

Управление энергетическими характеристиками ионного потока в плазмохимическом реакторе на базе пучково-плазменного разряда

Н. В. Исаев, И. Л. Клыков, Е. Г. Шустин

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал,
г. Фрязино Московской обл., Россия

Показано, что на основе ранее обнаруженного эффекта генерации в пучково-плазменном разряде (ППР) ионного потока от оси разряда может быть создан плазмохимический реактор для низкоэнергетического травления полупроводниковых структур. Здесь показана возможность простого управления плотностью и энергией ионного потока путем изменения потенциала коллектора разряда. Реализованы средства компенсации заряда ионного потока, падающего на непроводящую поверхность, с помощью модуляции потенциала держателя подложки, а также путем модуляции потенциала плазмы.

PACS: 41.75.-i; 52.25.-b

Ключевые слова: генерация, плазменно-пучковый разряд, ионный поток, плазмохимический реактор.

Введение

В настоящее время при производстве широкого спектра полупроводниковых приборов — от лазеров до микросхем СВЧ-диапазона — на основе кремния и полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ широко используются различные плазмохимические процессы как для травления и очистки поверхности полупроводников, диэлектриков и металлов, так и для осаждения тонких пленок на поверхность полупроводниковых структур. Одна из актуальных проблем — обеспечение "мягкого" бездефектного травления открытой поверхности полупроводниковых гетероструктурных соединений.

В плазмохимической технологии полупроводниковых приборов в основном используются ВЧ-разряды. Энергию ионов в таких разрядах, как правило, трудно уменьшить до величин <100 эВ, а следовательно, избежать радиационных нарушений структуры полупроводника.

Известны работы по созданию плазмы для плазмохимического реактора ударной ионизацией газа электронными пучками малой плотности, в частности, "Система плазменной обработки поверхности большой площади" (LAPPS) на основе ионизации газа высокоэнергетичным (2 кэВ) электронным пучком [1—3]. Показано, что эта система:

- эффективна при создании плазмы в любой газовой композиции;
- способна к созданию низкотемпературных электронов плазмы ($<0,5$ эВ) с высокой плотностью ($10^9 \div 10^{12}$ см $^{-3}$);
- масштабируется на большие площади (квадратные метры).

В этой системе, однако, используется электронный пучок малой плотности (1—10 мА/см 2), при этом "спокойная" плазма создается ударной ионизацией молекул газа электронами пучка, в системе отсутствуют внутренние механизмы ускорения ионов или плазмы. Требуемая плотность плазмы достигается при давлении рабочего газа,

на порядок бóльшем, чем в исследуемой нами системе, соответственно, из-за более высокой частоты столкновений ухудшается направленность ионного потока.

В отличие от этой системы ППР, формирующийся при существенно большей плотности тока, является по существу СВЧ-разрядом в полях, генерируемых в плазме в результате развития пучковой неустойчивости.

Огромное число работ, посвященных исследованию свойств ППР, изучению его различных проявлений в природе и возможных применений, было опубликовано со времени открытия явления ППР [4, 5]. Уже первые эксперименты с ППР [5, 6] показали, что этот вид разряда представляет собой простой и весьма эффективный путь создания сильно неравновесной плазмы. В 70-е годы возникло направление применения ППР в плазмохимии [7].

При исследованиях транспорта заряженных частиц в ППР при слабых магнитных полях

$$\omega_{ce} \ll \omega_p \text{ и } r_{Le} \ll R \ll r_{Li},$$

где ω_{ce} и ω_p — электронная циклотронная и плазменная частоты, соответственно;

r_{Le} и r_{Li} — ларморовские радиусы электронов и ионов плазмы;

R — радиус плазменной камеры.

Авторами данной работы обнаружено явление стационарного ускорения ионов в направлении, нормальном к оси разряда [8].

В определенных режимах разряда ионы плазмы ускоряются до энергий, на порядок превышающей тепловую энергию электронов в основном объеме плазмы, при этом плотность потока ионов на расстоянии 10 см от оси разряда достигает величины 0,1—0,5 мА/см².

