

МЕХАНИЗМ ПОГЛОЩЕНИЯ МОЩНОСТИ ПРИ СВЧ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ СТРУКТУР МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Ю.В. Гуляев, Р.К. Яфаров

За последнее десятилетие наметилось последовательное осуществление и применение устройств высоковакуумной плазменной обработки твердых тел в СВЧ-электромагнитном и магнитном полях (так называемой микроволновой плазме). Одной из первых областей широкого применения этого метода стало травление в субмикронной технологии электроники. Его преимущества выразились в уменьшении подтравов и увеличении эффективности защитных масок в связи с более направленными потоками химически активных частиц при их меньшей кинетической энергии.

В настоящей работе рассматривается механизм поглощения в волноводной плазме низкого давления установки СВЧ вакуумно-плазменного травления (ВПТ) электромагнитных волн с частотой, близкой к частоте электронного циклотронного резонанса.

В разработанной установке СВЧ ВПТ (рис. 1) через цилиндрический реактор со скоростью U_2 производится прокачка плазмообразующего химически активного газа (хладон 12, 14, CCl_4 и др.), который под влиянием СВЧ электромагнитных волн с правосторонним вращением плоскости поляризации вдоль магнитного поля, направленного по оси реактора, порождает плазму СВЧ газового разряда. Волновод рассчитан на распространение волны H_{11} . Величину и конфигурацию магнитного поля можно изменять с помощью токов в четырех секциях электромагнита. Подача газа в реактор осуществляется электронным регулятором расхода газа. Регулирование скорости откачки вакуумного агрегата осуществляется путем изменения сечения откачки затвором. Контроль падающей и отраженной СВЧ мощности производится ваттметрами с помощью направленных ответвителей с ослаблением 40 дБ. СВЧ источник работает на частоте 2,375 ГГц и обеспечивает плавную регулировку мощности от 0 до 2,5 кВт. Диапазон изменения магнитного поля (0–1300) Гс.

В области ЭЦР на условия распространения правовращающихся волн существенно влияет поглощение, связанное со столкновениями электронов с тяжелыми частицами, или циклотронное поглощение. Наиболее эффективное поглощение волн при ЭЦР происходит при условии $\nu / \omega \approx 1$ [1]. Однако эксперименты на установке СВЧ ВПТ показали, что возбуждение и поддержание плазмы СВЧ газового разряда во внешнем магнитном поле возможно при давлениях до $5 \cdot 10^{-3}$ Па и менее. При таких давлениях частота столкновений становится много меньше частоты электромагнитного поля ($\nu / \omega \ll 1$), и обычное столкновительное поглощение может стать не существенным.

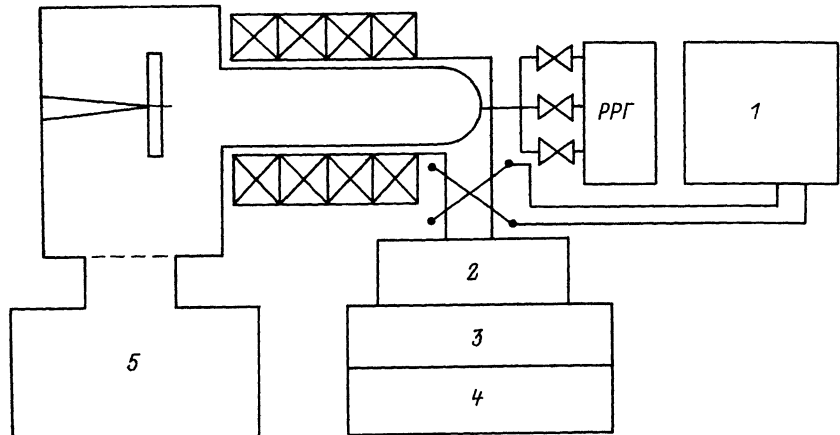


Рис. 1. Схема установки СВЧ ВПТ.

1 - контроль параметров СВЧ-системы, 2 - источник СВЧ, 3 - блок управления источником СВЧ, 4 - блок управления магнитом, 5 - система откачки.

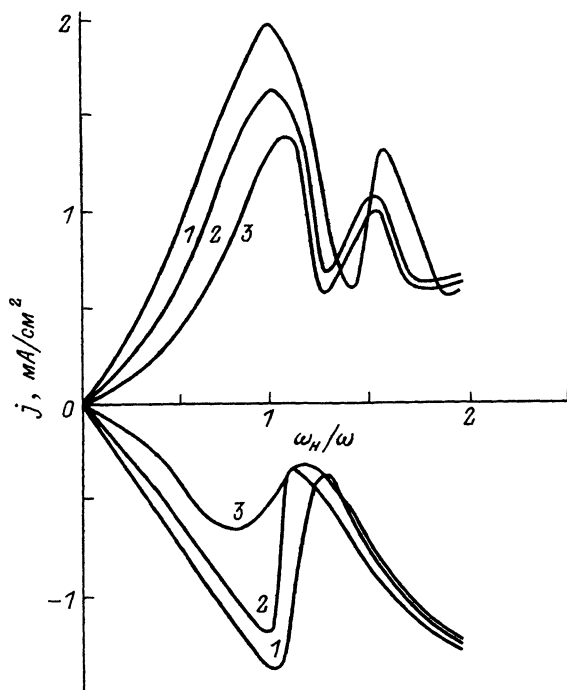


Рис. 2. Зависимости плотностей ионного и электронного токов ($U_{ВМТ} = +100$ В) от ω_H/ω с пробочным отношением 1,2; $P = 2,5 \cdot 10^{-2}$ Па и различных СВЧ мощностях: 1 - 450 Вт, 2 - 350 Вт, 3 - 300 Вт.

