

СПЕКТРЫ ПОЛОСТНОГО МАГНЕТРОНА

А.С. АБРААМЯН*

Институт прикладных проблем физики НАН Армении, Ереван, Армения

*e-mail: abrahamyanaleksan591@gmail.com

(Поступила в редакцию 22 июля 2026 г.)

Экспериментально исследовано излучение в видимом диапазоне из магнетрона с внутренней полостью в форме колокола. Приведены спектры гелиевой акустоплазмы при очень малой величине магнитного поля (<0.05 Тл), т. е. нестандартный режим работы магнетрона. Давление гелия в разрядной камере составляло 10 Па. Для создания акустоплазмы магнетрон питался модулированным током, который содержал постоянную и переменную компоненты. Постоянная компонента разрядного тока равна 100 мА. Глубина модуляции тока M — отношение амплитуды переменной компоненты к величине постоянной компоненты, менялась от нуля до единицы. При увеличении глубины модуляции M от 0 до 0.5 интенсивность спектральных линий возрастает. При $M \approx 1$ интенсивность спектральных линий резко падает. Значительная доля энергии в видимой части спектра сосредоточена в линиях молекулярного гелия, который образуется в разряде. Приведены экспериментально полученные спектры и перестройка спектральной линии в акустоплазменном режиме.

1. Введение

Обычный магнетрон для генерации электромагнитных колебаний СВЧ диапазона изображен на рис.1а. Электрическое поле приложено в плоскости рисунка, магнитное поле — перпендикулярно плоскости рисунка. Электрон, вышедший из катода, в магнитном поле по спирали движется к аноду. Двигаясь мимо резонаторов, электроны передают им свою энергию, накопленную в электрическом поле. Обычно используют цилиндрические или конусообразные формы анодов. В этом случае область между анодом и катодом представляет собой полость. Известна конструкция обращенного магнетрона для генерации

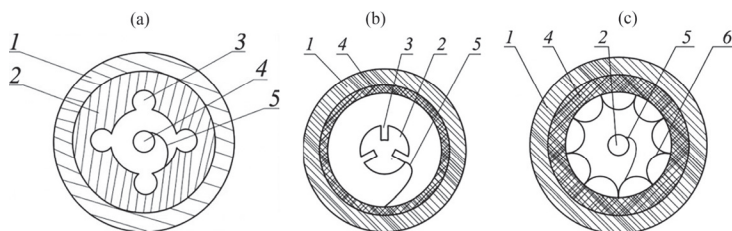


Рис.1. Различные типы магнетронов. (а) обычный магнетрон для генерации электромагнитных колебаний, (б) обращенный магнетрон для генерации электромагнитных колебаний, (с) полостной магнетрон для напыления. 1 — магнит, 2 — анод, 3 — резонатор, 4 — катод, 5 — траектория электрона, который ускоряется в электрическом поле и достигает анода, 6 — траектория быстрых электронов.

электромагнитных колебаний, когда катод расположен по окружности, а в центре находится анод с системой резонаторов (рис.1б) [1, 2].

Для напыления чаще используют планарную конструкцию, когда анодная петля располагается над катодом. Но для напыления также можно использовать магнетрон с полостью (цилиндрической, конусной или иной формы) [3–8].

В Институте прикладных проблем физики Национальной Академии Наук Армении (ИППФ) были разработаны акустоплазменные магнетроны как планарной, так и полостной конструкций [9, 10]. В рамках исследования перспектив и особенностей использования нового прибора – акустоплазменного магнетрона были получены интересные результаты, о которых сообщается ниже.

