

УДК 537.87:621.396

## ДВУМЕРНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ В РАЗРЕЗНОМ КОЛЬЦЕВОМ РЕЗОНАТОРЕ

© 2025 г. А. С. Казаков\*, П. А. Гусихин, И. В. Андреев,  
В. М. Муравьев, И. В. Кукушкин

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела  
имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, Черноголовка, Россия*

*\*E-mail: kazakov@issp.ac.ru*

Поступила в редакцию 27.09.2024 г.

После доработки 18.10.2024 г.

Принята к публикации 28.10.2024 г.

Выполнен анализ электромагнитных свойств разрезного кольцевого резонатора на основе двумерной электронной системы. Анализ поглощения электромагнитного излучения двумерной электронной системы в геометрии разрезного кольцевого резонатора выявил новые плазменные моды, связанные с разрезом в структуре. Указанный плазмонный резонанс проявляется в условиях возбуждения как переменным электрическим, так и переменным магнитным полем, что открывает возможность для разработки высокоэффективного перестраиваемого фазового элемента.

*Ключевые слова:* двумерная электронная система, плазмонный резонанс, кольцевой резонатор.

DOI: 10.31857/S0367676525020025, EDN: CYBJPT

### ВВЕДЕНИЕ

На протяжении последних десятилетий искусственно созданные метаматериалы, требуемые электродинамические свойства в которых могут быть заложены еще на этапе проектирования, привлекают к себе значительный интерес как с фундаментальных, так и с прикладных позиций [1–5]. Повышенное внимание к метаматериалам обусловлено в первую очередь рядом уникальных физических свойств, реализуемых в них и не свойственных естественно встречающимся в природе материалам, например: отрицательный показатель преломления [6–8], эффект суперлинзы [9, 10], электромагнитная невидимость [11, 12]. Кроме того, управление основными параметрами электромагнитных (ЭМ) волн, такими как фаза, амплитуда и поляризация, особенно в терагерцовом и субтерагерцовом спектральном диапазоне, открывает широкие перспективы для дальнейшего развития систем телекоммуникации и связи [4, 5, 13–17]. Для целого ряда потенциальных приложений крайне важно разработать метаматериалы с контролируемой фазовой характеристикой. Так, возможность с пространственным разрешением управлять фазой прошедшей ЭМ волны в широком диапазоне частот дает возможность произвольно изменять форму волнового фронта в соответствии с принципом Гюйгенса и расширенными законами преломления и отражения Снеллиуса [18–21].

В основе работы метаматериала с контролируемым фазовым откликом лежит явление сдвига фазы осциллятора на  $\pi$  при пересечении частотой возбуждения собственной резонансной частоты. Чтобы максимизировать достижимый фазовый сдвиг проходящей ЭМ волны, необходимо одновременно использовать два резонанса различной природы, например, электрический и магнитный [22, 23]. Каноническим примером метаматериала с сильным магнитным откликом является разрезной кольцевой резонатор (split-ring resonator, SRR), предложенный Пендри в 1999 году [24]. Отметим, что, ввиду соображений симметрии, магнитный резонанс в структуре разрезного кольцевого резонатора возникает на той же частоте, что и электрический дипольный резонанс, что обеспечивает сдвиг фазы прошедшей ЭМ волны на величину  $2\pi$  [25]. Для простоты классическую геометрию разрезного кольцевого резонатора, состоящую из двух концентрических колец, можно было бы заменить упрощенной геометрией одиночного кольца с разрезом, демонстрирующей аналогичные электрический и магнитный резонансы [26, 27].

Большинство предшествующих исследований, направленных на изучение электромагнитного отклика разрезного кольцевого резонатора, было выполнено на металлических мезоструктурах, настройка положения резонансов в которых после изготовления либо невозможна, либо требует значительного усложнения конструкции [28–30].

