— ДИАГНОСТИКА —

УДК 47.13.11; 533.9.072; 533.9.082

ИССЛЕДОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПЛАЗМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕЗОНАНСА НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ ЦИКЛОТРОННОЙ ЧАСТОТЫ

© 2024 г. А. В. Ковальчук^{1,*}, С. Ю. Шаповал^{1,**}

¹ Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук, г. Черноголовка *E-mail: anatoly-fizmat@mail.ru **E-mail: shapoval@iptm.ru Поступила в редакцию 22 апреля 2024 г. После доработки 10 июня 2024 г.

Принята к публикации 10 июня 2024 г.

СВЧ плазма (частота генерации 2.45 ГГц, мощность 200–1000 Вт, давление 0.2–10 мТорр) возбуждалась и поддерживалась в двух основных режимах: (1) при непрерывной подаче СВЧ мощности и низких магнитных полях (B = 300-450 Гс) в условиях сверхплотной ($N_e > N_{cr} = 7.4 \times 10^{10}$ см⁻³) плазмы и низкой плотности плазмы ($N_e < N_{cr}$); (2) при высоких магнитных полях (B = 750-1000 Гс), близких к ЭЦР-условию. Исследовались особенности генерации плазмы при условии ЭЦР и при условии резонанса на второй циклотронной гармонике.

Ключевые слова: СВЧ-излучение, ЭЦР-плазма, вторая циклотронная гармоника, КВЧ интерферометрия, плазменный зонд

DOI: 10.31857/S0544126924050013

1. ВВЕДЕНИЕ

СВЧ плазма в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) находит широкое применение в науке и технологии [1, 2]. Особый интерес представляют технологические операции в области микроэлектроники, проведенные с использованием ЭЦР плазмы. Например, внедрение водорода в кремниевые приборы способно сильно модифицировать свойства полупроводниковых структур, в частности увеличить их стойкость к радиационному воздействию [3], или формирование пассивирующего покрытия методом ECR-PECVD оптимизирует характеристики GaN HEMT транзисторов [4]. Это в основном связано с высокой плотностью плазмы 1011-1012 см-3, возбуждаемой при СВЧ мощности 100-200 Вт и низком рабочем давлении 0.2-10 мТорр. Высокая плотность плазмы обуславливается высоким уровнем поглощения СВЧ мощности при ЭЦР-условиях и удержанием плазмы магнитным полем. Типичные магнитные поля в коммерческих реакторах 900-1200 Гс. Для создания таких магнитных полей в резонаторах диаметром 20-25 см требуются две или три больших и мощных магнитных катушек.

Ряд применений требует использование СВЧ плазмы в условиях не только ЭЦР, но и резонанса на второй циклотронной гармонике [5, 6] и импульсной подаче СВЧ мощности [7].

В то же время СВЧ плазма, с плотностями близкими к плотности плазмы при условии ЭЦР, может возбуждаться на ТЕ и ТМ фундаментальных модах при давлениях 0.2–10 мТорр и при магнитных полях B = 400-600 Гс, вдвое меньших поля B_r для условия ЭЦР [8, 9]. Существует практический интерес изучить условия, при которых сверхплотная ($N_e > N_{cr} =$ = 7.4 × 10¹⁰ см⁻³) СВЧ плазма может быть возбуждена при низких магнитных полях B = 100-400 Гс. При $B < B_r/2$ минимизируется неоднородность плотности плазмы по сечению реакционной зоны. Такие СВЧ плазменные источники не требуют громоздких магнитных катушек и могут быть использованы в различных вариантах плазменной технологии.

В настоящей работе мы обсуждаем характеристики СВЧ плазмы, поддерживаемой в условиях ЭЦР и поддерживаемой в нерезонансных объемах при полях B = 100-1000 Гс.

После отработки стационарных режимов, СВЧ плазма применялась для осаждения слоев GaN

и H_xSi_rN_zH_y (молекулярная формула для нитрида кремния введена в публикации [10]).

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Концентрацию электронного газа в объеме СВЧ плазмы мы измеряли путем обработки данных КВЧ (крайне высокие частоты радиоволн, англ. ЕНF extremely-high frequency) интерферометрии. Объем с плазмой СВЧ играл роль активного тела в КВЧ интерферометре. Для этой цели пучок радиоволн с длиной волны (1–10) мм проходил по диаметру плазменного столба. Кварцевые окна использовались для входа и выхода пучка радиоволн. Опорный пучок радиоволн, посредством отражения от зеркал, проходил по волноводу вокруг половины реактора.

