



## ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ФІЗИЧНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

УДК 535 : 681.7 : 51 PACS 42.70.Gn

### РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ИНТЕРФЕЙСА ОПТОХЕМОТРОННОГО СЕНСОРА

А.А. Гирич, Ю.Т. Жолудов, к.т.н. А.С. Замковой, д.ф.-м.н. Н.Н. Рожницкий

*В работе рассматривается физическая и математическая модели оптоэлектронного интерфейса ОХ-сенсора. Получены геометрические параметры оптического волноведущего клина и проведена оценка возможности его использования в качестве устройства согласования ОХ-сенсора с оптоволокном с малыми потерями. Проведенные исследования применены к вопросу выявления параметров и процессов, относящихся к созданию оптоэлектронного интерфейса ОХ-сенсора повышенной эффективности для анализа различных объектов.*

**Постановка задачи и анализ литературы.** Оптохемотронные устройства представляют собой класс устройств жидкофазной оптоэлектроники, работа которых основана на явлении электрохимической люминесценции (ЭХЛ). Электрохимическая люминесценция представляет собой люминесценцию, возбуждаемую неоптически за счет последовательности электрохимических и рекомбинационных процессов в оптохемотронном (ОХ) устройстве при подаче на него напряжения (электролизе) [1]. Данное явление положено в основу анализа в биологии, медицине, экологии, сельском хозяйстве и других областях. С появлением нанотехнологий широкое распространение получили миниатюрные датчики-сенсоры. Их возможности и свойства описаны в литературе [2 – 4].

Конструкция подобного ОХ-сенсора рассмотрена в [5]. Ее особенностью является наличие тонкой молекулярной пленки, закрепленной на поверхности рабочего электрода, который является катодом. Последний модифицируется молекулами электрохемилуминофора-реагента с по-

мощью технологии Ленгмюра-Блоджетт (ЛБ) [6] и фактически представляет собой электрод-датчик сенсора. В объеме ячейки находится аналит – вещество, подлежащее анализу с концентрацией  $c_a$ . Модификация рабочего электрода дает возможность повысить вероятность рекомбинации между катион- и анион-радикалами реагента и аналита, а значит, и обеспечить максимальную интенсивность выходного аналитического ЭХЛ-сигнала  $I_{\text{ЭХЛ}} = f(c_a)$ . Это напрямую обеспечивает высокие метрологические характеристики анализа. В качестве реагента могут выступать такие вещества, как 9,10-дифениантрацен, тетрацен, рубрен, хелаты рутения, что обуславливается рядом причин, наиболее важной из которых является высокая вероятность выхода возбужденных синглетных состояний реагента в результате рекомбинации его ион-радикалов с ион-радикалами аналита по сравнению с другими органическими электрохемилюминофорами.

Для разработки эффективного оптоэлектронного интерфейса необходимо иметь информацию о сложных процессах, протекающих в нем. Наряду с экспериментальными данными необходимо проводить и моделирование процессов в устройстве согласования. Отличительной особенностью рассматриваемой задачи является конструкция сенсора с электродами, модифицированными пленками ЛБ, и оптическим волноведущим клином (его волноведущий слой (сердцевина) выполнена с большим коэффициентом преломления, чем покрывающие его слои (оболочка)), что существенно изменяет природу и механизм процессов, протекающих в сенсоре, и условия передачи и регистрации оптического сигнала.

**Цель работы.** Целью данной работы является разработка математической и физической моделей процессов, протекающих в оптоэлектронном интерфейсе ОХ-сенсора и проведение моделирования.

**Физическая модель.** Начальной стадией ЭХЛ-процесса является подача напряжения на электроды ОХ-ячейки, что приводит к последовательности электрохимических и рекомбинационных процессов с образованием эмиттеров ЭХЛ и возникновению оптического сигнала, поступающего с ОХ-сенсора на устройство оптического сопряжения – оптический клин (далее просто клин).

Далее за счет эффекта полного внутреннего отражения происходит переотражение света от внутренних граней клина и подача его в оптическое волокно. Клин используется в качестве узла оптического сопряжения между ОХ-сенсором и оптоволоком для его передачи в фотоприемник.

