

УДК 621.387.143.+537.52

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ СВЧ-РАЗРЯДА НИЗКОГО ВАКУУМА В ПЛАЗМОТРОНЕ РЕЗОНАТОРНОГО ТИПА

С.И. МАДВЕЙКО, С.В. БОРДУСОВ, М.С. ЛУШАКОВА

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 28 июля 2015

Проведена оценка эффективности использования объемных СВЧ-резонаторов для создания плазмы большого объема (более 4000 см³) низкого вакуума для целей групповой обработки изделий в технологии микроэлектроники. Результаты показали, что в резонаторной системе величина пробивной напряженности электрического поля порядка $E_0 \approx 110$ В/см для низкого вакуума может достигаться уже при СВЧ-мощностях свыше 50 Вт. Применительно к условиям возбуждения и поддержания СВЧ-плазмы технологического назначения проведен анализ условий сохранения резонатором резонирующих свойств при возбуждении в нем плазмы объемом около 9000 см³ и помещении в СВЧ-разряд разного количества кремниевых пластин. Результаты расчетов показывают, что изменение добротности объемного резонатора, обусловленной частичным заполнением его полупроводниковыми пластинами, приводит к уменьшению общей добротности нагруженного резонатора до 2,5 раз. При этом, к примеру, для возбуждения СВЧ-разряда при общей добротности нагруженного резонатора $Q \approx 200$ величина $E_0 \approx 110$ В/см обеспечивается использованием СВЧ-магнетрона среднего уровня мощности ($P_{\text{возд}} \approx 650$ Вт).

Ключевые слова: СВЧ-разряд, плазма, резонатор, волновод.

Введение

К настоящему времени в научно-технической литературе накоплен значительный экспериментальный материал, касающийся особенностей механизмов возбуждения СВЧ-разряда низкого вакуума [1–3], имеющего определенные технологические и технические преимущества перед ВЧ, НЧ и разрядами постоянного тока.

В современном производстве особое внимание уделяется проблемам энергоресурсосбережения при сохранении тенденции на увеличение производительности оборудования и сокращение длительности процессов обработки материалов. Поэтому применение плазмы большого объема (более 4000 см³) низкого вакуума имеет преимущества перед плазменными объемами небольших размеров, которые заключаются в возможности групповой обработки объектов микроэлектроники и управляемой обработке пластин больших размеров (диаметром 200 и 300 мм). В связи с этим анализ способов возбуждения и поддержания СВЧ-разряда в разрядной камере, линейные размеры сторон которой превышают длину электромагнитной волны СВЧ-диапазона, представляет как научный, так и практический интерес и значимость.

Теоретический анализ

Для возбуждения плазмы в ограниченном пространстве нужно сконцентрировать СВЧ-энергию до уровня напряженности электрической составляющей электромагнитного поля $E_{\text{проб}}$, близкого к пробойному (для разрядов низкого вакуума (порядка 67 Па), величина $E_{\text{проб}}$ составляет 80–300 В/см [2, 4]).

Проведем сравнительную оценку величины электрической составляющей электромагнитного поля для режима стоячей волны в СВЧ-аппликаторе нерезонаторного типа (волноводная конструкция (рис. 1, а)) и аппликаторе резонаторного типа (прямоугольный объемный резонатор (ОР) (рис. 1, б)), используемых в конструкциях СВЧ-плазмотронов.

