

# DIFF2D: моделирование плазмохимических процессов в диффузионном приближении

Ляхов Анатолий Александрович

---

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского

# Плазмохимические технологии

Плазмохимическое осаждение (PECVD – plasma enhanced chemical vapour deposition)

## Основное преимущество

Обеспечение протекания высокоэнергетических процессов при низкой температуре рабочего газа.

*Электроразрядный способ активации* плазмы очень гибок и технически удобен.

# Методы исследования

*Экспериментальные методы:*

эмиссионная спектроскопия

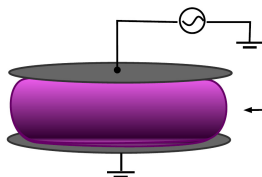
лазерная спектроскопия

зондовая диагностика

масс-спектрометрия

энергоанализаторы

СВЧ-методы



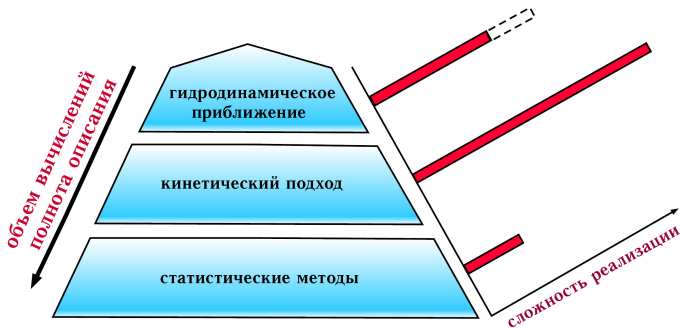
*Теоретическое описание:*

Математические модели  
разрядов

## Решаемые задачи:

- Определение концентраций плазменных частиц вблизи подложки в зависимости от внешних параметров;
- установление основных механизмов плазмохимического процесса (маршруты образования целевых продуктов).
- масштабирование лабораторных систем до промышленных

# Иерархия моделей



Статистические методы (молекулярной динамики, Монте-Карло, частиц-в-ячейках и др.) требуют больших вычислительных ресурсов. Недостаток информации об элементарных столкновительных процессах.

# Входные данные

*Гидродинамические* модели: коэффициенты переноса (диффузии, подвижности, теплопроводности и т.д.), константы скоростей химических реакций;

*Кинетические*: сечения рассеяния частиц, концентрации возбужденных состояний;

*Статистические*: потенциалы межмолекулярного взаимодействия/дифференциальные сечения рассеяния и др.

Информация о *параметрах взаимодействия частиц с поверхностью*: коэффициенты распыления, прилипания, аккомодации энергии и т.д.

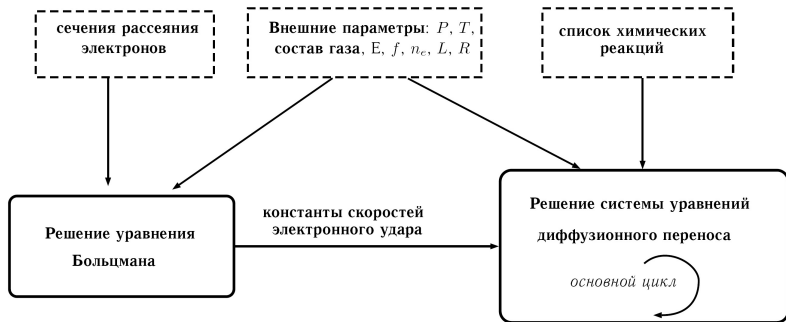


Рис. 1. Структура DIFF2D

# Кинетика электронов в плазме

Кинетическое уравнение Больцмана:

$$\frac{\partial f_0}{\partial t} = \frac{E^2 \nu_m^2}{3m\sqrt{\varepsilon}(\omega^2 + \nu_m^2)} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left( \frac{\varepsilon^{3/2}}{\nu_m} \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} \right) + St^{yn} f_0 + St^{ny} f_0, \quad (1)$$

$f_0(\varepsilon)$  – функция распределения электронов по энергии,  $St^{yn}$ ,  $St^{ny}$  – интегралы упругих и неупругих столкновений.

(1) решается конечно-разностным методом – счет на установление по неявной схеме Эйлера до выравнивания токов на частицу.

В программе имеется возможность решать задачу о зарядке пылевых частиц микронного размера в неравновесной плазме.