В то же время, перестройка частот электрического и магнитного резонансов, может быть, с легкостью осуществлена в мезоструктуре на основе двумерной электронной системы (ДЭС) аналогичной геометрии, резонансы в которой соответствуют двумерным плазменным возбуждениям. В то время как в металлических структурах индуктивная составляющая реактивного сопротивления определяется в основном геометрией мезоструктуры, в ДЭС преобладает кинетическая составляющая индуктивности, зависящая от концентрации электронов. Импеданс ДЭС может быть описан в рамках модели Друде [31, 32]:

$$Z = R + i\omega L_k, \quad L_k = m^*/n_s e^2,$$

где  $R = m^*/n_s e^2 \tau$  — сопротивление на квадрат двумерного электронного газа,  $m^*$  — эффективная масса электрона,  $n_s$  — двумерная электронная плотность,  $\tau$  — характерное время релаксации импульса,  $L_k$  — кинетическая индуктивность. Как видно, резонансные частоты двумерных плазменных возбуждений наряду с фазовым сдвигом прошедшей ЭМ волны могут быть перестроены путем варьирования концентрации носителей заряда в ДЭС или с помощью приложения внешнего перпендикулярного магнитного поля.

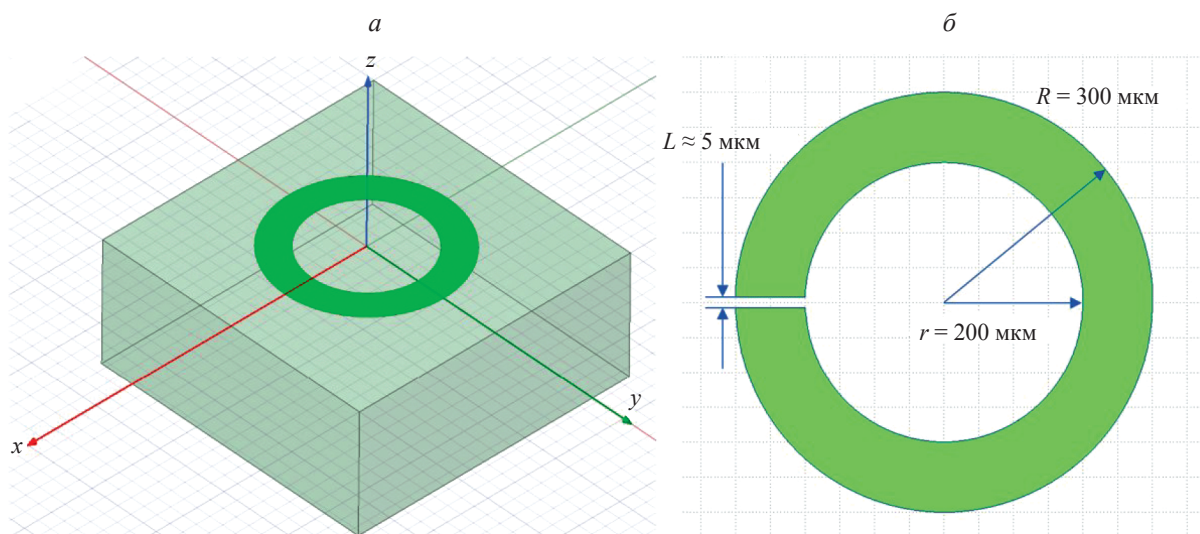
Электромагнитный отклик металлического разрезного кольцевого резонатора изучен достаточно подробно [26, 27, 33–35], однако, плазменные устройства на основе ДЭС с геометрией кольца с разрезом практически не исследовались. В качестве опорной точки настоящего исследования послужат полученные ранее экспериментальные результаты исследования плазменных возбуждений в содержащих ДЭС симметричных кольцевых мезоструктурах [36, 37].

В настоящей работе проведен численный анализ электромагнитного отклика мезоструктур, содержащих ДЭС в геометрии разрезного кольцевого резонатора с различными геометрическими параметрами. Продемонстрировано возникновение новых плазменных резонансов, обусловленных нарушением симметрии кольца. Обнаруженные моды возникают в дополнение к фундаментальному плазменному резонансу. В работе изучено поведение этих мод в зависимости от поляризации падающей электромагнитной волны.