Рассмотрим подробнее осуществление оптического контакта между клином и ОХ-сенсором. Такое согласование аналогично случаю согласования планарного волновода с оптоволоком, рассмотренному в ра-

боте [7]. Для этого необходимы оптические переходы, обеспечивающие малые потери оптической мощности или преобразовании излучения в другие, нежелательные моды утечки. Эти переходы должны разрабатываться таким образом, чтобы согласовывать распределения полей в соединяемых оптических элементах.

Характеристики волноводных переходов ухудшаются при взаимодействии мод и возникновении поля излучения. В регулярном волноводе все моды распространяются независимо друг от друга, однако в плавном переходе изменение поперечного сечения связывает моды друг другом и с полем излучения. В одномодовых структурах основная мода связана с полем излучения и теряет энергию на излучение из волновода. Если структура направляет несколько мод, они также обмениваются мощностью в процессе взаимодействия. Основная мода при этом теряет мощность на паразитные моды. Взаимодействие мод описывается уравнением связанных волн. Их решение дает мощность потерь на преобразование волн. Чтобы потери энергии не превышали определенной допустимой величины, переход должен изменять свои размеры и форму очень плавно, а также связывать регулярные волноводы без излома профиля. В таких условиях длинные и плавные переходы почти не имеют потерь на излучение и преобразование мод. Они могут удобно встраиваться в оптические системы, потому что при микроскопических размерах поперечных сечений волноводов даже относительно длинные переходы все же остаются весьма малыми по своей длине.

Плавный переход от ОХ-сенсора к клину будет преобразовывать каждую волноводную моду клина в соответствующую моду ОХ-сенсора. Если переход длинный и достаточно плавный, взаимодействия между модами практически нет, поэтому мощность, вводимую в одну конкретную моду клина, будет полностью преобразована в соответствующую моду ОХ-сенсора.

**Математическая модель.** Рассмотрим математическую модель оптоэлектронного интерфейса. Связь поперечного фазового параметра и любой частной моды с ее углом распространения осуществляется согласно выражению [7]

$$u = n_1 k a \sin \theta, \quad (1)$$

где  $n_1$  – показатель преломления сердцевинки клина;  $k$  – волновое число;  $a$  – радиус волновода.

Для всех мод в клине с большим значением нормировочной частоты параметр  $u$  остается почти постоянным вдоль перехода. Следовательно, по мере роста радиуса вдоль перехода угол  $\theta$  должен уменьшаться. Для перехода от радиуса  $a_1$  к радиусу  $a_2$  получаем

$$a_1 \sin \theta_1 = a_2 \sin \theta_2, \quad (2)$$

где  $2a_1$  – входная апертура клина;  $2a_2$  – выходная апертура клина;  $\theta_1$  – угол ввода излучения в клин. Угол  $\theta_1$  не превышает предельного угла  $\theta_c$  полного внутреннего отражения на границе сердцевина – оболочка. Согласно этому основному закону, все волноводные моды клина с углом распространения  $\theta_1 < \theta_c$  трансформируются вдоль оси системы в соответствующие моды ОХ-сенсора с углами распространения

$$\theta_1 < \arcsin[(a_1/a_2)\sin\theta_c], \quad (3)$$

где  $\theta_c$  – критический угол распространения излучения в клине.

В ОХ-сенсоре есть моды высшего порядка, для которых

$$\arcsin[(a_1/a_2)\sin\theta_c] < \theta_2 < \theta_c, \quad (4)$$

однако благодаря длинному и плавному переходу эти моды не возбуждаются. Если свет вводится в широкий конец клина, то в узкий конец через переход будет передаваться мощность только тех мод, углы распространения  $\theta_2$  которых находятся в границах, определяемых неравенством (3). Все моды высшего порядка с углами  $\theta_2$ , определяемыми неравенством (4), будут излучаться в оболочку. На рис. 1 показано излучение моды высокого радиального и нулевого азимутального порядков при прохождении меридиального луча вдоль линейного перехода. Угол распространения  $\theta$  луча, проходящего по переходу вдоль зигзагообразной траектории, увеличивается с каждым отражением до тех пор, пока не превысит предельного угла  $\theta_c$ . Плавно суживающийся переход от большего волокна к меньшему передает мощность только тех мод, которые еще направляет сердцевина меньшего волокна.

