

- [2] Манассон В.А., Баранюк В.Б., Товстюк К.Д. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 6. С. 1047-1050.
- [3] Green M.A., Shewchun J. // Sol. St. Electron. 1974. V. 17. P. 349-365.
- [4] Манассон В.А., Баранюк В.Б., Товстюк К.Д. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 13. С. 769-771.

Поступило в Редакцию
4 ноября 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 1
04; 06.2

12 января 1989 г.

УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ СВЧ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ СТРУКТУР МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Ю.В. Гуляев, Р.К. Яфаров

Сущность методов вакуумно-плазменной обработки (ВПО) материалов, в частности, СВЧ ВПО в магнитном поле, состоит в активации молекул инертных или химически активных газов. Активация частиц плазмы связана с различными процессами взаимодействия между ними. Наиболее важными являются процессы ионизации и рекомбинации. В стационарном состоянии скорости этих процессов равны, а концентрации электронов и ионов не изменяются. Аналогичная ситуация наблюдается для процессов возбуждения и возвращения в исходное состояние молекул или атомов, которые сопровождаются поглощением и испусканием излучения. При низких температурах (до 10^5 К) в слабоионизованной плазме основную роль играет дискретное излучение. Так, например, для хлора характерны излучения на длинах волн 741.4 нм, 725.6 нм и др. Концентрации заряженных и возбужденных частиц того или иного химического элемента, который играет активную роль в процессе вакуумно-плазменной обработки, можно определить путем регистрации плотности токов из камеры генерации плазмы и интенсивности излучения плазмы на заданных длинах волн. В настоящей работе показано, что этими концентрациями частиц при СВЧ плазменной обработке можно управлять, т.е. можно управлять режимами обработки материалов, которые благодаря использованию внешнего магнитного поля обладают большей свободой управления и возможностями оптимизации, по сравнению с традиционными методами обработки плазмой ВЧ разряда [1].

При СВЧ плазменной обработке в отсутствие магнитного поля зависимость извлекаемого тока от давления имеет максимум при давлении 1 Па (рис. 1, а). Это давление на 1-2 порядка больше, а величины токов при этом на 2-3 порядка меньше, чем в случаях с приложением внешнего магнитного поля (рис. 1, б). В сильных

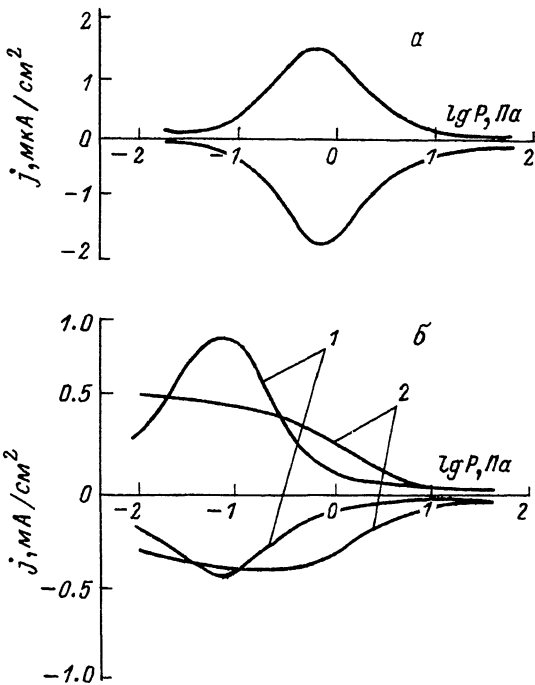


Рис. 1. Зависимости плотностей ионного ($j > 0$) и электронного ($j < 0$) токов при $U_{\text{выт.}} = \pm 100$ В от давления плазмообразующего газа для СВЧ мощности 600 Вт и различных величинах продольного магнитного поля: а - $\omega_H/\omega = 0$, б - $\omega_H/\omega = 1$ (кривые 1); $\omega_H/\omega = 1.7$ (кривые 2).

магнитных полях ($\omega_H/\omega > 1$) резонансный характер зависимости тока от давления, по сравнению с условием ЭЦР ($\omega_H/\omega = 1$), исчезает, а максимальные значения токов уменьшаются в 2-3 раза. Однако в сильных полях наблюдается начало монотонного роста токов с давлений ~ 10 Па, т.е. увеличивается верхняя граница давлений, при которых токи из камеры генерации плазмы становятся существенными и приемлемы для использования при обработке материалов.

