

Е.В. Берлин, В.Ю. Григорьев, Л.А. Сейдман

Индуктивные источники высокоплотной плазмы и их технологические применения

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2018

УДК 537.5

ББК 22.333

Б48

Б48 Берлин Е.В., Григорьев В.Ю., Сейдман Л.А.

Индуктивные источники высокоплотной плазмы
и их технологические применения

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 464с. ISBN 978-5-94836-519-0

Тенденции развития современной технологии электронной техники заключаются в увеличении степени интеграции изделий на поверхности подложек, что связано как с увеличением диаметра применяемых в производстве подложек, так и с уменьшением геометрических размеров элементов изделий на их поверхности до 0,01–0,04 мкм. Для технологии изготовления изделий с микро- и наноэлементами использование ВЧ разряда индуктивно связанный плазмы (ICP) как плазмообразующего источника предоставляет большие преимущества. В частности, с его помощью достигают высокую плотность плазмы (10^{11} – 10^{12} см $^{-3}$), минимальный разброс ионов по энергиям ($\Delta E_i \leq 5$ эВ), относительно низкое рабочее давление (10^{-2} – 10^{-1} Па) и низкую энергетическую цену иона (30–80) эВ/ион. Благодаря отсутствию накаливаемых узлов источник ICP обладает большим ресурсом работы с химически активными газами. Особенно важно, что он предоставляет возможность независимого управления энергией и плотностью потока ионов, поступающих на подложку. Успехи в конструировании источников ICP для целей микроэлектроники побудили разработчиков оборудования применить их и в других отраслях, например в азотировании стальных деталей, обработке полимерных пленок и нанесении специальных покрытий методами PVD и PECVD.

За последнее десятилетие источники ICP нашли широкое промышленное применение, о котором появилось большое количество новой информации. Поэтому назрела необходимость составления обзора, цель которого — систематизация основных экспериментальных результатов разработки и применения источников ICP. В книге приведено описание принципов действия, особенностей и преимуществ источников ICP и рассмотрены многочисленные варианты конструкций современных источников ICP. Приведены также примеры технологических применений описываемых источников для нанесения тонких пленок: в процессах PVD и PECVD. И кроме того, описано формирование плазмохимическим травлением трехмерных структур в различных материалах и двумерных структур в тонких пленках и связанное с такой обработкой существенное изменение свойств поверхностей различных материалов, в особенности полупроводников.

Таким образом, настоящая книга представляет собой подробное справочное руководство по конструкциям и применению источников ICP. Книга рассчитана на студентов, аспирантов, конструкторов нового технологического оборудования, использующего источники ICP, и технологов, работающих на таком оборудовании. Конструкторы найдут в ней обзор способов достижения высоких параметров источников ICP, а технологи ознакомятся с широким спектром их применения и полученных с их помощью достижений. Она также будет полезна в качестве учебного пособия для студентов старших курсов и аспирантов соответствующих специализаций.

УДК 537.5

ББК 22.333

© 2018, Берлин Е.В., Григорьев В.Ю., Сейдман Л.А.

© 2018, АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

ISBN: 978-5-94836-519-0

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	6
---------------	---

ГЛАВА 1.

Современные источники плазмы для технологических применений. Преимущества источников ICP.....	9
---	---

1.1. Технологические аспекты применения газоразрядной плазмы	9
1.1.1. Плавающий электрод в плазме	10
1.1.2. Плотность плазмы и ионный ток	11
1.1.3. Ток на электрод, находящийся под высокочастотным потенциалом	13
1.2. Способы и устройства формирования технологической плазмы	14
1.2.1. Диодный емкостный плазменный реактор	14
1.2.2. Индукционный ВЧ источник плазмы (ICP источник)	16
1.3. Свойства индукционного разряда при низком давлении.....	16
1.3.1. Зависимость плотности плазмы от вкладываемой в разряд ВЧ мощности.....	17
1.3.2. Поглощение высокочастотной мощности плазмой	18
1.3.3. Согласование источника ICP с цепями питания.....	20
1.3.4. Определение характерных величин разряда по его внешним параметрам	22

ГЛАВА 2.

