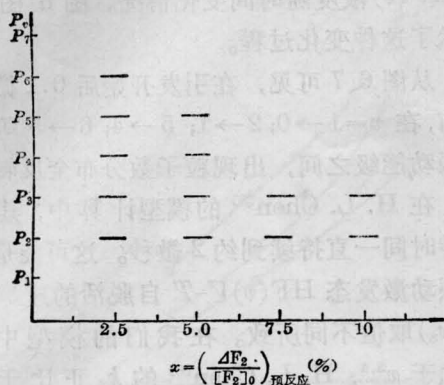


图3 预反应对激光谱线组成的影响

$F_2:H_2:He:O_2:HF(0) = 1:0.67:3:0.05:2x$
 $P_0 = 145$ 托; $t_0 = 4$ 微秒; $\eta = 0.5\%$; $T_0 = 300K$

的跃迁光谱,而随预反应程度的加大,高振动带光谱依次消失。这个结果已被我们最近的时间分辨光谱的实验结果所证实。

图4示出了HF(0)对激光输出比能的影响的计算结果。由图4可以看到,激光输出比能与预反应中 F_2 的消耗量几乎成反比。而只要有5%的 F_2 被预反应生成HF(0),激光输出比能就约降低一倍。

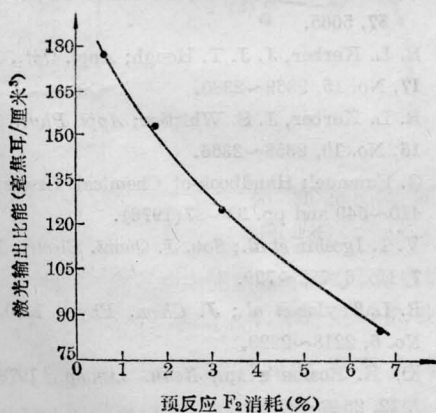


图4 HF(0)对激光输出比能的影响

$F_2:H_2:O_2:He = 3:1:0.3:8$; $P_0 = 1.34$ 大气压
 $T_0 = 300K$; $\alpha_{th} = 0.0083$ 厘米⁻¹; $\eta = 0.5\%$

从我们实验结果可知,当预反应未能控制时, F_2 消耗约25%。将图4结果延伸,这将使激光输出接近于零。这与化学激光的实验结果相符。

从图1和图4结果可知,要保持好的激光器性能, F_2/H_2 混合物的预反应必须控制在1%以内。而若以 O_2 作为预反应的阻抑剂,则 O_2/F_2 至少必须是20~30%。从图1可见,此时之激光输出比能,较无 O_2 时降低约20~50%。

3. 光引发剂的影响

V. I. Igoshin^[5]等的模型计算表明,当 F_2 分压不大于50托时,将吸收截面较 F_2 大50倍的引发剂加入 F_2/H_2 链反应激光器中,可将激光输出提高几倍。而当 F_2 分压高时,则无多大影响。但是,И. Ф. Чеботорев^[7]等的实验结果表明,当将 MoF_6 等光引发剂加入 F_2/H_2 体系时,只有在弱引发条件下才会提高激光输出。在[5]那样强的引发条件下,激光输出能量却反而下降。

我们的简化模型中的光引发剂RF,其光吸收截面较 F_2 大50倍。由于至今尚无光引发剂RF分解后母体R对HF(v)的脱活速率常数,故我们模型中也无法考虑它们的脱活效应。

计算结果示于图5。由图5看到,当 F_2 分压为54托,加入5.4托RF时,仅使激光输出比能提高约10%,而若考虑R对HF(v)的脱活,可能还会产生负作用。

可以认为:在 F_2/H_2 链反应体系,在 F_2 分压较高的强引发条件下,光引发剂的加入

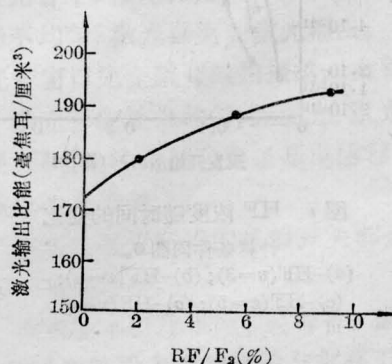


图5 光引发剂对激光输出比能的影响

$F_2:H_2:O_2:He = 1:1:0.1:4$; $P_0 = 0.43$ 大气压
 $T_0 = 300K$; $t_0 = 5 \times 10^{-6}$ 秒; $\eta = 0.5\%$