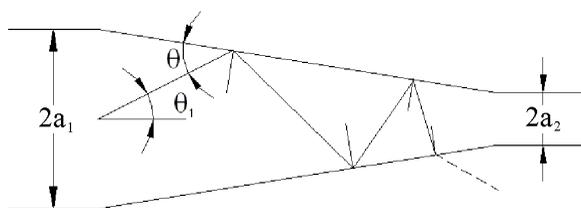


Рис. 1. Линейный переход между клином и ОХ-сенсором и траектория луча, переходящего в моду излучения

Уравнение (2) представляет собой теорему синусов Аббе для оптического изображения. Согласно этой теореме, свет из апертуры с радиусом  $a_1$  может быть сфокусирован оптической системой в апертуре ра-

диусом  $a_2$  с углами распространения меньше  $\theta_2$  тогда, когда его угол распространения в апертуре радиусом  $a_1$  меньше угла  $\theta_1$ , в соответствии с уравнением (2). Для выполнения этого преобразования у системы, формирующей изображение, не должно быть aberrаций.

Аналогично тому, как отображающая система должна быть свободна от aberrаций, свободный переход должен быть плавным и длинным. Переход должен быть неограниченно длинным, чтобы полностью избежать взаимодействия мод и преобразовывать мощность каждой моды на одном конце перехода в соответствующую моду на другом его конце. В переходах ограниченной длины всегда будет некоторое смещение мод и потери при передаче. Оценим минимальную длину линейного перехода, который передает (с малыми потерями) по крайней мере моды низшего порядка при прохождении луча, входящего в широкую часть перехода с нулевым углом распространения. При  $\theta_1 = 0$  этот луч представляет собой моды, лежащие далеко от отсечки на широком конце

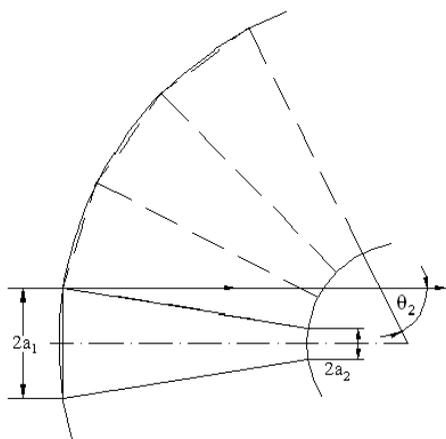


Рис. 2. Траектория в эквивалентных секторах линейного перехода

це перехода. На рис. 2 можно проследить луч, который падает под углом  $\theta_1 = 0$ , при  $a_1$  (входной радиус поперечного сечения перехода). Повторные отражения этого луча от стенок перехода заставляют луч в многоугольнике (рис. 2) последовательно пересекать секторы [10]. Он пересекает окружность, описанную около внутреннего многоугольника, соответствующего узкому концу перехода, с углом распространения

$$\theta_2 = (a_1/L)(a_1/a_2 - 1), \quad (5)$$

где  $L$  – длина перехода. Пока угол  $\theta_2$  остается меньше предельного угла  $\theta_c$  полного внутреннего отражения, волновод, соединенный с узким концом перехода, будет принимать этот луч. Следовательно, все лучи, вводимые под углом  $\theta_1 = 0$  на широком конце перехода, будут приниматься на его узком конце в том случае, если длина перехода больше расстояния

$$L = a_1(a_1/a_2 - 1) \left[ 1 - (n_2/n_1)^2 \right]^{-1/2}. \quad (6)$$

В этом уравнении угол  $\theta_c$  предполагается достаточно малым, так что возможна следующая аппроксимация:

$$\theta_c = \left[ 1 - (n_2 / n_1)^2 \right]^{1/2}. \quad (7)$$

Согласно выражению (6), минимальная длина волноведущего перехода зависит от размера волновода  $a_1$ , отношения  $a_1/a_2$  торцевых размеров перехода и относительной разности показателей преломления сердцевин и оболочки. Обычно переход должен быть существенно длиннее ширины волновода.

