

11

## **Волноводная антенна с расширенным угловым диапазоном для дистанционного управления направлением волнового пучка**

© Д.И. Соболев, Г.Г. Денисов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия  
E-mail: nrtnm@mail.ru

Поступило в Редакцию 30 июня 2016 г.

В окончательной редакции 17 ноября 2017 г.

Предложен новый метод увеличения углового диапазона волноводной антенны для дистанционного управления направлением волнового пучка в экспериментальных установках термоядерного синтеза с магнитным удержанием плазмы. За счет использования синтезированного профиля волновода переменного сечения возможно улучшение характеристик для больших углов наклона пучка. При этом характеристики для малых углов остаются неизменными, а профиль волновода слабо отличается от регулярного и может быть вписан в ограниченные размеры волноводных каналов.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.05.45710.16391

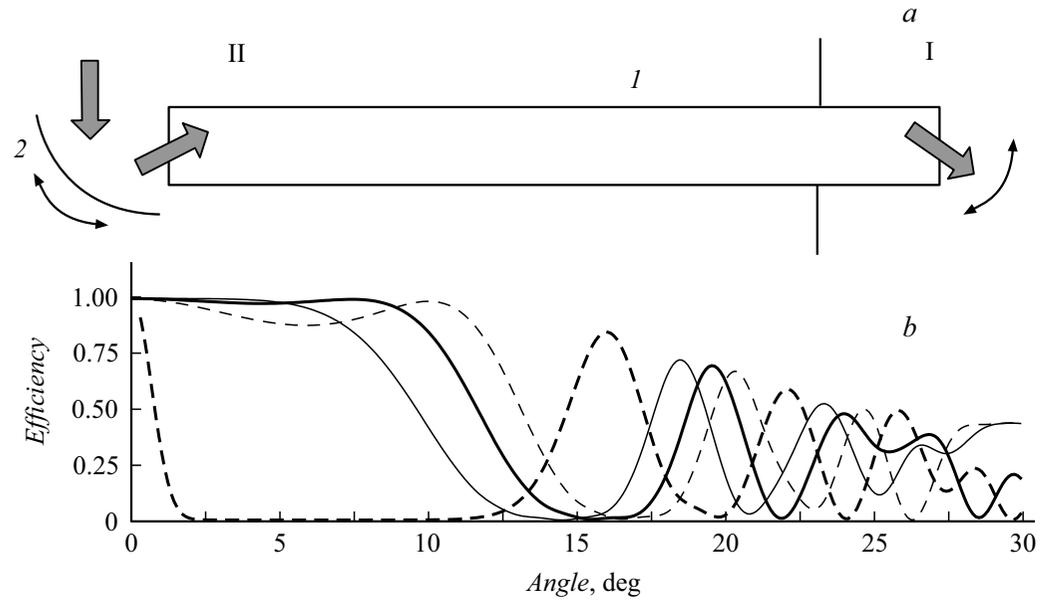
Для систем электронно-циклотронного нагрева и генерации тока установок управляемого термоядерного синтеза, таких как W-7X и DEMO, актуальна проблема ввода излучения в плазменную камеру с различными направлениями пучка. Традиционные системы с подвижными зеркалами непосредственно внутри камеры трудны в обслуживании и могут быть ненадежными при длительной эксплуатации. В качестве альтернативы ранее была предложена и исследована применительно к установкам управляемого термоядерного синтеза концепция дистанционного управления направлением пучка СВЧ-излучения („remote steering“), основанная на повторении поперечного распределения поля в квазиоптических волноводах определенной длины из-за эффекта Тэлбота [1–8]. В системе с дистанционным управлением (рис. 1, а) поворотное зеркало, расположенное снаружи, обеспечивает ввод пучка

нужного направления в волноводную антенну, из выходного среза которой внутрь камеры выходит повторенный пучок. Такая конструкция не предполагает размещения движущихся частей рядом с плазмой, однако недостатком разработанных к настоящему времени волноводных антенн является ограниченный допустимый угловой диапазон наклона пучка. В настоящей работе предложен метод увеличения эффективности при больших углах наклона с использованием волновода переменного сечения.

