ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, 2021, том 47, № 3, с. 277–286

ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ

УДК 533.9

ИЗУЧЕНИЕ УЛУЧШЕНИЯ ОДНОРОДНОСТИ ИОННО-ПУЧКОВОГО ТРАВЛЕНИЯ В УСТАНОВКЕ С ИНДУКТИВНО СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМОЙ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

© 2021 г.
H.-W. Cheong[a], J.-W. Kim[b], K. Kim[c], H. Lee[d, *]

[a] *Grad. School of Management of Technology, Hoseo University, Asan, Korea*
[b] *Samsung Electronics Co. Ltd., Hwaseong, Korea*
[c] *Dept. of Electrical and Computer Engineering, Seoul Natl. University, Seoul, Korea*
[d] *Hyundai Motor Company, Hwaseong, Korea*
**e-mail: hwally@nate.com*

Поступила в редакцию 20.07.2020 г.
После доработки 09.09.2020 г.
Принята к публикации 10.09.2020 г.

Спроектирована установка ионно-пучкового травления с индуктивно связанной плазмой в магнитном поле (MICP-IBE). Магнитное поле создавалось внешними магнитами, размещенными вокруг установки, и могло как увеличиваться с удалением от центра экранирующей сетки, так и уменьшаться. Были рассмотрены четыре различных конфигурации магнитного поля. Для каждой конфигурации измерены плотность электронов и электронная температура в зависимости от расстояния до центра экранирующей сетки. С помощью анализатора энергии ионов измерена плотность ионного потока для различных расстояний от центра подложки. На основе этих результатов сделаны выводы о степени однородности плотности ионного потока. Исследованы характеристики сухого травления CoFeB – типичного сплава, используемого в устройствах магнитной памяти. Показано, что однородность плотности потока ионов и скорости травления может быть улучшена путем правильного подбора конфигурации внешнего магнитного поля. Дальнейшее улучшение однородности характеристик возможно с использованием модифицированных сеток, которые отличаются от стандартных увеличением плотности ячеек с удалением от центра сетки. Улучшение однородности характеристик было подтверждено измерением плотности потока ионов и скорости травления в зависимости от радиального расстояния до центра подложки. При травлении образца CoFeB с новыми сетками степень неоднородности скорости травления составила 11.65% против 17.5% при травлении со стандартными сетками.

Ключевые слова: ионно-пучковое травление, индуктивно связанная плазма в магнитном поле, плотность электронов, скорость травления

DOI: 10.31857/S0367292121030057

1. ВВЕДЕНИЕ

Установки ионно-пучкового травления (IBE) получили широкое распространение в различных областях промышленности [1–3] из-за эффективного распыления, которое достигается за счет наличия заряженных частиц в пучке, низкой стоимости и удачной зависимости эффективности травления от угла падения ионов на поверхность. В связи с этим активно изучаются разрядные характеристики установок ионно-пучкового травления с такими источниками плазмы высокого давления как источник ионов электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) [4] и источник ионов на основе индуктивно-связанной плазмы в магнитном поле (MICP) [5]. Так как источники ионов MICP генерируют плазму более высокой плотности, чем источники ионов на основе простой индуктивно связанной плазмы, то установки ионно-пучкового травления с источниками ионов MICP, из-за более высокого потока ионов, обладают и большей скоростью травления. В последние годы установки ионно-пучкового травления широко используются при производстве новых типов запоминающих устройств, например, таких как магниторезистивная оперативная память (MRAM) [6, 7]. Данный тип памяти, по сравнению со своими аналогами, имеет более высокую плотность записи, потребляет при работе меньшую мощность и имеет более продолжительный срок службы и более высокую скорость чтения/записи [8]. Магнитный туннельный переход является основой ячейки памяти MRAM и состоит из слоя диэлектрика, помещенного

между двумя проводящими слоями таких материалов как CoFeB, W, Ru, Ta, FePt, CoFe, PtMn и TiN [9, 10]. Однако побочные продукты, образующиеся из перечисленных металлических слоев в процессе травления, могут осаждаться на боковой стенке магнитного туннельного перехода, что приводит к его пробою. Поэтому травление обычно производят с периодическими поворотами подложки относительно падающего пучка ионов, что позволяет удалять побочные продукты осаждения с боковых стенок путем их механического выбивания при столкновениях с ионами пучка [11–13]. Однако при травлении поверхностей большой площади в установках ионно-пучкового травления появляется ряд проблем из-за различных неоднородностей в ионном пучке [14–16].

В данной работе исследовалась степень однородности плотности электронов, плотности потока ионов и скорости травления в установке ионно-пучкового травления с источником ионов на основе индуктивно-связанной плазмы в магнитном поле (MICP-IBE). Такой источник плазмы производит более интенсивный поток ионов по сравнению с традиционной системой на основе индуктивно связанной плазмы (ICP). В ходе исследования были получены величины неоднородности таких параметров как концентрация электронов, плотность потока ионов и скорость травления при различных конфигурациях магнитного поля. Было показано, что при некоторых распределениях магнитного поля улучшается однородность исследуемых характеристик травления. Однако улучшение однородности характеристик с помощью изменения магнитного поля имеет свои ограничения, связанные с особенностями геометрии экранирующей и ускоряющей сеток, используемых в установке травления. В связи с этим в данной работе была предложена новая модель экранирующей и ускоряющей сеток, которая отличается от стандартной модели наличием зависимости плотности ячеек от расстояния до центра сетки. Было проведено сравнение однородности плотности потока ионов и скорости травления при использовании стандартных сеток и сеток, предложенных в данной работе.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка травления состояла из разрядной камеры и камеры травления, изготовленной из немагнитной нержавеющей стали (рис. 1). Плазма внутри разрядной камеры генерировалась с помощью индукционного ВЧ-разряда в слабом магнитном поле. Индуктивным элементом системы служила двухвитковая планарная антенна, к которой подводилась ВЧ-мощность от генератора, работающего на частоте 27.12 МГц. В верхней части разрядной камеры было сделано кварцевое ВЧ-окно толщиной 30 мм. Газ в разрядную камеру подавался через газовый вход, расположенный в верхней части камеры, а поток газа контролировался с помощью регулятора массового расхода. Для формирования ионного пучка между разрядной камерой и камерой травления помещалась система сеток, состоящая из экранирующей и ускоряющей сеток. К экранирующей сетке прикладывался положительный потенциал, а к ускоряющей – отрицательный. Диаметр отверстий в экранирующей сетке составлял 1.7 мм, а в ускоряющей – 1.4 мм. Расстояние между сетками было равно 1.5 мм. Подложка устанавливалась внутри камеры травления на вращающуюся подставку, которая одновременно с вращением могла обеспечивать наклон подложки относительно падающего потока ионов. Диаметр подставки составлял 100 мм, а расстояние между ускоряющей сеткой и подставкой при отсутствии наклона – 140 мм. Откачка разрядной камеры и камеры травления производилась турбомолекулярным насосом. При этом остаточное давление газа в установке составляло 1 мПа. В качестве буферного газа использовался аргон, давление которого измерялось с помощью двух датчиков давления Pfeiffer-Vacuum IKR-251, один из которых находился в разрядной камере, а другой – в камере травления. В процессе травления давление буферного газа в разрядной камере вдвое превышало давление газа в камере травления.