*Выходные данные:* ФРЭЭ, кинетические коэффициенты

$(D_e(E/N), \mu_e(E/N), k_i(E/N))$

# Параметры расчета ФРЭЭ

<i>рабочий газ:</i>	Ar, Ar+5%SiH <sub>4</sub>
<i>частота поля:</i>	$f = 13,56$ МГц
<i>давление:</i>	$p = 0,1$ Торр
<i>температура:</i>	$T = 300$ К
<i>приведенное поле:</i>	$E/N = 5 \cdot 10^{-18} - 5 \cdot 10^{-15}$ В·см <sup>2</sup>
<i>концентрация ионов:</i>	$n_i = 10^{10}$ см <sup>-3</sup>
<i>энергия ионов:</i>	$E_i = 0,025-0,1$ эВ
<i>массовая плотность пыли:</i>	$\rho_d = 1$ г/см <sup>3</sup>

	$a, \text{см}$	$n_d, \text{см}^{-3}$	$\xi_d, \text{см}^{-1}$
	$10^{-5}$	$10^6$	$1 \cdot 10^{-4}$
<i>пылесодержание:</i>	$4 \cdot 10^{-6}$	$3,13 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^{-4}$
	$10^{-5}$	$10^7$	$1 \cdot 10^{-3}$
	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$10^7$	$2 \cdot 10^{-3}$



# ФРЭЭ в сиановой плазме

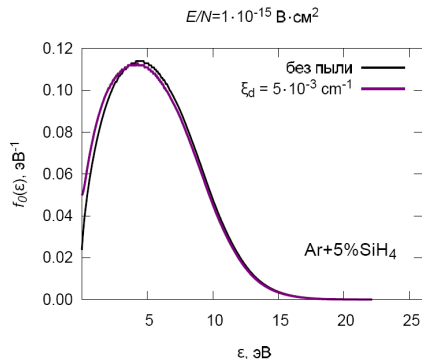


Рис. 2. ФРЭЭ в плазме Ar+5%SiH<sub>4</sub>

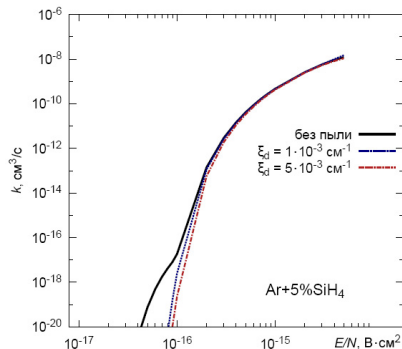


Рис. 3. Константа скорости диссоциации SiH<sub>4</sub>

# Распределение неупругих потерь

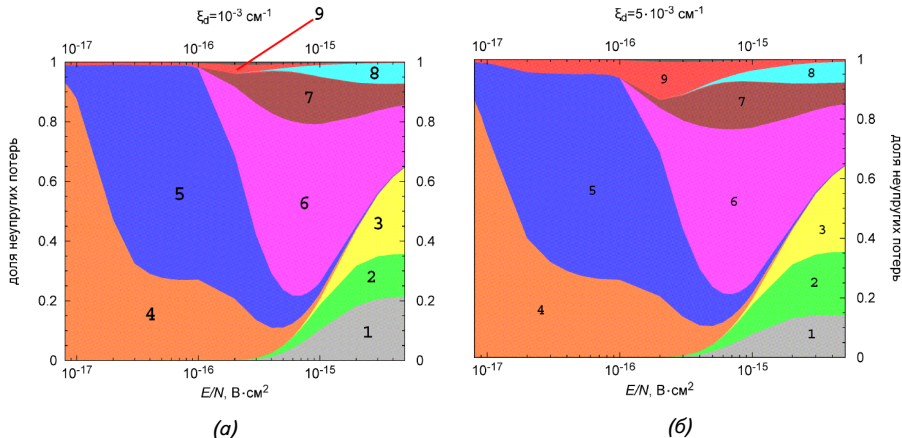


Рис. 4. Ar: 1– возбуждение  $^3P_{0,2}$ ; 2 – возбуждение; 3 – ионизация. SiH<sub>4</sub>: 4 – колебательное возбуждение моды  $\nu_{24}$ ; 5 – колебательное возбуждение моды  $\nu_{13}$ ; 6, 7 – электронное возбуждение; 8 – ионизация, 9 – прилипание к пыли. а)  $\xi_d = 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$  б)  $\xi_d = 5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$

# Диффузионная модель

Диффузия компонентов с учетом химических реакций:

$$\frac{\partial N_k(r, z)}{\partial t} = D_k \nabla_{r,z}^2 N_k + S_k(r, z), \quad (2)$$

$D_k$  – скалярный коэффициент диффузии частиц сорта  $k$ .