Плазменный зонд Ленгмюра применялся для измерения ионного тока насыщения *J*_{ion}.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Излучаемая СВЧ мощность на частоте f = 2.45 ГГц стабильно поддерживалась генератором в интервале $P_f = 50-1000$ Вт. Поток СВЧ-энергии поступал в объем источника (диаметр 15 см, длина



Рис. 1. Схема экспериментальной установки с генерацией плазменного разряда в условиях ЭЦР: f = 2.45 ГГц, $B_r = 875$ Гс. Для управления энергией положительно заряженных ионов к держателю подложки (Si, GaAs или Al₂O₃ пластина) прикладывается ВЧ-напряжение с управляемой амплитудой.

Газовое кольцо используется для организации однородного распределения по поверхности сапфировой подложки потока молекул триметилгаллия и триметилаллюминия в процессе эпитаксиального осаждения слоёв GaN и AlxGa1-xN. 16 см) через СВЧ тракт на основе волноводов с прямоугольным профилем.

Вдали от области ЭЦР и стенок камеры, в плазме $\{e, N_2^+\}$ энергия электронов $kT_e \approx 5 \Rightarrow B$. В любом направлении поток электронов в ≈ 1000 раз превышает поток ионов. Это обусловлено отношением масс $(M_i/m_e \approx 51000)$ и отношением температур $(T_e/T_i \approx 20)$ электронной и ионной компонент нейтральной плазмы. Изолированная подложка, помещенная в область плазмы, получит отрицательный заряд, необходимый для выравнивания потоков электронов и ионов на ее поверхность. Относительно нейтральной плазмы подложка зарядится отрицательным потенциалом. Такой потенциал в физике плазмы называется плавающим потенциалом V_{flo} . В плазме $\{e, N_2^+\}$ величина $V_{flo} \approx -5.155 kTe/e \approx -26B$ [11].

Физическая картина модифицируется, если на подложку относительно стенок камеры подать ВЧ-напряжение, как это показано на рис. 1. Под действием импульса силы от ВЧ-поля смещение облака электронного газа в M_i/m_a раз превышает смещение массива ионов. В каждом периоде колебаний плазмы подложка "окунается в электронное облако". Вблизи поверхности подложки произойдёт поляризация плазмы. В результате такой поляризации слой отрицательного заряда сместится на поверхность подложки, а слой с положительным зарядом будет распределен на некотором расстоянии от ее поверхности. Относительно нейтральной плазмы подложка получает отрицательный потенциал U_b, величина которого зависит от амплитуды ВЧ-напряжения. Положительные ионы в потоке частиц, атакующих поверхность подложки, на прохождении области поляризации плазмы, приобретают энергию равную eU_b . Более детальное описание выпрямляющего действия приэлектродной плазмы на ВЧ поле изложено в книге Ю. П. Райзера [12].

Ввиду высокой степени ионизации (0.001–0.3) в условиях ЭЦР-плазмы обеспечиваются достаточные потоки активных частиц для нанесения на подложку слоевых покрытий [13] при давлениях в камере (0.1–10) \times 10⁻³ Торр.

3. ФОРМИРОВАНИЕ СВЕРХПЛОТНОЙ И РАЗРЕЖЕННОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ МАГНИТ-НЫХ ПОЛЯХ НИЖЕ УСЛОВИЯ ЭЦР

До настоящего времени ведутся работы [14–17], целью которых является оптимизация параметров СВЧ плазмы и создание компактных источников плазменных ионов [18, 19]. Чтобы возбудить СВЧ плазму при низком давлении (< 100 мТорр) в магнитных полях существенно ниже ЭЦР-условия требуется подача высокой мощности СВЧ-накачки до нескольких кВт [20]. Нам удалось обойти это условие разработкой специальной методики возбуждения плазменного разряда при мощностях накачки 300–500 Вт и магнитных полях 0–700 Гс. Плазменный разряд может поддерживаться в двух модах: сверхплотная плазма ($N_e > N_{cr}$) и разреженная плазма ($N_e < N_{cr}$), где $N_{cr} = 7.4 \times 10^{10}$ см⁻³ – критическая плотность плазмы для частоты f = 2.45 ГГц [21]. Разреженная плазма может существовать при СВЧ мощности 200–1000 Вт в любых магнитных полях, даже при B = 0 и малом давлении, например при 0.2 мТорр. В таком случае СВЧ излучение проходит сквозь разреженную плазму, приводя к искажению вольт-амперных характеристик зонда Ленгмюра и нагреву подложкодержателя и, соответственно, подложки [21].