Магнитное поле в разрядной камере создавалось с помощью трех электромагнитов: верхнего, нижнего внутреннего и нижнего наружного (см. рис. 2). Каждая катушка электромагнита состояла из 1000 витков. Диаметр катушек, вертикальное расстояние между ними и величина тока в катушках электромагнита были определены с помощью специального программного обеспечения для расчета магнитных полей. Значения электрических токов в катушках были подобраны таким образом, чтобы величина магнитного поля в центре экранирующей сетки составляла примерно 1.3 мТ. Использовались четыре различных распределения магнитного поля. Данные, приведенные на рис. 3, были получены путем измерения радиального и аксиального распределений магнитного поля от центра экранирующей сетки с помощью датчика магнитного поля. Для всех четырех распределений величина магнитного поля увеличивалась с увеличением расстояния от центра сетки в аксиальном направлении. Стоит отметить, что для распределения 1 градиенты магнитного поля в радиальном и аксиальном направлениях отличались друг от друга знаками, в то время как для остальных распределений знаки аксиального и радиального градиентов магнитного поля совпадали. Отличия распределений 2–4 друг от друга заключались в величине градиента магнитного поля.

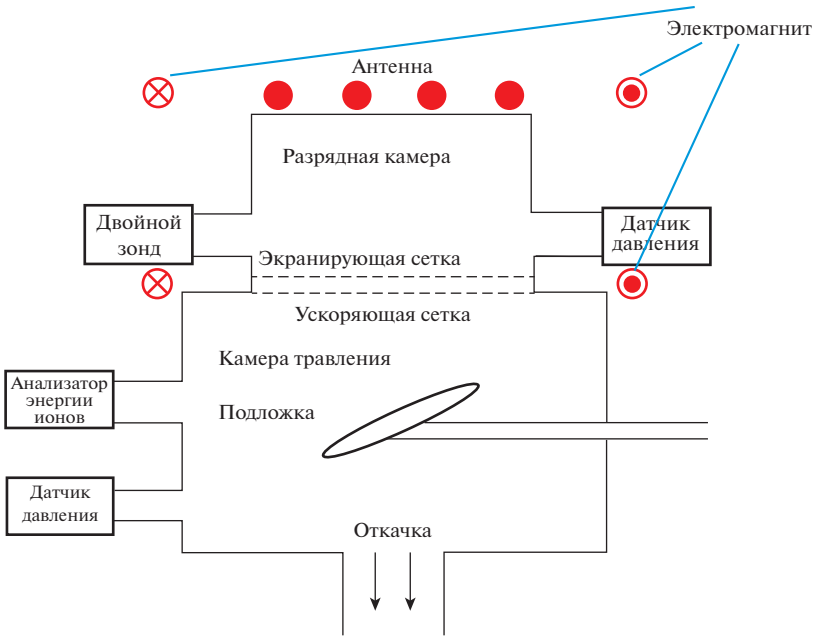

Рис. 1. Схема экспериментальной установки травления.

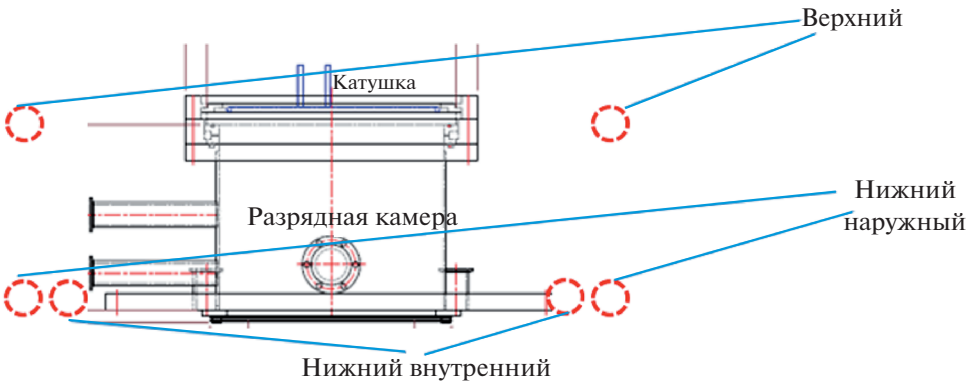

Рис. 2. Положение электромагнитов в установке.

