

Л и т е р а т у р а

1. Рухадзе А. А., Богданкевич Л. С., Росинский С. Е., Рухлин В. Г. Физика сильноточных релятивистских электронных пучков. — М.: Атомиздат, 1980.
2. Миллер Р. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. — М.: Мир, 1984.
3. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. — М.: Наука, 2004.
4. Плютто А. А., Мхеидзе Г. П., Корон Е. Д. // Отчет Сухумского физико-технического института № 2473. Ч. 2. 1967. — 18 с.; Мхеидзе Г. П., Корон Е. Д. // ЖТФ. 1971. Т. 41. Вып. 5. С. 873.
5. Ковальчук Б. М., Месяц Г. А. // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2. Вып. 14. С. 644.
6. Котов Ю. А., Калганов Н. Г., Ковальчук Б. М. // ПТЭ. 1974. № 6. С. 107.
7. Грехов И. В., Месяц Г. А. // УФН. 2005. Т. 175. № 7. С. 735.
8. Мхеидзе Г. П. // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37. Вып. 1. С. 1.
9. Беленсов П. Е., Капин А. Г., Плютто А. А., Рыжков В. Н. // ЖТФ. 1964. Т. 34. № 12. С. 2120.
10. Плютто А. А., Беленсов П. Е., Корон Е. Д. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1967. Т. 6. Вып. 3. С. 540.
11. Плютто А. А., Суладзе К. В., Темчин С. М., Корон Е. Д. // Атомная энергия. 1969. Т. 27. № 6. С. 418.
12. Векслер В. И. // Там же. 1957. Т. 2. № 5. С. 427; УФН. 1958. Т. 66. С. 99.
13. Плютто А. А., Корон Е. Д., Мхеидзе Г. П. // Отчет Сухумского физико-технического института № 429. 1963. — 16 с.; Мхеидзе Г. П., Плютто А. А., Корон Е. Д. // ЖТФ. 1971. Т. 41. Вып. 5. С. 952.
14. Graybill S., Uglum J. // Journal of Appl. Phys. 1970. V. 41. № 1. P. 236; Yonas G. // Particle Accelerators. 1973. V. 5. № 1. P. 81.
15. Nablo S. V. // Physics to day. 1969. V. 22. № 5. P. 59.
16. Rander J., Ecker B., Yonas G., Drickey D. J. // Phys. Rev. Lett. 1970. V. 24. № 6. P. 283.
17. Мовсесянц Ю. Б., Мхеидзе Г. П. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2001. № 2. С. 31.
18. Miller P. A., Poukey J. W., Wright T. P. // Phys. Rev. Lett. 1975. V. 35. № 14. P. 940.
19. Абдулин Э. Н., Баженов Г. П., Бастриков А. Н. и др. // Физика плазмы. 1985. Т. 11. Вып. 1. С. 109.
20. Weber B. V., Comisso R. J., Cooperstein G. et al. // IEEE Trans. Plasma Science. 1987. PS-15. № 6. P. 635; Appl. Phys. Lett. 1984. № 45. P. 104.
21. Ottinger P. F., Goldstein S. A., Meger R. A. et al. // J. Appl. Phys. 1984. V. 56. P. 774.

Статья поступила в редакцию 25 октября 2007 г.

Formation and application of the pulse high-current electron beams.

Part I. Processes in the plasma diode

G. P. Mkheidze, A. A. Savin

A. M. Prokhorov's General Physics Institute of the RAS, Moscow, Russia

Consideration is made to new results of investigation of plasma diodes and beam plasma. In the Part I account is taken of plasma diodes research.