2. Эксперимент

В случае использования магнетронов для напыления резонаторная система не нужна, поскольку генерация электромагнитного излучения является для процесса напыления паразитной. На рис.1с приведена схема не планарного магнетрона с полостью, который используется для напыления. Это обращенная конструкция магнетрона, без резонаторов у анода. В центре расположен анод, обычно цилиндрический стержень, а вокруг него, на некотором расстоянии расположен катод в виде цилиндра или другой формы. Магнитное поле ортогонально плоскости рисунка, электрическое поле лежит в плоскости рисунка. Распыляется материал катода. В случае использования цилиндрических анода и катода область между анодом и катодом представляет собой полость. Из-за этого магнетрон был назван полостным. В этой полости электроны ионизируют буферный газ и пары материала катода, часть ионов из этой области с большой энергией бомбардируют катод, при этом выбивают из катода новые атомы, электроны и ионы. Часть ионов и нейтральных атомов покидает область анод–катод и осаждается непосредственно на подложку. Часть атомов и ионов образует кластеры, которые также осаждаются на подложку [3–8].

Величина электрического и магнитного полей подбираются таким образом, что быстрые электроны 6, вылетевшие из катода 4, под действием силы Лоренца заворачивают в магнитном поле и снова бомбардируют катод, выбивая новые электроны. Медленные электроны 5 движутся по орбитам с большим радиусом и покидают прикатодную область. Они набирают энергию при движении в электрическом поле анод–катод. Но из-за магнитного поля они движутся по спиральным траекториям и по пути почти всю набранную энергию растрачивают на ионизацию буферного газа и пара материала катода, которые заполняют пространство между катодом и анодом. Если ионы положительные, то поле анода их отталкивает, и они покидают полость магнетрона (выходят из плоскости рисунка). В результате получается эффективный ионный источник распыляемого материала, вылетающего перпендикулярно плоскости рисунка.

В обычном магнетроне для напыления расстояние между анодом и катодом делается малым, практически есть только области катодного и анодного потенциалов. Газовый разряд может существовать при почти полном отсутствии положительного столба [1, 11]. В акустоплазменном магнетроне, разработанном в ИППФ, расстояние между анодом и катодом увеличено так, что обязательно есть положительный столб [9, 10]. При модуляции разрядного тока в нелинейных средах с дисперсией, из-за неустойчивости волны к малым возмущениям, в

положительном столбе возникает модуляционная неустойчивость – спонтанное возникновение и экспоненциальное усиление амплитудной и фазовой модуляции первоначальной гармонической волны [12–15]. Плазма является именно такой средой, и Альпик Мкртчян (Академик НАН РА) назвал плазменную среду с модуляционной неустойчивостью – акустоплазмой [16, 17].

В данном эксперименте исследовался акустоплазменный магнетрон с полостью в форме колокола, его внешний вид приведен на рис.2.



Рис.2. Акустоплазменный магнетрон с полостью в форме колокола. 1 – изолятор, 2 – анод, 3 – вывод анода, 4 – магнитная система, 5 – катод, 6 – керамический корпус.

Внутри колоколообразного керамического корпуса 6 находится колоколообразный катод 5. В центре колокола расположен анод 2 в изолирующей трубке 1. Вокруг керамического корпуса 6 находится магнитная система 4, которая создает магнитное поле необходимой конфигурации. Использовались медный катод и алюминиевый цилиндрический анод с медным покрытием. В качестве буферного газа использовался гелий.

Установка для экспериментов описана в работе [10]. Исследована работа такого магнетрона в режиме питания постоянным током и в акустоплазменном режиме, когда разрядный ток имеет постоянную и переменную компоненты, т. е. модулированный разряд [17]. Глубина модуляции тока M – отношение амплитуды переменной компоненты к величине постоянной компоненты изменялась от нуля до единицы.

Получение акустоплазменного режима возможно и при питании разряда постоянным током из-за пульсаций объемного заряда в промежутке анод–катод при нарушении квазинейтральности.

В данной работе исследовалось излучение в видимой области спектра из такой полости акустоплазменного магнетрона. Излучение из полости магнетрона по световоду передавалось на компьютерный спектрограф. Использовался спектрограф ИСП-51, который был переделан в компьютерный спектрограф с разрешением 0.1–0.2 нм/мм на дисплее компьютера.

