

04

© 1992

РАЗМЕРНО-ЗАВИСИМАЯ ПЛОТНОСТЬ МОЩНОСТИ
ТЕПЛОВОГО ИСТОЧНИКА ПРИ НАГРЕВАНИИ
МОНОКРИСТАЛЛА КРЕМНИЯ В ПЛАЗМЕ ВЧ РАЗРЯДА

А.Н. Магунов

Поток энергии из плазмы на твердую поверхность обычно является аддитивным параметром, пропорциональным площади поверхности [1]. При исследовании кинетики нагрева твердого тела, со всех сторон окруженного плазмой ВЧ разряда, обнаружена ситуация, когда плотность мощности, нагревающей тело, не является постоянной величиной, но зависит от его геометрических размеров. При этом полная тепловая мощность, передаваемая газоразрядной плазмой пластинке монокристаллического кремния, пропорциональна как площади, так и длине периметра пластинки.

Взаимодействие кислородной плазмы ВЧ разряда (13.56 МГц) с пластинками кремния изучалось в цилиндрическом кварцевом реакторе (внутренний диаметр 19 см, длина 40 см), ось которого расположена горизонтально. Емкостной разряд возбуждается внешними полуцилиндрическими электродами, параллельными оси цилиндра. Образец – прямоугольная пластинка толщиной около 0.5 мм – размещается на оси реактора в плоскости силовых линий электрического поля. Образцы изготавливались из серийно выпускаемых пластин монокристаллического кремния КЭФ-4.5 (легирующая примесь – фосфор с концентрацией 10^{15} см^{-3} , удельное электрическое сопротивление $\rho = 4.5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) и КДБ-10 (бор – 10^{15} см^{-3} , $\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$).

Держатель образца изготовлен из двух кварцевых стержней диаметром 1.5 мм, расположенных на расстоянии 15 мм. Давление газа в реакторе 50 Па, скорость прокачки $40 \text{ см}^3/\text{мин}$ (при этом среднее время нахождения нейтральной частицы в реакторе составляет 5 с). Напуск газа производится через 300 отверстий диаметром 0.3 мм, расположенных на расстоянии 5 мм друг от друга в четырех кварцевых трубках, установленных на стенке реактора параллельно оси цилиндра. Температура образца измеряется методом лазерной интерферометрии [2].

Эксперимент проведен для трех серий образцов: в первой горизонтальный размер всех 10 образцов одинаков (3.2 см), а вертикальный меняется от 3.1 до 0.35 см; во второй – вертикальный размер одинаков (2 см), а горизонтальный меняется от 4.9 до 1.75 см; в третьей от образца к образцу меняются оба размера (от $3.6 \times 3.6 \text{ см}^2$ до $0.38 \times 1.7 \text{ см}^2$).

Регистрируется зависимость температуры T образцов от времени t после зажигания разряда. Для каждой полученной зависимости

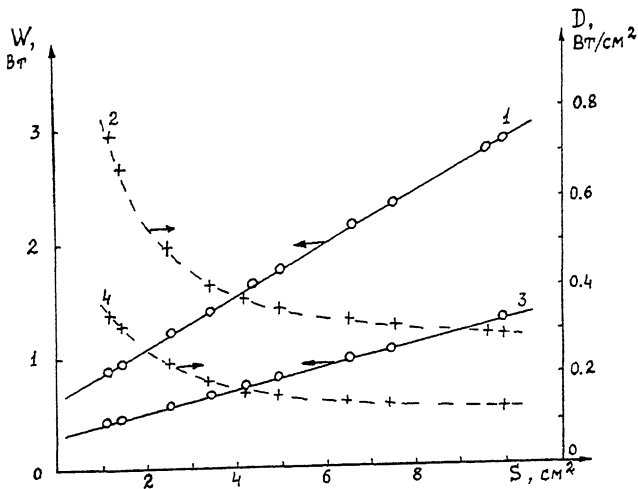


Рис. 1. Зависимость мощности W и плотности мощности D теплового источника от площади образца. $W_0 = 300$ Вт (1.2), 140 Вт (3.4).

$T(t)$ определяется скоростью нагревания на начальном участке. На рис. 1 представлена зависимость мощности $W(\text{Вт}) = cm(dT/dt)$, нагревающей образец, от его площади (c и m — удельная теплоемкость и масса образца). Зависимость является линейной (коэффициент корреляции 0.995) и при экстраполяции в точку $S = 0$ дает конечное значение мощности. Плотность мощности $D(\text{Вт}/\text{см}^2) = W/S$ не остается постоянной величиной, но проявляет размерную зависимость (рис. 1, кривые 2.4). Величина мощности при $S = 0$ пропорциональна пределу, к которому стремится периметр образцов при $S \rightarrow 0$. Прямая проверка влияния периметра образца на кинетику нагрева проведена следующим образом: для двух образцов одинаковой площади и массы, но разной формы (квадрат $2 \times 2 \text{ см}^2$ и прямоугольник $0.8 \times 5 \text{ см}^2$) скорости нагревания и мощности тепловых источников отличаются на 30–45% в интервале мощностей, вкладываемых в разряд, 140–300 Вт. Более высокая скорость нагревания характерна для образца с более длинным периметром.

