

- [11] Y o n e i K., O z a k i J., T o m i s h i -  
m a Y. // J. Phys. Soc. Jpn. 1987. V. 56. N 8.  
P. 2697-2712.
- [12] S k u p s k y S. // Phys. Rev. A. 1977. V. 16.  
P. 727.
- [13] A r i s t a N.R., B r a n d W. // Phys. Rev.  
A. 1981. V. 23. P. 1898.
- [14] M a y n a r d G., D e u t s c h C. // Phys.  
Rev. A. 1982. V. 26. P. 665.
- [15] A r i s t a N.R., B r a n d W. // J. Phys.  
C. 1983. V. 16. P. L1217.
- [16] F e r r a r i i s L., A r i s t a N.R. // Phys.  
Rev. A. 1984. V. 29. P. 2145.
- [17] К о т е л ь н и к о в С.С., Я к о в л е в Д.Г. // ЖЭТФ.  
1983. Т. 84. № 4. С. 1348.
- [18] A n d e r s e n H.H., Z i e g l e r J.F. /  
The Stopping and Ranges of Ions in Matter. Per-  
gamon. New York. 1977. V. 3.
- [19] Y o u n g F.C. et al. // Phys. Rev. Lett. 1982.  
V. 49. N 8. P. 549.
- [20] O l s e n J.N. et al. // J. Appl. Phys. 1985.  
V. 58. N 8. P. 2958.
- [21] B a u e r W., B l u h m H., G o e l B.  
Workshop on Inertial Confinement Fusion. Varenna.  
1988.

Институт высоких температур  
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию  
10 июля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 19 12 октября 1989 г.

04; 12

### ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СВЧ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННУЮ ОБРАБОТКУ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Р.К. Я ф а р о в, А.А. Н а з а р о в,  
Э.Т. М е в л ю т

Одной из важнейших характеристик плазменных процессов, используемых в микроэлектронике, является селективность воздействия на материалы, которая помимо решения конкретных технологических задач [1], означает также минимизацию энергозатрат и исходных реагентов при получении продукта с заданными свойствами. Для высокой энергетической эффективности необходимо локализовывать энергию, вкладываемую в разряд преимущественно на одном выде-

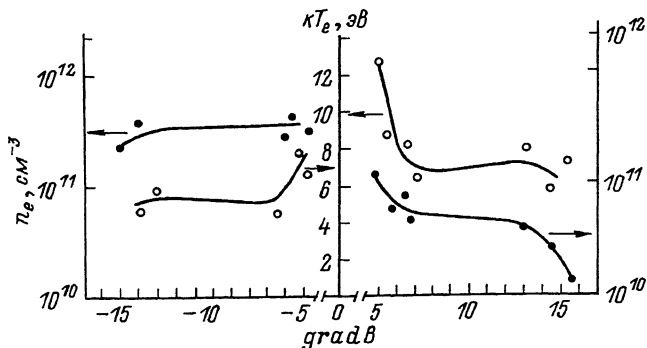


Рис. 1. Зависимость температуры и концентрации электронов от  $\text{grad } \beta$  для давления воздуха 0.1 Па и СВЧ мощности 375 Вт.

ленном канале реакций. Последнее достигается выбором параметров электронного газа. При этом большая часть вкладываемой в разряд энергии может идти, например, на получение ионов или радикалов определенного вида. Становится возможным управление химическими свойствами плазмы и регулирование как абсолютных, так и относительных скоростей травления материалов. В связи с этим одной из основных и первоочередных задач плазмохимии является диагностика электронной компоненты разряда, исследование факторов и методов управления этим процессом. Для рассматриваемого в настоящей работе метода СВЧ-вакуумно-плазменной обработки таким фактором является величина и конфигурация внешнего магнитного поля [2, 3].

Типичной конфигурацией магнитного поля, которая широко применяется в установках, реализующих данный метод обработки, является пробочная конфигурация с однородным магнитным полем между пробками. Параметром управления при этом являются пробочное отношение и отношение  $\omega_H / \omega$  где  $\omega_H$  — циклотронная частота,  $\omega$  — частота внешнего электромагнитного поля. Эти параметры не являются критическими по отношению к выбору внутренних параметров плазмы. Большими степенями свободы, как показывают приведенные в настоящей работе результаты, обладают конфигурации с неоднородным магнитным полем.

