

13.4

Профилированный ступенчатый рефлектор для селекции мод в мощных микроволновых генераторах ультракоротких импульсов

© Ю.Ю. Данилов, Э.Б. Абубакиров

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
Нижний Новгород, Россия
E-mail: danilov@ipfran.ru

Поступило в Редакцию 14 апреля 2023 г.
В окончательной редакции 12 октября 2023 г.
Принято к публикации 7 ноября 2023 г.

Селективное отражение пространственно-развитой моды цилиндрического волновода исследовано в приложении к выводу излучения и замыканию обратной связи в мощных микроволновых генераторах ультракоротких импульсов. Найдены профиль и соотношение параметров ступенчатого рефлектора, обеспечивающие максимальное подавление паразитных мод при заданном уровне потерь рабочей моды в широкой полосе частот. Показано, что ширина частотной полосы рефлектора аксиально-симметричной моды E_{02} достигает 10% над уровнем 0.9 от максимального значения отраженной мощности.

Ключевые слова: профилированный ступенчатый рефлектор, генератор ультракоротких импульсов, электродинамическая селекция мод, аксиально-симметричная мода, миллиметровый диапазон волн.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.03.57037.19592

Реализация нестационарной генерации в настоящее время представляется перспективным подходом для получения мощных импульсов излучения малой длительности в сантиметровом и, особенно, миллиметровом диапазонах длин волн, что нашло отражение в [1–6]. Нестационарная генерация на основе механизма сверхизлучения может обеспечить как одиночные ультракороткие микроволновые импульсы [7–10], так и их квазипериодические последовательности. Эти последовательности могут быть, например, получены в автомодуляционных режимах [11], в системах с просветляющимися нелинейными элементами, включенными в кольцо обратной связи [1–5], а также введением отражений на концах пространства взаимодействия [6].

Генерируемые в указанных режимах импульсы характеризуются малой длительностью и соответственно широкой полосой частотного спектра. Повышение выходной мощности таких источников излучения и их продвижение во все более высокочастотный диапазон требуют использования пространственно-развитых электродинамических систем, работающих на высоких собственных модах. Таким образом, электродинамические рефлекторы 4 (рис. 1, *a*), обеспечивающие вывод излучения или замыкание обратной связи, должны обладать очень высокой селективностью. Брэгговские отражатели и преобразователи мод, широко используемые в мощной микроволновой электронике, не всегда способны удовлетворить этому условию, и поэтому существует необходимость разработки альтернативных электродинамических элементов.

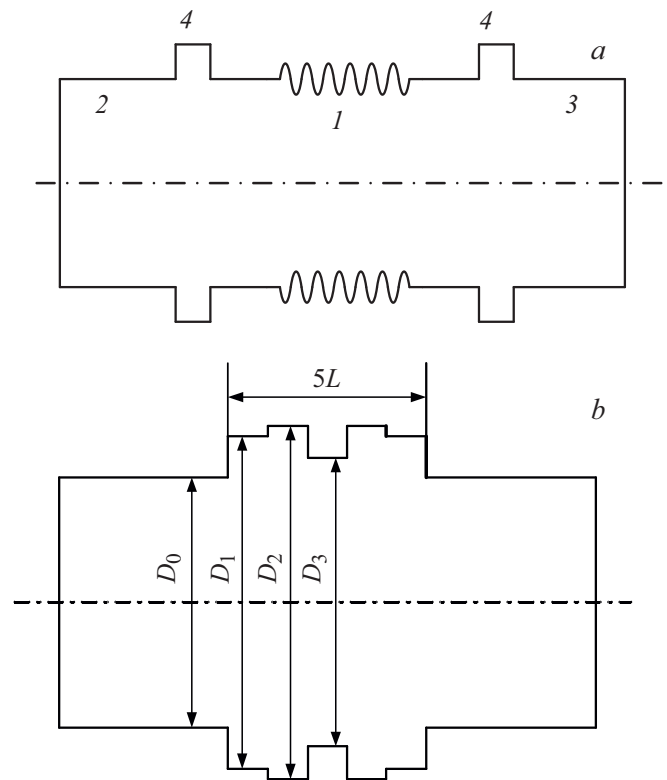


Рис. 1. Схема электродинамической системы мощного микроволнового генератора ультракоротких импульсов. *a* — общая схема: 1 — пространство взаимодействия, 2 — вход электронного пучка, 3 — волновод для вывода излучения, 4 — селективные рефлекторы. *b* — смоделированный профиль селективного широкополосного пятиступенчатого рефлектора 4.