Рассмотрим повторение поля в сверхразмерном волноводе квадратного сечения  $a \times a$ . Для монохроматического излучения с волновым числом  $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$  волновод называется сверхразмерным или квазиоптическим, если соблюдается соотношение  $a \gg \lambda$ . Для низких ТЕ-мод в гладком волноводе и для низких мод обеих поляризации в гофрированном волноводе с глубиной гофрировки  $\lambda/4$  продольное волновое число может быть приближенно записано с помощью первых членов ряда Тэйлора [2,4]

$$h_{m,n} = \sqrt{k^2 - g_{m,n}^2} \approx k - \frac{\pi^2(m^2 + n^2)}{2ka^2} - \frac{\pi^4(m^2 + n^2)^2}{8k^3a^4} \dots, \quad (1)$$

где  $g_{m,n}$  — поперечное волновое число,  $m$  и  $n$  — вертикальный и горизонтальный индексы соответственно. Возьмем некоторую пару мод и рассмотрим набег фаз между ними после прохождения участка волновода некоторой длины. Оставив первые два члена в (1), получим, что разность фаз пропорциональна  $2\pi$  после участка длиной  $L_0 = 8a^2/\lambda = 4ka^2/\pi$  для любой пары мод, что соответствует повторению поперечного распределения поля (второе повторение). Для половины этой длины  $L_1 = L_0/2$  набег фазы будет пропорционален  $2\pi$  для мод одной четности и пропорционален  $\pi$  с нечетным коэффициентом для мод разной четности, что соответствует распределению поля после отражения от двух перпендикулярных плоскостей, параллельных стенкам волновода (первое повторение). Для волнового пучка с симметричным распределением амплитуды это означает только смену направления: угол между направлением распространения и осью волновода меняет знак, оставаясь неизменным по модулю (пучок с обратным наклоном). Следующие члены в (1) влияют на набег фазы между модами и делают эффект повторения поля приближенным; таким образом, эффективность повторения снижается с увеличением мощности высоких мод в разложении входного поля. Для наклонного гауссова пучка



**Рис. 1.** *a* — схема дистанционного управления направлением волнового пучка: I — внутренний объем плазменной камеры, II — наружный объем, *I* — волноводная антенна, 2 — поворотное зеркало. Выходящий из волновода пучок имеет наклон, обратный наклону входного, что соответствует первому повторению. *b* — эффективность повторения гауссова волнового пучка в регулярном волноводе квадратного сечения. Тонкая сплошная линия соответствует пучку обратного наклона и длине волновода, равной длине первого повторения  $L_1$ , жирная сплошная линия — обратному наклону и  $0.99L_1$ , жирная штриховая линия — входному наклону и  $0.99L_1$ , тонкая штриховая линия — обратному наклону и  $0.983L_1$ .

качество повторенного пучка на длине  $L_1$  приемлемо до угла наклона  $\varphi = 12^\circ$  [9–12]. Оптимальная длина для повторения уменьшается с увеличением угла наклона. Таким образом, использование чуть более короткого волновода позволяет увеличить эффективность на больших углах за счет небольшого уменьшения эффективности на малых. Кроме того, несколько участков относительно большой, хотя и недостаточной для практического использования эффективности есть и при больших углах наклона (рис. 1, *b*).

Для модельного волновода были выбраны параметры, примерно соответствующие используемым в экспериментальных установках термоядерного синтеза: частота  $f = 170$  GHz, размер сечения волновода  $a = 5.08$  см, поперечный размер пучка  $w = 9$  mm. Вертикально наклоненный входной гауссов пучок с поперечным размером около  $0.18a$  содержит 97% мощности в 5–6 модах с последовательными вертикальными индексами и горизонтальным индексом, равным единице. Более широкие пучки значительно „обрезаются“ по краям входным сечением волновода, а пучки меньшей ширины имеют более широкий спектр разложения по модам, что также ведет к более низкой эффективности повторения. Графики эффективности для регулярных (цилиндрических) волноводов разной длины приведены на рис. 1, *b*. По сравнению с волноводом длиной  $L_1$  более короткий волновод имеет несколько меньшую эффективность при угле наклона менее  $5^\circ$ , но угловой диапазон с эффективностью более 80% при этом расширяется с 8 до  $10.5^\circ$ . Дальнейшее уменьшение длины не только увеличивает провал графика эффективности при малых углах наклона ( $3–5^\circ$  для  $L = 580$  см на рис. 1, *b*), но и уменьшает эффективность во втором ее максимуме (расположенном в районе  $7–8^\circ$  при  $L = 580$  см на рис. 1, *b*). Более короткие волноводы имеют еще меньшую эффективность во втором максимуме: она составляет только 90% при длине  $0.95L_1 = 556.1$  см, а сам максимум достигается при угле пучка  $18^\circ$ . Существующие методы расширения углового диапазона, связанные с изменением эффективной длины волновода в зависимости от угла наклона пучка, такие как оптимизированная входная оптика [10], ограничены сверху приблизительно таким значением угла. Следует также отметить, что расходимость исходного пучка, имеющего полуширину  $4^\circ$ , близка к расстоянию между локальными максимумами эффективности при больших углах.