УДК 533.915

Ионные потоки из пучково-плазменного разряда в слабом магнитном поле: физика и применение

Н. В. Исаев, Е. Г. Шустин, М. П. Темирязева

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники РАН, г. Фрязино, Московская обл., Россия

В. П. Тараканов

Институт теплофизики экстремальных состояний Объединенного института высоких температур РАН, Москва, Россия

Ю. В. Федоров

Институт СВЧ полупроводниковой электроники РАН, Москва, Россия

Проведены численное моделирование динамики развития пучковой неустойчивости в ограниченном объеме плазмы при слабом магнитном поле и измерения функции распределения электронов по скоростям. Результаты физических и машинных экспериментов позволили определить механизм исследуемого эффекта и найти способ управления энер-

гией и плотностью ионного потока. Одно из возможных приложений эффекта — новый тип плазмохимического реактора для обработки материалов, используемых в электронике. Проведена апробация технологии мягкого травления барьерного слоя гетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs.

Введение

В настоящее время при производстве широкого спектра полупроводниковых приборов, от лазеров до микросхем СВЧ-диапазона на основе кремния и полупроводниковых соединений A_3B_5 , широко используются различные плазмохимические процессы как для травления и очистки поверхности полупроводников, диэлектриков и металлов, так и их осаждения на поверхность полупроводниковых структур. Отчетливо наметилась потребность в оборудовании, способном производить "мягкое" бездефектное травление открытой поверхности полупроводниковых гетероструктурных соединений AlGaAs/InGaAs/GaAs и InAlAs/InGaAs/InP.

В плазмохимической технологии полупроводниковых приборов в основном используются ВЧ- и СВЧ-разряды. Энергия ионов в таких разрядах, как правило, трудно контролируется и управляется.

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 процесса ионизации высокоэнергетичным (2 кэВ) электронным пучком [1]. 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 — 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 большем, чем в исследуемой нами системе; соответственно, из-за более высокой частоты столкновений ухудшается направленность ионного потока.

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

В работе [2] обнаружено явление стационарного ускорения ионов в ППР низкого давления в слабом магнитном поле в направлении, нормальном к оси разряда. В определенных режимах разряда ионы плазмы ускоряются до энергии, 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/см 2 . В работе исследуется возможность создания на этой основе плазменного реактора, удовлетворяющего требованию технологии низкоэнергетичного травления поверхности полупроводниковых материалов.

Эксперименты по исследованию энергии ионов

Эффект ускорения ионов обнаружен в экспериментах, проводимых на установке, схема которой показана на рис. 1. Плазма формируется в вакуумной камере — цилиндре диаметром $2R_0 = 0,5$ м и такой же длиной. В камере поддерживается рабочее давление аргона 0,006—0,2 Па. Продольное магнитное поле с индукцией до 5 мТл в камере создается катушками Гельмгольца. Источником осевого электронного пучка служит диодная пушка Пирса с плоским гексабаридным катодом. Параметры электронного пучка на входе в плазменную камеру: ускоряющее напряжение $U_b = 1$ —3 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 плоский ленгмюровский зонд — танталовый диск диаметром 2 мм, плоскость которого ориентирована параллельно оси камеры. Зонд смонтирован на подвижном штоке, обеспечивающем перемещение зонда вдоль оси и по радиусу камеры. Форма и ориентация зонда обеспечивают наименьшее влияние на его характеристику электронного пучка. Электронная температура $T_e(r, L)$, потенциал плазмы $U_p(r, L)$ и электронная плотность плазмы $N_e(r, L)$ вычисляются при обработке зондовой ха-

рактические стандартным методом [3]: по наклону кривой $\ln(I_p - I_i) = f(U)$, потенциалу и току зонда в точке перегиба этой кривой. (Здесь I_p — ток зонда, U — его потенциал, I_i — ионный ток, полученный линейной аппроксимацией ионной части характеристики).

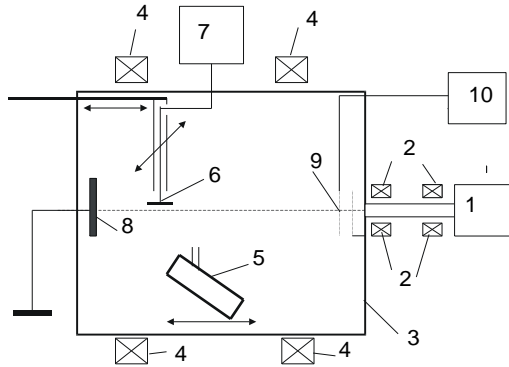


Рис. 1. Схема эксперимента:

- 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; 9 — СВЧ-модулятор; 10 — СВЧ-генератор

В качестве приемника ионного потока используется электростатический анализатор с плоским отклоняющим зеркалом [4], перемещаемый вдоль оси у боковой стенки плазменной камеры. 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 $\Delta W/W_0 = 0,12$.