Граничные условия:

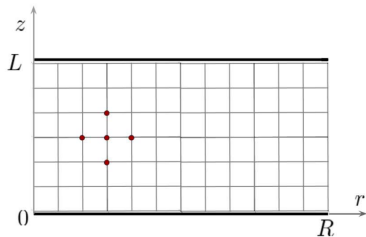
$$\begin{aligned} D_k \frac{\partial N_k}{\partial q} \Big|_{r=R, z=0, L} &= \frac{s_k N_k v_T}{2(2 - s_k)}, \quad q = r, z \\ D_k \frac{\partial N_k}{\partial r} \Big|_{r=0} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$s_k$  – коэффициент прилипания,  $v_T = \sqrt{8kT/\pi M_k}$  – тепловая скорость

# Метод решения системы уравнений переноса

$$\Omega = [0, R] \times [0, L], \quad (\omega_{ij}, r_i = r_{i-1} + h_{r,i}, z_j = z_{j-1} + h_{z,j}), \\ i = 0, 1, \dots, (N_R - 1), \quad j = 0, 1, \dots, (N_Z - 1)$$

- ◆ Шаблон "крест"
- ◆ Погрешность аппроксимации –  $O(h_r^2 + h_z^2 + \tau)$
- ◆ Двухслойная неявная продольно-поперечная схема.



На каждом временном полуслое СЛАУ решаются скалярной прогонкой.

## Модельная задача

Уравнение диффузии в цилиндре без источников. Решение:

$$u(t, r, z) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} C_{nm} e^{-D^2 \left( \frac{(\mu_0^{(n)})^2}{R^2} + \nu_m^2 \right) t} \cdot J_0 \left( \frac{\mu_0^{(n)}}{R} r \right) \cdot \sin(\nu_m z + \vartheta_m), \quad (4)$$

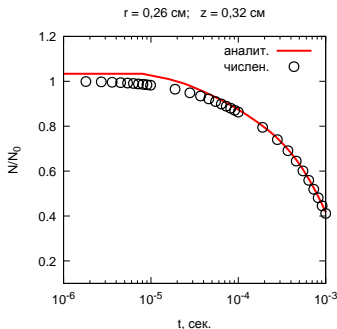
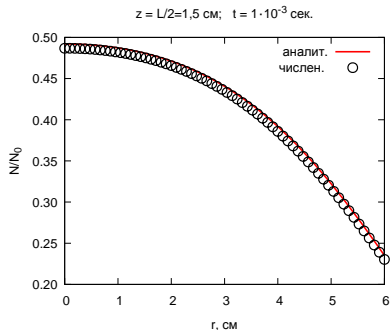
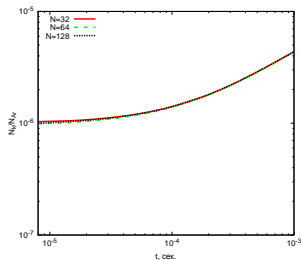
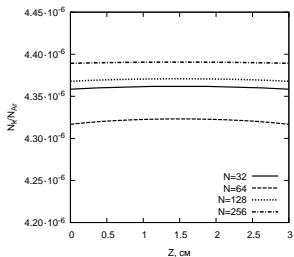
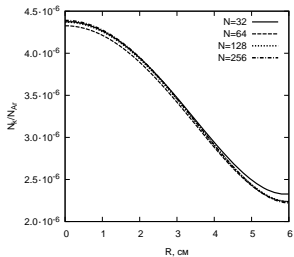


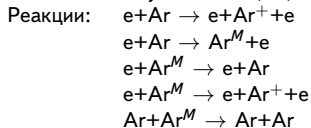
Рис. 5. Аналитическое и численное решение модельной задачи. 100%Ar, p = 0,1 Торр

## Аппроксимационная сходимость



Диффузия Ar, Ar<sup>M</sup> в реакторе R=6 см, L=3 см  
 $p = 0,1$  Торр,  $n_e = 10^9$  см<sup>-3</sup>

Число сеточных узлов N=32,64,128,256.