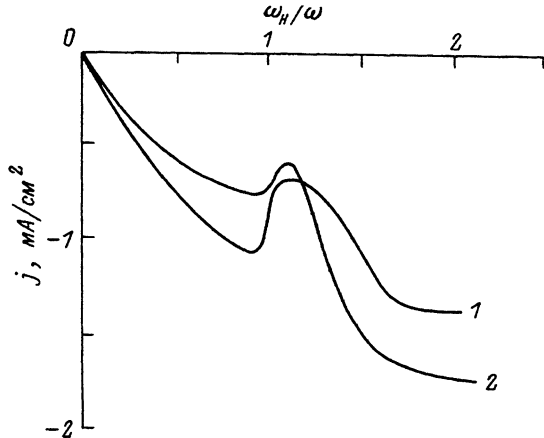


Рис. 3. Зависимости электронного тока ($U_{\text{выт}} = 100$ В) от ω_H / ω для СВЧ мощности 400 Вт, $P = 2.5 \cdot 10^{-2}$ Па и различных величинах расхода газа: 1 - $1.0 \cdot 10^{-2}$; 2 - 1.0 см³/с.

На рис. 2 приведены зависимости плотностей ионного и электронного токов, извлекаемых из реактора установки СВЧ ВПТ ($U_{\text{выт}} = \pm 100$ В) от ω_H / ω при давлении воздуха в реакторе $2.5 \cdot 10^{-2}$ Па и постоянной скорости прокачки для различных значений СВЧ мощности. Можно видеть „зазоры“, которые разделяют каждую из зависимостей как бы на два максимума и нарушают симметричность кривых относительно точки ЭЦР ($\omega_H / \omega = 1$). Причем с увеличением СВЧ мощности (концентрация заряженных частиц) смещение максимумов поглощения мощности (плотности токов) в сторону меньших отношений ω_H / ω увеличивается. Более того, при давлениях меньше $5 \cdot 10^{-3}$ Па наблюдались для каждой мощности верхние и нижние критические значения магнитных полей относительно точки ЭЦР, за пределами которых существование плазмы прекращалось. С увеличением СВЧ мощности области магнитных полей, в пределах которых плазма существовала, расширялись.

При исследовании влияния на поглощение СВЧ мощности различных конфигураций магнитного поля установлено, что наиболее интересной представляется та из них, в которой градиенты магнитного поля совпадают с направлением распространения электромагнитных волн. В этом случае КСВ и плотности токов имеют оптимумы в зависимости от градиента магнитного поля. Причем плотности токов больше, чем в магнитном поле пробочной конфигурации с ЭЦР.

На рис. 3 приведены зависимости электронного тока от ω_H / ω при различных скоростях прокачки и одинаковом давлении $2.5 \cdot 10^{-2}$ Па. На обеих зависимостях видны области, в которых монотонность увеличения токов с возрастанием магнитного поля нарушается. Ширина этих областей, а также величина относительного изменения токов в этих областях тем больше, чем меньше скорость прокачки.

Описанные закономерности наблюдаются тем отчетливее, чем меньше концентрация электронов и частота столкновений их с нейтральными атомами и молекулами. Они не могут быть объяснены на основании обычной теории циклотронного поглощения [1] и, по всей вероятности, являются следствием функционирования при СВЧ ВПТ механизма бесстолкновительного поглощения СВЧ энергии, одним из которых является механизм поглощения Ландау [2].

Для механизма Ландау характерно существование полос трансформации волн, ширина „зазора“ между которыми зависит от угла между градиентами концентрации и магнитным полем. При СВЧ ВПТ концентрация электронов по сечению цилиндрического реактора описывается бесселевой функцией нулевого порядка. В отсутствие прокачки газа продольный градиент концентрации электронов отсутствует. Поэтому угол α близок к $\pi/2$ и величина „зазора“ должна быть максимальной. С увеличением расхода газа за счет выноса электронов из реактора появляется продольная составляющая градиента концентрации электронов. В результате этого угол α и ширина зазора, в котором трансформация волн невозможна, уменьшаются. Таким образом, экспериментально наблюдаемое уменьшение ширины зазора между участками монотонного возрастания тока от ω_4 / ω с увеличением расхода газа (на рис. 3) является экспериментальным подтверждением существования при СВЧ ВПТ механизма бесстолкновительного поглощения СВЧ мощности (затухания Ландау). Это обеспечивает возможность выбора новых режимов эффективного использования СВЧ мощности (путем создания неоднородной плазмы), повышения эффективности процесса СВЧ ВПТ и продвижения условий его реализации в области более высоковакуумные ($\leq 10^{-3}$ Па) и атомно „чистые“ с целью проведения прецизионной обработки изделий микроэлектроники, удовлетворяющей самым высоким технологическим требованиям.

Л и т е р а т у р а

- [1] Мак-Доналд А. Сверхвысокочастотный пробой в газах. М.: Мир, 1969. 212 с.
[2] Гопант В.Е., Пилия А.Д. Линейная трансформация и поглощение волн в плазме. - УФН, 1971, т. 104, с. 413-457.

Институт радиотехники
и электроники АН СССР
Саратовский филиал

Поступило в Редакцию
22 июля 1988 г.
В окончательной редакции
10 ноября 1988 г.