На рис. 2 приведены зависимости плотностей тока из камеры генерации плазмы и интенсивностей свечения линий CU^* с $\lambda = 741.4$ нм в плазме паров HCl , которая широко применяется для ВПТ соединений As_2S_3 , Al и др. материалов от параметров процесса. Можно видеть, что в режимах, близких к ЭЦР ($P = 0.1$ Па $\omega_H/\omega = 1$) эффективности процессов ионизации и возбуждения нейтральных частиц коррелирует между собой. В режимах,

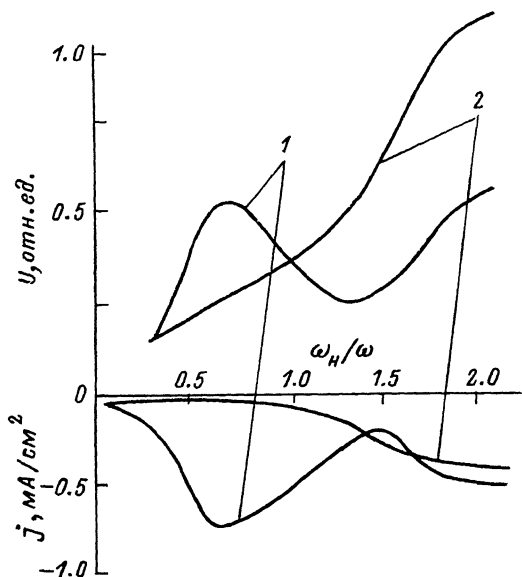


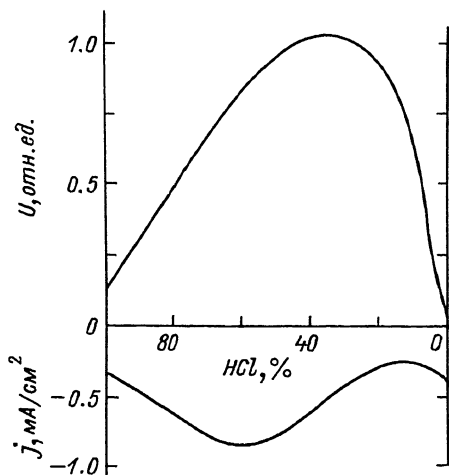
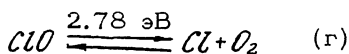
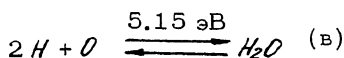
Рис. 2. Зависимости плотностей электронного тока ($j < 0$) и интенсивностей свечения линий Cl^* с $\lambda = 741.4$ нм от ω_H / ω для $W = 600$ Вт и различных давлений паров HCl : 1 - $P = 0.1$ Па, 2 - $P = 1$ Па.

отличных от ЭИР, такой корреляции не наблюдается. Зависимость плотностей токов, извлекаемых из реактора от соотношения давления газа и ω_H / ω , оказывается сложной. Это связано с трудностями получения электронов с высокой энергией, которая была бы достаточна для ионизации атомов. Пропорциональная зависимость интенсивности возбуждения атомов и величины продольного магнитного поля объясняется уменьшением потерь электронов на боковых стенках цилиндрического реактора за счет уменьшения поперечной диффузии электронов с увеличением ω_H / ω [2]. Энергий электронов при этом недостаточно для ионизации атомов, но возбуждение их может быть обеспечено.

Кроме давления и магнитного поля большое влияние на плотность тока и интенсивность излучения линий спектра плазмы оказывает состав газовой смеси. Так, для смеси $HCl + O_2$ обе зависимости имеют максимумы, положение которых реализуется при различных парциальных составах (рис. 3). В этой смеси возможны следующие реакции диссоциации с соответствующими энергиями [3].



Рис. 3. Зависимости плотности электронного тока $j < 0$ и интенсивности свечения линии Cl^* с $\lambda = 741.4$ нм от процентного содержания паров HCl в смеси $HCl + O_2$ ($W = 600$ Вт, $P = 0.1$ Па, $\omega_H/\omega = 1.7$).