Конструкции антенн источников ICP.....	24
--	----

2.1. Локальные антенны источников ICP	24
2.1.1. Планарные антенны.....	25
2.1.1.1. Планарные антенны вне рабочей камеры (внешние антенны)	25
2.1.1.2. Планарные антенны, погруженные в плазму (внутренние антенны)	64
2.1.2. Антенны с цилиндрической катушкой	82
2.1.2.1. Антенны с цилиндрической катушкой вне камеры (внешние антенны)	82
2.1.2.2. Антенны с цилиндрической катушкой, погруженной в плазму (внутренние антенны).....	87
2.2. Источники ICP для обработки деталей большой площади	90
2.2.1. Внешние антенны источников ICP большой площади	90
2.2.2. Внутренние антенны источников ICP большой площади	101
2.2.2.1. Планарные спиральные антенные катушки	102
2.2.2.2. Антенны из линейных элементов	103

2.2.2.3. Внутренние антенны с разомкнутыми ферромагнитными сердечниками	121
2.2.2.4. Антенны с постоянным магнитным полем.....	137
2.2.2.5. Источники ICP ячеистой структуры.....	140
2.2.2.6. Источники пучков нейтральных частиц.....	154

ГЛАВА 3.**Нанесение тонких пленок с ассистированием
источником ICP**

157

3.1. Нанесение тонких пленок конденсацией паров в вакууме с ассистированием источником ICP.....	157
3.1.1. Нанесение тонких пленок распылением мишени с помощью источника ICP.....	158
3.1.2. Повышение степени активации распыленных частиц в процессах нереактивного магнетронного нанесения	160
3.1.3. Повышение степени активации частиц реактивного газа в процессах реактивного магнетронного нанесения.....	168
3.1.4. Резюме	186
3.2. PECVD процессы осаждения тонких пленок с ассистированием источником ICP	186
3.2.1. Пленки углерода.....	187
3.2.2. Пленок кремния.....	193
3.2.3. Пленок нитрида и оксида кремния	209
3.2.4. Пленок нитридов тугоплавких металлов.....	218

ГЛАВА 4.**Плазмохимическое травление различных материалов
с помощью источников ICP.....**

222

4.1. Общие принципы плазмохимического травления с помощью источников ICP.....	222
4.2. Процессы формирования трехмерных структур в различных материалах	229
4.2.1. В подложках кремния	229
4.2.1.1. Бош процесс	231
4.2.1.2. Крио процесс	237
4.2.1.3. Одностадийные процессы без применения криогенных температур подложки	245
4.2.1.4. Резюме по плазмохимическому травлению кремния:	255
4.2.2. В карбиде кремния	256
4.2.2.1. Травление подложек SiC	256
4.2.2.2. Вытравление сквозных отверстий в подложках SiC с эпитаксиальными слоями GaN	270

4.2.2.3. Резюме по травлению карбида кремния:	273
4.2.3. В кварце	274
4.2.4. В сапфире	278
4.2.5. В нитриде галлия	281
4.2.5.1. Оптимизация режимов травления GaN	281
4.2.5.2. Селективное травление GaN	287
4.2.6. В арсениде галлия	308
4.2.7. В других сложных полупроводниках (InP, InGaP, InAs, InSb, GaSb, AlGaAsSb и InGaAsSb)	316
4.2.8. В полимерах	322
4.3. Формирование двумерных структур в тонких пленках различных материалов	325
4.3.1. В пленках кремния	326
4.3.2. В пленках нитрида кремния	332
4.3.3. В пленках окисла кремния	337
4.3.4. В пленках металлов и сплавов	342
4.3.5. В пленках нитридов металлов	351
4.3.6. В пленках окислов металлов	355
4.3.7. В пленках полимеров	366

ГЛАВА 5.**Изменение свойств поверхности различных материалов
при обработке в источнике ICP**

372

5.1. Поверхность GaN	373
5.1.1. Обработка в плазме аргона	373
5.1.2. Обработка в плазме азота	379
5.1.3. Обработка в плазме кислорода	388
5.1.4. Обработка в плазме галогеносодержащих газов	394
5.1.5. Резюме по последствиям обработки в плазме поверхности нитрида галлия:	416
5.2. Поверхность GaAs и других сложных полупроводников	418
5.3. Поверхность кремния и окисла кремния	423
5.4. Поверхность полимеров	427
5.5. Азотирование поверхности стальных деталей	429
5.6. Поверхность других материалов	434

Заключение..... 437

Список литературы..... 438