

04;09;12

©1994

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ОБЪЕМНОГО НАГРЕВА ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК НА КРЕМНИИ В ПЛАЗМЕ ВЧ РАЗРЯДА

А.Н.Магунов

Известно, что металлическая поверхность при взаимодействии с плазмой может проявлять каталитическую или химическую активность [1-3]. Те гетерогенные процессы, в которых выделяется или поглощается тепло, представляют интерес для изучения калориметрическим методом. Тепловая диагностика возможна, если при нанесении металлической пленки на термозонд дополнительное тепловыделение происходит только на поверхности. В этом случае тепловая мощность прямо связана со скоростью гетерогенного процесса. В ряде работ [4-5] содержится утверждение, что в ВЧ разряде действует объемный источник нагрева металлических пленок, однако в основе утверждения лежат косвенные данные, а не прямые измерения. При термозондовых исследованиях в ВЧ и СВЧ разрядах считается возможной систематическая погрешность из-за нагрева металлического зонда в поле электромагнитной волны [6].

В данной работе методом дифференциальной сканирующей калориметрии проведены измерения ВЧ мощности, поглощаемой металлическими пленками толщиной 0.1-0.7 мкм, и показано, что роль объемного нагрева пленок в ВЧ разряде пренебрежимо мала по сравнению с ролью других механизмов.

Эксперименты проведены в цилиндрическом кварцевом реакторе с емкостным ВЧ возбуждением разряда внешними электродами. В экспериментах использованы металлические пленки двух типов: с толщиной 0.12 мкм и электрическим сопротивлением $\sigma^{-1} = 4.0 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ (алюминий), а также с толщиной 0.7 мкм и сопротивлением $\sigma^{-1} = 7.6 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ (сплав Al+1%Si). Пленки нанесены на монокристаллы кремния методом электронно-лучевого испарения. В качестве подложек использованы пластины КЭФ-4.5(100) (электронная проводимость, легирующая примесь — фосфор, концентрация свободных носителей 10^{15} см^{-3} , сопротивление $\sigma^{-1} = 4.5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, ориентация поверхности 100). Толщина монокристаллов около 0.5 мм.

Образец — пластинка прямоугольной формы с площадью около 4 см^2 — располагается на оси реактора на кварцевой подвеске. Плоскость пластины перпендикулярна оси реактора и параллельна вектору ВЧ поля. Температура образцов измеряется лазерным интерференционным термометром [7]. Металлическая пленка на поверхности не препятствует измерению температуры, так как лазерный пучок падает на противоположную поверхность пластинки.

Проверка роли объемного ВЧ нагрева пленок проведена в отсутствие плазмы в реакторе. При напряжении на электродах, равном 240 В (амплитуда “холодного” поля на оси 10 В/см), и давлении кислорода в реакторе $\sim 10^3 \text{ Па}$, разряд не зажигается, так как поле ниже порогового. Образец (структура Al-Si) в этих условиях не нагревается в течение 5 мин работы генератора. Измерение температуры за это время не достигает порога обнаружения, равного 0.1 К. Таким образом, скорость нагревания ниже, чем $3 \cdot 10^{-4} \text{ К/с}$, а мощность, выделяющаяся в образце, меньше 0.1 мВт. Отсутствие ВЧ нагрева объясняется тем, что время релаксации поля в образце $\tau_m = \epsilon \epsilon_0 \sigma^{-1}$ на несколько порядков меньше периода τ поля. В любой момент поле E в образце ослаблено электростатическим экранированием столь существенно, что поглощаемая мощность $\sigma E^2 V$ практически равна нулю (V -объем).

В присутствии плазмы, окружающей образец, ситуация может измениться. Соотношение $\tau_m \ll \tau$ указывает на причину ослабления поля в образце, но степень ослабления и величина теплового эффекта при этом остаются неопределенными. ВЧ ток, протекающий в образце, может увеличиться вследствие эмиссионных явлений на краях образца [8], а также возникновения емкостей на границах поверхность-плазма. Кроме того, известно [9], что проводящее тело, вытянутое вдоль поля, при контакте с плазмой представляет собой распределенный аналог двойного зонда, причем направление токов в плазме и проводнике совпадают. Меньшая часть поверхности пластины является стоком для электронов плазмы, а большая — стоком для положительных ионов. Граница между этими областями находится под плавающим потенциалом и перемещается по образцу с частотой поля.