Рефлектор, представляющий собой ступенчатое расширение волновода [4,5,12–15], является наиболее компактным из альтернативных селективных элементов. Однако его частотная полоса должна быть существенно увеличена для работы с импульсами малой длительности. Усовершенствованный селективный рефлектор с профилированным ступенчатым расширением был предложен и численно смоделирован в [5], где он предназначался для генератора ультракоротких импульсов 8-миллиметрового диапазона с двумя параллельными излучающим и поглощающим электронными пучками. Этот генератор был рассчитан на низшую моду HE_{11} , и рефлектор должен был обеспечить в цилиндрическом волноводе, выводящем излучение, широкополосное отражение низшей моды H_{11} при минимальном отражении единственной паразитной моды E_{01} . Очевидно, что селекция мод в генераторах ультракоротких импульсов с пространственно-развитыми электродинамическими системами значительно усложняется, так как минимальное отражение в широкой полосе частот необходимо обеспечить для каждой из большого количества паразитных мод.

Типичная рабочая мода для реализованных источников микроволновых импульсов малой длительности представляет собой аксиально-симметричное колебание E -типа [7–10]. Моделирование селективного широкополосного рефлектора в рамках настоящей работы было проведено для аксиально-симметричной моды E_{02} , выбор которой позволяет успешно реализовать дополнительную циклотронно-резонансную селекцию в черенковских релятивистских генераторах [16,17]. Угол Бриллюэна рабочей моды в цилиндрическом волноводе был ограничен в пределах 40 – 50° для адаптации к характерной конструкции мощных микроволновых генераторов малой длительности. Для моделирования был выбран 8-миллиметровый диапазон длин волн. Моделирование проводилось посредством программного кода ANSYS Electromagnetic Suite 2022 R2 [18] в пренебрежении омическими потерями.

Профиль селективного широкополосного пятиступенчатого рефлектора, полученный в результате моделирования, представлен на рис. 1, *b*. Профиль является симметричным, длины его пяти секций одинаковы. Рабочее колебание широкополосного рефлектора представляет собой нормальное колебание двух парциальных мод непрофилированного ступенчатого расширения [5]. Профиль деформации и соотношение ее параметров были предварительно оценены посредством метода возмущений [5,19], чтобы получить требуемая связь и частотную отстройку между этими парциальными модами, а также обеспечить отсутствие паразитных резонансов в широкой полосе частот. Центральная секция деформации предназначена для смещения по частоте паразитных резонансов, обусловленных распространяющимися модами с радиальным

индексом, меньшим, чем у рабочего колебания. Секции, соседние с центром деформации, предназначены для смещения паразитных резонансов, обусловленных распространяющимися модами с тем же радиальным индексом, что и у рабочего колебания, и в первую очередь ближайшей к нему моды H_{12} . Настройка рефлектора на заданную центральную частоту производится подбором параметров двух крайних секций деформации.

Селективный широкополосный профилированный ступенчатый рефлектор также может быть смоделирован аналогичным способом как для моды H_{12} , так и для мод E_{0p} и H_{1p} с более высокими радиальными индексами.

Результаты моделирования профилированного ступенчатого рефлектора продемонстрировали его высокую селективность при различных уровнях отражения рабочей моды. Нормированные на исходную мощность частотные зависимости рефлекторов с максимальными уровнями отражения 0.65 и 0.9 для моды E_{02} представлены на рис. 2 (R и T — коэффициенты отражения и прохождения). Частотная полоса для первого варианта рефлектора достигает 10% над уровнем 0.9 от максимального значения отраженной мощности, для второго варианта она достигает 1.5% . Профиль первого варианта рефлектора (рис. 1, *b*) описывается параметрами $D_0 = 19.7$ mm, $D_1 = 24.8$ mm, $D_2 = 28.9$ mm, $D_3 = 19.9$ mm, $L = 1.9$ mm, профиль второго варианта (рис. 1, *b*) описывается параметрами $D_0 = 20.8$ mm, $D_1 = 26.7$ mm, $D_2 = 29$ mm, $D_3 = 23.2$ mm, $L = 2$ mm.

Таким образом, условия, обеспечивающие максимальный уровень отражения, противоречат условиям, обеспечивающим максимально широкую частотную полосу, что требует поиска компромисса при реализации рефлектора для каждого конкретного источника. Частотные зависимости рабочей моды в обоих вариантах являются плавными и почти симметричными относительно центральной частоты (рис. 2); следовательно, такой рефлектор не внесет существенных искажений в форму отраженного импульса.