**Результаты математического моделирования.** Моделирование оптоэлектронного интерфейса проводилось путем численного решения уравнений (5) – (7) для следующих параметров системы: входная апертура клина  $a_1 = 500$  мкм; выходная апертура клина  $a_2 = 25$  мкм; показатель преломления сердцевин клина  $n_1 = 1,5$ ; показатель преломления оболочки клина  $n_2 = 1,42$ .

В результате численного решения выражения для угла распространения излучения в клине (5) была получена зависимость угла распространения излучения в клине от его длины (рис. 3). Минимальная длина клина была найдена из (6) и составила 29,5 мм. При длине клина, большей или равной этой величине, потери излучения в клине минимальны.

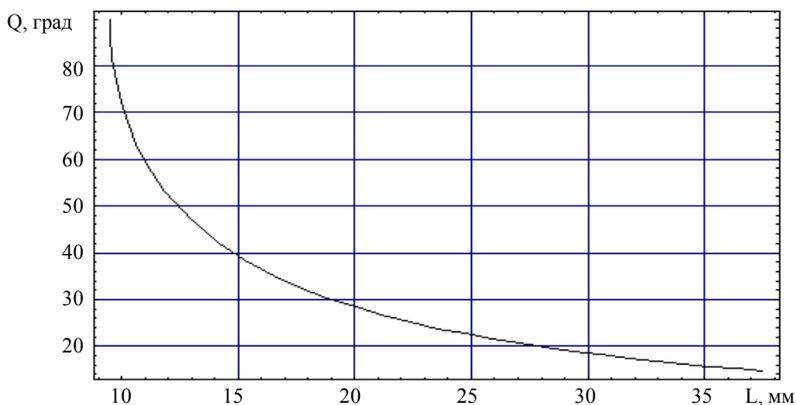


Рис. 3. Зависимость угла распространения излучения в клине ( $\theta_2$ ) от его длины

Коэффициент передачи оптического сигнала при разных длинах клина неодинаков (рис. 4), его значение зависит от угла распространения излучения в клине  $\theta_2$  по квадратичному закону.

Для нахождения зависимости потерь в клине от его длины (рис. 5) было использовано выражение

$$\alpha = 10 \lg(P_1 / P_2), \quad (8)$$

где  $P_1$  – мощность, входящая в клин;  $P_2$  – мощность, выходящая из клина. Для расчетного значения длины клина 30 мм потери составили 0,54 дБ.

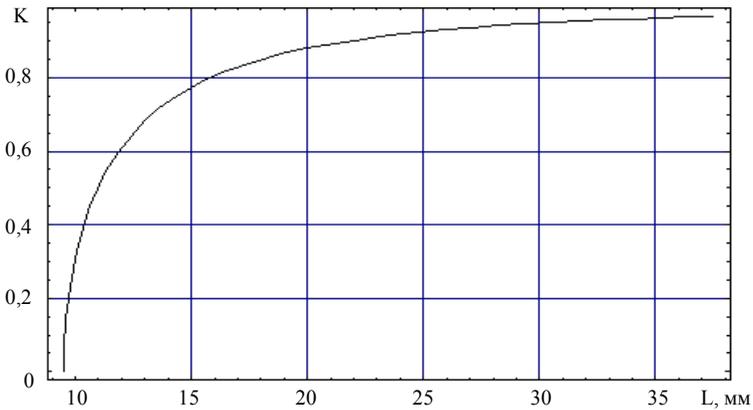


Рис. 4. Зависимость коэффициента передачи оптического сигнала в клине от его длины