## МОДЕЛЬ РАЗРЕЗНОГО КОЛЬЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА

Модели численно проанализированных структур в геометрии кольца и разрезного кольцевого резонатора представлены на рис. 1. В основу модели положена коммерчески доступная гетероструктура GaAs/AlGaAs с характерными значениями концентрации высокоподвижных ( $\mu = 4 \cdot 10^6 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ) электронов в квантовой яме  $n_s = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  при температуре  $T = 4.2 \text{ К}$ . Выбор конкретной топологии обусловлен возможностью и удобством реализации модельной конструкции для последующего эксперимента, а также параметрами коммерчески доступных гетероструктур. Характерные геометрические параметры колец во всех типах структур были следующими: внешний радиус  $R = 300 \text{ мкм}$ , внутренний радиус  $r = 200 \text{ мкм}$ . Глубина залегания ДЭС составляла  $200 \text{ нм}$ , тогда как толщина всей гетероструктуры с учетом изолирующей подложки —  $360 \text{ мкм}$ .

Электромагнитный отклик структуры численно анализировался с учетом импеданса ДЭС и диэлектрических параметров окружения. Возбуждение плазменных резонансов оценивалось



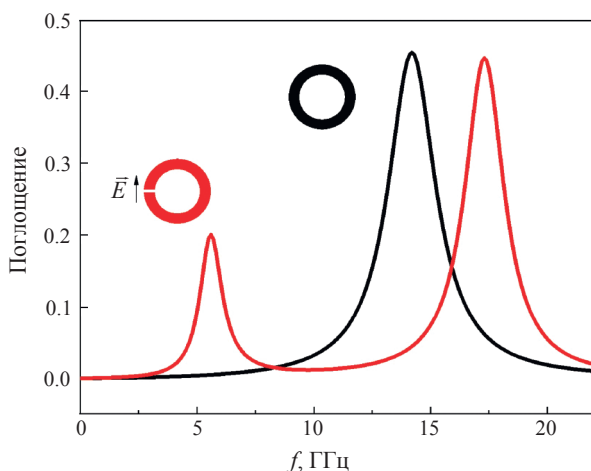
**Рис. 1.** Модель исследуемой мезоструктуры в геометрии кольцевого резонатора на подложке GaAs (а). Схематичное изображение геометрии исследуемого разрезного кольцевого резонатора (б).

исходя из поглощения структуры. Численное решение уравнений Максвелла было выполнено в специализированном программном пакете методом конечных разностей во временной области. Для упрощения и ускорения вычислений в качестве модельного объекта выступала бесконечная периодическая структура, воспроизводимая посредством задания периодических граничных условий на перпендикулярных осям  $x$  и  $y$  (красная и зеленая оси на рис. 1а) граням модельной структуры.

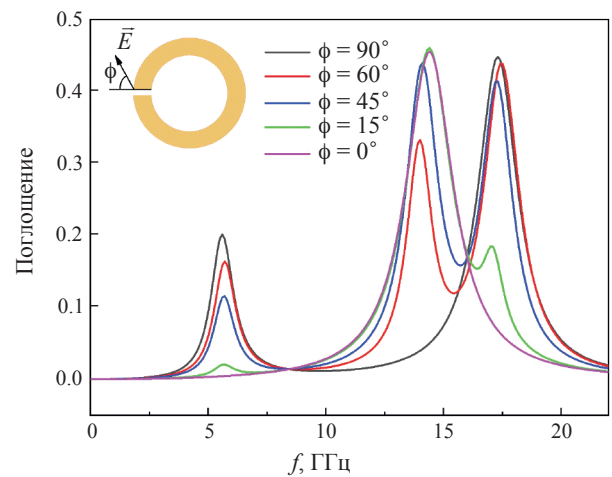
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде всего, был проведен сравнительный анализ поглощения электромагнитного излучения в приведенных выше структурах с геометрией кольца и разрезного кольцевого резонатора (рис. 2). Полученная частотная зависимость поглощения электромагнитного излучения ДЭС в форме кольца демонстрирует наличие одного пика поглощения при  $f \approx 14$  ГГц, соответствующего дипольному плазменному резонансу, когда на длине кольца укладывается длина волны плазменного возбуждения. Введение разреза в структуру кольцевой ДЭС приводит к радикальной модификации спектра поглощения ЭМ излучения, а именно, возникает дополнительный низкочастотный ( $f \approx 5$  ГГц) резонанс. Кроме того, наблюдается сдвиг в высокочастотную область фундаментальной плазменной моды, который может быть ассоциирован с диполь-дипольным взаимодействием двух половин кольцевого резонатора, понижающим энергию и, соответственно, резонансную частоту возбуждения в случае отсутствия разреза в кольце [38].

