

## Краткие сообщения

04;11;12

### Свойства пленок пермаллоя, полученных в потоках низкотемпературной плазмы с управляемым составом

© В.А. Александров, А.Г. Веселов, О.А. Кирясова, А.А. Сердобинцев

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратовский филиал,  
410019 Саратов, Россия  
e-mail: Alexandrov VA@gmail.com

(Поступило в Редакцию 30 июля 2008 г.)

Предложена простая реализация потокообразующей плазменной распылительной системы. Управление составом, энергией и плотностью потока частиц позволило установить причины, определяющие свойства пленок. Установлено, что электронная составляющая потока, а также усиление ионной компоненты негативно влияют на магнитные свойства пленок. Определяющее влияние на ширину линии ферромагнитного резонанса (ФМР) пленок толщиной 10–150 нм оказывает энергия нейтральной составляющей потока, определяемая условиями распыления при напряжении на аноде 400–700 В. В этом достаточно узком диапазоне энергий значение ФМР составило 25 Ое на холодных подложках.

PACS: 81.15.Jj, 75.50.Bb

#### Введение

Результаты ряда работ по исследованию свойств тонких пленок и структур, полученных в условиях бомбардировки поверхности компонентами низкотемпературной плазмы, свидетельствуют о сложности физических процессов при таком воздействии. Можно отметить, что в большинстве исследований акцент делается на конструкции плазмообразующих систем на режимах синтеза и получаемых изменениях свойств — плотности, адгезии [1], межплоскостного расстояния, показателя преломления [2], магнитоактивности [3], пьезоактивности [4]. Факторы, вызывающие наблюдаемые изменения, упоминаются как гипотетические. Нельзя не отметить, что в некоторых работах выдвигается предположение об определяющей роли количественного соотношения нейтральных и заряженных частиц плазмы на модификацию свойств. Делаются предположения и о том, что диапазон значений энергий, переносимой компонентами именно низкотемпературной плазмы, сравним с диапазоном значений энергии и межмолекулярных взаимодействий, что позволяет рассматривать синтез пленок в квазинейтральных плазменных потоках как более перспективный метод формирования структуры пленки.

Наиболее существенная проблема, которая делает проведение качественных и количественных оценок модификации свойств практически невозможным, связана с тем, что во всех известных работах распыление мишени, массоперенос и осаждение пленки происходило в одной и той же камере. В этих условиях совершенно невозможно не только разделить компоненты, но и управлять

энергией бомбардировки без одновременного изменения условий распыления.

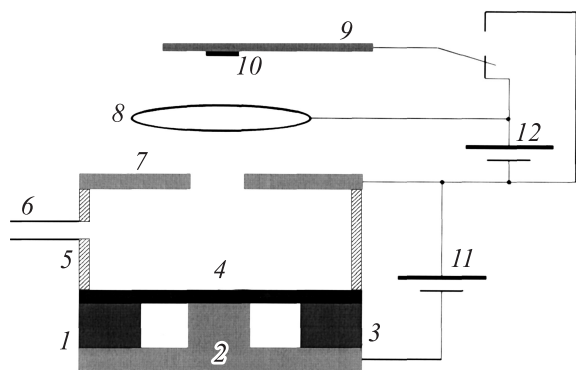
Становится очевидной необходимость плазмообразующей системы, по крайней мере, на три области — квазизамкнутый объем распыления мишени, электромагнитную систему формирования потока определенного состава, месторасположение подложки. Именно в этих условиях, как будет показано в настоящей работе, появляется реальная возможность для детального изучения факторов, влияющих на свойства пленок.

В работе предлагается один из вариантов такой системы и приводятся результаты серии экспериментов по синтезу пленок пермаллоя в потоках плазмы разного состава и интенсивности. Приводятся результаты по влиянию упомянутых факторов на магнитоактивность получаемых пленок.

#### Экспериментальная часть

В работе был реализован один из вариантов плазмообразующей системы с пространственным разделением процессов распыления, переноса и осаждения. Используемая система позволяла управлять потоком осаждения при помощи дополнительного электрода. Схематично она представлена на рис. 1.