На рис. 4 представлены фотографии стандартной и модифицированной сеток. Основное отличие приведенных сеток заключалось в том, что в стандартной сетке ячейки равномерно распределены по поверхности, а в модифицированной сетке распределение ячеек по поверхности неравномерное. В новой сетке поверхность разделена на три области: область *1* – диск радиусом 20 мм; область *2* – кольцо с внутренним радиусом 20 мм и внешним радиусом 40 мм; область *3* – кольцо с внутренним радиусом 40 мм и внешним радиусом 60 мм. Диаметр ячеек был одинаков в стандартной и модифицированной сетках и составлял 1.7 мм для экранирующей и 1.4 мм для ускоряющей сеток. Расстояния между центрами ячеек в областях *1*, *2* и *3* составляли 2.8, 2.6 и 2.4 мм соответственно. Плотность ячеек в сетке увеличивалась с увеличением расстояния от центра сетки и в области *3* была наибольшей.

Для измерения плотности электронов и электронной температуры использовался двойной зонд, расположенный в разрядной камере на расстоянии 30 мм от экранирующей сетки. Цилиндрический вольфрамовый зонд имел диаметр 0.335 мм и длину 4.5 мм. Для согласования импедансов к зонду подключались дроссельные фильтры на частотах 27.12 МГц и 54.24 МГц. Для измерения энергии ионов и плотности ионного потока использовался анализатор энергии ионов [17–21], который располагался в камере травления

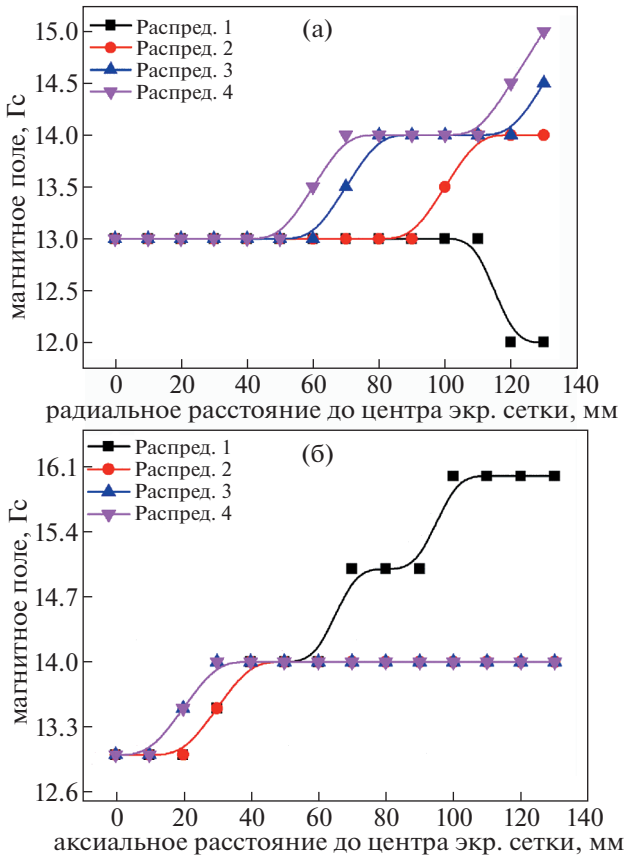

Рис. 3. Величина магнитного поля в зависимости от радиального (а) и аксиального (б) расстояний от центра экранирующей сетки.

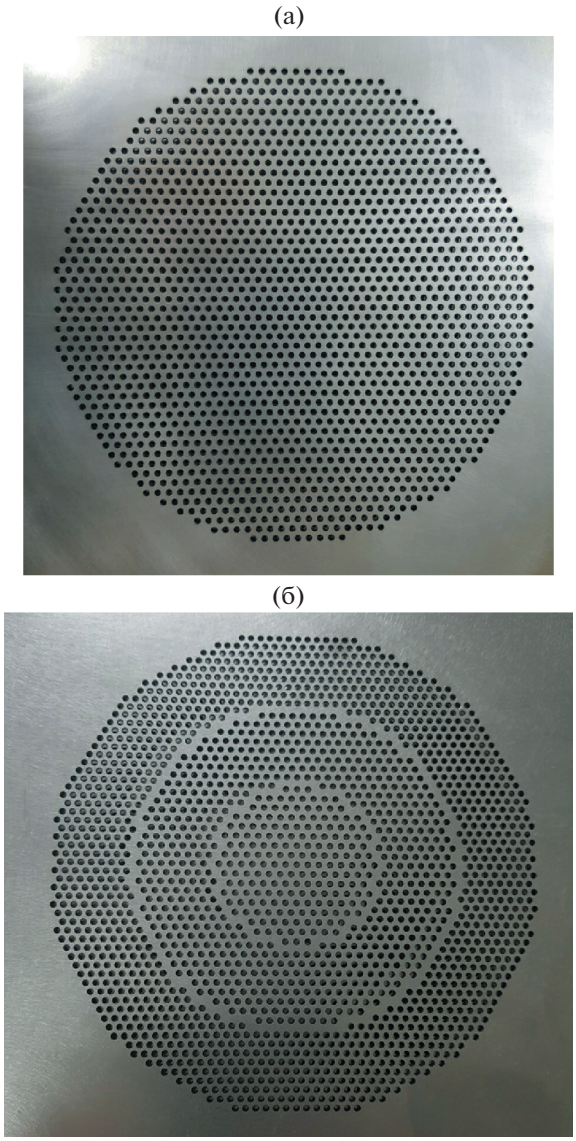

Рис. 4. Вид стандартной (а) и модифицированной (б) сеток ($R_{экр.отв.}$ = 1.7 мм, $R_{уск.отв.}$ = 1.4 мм).