对提高激光输出能量并无好效果。

4. 各振动能级 HF(v) 浓度随时间的变化

Kerber^[3] 的简化模型未论及各振动能

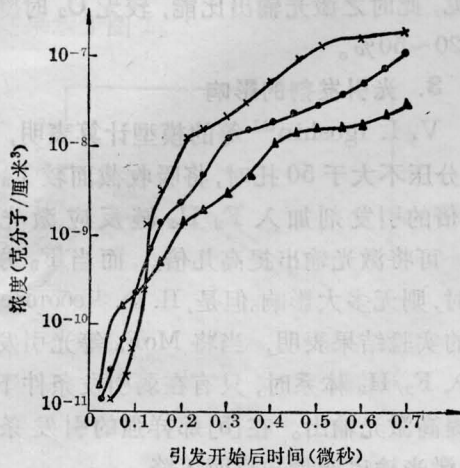


图 6 HF 浓度随时间的变化

F:H₂:O₂:He=3:1:0.2:4; $P_0=0.9$ 大气压
 $T_0=300\text{K}$; $t_0=1 \times 10^{-6}$ 秒; $\eta=0.5\%$
 $\alpha_{th}=0.0106 \text{ 厘米}^{-1}$

曲线上一— $v=0$; 中— $v=1$; 下— $v=2$

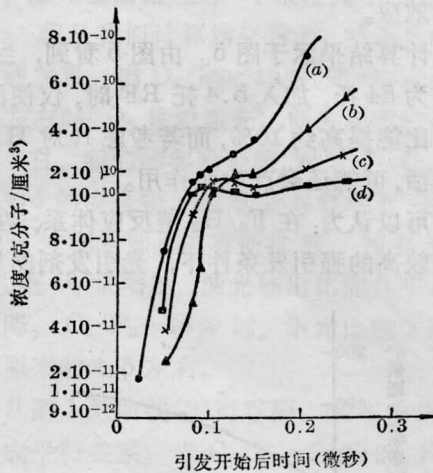


图 7 HF 浓度随时间的变化

计算条件同图 6。

(a)—HF($v=3$); (b)—HF($v=4$);
 (c)—HF($v=5$); (d)—HF($v=6$)

级 HF(v) 浓度随时间变化情况。图 6、图 7 显示了这种变化过程。

从图 6、7 可见，在引发开始后 0.1 微秒以前，在 $v=1 \rightarrow 0$; $2 \rightarrow 1$; $5 \rightarrow 4$; $6 \rightarrow 5$ 等四对振动能级之间，出现粒子数分布全反转现象。在 H. L. Chen^[8] 的模型计算中，其全反转时间一直持续到约 2 微秒。这可能是由于振动激发态 HF(v) $V-T$ 自脱活的速率常数 (k_s) 取值不同所致。在我们的模型中 k_s 正比于 $v^{2.4}$ ，H. L. Chen^[8] 的 k_s 正比于 v 。而在模型计算中，激光的性能对于 k_s 的取值是非常灵敏的。取 $k_s \sim v^{2.4}$ 要比取 $k_s \sim v$ 更接近于实测结果^[3]。因此，我们的模型计算结果似应更合理些。

参 考 文 献

- [1] (a) G. Emanuel *et al.*; RESALE-1, A Chemical Laser Computer Program, TR-0172 (2776) - (Aerospace Corp. Los. Angeles Calif., 31, March, 1972).
- (b) R. L. Kerber *et al.*; *Appl. Opt.*, 1972, **11**, No. 5, 1112~1123.
- (c) S. N. Suchard *et al.*; *J. Chem. Phys.*, 1972, **57**, 5065.
- [2] R. L. Kerber, J. J. T. Hough; *Appl. Opt.*, 1973, **17**, No. 15, 2369~2380.
- [3] R. L. Kerber, J. S. Whittier; *Appl. Phys.*, 1976, **15**, No. 10, 2358~2366.
- [4] G. Emanuel; *Handbook of Chemical Lasers*, pp. 470~549 and pp. 33~87 (1976).
- [5] V. I. Igoshin *et al.*; *Sov. J. Quant. Electr.*, 1977, **7**, No. 6, 722~729.
- [6] R. L. Taylor *et al.*; *J. Chem. Phys.*, 1980, **73**, No. 5, 2218~2223.
- [7] Ю. И. Козлов и др.; *Кван. электр.*, 1978, **5**, №12, 2645~2648.
- [8] H. L. Chen *et al.*; *J. Chem. Phys.*, 1974, **61**, No. 1, 306~318.
- [9] H. L. Chen *et al.*; *J. Chem. Phys.*, 1977, **66**, 5513.
- [10] В. Т. Крутова; *Кван. электр.*, 1976, **3**, №9, 1919.