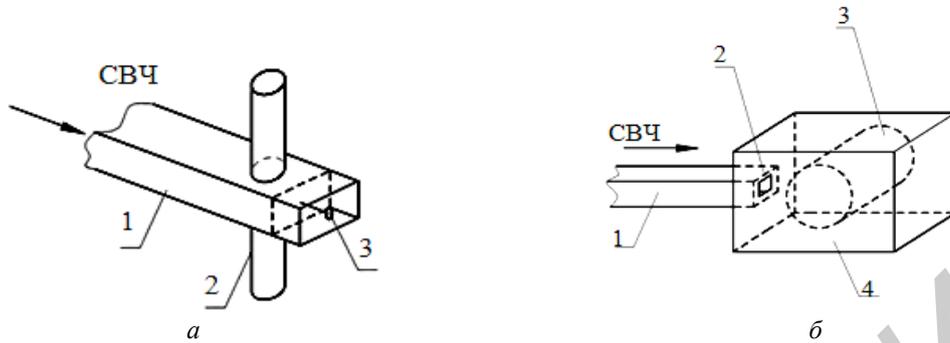


Рис. 1. СВЧ-аппликаторы, используемые в конструкциях СВЧ-плазмотронов:

а: 1 – волновод; 2 – кварцевая труба; 3 – подстроечный поршень;

б: 1 – волновод; 2 – отверстие связи для ввода электромагнитной энергии в резонатор; 3 – кварцевая труба; 4 – прямоугольный резонатор

Для вычисления среднеквадратичной величины пробивной напряженности электрического поля в кварцевой трубке, размещенной в волноводе, как функции пробивной мощности для волны типа TE_{10} , используем уравнение [5]:

$$E_0 = \sqrt{\frac{P_{\text{возд}}}{0,662 \cdot 10^{-3} ab \left(\frac{\lambda}{\lambda_B}\right)}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{возд}}$ – величина вводимой в резонатор мощности; a, b – ширина длинной и короткой стенок волновода соответственно; λ – длина волны в открытом пространстве; λ_B – длина волны в волноводе.

Длина электромагнитной волны (далее волны) в открытом пространстве вычисляется по формуле [6]:

$$\lambda = \frac{c}{f_p}, \quad (2)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света; $f_p = 2,45$ ГГц – круговая частота электромагнитного поля.

Связь величины длины волны в волноводе λ_B , в открытом пространстве λ , и критическая $f_{\text{кр}}$ определяется следующим выражением [5]:

$$\lambda_B = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{\text{кр}})^2}}. \quad (3)$$

Критическая длина волны определяется из выражения [5]:

$$\lambda_{\text{кр}} = 2 \left(\frac{m^2}{b^2} + \frac{n^2}{a^2} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

где m, n – волновые числа ($m = 1, n = 0$).

Среднеквадратичная напряженность электрического поля E_0 ненагруженного резонатора для того же типа колебаний может быть определена по формуле [7]:

$$E_0 = \sqrt{\frac{Q_0 P_{\text{возд}}}{\omega \cdot \epsilon_0 \cdot V_c}}, \quad (5)$$

где Q_0 – добротность ненагруженного резонатора; $P_{\text{ввод}}$ – величина вводимой в резонатор мощности; ω – частота поля; ϵ_0 – электрическая постоянная вакуума, $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; V_c – объем резонирующей камеры.

Результаты расчетов зависимости напряженностей электрического поля от мощности $P_{\text{ввод}}$ электромагнитной волны в волноводе сечением 45×90 мм² и в объеме резонатора с добротностью $Q \approx 10000$ (усредненная величина добротности [7], характерная для пустого резонатора, используемого в СВЧ нагревательных устройствах), представлены на рис. 2. Например, для получения в волноводе величины напряженности электрического поля 110 В/см необходимо использование СВЧ-генераторов с выходной мощностью СВЧ-энергии около 2000 Вт, когда в резонаторе та же величина напряженности электрического поля E_0 формируется уже при мощностях СВЧ-энергии более 50 Вт. Поскольку электрическое поле, необходимое для пробоя в молекулярном газе, зависит от сорта газа, давления газа, размеров камеры, первоначальной плотности (первичных) электронов, от частоты электромагнитного поля и др., то результаты расчетов величины E_0 применительно к возбуждению СВЧ-плазмы в ограниченном пространстве (рис. 2) носят приближенный характер. Однако полученные расчетные данные дают в полной мере представление о величине СВЧ-энергии, необходимой для возбуждения СВЧ-разряда низкого вакуума.