3. Результаты эксперимента и обсуждение

На рис.3 представлены интенсивности спектральных линий (в относительных единицах) для питания разряда постоянным током и в акустоплазменном режиме. В качестве буферного газа использовался гелий. Давление в разрядной камере $P_0 = 10$ Па. Величина постоянной компоненты разрядного тока $I_0 =$

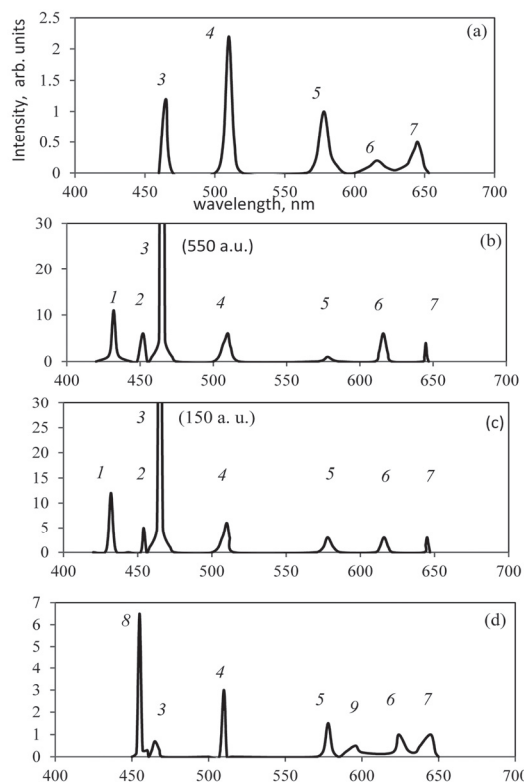


Рис.3. Интенсивности спектральных линий (в относительных единицах). Буферный газ He, $P_0 = 10$ Па, $I_0 = 100$ мА. $1 - \lambda = 432$, $2 - \lambda = 454$, $3 - \lambda = 465$, $4 - \lambda = 510$, $5 - \lambda = 578$, $6 - \lambda = 616$, $7 - \lambda = 640$, $8 - \lambda = 455$, $9 - \lambda = 596$ нм. (a) DC ($M = 0$); (b) $f = 1$ кГц, $M = 0.3$; (c) $f = 2$ кГц, $M = 0.3$; (d) $f = 10$ кГц, $M = 0.3$.

100 мА. Величина переменной компоненты разрядного тока $I_- = 30$ мА, $M = (I_-/I_0) = 0.3$. При увеличении глубины модуляции M от 0 до 0.5 интенсивность спектральных линий возрастает. При $M \approx 1$ интенсивность спектральных линий резко падает.

На рис.3а представлен спектр, полученный при питании разряда постоянным током (режим DC). На рис.3б, с, d – спектры, полученные в акустоплазменном режиме. На рис.3б частота модуляции тока $f = 1$ кГц, на рис.3с $f = 2$ кГц, на рис.3д $f = 10$ кГц.

Спектральные линии, приведенные на рис.3 под номерами 1–9 имеют следующие длины волн: $1 - \lambda = 432$ нм, не идентифицирована, $2 - \lambda = 454$ нм, линия молекулярного гелия (He_2), $3 - \lambda = 465$ нм, линия He_2 , $4 - \lambda = 510$ нм, линия меди (Cu), $5 - \lambda = 578$ нм, линия Cu , $6 - \lambda = 616$ нм, не идентифицирована, $7 - \lambda = 640$ нм, линия He_2 , $8 - \lambda = 455$ нм, линия He_2 , $9 - \lambda = 596$ нм, не идентифицирована. Данные спектральных линий для идентификации He_2 были взяты из [18], для линий Cu из [19].

