

## РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ВОЛНОВОДНОГО СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРА ПРИЗМЕННОГО ТИПА

А. В. Шульга

УДК 621.372.8

Белорусско-Российский университет,  
212000, Могилев, просп. Мира, 43; e-mail: ashulga@tut.by

(Поступила 7 мая 2013)

Исследована зависимость разрешающей способности волноводного спектроанализатора на основе призмного устройства возбуждения мод от параметров волноводной структуры. Показано, что предельная разрешающая способность волноводного спектроанализатора определяется отношением хроматической дисперсии волновода к мнимой части постоянной распространения вытекающей моды структуры волновод—призма связи.

**Ключевые слова:** разрешающая способность, призмное устройство связи,  $m$ -линия, планарный волновод, спектроанализатор.

*A resolving power of a spectrum analyzer based on a prism coupler to excite modes in a thin-film waveguide was studied as a function of the waveguide properties. It was shown that the limiting resolving power of the waveguide spectrum analyzer was determined by a ratio of the waveguide chromatic dispersion to the imaginary part of the leaky-mode propagation constant in the waveguide/coupling prism structure.*

**Keywords:** resolving power, prism coupler,  $m$ -line, planar waveguide, spectrum analyzer.

При возбуждении планарного волновода пучком некогерентного излучения для каждой хроматической компоненты формируются моды, для которых структура поля, фазовая скорость распространения и волноводный показатель преломления будут зависеть не только от параметров волноводного слоя, но и от длины волны излучения. Поэтому такое устройство можно использовать для анализа спектрального состава излучения [1—3]. Миниатюрные оптические спектроанализаторы подобного рода представляют интерес при создании датчиков концентрации в химии, биологии и медицине [4]. Разрешающая способность такого спектроанализатора будет определяться наименьшей разностью волноводных показателей преломления мод для соответствующих близлежащих хроматических компонент светового пучка [1].

Возбуждение планарного диэлектрического волновода с помощью призмного устройства связи (ПУС) [5] основано на явлении нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) [6, 7], при котором происходит туннелирование энергии световых волн через среду с меньшим показателем преломления (буферный слой) и толщиной, меньшей длины волны возбуждающего света. Возбуждение волноводных мод возможно при определенных дискретных углах падения светового пучка на основание ПУС, при которых выполняется условие фазового синхронизма для электромагнитной волны, распространяющейся вдоль границы раздела призма связи (ПС)—буферный слой, и моды волноводной структуры. При возбуждении одномодового волновода монохроматическим светом в отраженном свете наблюдается так называемая  $m$ -линия [8]. В случае возбуждения волновода полихроматическим светом в отраженном свете присутствует серия  $m$ -линий, угловое положение которых определяется волноводным показателем преломления  $n_w$  для соответствующей хроматической компоненты светового пучка. Волноводный показатель преломления связан с комплексной постоянной распространения волноводной моды  $h$  соотношением  $n_w = k_0^{-1} \operatorname{Re} h$ , где  $k_0 = 2\pi/\lambda$ .

Угловое распределение интенсивности отраженного от ПУС сходящегося монохроматического светового пучка, приведенное к первоначальному распределению интенсивности при возбуждении моды планарного диэлектрического волновода, представлено на рис. 1. Описание установки и методика регистрации пространственной структуры интенсивности отраженного светового пучка при возбуждении волноводной моды приведены в [3]. Угловая ширина  $m$ -линии зависит от мнимой части постоянной распростра-

## RESOLVING POWER OF A PRISM-TYPE WAVEGUIDE SPECTRUM ANALYZER

A. V. Shulga (Belarusian-Russian University, 43 Mira Prosp., Mogilev, 212000, Belarus; e-mail: ashulga@tut.by)



нения вытекающей моды структуры призма—волновод  $h_s$ , которая в свою очередь определяется мнимой частью комплексной постоянной распространения волноводной моды  $h$  и коэффициентом оптической связи волновода и призмы [9].