В основе предлагаемой системы лежит традиционная планарная магнетронная система с распылением на постоянном токе. Распыление вещества мишени (пермаллой) производится в квазизамкнутом объеме, в качестве рабочего газа используется аргон. Использование квазизамкнутой распылительной камеры позволяет снизить давление в зоне осаждения, что приводит к уменьше-



**Рис. 1.** Магнетронная распылительная система (МРС) с квазизамкнутым объемом: 1 — магнитная система; 2 — магнитопровод; 3 — постоянный магнит; 4 — мишень; 5 — кварцевый стакан; 6 — напуск аргона; 7 — анод; 8 — вытягивающая система; 9 — подложкодержатель; 10 — подложка; 11 — блок питания МРС; 12 — источник вытягивающего напряжения.

нию количества нежелательных примесей в получаемой пленке.

Создаваемое магнитной системой распределение магнитных полей приводит к формированию направленного плазменного потока, проходящего через отверстие в аноде. После анода расположен дополнительный кольцевой электрод, который используется в качестве простейшей электростатической управляющей системы. Осаждение плазменного потока происходит в третьей части системы, представленной подложкодержателем с возможностью управления потенциалом и температурой подложки.

Плазмообразующая система была смонтирована на установке ВУП-5 с давлением остаточных газов не хуже  $2 \cdot 10^{-5}$  Торр и прецизионной системой напуска рабочего газа.

Предлагаемая распылительная система предоставляет возможность управления большинством параметров потока плазмы. Так, интенсивность потока определяется током в распылительной камере, энергия осаждаемых нейтральных частиц определяется рабочим давлением, количество заряженных частиц в потоке определяется напряжением управляющего электрода, а их энергия — потенциалом подложки.

Было проведено несколько серий напыления тонких пленок пермаллоя на монокристаллические кремниевые подложки при различных параметрах потока плазмы. Основной целью данных экспериментов явилось выяснение влияния таких параметров потока, как элементный состав (электроны, ионы, нейтральные частицы), интенсивность и энергия частиц, на магнитные свойства получаемых пленок. В качестве меры магнитоактивности получаемых пленок была выбрана величина полуширины линии ферромагнитного резонанса (ФМР).

В первой серии экспериментов изменялось количество ионов и электронов, достигающих подложки. Для этого на электрод вытягивающей системы подавались различные напряжения смещения. Увеличение количества электронов в потоке осаждения достигалось подачей положительного (относительно мишени) напряжения, увеличение количества ионов — отрицательного. Следует отметить, что при увеличении количества электронов количество ионов уменьшается незначительно вследствие их большей инертности, а при увеличении количества ионов электронный поток резко уменьшается.

Во второй серии изучалось влияние энергии осаждаемых нейтральных частиц на магнитные свойства получаемых пленок. Однако прямое управление энергией частиц данной компоненты осаждаемого потока затруднительно ввиду нейтральности его составляющих. Поэтому в настоящей работе была использована упомянутая выше косвенная возможность управления с помощью варьирования давления рабочего газа. Давление в распылительной камере определяет вид и напряжение разряда, что в свою очередь определяет значение бомбардирующих мишень ионов рабочего газа и, следовательно, энергии распыляемых атомов мишени. Таким образом, варьировалась энергия нейтральных частиц при помощи изменения давления в распылительной камере и перехода к другому виду разряда.

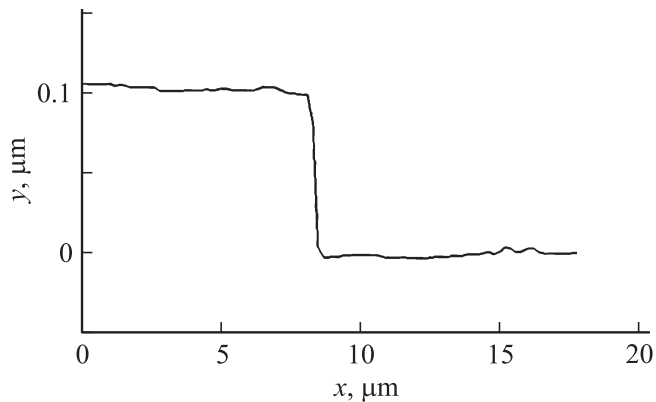
Для определения влияния неоднородности образцов по толщине и составу на полученные результаты производились исследования распределения этих величин по поверхности подложек и по различным образцам методами атомно-силовой микроскопии (зондовой нанолаборатории NT-MDT INTEGRA SPECTRA) и лазерного микроспектрального анализа состава (установка лазерного микроспектрального анализа LDMA).