Согласно результатам физических экспериментов [9] и компьютерного моделирования [10] был определен физический механизм обнаруженного эффекта:

- при нелинейном развитии пучковой неустойчивости в ограниченном объеме (плазменном резонаторе) генерация регулярных колебаний весьма быстро, за несколько времен пролета пучка сменяется возбуждением широкополосных стохастических колебаний;

- в области, занятой электронным пучком, формируется сильно неравновесная плазма со средней энергией электронов, достигающей сотни электронвольт;

- электроны этой области создают дополнительный ток электронов из плазмы на торцевые электроды;

- увеличение электронного тока приводит к росту потенциала плазмы в области, занятой пучком;

- градиент потенциала между областью, занятой пучком, и периферийной областью плазмы определяет ускорение потока ионов по нормали к оси системы.

Диапазон энергий ионов аргона 20—70 эВ оптимален для бездефектного травления (распыления) инертными газами (без участия химически активных сред) соединений типа A^{III}B^V и гетероструктур на их основе. Исходя из этого проводилась апробация режимов травления гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs (P-HEMT), применяемых для разработки транзисторов миллиметрового диапазона [11]. Исследовалось влияние такой обработки на концентрацию и подвижность электронов, чувствительные к радиационным дефектам, вносимым в процессе травления. Показано наличие эффекта травления без существенной деградации параметров гетероструктур (подвижности электронов), что свидетельствует о малой плотности радиационных нарушений и возможности использования ППР в технологии изготовления гетероструктурных СВЧ-приборов.

В данной работе описаны результаты изучения возможностей управления энергетическими характеристиками ионного потока в диапазоне, оптимальном для бездефектного травления полупроводников.

Эксперимент

Эффект ускорения ионов обнаружен в экспериментах, проводимых на установке, схема которой показана на рис. 1, и подробно описан в работах [8, 9]. Плазма формируется в вакуумной камере — цилиндре диаметром $2R_0 = 0,5$ м и такой же длиной при продольном магнитном поле с индукцией до 5 мТл. В камере поддерживается рабочее давление аргона 0,006—0,2 Па. Источником осевого электронного пучка служит диодная пушка Пирса с плоским гексабаридным катодом. Параметры электронного пучка на входе в плазменную камеру: ускоряющее напряжение $U_b = 1—2$ кВ, ток I_b — до 500 мА, характерный диаметр 1—1,5 см. Источник питания пушки обеспечивает ее работу в импульсном режиме с длительностью импульса $\tau_b = 10—200$ мс и скважностью >3 .

У противоположной стенки плазменной камеры помещен коллектор электронов, совмещенный с энергоанализатором электронов (электростатический сеточный анализатор с тормозящим полем).

Для диагностики плазмы используется ленгмюровский зонд.

В качестве приемника ионного потока используется электростатический анализатор с плоским отклоняющим зеркалом. Коллиматор ионов ориентирован перпендикулярно оси камеры. Параметры

анализатора: диапазон анализируемых энергий 0—100 эВ, чувствительность $\sim 0,5 \cdot 10^{-9}$ А/см², разрешающая способность по энергиям $\Delta W/W_0 = 0,12$.

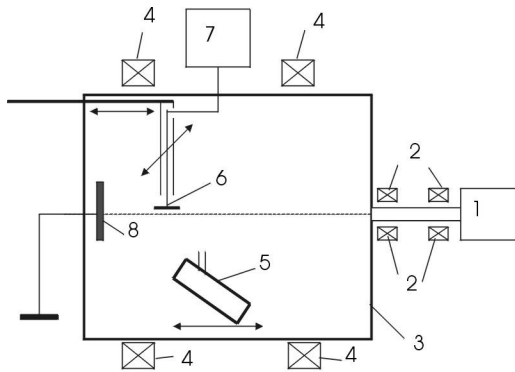


Рис. 1. Схема эксперимента:

- 1 — пушка Пирса; 2 — катушки фокусировки пучка;
- 3 — плазменная камера; 4 — катушки Гельмгольца;
- 5 — анализатор энергии ионов; 6 — зонд; 7 — блок регистрации зондовой характеристики; 8 — коллектор

В работах [8, 11] представлен вид функции распределения ионов по энергиям в различных режимах разряда.

Выявленный механизм ускорения ионов, определяемый электронными токами на торцы системы, привел к выводу о возможности простого управления плотностью и энергией ионного потока путем изменения потенциала коллектора разряда.

Моделирование [12, 13] показало, что поток и энергия ионов, приходящих на границу области разряда при различных параметрах коллектора, действительно определяется перераспределением электронных токов на торцах системы и соответствующим изменением радиального профиля потенциала плазмы.