На рис. 2 показан вид функции распределения ионов по энергиям (ФРИЭ) при различных давлениях рабочего газа.

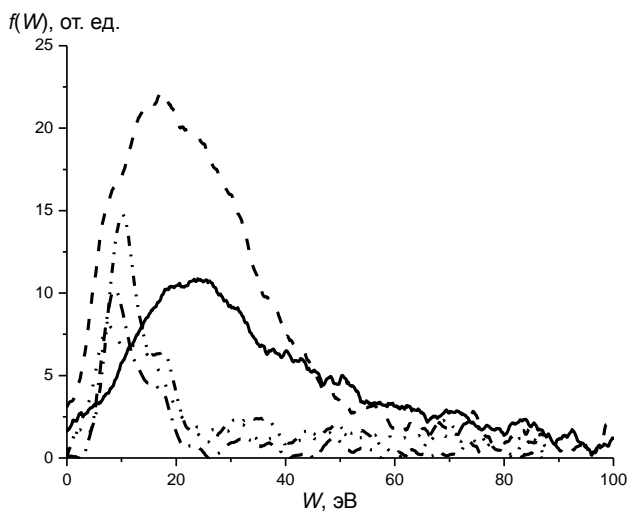


Рис. 2. Вид функции распределения потока ионов на периферии разряда при различных давлениях газа p (мТорр) в камере:
 — $p = 0,3$; $p = 0,4$; - · - · - $p = 0,5$;
 - - - - $p = 0,6$; - · - · - $p = 0,7$

В экспериментах [2, 5] показано, что, меняя параметры пучково-плазменного разряда в эквипотенциальной камере взаимодействия, можно менять среднюю энергию ионного потока, бомбардирующего поверхность вблизи боковой стенки камеры, в диапазоне 8—50 эВ.

Механизм эффекта

Для определения физического механизма эффекта ускорения ионов проведено компьютерное моделирование взаимодействия в системе плазма-пучок при параметрах модели, качественно соответствующих условиям описанных выше экспериментов [6].

Согласно результатам моделирования:

- 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 сотен электрон-вольт, при этом функции распределения электронов пучка и плазмы становятся физически неразличимы;

- 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.

Стохастизация генерируемых колебаний — весьма существенный момент, выявленный в численном эксперименте. По-видимому, именно стохастизацией колебаний определяется интенсивный нагрев электронов плазмы в приосевой области, демонстрируемый в данном компьютерном эксперименте, использующем модель бесстолкновительной плазмы.

Результаты компьютерного эксперимента стимулировали дополнительные измерения пространственного распределения высокочастотных полей, возбуждаемых в системе, и функции распределения электронов на выходе из области взаимодействия [7].

Подтвержден эффект развития стохастических колебаний в разряде с шириной спектра $\sim 1/3$ от средней частоты. При этом наблюдается эффект концентрации регулярных (почти монохроматиче-

ских) колебаний вблизи от точки инжекции пучка, за которым следует более плавный рост интенсивности стохастических колебаний к коллектору. Анализ поперечного распределения интенсивности поля показывает, что колебания в диапазоне ленгмюровских частот явно локализованы по радиусу в пределах $\sim R_{beam}$.

Анализ функции распределения по продольным скоростям электронов, приходящих на коллектор, при различных давлениях в камере (а значит, при различных отношениях n_b/N_p) показал, что одновременно с размытием пучка по скоростям явно расширяется и часть функции распределения, соответствующая приосевым электронам плазмы: средняя энергия продольного движения электронов плазмы в области пучка достигает 100—120 эВ. Размытие функции распределения электронов плазмы резко падает при удалении от оси: кинетическая температура электронов на расстоянии >2 см от оси не превышает 10—12 эВ.

