

06;07;12

ЗАТУХАНИЕ СВЯЗАННЫХ МОД ПОГЛОЩАЮЩИХ ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДОВ

© Д.И.Семенцов, А.М.Шутый

В большинстве используемых планарных волноводов потери, связанные с оптическим поглощением в материале пленки, незначительны и, как правило, не учитываются при теоретическом анализе. Однако в волноводах, выполненных на основе феррит-гранатовых пленок, поглощение в ближнем ИК диапазоне составляет $\alpha \sim 1-10 \text{ см}^{-1}$, что не всегда можно считать малым [1,2]. В литературе главным образом исследуется влияние поглощения на затухание ТЕ и ТМ мод скалярного волновода без учета их взаимодействия [3-5]. В настоящей работе на основе метода связанных волн рассматривается преобразование волноводных мод в поглощающем волноводе, приводящее к неперриодическому обмену энергией между модами, не исследованному до сих пор.

Электрическое поле в волноводе с возмущенной диэлектрической проницаемостью представляется в виде разложения по полному набору собственных мод невозмущенного волновода:

$$E(x, z) = \sum_{\nu} A_{\nu}(z) \mathcal{E}_{\nu}(x) \exp[-i(\beta'_{\nu} - i\beta''_{\nu})z], \quad (1)$$

где $A_{\nu}(z)$ — амплитуда ν -й моды, зависящая от координаты вдоль волновода в результате межмодового перехода энергии в возмущенном волноводе. Профильные функции $\mathcal{E}_{\nu}(x)$ нормированы на единичную мощность вводимого в волновод излучения и определяют распределение поля по толщине волновода. Мнимая часть постоянной распространения определяет затухание энергии ν -й моды при отсутствии межмодовой связи, а именно $\alpha_{\nu} = 2\beta''_{\nu}$.

Только две моды из полного набора обладают достаточным фазовым синхронизмом, обеспечивающим значительную модовую связь. Выражения для амплитуд связанных мод при выполнении граничных условий $A_{\mu} = A_{\mu}(0)$, $A_{\nu} = 0$ при $z = 0$ имеют следующий вид [6,7]:

$$A_{\mu}(z) = A_{\mu}(0) \left(\cos \chi z - \frac{i\Delta}{\chi} \sin \chi z \right) \exp [i(\Delta - \Delta\beta_{\mu} + i\beta''_{\mu})z],$$

$$A_{\nu}(z) = iA_{\mu}(0) \frac{\gamma^{**}}{\chi} \sin \chi z \exp [-i(\Delta + \Delta\beta_{\nu} - i\beta''_{\nu})z], \quad (2)$$

где коэффициент связи γ в общем случае определяется соответствующими компонентами тензора возмущения диэлектрической проницаемости $\Delta\epsilon$ слоя толщиной L :

$$\gamma = k_0 \int_0^L \epsilon_{\mu}^* \Delta\epsilon \epsilon_{\nu} dx,$$

где $k_0 = \omega/c$, ω — частота излучения, c — скорость света; $\delta\beta_{\mu,\nu}$ — поправки к постоянным распространения $\beta_{\mu,\nu}$ взаимодействующих мод, обусловленные возмущением; введены также параметры:

$$2\Delta = 2(\Delta' + i\Delta'') = \beta'_{\mu} + \Delta\beta_{\mu} - \beta'_{\nu} - \Delta\beta_{\nu} + i(\beta''_{\nu} - \beta''_{\mu}),$$

$$\chi = (|\gamma|^2 + \Delta^2)^{1/2}.$$

При фазовом синхронизме ($\Delta' = 0$) и достаточно большой разности параметров затухания связанных мод $|\beta''_{\mu} - \beta''_{\nu}| \geq 2|\gamma|$ тригонометрические функции в (2) переходят в гиперболические. В результате будет отсутствовать периодический обмен энергией между модами при распространении в волноводе, имеющий место для прозрачного волновода или в случае малого отличия между модовыми параметрами затухания. При этом интенсивность возбуждаемой ν -й моды $I_{\nu} = |A_{\nu}(z)|^2$ имеет один максимум на длине волновода

$$z_1 = \frac{1}{2\sigma} \ln \left(\frac{\beta''_{\mu} + \beta''_{\nu} + 2\sigma}{\beta''_{\mu} + \beta''_{\nu} - 2\sigma} \right), \quad (3)$$