Показано, что изменением радиуса и/или потенциала коллектора можно достичь двукратного увеличения средней энергии ионов (в условиях этой модели) и трехкратного увеличения плотности их радиального потока. Эксперименты подтвердили этот вывод: изменение потенциала коллектора в диапазоне 0—70 В приводит к изменению средней энергии от 20 до 60 эВ с увеличением плотности потока на порядок [11].

С точки зрения обработки непроводящей поверхности существенно не только энергетическое распределение ионов в объеме плазмы, но и плавающий потенциал поверхности: некомпенсированный заряд ионного потока вызовет плавающий потенциал, который будет тормозить ионы. Для отработки способов управления энергетическими характеристиками ионного потока проведены эксперименты по изучению функции распределения ионов на периферии ППР и плавающего потенциала на поверхности образца, подвергаемого

травлению. Результаты приведены на рис. 2 и 3, сравнение которых показывает, что средняя энергия потока ионов, падающих на изолированную поверхность, помещенную на расстоянии 8—10 см от оси, может достигать 40 эВ при плотности потока до 0,5 мА/см².

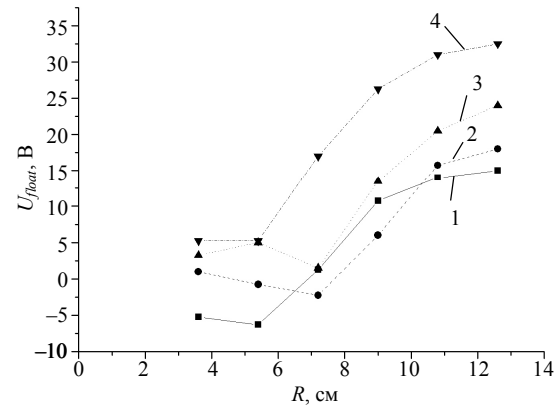


Рис. 2. Плавающий потенциал в зависимости от радиального положения зонда при различных потенциалах коллектора разряда U_{col} : 1 — 30 В; 2 — 40 В; 3 — 50 В; 4 — 60 В

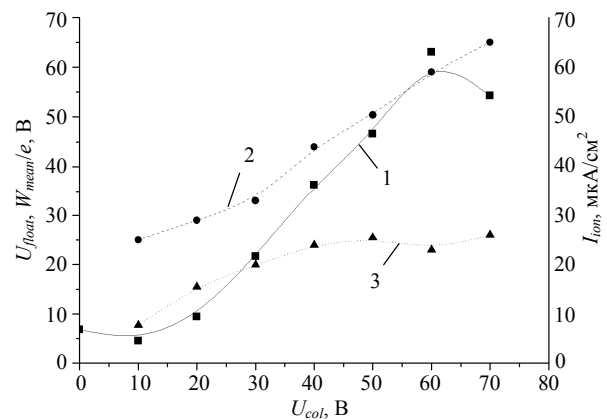


Рис. 3. Зависимости плавающего потенциала зонда в точке размещения подложки, средней энергии ионов и плотности тока ионов на подложку от потенциала коллектора: 1 — плотность тока ионов; 2 — средняя энергия ионного потока; 3 — плавающий потенциал зонда

Для компенсации заряда ионного потока, падающего на непроводящую поверхность диэлектрической или полупроводниковой подложки в режиме травления, предложено использовать высокочастотную модуляцию потенциала держателя подложки. При подаче на держатель напряжения U_0 на частотах ~ 100 — 1000 кГц на поверхности, контактирующей с плазмой, оказывается напряжение

$$\sim U_p = U_0(C_{sh} + Y_{sh})/C_d,$$

где C_{sh} — емкость граничного слоя;
 Y_{sh} — его (нелинейная) проводимость;
 C_d — емкость подложки.

Если $U_p > U_{float}$, то в течение части периода переменного напряжения на поверхность будут собираться электроны, нейтрализующие заряд ионов. Моделирование этого режима с помощью численного решения нелинейных дифференциальных уравнений соответствующей электрической цепи [14, 15] подтвердило ожидаемый эффект.

Проведена апробация режима травления пластины полуизолирующего арсенида галлия (непроводящая подложка) через маску резиста в режиме модуляции потенциала на держателе подложки напряжением частоты 100 кГц. Режим разряда: напряжение на коллекторе 60 В, магнитное поле в камере 32 мТл, давление рабочего газа 0,2 мТорр. Скорость травления, составлявшая 0,25 нм/мин при заземленном держателе подложки, увеличивалась до 1,5 нм/мин при амплитуде осциллирующего напряжения на держателе подложки 75 В и до 2,5 нм/мин — при амплитуде 100 В. Таким образом, применение модуляции потенциала существенно увеличило эффективность травления поверхности непроводящей пластины.