Низкие коэффициенты отражения для паразитных мод предотвращают возможность их самовозбуждения в широкой частотной полосе (рис. 2). При моделировании каждого варианта рефлектора также учитывалось, что он должен обеспечить малый уровень трансформации рабочей моды E_{02} в отраженную паразитную моду E_{01} (рис. 2, *b, d*). Тем не менее электронная селекция наиболее опасных паразитных мод должна быть предусмотрена при разработке каждого конкретного источника. Так, мода E_{21} , ближайшая к рабочей моде среди E -мод, может потребовать именно электронной селекции, так как смещения по частоте их парциальных колебаний, вызванные профилированием стенки, почти не различаются.

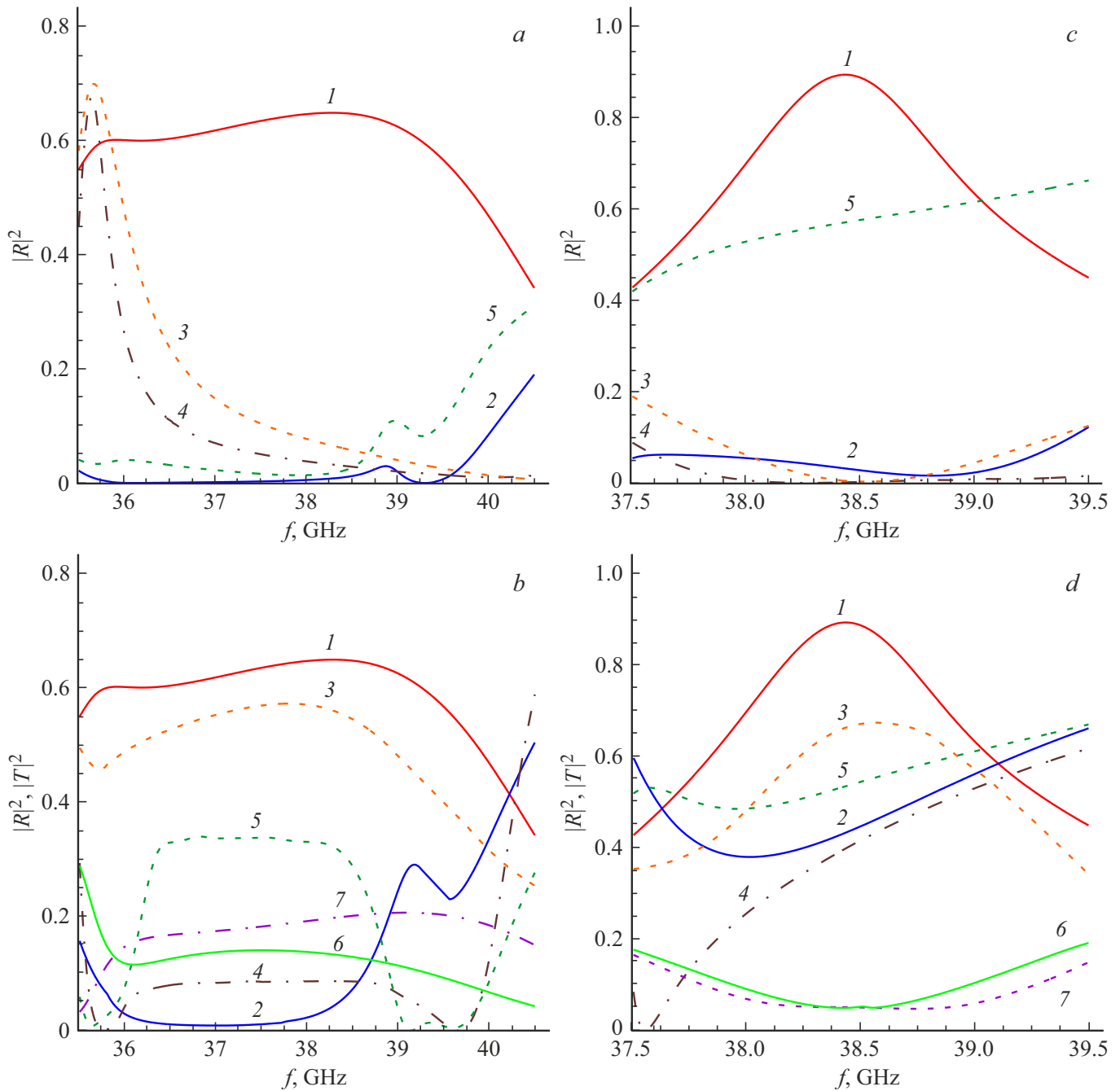


Рис. 2. Частотные зависимости рефлекторов с максимальными уровнями отражения 0.65 (*a, b*) и 0.9 (*c, d*). *a, c* — отражение моды E_{02} (1) и низших мод H_{11} (2), E_{01} (3), H_{21} (4), E_{11} (5); *b, d* — отражение моды E_{02} (1), отражение более высоких мод H_{31} (2), E_{21} (3), H_{12} (4), E_{12} (5) и трансформация моды E_{02} в моду E_{01} , отраженную (6) и проходящую (7).