## Состав модели в приложении к плазме Ar+SiH<sub>4</sub>

- рабочий газ: Ar, SiH<sub>4</sub>;
- радикалы: SiH<sub>x</sub>, (x=1-3), Si;
- полисиланы и их радикалы: Si<sub>2</sub>H<sub>y</sub> (y=2-6), Si<sub>3</sub>H<sub>7</sub>, Si<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, Si<sub>4</sub>H<sub>9</sub>, Si<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, Si<sub>5</sub>H<sub>11</sub>, Si<sub>5</sub>H<sub>12</sub>;
- H, H<sub>2</sub>;
- метастабильные состояния аргона Ar<sup>M</sup> (11,55 эВ, суммарно).

### Параметры расчета

Содержание моносилана	$x = 1 - 10\%$
Давление:	$p = 0,1$ Торр
Температура:	$T = 500$ К
Размеры реактора:	$R = 6$ см, $L = 3$ см
Интервал моделирования	$T = 10^{-1}$ сек.
Число узлов сетки:	$N_R = N_Z = 32-64$
Шаг интегрирования:	$dt = 10^{-7}$ сек.
Населенность Ar <sup>M</sup> :	$n_{Ar^M} / n_{Ar} = 10^{-7}$
Блок ФРЭЭ:	
Концентрация пыли:	$n_d = 10^7$ см <sup>-3</sup>
Радиус частиц пыли:	$a = 10^{-5}$ см
Приведенное поле:	$E/N = 1 \cdot 10^{-15}$ В·см <sup>2</sup>

Около 60 бимолекулярных химических реакций – (Kushner,1988), (Perrin,1996), (Leroy,1998), (Kwon,2009).

$$Pe = \frac{uL}{D} = 4,03 \frac{LQ}{\rho R^2 D}, \quad [Q] = \text{std.см}^3/\text{мин}, [p] = \text{Торр} \quad (5)$$

Для Si<sub>5</sub>H<sub>12</sub>  $D \approx 57$  см<sup>2</sup>/с (Ar+5%SiH<sub>4</sub>  $p = 0,1$  Торр и  $T = 500$  К) и по критерию  $Pe \leq 0,1$  допустимый расход газа  $Q \leq 1,7$  std.см<sup>3</sup>/мин. при котором конвективным движением можно пренебречь.

# Кинетика роста радикалов

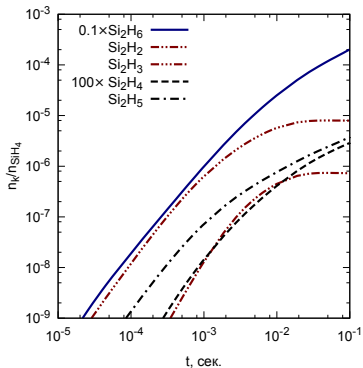
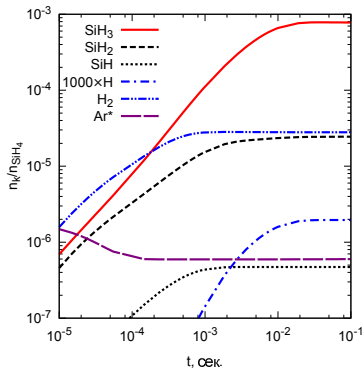


Рис. 6. Относительная концентрация силиновых радикалов и водорода.  $Ar+5\%SiH_4$ ,  $p = 0,1$  Торр



# Диффузионный профиль $\text{SiH}_3$ и потоки

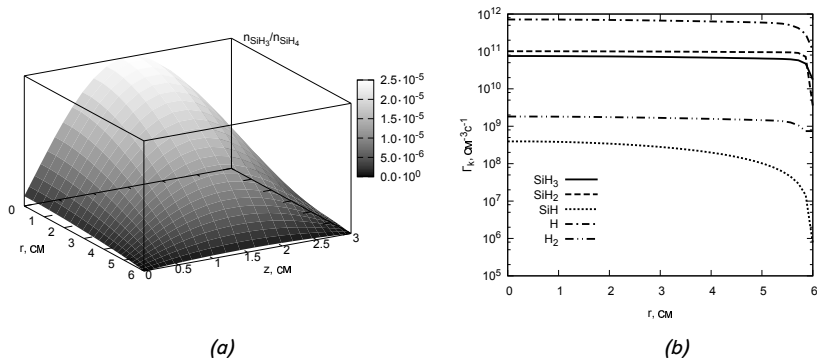


Рис. 7. а) Пространственное распределение  $\text{SiH}_3$  (относительная концентрация); б) аксиальные плотности потоков частиц на торцевую поверхность разрядной камеры при  $z = L$