Для улучшения эффективности при больших углах наклона используется волновод переменного сечения, профиль которого получен с

использованием специального итерационного метода синтеза поверхности волновода [13–15], модифицированного с учетом выбранного типа нерегулярности поверхности волновода в данной задаче. Оказалось, что, используя всего два расчета распределения поля на итерацию, можно выразить в первом приближении связь изменения эффективности волноводного преобразователя с изменением формы его поверхности. Замкнутая поверхность, определяющая волновод, состоит из заданного входного сечения  $S_1$ , заданного выходного сечения  $S_2$  и исходной (до итерации) проводящей поверхности стенок  $S_0$ . На каждой итерации внутри волновода рассчитываются два распределения электромагнитного поля: первое с использованием заданных входных полей  $E_1$  и  $H_1$  в качестве граничного условия, а второе с использованием развернутых внутрь волновода желаемых выходных полей  $E_2$  и  $H_2$ . Малая гладкая деформация стенок волновода меняет эффективность преобразования входного поля в выходное (взаимную мощность)  $P$  в соответствии с формулами

$$\Delta P = \int_{S_0} l F dS, \quad F = -ik(\mathbf{H}_{\tau 1} \mathbf{H}_{\tau -2} + E_{n1} E_{n-2}), \quad (2)$$

где  $\tau$  и  $n$  означают тангенциальную и нормальную компоненты поля на стенке соответственно. Для увеличения эффективности на  $\Delta P$  при одновременной минимизации нормы величины деформации стенок волновода  $\int_{S_0} l^2 dS$  деформация принимает вид

$$l = \alpha \operatorname{Re} F + \beta \operatorname{Im} F, \quad (3)$$

где константы  $\alpha$  и  $\beta$  выражаются через  $\Delta P$  и поверхностные интегралы от функции  $F$  [13].

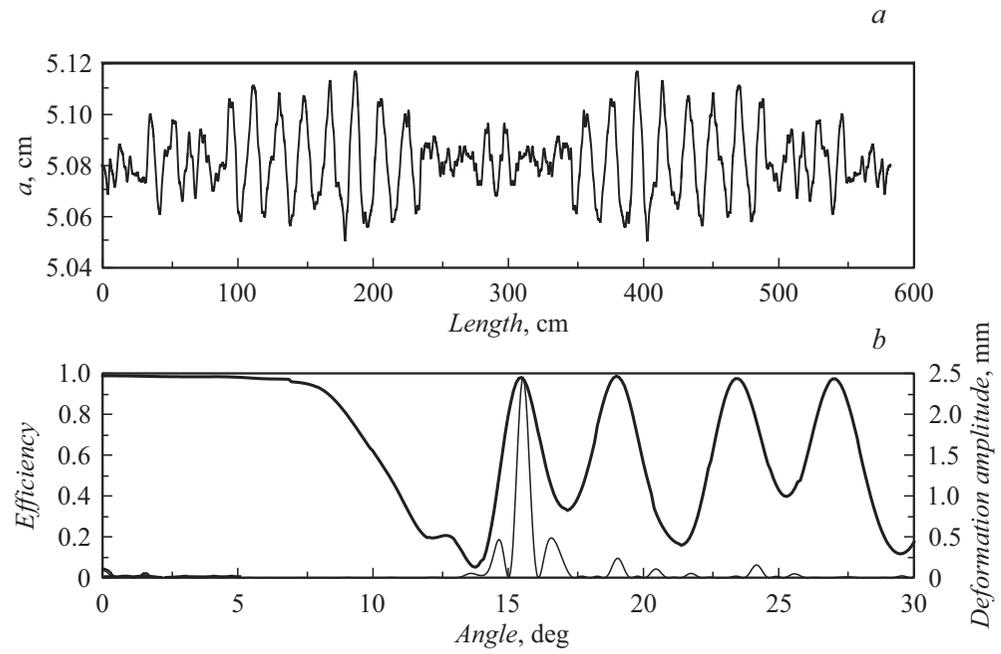
Существуют некоторые ограничения на возможные варианты деформации поверхности волновода. Во-первых, величина отклонения от исходной поверхности должна быть достаточно малой, чтобы не мешать установке, как правило, в достаточно тесные габариты волноводных каналов. Во-вторых, изготовление волноводов с поперечным сечением изогнутой формы представляется существенно более сложным, поэтому во всех сечениях волновод остается прямоугольным. Для обеспечения симметричной характеристики для положительных и отрицательных углов наклона пучка была использована симметричная деформация