а интенсивность вводимой μ -й моды I_{μ} имеет один минимум на длине

$$z_2 = \frac{1}{2\sigma} \ln \left(\frac{\Delta'' - \sigma}{\Delta'' + \sigma} \right), \quad (4)$$

где $\sigma = (\Delta''^2 - |\gamma|^2)^{1/2}$ и один максимум на длине z_3 , выражение для которой в общем случае громоздко и здесь не приводится. Существенным является то, что в результате взаимодействия мод изменяется их затухание, определяясь для области волновода $z > z_3$ величиной

$$\alpha_{\mu,\nu} = 2(\beta''_{\mu} + \beta''_{\nu} \pm \sigma). \quad (5)$$

Это позволяет регулировать в известных пределах модовое затухание $\alpha_{\mu,\nu}$ варьированием коэффициента связи. Кроме того, изменением коэффициента связи можно регулировать

суммарную интенсивность $I_\mu + I_\nu$ на выходе волновода, что исключено для связи одинаково поглощаемых мод. Приведенные результаты справедливы также для малой фазовой расстройке $2\Delta' < |\gamma|$.

При условии $\Delta' = 0$ и $\Delta'' = |\gamma|$ выражения для интенсивности мод принимают вид

$$I_\mu = I_0(z\Delta'' + 1)^2 \exp[-(\beta''_\mu + \beta''_\nu)z],$$

$$I_\nu = I_0(z\Delta'')^2 \exp[-(\beta''_\mu + \beta''_\nu)z], \quad (6)$$

где $I_0 = |A_\mu(0)|^2$, а максимумы интенсивности ν -й, μ -й мод и минимум μ -й моды реализуются соответственно на длинах

$$z_1 = 2/(\beta''_\mu + \beta''_\nu), z_3 = 2\beta''_\mu/(\beta''_\mu^2 - \beta''_\nu^2), z_2 = 1/(\beta''_\mu - \beta''_\nu).$$

Если вводимая μ -я мода затухает слабее возбуждаемой, то ее интенсивность не имеет экстремальных значений и монотонно убывает.

Как следует из анализа приведенных соотношений, возможности управления затуханием энергии в волноводе тем значительнее, чем сильнее различаются коэффициенты поглощения мод, при отсутствии межмодовой связи. Для количественной оценки описанного эффекта рассмотрим преобразование типа $TM_1 \leftrightarrow TE_1$ в магнитогириротропном волноводе, представляющем собой феррит-гранатовую пленку на гадолиний-галлиевой подложке с покровным слоем из проводящего материала. Проводящий слой влияет главным образом на поглощение мод, сильно усиливая дихроизм ($\beta''_M = -4.5 \text{ см}^{-1}$ и $\beta''_E = -0.5 \text{ см}^{-1}$), и практически не влияет на остальные параметры мод [3]. Для расчетов использованы следующие параметры волноводной структуры: диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_1 = 3.8$, отличные от нуля диагональные компоненты невозмущенной диэлектрической проницаемости пленки $\epsilon_{yy} = \epsilon_{zz} = 4.5371$, $\epsilon_{xx} = 4.5383$, за возмущенную часть диэлектрической проницаемости приняты зависящие от намагниченности компоненты $\Delta\epsilon_{ij}$ [7]; толщина пленки $L = 6.8 \text{ мкм}$, при которой в рассматриваемом волноводе синхронизированы ($\Delta' \approx 0$) TE_1 и TM_1 моды; магнитооптические параметры пленки $f = 3.07 \cdot 10^{-4}$, $\Delta g = -0.73 \cdot 10^{-4}$, $g_{11} = 5.07 \cdot 10^{-4}$, $g_{44} = 2.4 \cdot 10^{-4}$. Длина волны излучения в вакууме $\lambda = 1.15 \text{ мкм}$. Магнитные проницаемости всех слоев в используемом диапазоне принимаются равными единице.