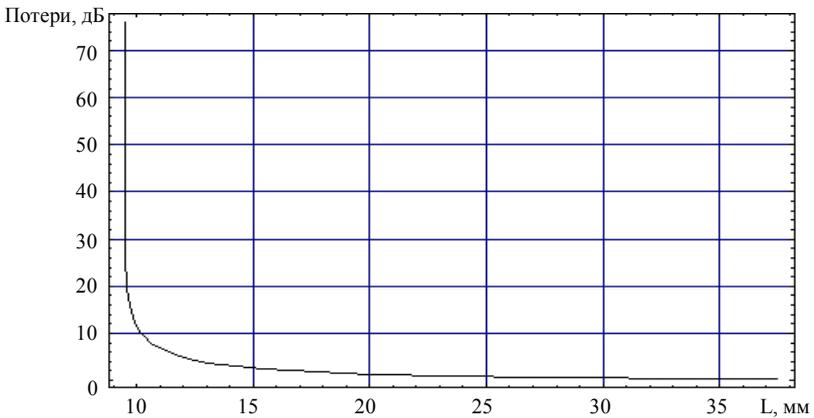


Рис. 5. Зависимость потерь в клине от его длины

**Выводы.** В результате проделанной работы рассмотрено сопряжение ОХ-сенсора с модифицированным ЛБ-пленкой рабочим электродом и оптического волокна. С помощью представленной математической модели были проведены численные расчеты. Полученные результаты свидетельствуют о следующих особенностях процессов, протекающих в рассмотренном устройстве: 1 – зависимость угла распространения излучения в клине от его длины показывает, что необходимо выбирать такую длину перехода, чтобы угол  $\theta_2$  был меньшим или равным критическому углу распространения  $\theta_c$  в клине (7); 2 – потери на излучение чрезвычайно быстро

уменьшаются, если длина перехода превышает  $L > 450a_2$ ; для достижения минимальных потерь в клине необходимо выполнение условия, изложенного в первом выводе. Полученные результаты позволяют оптимизировать геометрические параметры волноведущего клина – основного элемента оптоэлектронного интерфейса ОХ-сенсора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рожницкий Н.Н., Бых А.И., Красноголовец М.А. *Электрохимическая люминесценция: Монография*. – Х.: ХТУРЭ, 2000. – 320 с.
2. Deaver D.R. *A new non-isotopic detection system for immunoassays // Nature*. – 1995. – № 377. – P. 758 – 760.
3. Laespada M.E.F., Pavon J.L.P., Cordero B.M. *Electrochemiluminescent detection of enzymatically generated hydrogen peroxide // Analytica chimica acta*. – 1996. – No. 327. – P. 253 – 260.
4. Robert J. Forster, Conor F. Hogan *Electrochemiluminescent metallopolymer coatings: combined light and current detection in flow injection analysis // Anal. Chem.* – 2000. – Vol. 72, #72. – P. 5576 – 5582.
5. Масолова Н.В. Система анализа биожидкости с использованием ЭХЛ-сенсора // Сб. научных трудов по материалам 1-го Международного радиоэлектронного Форума: «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». – 2002. – Ч. 2. – С. 631 – 633.
6. Одержання і дослідження молекулярної структури плівок Ленгмюра-Блоджетт на основі поліімідів / В.П. Кухар, М.І. Міщенко, В.В. Цукрук, С.Ю. Петраш, Є.В. Шелудько, О.В. Толмачов, І.П. Крайнов // *Доповіді АН України*. – 1991. – № 3. – С. 114 – 119.
7. Унгер Х.Г. *Планарные и волоконные оптические волноводы: пер. с англ. / Под ред. В.В. Шевченко*. – М.: Мир, 1980. – 656 с.
8. Forster T. *Fluoreszenz Organischer Verbindungen.-Göttingen: Van den Hoeck und Ruprecht, (1951)*. – 320 p.
9. Marcuse D. *Excitation of the dominant mode of round fibre by Gaussian beam // Bell Syst. Tech J.* – 1970. – 49. – P. 1695 – 1703.
10. Williamson D.E., *Cone chanel optics // J. Opt. Soc. Amer.* – 1952. – 42. – P. 712 – 715.

Поступила 22.11.2004

**ГИРИЧ Алексей Александрович**, студент пятого курса Харьковского национального университета радиоэлектроники. Область научных исследований – медицина и оптоэлектроника.

**ЖОЛУДОВ Юрий Тимофеевич**, аспирант кафедры ФОЭТ ХНУРЭ. Область научных исследований – оптоэлектроника, математическое моделирование.

**ЗАМКОВОЙ Алексей Семенович**, канд. техн. наук, профессор, зав. кафедры ФОЭТ Харьковского национального университета радиоэлектроники. Область научных исследований – оптоэлектроника.

**РОЖИЦКИЙ Николай Николаевич**, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. лаборатории оптоэлектроники Харьковского национального университета радиоэлектроники. Область научных исследований – оптоэлектроника.