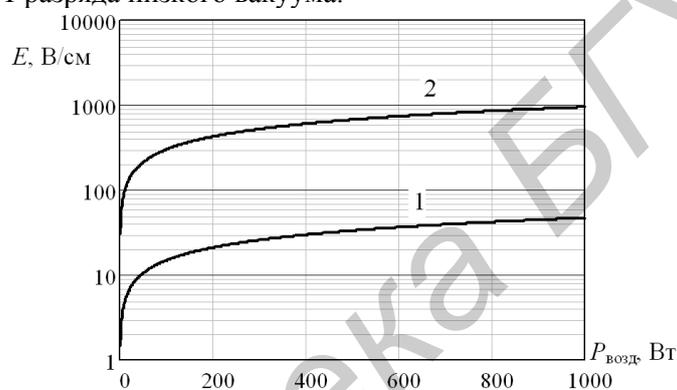


Рис. 2. Расчетные значения среднеквадратичной напряженности электрической составляющей СВЧ электромагнитного поля в диапазоне мощностей в волноводе и резонаторе: 1 – согласованная система нерезонаторного типа (волновод); 2 – резонатор

Анализ представленных на рисунке графиков показывает, что для возбуждения и поддержания СВЧ-разряда большого объема при значительно меньших значениях вводимой в СВЧ-разряд мощности по сравнению с системами волноводного типа целесообразно использовать резонатор. Высокая напряженность электрического поля в резонаторе создается вследствие резонанса волн, возникающего в замкнутом объеме металлического резонатора [6]. Величина пробивной напряженности электрического поля $E_0 = 110$ В/см для низкого вакуума может достигаться уже при мощностях свыше 50 Вт.

При проведении процессов групповой СВЧ плазмохимической обработки материалов микроэлектроники в камеру СВЧ плазмотрона одновременно помещается определенное число полупроводниковых пластин, обладающих высоким значением тангенса угла диэлектрических потерь. В этом случае увеличение объема, занимаемого полупроводниковыми пластинами в реакционно-разрядной камере, может приводить к изменению добротности объемного резонатора [8]. Поэтому применительно к условиям возбуждения и поддержания СВЧ-плазмы технологического назначения, интерес представляет анализ изменения добротности объемного резонатора в зависимости от количества и природы вещества, внесенного в него.

Величина добротности пустого объемного резонатора Q_0 и добротность Q резонатора, заполненного плазмой и объектами обработки в объеме СВЧ-плазмы, характеризует свойства разрядных систем, используемых для формирования технологической СВЧ-плазмы [6, 9].

Проанализируем условия сохранения резонатором резонирующих свойств при условии возбуждения в части его объема плазмы пониженного давления и помещении в разряд кремниевых пластин. Оценка добротности нагруженного ОР применительно к условиям технологического применения имеет приближенный характер, поскольку параметры

низкотемпературной неравновесной плазмы являются нестационарными и оказывают существенное влияние на распределение электромагнитной энергии в ОР.

Полную добротность (нагруженную) Q ОР можно рассматривать как суперпозицию добротностей, связанных с материалом экранирующих стенок, с потерями в среде, заполняющей резонатор, а также обусловленных местами и способами ввода и вывода электромагнитной энергии [10, 11]:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{\text{мет}}} + \frac{1}{Q_{\text{д}}} + \frac{1}{Q_{\Sigma}}, \quad (6)$$

где $Q_{\text{мет}}$ – собственная добротность ОР, обусловленная потерями в стенах; $Q_{\text{д}}$ – добротность, обусловленная диэлектрическим заполнением; Q_{Σ} – добротность, обусловленная связями с внешними устройствами.

Предполагается, что в правильно изготовленном закрытом резонаторе СВЧ-энергия не проникает во внешнюю среду и полностью концентрируется в объеме резонатора, поэтому последнее слагаемое в уравнении (6) близко к 0 и им можно пренебречь.