На рис. 3 представлены частотные зависимости поглощения электромагнитного излучения ДЭС в геометрии разрезного кольцевого резонатора при различной поляризации электрического поля падающей волны относительно разреза.



**Рис. 2.** Частотная зависимость поглощения электромагнитной волны содержащими ДЭС мезаструктурами в геометрии кольца (черный) и разрезного кольцевого резонатора (красный).

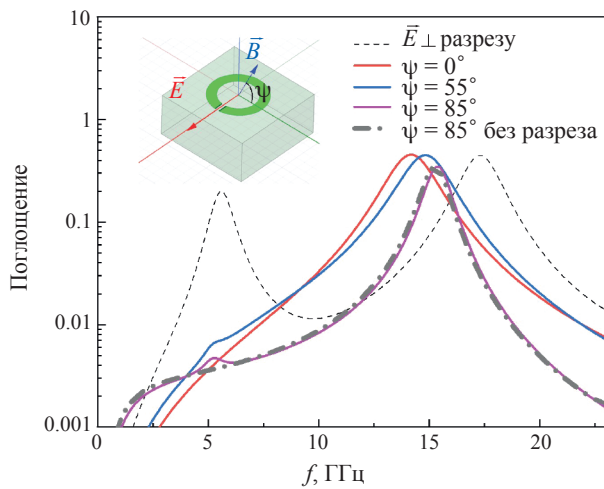


**Рис. 3.** Частотная зависимость поглощения электромагнитного излучения ДЭС в геометрии разрезного кольцевого резонатора в зависимости от угла между вектором напряженности электрического поля падающей волны и разрезом в структуре.

тора при различной поляризации электрического поля падающей волны относительно разреза. Волна распространяется перпендикулярно плоскости, в которой расположена структура.

Наиболее ярко дополнительный максимум поглощения проявляется при условии перпендикулярной поляризации электрического поля падающей волны относительно разреза, тогда как при параллельной поляризации низкочастотный пик исчезает. Этот результат представляется вполне естественным, поскольку возбужденные поляризованным вдоль разреза электрическим полем плазменные моды определяются геометрией двух половин кольца, тогда как разрез находится в точности между ними и не влияет на конфигурацию плазменных возбуждений. Отметим также, что при уменьшении угла между поляризацией вектора электрического поля и разрезом происходит красный сдвиг резонанса поглощения, соответствующего фундаментальной плазменной моде. Положение этого резонанса при параллельной поляризации падающей электромагнитной волны относительно не слишком широкого разреза ( $d \ll R$ ) ожидаемо совпадает с положением единственного резонанса поглощения в кольцевой ДЭС без разреза. Представленные выше результаты указывают на связь дополнительного низкочастотного резонанса поглощения падающей электромагнитной волны с нарушением симметрии и топологии структуры — разрезом. Именно на частоте этого резонанса, исходя из симметрии структуры, ожидается возникновение магнитного резонанса, возбужденного переменным магнитным полем падающей волны [24, 25, 33].