Итак, физические эксперименты подтверждают формирование в разряде (в наших условиях) сильно неравновесной плазмы в области пучка с электронами, нагретыми до сотен вольт. Подтверждается также связь эффекта нагрева формирования потока ионов на периферию разряда с наличием этой сильно нагретой группы электронов, а также связь энергетических характеристик ионов со спектром генерируемых колебаний.

Апробация технологии низкоэнергетического травления

Диапазон энергий ионов аргона 20—70 эВ — оптимальный для мягкого травления (распыления) инертными газами (без участия химически активных сред) соединений типа A_3B_5 и гетероструктур на их основе: ионы с меньшей энергией практически не вызывают распыления, ионы с большей энергией создают радиационные дефекты структуры полупроводника. Исходя из этого проводились апробация и отработка режимов травления гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs (P-HEMT), применяемых для разработки транзисторов миллиметрового диапазона. Анализ результатов травления осуществлялся с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) (измерение глубины и профиля травления) и путем измерения концентрации и подвижности двумерного электронного газа, чувствительных к радиационным дефектам.

В технологических экспериментах анализатор ионов заменялся на держатель подложки, выполненный из фторопласта, с термодатчиком и вспомогательным плоским зондом-датчиком тока ионов.

Коллектор разряда — молибденовый диск диаметром 8 см. После химической очистки камеры образец (сегменты пластин с гетероструктурами или пластина диаметром 60 мм целиком) устанавливали на держателе и производилась откачка вакуумной камеры до давления ~ 2 мПа. После заполнения рабочим газом и дополнительной очистки камеры ионной бомбардировкой проводилось травление образца в течение установленного времени с контролем параметров разряда и тока ионов на вспомогательный зонд. Начало отсчета времени обработки было 6 ч в рабочем цикле импульса электронного инжектора 10 (см. рис. 1). Режим травления: давление газа 0,2 Па, магнитное поле в камере 40 Гс, напряжение пучка 2 кВ, ток пучка 300 мА, длительность импульса пучка 150 мс при скважности 4—6. Скорость травления арсенида галлия в этом режиме составляла 0,5—1 нм/мин.

Исследования, проведенные на образцах P-HEMT структур, содержащих двумерный электронный газ, показали, что при данных условиях не происходит накопления радиационных дефектов, ухудшающих параметры двумерного электронного газа.

Не выявлено признаков неоднородности травления по пластине диаметром 60 мм.

Характерное АСМ-изображение области травления после снятия резиста и профиль границы зоны травления показаны на рис. 3. Крутизна границы области травления не отличается от крутизны границы маски, что свидетельствует о высокой анизотропии ионного потока.

Выявленный механизм ускорения ионов, определяемый в конечном счете изменением электронных токов на торцы системы, привел к выводу о возможности простого управления плотностью и энергией ионного потока путем изменения потенциала коллектора разряда. Эксперименты подтвердили этот вывод: изменение потенциала коллектора в диапазоне 0—70 В приводит к изменению средней энергии от 25 до 80 эВ с увеличением плотности потока на порядок (рис. 4).

Результаты компьютерного моделирования показывают, что ток и энергия ионов, приходящих на периферию разряда, действительно определяются перераспределением электронных токов по заднему торцу и соответствующим изменением радиального профиля потенциала плазмы (рис. 5). Подтверждается, что изменением площади коллектора и потенциала на нем можно существенно увеличить среднюю энергию ионов (в условиях модели более чем в 3 раза) и плотность их радиального потока. Моделирование позволило оптимизировать размеры коллектора в натуральных экспериментах.