На рис. 1 для преобразования $TM_1 \rightarrow TE_1$ (а) и $TE_1 \rightarrow TM_1$ (б) приведена зависимость от длины волновода z относительной (нормированной на I_0 — интенсивность

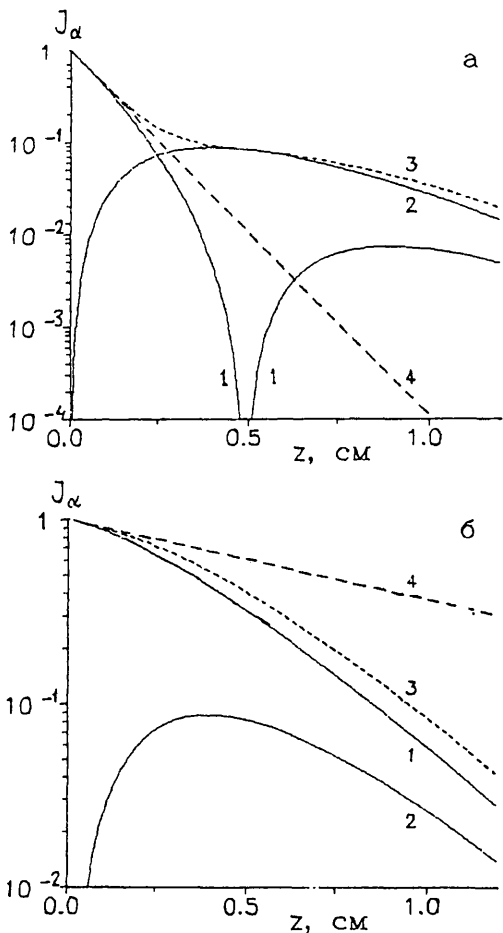


Рис. 1. Зависимость от длины волновода z относительной интенсивности вводимой моды J_μ (кривые 1), возбуждаемой моды J_ν (кривые 2), суммарной интенсивности $J_\mu + J_\nu$ (кривые 3) и интенсивности вводимой моды при отсутствии связи $J_\mu = \exp(-2\beta''_\mu z)$ ($\gamma = 0$, кривые 4) для преобразования $TM_1 \rightarrow TE_1$ (а) и $TE_1 \rightarrow TM_1$ (б).

вводимой моды при $z = 0$) интенсивности вводимой моды $J_\mu(z) = I_\mu(z)/I_0$ (кривые 1), возбуждаемой моды $J_\nu(z)$ (кривые 2), суммарной интенсивности $J_\mu(z) + J_\nu(z)$ (кривые 3) и интенсивности вводимой моды при отсутствии связи $J_\mu(z) = \exp(-2\beta''_\mu z)$ ($\gamma = 0$, кривые 4). Намагниченность лежит в плоскости пленки под углом $\psi = 59^\circ$ к оси z , при котором выполняется условие модового синхронизма ($\Delta' \approx 0$)

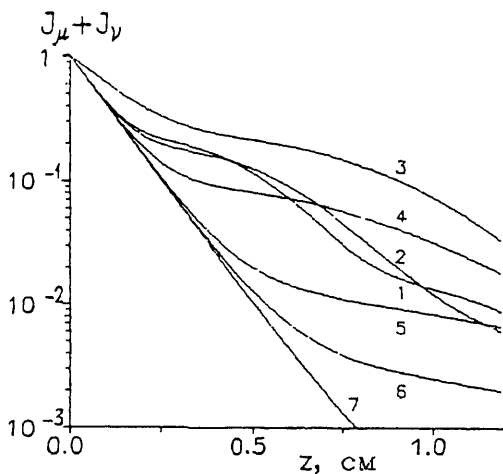


Рис. 2. Зависимость от длины волновода суммарной относительной интенсивности связанных мод для преобразования $TM_1 \rightarrow TE_1$ при различной ориентации магнитного момента в плоскости пленки.