Описанный выше способ компенсации заряда поверхности, контактирующей с плазмой, ограничен по применению: в случае большой толщины подложки и ее малой диэлектрической проницаемости падение напряжения на емкости подложки оказывается слишком большим. Поэтому авторы исследовали альтернативный способ управления плавающим потенциалом поверхности электроизолированной структуры — модуляцией потенциала плазмы с помощью подачи на коллектор пульсирующего потенциала.

Как показано на рис. 3, плотность потока ионов и плавающий потенциал изолированной поверхности явно зависят от потенциала коллектора, поэтому можно было ожидать, что при модуляции этого потенциала переменным сигналом с периодом, близким к характерному времени зарядки поверхности, будет происходить периодическая нейтрализация заряда на поверхности. Исследования подтвердили это предположение. В качестве источника пульсирующего напряжения на коллекторе был использован специально разработанный модулятор.

Модулятор предназначен для усиления сигнала произвольной формы на частотах до 100 кГц. Фронты импульсного прямоугольного сигнала имеют длительность 2,6 мкс. Амплитуда выходного сигнала может регулироваться в пределах 5—100 В при входном сигнале, не превышающем 15 В. Выходной каскад собран на полевом транзисторе IFR 640, за счет чего прибор позволяет выдавать мощность на выходе до 100 Вт. Входное сопротивление равно 20 кОм, емкость на входе 0,1 мкФ.

Измерялись функция распределения потока ионов, усредненная по импульсу пучка (много большому периоду модулирующего напряжения), и временной ход плавающего потенциала зонда-имитатора структуры. На рис. 4 и 5 представлены результаты измерений. Видно, что усредненный потенциал изолированной поверхности при подаче осциллирующего напряжения на коллектор резко падает, что свидетельствует о компенсации заряда. В то же время усредненная функция распределения расширяется по сравнению с режимом постоянного напряжения на коллекторе. В дальнейшем планируется оптимизация данного режима с помощью создания осциллирующего потенциала коллектора специальной формы.

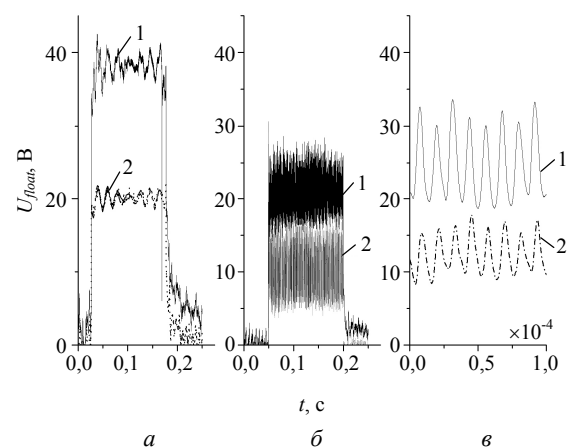


Рис. 4. Плавающий потенциал в режимах с постоянным (а) и осциллирующим (б, в) напряжением на коллекторе: 1 — максимальное напряжение на коллекторе 60 В; 2 — 40 В

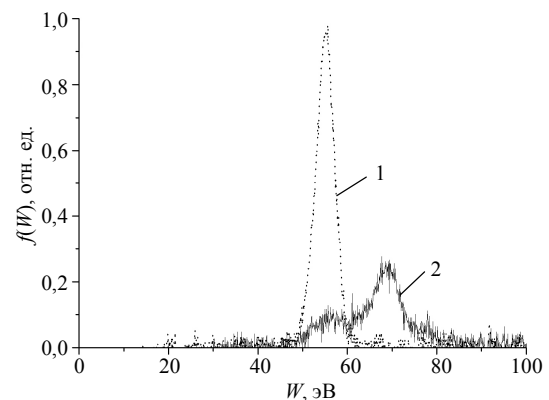


Рис. 5. Усредненная функция распределения при потенциале коллектора: 1 — постоянном, $U_{col} = 60$ В; 2 — осциллирующем, U_{col} меняется синусоидально от 0 до 60 В с частотой 100 кГц

Выводы

1. Показана возможность простого управления энергией и плотностью ионного потока в плазменно-химическом реакторе на базе пучково-плазменного разряда с помощью регулирования потенциала коллектора разряда.