Для исключения различий в свойствах поверхности, способных влиять на скорости гетерогенных процессов, поверхность металлической пленки нанесена пленка полимера (новолачной смолы) толщиной 1 мкм. Такая же пленка нанесена на одну из поверхностей образца сравнения — кремниевой пластинки без пленки металла. Таким образом, получены два образца с одинаковыми поверхностными, но разными

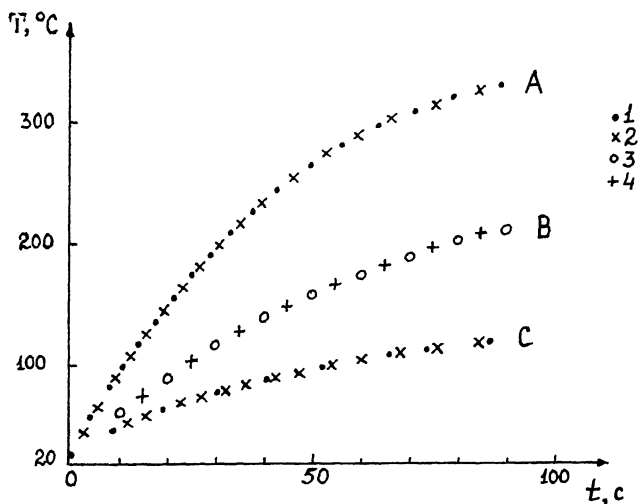


Рис. 1. Зависимость температуры образцов от времени после зажигания разряда в азоте. Вкладываемая мощность: 300 Вт, (A, C), 140 Вт (B). Размещение образцов в реакторе: на оси (A, B), вблизи электрода (C). Образцы: Si—Al-полимер (1), Si-полимер (2), Si—Al—Al₂O₃ (3), Si (4).

электрическими свойствами. Металлическая пленка имеет электрический контакт с плазмой по периметру образца, а пластина — по всей поверхности, не покрытой полимером. Пленка имеет электрическое сопротивление, в 300–800 раз меньшее, чем пластина, и разделена с пластиной барьером Шотки, распределенным по всей поверхности.

При давлении азота в реакторе 50 Па зарегистрирована температурная кинетика обоих образцов при их нагревании в разряде. На рис. 1 показаны зависимости температуры T образцов от времени t после зажигания разряда, на рис. 2 — температурные зависимости плотности мощности $D = c\rho h dT/dt$, нагревающей образец (c , ρ и h — удельная теплоемкость, плотность и толщина пластинки). Измерения проведены как на оси реактора, так и на расстоянии 1 см от электрода, где поле значительно сильнее.

Затем полимерная пленка удалена в кислородной плазме с обоих образцов и проведена регистрация зависимостей $T(t)$ на оси реактора для пластинки кремния и структуры кремний-металл. На поверхности алюминия, обращенной к плазме, образован слой окисла толщиной 3–5 нм, туннельно-прозрачный для электронов, но снижающий каталитическую активность поверхности. Результат показан на рис. 1.

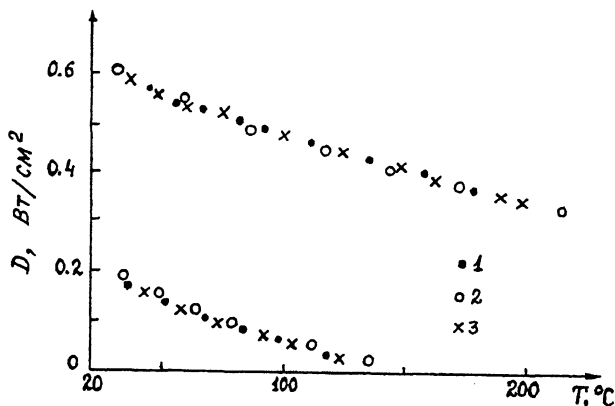


Рис. 2. Температурная зависимость плотности мощности, передаваемой образцу из азотной плазмы (300 Вт). Ось реактора (верхняя кривая), приэлектродный слой (нижняя кривая). Образцы: Si-Al (0.12 мкм)-полимер (1), Si-Al(0.7 мкм)-полимер (2), Si-полимер (3).