Переход от разреженной плазмы к сверхплотной возможен в том случае, когда поглощенной СВЧ мощности достаточно для возбуждения плазмы с плотностью более N_{cr} [21]. При давлениях менее 1 мТорр частота столкновений электронов с нейтральными частицами мала для обеспечения поглощения СВЧ мощности за счет столкновений. В этом случае для эффективного поглощения СВЧ мощности электронный циклотронный резонанс право поляризованных СВЧ волн.

При магнитных полях ниже ЭЦР-условия, $B < Br = 2\pi fmc/e = 875\Gamma c$, и давлении в разряде 0.1-3 мТорр, переход от разреженной к сверхплотной плазме может быть осуществлен при магнитных полях B = 435-440 Гс около окна ввода СВЧ мощности. Этот переход сопровождается увеличением плотности плазмы N_e , тока насыщения ионного зонда и падением доли СВЧ мощности, проходящей сквозь плазму (P_{tr}). Отраженная мощность обычно тоже падает, но величина этого падения зависит от положения стержней тюнера. Такой переход наблюдался во всем интервале использованных в работе величин прямой СВЧ мощности P_{ref} , давления в камере и настройке тюнера.

Магнитное поле перехода $B_{wv} = 435-440$ Гс соответствует половине магнитного поля циклотронного резонанса $B_r = 875$ Гс и не зависит от плотности плазмы, давления газов и СВЧ мощности. Переход происходит за счет увеличения поглощения СВЧ мощности в условиях резонанса второй циклотронной гармоники [5, 6]. На частоте f = 2.45 ГГц вторая гармоника $\omega_2 = 2\pi f/2 = 7.70 \times 10^9 \text{c}^{-1}$. Магнитное поле $B_2 = 438$ Гс, соответствующее резонансу второй гармоники, прекрасно совпадает с величиной переходного магнитного поля $B_{wv} = 435-440$ Гс.

С целью генерации однородной плотности плазмы по сечению газового потока распределение магнитного поля было установлено так, как показано на рис. 2.

Подбором расстояния между катушками и величин токов через них величина магнитного поля на срезе окна энерговвода была установлена 925 Гс. ЭЦР условие *B_r* = 875 Гс обеспечивалось на отрезке не менее четверти длины волны СВЧ излучения. При таких условиях устойчиво генерируется однородная мода плазмы [22]. В ходе исследований определялась зависимость тока насыщения зонда от напряженности магнитного поля. *При перестройке*

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 53 № 5 2024



Рис. 2. Распределение магнитного поля на оси реактора в зависимости от расстояния до среза окна энерговвода. В экспериментах для обеспечения формирования однородной моды плазмы использовалась область Z = [5, 6] см.

магнитного поля токи катушек изменялись пропорционально, чтобы сохранить неизменным относительное распределение напряженности поля в объеме плазмы. Величина отраженной СВЧ мощности поддерживалась автоматическим тюнером на уровне 50 Вт.

Зависимость тока насыщения J_{ion} зонда Ленгмюра на оси камеры от напряженности магнитного поля показана на рис. З при давлении азота 1 мТорр и поглощаемой СВЧ мощности $P_{abs} = 450$ Вт. При напря-



Рис. 3. Зависимость тока насыщения плазменного зонда от величины магнитного поля в интервале «полки» (см. рис. 2). $P_f = 500$ Br, $P_{ref} = 50$ Br, давление азота 1 мТорр. При перестройке магнитного поля для определения зависимости тока насыщения зонда от магнитного поля токи катушек изменялись пропорционально, чтобы сохранить распределение напряженности поля. Величина отраженной мощности P_{ref} поддерживалась автоматическим тюнером на уровне 50 Br.

женностях магнитного поля $B_1 = B_r = 875$ Гс и $B_2 = B_r/2 \approx 438$ Гс ток J_{ion} проходит через максимумы. Величины этих максимумов зависят от давления газа и СВЧ мощности. Максимум при поле B_1 соответствует ЭЦР, а максимум при поле B_2 соответствует резонансу на второй циклотронной гармонике.