# Анализ кинетики радикалов

Источниковый член в уравнении диффузии  $k$ -го компонента:

$$S_k(r, z) = \sum_{i=1}^{L_k} w_{k,i} K_i n_{A(i)} n_{B(i)} - n_k \sum_{j=1}^{P_k} K'_j n_{C(j)} \quad (6)$$

$w_{k,i}$  – стехиометрический коэффициент

$n_{A(i)}, n_{B(i)}, n_{C(j)}$  – концентрации реагентов сортов  $A(i), B(i), C(j)$

$K, K'$  – константы скоростей реакций прибыли и убыли

Для всех реакций  $k$ -го компонента во время вычислений накапливаются значения соответствующих слагаемых в суммах правой части (6)

# Кинетика химических реакций

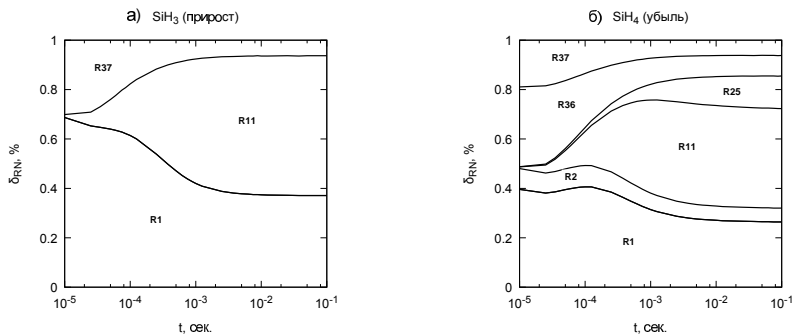
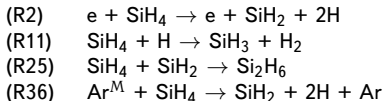
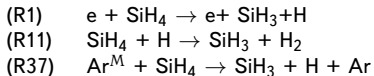


Рис. 8. Парциальный вклад реакций: а) образование радикала SiH<sub>3</sub>; б) диссоциации SiH<sub>4</sub>



# Заключение

DIFF2D: математическая модель переноса нейтральных компонентов химически активной плазмы в реакторе цилиндрической геометрии.

- расчет кинетических параметров неравновесной электронной подсистемы;
- пространственное распределение концентраций реагентов, диффузионные потоки частиц;
- покомпонентный численный анализ химической кинетики на заданном временном интервале.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**

# Сечения рассеяния электронов на Ar и He

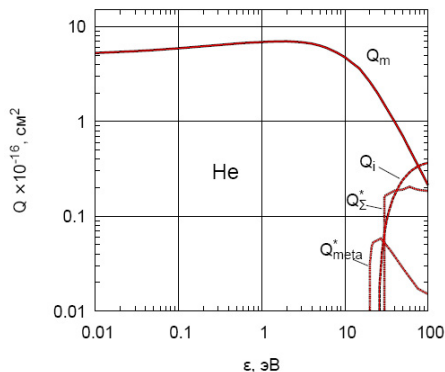
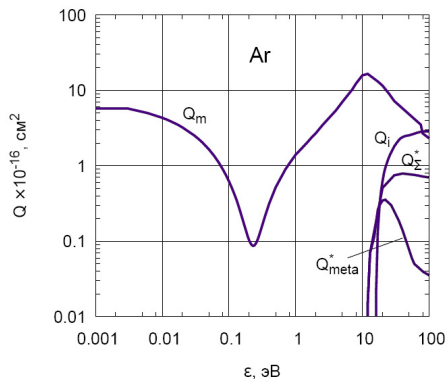


Рис. 9. Morgan database, (LXCAT, 2017)

# Сечения рассеяния электронов на $\text{SiH}_4$

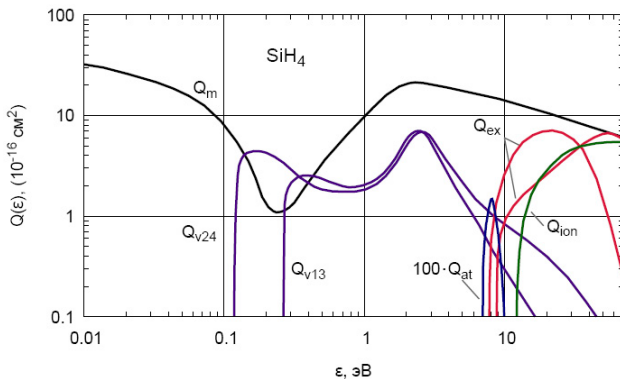


Рис. 10. Morgan database, (LXCAT,2017)