пары противоположных стенок: изменяется только вертикальный размер волновода при сохранении прямой оси и постоянного горизонтального размера. По-видимому, при данных ограничениях невозможно синтезировать профиль волновода, обеспечивающий постоянную высокую эффективность во всем желаемом диапазоне, но достижения высокой эффективности для нескольких довольно близко расположенных углов может быть достаточно для практического применения в будущих установках управляемого термоядерного синтеза. Длина синтезированного волновода была выбрана равной 582.6 см, что является оптимальным для повторения пучка с наклоном в  $5^\circ$  и практически не дает провала эффективности на меньших углах. В регулярном волноводе существует несколько локальных максимумов эффективности, которые расположены достаточно близко друг к другу:  $19^\circ$ ,  $23.5^\circ$  и  $27.3^\circ$ . В синтезированном волноводе также максимизировалась эффективность для этих значений угла. Поскольку для большинства направлений выходной пучок имеет обратный наклон, было также выбрано значение угла  $15.5^\circ$ , исходная эффективность на котором для пучка обратного наклона практически нулевая. Это позволяет избежать переключения выходного пучка между положительным и отрицательным углом при постепенном увеличении наклона входного пучка. Для одновременного увеличения эффективности на нескольких углах соответствующие пары полей рассчитывались на каждой итерации и вместе использовались для определения деформации поверхности.

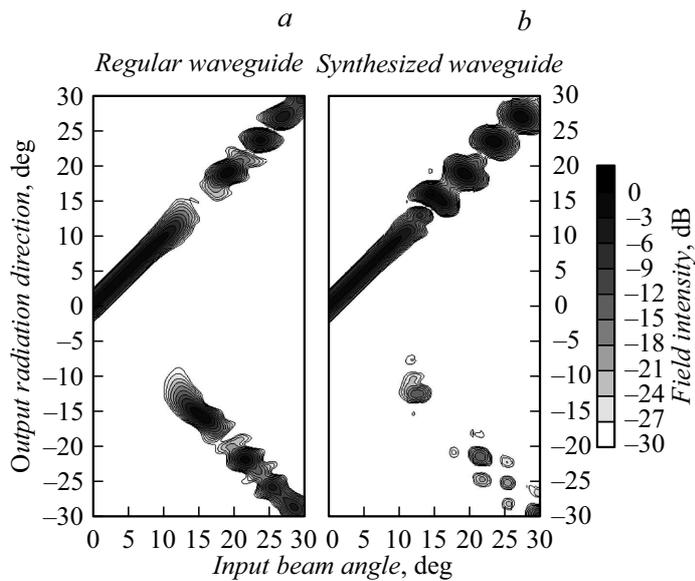
Синтезированный профиль волновода близок к регулярному: максимальное отклонение находится в пределах  $\pm 4$  мм (рис. 2, *a*). Этого должно быть достаточно, чтобы не вызвать проблем с установкой без расширения каналов. Эффективность для каждого из выбранных значений угла наклона превышает 98% (рис. 2, *b*, жирная линия). Мы также проанализировали зависимость размера волновода от продольной координаты при помощи преобразования Фурье и выразили образ через угол наклона пучка (рис. 2, *b*, тонкая линия) в соответствии с уравнением

$$k_{\parallel} a = 2\pi \sin \varphi, \quad (4)$$

где  $k_{\parallel}$  — продольное волновое число симметричной поверхности волновода, а  $\varphi$  — угол наклона пучка с наиболее эффективным брэгговским взаимодействием. Из рисунка видно, что наиболее существенная деформация требуется для компенсации очень низкой эффективности



**Рис. 2.** Характеристики синтезированного волновода: *a* — зависимость вертикального размера от продольной координаты, *b* — зависимость эффективности от угла наклона волнового пучка (жирная линия) и амплитуда деформации, потребовавшейся для оптимизации эффективности в данном направлении (тонкая линия).



**Рис. 3.** Диаграммы излучения регулярного (а) и синтезированного (б) волноводов.

около  $15.5^\circ$ . Для всех остальных углов требуется амплитуда нерегулярности не больше миллиметра. Модовый состав в промежуточных сечениях волновода на единицы процентов отличается от разложения исходного пучка, за исключением пучков с наклоном около  $15.5^\circ$ , где появляется по одной моде с каждого края исходного диапазона вертикальных индексов.