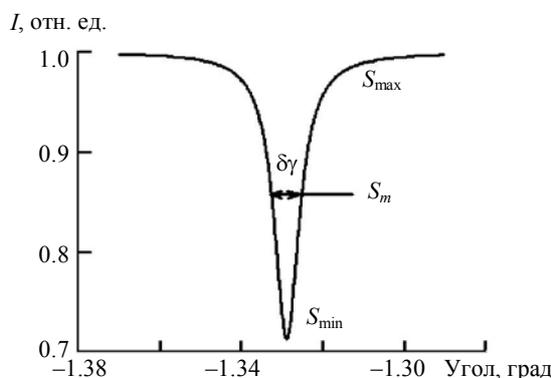


Рис. 1. Угловой спектр  $m$ -линии, соответствующий волноводной моде, возбуждаемой монохроматическим излучением

Разрешающая способность спектрального прибора определяется угловой дисперсией прибора и угловой шириной его аппаратной функции  $\delta\gamma$  [10]:

$$R = (\lambda/\delta\gamma)(d\gamma/d\lambda),$$

где  $d\gamma/d\lambda$  — дисперсия углового положения  $m$ -линии в зависимости от длины волны. В случае спектрального прибора на основе ПУС в качестве аппаратной функции можно рассматривать профиль  $m$ -линии, наблюдаемой в фокальной плоскости объектива при отражении монохроматического света от ПУС. При этом  $\delta\gamma$  равно угловой ширине регистрируемой  $m$ -линии. Когда угловое положение минимума  $m$ -линии совпадает с угловым положением оси симметрии отраженного пучка, распределение интенсивности в его поперечном сечении описывается функцией [9]:

$$S(\gamma) = \frac{(p_1 + 2 \operatorname{Re}|p_2|)^2 + \kappa^2}{p_1^2 + \kappa^2},$$

где  $p_1 = \omega \operatorname{Im} h_s$ ;  $p_2 = -i2\omega \Delta h D(1 - D)^2$ ;  $\kappa = -k_0 n_a \omega_0 (\gamma - \gamma_0)$ ;  $\omega = \omega_0 N(\gamma)$ ;  $D = -i \left( \frac{\epsilon_p}{\epsilon_g} \right)^T \sqrt{\frac{(\operatorname{Re} h)^2 - k_0^2 \epsilon_g}{k_0^2 \epsilon_p - (\operatorname{Re} h)^2}}$ ;

$$N(\gamma) = \frac{\sqrt{1 - (n_a^2/n_p^2) \sin^2 \gamma}}{\cos \gamma \sin \varphi}; \quad \varphi = \arccos(\operatorname{Re} h_s/k_0 n_p); \quad n_a \text{ и } n_p \text{ — показатели преломления окружающей среды и призмы; } \epsilon_p \text{ и } \epsilon_g \text{ — диэлектрическая проницаемость призмы и буферного слоя; } \omega_0 \text{ — радиус пучка.}$$

Угловую ширину  $m$ -линии  $\delta\gamma$  определим как  $\delta\gamma = 2(\gamma_m - \gamma_0)$ , где  $\gamma_m$  — угловая координата, соответствующая значению  $S_m = (S_{\min} + S_{\max})/2$ ,  $\gamma_0$  — угловая координата резонансного минимума. Исходя из того что угловой спектр интенсивности светового пучка предполагается нормированным, а интенсивность энергетического минимума пучка находится при  $\kappa = 0$  (так как  $\gamma = \gamma_0$ ), после несложных преобразований получаем:

$$\delta\gamma = 2 \frac{N(\gamma) \operatorname{Im} h_s}{n_a k_0}. \tag{1}$$

Из (1) явно следует линейная зависимость угловой ширины  $m$ -линии от мнимой части постоянной распространения вытекающей моды структуры волновод—ПС.

Выражение, связывающее волноводный показатель преломления и угловое положение  $m$ -линии относительно выходной грани ПС, имеет вид:

$$n_w(\lambda) = n_p(\lambda) \sin \beta, \tag{2}$$

где  $\beta = \Theta_p - \arcsin \xi$  — угол падения луча на основание ПС;  $\xi = \sin \alpha = (n_a/n_p) \sin \gamma$ ,  $\alpha$  — угол падения отраженного луча на выходную грань ПС. Дифференцируя выражение (2) по длине волны  $\lambda$  и учитывая, что показатель преломления материала ПС зависит от длины волны  $n_p = n_p(\lambda)$ , получаем дисперсию углового положения  $m$ -линии ПУС:



$$\frac{d\gamma}{d\lambda} = \frac{\left( \sin \beta \sqrt{1 - \xi^2} + \xi \cos \beta \right) \frac{dn_p}{d\lambda} - \sqrt{1 - \xi^2} \frac{dn_w}{d\lambda}}{n_a \cos \gamma \cos \beta},$$