Тогда добротность нагруженного ОР будет определяться выражением

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{\text{мет}}} + \frac{1}{Q_{\text{д}}}. \quad (7)$$

Проведем оценку добротности ОР призматической формы со сторонами a, b, c , внутри которого расположена цилиндрическая кварцевая труба (реакционно-разрядная камера) диаметром d и длиной h , равной глубине резонатора ($h = c$), в пределах которой формируется СВЧ разряд (рис. 3).

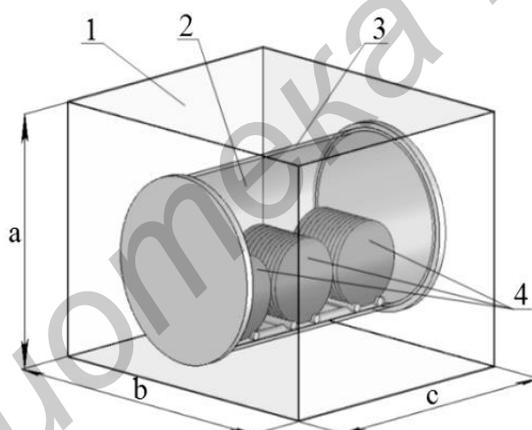


Рис. 3. Схематическое изображение расположения кварцевой трубы с плазмой и кремниевыми пластинами в призматическом резонаторе применительно к расчету добротности нагруженного резонатора: 1 – объемный резонатор; 2 – СВЧ-плазма; 3 – кварцевая труба; 4 – кремниевые пластины

В реакционно-разрядной камере размещены пластины из полупроводникового материала – монокристаллического кремния. Неоднородности внутри ОР, характерные для процесса плазмохимической обработки, будем рассматривать как среды, имеющие свойства диэлектриков с потерями [5, 9].

Кварцевое стекло с тангенсом угла диэлектрических потерь, равным 0,0025–0,0006, из которого изготовлена реакционно-разрядная камера, является практически прозрачным для СВЧ-излучения, поэтому при расчетах не будет учитываться его влияние на результирующую добротность нагруженного резонатора [12]. Исходя из этого выражение, характеризующее полную добротность (нагруженную) Q ОР, может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{\text{мет}}} + \frac{1}{Q_{\text{пл}}} + \frac{1}{Q_{\text{пл}}}, \quad (8)$$

где $Q_{\text{пл}}$ – добротность ОР, частично заполненного плазмой; $Q_{\text{пл}}$ – добротность ОР, обусловленная частичным заполнением полупроводниковыми пластинами.

Полагаем, что ОР работает в многомодовом режиме при одновременном возбуждении нескольких типов колебаний [1, 13]. Структура поля в резонаторе с потерями и без них одинакова [1]. В этом случае собственная добротность прямоугольного ОР (ненагруженного) определяется по формуле [8]:

$$Q_{\text{мет}} = \frac{2}{\delta \cdot \mu} \cdot \frac{V}{S}, \quad (9)$$

где $\delta = \sqrt{c / 2\omega_p \cdot \sigma \cdot \mu_a}$ – глубина проникновения поля в металл; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света; $\omega_p = 2\pi f_p$ – резонансная частота, $f_p = 2,45$ ГГц; σ – удельная проводимость стенок ОР; $\mu = \mu_a / \mu_0$ – относительная магнитная проницаемость материала стенок ОР; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость материала стенок ОР; μ_0 – магнитная постоянная; V – объем ОР; S – площадь поверхности ОР.