На рис. 4 приведены зависимости поглощения падающей под углом электромагнитной волны в кольце и разрезном кольцевом резонаторе при



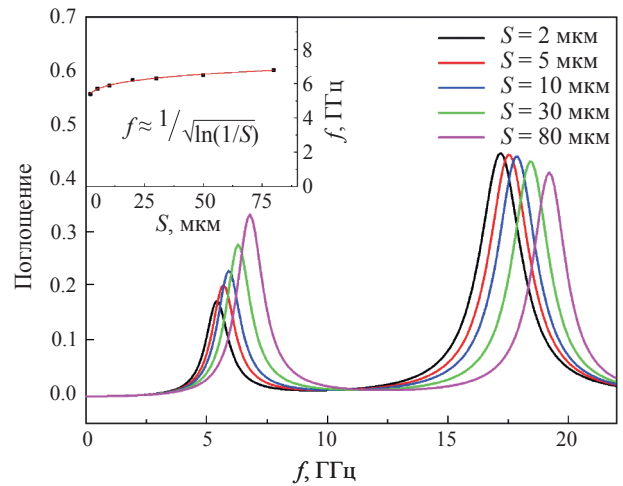
**Рис. 4.** Частотные зависимости поглощения электромагнитной волны содержащими ДЭС мезаструктурами в геометрии разрезного кольцевого резонатора (сплошные цветные линии и тонкая штриховая линия) и кольца (толстая штрихпунктирная линия), измеренные при различных углах падения волны.

условии параллельной поляризации электрического поля относительно разреза. В такой конфигурации, при наличии ненулевой нормальной по отношению к ДЭС компоненты переменного магнитного поля падающей волны, ожидается возникновение чисто магнитного резонанса поглощения ввиду отсутствия дополнительной низкочастотной электрической плазменной моды.

Из приведенных на рис. 4 результатов видно, что в асимметричной содержащей ДЭС мезаструктуре наблюдается возбужденный переменным магнитным полем резонанс, при чем на той же частоте, что и электрический низкочастотный дипольный резонанс (рис. 4, штриховая линия). В симметричном кольце указанная особенность поглощения электромагнитной волны отсутствует (рис. 4, штрихпунктирная линия). Таким образом, в содержащей ДЭС мезаструктуре с геометрией разрезного кольцевого резонатора могут быть возбуждены обусловленные разрезом дополнительные электрические дипольный и магнитный плазменные резонансы, частоты которых ввиду симметрии структуры совпадают.

С целью определения влияния геометрии структуры на положение и степень проявления обусловленной разрезом низкочастотной плазменной моды был проведен численный расчет поглощения электромагнитного излучения в геометрии возбуждения электрическим полем ряда структур с различными значениями ширины щели (рис. 5).

Из рис. 5 можно заметить, что изменение геометрических параметров разреза (ширины щели) приводит к сдвигу как фундаментальной плазменной моды, так и дополнительного низкочастотного резонанса, связанного с наличием разреза в структуре. На качественном уровне влия-



**Рис. 5.** Частотная зависимость поглощения электромагнитной волны содержащими ДЭС мезаструктурами в геометрии разрезного кольцевого резонатора с различной шириной щели; на вставке приведена зависимость частоты обусловленного разрезом резонанса от ширины щели в структуре.

ние геометрических параметров структуры на электродинамический отклик ДЭС может быть объяснено с применением LC-подхода для описания плазменных резонансов [31, 39]. В рамках такого подхода содержащая ДЭС мезаструктура представляется в виде LC-цепи с сосредоточенными либо распределенными параметрами. При этом емкости в такой цепи определяются геометрией мезаструктуры и диэлектрическим окружением системы, а индуктивный вклад содержит помимо обычной электромагнитной составляющей еще и кинетическую индуктивность двумерных электронов  $L_k = m^*/n_s e^2$ , которая обычно не мала.