358

Уменьшение плотности плазмы при магнитном поле 500—800 Гс сопровождается увеличением протечки СВЧ излучения сквозь плазму, хотя отраженная мощность остается постоянной. Протечка СВЧ излучения сквозь плазму приводит к уменьшению поглощенной мощности P_{abs} и соответственному уменьшению плотности плазмы. Протечка СВЧ излучения сквозь плазму в этих условиях может быть объяснена следующим образом. Когда магнитное поле в области поглощения СВЧ энергии около окна энерговвода приближается к ЭЦР-условию (875 Гс), толщина эванесцентной зоны около окна ($N_e > N_{cr}$) уменьшается, что позволяет некоторым порциям лево и право поляризованным волнам проходить сквозь эванесцентную зону и распространяться без поглощения [23, 24].

Зависимости тока насыщения зонда J_{ion} от поглощенной СВЧ мощности $P_{abs} = (P_f - P_{ref})$ показаны на рис. 4.



Рис. 4. Зависимости ионного тока насыщения зонда J_{ion} от поглощенной СВЧ мощности $P_{abs} = (P_f - P_{ref})$ в плазме N₂. Давление азота p = 1 мТорр.

Можно заметить, что J_{ion} увеличивается практически линейно с ростом поглощенной мощности P_{abs} . Это означает, что в сверхплотной плазме CBЧ излучение не проходит сквозь плазму и вся энергия поглощается плазмой.

При магнитных полях В < 800 Гс сверхплотная СВЧ плазма может поддерживаться вплоть до давления $p_{tr} = 0.7$ мТорр (рис. 5). При давлении ниже p_{tr} плотность плазмы резко уменьшается и при давлении 0.2 мТорр (p_{ext}) плазма гаснет. Это сопровождается прохождением СВЧ излучения в объем плазмохимической установки.



Рис. 5. Зависимость тока насыщения плазменного зонда J_{ion} от давления азота в реакторе. Падающая мощность $P_f = 500$ Вт. Отраженная мощность $P_{ref} = 50$ Вт. Магнитное поле на оси реактора $B = B_r/2 = 438$ Гс.

Переходное значение давления p_{tr} вероятно связано с критической плотностью плазмы $N_{cr} = 7.4 \times 10^{10}$ см⁻³ для частоты 2.45 ГГц. Для иллюстрации на рис. 6 приведена зависимость плотности плазмы N_e от давления в реакторе. Измерения N_e проводились методом КВЧ интерферометрии [25]. Плотность $N_{cut-off}$ плазмы отсечки [23, 24, 26] для право поляризованных волн: $N_{cut-off}$ · $R = N_{cr}(1-/B_r)$. Для лево поляризованных волн: $N_{cut-off}$ · $L = N_{cr}(1+B/B_r)$. При резонансном магнитном поле $B = B_r$ плотность плазмы отсечки $N_{cut-off}$ ·L достигает величины $2N_{cr} = 1.48 \times 10^{11}$ см⁻³. При давлении 2 мТорр экспериментально измеряемая плотность плазмы достигает значения $N_{cut-off} = 2N_{cr}$ и далее продолжает увеличиваться с ростом давления вплоть до 7 мТорр, затем начинает постепенно уменьшаться.



Рис. 6. Зависимость плотности плазмы от давления азота в реакторе. Падающая мощность $P_f = 500$ Вт. Отраженная мощность $P_{ref} = 50$ Вт, Магнитное поле на оси реактора $B = B_r = 875$ Гс. Концентрация электронного газа вычислялась из данных КВЧ интерферометрии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ особенностей СВЧ плазмы при магнитных полях, напряженность которых ниже напряженности поля ($B_r = 875$ Гс) необходимого для условия ЭЦР и при магнитных полях, напряженность которых близка к ЭЦР условию.

Установлено, что в нерезонансном объеме при напряженностях магнитного поля ниже условия ЭПЬ могут возбужлаться и поллерживаться лва вида плазмы: низкой плотности ($N_e < N_{cr}$), сопровождающейся протечками СВЧ излучения сквозь разряд, и сверхплотной ($N_e > N_{cr}$). Для давлений в реакторе р > 1 мТорр и СВЧ мощности Pabs > 200 Вт сверхплотная плазма может поддерживаться при напряженностях магнитного поля около окна СВЧ ввода равных 75-800 Гс.

Переход от разреженной к сверхплотной плазме происходит при напряженностях магнитного поля около окна СВЧ ввода равных 430-440 Гс. Мы предполагаем, что этот переход связан с реализацией условия ($B = B_r/2 = 438$ Гс) резонанса на второй циклотронной гармонике.

Понимание процессов формирования плазмы при воздействии магнитного поля и СВЧ-излучения на газовую среду дает возможность организации стабильных, воспроизводимых технологических операций, удовлетворяющих требованиям микроэлектроники и других наукоемких областей технологии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИПТМ РАН № 075-00296-24-01.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Celona L., Gammino S., Ciavola G., Maimone F., Mascali D. Microwave to plasma coupling in electron cyclotron resonance and microwave ion sources (invited). Rev. Sc. Instrum., 81 (2), 02A333 (2010). DOI: 10.1063/1.3265366
- Shapoval S., Bulkin P., Chumakov A., Khudobin S., 2. Maximov I., Mikhailov G. Compact ECR-source of ions and radicals for semiconductor surface treatment. Vacuum, 43 (3), 195 (1992). https://doi.org/10.1016/0042-207X(92)90260-4

- Polushkin E.A., Nefed'ev S.V., Koval'chuk A.V. et al. 3 Hydrogen Plasma under Conditions of Electron-Cyclotron Resonance in Microelectronics Technology. Russ Microelectron 52, 195-197 (2023). https://doi.org/10.1134/S1063739723700373
- Shapoval S., Gurtovoi V., Kovalchuk A., Lester F.E., Vertjachih A., Gaquiere C., Theron D. "Improvement of 4.

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 53 Nº 5 2024 conductivity and breakdown characteristics of AlGaN/ GaN HEMT structures in passivation experiments" Proc. SPIE 5023, 10th International Symposium on Nanostructures: Physics and Technology, (11 June 2003). https://doi.org/10.1117/12.511539

Datlov J., Teichmann J., Zacek F. Regimes of plasma 5. acceleration by inhomogenous high frequency and magnetostatic field in a cavity resonator. Phys. Letters, 17 (1), 30 (1965).

https://doi.org/10.1016/0031-9163(65)90634-7

- Celona L., Gammino S., Maimone F., Mascali D., Gambino 6. N. . Miracoli R., and Ciavola G. Observations of resonant modes formation in microwave generated magnetized plasmas. Eur. Phys. J. D, 61(1), 107 (2011). https://doi.org/10.1140/-epid/e2010-00244-y
- 7. Skalvga V.A., Golubev S.V., Izotov I.V., Lapin R.L., Razin S.V., Sidorov A.V., and Shaposhnikov R. A. High-current pulsed ECR ion sources. Prikl. Fiz., 1, 17 (2019). https:// applphys.orion-ir.ru/appl-19/19-1/PF-19-1-17.pdf
- 8. Tulle P.A. Off-resonance microwave-created plasmas. Plasma Phys., 15 (10), 971 (1973). DOI: 10.1088/0032-1028/15/10/003
- 9. Morito M., and Ken'ichi O. Ion extraction from microwave plasma excited by ordinary and extraordinary waves and applications to the sputtering deposition. J. Vac. Sci. Technol. A, 9, 691 (1991). https://doi.org/10.1116/1.577345
- 10. Kovalchuk A., Beshkov G., Shapoval S. Dehydrogenation of Low-Temperature ECR-Plasma Silicon Nitride Films under Rapid Thermal Annealing. J. Res. Phys., 31 (1), 37-46 (2007). https://www.researchgate.net/ publication/277125029_Dehydrogenation_of_lowtemperature ECR-plasma silicon nitride- films under rapid thermal annealing
- 11. Райзер Ю.П. Физика газового разряда, Глава 8, § 5, пункт 5.3., 199 («Наука», Физматлит 1992) ISBN: 5-02-014615-3. https://studizba.com/files/show/djvu/2107-1rayzer-yu-p--fizika-gazovogo-razryada.html (in Russian)
- 12. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Глава 15. § 4. пункт 4.3., 479 («Наука», Физматлит 1992) ISBN: 5-02-014615-3. https://studizba.com/files/show/djvu/2107-1ray-zer-yu-p--fizika-gazovogo-razryada.html (in Russian)
- 13. Shapoval S.Y., Petrashov V.T., Popov O.A, Yoder M.D., Maciel P.D., and Lok C.K.C. Electron cyclotron resonance plasma chemical vapor deposition of large area uniform silicon nitride films. J. Vac. Sci. Technol. A, 9 (6), 3071 (1991). DOI: 10.1116/1.577175
- 14. Salahshoor M., Aslaninejad M. Resonance surface, microwave power absorption, and plasma density distribution in an electron cyclotron resonance ion source. Phys. Rev. Accel. Beams, 22 (4), 043402 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.22.043402
- 15. Roychowdhury P., Mishra L., Kewlani H., Gharat S. Hydrogen Plasma Characterization at Low Pressure in 2.45 GHz Electron Cyclotron Resonance Proton Ion Source. IEEE Transactions on Plasma Science, 45 (4), 665 (2017).
 - DOI: 10.1109/TPS.2017.2679758
- 16. Gallo C.S., Galata A., Mascali D., Torrisi G. A possible optimization of electron cyclotron resonance ion sources plasma chambers. 23th Int. Workshop on ECR Ion Sources, 67 (Catania, Italy, ECRIS 2018). https://accelconf.web.cern.ch/ecris2018/papers/tub3.pdf

- 17. *Qian Y. Jin, Yu G. Liu, Yang Z., Qi Wu, Yao J. Zhai and Liang T. Sun.* RF and Microwave Ion Sources Study at Institute of Modern Physics. Plasma, 4 (2), 332 (2021). https://doi.org/10.3390/plasma4020022
- Mauro G.S., Torrisi G., Leonardi O., Pidatella A., Sorbello G., and Mascali D. Design and Analysis of Slotted Waveguide Antenna Radiating in a "Plasma-Shaped" Cavity of an ECR Ion Source. MDPI Telecom, 2 (1), 42 (2021). https://doi.org/10.3390/telecom-2010004
- Tsybin O.Yu., Makarov S.B., Dyubo D.B., Kuleshov Yu.V., Goncharov P.S., Martynov V.V., Shunevich N.A. An electrically powered ion accelerator with contact ionization for perspective electrically powered thrusters. St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics, 13 (2), 99 (2020). https://physmath.spbstu.ru/en/article/2020.48.08/
- Lax B., Allis W.P. and Brown S.C. The effect of magnetic field on the breakdown of gases at microwave frequencies. J. Appl. Phys., 21, 1297 (1950). DOI: 10.1063/1.1699594
- Popov O.A. Characteristics of electron cyclotron resonance plasma sources. J. Vac. Sci. Technol. A, 7 (3), 894 (1989). https://doi.org/10.1116/1.575816
- 22. Shapoval S.Y., Petrashov V.T., Popov O.A., Yoder M.D.Jr., Maciel P.D., and Lok C.K.C. Electron cyclotron resonance

plasma chemical vapor deposition of large area uniform silicon nitride films. J. Vac. Sci. Technol. A, 9(6), 3071 (1991). https://doi.org/10.1116/1.577175

- 23. Ginzburg V.L. The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasmas 2nd ed. (Pergamon Press, Oxford, 1970) ISBN: 0080155693; Russian original:, V. L. Ginzburg. The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasmas 2nd ed. (Nauka, Moscow, 1967). https://www.studmed. ru/ginzburg-vl-rasprostranenie-elektromagnitnyh-volnv-plazme_729023ed3e1.html
- Popov O.A., Shapoval S.Y. and Yoder M.D.Jr. 2.45 GHz microwave plasmas at magnetic fields below ECR. Plasma Sources Sci. Technol., 1 (1), 7 (1992). DOI: 10.1088/0963-0252/1/1/002
- Popov O.A., Shapoval S.Y. and Yoder M.D., and Chumakov A.A. Electron cyclotron resonance plasma source for metalorganic chemical vapor deposition of silicon oxide films. J. Vac. Sci. Technol. A, 12(2), 300 (1994). https://doi.org/10.1116/1.578872
- Stix T.H. The Theory of Plasma Waves (McGraw-Hill, New York, 1962) ASIN: B0006AY0IW. https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=uc1.b3754096&view=1up&seq=9

ELECTRON CYCLOTRON RESONANCE PLASMA STUDIES USING THE SECOND CYCLOTRON HARMONIC RESONANCE

© 2024 A. V. Kovalchuk^{1,*}, S. Y. Shapoval^{1,**}

¹ Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia *E-mail: anatoly-fizmat@mail.ru ** E-mail: shapoval@iptm.ru

Microwave plasma (generation frequency 2.45 GHz, power 200–1000 W, pressure 0.2–10 mTorr) is excited and maintained in two main modes: (1) at continuous microwave power and low magnetic fields (B = 300-450 G) under a superdense ($N_e > N_{cr} = 7.4 \times 10^{10}$ cm⁻³) plasma and low plasma density ($N_e < N_{cr}$); and (2) in high magnetic fields (B = 750-1000 G), close to the ECR condition. The peculiarities of plasma generation under the ECR condition and at the second harmonic of cyclotron resonance are studied.

Keywords: microwave radiation, ECR plasma, second cyclotron harmonic, plasma probe, EHF interferometry

REFERENCES

- Celona L., Gammino S., Ciavola G., Maimone F., Mascali D. Microwave to plasma coupling in electron cyclotron resonance and microwave ion sources (invited) // Rev. Sc. Instrum. 2010. V. 81. No 2. P. 02A333. DOI: 10.1063/1.3265366
- Shapoval S., Bulkin P., Chumakov A., Khudobin S., Maximov I., Mikhailov G. Compact ECR-source of ions and radicals for semiconductor surface treatment // Vacuum. 1992. V. 43. No 3. P. 195. https://doi.org/10.1016/0042-207X(92)90260-4
- 3. *Polushkin E.A., Nefed'ev S.V., Koval'chuk A.V., et al.* Hydrogen Plasma under Conditions of Electron-Cyclotron

Resonance in Microelectronics Technology // Russian Microelectronics. 2023. V. 52. P. 195-197. https://doi.org/10.1134/S1063739723700373

- 4. Shapoval S., Gurtovoi V., Kovalchuk A., Lester Fuess Eastman, Vertjachih A., Christophe Gaquiere, David Theron. Improvement of conductivity and breakdown characteristics of AlGaN/GaN HEMT structures in passivation experiments // Proc. SPIE 5023, 10th International Symposium on Nanostructures: Physics and Technology, 11 June 200. https://doi.org/10.1117/12.511539
- 5. Datlov J., Teichmann J., Zacek F. Regimes of plasma acceleration by inhomogenous high frequency and

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 53 № 5 2024

360

magnetostatic field in a cavity resonator // Phys. Letters. 1965. V. 17. No 1. P. 30. https://doi.org/10.1016/0031-9163(65)90634-7

- Celona L., Gammino S., Maimone F., Mascali D., Gambino N., Miracoli R., and Ciavola G. Observations of resonant modes formation in microwave generated magnetized plasmas // Eur. Phys. J. D. 2011. V. 61. No 1. P. 107. https://doi.org/10.1140/epjd/e2010-00244-y
- Skalyga V.A., Golubev S.V., Izotov I.V., Lapin R.L., Razin S.V., Sidorov A.V., and Shaposhnikov R.A. High-current pulsed ECR ion sources // Prikl. Fiz. 2019. V. 1. P. 17, https://applphys.orion-ir.ru/appl-19/19-1/PF-19-1-17.pdf
- Tulle P.A. Off-resonance microwave-created plasmas // Plasma Phys. 1973. V. 15. No 10. P. 971. DOI: 10.1088/0032-1028/15/10/003
- Morito Matsuoka and Ken'ichi Ono. Ion extraction from microwave plasma excited by ordinary and extraordinary waves and applications to the sputtering deposition // J. Vac. Sci. Technol. A. 1991. V. 9. P. 691. https://doi.org/10.1116/1.577345
- Kovalchuk A., Beshkov G., Shapoval S. Dehydrogenation of Low-Temperature ECR-Plasma Silicon Nitride Films under Rapid Thermal Annealing // J. Res. Phys. 2007.
 V. 31. No 1. P. 37-46, https://www.researchgate.net/ publication/277125029_Dehydrogenation_of_lowtemperature_ECR-plasma_silicon_nitride-films_ under_rapid_thermal_annealing
- Raiser Y.P. Physics of gas discharge. Chapter 8, § 5. Item 5.3. P. 199. "Nauka", Fizmatlit, 1992, ISBN: 5-02-014615-3, https://studizba.com/files/show/djvu/2107-1rayzer-yu-p-fizika-gazovogo-razryada.html (in Russian)
- Raiser Y.P. Physics of gas discharge. Chapter 15, § 4. Item 4.3. P. 479. "Nauka", Fizmatlit, 1992, ISBN: 5-02-014615-3, https://studizba.com/files/show/djvu/2107-1rayzer-yu-p-fizika-gazovogo-razryada.html (in Russian)
- Shapoval S.Y., Petrashov V.T., Popov O.A., Yoder M.D. Jr., Maciel P.D., and Lok C.K.C. Electron cyclotron resonance plasma chemical vapor deposition of large area uniform silicon nitride films // J. Vac. Sci. Technol. A. 1991. V. 9. No 6. P. 3071. DOI: 10.1116/1.577175
- Salahshoor M., Aslaninejad M. Resonance surface, microwave power absorption, and plasma density distribution in an electron cyclotron resonance ion source // Phys. Rev. Accel. Beams. 2019. V. 22. No 4. P. 043402. DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.22.043402
- Pradip Roychowdhury, Love Mishra, Hitesh Kewlani, Surendra Gharat. Hydrogen Plasma Characterization at Low Pressure in 2.45 GHz Electron Cyclotron Resonance Proton Ion Source // IEEE Transactions on Plasma Science. 2017. V. 45. No 4. P. 665. DOI: 10.1109/TPS.2017.2679758
- 16. *Gallo C.S., Galata A., Mascali D., Torrisi G.* A possible optimization of electron cyclotron resonance ion sources