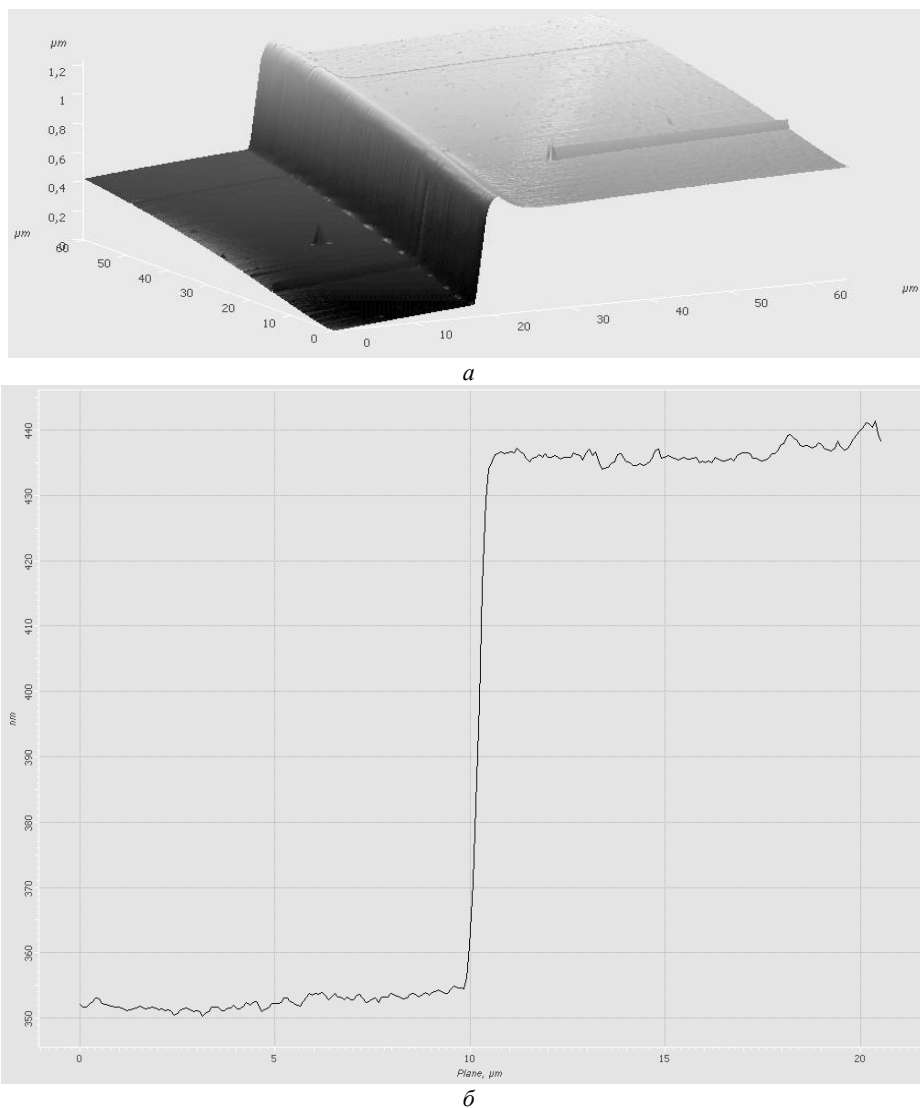


Рис. 3. АСМ-изображение (а) и поперечный профиль (б) зоны травления структуры на арсениде галлия