Параметры электронной компоненты разряда изучались в установке СВЧ вакуумно-плазменной обработки структур микроэлектроники, описанной в работе [2] методом двойного зонда [4]. Его основное преимущество в данном случае — меньшая чувствительность к колебаниям плазмы, характерных для разрядов в магнитных полях, и небольшой ток электронов на зонд. Это предотвращает прогрев зонда и уменьшает возмущение плазмы, вызванное отбором электронов. В экспериментах использовались цилиндрические зонды, изготовленные из вольфрамовой проволоки диаметром 0.4 мм. Для изоляции зондов проволока помещалась в стеклянную трубку, запаянную

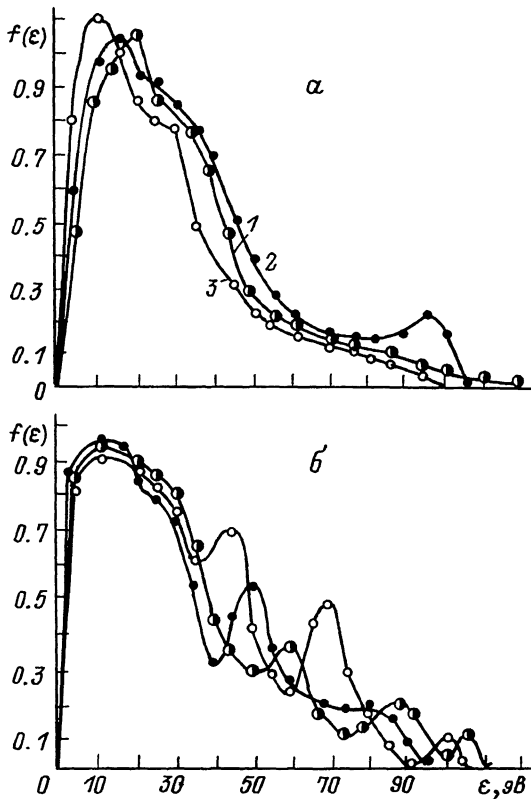


Рис. 2. Влияние  $\text{grad } B$  на ФРЭЭ для воздуха  $P = 0.1 \text{ Па}$ ,  $W = 375 \text{ Вт}$  (а -  $\text{grad } B < 0$ , б -  $\text{grad } B > 0$ , 1 - 5, 6; 2 - 6, 8; 3 - 14).

на расстоянии 5 мм от закрытого конца зонда. Зонды устанавливались на расстоянии 4 см от выхода плазмотрона и 2 см от поверхности обрабатываемой подложки. Расстояние между зондами составляло 4 см. Ось симметрии зондов совпадала с осью симметрии СВЧ плазмотрона. На рис. 1 приведены экспериментальные зависимости температуры и концентрации электронов от градиента магнитного поля для давления воздуха 0.1 Па и СВЧ мощности 375 Вт. Знак градиента индукции магнитного поля  $B$  указывает направление ее возрастания относительно направления распространения в реакторе СВЧ мощности. При положительном  $\text{grad } B$  эти направления противоположны.

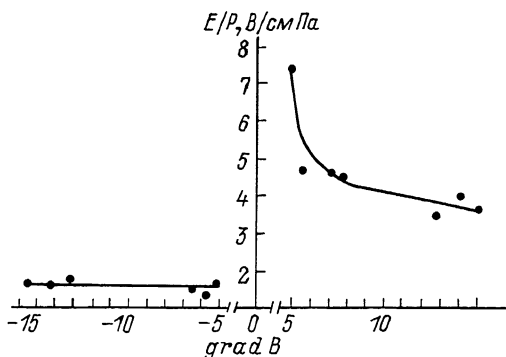


Рис. 3. Значения приведенного поля в СВЧ разряде в зависимости от  $\text{grad } B$  ( $W = 375$  Вт,  $P = 0.1$  Па).