Чтобы учесть влияние формы образца на кинетику нагрева, предположим наличие двух тепловых источников, один из которых локализован на периметре образца, а другой распределен по всей поверхности:

$$W = 2I_1 S + I_2 P, \quad (1)$$

$$D = 2I_1 + I_2 P/S. \quad (2)$$

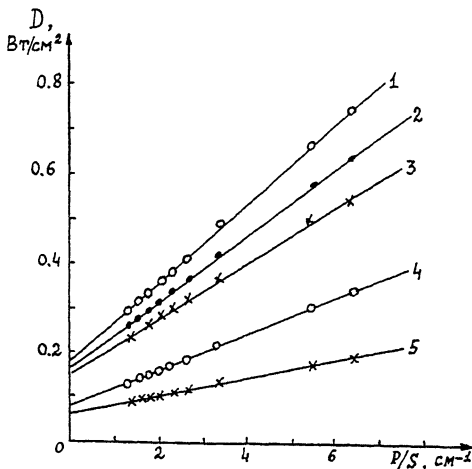


Рис. 2. Зависимость плотности мощности D от отношения P/S при различных температурах. Мощность, вкладываемая в разряд: 300 Вт (1–3), 140 Вт (4–5). Температура образца: 55 °С (1,4), 95 °С (2), 135 °С (3, 5).

Здесь S и ρ – площадь одной поверхности и длина периметра, I_1 (Вт/см²) и I_2 (Вт/см) характеризуют поверхностный и линейный тепловые источники. Первый источник действует на любой границе раздела, второй возникает около ограниченного тела, внесенного в плазму. Ранее действие этого источника не наблюдалось вследствие того, что при изучении кинетики нагревания образца в плазме не была исследована размерная зависимость (практически всегда используются образцы одного размера). По трем сериям образцов определены интенсивности источников: $I_1 = 90 \pm 10$ мВт/см² и $I_2 = 100 \pm 20$ мВт/см при вкладываемой в разряд мощности $W_0 = 300$ Вт; $I_1 = 41 \pm 4$ мВт/см² и $I_2 = 43 \pm 5$ мВт/см при $W_0 = 140$ Вт. Оценить поверхностную плотность мощности линейного источника можно следующим образом: если тепловыделение идет в примыкающем к периметру участке с эффективной шириной l , максимальное значение которой не превосходит полуширины самого малого образца ($l \leq 1.7$ мм), то отношение $I_2/2l$ дает нижнюю границу 0.28 Вт/см² ($W_0 = 300$ Вт) и 0.13 Вт/см² ($W_0 = 140$ Вт). При увеличении температуры образца интенсивность каждого из источников уменьшается (рис. 2), причем уменьшение нельзя объяснить тепловым излучением пластины, т. к. при $T \leq 200$ °С кремний в ИК диапазоне имеет высокую прозрачность и является неэффективным тепловым излучателем.

Вероятный механизм тепловыделения вблизи периметра образца связан с краевым электростатическим эффектом, т. е. усилением поля у краев плоскостей, ограничивающих образец. Оценка интенсивности теплового источника, обусловленного ионной бомбардировкой образца дает следующий результат: при концентрации заряжен-

ных частиц в плазме $n_e \approx 10^9 \text{ см}^{-3}$, плавающем потенциале образца порядка $\sim 100 \text{ В}$, бесстолкновительном наборе энергии в слое и полной тепловой аккомодации $\delta = 1$ получаем для ионного тока насыщения

$$D \approx 0.25 n_e \bar{v}_i \delta \mathcal{E} \approx 4 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/см}^2.$$

Таким образом, ионная бомбардировка может обеспечить интенсивность на 3 порядка величины меньшую, чем наблюдаемая в эксперименте.

Проведена проверка зависимости эффекта от проводимости образца. Установлено, что кинетика нагревания не зависит от проводимости в диапазоне от $\rho = 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (пленка алюминия на кремнии) до $\rho = 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (высокоомный кремний, очищенный зонной плавкой).

Распределение свечения разряда вблизи образца не содержит каких-либо аномалий, указывающих на существование слоя, аналогичного приэлектродному.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Войцения В.С., Гужова С.Г., Титов В.И. Воздействие низкотемпературной плазмы и электромагнитного излучения на материалы. М.: Энергоатомиздат, 1991. 223 с.
- [2] Магуннов А.Н., Мудров Е.В. // Теплофизика высоких температур. 1992. Т. 30. В. 2. С. 372-378.

Институт микроэлектроника РАН,
Ярославль

Поступило в Редакцию
2 июня 1992 г.