При моделировании был определен диапазон значений максимальной напряженности электрического поля на поверхности рефлектора при скруглении его острых кромок с малым радиусом кривизны $(0.05-0.1)\lambda$ [13], типичным для микроволновых генераторов ультракоротких импульсов с характерным уровнем пиковой мощности 1 GW. Максимальная на-

пряженность электрического поля на поверхности рефлектора для обоих его вариантов при этом находится в пределах 1–1.4 MV/cm, что не превышает значений, типичных для мощных импульсных приборов [13,14].

Полученные результаты позволяют заключить, что предложенный рефлектор может быть использован по

крайней мере вплоть до верхней границы субмиллиметрового диапазона длин волн, где влияние погрешностей изготовления может оказаться существенным.

Отметим, что профилированные ступенчатые рефлекторы могут также найти применение в микроволновых генераторах, работающих в квазистационарных режимах. В релятивистских лампах обратной волны они могут стать компактной заменой брэгговским рефлекторам, где те используются как для вывода излучения, так и для формирования оптимальной продольной структуры высокочастотного поля [17]. В черенковских релятивистских генераторах с резонансными элементами они могут обеспечить их селективную работу при использовании сверхразмерных электродинамических систем [13,14,20,21].

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0030-2021-0027 (программа „Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года“).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Н.С. Гинзбург, Г.Г. Денисов, М.Н. Вилков, И.В. Зотова, А.С. Сергеев, Письма в ЖТФ, **41** (17), 44 (2015). [N.S. Ginzburg, G.G. Denisov, M.N. Vilkov, I.V. Zotova, A.S. Sergeev, Tech. Phys. Lett., **41** (9), 836 (2015). DOI: 10.1134/S1063785015090047].
- [2] Н.С. Гинзбург, Э.Б. Абубакиров, М.Н. Вилков, И.В. Зотова, А.С. Сергеев, ЖТФ, **88** (8), 1241 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2018.08.46316.2581 [N.S. Ginzburg, E.B. Abubakirov, M.N. Vilkov, I.V. Zotova, A.S. Sergeev, Tech. Phys., **63** (8), 1205 (2018). DOI: 10.1134/S1063784218080078].
- [3] N.S. Ginzburg, G.G. Denisov, M.N. Vilkov, A.S. Sergeev, S.V. Samsonov, A.M. Malkin, I.V. Zotova, Phys. Rev. Appl., **13** (4), 044033 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.13.044033
- [4] Н.С. Гинзбург, М.Н. Вилков, Ю.Ю. Данилов, А.П. Коношков, Л.А. Юровский, Е.В. Иляков, И.С. Кулагин, И.В. Зотова, Письма в ЖТФ, **47** (4), 29 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.04.50642.18365 [N.S. Ginzburg, M.N. Vilkov, Yu.Yu. Danilov, A.P. Konyushkov, L.A. Yurovskiy, E.V. Ilyakov, I.S. Kulagin, I.V. Zotova, Tech. Phys. Lett., **47** (2), 184 (2021). DOI: 10.1134/S106378502102022X].
- [5] Н.С. Гинзбург, М.Н. Вилков, В.Н. Мануилов, Ю.Ю. Данилов, А.П. Коношков, Е.В. Иляков, И.С. Кулагин, И.В. Зотова, Изв. вузов. Радиофизика, **65** (3), 212 (2022). DOI: 10.52452/00213462_2022_65_03_212 [N.S. Ginzburg, M.N. Vilkov, V.N. Manuilov, Yu.Yu. Danilov, A.P. Konyushkov, E.V. Ilyakov, I.S. Kulagin, I.V. Zotova, Radiophys. Quantum Electron., **65** (3), 196 (2022). DOI: 10.1007/s11141-023-10205-7].
- [6] Е.М. Тотменинов, В.В. Ростов, Письма в ЖТФ, **47** (1), 51 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.01.50460.18527 [E.M. Totmeninov, V.V. Rostov, Tech. Phys. Lett., **47** (1), 46 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021010119].