Установлено, что при  $\text{grad } B > 0$  эффективность поглощения СВЧ мощности и температура электронов выше, а их концентрация ниже, чем в случаях с  $\text{grad } B < 0$  и обычной пробочной конфигурацией.

Аномальный характер эффективности поглощения СВЧ мощности и температуры электронов при  $\text{grad } B > 0$  может быть связан с дополнительным механизмом бесстолкновительного поглощения СВЧ мощности вследствие линейной трансформации падающей волны в медленную плазменную волну с последующим эффективным затуханием последней [5]. Эффективность линейной трансформации зависит от концентрации  $n$ , градиента концентрации  $n$ , угла  $\theta$  между  $\text{grad } n$  и направлением силовых линий магнитного поля. Можно ожидать, что при  $\text{grad } B > 0$  (в отличие от случая  $\text{grad } B < 0$ ) область плазмы, в которой показатель преломления для холодной плазмы обращается в бесконечность, приближается к торцевой стенке кварцевого баллона реактора, за которой плазма отсутствует. При этом увеличивается градиент концентрации  $n$ , от которого и зависит эффективность трансформации волн. Напротив, при  $\text{grad } B < 0$  улучшается однородность плазмы по длине реактора и возрастает „барьерное“ ослабление, обусловленное существованием области между внешней границей слоя и точкой трансформации волн — эффективность поглощения СВЧ мощности и температура электронов уменьшается по сравнению с  $\text{grad } B > 0$ .

Из рис. 2, на котором приведены экспериментальные функции распределения электронов по энергиям с различными значениями  $\text{grad } B$ , можно видеть, что при  $\text{grad } B > 0$  с большей эффективностью поглощения СВЧ мощности имеется возможность получения групп „быстрых“ электронов, энергия которых может меняться в пределах до 100 эВ.

Наличие групп „быстрых“ электронов и большая средняя их энергия при положительном  $\text{grad } B$  коррелирует с более высоким приведенным электрическим полем в плазме, которое также существенно зависит от неоднородности внешнего магнитного поля (рис. 3)

и свидетельствует о возможности управления функцией распределения электронов по энергиям в плазме СВЧ газового разряда.

Таким образом, изменением величины и конфигурации внешнего магнитного поля может обеспечиваться управление параметрами электронной компоненты плазмы СВЧ газового разряда. В частности, изменением градиента неоднородного магнитного поля можно регулировать эффективность поглощения СВЧ мощности, большую плотность плазмы получать при меньшей средней энергии электронов и наоборот. Представляется возможным получение неравновесных функций распределения с регулируемым положением на оси энергии групп "быстрых" электронов. Такая локализация энергии способствует выделению определенных каналов преимущественного поглощения СВЧ мощности, управлению химическим составом плазмы и селективностью процессов обработки многослойных тонкопленочных структур микроэлектроники.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Д а н и л и н Б.С., К и р е е в В.Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов М.: Энергоатомиздат. 1987. 264 с.
- [2] Г у л я е в Ю.В., Я ф а р о в Р.К. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 24. С. 2211-2214.
- [3] Г у л я е в Ю.В., Я ф а р о в Р.К. // Письма в ЖТФ, 1989. Т. 15. Вып. 1, С. 74-78.
- [4] К о з л о в О.В. Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969. 219 с.
- [5] Г о л а н т В.Е., П и л и я А.Д. // УФН. 1971. Т. 104. С. 413-457.

Институт радиотехники  
и электроники АН СССР  
Саратовский филиал

Поступило в Редакцию  
18 июля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 19

12 октября 1989 г.

04; 07

#### ПЕРЕХОД ДИФFUЗНОГО НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА В КОНТРАГИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РЕЗОНАНСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

М.Г. К а с п а р о в, А.В. М о х о в,  
А.П. Н е ф е д о в

Для выяснения природы контракции несамостоятельного разряда представляет интерес влияние внешнего возмущения на устойчивость разряда. Для этих целей применялись вспомогательные разряды [1], лазерный пробой [2]. Однако возмущения, вызванные таким образом, приводят к ряду последствий (разогрев газа, удар-