и разрешающую способность волноводного спектроанализатора:

$$R = \pi \left( \left( \frac{n_p}{\operatorname{tg} \Theta \sqrt{n_p^2 - n_w^2 - n_w^2}} \right) \frac{dn_p}{d\lambda} - \frac{dn_w}{d\lambda} \right) (\operatorname{Im} h_s)^{-1}. \quad (3)$$

Как следует из выражения (3), разрешающая способность волноводного спектроанализатора зависит от дисперсии материала ПС и волноводного показателя преломления. При этом рост дисперсии ПС приводит к уменьшению разрешающей способности волноводного спектроанализатора. Если для ПУС выполняется условие  $dn_p/d\lambda \cong 0$  или дисперсия материала ПС компенсирована, то из (3) следует

$$R = \pi (dn_w/d\lambda) (\operatorname{Im} h_s)^{-1}. \quad (4)$$

Выражение (4) определяет предельную разрешающую способность волноводного спектрального прибора. Обычно  $R$  всегда меньше, так как зависит от способа и аппаратуры регистрации профиля  $m$ -линии, например разрешающей способности и чувствительности фоторегистрирующего устройства.

Волноводный спектроанализатор призмного типа позволил уверенно разрешить дублет натриевой линии [11]. В качестве волноводного слоя в спектроанализаторе использовался многослойный волновод  $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$  со следующими оптическими характеристиками на  $\lambda = 589$  нм: дисперсия  $dn_w/d\lambda = 0.533 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ , оптические потери  $\operatorname{Im} h/k_0 = 3.94 \cdot 10^{-5}$ . Минимальное расстояние между спектральными линиями, которые можно разрешить с помощью данной тонкопленочной структуры, составляет  $\Delta\lambda = 0.148$  нм, что удовлетворительно согласуется с результатами эксперимента. Из выражения (4) следует, что в случае, когда показатель поглощения волноводного слоя значительно превышает показатель поглощения подложки, разрешающая способность волноводного спектроанализатора увеличивается при переходе к модам высших порядков.

Таким образом, с учетом того что разрешающая способность волноводного спектроанализатора определяется отношением волноводной дисперсии к мнимой части постоянной распространения оптической моды, возбуждаемой в структуре волновод—призма связи, получено выражение, позволяющее оценить предельную разрешающую способность волноводного спектроанализатора. Показано, что его разрешающая способность увеличивается при переходе к модам высших порядков при использовании волноводов, для которых коэффициент поглощения намного превышает коэффициент поглощения подложки.

- [1] А. С. Кузали, А. В. Чекан. Квант. электрон., **3**, № 11 (1976) 2457—2459
- [2] А. В. Шульга, А. В. Хомченко, А. Б. Сотский, Л. И. Сотская. Вестн. МГТУ, **11**, № 2 (2006) 205—213
- [3] А. В. Хомченко, А. В. Шульга, А. Б. Сотский. Способ определения частотного спектра мощности световых пучков и устройство для его осуществления. Патент РБ № 15533 (2012)
- [4] I. Avrutsky, K. Chaganti, I. Salakhutdinov, G. Auner. Appl. Opt., **45**, N 30 (2006) 7811—7817
- [5] А. В. Хомченко. Волноводная спектроскопия тонких пленок, Минск, изд-во Бел. гос. ун-та (2002)
- [6] А. Б. Шварцбург. УФН, **177**, № 1 (2007) 43—58
- [7] Г. Когельник. УФН, **121**, № 4 (1977) 695—726
- [8] Р. К. Тien. Appl. Opt., **10**, N 11 (1971) 2395—2413
- [9] А. Б. Сотский, А. А. Романенко, А. В. Хомченко, И. В. Примак. Радиотехн. и электрон., **44**, № 6 (1999) 687—695
- [10] В. И. Малышев. Введение в экспериментальную спектроскопию, Москва, Наука (1979)
- [11] А. В. Шульга, А. В. Хомченко, В. В. Хомченко. Сб. тез. IX междунар. науч. конф. “Лазерная физика и оптические технологии”, Гродно, 30 мая—2 июня 2012 г., Минск, Ин-т физики (2012) 234