Из приведенных графиков видно, что влияние металлической пленки на температурную кинетику пластин весьма мало. Оценим чувствительность калориметрии при измерении разности $\Delta D = D - D_c$, где D и D_c — плотности мощности, передаваемой образцу с пленкой и образцу сравнения:

$$\Delta D = (S_Q t)^{-1} (\Delta \varphi - \Delta \varphi_c).$$

Здесь $S_Q = d\varphi/dQ$ — энергетическая чувствительность калориметра (φ — фаза интерферограммы, Q — плотность энергии поглощенной калориметром, Дж/см²), $\Delta \varphi$ и $\Delta \varphi_c$ — изменения фазы для образца с пленкой и эталона за время t . Для кремния $S_Q \approx 15$ см²/Дж. Регистрируемая разность фаз двух интерферограмм составляет ~ 0.3 рад, что соответствует сдвигу на $1/20$ интерференционной полосы. Если такая разность фаз двух интерферограмм достигается за $t \approx 50$ с, то обнаружительная способность калориметрии по разности ΔD составляет $4 \cdot 10^{-4}$ Вт/см². По отношению к интегральной плотности мощности, передаваемой образцу после зажигания разряда (рис. 2), порог обнаружения равен 0.1%. Для всех экспериментов на оси реактора эффект от присутствия металлической пленки не достигает порога обнаружения, т.е. отсутствует.

При измерении в области приэлектродного слоя более высокая скорость нагрева регистрируется для образца с металлической пленкой. Для образца с пленкой Al (0.12 мкм)

плотность мощности выше, чем для эталона, на $\Delta D = 1.2 \times 10^{-3}$ Вт/см², что соответствует дополнительной скорости нагрева образца $1.5 \cdot 10^{-2}$ К/с. Для пластинки с пленкой Al+1%Si (0.7 мкм) получено $\Delta D = 5.4 \cdot 10^{-3}$ Вт/см², а скорость нагрева выше на $7.4 \cdot 10^{-2}$ К/с, чем для эталона. Мощность дополнительного теплового источника, нагревающего образец с металлической пленкой в приэлектродном слое, составляет примерно 1% от полной мощности, нагревающей образец. В предположении, что дополнительная скорость нагрева калориметра обусловлена протеканием ВЧ токов в объеме пленки, получаем грубую оценку скорости нагрева свободной металлической пленки (без кремниевой подложки) в приэлектродном слое: $dT/dT \lesssim 50$ К/с.

Автор признателен М.О.Изюмову за изготовление образцов и О.В.Лукину за помощь в проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] *Chapman B.* Glow discharge processes: sputtering and plasma etching. N.Y.: Wiley, 1980. 350 p.
- [2] *Selamoglu N., Mucha J.A., Flamm D.L., Ibbotson D.E.* // J. Appl. Phys. 1987. V. 62. N 3. P. 1049-1053.
- [3] *Porkolab G.A., Wolf E.D.* // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 56. N 23. P. 2319-2321.
- [4] *Chen M.M., Lee Y.H.* // J. Electrochem. Soc. 198. V. 131. N 9. P. 2118-2123.
- [5] *Тихонова Э.А., Тягинский А.Ю., Шаронова Е.П.* // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 1987. В. 3. С. 84-87.
- [6] *Иванов Ю.А., Лебедев Ю.А., Полак Л.С.* Методы контактной диагностики в неравновесной плазмохимии. М.: Наука, 1981. 144 с.
- [7] *Магунев А.Н., Мудров Е.В.* // ТВТ. 1992. Т. 30. В. 2. С. 372-378.
- [8] *Hofer O.H.* // J. Vac. Sci. Technol. A. 1987. V. 5. N 4. P. 2213-2216.
- [9] *Кулик П.П., Рябый В.А., Ермошин Н.В.* Неидеальная плазма. М.: Энергоатомиздат, 1984. 200 с.

Институт микроэлектроники
Ярославль

Поступило в Редакцию
23 апреля 1993 г.
В окончательной редакции
9 декабря 1993 г.