Спектральные линии 4 и 5 (510 и 578 нм) – это линии само-обращенных переходов меди (линии работы медного лазера). Импульсные медные лазеры работают на заднем фронте наносекундных импульсов, однако в нашем случае

частота модуляции 1 кГц. Это предполагает возможность создания нового типа лазера на парах меди. Остальные линии меди очень слабые или вообще не наблюдаются. Линии 2, 3, 7, 8 (соответственно 454, 455, 465, 640 нм) – принадлежат молекулярному гелию He_2 , который образуется в разрядной камере.

Из рис.3 видно, что в спектре доминируют линии молекулярного гелия, т. е. в разряде почти весь гелий находится в молекулярном состоянии.

Интенсивность спектральных линий зависит от частоты модуляции разрядного тока. Например, для линии 3, линии молекулярного гелия (465 нм) при модуляции тока с частотой 1 кГц, интенсивность линии в 500 раз больше, чем при питании разряда постоянным током. На частоте модуляции 2 кГц интенсивность линии падает в 3 раза, а на частоте 10 кГц – в 700 раз, т. е. образование и распад неустойчивой молекулы He_2 связаны с акустоплазменными резонансами. Это может представлять интерес при использовании акустоплазмы в плазмохимических реакциях.

При питании разряда постоянным током в спектре доминируют линии меди ($4-\lambda = 510$ и $5-\lambda = 578$ нм). Причем это линии само-обращенных переходов, которые наблюдаются только в очень быстропротекающих процессах, например, в лазерах на парах меди только на заднем фронте наносекундных импульсов. В нашем случае частота модуляции разрядного тока всего 1 кГц. Можно было ожидать, что проявятся обычные спектральные линии меди, но они имели незначительную интенсивность. Можно было предполагать, что в акустоплазменном разряде при распаде молекулы гелия атомы гелия с высоким энергетическим потенциалом возбуждают атомы меди, и атомы меди быстро релаксируют в невозбужденное состояние. Однако в эксперименте модуляция тока разряда на интенсивность линий меди почти не оказывала влияния (возрастала всего в 2 раза). Поэтому маловероятно, чтобы распад молекулярного гелия влиял на интенсивность линий меди.

Возможно также, что в разряде, в замкнутой полости из-за спонтанных акустоплазменных колебаний образуются короткоживущие кластеры меди, или кластеры медь–гелий. При распаде таких кластеров образуется возбужденный атом меди, который и излучает на само-обращенных переходах.

Работа проводилась с целью исследования особенностей акустоплазменного магнетрона. Для исследования, собственно, акустоплазменных эффектов для исключения влияния внешнего магнитного поля, оно обнулялось. Таким образом, вращение электронной и ионной компоненты разрядного тока из-за силы Лоренца было незначительным. На первый план выступало вращение, связанное с акустоплазменными резонансами, с возникновением акустических не осевых мод [20]. Колоколообразная форма полости была выбрана для того, чтобы обеспечить плоский фронт акустической волны вдоль оси колокола.

Поскольку магнитное поле очень малое, то быстрые электроны и ионы не заворачивают обратно на катод, а пересекают полость магнетрона и бомбардируют противоположную стенку катода и там выбивают вторичные электроны и ионы. Т.е. процесс похож на обычное катодное распыление. И тогда можно

представить, что плазма, особенно в расширяющейся части колокола имеется положительный столб, в котором существуют акустоплазменные эффекты [17].

На рис.4 показана возможность перестройки голубой спектральной линии молекулярного гелия в области длин волн 450–467 нм при изменении частоты модуляции. Это свидетельствует о влиянии акустоплазмы на квантовом уровне и предполагает дальнейшее исследование.