Как видно из рисунков, эффективность синтезированного профиля на малых углах не отличается от исходной, что позволяет использовать предложенный метод в сочетании с некоторыми другими, например с оптимизированной входной оптикой [10]. Характеристики при наклоне пучка в горизонтальной плоскости также остались без изменений. Они могут быть улучшены аналогичным образом, но это потребует деформации второй пары стенок волновода. Следует также отметить, что области около локальных минимумов эффективности для синтезированного волновода имеют существенно отличающуюся от регулярного

волновода диаграмму излучения (рис. 3). Если для последнего при постепенном увеличении наклона пучка происходит частое переключение между положительным и отрицательным направлениями, то синтезированный волновод излучает в основном в направлениях, совпадающих с соседними максимумами эффективности, причем чем ближе угол входного пучка к углу данного максимума, тем большая доля мощности излучается в его направлении. Были также проведены дополнительные расчеты для определения чувствительности синтезированного профиля к погрешностям изготовления. Эффективность в максимумах остается заметно выше 95% при среднем размере сечения волновода в пределах  $50.8 \pm 0.025$  mm.

Таким образом, использование синтезированного профиля волноводной антенны позволяет существенно расширить угловой диапазон наклона волнового пучка в системе дистанционного управления его направлением. Для распространенной частоты 170 GHz и размера сечения волновода около 5 см получено несколько областей с эффективностью до 98%, что расширяет доступный диапазон до  $28^\circ$  без потерь эффективности при малых углах.

## Список литературы

- [1] *Talbot H.F.* // *Phil. Mag.* 1836. V. 9. N 56. P. 401–407.
- [2] *Rivlin L.A., Shul'dyaev V.S.* // *Radiophys. Quantum Electron.* 1968. V. 11. N 4. P. 318–321.
- [3] *Bryngdahl O.* // *J. Opt. Soc. Am.* 1973. V. 63. N 4. P. 416–419.
- [4] *Ulrich R.* // *Opt. Commun.* 1975. V. 13. N 3. P. 259–264.
- [5] *Moeller C.P.* // *Proc. 23rd Int. Conf. on infrared and millimeter waves.* Colchester, UK, 1998. P. 116.
- [6] *Kasperek K., Gantenbein G., Plaum B., Wacker R., Chirkov A.V., Denisov G.G., Kuzikov S.V., Ohkubo K., Hollmann F., Wagner D.* // *Nucl. Fus.* 2003. V. 43. N 11. P. 1505–1512.
- [7] *Lechte C., Plaum B., Kasperek W., Zeitler A., Erckmann V., Laqua H., Weissgerber M., Bechtold A., Busch M., Szcapaniak B.* // *Proc. 38th Int. Conf. IRMMW–THz.* Mainz, Germany, 2013. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2013.6665754.
- [8] *Ohkubo K., Kubo S., Kumazawa R., Shimosuma T., Yoshimura Y., Inagaki S., Nakamura Y., Saito K., Seki T., Mutoh T., Watari T., Kasperek W.* // *Proc. of the 20th IAEA Fusion Energy Conf.* Vilamoura, Portugal, 2004. FT/P7-19.

- 
- [9] *Denisov G.G., Kuzikov S.V., Kobayashi N.* // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 2001. V. 22. N 12. P. 1735–1760.
- [10] *Chirkov A.V., Denisov G.G., Kasparek W., Wagner D., Gantenbein G., Haug M., Hollmann F.* // Fus. Eng. Design. 2001. V. 53. N 1-4. P. 465-473.
- [11] *Denisov G.G., Fedorova K.A., Danilov Y.Y., Kuzikov S.V., Shmelev M.Y., Plotkin M.E.* // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 2007. V. 28. N 11. P. 923–935.
- [12] *Kasparek W., Lechte C., Plaum B., Zeitler A., Erckmann V., Laqua H., Weißgerber M., Bechtold A., Busch M., Szczepaniak B.* // EPJ Web Conf. 2015. V. 87. P. 04005 (1–5).
- [13] *Denisov G.G., Kalynova G.I., Sobolev D.I.* // Radiophys. Quant. Electron. 2004. V. 47. N 8. P. 615–620.
- [14] *Sobolev D.I., Denisov G.G.* // Radiophys. Quant. Electron. 2007. V. 50. N 9. P. 720–725.
- [15] *Sobolev D.I., Denisov G.G.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. V. 38. N 10 (Pt 2). P. 2825–2830.