Зависимость положения низкочастотного резонанса от ширины щели в разрезном кольцевом резонаторе объясняется тем, что частота данного резонанса должна определяться кинетической индуктивностью кольца ДЭС и емкостью щелевого разреза в структуре, с хорошей точностью, определяемой соотношением:

$$C \approx \frac{\epsilon \epsilon_0 w}{\pi} \ln \frac{16h}{\pi s},$$

где  $w$  — ширина кольца ДЭС, а  $h$  — толщина подложки.

И действительно, численное моделирование показывает, что зависимость частоты данного резонанса от ширины щели хорошо описывается функциональным соотношением  $f \approx 1/\sqrt{\ln(1/s)}$  (кривая на вставке к рис. 5). Аналогично небольшое фиолетовое смещение основного резонанса можно качественно объяснить уменьшением эффективной "плазменной" емкости системы при разрезании из-за последовательного добавления емкости щелевого разреза.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, продемонстрирован численный анализ модели мезаструктуры на основе ДЭС, организованной на подложке GaAs в форме разрезного кольцевого резонатора. Расчет спектра поглощения электромагнитного излучения показал наличие двух резонансов, соответствующих фундаментальной плазменной моде, а также дополнительной плазменной моде, обусловленной разрезом. Продemonстрирована возможность возбуждения низкочастотного плазменного резонанса как переменным электрическим, так и переменным магнитным полем, тем самым выполняя условие наложения двух резонансов различной природы, позволяя в теории достичь сдвига фазы проходящей волны  $2\pi$ . Кроме того, исследованы поляризационные зависимости обусловленного разрезом плазменного резонанса, а также его зависимость от геометрии структуры.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-72-00060).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kadic M., Milton G.W., van Hecke M. et al. // Nature Rev. Phys. 2019. V. 1. P.198.
- Кильдишев А.В., Шалаев В.М. // УФН. 2011. Т. 181. № 1. С. 59; Kildishev A.V., Shalaev V.M. // Phys. Usp. 2011. V. 54. No. 1. P. 53.
- Zheludev N., Kivshar Y. // Nature Mater. 2012. V. 11. P. 917.
- Valipour A., Kargozarfard M.H., Rakhshi M. et al. // Proc. Inst. Mech. Eng. L. 2022. V. 236. No. 11. P. 2171.
- Holloway C.L., Kuester E.F., Gordon J.A. et al. // IEEE Antennas Propag. Mag. 2012. V. 54. No. 2. P. 10.
- Веселаго В.Г. // УФН. 1967. Т. 92. № 7. С. 517; Veselago V.G. // Sov. Phys. Usp. 1967. V. 92. No. 7. P. 517.
- Smith D.R., Pendry J.B., Wiltshire M.C.K. // Science. 2004. V. 305. No. 5685. P. 788.
- Shalaev V.M. // Nature Photon. 2007. V. 1. No. 1. P. 41.
- Pendry J.B. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 85. No. 18. P. 3966.
- Yuan G., Rogers K.S., Rogers E.T. et al. // Phys. Rev. Appl. 2019. V. 11. No. 6. Art. No. 064016.
- Pendry J.B., Schurig D., Smith D.R. // Science. 2006. No. 312. P. 1780.
- Cai W., Chettiar U.K., Kildishev A.V. et al. // Nature Photon. 2007. V. 1. No. 4. P. 224.
- Guo Y., Guo Y., Li C. et al. // Appl. Sciences. 2021. V. 11. No. 9. P. 4017.
- Xu C., Ren Z., Wei J. et al. // iScience. 2022. V. 25. No. 2. Art. No. 103799.
- Бахтеев И.Ш., Молчанов С.Ю., Муравьев М.М. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 4. С. 489; Bahteev I.S., Molchanov S.Y., Muravev V.M. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 4. P. 400.
- Молчанов С.Ю., Бахтеев И.Ш., Муравьев В.М. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 4. С. 499; Molchanov S.Y., Bahteev I.S., Muravev V.M. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 4. P. 408.