С целью выявления зависимости полуширины линии ФМР от толщины растущей пленки была проведена дополнительная серия напылений с различной длительностью процесса. Было установлено, что толщина пленок в диапазоне 10–150 нм не влияет на полуширину линии ФМР.

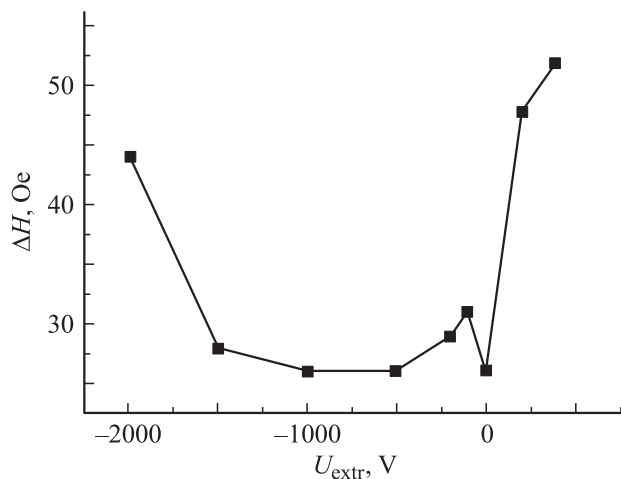
## Результаты и их обсуждение

Данные атомно-силовой микроскопии показали, что полученные в различных сериях пленки имеют одинаковую толщину —  $1000 \pm 50 \text{ \AA}$  (время напыления 60 с) по всей поверхности. Дополнительное исследование показало равномерное (в пределах 1%) распределение толщины растущей пленки по поверхности подложки на образце  $2 \times 2 \text{ см}$  (при диаметре зоны эрозии мишени в 4 см).

На рис. 2 показан один из профилей для измерения толщины образцов, полученных с помощью атомно-силового микроскопа.



**Рис. 2.** Профиль поверхности полученной пленки в районе ступеньки пленка/подложка.



**Рис. 3.** Зависимость полуширины линии ФМР от напряжения.

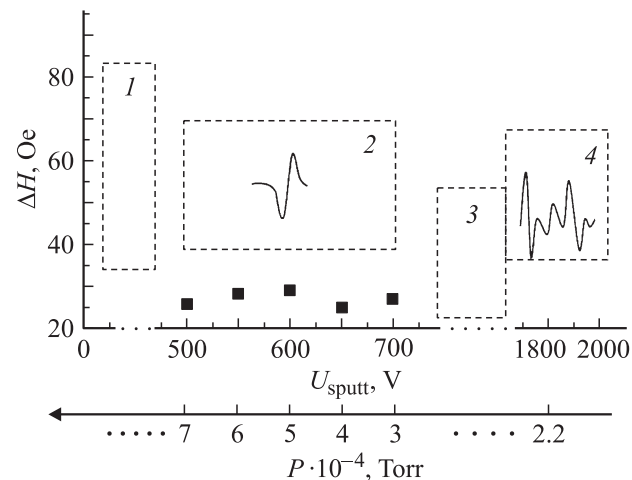
Исследование состава образцов методом лазерного микроспектрального анализа показало следующий результат: Ni — 85, Cr — 25, Fe — 10%, повторяющийся по всем образцам (и по поверхности отдельно взятых образцов) с точностью до 1%. Этот результат указывает на отсутствие влияния толщины и состава на изменение полуширины линии ФМР получаемых пленок. Данные измерений на серии из двадцати образцов показывают хорошую воспроизводимость получаемых результатов и позволяют сделать вывод о возможности использования разработанной схемы в качестве основы промышленной технологии.

Усиление электронной компоненты потока плазмы, что соответствует положительному потенциалу вытягивающей системы по отношению к мишени (рис. 3), приводит к резкому ухудшению магнитоактивности получаемых пленок. Данный факт можно объяснить нагревом подложки электронным потоком. Дополнительные эксперименты с подогревом подложки при помощи резистивного нагревателя показали существенное ухудшение

магнитоактивности получаемых пленок, что подтверждает высказанное выше предположение.

Увеличение ионной компоненты потока (это соответствует отрицательному потенциалу на вытягивающем электроде. см. рис. 3) до некоторых пороговых значений не приводит к изменению магнитоактивности получаемых пленок. При дальнейшем росте отрицательного потенциала на управляющем электроде ( $> -1500$  V) происходит ухудшение магнитных свойств. Причиной обнаруженной закономерности является разрушение растущей пленки ионами с высокой энергией.

На рис. 4 показана зависимость полуширины линии ФМР от напряжения в распылительной камере (или от задающего это напряжение давления). Как видно из рисунка, пленки, получаемые в области тлеющего разряда, обладают выраженным одиночным пиком с полушириной в пределах 25–30 Oe. При понижении давления в камере (и соответственном увеличении напряжения) разряд переходит из тлеющего в таунсендовский, характеризующийся малыми токами разряда и большой энергией выбитых частиц. Полученная в таком режиме пленка имела около тридцати линий ферромагнитного резонанса, однако их амплитуда несущественно превышала амплитуду шумов, что свидетельствует о большой неоднородности, вплоть до распада пленки на множество фаз [5]. Другим предельным случаем, не реализуемым в данной установке, является случай малых энергий осаждаемых частиц. Однако подобный режим возможен при синтезе пленок методом термического испарения и, в частности, из работы [6] известно, что получаемые таким методом на холодных подложках пленки пермаллоя обладают полушириной ФМР, по крайней мере, в два раза большей.



**Рис. 4.** Зависимость полуширины линии ФМР от рабочего напряжения МРС. Вторая ось X показывает соответствующие рабочие давления в камере. 1 — область нестабильного давления (дугового разряда), 2 — область тлеющего разряда, 3 — область нестабильного разряда, 4 — область таундсековского разряда, распада пленок.

## Заключение

В работе предлагается схема разделения протекающих в распылительной системе процессов, позволяющая производить формирование осаждаемых потоков низкотемпературной плазмы с управляемыми характеристиками, что может быть использовано как в экспериментальной физике, так и в промышленности. Разработана соответствующая установка для изучения роста магнитоактивных пленок пермаллоя в магнетронной распылительной системе с холодной подложкой. Полученные результаты позволяют заключить, что в случае воздействия низкотемпературной плазмы на рост пленок пермаллоя при минимизации ионного и электронного потоков определяющим магнитоактивность фактором является энергия осаждаемых нейтральных частиц, оптимальные значения которой соответствуют напряжениям на аноде в интервале 400–700 В.

## Список литературы

- [1] *Helmersson U, Lattemann M, Bohlmark J, Ehiasarian A.P, Gudmundsson J.T.* // *Thin Solid Films*. 2006. Vol. 513. N 1–2. P. 1–24.
- [2] *Сердобинцев А.А., Бурьлин Е.И., Веселов А.Г., Кирясова О.А., Джумалиев А.С.* // *ЖТФ*. 2008. Т. 78. Вып. 3. С. 83–85.
- [3] *Александров В.А., Веселов А.Г.* // *ЖТФ*. 2008. Т. 78. Вып. 3. С. 101–103.
- [4] *Бурьлин Е.И., Веселов А.А., Веселов А.Г., Джумалиев А.С., Иванов С.Н., Кирясова О.А.* // *Письма в ЖТФ*. 2000. Т. 26. Вып. 7. С. 31–34.
- [5] *Рандошкин В.В., Козлов В.И., Кокшаров Ю.А., Солецкий А.М., Сысоев Н.Н., Усманов Н.Н.* // *ЖТФ*. 2007. Т. 77. Вып. 4. С. 104–106.
- [6] *Исхаков Р.С., Середкин В.А., Столяр С.В., Яковчук В.Ю., Фролов Г.И., Бондаренко Г.В., Чеканова Л.А., Поляков В.В.* // *Письма в ЖТФ*. 2008. Т. 34. Вып. 13. С. 75–82.