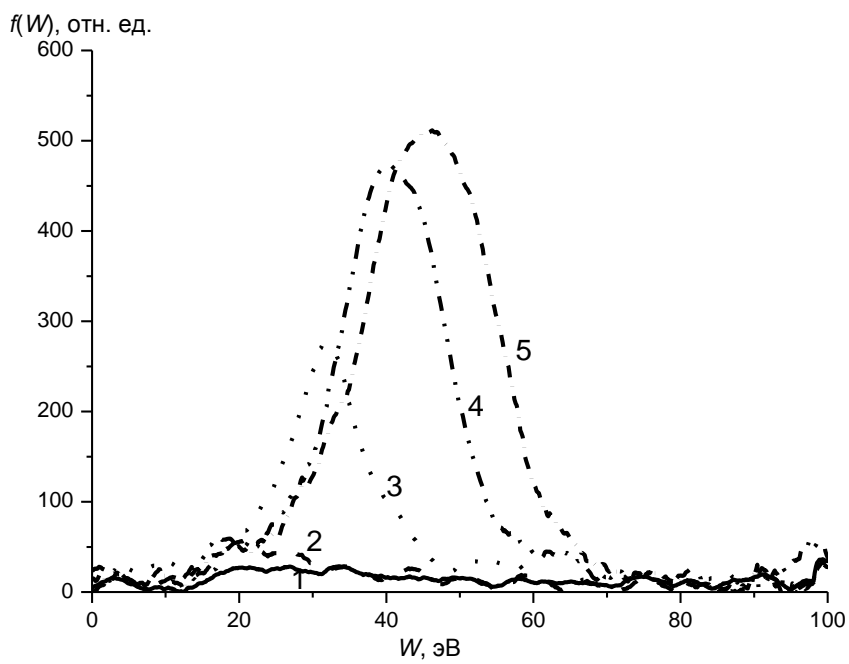
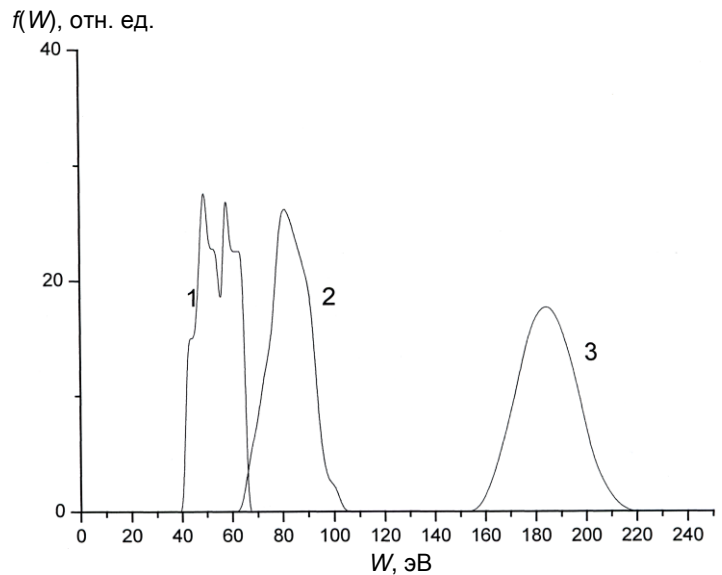


Рис. 4. Функция распределения ионов по энергиям при различных управляющих напряжениях на коллекторе U_{col} , В:
 1 — 0; 2 — 20; 3 — 40;
 4 — 60; 5 — 70

Рис. 5. Результат компьютерного моделирования: функция распределения ионов при потенциале коллектора электронов 0 (1) и 200 В (2, 3) и различных диаметрах коллектора: диаметр коллектора равен начальному диаметру пучка (2) и двойному диаметру (3)



Выводы

1. Описан эффект ускорения ионов в пучково-плазменном разряде в слабом магнитном поле, который может быть основой технологии низкоэнергетического травления материалов для микро- и нанoeлектроники. Проводимые физические эксперименты и компьютерное моделирование исследуемых процессов позволяют идентифицировать физические механизмы и одновременно разработать способы и технические средства управления характеристиками ионных потоков в технологическом процессе.

2. Проведена апробация технологии мягкого травления ионными потоками из ППР в среде аргона псевдоморфных полупроводниковых гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs (P-HEMT), использующихся для изготовления полевых СВЧ-транзисторов. Исследовано влияние такой обработки на концентрацию и подвижность электронов, чувствительных 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 HEMT приборов.

3. Проведены компьютерные и физические эксперименты, позволившие определить способы и средства оптимизации энергетических характеристик ионных потоков для эффективного травления гетероструктур.

Авторы благодарны профессору А. А. Рухадзе за полезные обсуждения физических процессов в исследуемой системе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 06-08-01496, 07-08-00014).