Из рассмотрения приведенной системы реакций следует, что преимущественным процессом является связывание атомарного водорода, полученного в результате реакций (а), кислородом с образованием относительно стабильных молекул воды по реакции (в). Соединение ClO не является стабильным из-за низкой энергии диссоциации. В результате дефицита атомов водорода происходит смещение реакции (а) вправо и ускорение темпа генерации свободных атомов хлора. Энергия же возбуждения атомов Cl^* с $\lambda = 741.4$ нм очень низкая. Их образование не может являться лимитирующим процессом и интенсивность свечения линии атомарного хлора практически пропорциональна его концентрации в смеси. Отсюда следует, что интенсивность свечения линии хлора в смеси $HCl + O_2$ должна быть выше, чем в чистом HCl и иметь максимум в зависимости от процентного содержания в смеси каждого из компонентов. Из сравнения энергий диссоциаций реакции (а) и (б) следует, что энергия диссоциации кислорода выше энергии диссоциации молекул HCl . Поэтому реакция (б) является менее вероятной по сравнению с реакцией (а). Для компенсации этого, с целью достижения стационарного состояния в плазме, необходимо, чтобы концентрация O_2 в смеси была больше, чем концентрация паров HCl . Т. е. максимум интенсивности свечения линии Cl^* должен быть сдвинут в сторону с большей концентрацией кислорода в смеси, что и наблюдается экспериментально. Аналогичный характер зависимостей наблюдался в смесях CF_4 с кислородом и других.

Таким образом, регулировкой давления, состава газа и магнитного поля достигается управление „каналами“ поглощения плазмой СВЧ мощности, зарядовой кинетикой, массовым составом и другими параметрами плазмы химически активных газов с целью управления механизмом и кинетикой гетерогенных плазмохимических процессов от „активированного газового травления“ (низкие давления, $\omega_H/\omega = 1$) до механизма „травления активированным газом“ (большие давления, сильные магнитные поля: $\omega_H/\omega > 1$). Выбор условий оптими-

зации процессов СВЧ ВПТ производится по минимуму КСВ в СВЧ тракте установки и максимуму концентрации заряженных или возбужденных частиц определенного вида.

Л и т е р а т у р а

- [1] Д а н и л и н Б.С., К и р е е в В.Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 264 с.
- [2] Г о л а н т В.Е., Ж и л и н с к и й А.П., С а х а - р о в С.А. Основы физики плазмы. М.: Атомиздат, 1977. 384 с.
- [3] Р а б и н о в и ч В.А., Х а в и н З.Я. Краткий химический справочник. Л.: Химия, 1978. 392 с.

Институт радиотехники
и электроники АН СССР
Саратовский филиал

Поступило в Редакцию
5 октября 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 1
05.2

12 января 1989 г.

ТЕМПЕРАТУРА КЮРИ И НАМАГНИЧЕННОСТЬ НАСЫЩЕНИЯ НИКЕЛЯ С СУБМИКРОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ

Р.З. В а л и е в, Р.Р. М у л ю к о в,
Х.Я. М у л ю к о в, В.И. Н о в и к о в,
Л.И. Т р у с о в

Намагниченность насыщения I_s и температуру Кюри T_c принято считать структурно нечувствительными характеристиками ферромагнитных материалов. Однако в последние годы доказано, что у материалов в аморфном состоянии величины I_s и T_c существенно меньше, чем в кристаллическом состоянии. В этой связи представляет интерес исследование магнитных свойств субмикрозернистых (СМЗ) металлов, которые являются компактными ансамблями мелких (< 1 мкм) кристаллитов (зерен) [1, 2].

В настоящей работе исследовали магнитные свойства СМЗ металла на примере никеля с исходным размером зерна 70 нм. Образцы никеля изготавливали компактированием ультрадисперсного порошка с использованием техники высоких давлений [3]. Порошок получили путем испарения-конденсации в инертной среде. Чистота испаряемого никеля 99.99%. Структуру полученных образцов исследовали в просвечивающем электронном микроскопе.

Температурную зависимость намагниченности насыщения $I_s(T)$ измеряли с помощью вакуумных автокомпенсационных микровесов.