

Д.ф.-м.н. Глущенко А.Г., к.ф.-м.н. Глущенко Е.П.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Российская Федерация

СТИМУЛИРОВАННАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ СЛОИСТЫХ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР

Для канализации энергии электромагнитного излучения в различных диапазонах длин волн используются экранированные волноводные структуры [1]. Хорошо известно, что если поперечные размеры волновода меньше критических значений (обычно сопоставимых с длиной волны) волноводы теряют свойства направляющей системы, становятся запердельными и представляют интерес, в основном, как элементы волноводной техники с высоким волновым импедансом [2]. Это позволяет, в частности, использовать металлические пластины с отверстиями, размеры которых существенно меньше длины волны излучения в качестве экранов микроволнового излучения, обеспечивая визуальный доступ к области излучения. О некоторых новых направлениях и возможностях использования запердельных волноводов в субволновой технике сообщалось в [3; 4]. Анализ показывает, что наличие в полости запердельного волновода усиливающей среды любой физической природы приводит к качественному изменению свойств структуры: волновод теряет свойство запердельности, наблюдается эффект стимулированной внешним источником энергии прозрачности волноводной структуры.

Пусть в прямоугольном волноводе с идеальными металлическими стенками находятся усиливающая среда в области $0 \leq x \leq d$ с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_1 = \varepsilon_1' + i\varepsilon_1''$ ($\varepsilon_1'' > 0$ – параметр усиления среды) и в области $d \leq x \leq a$ однородный изотропный диэлектрик с потерями $\varepsilon_2 = \varepsilon_2' + i\varepsilon_2''$, ($\varepsilon_2'' < 0$), $\mu_1 = \mu_2 = 1$. Широкая стенка волновода параллельна оси $0x$ и равна a , узкая стенка параллельна оси $0y$. Рассмотрим H_{m0} – волны ($\partial/\partial y = 0$), распространяющиеся вдоль оси $0z$ волновода. С учетом граничных условий на

боковых металлических стенках волновода: $E_{y1}(x=0) = E_{y2}(x=a) = 0$ решение ищется в виде:

$$E_{y1} = A \cdot \sin k_{x1} x \cdot \exp[i(\omega t - k_z z)], \quad E_{y2} = B \cdot \sin k_{x2}(a-x) \cdot \exp[i(\omega t - k_z z)],$$

$$\text{где } k_{x1} = \sqrt{k_0^2 \varepsilon' \mu + i k_0^2 \varepsilon'' \mu - k_z^2}, \quad k_{x2} = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_2 \mu - k_z^2}.$$

Учет граничных условий в плоскости раздела сред $x = d$:

$$E_{y1}(x=d) = E_{y2}(x=d), \quad H_{z1}(x=d) = H_{z2}(x=d)$$

позволяет представить дисперсионное уравнение структуры в виде:

$$k_{x1} \operatorname{ctg} k_{x1} d + k_{x2} \operatorname{ctg} k_{x2} (a-d) = 0,$$

где постоянная распространения имеет комплексные значения $k_z = k'_z + i k''_z$. Решение дисперсионного уравнения обычно ищется численными методами. Для запердельных длин волн $0 < |k_{x1} d| < \pi$, $0 < |k_{x2} (a-d)| < \pi$ и для основной волны можно, используя разложение: $\operatorname{ctg} x \approx 1/x - x/3 - \dots$, получить приближенное решение в виде:

$$k_z \approx k_0 \sqrt{\varepsilon'_1 \frac{d}{a} + \varepsilon'_2 \left(1 - \frac{d}{a}\right) - \frac{3}{k_0^2 d(a-d)} + i \left[\varepsilon''_1 \frac{d}{a} + \varepsilon''_2 \left(1 - \frac{d}{a}\right) \right]}.$$

Частично заполненные волноводы с усиливающими средами могут использоваться для передачи и усиления электромагнитных волн при одновременном выполнении соотношений:

$$\varepsilon'_1 \frac{d}{a} + \varepsilon'_2 \left(1 - \frac{d}{a}\right) - \frac{3}{k_0^2 d(a-d)} < 0 \text{ и } \varepsilon''_1 \frac{d}{a} + \varepsilon''_2 \left(1 - \frac{d}{a}\right) > 0.$$

Первое соотношение является условием запердельности волновода. Критическая длина волны:

$$\lambda_{cr} \approx 2\pi \sqrt{\frac{d(a-d)}{3} \left[\varepsilon'_1 \frac{d}{a} + \varepsilon'_2 \left(1 - \frac{d}{a}\right) \right]}.$$

Выполнение второго соотношения обеспечивает усиление. Параметр

$$\varepsilon''_{eff} = \varepsilon''_1 \frac{d}{a} + \varepsilon''_2 \left(1 - \frac{d}{a}\right)$$