Добротность $Q_{\text{пл}}$, обусловленная частичным заполнением объема резонатора плазмой, определяется по формуле [9]:

$$Q_{\text{пл}} = \frac{\varepsilon \omega_p}{4\pi\sigma}. \quad (10)$$

В упрощенном виде при отсутствии поля подмагничивания ($\vec{H}_0 = 0$) эквивалентные параметры плазмы – проводимость и диэлектрическая проницаемость – могут быть определены из следующих формул [9]:

$$\sigma = \frac{e^2 N_e \gamma_{\text{ст}}}{m_e (\omega_p^2 + \gamma_{\text{ст}}^2)}, \quad (11)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{4\pi e^2 N_e}{m_e (\omega_p^2 + \gamma_{\text{ст}}^2)}, \quad (12)$$

где e – заряд электрона; N_e – концентрация электронов; $\gamma_{\text{ст}} = \pi a^2 N_e v_e$ – число столкновений электронов друг с другом; a – некоторый эффективный радиус молекулы; v_e – средняя скорость электрона; m_e – масса электрона.

Добротность $Q_{\text{пл}}$ в случае внесения в ОР полупроводниковых пластин может быть рассчитана по формуле [1]:

$$Q_{\text{пл}} = 2\pi f_p \frac{W}{P_{\text{пл}}}, \quad (13)$$

где W – энергия, запасенная в колебательной системе; $P_{\text{пл}}$ – мощность потерь в полупроводниковых пластинах.

Процесс разогрева пластин при взаимодействии их с СВЧ полем будет происходить аналогично обычному диэлектрическому нагреву. Мощность потерь в этом случае определяется выражением [1]:

$$P_{\text{пл}} = 2\pi f_p E^2 \varepsilon_0 \varepsilon'_{\text{пл}} \text{tg}\delta, \quad (14)$$

где f_p – круговая частота электромагнитного поля; E – напряженность электрического поля; ε_0 – диэлектрическая постоянная; $\varepsilon'_{\text{пл}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость; $\text{tg}\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь (для кремниевых пластин $\text{tg}\delta = 0,15$ [12]).

На рис. 4 представлены расчетные значения зависимости добротности $Q_{\text{пл}}$, обусловленной наличием полупроводниковых пластин в ОР, и общей добротности Q ОР, нагруженного плазмой и кремниевыми пластинами, рассчитанные для волны типа E_{10} , от количества кремниевых пластин диаметром 100 мм и толщиной 0,3 мм, располагаемых в центре ОР.

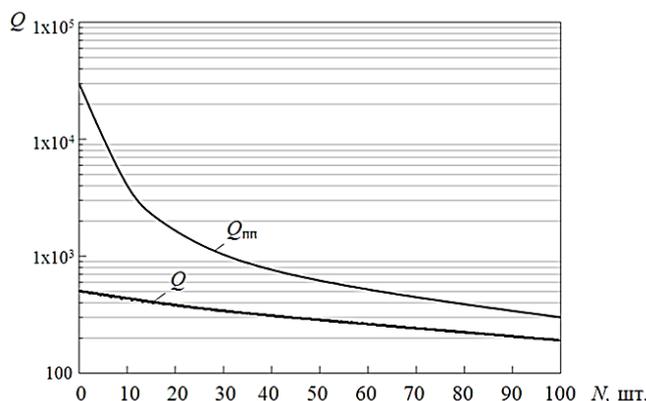


Рис. 4. Зависимость добротности $Q_{\text{П}}$ и общей добротности ОР Q от количества кремниевых пластин в ОР

Результаты расчетов показали, что изменение добротности $Q_{\text{П}}$, обусловленной наличием кремниевых пластин в ОР от 1 до 100 шт., имеющих большое значение тангенса угла диэлектрических потерь, приводит к изменению общей добротности Q нагруженного резонатора с 500 до 200. Используя формулу (5), можно рассчитать, что при использовании в качестве источника электромагнитных колебаний СВЧ-магнетрона среднего уровня мощности М-105 ($P_{\text{возд}} = 650$ Вт), напряженность электрического поля в исследуемом резонаторе при общей его добротности $Q = 200$ составит величину порядка $E = 110$ В/см. Эта величина является близкой к минимальной необходимой для возбуждения СВЧ-разряда в резонаторе [2]. Таким образом, помещение в СВЧ-плазму кремниевых пластин диаметром 100 мм в количестве 100 шт. при определенных условиях плазмообразования (сорт газа, давление, место расположения кремниевых пластин в камере) может привести к нестабильности генерации СВЧ-разряда.