# Интегралы столкновений

$$\text{St}^{\text{yn}} f_0 = \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left[ \frac{m_e}{M} \sqrt{\varepsilon} \nu^{\text{yn}}(\varepsilon) \left( f_0 + T \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} \right) \right] \quad (7)$$

$$\text{St}^{\text{hy}} f_0 = \sum_k (\nu_k^{\text{hy}}(\varepsilon + \varepsilon_k^*) f_0(\varepsilon + \varepsilon_k^*) - \nu_k^{\text{hy}}(\varepsilon) f_0(\varepsilon)) \quad (8)$$



# Кинетические коэффициенты

Коэффициент диффузии электронов (Голант, 1977) –

$$D_e = \frac{2}{3m_e} \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon f_0(\varepsilon)}{\nu_m(\varepsilon)} d\varepsilon, \quad (9)$$

подвижность электронов –

$$\mu_e = \frac{2e}{3m_e} \int_0^{\infty} \left( \varepsilon \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} - \frac{f_0}{2} \right) \frac{d\varepsilon}{\nu_m(\varepsilon)}, \quad (10)$$

$$[f_0(\varepsilon)] = \text{эВ}^{-1}$$

# Приближение локальной энергии

Пространственный профиль кинетических коэффициентов электронов  $K(\vec{r})$  через профиль средней энергии электронов по схеме:

$$\varepsilon_e(\vec{r}) \rightarrow |E/N|(\vec{r}) \rightarrow K(\vec{r}).$$

Зависимости  $\varepsilon_e(E/N)$ ,  $K(E/N)$  предварительно табулируются с помощью подпрограммы расчета ФРЭЭ.

Коэффициенты диффузии  $D_k$  вычислялись по формуле Уилке:

$$D_k = (n - n_k) \left[ \sum_{j:j \neq k} n_j / D_{kj} \right]^{-1} \quad (11)$$

Бинарные коэффициенты  $D_{kj}$

$$D_{jk} = 1.412308 \frac{\sqrt{T^3 / \mu_{kj}}}{\rho \sigma_{jk}^2 \Omega_{jk}^*(T_{jk}^*)} \left[ \frac{\text{см}^2}{\text{с}} \right] \quad (12)$$

(Гиршфельдер, 1961), (Perrin, 1996), (Горбачев, 2000)

## Коэффициенты диффузии ( $p=0,1$ Тор, $T=500$ К)

Компонент	$\sigma, \text{ \AA}$	$\varepsilon/k_B T$	$D, \text{ cm}^2/\text{c}$	$s$
SiH <sub>4</sub>	4,084	207,6	140,30	0,00
Ar	3,542	93,3	167,78	0,00
SiH <sub>3</sub>	3,943	170,3	150,42	0,15
SiH <sub>2</sub>	3,803	133,1	162,10	1,00
SiH	3,662	95,8	176,18	1,00
Si	2,910	3036,0	123,41	1,00
H	2,50	30,0	1149,40	0,20
H <sub>2</sub>	2,915	59,7	677,96	0,00
Si <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	4,383	323,8	106,41	1,00
Si <sub>2</sub> H <sub>3</sub>	4,494	318,2	103,40	1,00
Si <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	4,601	312,6	100,62	1,00
Si <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	4,717	306,9	97,75	0,15
Si <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	4,828	301,3	95,12	0,00
Si <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	5,562	331,2	74,21	0,00
Si <sub>3</sub> H <sub>7</sub>	5,08	120,0	93,77	0,15
Si <sub>4</sub> H <sub>9</sub>	5,80	331,2	67,91	0,15
Si <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	5,80	331,2	67,84	0,00
Si <sub>5</sub> H <sub>11</sub>	6,50	331,2	57,35	0,15
Si <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	6,50	331,2	57,31	0,00
Ar <sup>M</sup>	3,44	331,2	148,59	0,00

№	Реакция	$k, \text{см}^3/\text{с}$	№	Реакция	$k, \text{см}^3/\text{с}$
1	$e + \text{SiH}_4 \rightarrow e + \text{SiH}_3 + \text{H}$	F	30	$\text{Si}_2\text{H}_4 + \text{H}_2 \rightarrow \text{SiH}_4 + \text{SiH}_2$	$3.56 \cdot 10^{-9}$
2	$e + \text{SiH}_4 \rightarrow e + \text{SiH}_2 + 2\text{H}$	F	31	$\text{Si}_2\text{H}_5 + \text{H} \rightarrow \text{Si}_2\text{H}_4 + \text{H}_2$	$1.00 \cdot 10^{-10}$
3	$e + \text{SiH}_4 \rightarrow \text{SiH} + \text{H} + \text{H}_2 + e$	F	32	$\text{Si}_2\text{H}_6 + \text{H} \rightarrow \text{SiH}_4 + \text{SiH}_3$	$6.70 \cdot 10^{-12}$
4	$e + \text{SiH}_4 \rightarrow \text{SiH}_2 + \text{H}_2 + e$	F	33	$\text{Si}_2\text{H}_6 + \text{H} \rightarrow \text{Si}_2\text{H}_5 + \text{H}_2$	$1.30 \cdot 10^{-12}$
5	$e + \text{H}_2 \rightarrow e + 2\text{H}$	F	34	$\text{Si}_2\text{H}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{Si}_2\text{H}_5$	$1.70 \cdot 10^{-12}$
6	$e + \text{Si}_2\text{H}_6 \rightarrow e + \text{SiH}_4 + \text{SiH}_2$	F	35	$\text{Si}_3\text{H}_8 + \text{H} \rightarrow \text{Si}_2\text{H}_5 + \text{SiH}_4$	$1.97 \cdot 10^{-11}$
7	$e + \text{Si}_2\text{H}_6 \rightarrow e + \text{Si}_2\text{H}_4 + \text{H}_2$	F	36	$\text{Ar}^M + \text{SiH}_4 \rightarrow \text{SiH}_2 + 2\text{H} + \text{Ar}$	$2.60 \cdot 10^{-10}$
8	$e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}^M$	F	37	$\text{Ar}^M + \text{SiH}_4 \rightarrow \text{SiH}_3 + \text{H} + \text{Ar}$	$1.40 \cdot 10^{-10}$
9	$e + \text{Ar}^M \rightarrow e + \text{Ar}$	F	38	$\text{Ar}^M + \text{H}_2 \rightarrow 2\text{H} + \text{Ar}$	$7.00 \cdot 10^{-11}$
10	$e + \text{Ar}^M \rightarrow e + \text{Ar}^+ + e$	F	39	$\text{Ar}^M + \text{SiH}_3 \rightarrow \text{SiH}_2 + \text{H} + \text{Ar}$	$1.00 \cdot 10^{-10}$
11	$\text{SiH}_4 + \text{H} \rightarrow \text{SiH}_3 + \text{H}_2$	$2.80 \cdot 10^{-11}$	40	$\text{Ar}^M + \text{SiH}_2 \rightarrow \text{SiH} + \text{H} + \text{Ar}$	$1.00 \cdot 10^{-10}$
12	$\text{SiH}_4 + \text{SiH} \rightarrow \text{Si}_2\text{H}_3 + \text{H}_2$	$2.18 \cdot 10^{-11}$	41	$\text{Ar}^M + \text{SiH} \rightarrow \text{Si} + \text{H} + \text{Ar}$	$1.00 \cdot 10^{-10}$
13	$\text{SiH}_4 + \text{SiH} \rightarrow \text{Si}_2\text{H}_5$	$2.50 \cdot 10^{-12}$	42	$\text{Ar}^M + \text{Si}_2\text{H}_6 \rightarrow \text{Si}_2\text{H}_4 + 2\text{H} + \text{Ar}$	$6.60 \cdot 10^{-10}$
14	$\text{SiH}_3 + \text{H} \rightarrow \text{SiH}_2 + \text{H}_2$	$5.00 \cdot 10^{-10}$	43	$\text{Ar}^M + \text{Si}_2\text{H}_6 \rightarrow \text{Si}_2\text{H}_2 + 2\text{H} + \text{Ar}$	$6.60 \cdot 10^{-10}$
15	$\text{SiH}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{SiH}_4$	$7.66 \cdot 10^{-15}$	44	$\text{Ar}^M + \text{Ar}^M \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{Ar} + e$	$8.00 \cdot 10^{-9}$
16	$\text{SiH}_2 + \text{H} \rightarrow \text{SiH} + \text{H}_2$	$2.31 \cdot 10^{-11}$	45	$\text{SiH}_2 + \text{Si}_2\text{H}_6 \rightarrow \text{Si}_3\text{H}_8$	$2.03 \cdot 10^{-11}$
17	$\text{SiH}_2 + \text{SiH} \rightarrow \text{Si}_2\text{H}_3$	$7.22 \cdot 10^{-13}$	46	$\text{SiH} + \text{Si}_2\text{H}_6 \rightarrow \text{Si}_3\text{H}_7$	$1.00 \cdot 10^{-11}$
18	$\text{SiH}_3 + \text{SiH}_3 \rightarrow \text{SiH}_4 + \text{SiH}_2$	$3.00 \cdot 10^{-11}$	47	$\text{SiH}_2 + \text{Si}_3\text{H}_8 \rightarrow \text{Si}_4\text{H}_{10}$	$1.00 \cdot 10^{-11}$
19	$\text{SiH}_2 + \text{SiH}_2 \rightarrow \text{Si}_2\text{H}_2 + \text{H}_2$	$1.08 \cdot 10^{-9}$	48	$\text{Si}_3\text{H}_8 + \text{SiH}_3 \rightarrow \text{Si}_4\text{H}_9 + \text{H}_2$	$1.00 \cdot 10^{-11}$
20	$\text{SiH}_3 + \text{SiH}_2 \rightarrow \text{Si}_2\text{H}_5$	$3.77 \cdot 10^{-13}$	49	$\text{Si}_2\text{H}_5 + \text{Si}_2\text{H}_5 \rightarrow \text{Si}_4\text{H}_{10}$	$1.00 \cdot 10^{-11}$
21	$\text{SiH}_4 + \text{Si}_2\text{H}_4 \rightarrow \text{Si}_3\text{H}_8$	$1.00 \cdot 10^{-10}$	50	$\text{Si}_2\text{H}_4 + \text{Si}_2\text{H}_6 \rightarrow \text{Si}_4\text{H}_{10}$	$1.00 \cdot 10^{-11}$
22	$\text{SiH} + \text{H} \rightarrow \text{Si} + \text{H}_2$	$1.70 \cdot 10^{-10}$	51	$\text{Si}_3\text{H}_7 + \text{H} \rightarrow \text{Si}_3\text{H}_8$	$1.00 \cdot 10^{-11}$
23	$\text{SiH}_4 + \text{Si} \rightarrow \text{Si}_2\text{H}_2 + \text{H}_2$	$1.62 \cdot 10^{-13}$	52	$\text{SiH} + \text{Si}_3\text{H}_8 \rightarrow \text{Si}_4\text{H}_9$	$1.00 \cdot 10^{-11}$
24	$\text{SiH}_2 + \text{Si} \rightarrow \text{Si}_2\text{H}_2$	$4.53 \cdot 10^{-13}$	53	$\text{Si}_4\text{H}_9 + \text{H} \rightarrow \text{Si}_4\text{H}_{10}$	$1.00 \cdot 10^{-11}$
25	$\text{SiH}_4 + \text{SiH}_2 \rightarrow \text{Si}_2\text{H}_6$	$1.05 \cdot 10^{-11}$	54	$\text{SiH} + \text{Si}_4\text{H}_{10} \rightarrow \text{Si}_5\text{H}_{11}$	$1.00 \cdot 10^{-11}$
26	$\text{Si}_2\text{H}_2 + \text{H} \rightarrow \text{Si}_2\text{H}_3$	$4.94 \cdot 10^{-11}$	55	$\text{SiH}_2 + \text{Si}_4\text{H}_{10} \rightarrow \text{Si}_5\text{H}_{12}$	$1.00 \cdot 10^{-11}$
27	$\text{Si}_2\text{H}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{Si}_2\text{H}_4$	$1.40 \cdot 10^{-11}$	56	$\text{SiH}_3 + \text{Si}_4\text{H}_{10} \rightarrow \text{Si}_5\text{H}_{11} + \text{H}_2$	$1.00 \cdot 10^{-11}$
28	$\text{SiH}_4 + \text{Si}_2\text{H}_5 \rightarrow \text{SiH}_3 + \text{Si}_2\text{H}_6$	$5.00 \cdot 10^{-13}$	57	$\text{Si}_5\text{H}_{11} + \text{H} \rightarrow \text{Si}_5\text{H}_{12}$	$1.00 \cdot 10^{-11}$
29	$\text{SiH}_3 + \text{Si}_2\text{H}_6 \rightarrow \text{SiH}_4 + \text{Si}_2\text{H}_5$	$2.76 \cdot 10^{-12}$			