можно рассматривать как эффективный параметр, характеризующий величину усиления комбинированной среды. Для компенсации диссипации энергии и усиления необходимо, чтобы $\varepsilon_1'' > \frac{a-d}{d} |\varepsilon_2''|$. С практической точки зрения важно, что это соотношение может быть легко реализовано в структурах, которые можно изготовить методами пленочной технологии. До настоящего времени пленочная технология несмотря на перспективность ее использования не нашла широкого применения в технологии производства волноводной техники. Это связано, прежде всего, с малым влиянием пленок на параметры волноводных устройств и, как следствие, неэффективности управления параметрами устройств пленочными элементами. На рис.1 показаны дисперсионные характеристики волновых чисел H_{10}, H_{20}, H_{30} волн волновода, заполненного усиливающей средой типа $GaAs, Al_{0.15}Ga_{0.85}As, AlAs$ и т.п.). Запретельные области длин волн для трех мод полностью заполненного волновода расположены в областях $\lambda/2a > \varepsilon/\sqrt{m}$.

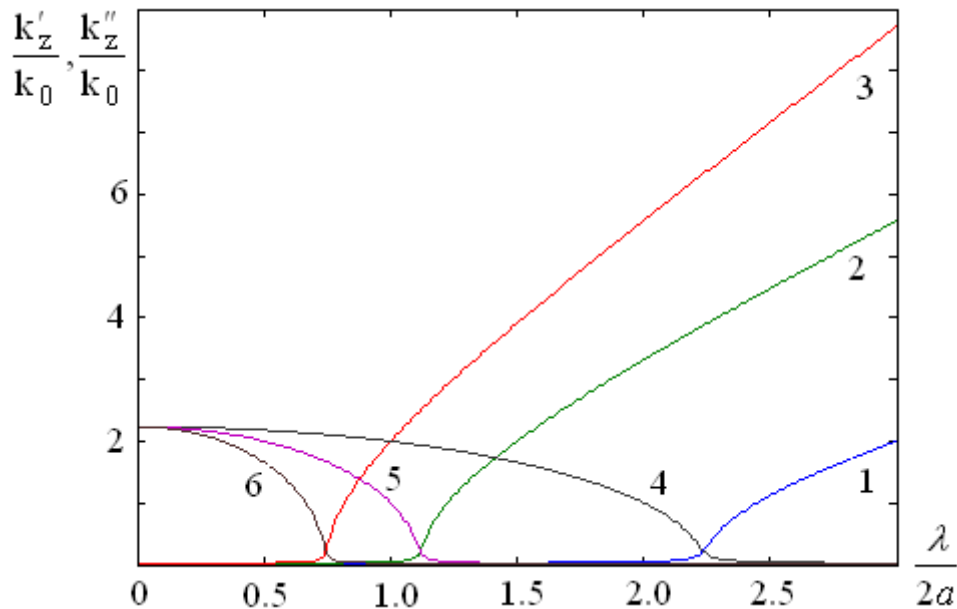


Рис. 1. Дисперсионные характеристики волн H_{mn} в прямоугольном волноводе с активной средой ($a = 2b, \varepsilon = 5,0 + i0,1, H_{10}-1, H_{20}-2, H_{30}-3 - k_z''/k_0, H_{10}-4, H_{20}-5, H_{30}-6 - k_z'/k_0$)

С ростом длины волны, превышающей критическое значение $\lambda > \lambda_{cr}$ для каждой моды коэффициент усиления в запердельной области частот возрастает для всех типов волн, а также с увеличением индекса моды. Эти свойство характерно для экранированных волноводов и других форм поперечного сечения.

Полученные результаты показывают, что металлические сетчатые экраны микроволнового излучения, которые можно рассматривать как совокупность волноводных структур запердельных размеров, при попадании в их полость сред с усиливающими на рабочих частотах параметрами, теряют свойства экранирования и становятся прозрачными для электромагнитных волн. В этом случае наблюдается свойство индуцированной внешними источниками энергии прозрачности структуры. Это обстоятельство необходимо учитывать, в частности, при разработке экранов электромагнитного излучения.

Список использованных источников:

1. Барыбин А.А. Электродинамика волноведущих структур. Теория возбуждения и связи волн / А.А. Барыбин. – М.: Физматлит, 2007. – 512 с.
2. Макеев Ю.Г. Собственные электромагнитные колебания в резонаторах на запердельных волноводах / Ю.Г. Макеев, А.П. Моторненко // ЖТФ. – 1999. – Т. 64. – № 4. – С. 84–88.
3. Кузнецова Т.И. Структура световых волн в волноводе, сужающемся до субволновых поперечных размеров / Т.И. Кузнецова, В.С. Лебедев // Квантовая электроника. – 2002. – Т. 32. – № 8. – С. 727–737.
4. Глущенко А.Г. Запердельные волноводные структуры и среды с усилением / А.Г. Глущенко, Е.П. Захарченко. – Самара: Сам НЦ РАН, 2009. – 170 с.