над подложкой. Анализатор состоял из четырех сеток (сетки под плавающим потенциалом, экранирующей сетки, сетки-дискриминатора и антидинатронной сетки) и коллектора. Каждая сетка содержала по 500 ячеек и была изготовлена из нержавеющей стали. Расстояние между сетками в анализаторе составляло 0.3 мм. Детальное описание анализатора приведено в [22]. Анализатор энергии ионов имел рабочую область диаметром 4 мм и размещался в корпусе из анодированного алюминия. Степень неоднородности плотности ионного потока определялась в соответствии с формулой:

$$\text{Степень неоднородности}(\%) = \frac{(\text{Макс. значение} - \text{Мин. значение})}{\text{Среднее значение}}100.$$

Образец травления, использовавшийся в данной работе, состоял из двух слоев: слоя CoFeB толщиной 450 нм и слоя маски SiO_2 толщиной 500 нм (см. рис. 5). Для данного образца была измерена степень неоднородности скорости травления при различных распределениях магнитного поля. Также на линейных образцах CoFeB было произведено сравнение характеристик травления и степени неоднородности при использовании стандартной и модифицированной сеток. Изме-

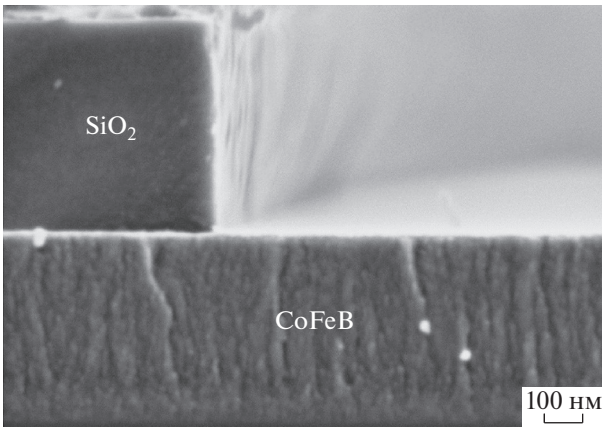

Рис. 5. Фотография образца CoFeB до травления.

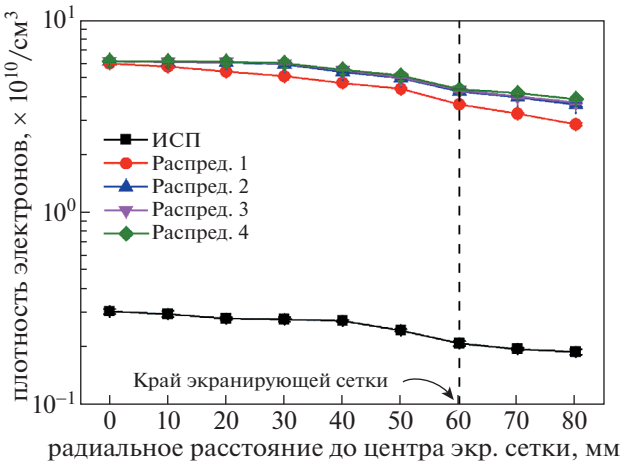

Рис. 6. Плотность электронов в зависимости от радиального расстояния до центра экранирующей сетки при различных конфигурациях магнитного поля (мощность ВЧ-источника – 500 Вт, расход Ar – 3 ст. см^3/мин, давление Ar – 0.04 Па).

рения степени неоднородности образца травления проводились на сканирующем электронном микроскопе (FESEM, SIGMA, Carl Zeiss Co.).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Влияние конфигурации магнитного поля

В работе была проведена серия экспериментов по определению плотности электронов и электронной температуры в разрядной камере в зависимости от расстояния до центра экранирующей сетки в радиальном направлении при различных конфигурациях магнитного поля (ICP, распределения 1–4). Мощность источника, давление буферного газа (Ar) и его расход составляли во всей серии 500 Вт, 0.04 Па и 3 ст.см^3/мин, соответственно.

На рис. 6 приведено распределение плотности электронов в зависимости от расстояния до центра экранирующей сетки. Если сравнивать значение плотности электронов в центре сетки, то минимальное значение наблюдалось для конфигурации ICP. Для всех остальных конфигураций магнитного поля значения плотности электронов в центре сетки одинаковы. Плотность электронов в конфигурациях M-ICP возрастает более чем в 10 раз по сравнению с плотностью электронов в конфигурации ICP. Это происходит не только из-за нагрева R-волной [23], которая, как известно, распространяется вдоль магнитного поля при выполнении дисперсионного соотношения [24], но также и за счет более сильного удержания плазмы магнитным полем. Плотность электронов имеет тенденцию к уменьшению при увеличении радиального расстояния от центра сетки, однако степень этого уменьшения зависит от распределения магнитного поля. Для распределения *1* уменьшение плотности электронов с удалением от центра сетки имело наибольшую величину среди всех рассмотренных конфигураций поля. Это было обусловлено тем, что в данной конфигурации величина магнитного поля уменьшалась с увеличением радиального расстояния. Известно, что если величина магнитного поля снижается с увеличением радиального расстояния, то в таких конфигурациях магнитного поля возможно появление флейтовой неустойчивости. Последнее приводит к ухудшению однородности концентрации электронов в объеме [25]. Для подавления такого типа неустойчивости величина магнитного поля должна расти с увеличением радиального расстояния [26]. Такие конфигурации магнитного поля использовались в случаях распределений *2–4*. В этих распределениях знаки градиентов магнитного поля одинаковы, однако сами величины градиентов различаются для разных распределений поля. Величина плотности электронов на краю сетки растет с ростом номера распределения, однако данное увеличение не является существенным. Таким образом, основными результатами увеличения плотности электронов на краях сетки являются подавление флейтовой неустойчивости и увеличение степени однородности плотности электронов. Степени неоднородности плотности электронов в плазме для условий эксперимента приведены в табл. 1. Степень неоднородности для распределения *4* (15.48%) была меньше степени неоднородности как для конфигурации ICP (18.01%), так и для распределения поля *1* (22.9%).

Для подтверждения корреляции между плотностью электронов в разрядной камере и плотностью ионного потока в камере травления была измерена величина плотности ионного потока в зависимости от расстояния до центра подложки.