附 录

反应及速率系数

反 应	速 率 系 数 (厘米 ³ /摩尔·秒)	文 献
1 $F_2 + h\nu \longrightarrow 2F$	$k_1 = k_i t \exp(-t/t_0)$	[5]
2 $RF + h\nu \longrightarrow R + F$	$k_2 = k_1 \cdot \sigma_{RF} / \sigma_{F_2}$	[5]
3a $F + H_2 \longrightarrow HF(0) + H$	$k_{3a} = 9 \times 10^{12} \cdot 1.6/e$	[1b]
3b $F + H_2 \longrightarrow HF(1) + H$	$k_{3b} = 2.6 \times 10^{13} \cdot 1.6/e$	[3]
3c $F + H_2 \longrightarrow HF(2) + H$	$k_{3c} = 8.8 \times 10^{13} \cdot 1.6/e$	[3]
3d $F + H_2 \longrightarrow HF(3) + H$	$k_{3d} = 4.4 \times 10^{13} \cdot 1.6/e$	[3]
4a $H + F_2 \longrightarrow HF(0) + F$	$k_{4a} = 1.1 \times 10^{12} \cdot 2.4/e$	[3]
4b $H + F_2 \longrightarrow HF(1) + F$	$k_{4b} = 2.5 \times 10^{12} \cdot 2.4/e$	[3]
4c $H + F_2 \longrightarrow HF(2) + F$	$k_{4c} = 3.5 \times 10^{12} \cdot 2.4/e$	[3]
4d $H + F_2 \longrightarrow HF(3) + F$	$k_{4d} = 3.6 \times 10^{12} \cdot 2.4/e$	[3]
4e $H + F_2 \longrightarrow HF(4) + F$	$k_{4e} = 1.6 \times 10^{13} \cdot 2.4/e$	[3]
4f $H + F_2 \longrightarrow HF(5) + F$	$k_{4f} = 3.6 \times 10^{13} \cdot 2.4/e$	[3]
4g $H + F_2 \longrightarrow HF(6) + F$	$k_{4g} = 4.8 \times 10^{13} \cdot 2.4/e$	[3]
5 $H + O_2 + M_5 \longrightarrow HO_2 + M_5$	$*k_5 = 6.17 \times 10^{14} \cdot 1.6/e, M_5 = He$	[3]
6 $F + O_2 + M_6 \longrightarrow FO_2 + M_6$	$*k_6 = 1.8 \times 10^{15}, M_6 = M_5 = He$	[9]
7 $F_2 + M_7 \xrightleftharpoons[k_{-7}]{k_7} 2F + M_7$	$k_7 = 5 \times 10^{13} \exp(-81/\theta), M_7$ 为所有粒子	[1b]
	$k_{-7} = g_{M_4} \times 1.6 \times 10^{-32} T^{-1}, g_{M_4} \begin{cases} 1, M_7 = He, F_2 \\ 20, M_7 = H \\ 8, M_7 = H_2 \\ 2, M_7 = HF \end{cases}$	[10]
8a $HF(v) + HF(0) \longrightarrow HF(v-1) + HF(0)$	$k_{8a} = v^{2.4} \times (10^{14} T^{-0.8} + 10^{0.4} T^{3.5}), v = 1, 2, \dots, 7$	[3]
8b $HF(v) + He \longrightarrow HF(v-1) + He$	$k_{8b} = v(8.7 \times 10^{-7} T^5), v = 1, 2, \dots, 7$	[3]
8c $HF(v) + H \longrightarrow HF(v-1) + H$	$k_{8c} = 1.8 \times 10^{13} \cdot 0.7/e, v = 1, 2, \dots, 7$	[3]
8d $HF(1) + F \longrightarrow HF(0) + F$	$k_{8d} = 1.5 \times 10^{10} \cdot 1.1/eT$	[3]
8e $HF(2) + F \longrightarrow HF(1) + F$	$k_{8e} = 1.5 \times 10^{10} \cdot 0.5/eT$	[3]
8f $HF(v) + F \longrightarrow HF(v-1) + F$	$k_{8f} = 1.5 \times 10^{10} T, v = 3, 4, 5, 6, 7$	[3]
8g $HF(v) + H_2 \longrightarrow HF(v-1) + H_2$	$k_{8g} = v 10^5 T^2, v = 1, 2, \dots, 7$	[3]
8h $HF(v) + F_2 \longrightarrow HF(v-1) + F_2$	$k_{8h} = v 10^{-4} T^4, v = 1, 2, \dots, 7$	[3]
8i $HF(v) + O_2 \longrightarrow HF(v-1) + O_2$	$k_{8i} = v(11T^3 + 2.4 \times 10^9), v = 1, 2, \dots, 7$	[4]
9a $HF(v) + HF(v) \longrightarrow HF(v-1) + HF(v+1)$	$k_{9a} = 1.5 \times 10^{12} T^{0.5}, v = 1, 2, \dots, 6$	[3]
9b $HF(v) + HF(v+1) \longrightarrow HF(v-1) + HF(v+2)$	$k_{9b} = 0.5k_{9a}, v = 1, 2, 3, 4, 5$	[3]
9c $HF(v) + HF(v+2) \longrightarrow HF(v-1) + HF(v+3)$	$k_{9c} = 0.25k_{9a}, v = 1, 2, 3, 4$	[3]
9d $HF(v) + HF(v+3) \longrightarrow HF(v-1) + HF(v+4)$	$k_{9d} = 0.125k_{9a}, v = 1, 2, 3$	[3]

* 单位是: 厘米³/摩尔²·秒; $\theta = 4.575 \times 10^{-3} T$