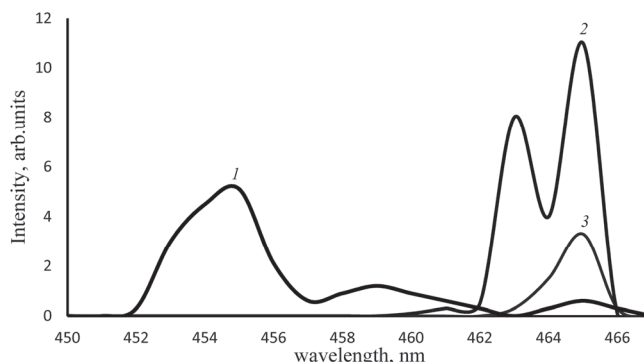


Рис.4. Перестройка спектральной линии в акустоплазменном режиме в разряде He. $P_0 = 10$ Па, $I_0 = 100$ мА. 1 – $f = 10$ кГц, $M = 0.3$, 2 – $f = 2$ кГц, $M = 0.3$, 3 – DC (интенсивность спектров 1 и 3 приведена в масштабе 3:1).

4. Заключение

Экспериментально исследовано излучение в видимом диапазоне из магнетрона с внутренней полостью в форме колокола. Использовалась гелиевая плазма при давлении 10 Па. Работа проводилась с целью исследования особенностей акустоплазменного магнетрона. Для исследования, собственно, акустоплазменных эффектов и исключения влияния внешнего магнитного поля, оно обнулялось. Таким образом, вращение электронной и ионной компоненты разрядного тока из-за силы Лоренца было незначительным. На первый план выступало вращение, связанное с акустоплазменными явлениями.

При увеличении глубины модуляции разрядного тока M от 0 до 0.5 интенсивность спектральных линий возрастает. При $M \approx 1$ интенсивность спектральных линий резко падает.

Значительная доля энергии в видимой части спектра сосредоточена в линиях молекулярного гелия, который образуется в разряде. Интенсивность линии 465 нм молекулярного гелия зависит от частоты модуляции и меняется более, чем в 500 раз.

В разряде получены линии само-обращенных переходов меди, которые возможны только в быстро протекающих процессах, но в эксперименте частота модуляции разрядного тока не превышала 10 кГц. Показана возможность перестройки длины волны спектральной линии Cu при изменении частоты модуляции.

Полученные результаты могут быть использованы как в теоретических исследованиях, так и в прикладной области (плазмохимия, генерация излучений, системы для напыления).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ю.П. Райзер.** Физика газового разряда. Москва, Наука, 1987.
2. Cavity magnetron. Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Cavity_magnetron.
3. **Б.С. Данилин, В.К. Сырчин.** Магнетронные напылительные системы. Москва, Радиосвязь, 1982.
4. **В.П. Каштанов, Б.М. Смирнов, Р. Хипплер.** УФН, **50**, 455 (2007).
5. **L.C. Feldman, J.W. Mayer.** Fundamentals of Surface and Thin Film Analysis. New York, North-Holland, 1986.
6. **В.Ф. Попов, Ю.Н. Горин.** Процессы и установки электронно-ионных технологий. Учебник для ВУЗов. Москва, Высшая школа, 1988.
7. Handbook of Thin Film Deposition. Krishna Seshan (Ed.). William Andrew, 2012.
8. **L.F. Francis.** Materials Processing. Academic Press, 2016.
9. **A.H. Mkrtchyan, A.R. Mkrtchyan, A.S. Abrahamyan, V.V. Nalbandyan.** Patent Armenia, no.3086A, 2016.
10. **A.S. Abrahamyan, A.H. Mkrtchyan, V.V. Nalbandyan, H.T. Hovhannisyan, R.Yu. Chilingaryan, A.S. Hakobyan, P.H. Mossoyan.** Resource-Efficient Technologies, **3**, 7 (2018).
11. **А.В. Елетский, Л.А. Палкина, Б.М. Смирнов.** Явления переноса в слабо ионизованной плазме. Москва, Атомиздат, 1977.
12. **V.E. Zakharov.** Soviet Physics JETP, **24**, 740 (1967).
13. **V.E. Zakharov, L.A. Ostrovsky.** Physica D, **238**, 540(2009).
14. **L. Hadzievsky, M. Stepic, M.M. Scoric.** Phys. Rev. B, **68**, 014305-1 (2003).
15. **О.И. Конаков, А.А. Тихомиров.** Вестник Нижегородского университета им. Лобачевского, **5**, **283** (2011).
16. **Г.А. Галечян, А.Р. Мкртчян.** Акустоплазма. Ереван, Апага, 2005.
17. **A.R. Mkrtchyan, A.S. Abrahamyan.** Armenian J. Phys., **13**, 131 (2020).
18. **R.W.B. Pearse, A.G. Gaydon.** The Identification of Molecular Spectra. London, Chapman & Hall Ltd, 1941, or 4th ed., London, Chapman & Hall, 1976.
19. **В.М. Батенин, В.В. Бучанов, М.А. Казарян, И.И. Климовский, Э.И. Молодых.** Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. Москва, Научная книга, 1998.
20. **E. Skudrzyk.** The Foundation of Acoustic. v.1, Springer Verlag, 1971.