Заключение

Применительно к условиям процесса СВЧ плазмохимической обработки приведенные расчеты носят приближенный характер. В расчетах не учитывалось взаимное расположение кремниевых пластин, в определенных случаях приводящее к перераспределению электромагнитных волн в резонаторе. Также в процессе расчетов не учитывалась площадь поверхности кремниевых пластин, на которой происходит гибель активных частиц. Поэтому для более детального изучения процесса плазмообразования при СВЧ плазмохимической обработке полупроводниковых пластин необходимо проведение экспериментальных исследований электрофизических характеристик плазмы СВЧ разряда.

Научная работа выполнялась при финансовой поддержке в рамках Государственной программы научных исследований «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы», задание № 4.5.02.

ANALYSIS OF LOW VACUUM MICROWAVE DISCHARGE EXCITING CONDITIONS IN RESONATOR TYPE PLASMATRON

S.I. MADVEIKA, S.V. BORDUSAU, M.S. LUSHAKOVA

Abstract

The efficiency of a cavity microwave resonator using for getting large volume (more than 4000 cm^3) low vacuum plasma for group treatment of products in the microelectronics technology has been evaluated. The results showed that the value of electric field breakdown intensity about $E_0 \approx 110$ V/cm in a resonator system for low vacuum can be already achieved at a microwave power higher than 50 W. As far as the conditions of exciting and maintaining the microwave plasma for technological application are concerned, the conditions of preserving resonating properties at exciting plasma with a volume of 9000 cm^3 in resonator and in case of placing a various number of silicon wafers in the microwave discharge have been analyzed. The results of the calculations show that at the

presence of plasma the quality factor of the cavity resonator change caused by its partial loading with semiconductor wafers leads to the decrease of resonator's total quality factor by 2,5 times. In order to excite microwave discharge at total quality factor of loaded resonator $Q \approx 200$, the value $E_0 \approx 110$ V/cm can be provided with using microwave magnetron of medium power level ($P_{gen} \approx 650$ W).

Список литературы

1. *Бордусов С.В.* Плазменные СВЧ технологии в производстве изделий электронной техники: монография / Под ред. А.П. Достанко. Минск, 2002.
2. *Мак-Доналд А.* Сверхвысокочастотный пробой в газах / Под ред. М.С. Рабиновича. М., 1969.
3. *Кудреватова О.В.* // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1987. № 9 (1266). С. 40.
4. *Мик Дж., Крэгс Дж.* Электрический пробой в газах / Под ред. В.С. Комелькова. М., 1960.
5. СВЧ-энергетика. Т. 1: Генерирование. Передача. Выпрямление / Под ред. Э. Окресса. М., 1971.
6. *Ширман Я.Д.* Радиоволноводы и объемные резонаторы. М., 1959.
7. *Potts H., Hugill J.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2000. № 9. P.18–24.
8. *Брандт А.А.* Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М., 1963.
9. *Гинзбург В.Л.* Распространение электромагнитных волн в плазме. М., 1960.
10. *Харвей А.Ф.* Техника сверхвысоких частот / пер. с англ.; под ред. В.И. Сушкевича. М., 1965.
11. *Самойлик С.С., Бондарев В.П.* // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. 2008. № 1. С. 32–37.
12. Свойства элементов: справочник. Часть 1 / Под ред. Г.В. Самсонова. М., 1976.
13. СВЧ-энергетика: в 3 т. Т. 2: Применение энергии сверхвысоких частот в промышленности / Под ред. Э. Окресса. М., 1971.