plasma chambers // 23th Int. Workshop on ECR Ion Sources. P. 67. Catania, Italy, ECRIS 2018, https:// accelconf.web.cern.ch/ecris2018/papers/tub3.pdf

- Qian Y. Jin, Yu G. Liu, Yang Zhou, Qi Wu, Yao J. Zhai and Liang T. Sun. RF and Microwave Ion Sources Study at Institute of Modern Physics // Plasma. 2021. V. 4. No 2. P. 332. https://doi.org/10.3390/plasma4020022
- Giorgio Sebastiano Mauro, Giuseppe Torrisi, Ornella Leonardi, Angelo Pidatella, Gino Sorbello, and David Mascali. Design and Analysis of Slotted Waveguide Antenna Radiating in a "Plasma-Shaped" Cavity of an ECR Ion Source // MDPI Telecom. 2021. V. 2. No 1. P. 42. https://doi.org/10.3390/telecom2010004
- Tsybin O.Yu., Makarov S.B., Dyubo D.B., Kuleshov Yu.V., Goncharov P.S., Martynov V.V., Shunevich N.A. An electrically powered ion accelerator with contact ionization for perspective electrically powered thrusters // St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 2020. V. 13. No 2. P. 99, https://physmath.spbstu.ru/en/article/2020.48.08/
- Lax B., Allis W.P., and Brown S.C. The effect of magnetic field on the breakdown of gases at microwave frequencies // J. Appl. Phys. 1950. V. 21. P. 1297. DOI: 10.1063/1.1699594
- Popov O.A. Characteristics of electron cyclotron resonance plasma sources // J. Vac. Sci. Technol. A. 1989. V. 7. No 3. P. 894. https://doi.org/10.1116/1.575816
- 22. Shapoval S.Y., Petrashov V.T., Popov O.A. Yoder M.D. Jr., Maciel P.D., and Lok C.K.C. Electron cyclotron resonance plasma chemical vapor deposition of large area uniform silicon nitride films // J. Vac. Sci. Technol. A. 1991. V. 9. No 6. P. 3071. https://doi.org/10.1116/1.577175
- 23. *Ginzburg V.L.* The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasmas (2nd edn). Pergamon Press, Oxford, 1970, ISBN: 0080155693; Russian original:, V. L. Ginzburg. The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasmas (2nd edn). "Nauka", Moscow, 1967, https://www.studmed. ru/ginzburg-vl-rasprostranenie-elektromagnitnyh-volnv-plazme_729023ed3e1.html
- Popov O.A., Shapoval S.Y. and Yoder M.D.Jr. 2.45 GHz microwave plasmas at magnetic fields below ECR // Plasma Sources Sci. Technol. 1992. V. 1. No 1. P. 7. DOI: 10.1088/0963-0252/1/1/002
- Popov O.A., Shapoval S.Y. and Yoder M.D.Jr., and ChumakovA.A. Electron cyclotron resonance plasma source for metalorganic chemical vapor deposition of silicon oxide films // J. Vac. Sci. Technol. A. 1994. V. 12. No 2. P. 300, https://doi.org/10.1116/1.578872
- Stix T.H. The Theory of Plasma Waves // McGraw-Hill, New York, 1962, ASIN: B0006AY0IW, https://babel. hathitrust.org/cgi/pt?id=uc1.b3754096&view=1up&seq=9