- Бровко А.М., Джикурба К.Р., Муравьев В.М. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 2. С. 177; Brovko A.M., Dzhikirba K.R., Muravev V.M. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 2. P. 150.
- Yu N., Genevet P., Kats M.A. et al. // Science. 2011. V. 334. No. 6054. P. 333.
- Pfeiffer C., Grbic A. // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. No. 19. Art. No. 197401.
- Decker M., Staude I., Falkner M. et al. // Adv. Opt. Mater. 2015. V. 3. No. 6. P. 813.
- Chen M., Kim M., Wong A.M. et al. // Nanophotonics. 2018. V. 7. No. 6. P. 1207.
- Ремнев М.А., Климов В.В. // УФН. 2018. Т. 188. № 2. С. 169; Remnev M.A., Klimov V.V. // Phys. Usp. 2018. V. 61. No. 2. P. 157.
- Kerker M., Wang D.S., Giles C.L. // JOSA. 1983. V. 73. No. 6. P. 765.
- Pendry J.B., Holden A.J., Robbins D.J., Stewart W.J. // IEEE Trans. Microwave. Theory Tech. 1999. V. 47. No. 11. P. 2075.
- Padilla W.J. // Opt. Express. 2007. V. 15. P. 1639.
- Linden S., Enkrich C., Wegener M. et al. // Science. 2004. V. 306. No. 5700. P. 1351.
- Katsarakis N., Koschny T., Kafesaki M. et al. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. P. 2943.
- Hannam K.E., Powell D.A., Shadrivov I.V. et al. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. No. 8. Art. No. 081111.
- Kapitanova P.V., Maslovski S.I., Shadrivov P.M. et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 99. No. 25. Art. No. 251914.
- Kodama C.H., Coutu R.A. // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 108. No. 23. Art. No. 231901.
- Burke P.J., Spielman I.B., Eisenstein J.P. et al. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76. No. 6. P. 745.
- Yoon H., Yeung K., Kim P. et al. // Philos. Trans. Royal Soc. A. 2014. V. 372. Art. No. 20130104.
- Padilla W.J., Taylor A.J., Highstrete C. et al. // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 96. No. 10. Art. No. 107401.
- Aydin K., Bulu I., Guven K. et al. // New J. Phys. 2005. V. 7. No. 1. P. 168.
- Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C. et al. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. No. 18. P. 4184.
- Губарев С.И., Ковальский В.А., Кулаковский Д.В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 80. № 2. С. 134; Gubarev S.I., Koval'ski V.A., Kulakovski D.V. et al. // JETP Lett. 2004. V. 80. No. 2. P. 124.
- Kovalskii V.A., Gubarev S.I., Kukushkin I.V. et al. // Phys. Rev. B. 2006. V. 73. No. 19. Art. No. 195302.
- Rechberger W., Hohenau A., Leitner A. et al. // Opt. Commun. 2003. V. 220. No. 1-3. P. 137.
- Зарезин А.М., Гусихин П.А., Андреев И.В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2021. Т. 113. № 11. С. 740; Zarezin A.M., Gusikhin P.A., Andreev I.V. et al. // JETP Lett. 2021. V. 113. P. 713.

## Two-dimensional plasma excitations in a split-ring resonator

A. S. Kazakov\*, P. A. Gusikhin, I. V. Andreev, V. M. Muravev, I. V. Kukushkin

*Osipyan Institute of Solid-State Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia*

*\*e-mail: kazakov@issp.ac.ru*

We analyzed the electromagnetic properties of a split-ring resonator based on a two-dimensional electronic system (2DES). Analysis of the absorption of electromagnetic radiation by the 2DES in the geometry of a split-ring resonator revealed new plasma modes associated with a split in the structure. This plasmon resonance manifests itself under conditions of excitation by both alternating electric and alternating magnetic fields, which opens the possibility of developing a highly efficient tunable phase shifting element.

**Keywords:** two-dimensional electron system, plasmon resonance, ring resonator.