Таблица 1. Степень неоднородности при различных конфигурациях магнитного поля

	ICP	Распр. 1	Распр. 2	Распр. 3	Распр. 4
Плотность электронов (%)	18.01	22.90	16.59	16.05	15.48
Плотность потока ионов (%)	25.35	26.80	22.03	21.79	21.65
Скорость травления (%)	19.69	22.19	17.17	17.1	16.97

Измерения проводились с помощью анализатора энергии ионов и приведены на рис. 7а. Напряжение на экранирующей сетке составляло 300 В, а на ускоряющей – –600 В. Поведение плотности потока ионов при увеличении расстояния до центра подложки аналогично поведению неоднородности плотности электронов – она уменьшается с увеличением расстояния от центра подложки. В частности, уменьшение плотности ионного потока наиболее значительно для распределения поля *1* по сравнению с распределениями полей *2*, *3* и *4*. Более того, степень неоднородности плотности ионного потока для распределения *1* (26.8%) является наибольшей среди рассмотренных конфигураций магнитного поля, а степень неоднородности плотности потока ионов для распределений поля *2–4* ниже, чем для конфигурации ICP (25.35%). Данные по степени неоднородности плотности потока ионов приведены в табл. 1. Наименьшей степенью неоднородности плотность потока ионов обладает в случае распределения *4*, хотя данное значение степени неоднородности не сильно отличается от распределений *2* и *3*.

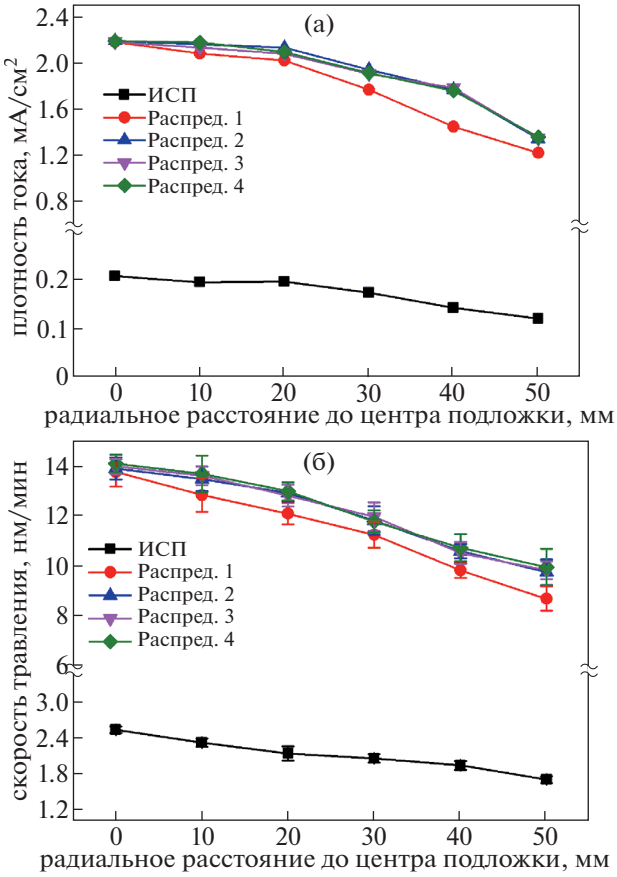

Рис. 7. Плотность потока ионов (а) и скорость травления (б) в зависимости от радиального расстояния до центра подложки при различных конфигурациях магнитного поля (мощность ВЧ-источника – 500 Вт, расход Ar – 3 ст. см^3/мин, давление Ar – 0.04 Па, $V_{экран}$ = = 300 В, $V_{ускор}$ = –600 В).

Также в работе был проведен ряд экспериментальных травлений для определения степени неоднородности скорости травления для конфигураций поля ICP и распределений поля *1–4*. При измерении степени неоднородности скорости травления для каждой конфигурации магнитного поля были проведены травления шести экспериментальных образцов CoFeB. Образцы располагались на расстояниях 0, 10, 20, 30, 40 и 50 мм от центра подложки. Экспериментальные травления повторялись пять раз для каждого случая. Результаты экспериментов приведены на рис. 7б. Из приведенных данных видно, что при наличии магнитного поля скорость травления в центре подложки составила 14 нм/мин, что в шесть раз больше, чем в конфигурации ICP. Для всех рассмотренных случаев скорость травления уменьшалась при увеличении расстояния от центра подложки. В частности, для распределения *1* наблюдалось наибольшее уменьшение скорости, что хорошо согласуется со степенью неоднородности для плотности электронов и плотности ионного потока. Рассчитанная степень неоднородности скорости травления для распределения *1* также оказалась наибольшей и составила 22.19%. Для остальных конфигураций магнитного поля степень неоднородности скорости травления составила примерно 17%. Для распределения *4* наблюдалась наименьшая степень неоднородности, однако отличия по неоднородности скорости травления между распределениями *2–4* оказались незначительными. Как уже было сказано, поведение степени неоднородности скорости травления находится в хорошем согласии со степенью неоднородности плотности электронов и степенью неоднородности плотности потока ионов. Таким образом, однородность плотности электронов улучшается при таком распределении

магнитного поля, в котором величина магнитного поля растет с увеличением радиального расстояния от центра экранирующей сетки, что приводит к улучшению однородности скорости травления образца.

3.2. Влияние плотности отверстий

Улучшение параметров однородности с помощью магнитного поля имеет свои пределы. Поэтому в данной работе была проведена модернизация экранирующей и ускоряющей сеток для определения возможности дальнейшего увеличения однородности параметров травления. Стандартные сетки имеют однородное распределение плотности ячеек (14.728 см$^{-2}$), а предложенная в данной работе модернизация предполагает увеличение плотности ячеек с увеличением радиального расстояния (область *1* – 14.728 см$^{-2}$, область *2* – 17.081 см$^{-2}$, область *3* – 20.046 см$^{-2}$). Плотность ячеек в сетке может быть выражена следующим соотношением:

$$n_c = 14.728\ (\text{см}^{-2}),$$

$$n_p = 0.076r^2 + 0.87r + 13.781\ (\text{см}^{-2}),$$

где n_c, n_p, и r – плотность ячеек в стандартной сетке, плотность ячеек в модифицированной сетке и расстояние от центра сетки соответственно.

Конфигурация магнитного поля в данных экспериментах соответствовала распределению поля *2*. Мощность ВЧ-источника составляла 500 Вт, давление буферного газа (Ar) и его расход – 0.04 Па и 3 ст. см^3/мин соответственно. Напряжение на экранирующей и ускоряющей сетках составляло 300 В и –600 В.

На рис. 8а приведены измеренные значения плотности ионного потока в зависимости от радиального расстояния при использовании стандартной и модифицированной сеток. Для модифицированной сетки были проведены измерения плотности потока ионов на расстояниях 0, 10, 30 и 50 мм от центра подложки. Плотность потока ионов в центре подложки для модифицированной и стандартной сеток совпадали, однако на расстоянии 30 и 50 мм от центра плотность ионного потока при использовании модифицированной сетки была выше, чем при использовании стандартной. Данные по степени неоднородности плотности потока ионов для описанных экспериментов приведены в табл. 2. Степень неоднородности плотности ионного потока при использовании модифицированной сетки составила 15.44%, что ниже величины неоднородности при использовании стандартной сетки – 22.03%. Для выявления корреляции между плотностью потока ионов и характеристиками сухого травления были проведены экспериментальные травления

Таблица 2. Степень неоднородности при использовании стандартных и модифицированных сеток

	Стандартные сетки	Модифицированные сетки
Плотность потока ионов (%)	22.03	15.44
Скорость травления (%)	17.50	11.65

образцов, располагавшихся на расстояниях 0, 30 и 50 мм от центра подложки. Травление образцов проводилось 5 раз для подтверждения повторяемости результатов. На рис. 9 представлены фотографии сечения образцов травления, которые находились на расстоянии 0, 30 и 50 мм от центра подложки. На этих фотографиях, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа, проведена горизонтальная линия для

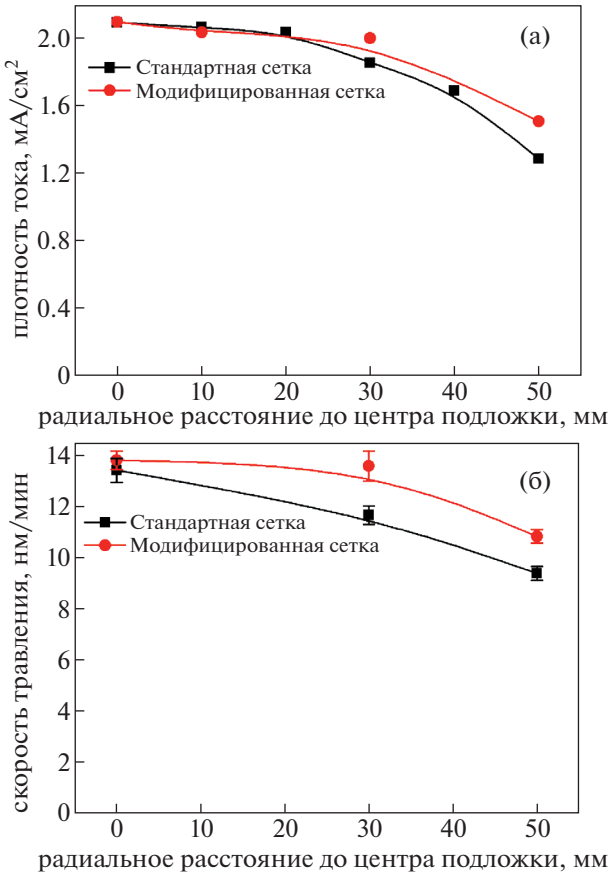

Рис. 8. Плотность потока ионов (а) и скорость травления (б) в зависимости от радиального расстояния до центра подложки при использовании стандартных и модифицированных сеток (мощность ВЧ-источника – 500 Вт, расход Ar – 3 ст. см^3/мин, давление Ar – 0.04 Па, $V_{\text{экран}}$ = 300 В, $V_{\text{ускор}}$ = –600 В).