CAVITY MAGNETRON SPECTRA

A.S. ABRAHAMYAN

Visible radiation from a magnetron with a bell-shaped internal cavity was experimentally studied. The spectra of helium acoustoplasma are presented at a very low magnetic field (<0.05 Tl), i.e., a non-standard magnetron operating mode. The helium pressure in the discharge chamber was 10 Pa. To generate acoustoplasma, the magnetron was fed with a modulated current, which contained direct and alternating components. The direct component

of the discharge current was 100 mA. The current modulation depth M , the ratio of the amplitude of the alternating component to the magnitude of the constant component, varied from zero to unity. With an increase in the modulation depth from $M = 0$ to $M = 0.5$, the intensity of the spectral lines increases. At $M \approx 1$, the intensity of the spectral lines drops sharply. A significant share of the energy in the visible part of the spectrum is concentrated in the lines of molecular helium, which is formed in the discharge. The experimentally obtained spectra and the rearrangement of the spectral line in the acoustoplasma mode are presented.

ԽՈՐՈՉԱՅԻՆ ՄԱԳՆԵՏՐՈՆԻ ՄՊԵԿՏՐՆԵՐ

Ա.Ս. ԱԲՐԱՀԱՄՅԱՆ

Փորձարարորեն ուսումնասիրվել է զանգակաձև ներքին խոռոչ ունեցող մագնետրոնից տեսանելի ճառագայթումը: Հելիումի ակուստոպլազմայի սպեկտրները ներկայացված են շատ ցածր մագնիսական դաշտի (<0.05 Tl) դեպքում, այսինքն՝ ոչ ստանդարտ մագնետրոնային աշխատանքային ռեժիմի դեպքում: Հելիումի ճնշումը պարպման խցիկում կազմել է 10 Pa: Ակուստոպլազմա առաջացնելու համար մագնետրոնը սնուցվել է մոդուլացված հոսանքով, որը պարունակում է հաստատուն և փոփոխական բաղադրիչներ: Պարպման հոսանքի հաստատուն բաղադրիչը կազմել է 100 mA: Հոսանքի մոդուլացիայի խորությունը՝ փոփոխական բաղադրիչի ամպլիտուդի և հաստատուն բաղադրիչի մեծության հարաբերակցությունը, տատանվում էր զրոյից մինչև մեկ: Մոդուլացիայի խորության $M=0$ -ից մինչև $M=0.5$ մեծացման հետ սպեկտրալ գծերի ինտենսիվությունը մեծանում է: $M \approx 1$ դեպքում սպեկտրալ գծերի ինտենսիվությունը կտրուկ նվազում է: Սպեկտրի տեսանելի մասում էներգիայի զգալի մասը կենտրոնացած է մոլեկուլյար հելիումի գծերում, որոնք առաջանում են պարպման ժամանակ: Ներկայացված են փորձարարական ճանապարհով ստացված սպեկտրները և սպեկտրալ գծի տեղափոխումը ակուստոպլազմային ռեժիմում: