

03; 04

© 1992

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА В ВЧ РАЗРЯДЕ МЕТОДОМ КОНТАКТНОГО ТЕРМОМЕТРА С ОПТИЧЕСКИМ СЧИТЫВАНИЕМ

А.Н. Магун о в

При использовании контактных методов диагностики температура газа определяется из стандартного уравнения баланса тепловых потоков на чувствительный элемент (спай термодпары и т. д.), температура которого измеряется. Уравнение баланса [1] содержит несколько близких по величине слагаемых, о каждом из которых необходимо делать допущения, не проверяемые экспериментально (например, о величине коэффициента тепловой аккомодации молекул, излучательной способности чувствительного элемента, градиенте температуры вдоль подводящих проводов и т. д.). Из-за неопределенности ряда параметров погрешность определения разности между температурами газа и чувствительного элемента может достигать сотен процентов.

В данной работе проведено измерение температуры газа в ВЧ разряде по переходной характеристике установления температуры массивного термометрического тела после зажигания разряда. Термометрическим телом является пластинка монокристаллического кремния. Использование нестационарного процесса позволяет в каждый момент времени измерять две величины — температуру чувствительного элемента и ее производную по времени. Мощность теплового излучения кремниевой пластинки пренебрежимо мала по сравнению с тепловым потоком из газа, т. к. монокристалл кремния в диапазоне 2–20 мкм прозрачен до температур ~ 200 °С. В уравнении теплового баланса количество слагаемых сокращается до минимума, а в оставшемся выражении определяются оба неизвестных параметра (температура газа и характеристика теплообмена на границе газ-поверхность).

Эксперимент проводился в цилиндрическом кварцевом реакторе диаметром 19 см и длиной 40 см. Внешние электроды, параллельные оси цилиндра, возбуждают емкостной разряд на частоте 13.56 МГц. Давление кислорода в реакторе 50 Па, расход газа 40 см³/мин. Термометр-полированная кремниевая пластинка размером 2.7 x 2.7 x 0.05 см³ помещается на оси реактора, плоскость пластинки перпендикулярна оси. Держатель выполнен из двух кварцевых стержней диаметром 1.5 мм. Держатель имеет меньшую теплоемкость и площадь поверхности по сравнению с термометром. Теплообменом термометра с держателем можно пренебречь вследствие малой площади точечного контакта и низкой теплопроводности плавленного кварца.

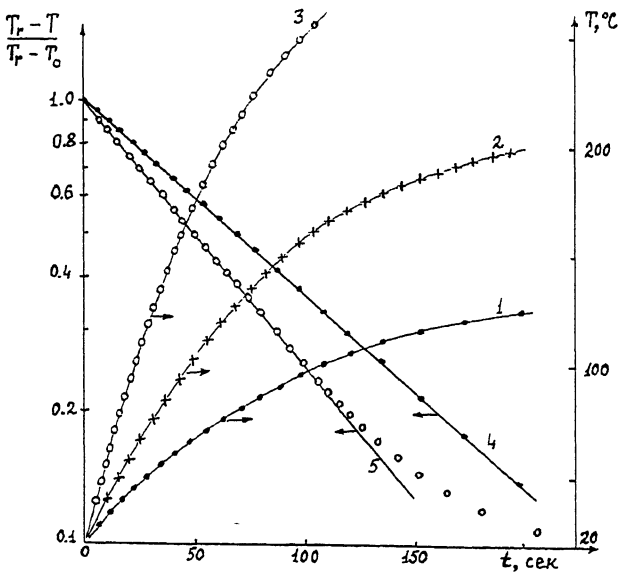


Рис. 1. Температура кремниевой пластинки ($2.7 \times 2.7 \times 0.47 \text{ см}^3$) после зажигания разряда. Мощность, вкладываемая в разряд: 55 Вт (1,4), 110 Вт (2), 200 Вт (3,5).

Температура пластинки после зажигания разряда измеряется методом лазерной интерферометрии [2], основанном на сильной температурной зависимости оптической толщины кремния, выполняющего роль интерферометра Фабри-Перо для излучения He-Ne лазера ($\lambda = 1.15 \text{ мкм}$). Оптическая толщина интерферометра увеличивается на $\lambda/4$, а интенсивность отраженного пластинкой света изменяется в ~ 3 раза (от максимума до минимума или наоборот) при увеличении температуры кремния на $\Delta T = 2.5 \text{ К}$. В пределах изменения регистрируемого сигнала легко различить не менее 10 градаций, что позволяет проводить измерения с погрешностью, не превышающей 0.3 К (при автоматизированной обработке интерферограмм точность увеличивается по крайней мере на порядок величины).

Регистрация зависимости температуры кремния от величины после пробоя газа проведена для девяти уровней ВЧ мощности, вкладываемой в разряд, в диапазоне 55–340 Вт. На рис. 1 приведены зависимости для трех уровней мощности.