2. Для компенсации заряда электроизолированной структуры в процессе травления использована высокочастотная модуляция держателя подложки. Это позволило на порядок увеличить скорость травления структуры на подложке из GaAs.

3. Предложен и апробирован альтернативный способ управления плавающим потенциалом изолированной поверхности путем высокочастотной модуляции потенциала плазмы.

Предложенные способы управления энергетическими характеристиками ионного потока, падающего на изолированную поверхность, получают свое развитие в применении к другим плазменным технологиям обработки поверхности, в частности, при осаждении диэлектрических и полупроводниковых пленок.

Авторы благодарят В. М. Носырева за помощь в разработке модулятора потенциала коллектора, А. А. Рухадзе и В. П. Тараканова — за полезные обсуждения результатов работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 07-08-00014).

Л и т е р а т у р а

1. Fernsler R. F., Manheimer W. M., Meger R. A. et al. // Phys. Plasmas. 1998. V. 5. P. 2137.
2. Manheimer W. M., Fernsler R. F., Lampe M., Meger R. A. // Plasma Sources Sci. Technol. 2000. V. 9. P. 370.
3. Leonhardt D., Muratore C., Walton S. G. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2005. V. 33. P. 783.
4. Kharchenko I. F. et al. // Nucl. Fusion 1962. Suppl. Pt. 3. P. 1101.
5. Getty L. D., Smullin W. D. // J. Appl. Phys. 1963. V. 34. P. 3421.
6. Seidl M., Šunka P. // Nuclear Fusion. 1967. V. 7. P. 237.
7. Иванов А. А., Соболева Т. К. Неравновесная плазменная химия. — М.: Атомиздат. 1978.
8. Исаев Н. В., Чмиль А. И., Шустин Е. Г. // Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 3. С. 257.
9. Исаев Н. В., Шустин Е. Г. // Там же. 2007. Т. 33. № 1. С. 43.
10. Тараканов В. П., Шустин Е. Г. // Там же. № 2. С. 151.
11. Исаев Н. В., Шустин Е. Г., Темиряева М. П., Тараканов В. П., Федоров Ю. В. // Прикладная физика. 2008. № 3. С. 73.
12. Клыков И. Л., Тараканов В. П., Шустин Е. Г.: Тез. докл. XXXVI Междунар. (Звенигородской) конф. по физике плазмы и УТС, 2009. С. 264.
13. Клыков И. Л., Шустин Е. Г., Тараканов В. П. // Прикладная физика. 2009. № 6. С. 87—91.
14. Курнаев В. А., Песков В. В., Чмиль А. И., Шустин Е. Г.: Тез. докл. XXXVI Междунар. (Звенигородской) конф. по физике плазмы и УТС, 2009. С. 316.
15. Курнаев В. А., Песков В. В., Чмиль А. И., Шустин Е. Г. // Прикладная физика. 2009. № 6. С. 118—122.

Статья поступила в редакцию 26 июня 2009 г.

Control of the power characteristics of ion flow in plasma processing reactor on the basis of beam plasma discharge

N. V. Isaev, I. L. Klykov, E. G. Shustin

V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, 1 Vvedensky sq.,
141190, Fryazino, Moscow Region, Russia
E-mail: shustin@ms.ire.rssi.ru

Earlier we have detected effect of generation of ion flow from a discharge axis in beam plasma discharge. There has been shown, that on the basis of this effect plasma processing reactor for can be created for low energy etching of semiconductor structures. Possibility of simple control of ion stream density and energy is shown here by change of a potential of a collector of discharge. The means of compensation of an ion stream charge incident on a non-conducting surface with the help of modulation of a potential of a substrate holder have been implemented, and also by modulation of a potential of plasma.

PACS: 41.75.-i; 52.25.-b

Keywords: generation, plasma beam discharge, ionic stream, plasma chemical reactor.

Исаев Николай Васильевич, зав. лабораторией
Клыков Илья Леонидович, аспирант
Шустин Евгений Германович, ведущий науч. сотр.
141190, г. Фрязино Московской обл., пл. Введенского 1, ИРЭА, Фрязинский филиал
Тел. (49656) 525-69, факс (495) 702-95-72; E-mail: shustin@ms.ire.rssi.ru