Литература

1. Leonhardt D., Muratore C., Walton S. G.//IEEE Trans. on Plasma Science. 2005. V. 33. P. 783.
2. Исаев Н. В., Чмиль А. И., Шустин Е. Г.//Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 3. С. 257.
3. Козлов О. В. Электрический зонд в плазме. — М.: Атомиздат, 1969.
4. Козлов И. Г. Современные проблемы электронной спектроскопии. — М.: Атомиздат, 1978
5. Исаев Н. В., Рухадзе А. А., Шустин Е. Г.//Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 11. С. 953.
6. Тараканов В. П., Шустин Е. Г.//Там же. 2007. Т. 33. № 2. С. 151.
7. Исаев Н. В., Шустин Е. Г.//Там же. № 1. С. 43.

Статья поступила в редакцию 25 октября 2007 г.

Ion flows from beam plasma discharge at low magnetic field: physics and application

N. V. Isaev, E. G. Shustin, M. P. Temiryazeva

Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Fryazino, Moscow reg., Russia

V. P. Tarakanov

Institute for High Energy Density of Associated Institute for High Temperatures of RAS, Moscow, Russia

Yu. V. Fedorov

Institute of UHF Semiconducting Electronics of RAS, Moscow, Russia

A numerical simulation of dynamics of beam instability development in a bounded volume of plasma at a low magnetic field and measurements of a velocity distribution function of electrons have been carried out. It is shown, that in area occupied by an electron beam highly non-equilibrium plasma with mean energy of electrons reaching hundreds of eV is formed due to accumulation of HF field. The acceleration of ions is a consequence of presence of a potential gradient between area with high level of microwave oscillations and peripheral area of plasma have been carried out. The effect of essential heating of electrons in paraxial area is detected. Results of physical and computer experiments have enabled to determine a mechanism of the effect under studies and to find a way of control of the flow energy and density. Possible application of the effect is a novel plasma processing reactor for treatment of materials used in electronics engineering. In particular, information is represented here on approbation of soft etching technology of AlGaAs barrier layer at semiconducting AlGaAs/InGaAs/GaAs heterostructure.

УДК 621.385.624:621.385.632

Низковольтное управление током пучка в электронно-оптических системах источников излучения О-типа миллиметрового диапазона

А. И. Тореев, Ю. Г. Гамаюнов, Е. В. Патрушева

Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия

Рассмотрены системы низковольтного управления током электронного пучка в источниках излучения миллиметрового диапазона. Показана перспективность системы с управляющим электродом с положительным потенциалом в номинальном режиме в электронно-оптических системах источников излучения О-типа коротковолнового участка этого диапазона. Изложен подход, проведены расчеты и представлены основные геометрические размеры двух вариантов электронных пушек с управляющим электродом, которые могут явиться основой для проектирования подобных систем.

Введение

Применение электронно-оптических систем (ЭОС) с низковольтным управлением электронным потоком в мощных источниках излучения О-типа позволяет существенно снизить энергозатраты, массу и габариты радиоэлектронной аппаратуры, а также повысить ее эксплуатационную надежность. При разработке ЭОС для приборов СВЧ-диапазона, как правило, предпочтение отдается системам с сеточным управлением электронным пучком, поскольку они обладают большей эффективностью. В таких системах удается обеспечить наименьшие величины управляющего напряжения, например, по сравнению с управлением по фокусирующему электроду. Разработаны и реа-

лизованы различные модификации ЭОС с сеточным управлением [1, 2]. По мере перехода к более коротким длинам волн ужесточаются требования, предъявляемые к катодно-сеточным узлам и электронным пушкам из-за необходимости преодоления противоречивых факторов, основными из которых являются:

обеспечение эффективной управляемости при сохранении максимально возможной прозрачности сетки;

сохранение достаточной жесткости и хорошего теплоотвода при уменьшении поперечных размеров перемычек сетки;

предотвращение межэлектродных замыканий из-за тепловых уходов при уменьшении зазоров между сетками и катодом.