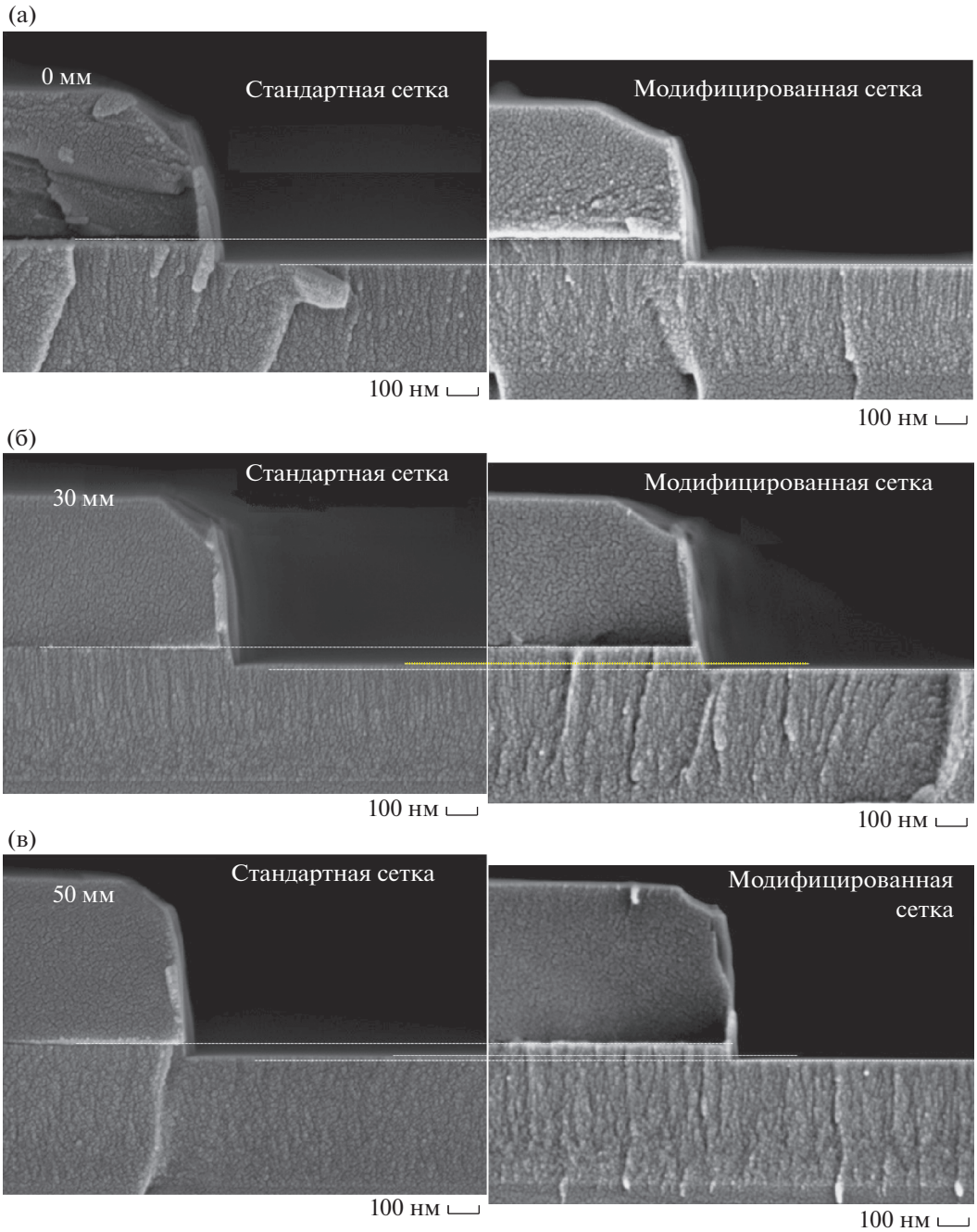

Рис. 9. Фотография профиля образца травления, расположенного на расстоянии 0 мм (а), 30 мм (б) и 50 мм (с) от центра подложки (мощность ВЧ-источника – 500 Вт, расход Ar – 3 ст. см^3/мин, давление Ar – 0.04 Па, $V_{экран}$ = 300 В, $V_{ускор}$ = –600 В).

определения различия глубин травления при использовании стандартной и модифицированной сеток. Глубина травления в центре подложки была одинаковой для стандартной и модифицированной сеток, в то время как на расстояниях 30 мм и 50 мм от центра подложки глубина травления при использовании модифицированной сетки была больше, чем при использовании стандартной. Измеренные скорости травления при использовании различных сеток приведены на рис. 8б, где изображена скорость травления образца в зависимости от радиального расстояния до центра подложки. При центральном положении образца скорости травления для обоих вариантов сеток были одинаковы и составили приблизительно 14 нм/мин. Однако на расстояниях

30 мм и 50 мм от центра подложки скорость травления при использовании модифицированной сетки была выше. Степень неоднородности скорости травления при использовании различных сеток приведена в табл. 2, из которой видно, что степень неоднородности скорости травления при использовании модифицированной сетки (11.65%) меньше степени неоднородности при использовании стандартной сетки (17.5%). Таким образом можно заключить, что улучшение однородности таких характеристик как плотность электронов, плотность потока ионов и скорость травления происходило не только при использовании подходящего распределения магнитного поля внутри установки, но и при модификации экранирующей и ускоряющей сеток.

Использование дополнительного магнитного поля и модифицированных сеток, по-видимому, улучшает не только однородность скорости травления образца, но и качество поверхности травления. Плотная плазма, образующаяся в идукционном ВЧ-разряде низкого давления проникает через сетки из-за того, что размер ячеек сетки и расстояние между ними больше дебаевского радиуса. Таким образом сетки могут ускорять не только ионы, но и электроны плазмы, которые также достигают поверхности подложки, что в свою очередь приводит к компенсации положительного заряда и подавлению бокового травления. Более детальная информация по данному вопросу будет опубликована позднее.

4. ВЫВОДЫ

В данной работе исследовалась однородность плотности электронов, плотности потока ионов и скорости травления для случая индуктивно связанной плазмы (ICP) и индуктивно связанной плазмы в магнитном поле (MICP). Было рассмотрено четыре конфигурации магнитного поля (распределения *1–4*) с уменьшающейся и увеличивающейся величиной магнитного поля при увеличении радиального расстояния от центра экранирующей сетки. Было показано, что величина магнитного поля должна увеличиваться в радиальном направлении для подавления возможной флейтовой неустойчивости и увеличения степени однородности плотности электронов. Также было показано, что улучшение однородности плотности электронов приводит к улучшению однородности плотности потока ионов и скорости травления. Таким образом, улучшения однородности скорости травления можно добиться путем правильного подбора распределения магнитного поля внутри установки.

В работе была предложена модификация стандартных сеток, при которой плотность ячеек в сетке растет с ростом расстояния от центра сетки. Были измерены плотности потока ионов и скорости травления CoFeB при использовании стандартных и модифицированных сеток. Для обоих случаев была рассчитана степень неоднородности параметров травления. Показано, что при использовании модифицированных сеток степень неоднородности плотности ионного потока и скорости травления меньше, чем при использовании стандартных сеток. Данное обстоятельство позволяет утверждать, что предложенная модификация сеток установки улучшает однородность параметров травления.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данное исследование было поддержано Фондом научных исследований университета Хосео (2018-0355). Оба автора (H.-W. Cheong, J.-W. Kim) внесли равный вклад в эту работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chu W.K., Mayer J.W., Nicolet M.-A., Buck T.M., Amsel G., Eisen F.* // Thin Solid Films. 1973. V. 17. № 1. P. 1.
2. *Lee E.H.* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. 1999. V. 151. № 1–4. P. 29.
3. *Yamashita M., Fenn J.B.* The Journal of Physical Chemistry. 1984. V. 88. № 20. P. 4451.
4. *Matsuo S., Adachi Y.* // Japanese Journal of Applied Physics. 1982. V. 21. № 1. P. L4.
5. *Kim J.W., Cheong H.W., Hong Y.T., Whang K.W.* // Plasma Sources Science and Technology. 2017. V. 26. № 3. P. 035008.
6. *Kinoshita K., Utsumi H., Suemitsu K., Hada H., Sugibayashi T.* // Japanese J. Applied Physics. 2010. V. 49. № 851. P. 08JB02.
7. *Takahashi S., Kai T., Shimomura N., Ueda T., Amano M., Yoshikawa M., Kitagawa E., Asao Y., Ikegawa S., Kishi T., Yoda H., Nagahara K., Mukai T., Hada H.* IEEE Transactions on Magnetics. 2006. V. 42. № 10. P. 2745.
8. *Sousa R.C., Prejbeanu I.L.* // Comptes Rendus Physique. 2005. V. 6. № 9. P. 1013.
9. *Kawahara T., Ito K., Takemura R., Ohno H.* // Microelectronics Reliability. 2012. V. 52. № 4. P. 613.
10. *Zhu J., Park C.* Materialstoday. 2006. V. 9. № 11. P. 36.
11. *Sugiura K., Takahashi S., Amano M., Kajiyama T., Iwayama M., Asao Y., Shimomura N., Kishi T., Ikegawa S., Yoda H., Nitayama A.* // Japanese J. Applied Physics. 2009. V. 48. № 8S1. P. 08HD02.
12. *Chun S.W., Kim D.H., Kwon J.H., Kim B.H., Choi S.J., Lee S.B.* // J. Applied Physics. 2012. V. 111. № 7. P. 07C722.
13. *Peng X., Wakeham S., Morrone A., Axdal S., Feldbaum M., Hwu J., Boonastra T., Chen Y., Ding J.* // Vacuum. 2009. V. 83. № 6. P. 1007
14. *Aston G., Kaufman H.R., Wilbur P.J.* AIAA Journal. 2012. V. 16. № 5. P. 516
15. *Fujiwara Y., Sakakita H., Nakamiya A., Hirano Y., Kiyama S.* // Rev. Scientific Instruments. 2016. V. 87. № 2. P. 02B930.

16. *Flamm D., Zeuner M.* // Surface and Coatings Technology. 1999. V. 116–119. P. 1089.
17. *Coburn J.W., Kay E.* // J. Applied Physics. 1972. V. 43. № 12. P. 4965.
18. *Ingram S.G., Braithwaite N.St.J.* // J. Physics D: Applied Physics. 1988. V. 21. № 10. P. 1496.
19. *Kuypers A.D., Hopman H.J.* // J. Applied Physics. 1988. V. 63. № 6. P. 1894.
20. *Bohm C., Perrin J.* Rev. Scientific Instruments. 1993. V. 64. № 1. P. 31.
21. *Conway G.D., Perry A.J., Boswell R.W.* // Plasma Sources Science and Technology. 1998. V. 7. № 3. P. 337.
22. *Lee W.H., Kim H., Kim J.W., Cheong H.W., Koo I.G., Lee S., Seong H., Whang K.W.* in *Proceedings of the 66th Annual Gaseous Electronics Conference, New Jersey*, 2013. V. 58.
23. *Lee H.J., Yang I.D., Whang K.W.* // Plasma Sources Science and Technology. 1996. V. 5. № 3. P. 383.
24. *Lieberman M.A., Lichtenberg A.J.* Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. Reading, NJ: Wiley, 2005.
25. *Rose D.V., Genoni T.C., Welch D.R.* // Physics of Plasmas. 2006. V. 13. № 9. P. 092507.
26. *Lee W.H., Cheong H.W., Kim J.W., Whang K.W.* // Plasma Sources Science and Technology. 2015. V. 24. № 6. P. 065012.

Перевод с англ. Н.Л. Александрова

A Study on the Improvement of Etch Uniformity in an Ion Beam Etcher with a Magnetized Inductively Coupled Plasma Source

H.-W. Cheong[1], J.-W. Kim[2], K. Kim[3], and H. Lee[4, #]

[1] *Grad. School of Management of Technology, Hoseo University, Asan, Korea*
[2] *Samsung Electronics Co. Ltd., Hwaseong, Korea*
[3] *Dept. of Electrical and Computer Engineering, Seoul Natl. University, Seoul, Korea*
[4] *Hyundai Motor Company, Hwaseong, Korea*
#e-mail: hwally@nate.com

A magnetized inductively coupled plasma ion beam etcher (MICP-IBE) was designed by employing electromagnets around the etcher (IBE). A magnetic field can be set up such that the magnitude of the magnetic flux density on the screen grid increases or decreases with the radial distance from the screen grid center. Four different types of magnetic field conditions were considered. The plasma densities and electron temperatures were measured as functions of radial distance from the screen grid center under each condition. In addition, ion flux was measured with respect to radial distance from the substrate center using ion energy analyzer (IEA), after which the uniformity characteristics of the ion flux in the substrate were investigated. The dry etching characteristics of CoFeB, a typical alloy being used in the magnetic memory device, were investigated. The uniformity characteristics of the ion flux and the etch rate can be improved with the proper design of magnetic field conditions; however, the improvement was confirmed to be limited. In this respect, a new screen and acceleration grid were designed that have different grid hole densities with radial distance from the grid center (hereafter referred to as the proposed grid). Using the proposed grid, the ion flux and etch rate of CoFeB were measured with respect to radial distance from the substrate center, to see if the radial etch rate uniformity can be improved further. The CoFeB etch rate non-uniformity in the proposed grid (11.65%) was lower than that for the conventional grid (17.5%).

Keywords: ion beam etcher, magnetized inductively coupled plasma, uniformity, plasma density, etch rate