- [7] N.S. Ginzburg, N.Yu. Novozhilova, I.V. Zotova, A.S. Sergeev, N.Yu. Peskov, A.D.R. Phelps, S.M. Wiggins, A.W. Cross, K. Ronald, W. He, V.G. Shpak, M.I. Yalandin, S.A. Shunailov, M.R. Ulmaskulov, V.P. Tarakanov, Phys. Rev. E, **60** (3), 3297 (1999). DOI: 10.1103/PhysRevE.60.3297].
- [8] М.И. Яландин, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.Р. Ульмаскулов, Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, А.С. Сергеев, А.Д.Р. Фелпс, А.В. Кросс, К. Рональд, С.М. Виггинс, Письма в ЖТФ, **25** (23), 1 (1999). [M.I. Yalandin, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.R. Ulmaskulov, N.S. Ginzburg, I.V. Zotova, A.S. Sergeev, A.D.R. Phelps, A.W. Cross, K. Ronald, S.M. Wiggins, Tech. Phys. Lett., **25** (12), 927 (1999). DOI: 10.1134/1.1262711].
- [9] S.D. Korovin, A.A. Eltchaninov, V.V. Rostov, V.G. Shpak, M.I. Yalandin, N.S. Ginzburg, A.S. Sergeev, I.V. Zotova, Phys. Rev. E, **74** (1), 016501 (2006). DOI: 10.1103/PhysRevE.74.016501
- [10] V.V. Rostov, A.A. Elchaninov, I.V. Romanchenko, M.I. Yalandin, Appl. Phys. Lett., **100** (22), 224102 (2012). DOI: 10.1063/1.4723845
- [11] Н.М. Рыскин, В.Н. Титов, Изв. вузов. Радиофизика, **44** (10), 860 (2001). [N.M. Ryskin, V.N. Titov, Radiophys. Quantum Electron., **44** (10), 793 (2001). DOI: 10.1023/A:1013717032173].
- [12] G.G. Denisov, D.A. Lukovnikov, S.V. Samsonov, Int. J. Infrared Millimeter Waves, **16** (4), 745 (1995). DOI: 10.1007/BF02066634
- [13] С.Д. Коровин, И.К. Куркан, В.В. Ростов, Е.М. Тотменинов, Изв. вузов. Радиофизика, **42** (12), 1189 (1999). [S.D. Korovin, I.K. Kurkan, V.V. Rostov, E.M. Totmeninov, Radiophys. Quantum Electron., **42** (12), 1047 (1999). DOI: 10.1007/BF02677128].
- [14] А.И. Климов, И.К. Куркан, С.Д. Полевин, В.В. Ростов, Е.М. Тотменинов, Письма в ЖТФ, **34** (6), 23 (2008). [A.I. Klimov, I.K. Kurkan, S.D. Polevin, V.V. Rostov, E.M. Totmeninov, Tech. Phys. Lett., **34** (3), 235 (2008). DOI: 10.1134/S1063785008030176].
- [15] Ю.Ю. Данилов, ЖТФ, **84** (7), 143 (2014). [Yu.Yu. Danilov, Tech. Phys., **59** (7), 1088 (2014). DOI: 10.1134/S1063784214070081].
- [16] Э.Б. Абубакиров, В.И. Белоусов, В.Н. Варганов, В.А. Гинзбург, Н.Ф. Ковалев, Н.Г. Колганов, М.И. Петелин, Е.И. Солуянов, Письма в ЖТФ, **9** (9), 533 (1983). [E.B. Abubakirov, V.I. Belousov, V.N. Varganov, V.A. Ginzburg, N.F. Kovalev, N.G. Kolganov, M.I. Petelin, E.I. Soluyanov, Sov. Tech. Phys. Lett., **9** (5), 230 (1983)].
- [17] Э.Б. Абубакиров, А.Н. Денисенко, Н.Ф. Ковалев, Е.А. Копелович, А.В. Савельев, Е.И. Солуянов, М.И. Фукс, В.В. Ястребов, ЖТФ, **69** (11), 102 (1999). [É.B. Abubakirov, A.N. Denisenko, N.F. Kovalev, E.A. Kopelovich, A.V. Savel'ev, E.I. Soluyanov, M.I. Fuks, V.V. Yastrebov, Tech. Phys., **44** (11), 1356 (1999). DOI: 10.1134/1.1259523].
- [18] ANSYS Electromagnetic Suite 2022 R2 [Электронный ресурс]. <http://www.ansys.com>

-
- [19] О.С. Милованов, Н.П. Собенин, *Техника сверхвысоких частот* (Атомиздат, М., 1980), с. 132–135.
- [20] R. Xiao, C. Chen, Y. Cao, J. Sun, *J. Appl. Phys.*, **114** (21), 213301 (2013). DOI: 10.1063/1.4840956
- [21] D. Wu, T. Shu, J. Ju, S. Peng, *Rev. Sci. Instrum.*, **86** (8), 084706 (2015). DOI: 10.1063/1.4929869