и справедливо равенство $\Delta'' = |\gamma|$. Из приведенных на рис. 1, а зависимостей следует, что интенсивность вводимой, сильно поглощаемой моды при ее взаимодействии с менее поглощаемой модой, пройдя минимальное значение $J_\mu(z_2)$, в дальнейшем затухает значительно медленнее, чем интенсивность собственной μ -й моды. Если вводимая мода поглощается слабее возбуждаемой (рис. 1, б), то модовая связь усиливает ее затухание. При этом суммарная интенсивность в первом случае оказывается больше, а во втором — меньше интенсивности невзаимодействующей моды.

При отклонении намагниченности от угла $\psi = 59^\circ$ фазовый синхронизм нарушается незначительно ($\Delta' = -2.13 \text{ см}^{-1}$ для $\psi = 0^\circ$ и $\Delta' = 0.8 \text{ см}^{-1}$ для $\psi = 90^\circ$), и характер модового взаимодействия в этом случае определяется главным образом соотношением коэффициента связи и разности параметров затухания Δ'' . Меняя коэффициент связи за счет поворота магнитного момента пленки, можно эффективно изменять распространяемую в волноводе суммарную энергию. На рис. 2 показана зависимость от длины волновода суммарной относительной интенсивности мод для преобразования $TM_1 \rightarrow TE_1$ при различной ориентации магнитного момента в плоскости пленки: $\psi = 0, 30, 50, 59, 80, 85, 90^\circ$ соответственно для кривых 1–7. В условиях, близких к фазовому синхронизму связанных мод, наиболее эффективное управление переносимой в волноводе энергией возможно, если коэффициент связи $|\gamma|$ меньше величины

$|\Delta''|$ (кривые 4-7) либо незначительно ее превосходит (кривая 3). При дальнейшем увеличении коэффициента связи (кривые 1, 2), возможности управления энергией волновода посредством изменения величины $|\gamma|$ сильно снижаются и в предельном случае $|\gamma| \gg |\Delta''|$ полностью исчезают, так как энергия двух синхронизированных мод при этом затухает по закону $\exp[-(\beta''_\mu + \beta''_\nu)z]$, определяясь только мнимыми частями постоянных распространения мод. Для больших коэффициентов связи ($|\gamma| \gg |\Delta''|$) изменение затухания полной энергии возможно только значительным увеличением фазовой расстройки Δ' , тогда взаимодействие мод нарушается и переносимая волноводом энергия, оказавшись практически полностью состоящей из энергии вводимой μ -й моды, будет затухать по закону $\exp[-2\beta''_\mu z]$.

Таким образом, в поглощающих планарных волноводах характер связи синхронизированных мод изменяется, если выполняется условие $|\gamma| \lesssim |\Delta''|$. При этом исчезает периодический обмен энергией между модами, затухание самих мод оказывается зависящим от коэффициента связи и становится возможным эффективное управление затуханием поля в волноводе. Описанный эффект может быть использован для создания амплитудных модуляторов излучения на основе поглощающих планарных волноводов.

Список литературы

- [1] Прохоров А.М., Смоленский Г.А., Агеев А.Н. // УФН. 1984. Т. 143. № 1. С. 33-72.
- [2] Рандошкин В.В., Червоноенкис А.Я. Прикладная магнитооптика. М.: Энергоатомиздат, 1990. 319 с.
- [3] Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. М.: Мир, 1984. 512 с.
- [4] Волноводная оптоэлектроника // Под ред. Т. Тамира. М.: Мир, 1991. 575 с.
- [5] Нернер G., Castera J.P., Desormiere B. // Physica 89D. 1977. P. 264-266.
- [6] Семенцов Д.И., Шутый А.М. // ЖТФ. 1995. Т. 65. В. 2. 156-162.
- [7] Семенцов Д.И., Шутый А.М., Иванов О.В. // Радиотехника и электроника. 1996. Т. 41. С. 1-8.

Филиал Московского
государственного университета
им. М.В. Ломоносова
Ульяновск

Поступило в Редакцию
31 января 1996 г.