На начальной стадии нагрева, когда температура кристалла невелика ($T < 200 \text{ }^\circ\text{C}$), тепловым излучением пластины можно пренебречь по сравнению с мощностью теплового источника, нагревающего пластинку [3]. Температурная кинетика описывается выражением

$$cndT/dt = \alpha S(T_r - T), \quad (1)$$

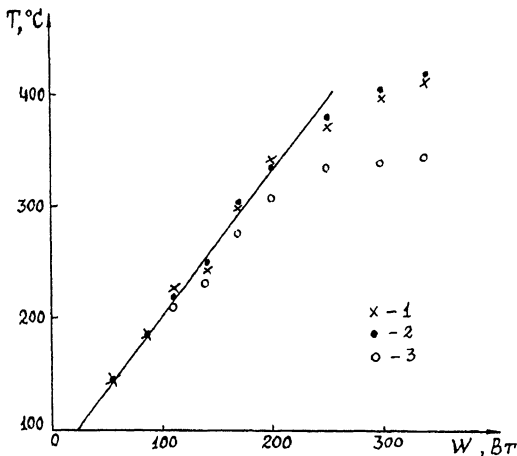


Рис. 2. Зависимость температуры газа от мощности, вкладываемой в разряд (1, 2), и установившаяся температура образца (3). Толщина кремниевой пластинки: 470 мкм (1, 3), 380 мкм (2).

где c , m и S - соответственно удельная теплоемкость, масса и площадь пластинки, α (Вт/см²К) - коэффициент теплоотдачи на границе раздела газ-кремний, T - температура газа. В эксперименте измеряются две величины, входящие в (1): dT/dt и T . Для определения T_r и α достаточно провести измерения в два различных момента времени. Такой способ справедлив, когда T_r и α не меняются во времени. При постоянных значениях T_r и α уравнение (1) интегрируется, причем в полулогарифмических координатах зависимость спрямляется:

$$\ln[(T_r - T)/(T_r - T_0)] = -\alpha St/cm, \quad (2)$$

где T_0 - начальная температура кристалла. Проводя вариацию значений T_r и α , можно по методу наименьших квадратов найти значения, наилучшим образом согласующиеся с экспериментальной зависимостью $T(t)$. Для расчета использованы 20-30 экспериментальных точек в диапазоне $T \approx 180$ °С для каждой мощности. На рис. 1 приведена зависимость (2) для двух уровней мощности. Коэффициенты корреляции между полученными аппроксимациями и экспериментальными зависимостями $T(t)$ во всех случаях не ниже 0,999. Таким образом, предположение о постоянстве T_r и α подтверждается. При малом уровне мощности ($W \approx 100$ Вт) и невысоких температурах пластины выражение (1) точно описывает экспериментальную зависимость $T(t)$ вплоть до установившейся температуры. При повышении мощности и температуры пластины наблюдаются расхождения между значениями, полученными экспе-

риментально и вычисленными согласно (2), как видно на рис. 1 (кривая 5). Отклонение обусловлено тепловым излучением пластины. При мощностях 250–340 Вт установившаяся температура пластины практически постоянна, что связано с сильной ($\sim T^2$, где $n \approx 10-11$) температурной зависимостью тепловой мощности, излучаемой пластиной. При этих мощностях отрыв температуры газа от температуры пластины достигает 50–80 °С. На рис. 2 показаны зависимости температуры газа от мощности, вкладываемой в разряд, полученные для образцов разной толщины (470 и 380 мкм). В интервале 55–200 Вт наблюдается линейная зависимость T_r (°С) = $74 + 1.30 W$ (Вт). На рис. 2 приведены также значения установившейся температуры образца ($k = 470$ мкм) в диапазоне мощностей, где имеется отрыв температуры газа.

Коэффициент теплоотдачи α увеличивается с температурой газа от $3.4 \cdot 10^{-4}$ Вт/см²К при $W = 55$ Вт до $5.7 \cdot 10^{-4}$ Вт/см²К при $W = 340$ Вт. Заряженные частицы не влияют на тепловой баланс пластины вследствие малой степени ионизации газа (порядка 10^{-7} – 10^{-6} [4]). Излучение плазмы и объемный ВЧ нагрев пластины, как показано в [2], также незначительны по сравнению с основным каналом нагрева.

Высокие температуры газа при малой удельной мощности (4.4×10^{-3} – $2.7 \cdot 10^{-2}$ Вт/см³) обусловлены большим размером реактора: при равномерном энерговыделении температуры стенки T_r газа на оси T_r и радиус R связаны соотношением $T_r^2 - T_0^2 \sim R^{20}$ [5]. В трубках диаметром 3 см температура газа достигает 700 К, когда характерный масштаб удельной мощности равен 0.2–0.3 Вт/см³ [1, 6], что на порядок величины выше, чем в нашем реакторе.

Автор выражает благодарность И.И. Амирову за помощь в проведении экспериментов.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] И в а н о в Ю.А., Л е б е д е в Ю.А., П о л а к Л.С. Методы контактной диагностики в неравновесной плазмохимии. М.: Наука, 1981. 143 с.
- [2] М а г у н о в А.Н., М у д р о в Е.В. Тез. докл. Межд. симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии. Рига. 1991. С. 273–275.
- [3] М а г у н о в А.Н. Роль теплового излучения в установлении температуры кремниевой пластины в газовом разряде. Препринт ИМ АН. 1990. № 18. 24 с.
- [4] И в а н о в с к и й Г.Ф., П е т р о в В.И. Ионно-плазменная обработка материалов. М.: Радио и связь, 1985. 232 с.
- [5] К а р а у л и н а Е.В., Л е б е д е в Ю.А. О соотношении характеристик плазмы неравновесных самостоятельных разрядов СВЧ и постоянного тока. В сб.: Плазмохимия–91 / Под ред. Л.С. Полака. М.: ИНХС АН, 1991. С. 7–44.

[6] Р у с а н о в В.Д., Ф р и д м а н А.А. Физика химически активной плазмы. М.: Наука, 1984. 414 с.

Институт микроэлектроники РАН,
Ярославль

Поступило в Редакцию
12 декабря 1991 г.
В окончательной редак-
ции 5 мая 1992 г.