
Радиофизика

УДК 621.378.826.535 8

Исследование температурного оптического коэффициента золь-гель волноводов

С. В. Павлов, Н. С. Трофимов, Т. К. Чехлова

*Кафедра радиофизики
Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198, Россия*

Проведён и систематизирован обзор методов исследования температурной зависимости характеристик оптических волноводов на основе плёнок, изготовленных по золь-гель технологии. Предложена и опробована методика температурных исследований эффективного показателя преломления волноводных мод с помощью термоэлектрического модуля Пельтье. Данная методика отличается простотой и удобством и при этом позволяет существенно расширить возможности температурных исследований волноводов и материалов, из которых они изготовлены.

Ключевые слова: интегральная оптика, оптический волновод, эффективный показатель преломления, золь-гель процесс, термооптический коэффициент.

1. Введение

В связи с высоким темпом развития новых технологий, представляющих большой интерес для оптических телекоммуникационных систем, становится чрезвычайно важным изучение с большой точностью оптических свойств используемых материалов с целью выявления ограничений, налагаемых на эти материалы (чувствительность к параметрам окружающей среды, трудности при изготовлении, цена и др.)

В частности, развитие волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) предполагает развитие их элементной базы с целью улучшения характеристик устройств, направленного на увеличение объёма информации, передаваемой по волокну (обеспечение термостабильности, повышение спектрального разрешения интерференционных устройств и др.). К таким устройствам относятся оптические волноводные системы уплотнения и разуплотнения каналов, узкополосные фильтры, резонаторы и др. В настоящее время для их создания используются различные новые материалы и технологии.

В последнее время исследователи большой интерес проявляют к оптическим волноводам, изготовленным по золь-гель технологии [1], которая обеспечивает хорошие оптические характеристики, а также даёт дополнительные возможности для реализации поставленной задачи.

Одной из главных особенностей плёнок, изготовленных по золь-гель технологии, является относительно большой отрицательный термооптический коэффициент (ТОК). Это свойство может быть использовано для подстройки параметров интегрально-оптических (ИО) элементов, а также для создания температурно-независимых и поляризационно-независимых устройств. Структура плёнок, изготовленных по указанной технологии, допускает легирование их веществами, позволяющими создавать элементы ИО, такие как лазеры и усилители, электрооптические устройства и др. [2–4].

В настоящей работе были исследованы оптические волноводы на основе плёнок TiO_2-SiO_2 , изготовленных по золь-гель технологии. Золь-гель технология — это методика создания на стеклянных или кварцевых подложках оптически прозрачных плёнок путём высушивания и последующего отжига нанесённого на эти подложки слоя специального коллоидального раствора — золя [1]. Получение по

этой технологии оптически прозрачных и однородных плёнок не требует применения дорогостоящего, сложного оборудования, что и обусловило повышенный интерес к этой теме.

Золь-гель технология обеспечивает возможность очень точного управления структурой получаемого вещества на молекулярном уровне и получение многокомпонентных оксидных соединений. Оптический показатель преломления золь-гель плёнок главным образом зависит от соотношений компонентов начального раствора и температуры отжига.

При изготовлении плёнок по золь-гель технологии необходимо соблюдать стабильность параметров режима отжига и параметров окружающей среды (температура, относительная влажность и т.д.). Соблюдение этих условий позволяет получать оптические волноводы с заданными значениями коэффициента замедления или буферные золь-гель слои с точно заданными показателями преломления для различных комбинированных волноводных систем.

В данной работе основной задачей являлось исследование эффективного показателя преломления (ЭПП) волноводных мод оптических волноводов и их термооптических коэффициентов в широком диапазоне температур.

Для решения этой задачи был проведён аналитический обзор методов определения ТОК и на его основе разработан метод, оптимально соответствующий программе исследований.

2. Термооптический коэффициент волновода

Термооптический коэффициент волновода $dn_{эфф}/dT$ для определённого типа волны характеризует изменение эффективного показателя преломления волноводной моды при изменении температуры.

Эффективный показатель преломления TE -моды волновода определялся из дисперсионного уравнения с учётом двух факторов: температурной зависимости показателей преломления материалов $n(T)$, составляющих волновод, и толщины плёнки $h(T)$ [5],

$$\frac{2\pi}{\lambda} h(T) \sqrt{n^2(T) - n_{эфф}^2} = \arctg \vartheta \left(\frac{\sqrt{n_{эфф}^2 - n_1^2}}{\sqrt{n^2(T) - n_{эфф}^2}} \right) + \arctg \vartheta \left(\frac{\sqrt{n_{эфф}^2 - n_3^2(T)}}{\sqrt{n^2(T) - n_{эфф}^2}} \right) + \pi(\nu - 1), \quad (1)$$

где n_1 , $n_2(T)$, $n_3(T)$ — показатели преломления воздуха, плёнки и подложки, соответственно, ν — номер волноводной моды.

ТОК плёнок, изготовленных по золь-гель технологии, имеет отрицательную величину, а коэффициент расширения плёнки всегда положителен. Установлено [5], что ТОК волновода зависит от параметров плёнки в соответствии с вкладом, обусловленным влиянием этих двух факторов, а этот вклад обусловлен различной степенью концентрации поля волноводной моды в золь-гель плёнке.

Величина ТОК волновода оказывает существенное влияние на термостабильность элементов ИО. Для создания атермальных устройств необходимо обеспечить практически нулевой ТОК.

Высокое значение ТОК даёт возможность перестраивать резонансные частоты резонаторов, интерференционных фильтров, длину волны лазеров с брэгговскими отражателями и с распределённой обратной связью, а также создавать эффективные ИО переключатели в системах ВОЛС.

Кроме того, как было показано в работе [6], ТОК связан со структурой плёнки, которая определяет физико-химические процессы на её поверхности, что чрезвычайно важно при создании высокочувствительных сенсоров [7]. Поэтому исследование ТОК в оптических волноводах в широком диапазоне температур и зависимость его величины от параметров волновода представляет собой важную задачу.

3. Обзор методов определения ТОК

Выбор той или иной методики измерения ТОК обусловлен конкретной задачей, поставленной перед исследователями. Суть всех методик состоит в измерении эффективного показателя преломления $n_{эфф}$ волноводной моды, возбуждённой в волноводе, при разных температурах.

Обычно возбуждение волновода производится резонансным методом либо с помощью призмы, либо решётки. Источником излучения служит лазер. При изменении температуры волновода изменяется угол возбуждения волноводной моды φ , так как изменяются показатели преломления материалов, из которых изготовлен волновод. Этот угол фиксируется гониометром.

С помощью полученной зависимости угла возбуждения φ от температуры определяется ЭПП возбуждённой моды для фиксированной температуры по формуле

$$n_{эфф}(T) = n_{пр}(T) \sin \left(\alpha_{пр} - \arcsin \frac{\sin \varphi(T)}{n_{пр}(T)} \right), \quad (2)$$

где $\alpha_{пр}$ — угол призмы, а $n_{пр}(T)$ — показатель преломления призмы, зависящий от температуры.

Нагрев образца может быть осуществлён несколькими способами: нагрев образцов в термостате до максимальной температуры диапазона измерений с последующим охлаждением [5]; нагрев образцов, помещённых в изолированную камеру, нагреваемую проточной водой, нагретой до нужной температуры [6]; нагрев образцов с помощью излучения лампы [7]. При этом важно обеспечить хорошую точность и удобство измерения ЭПП.

В работе [6] была разработана методика исследования основных химических процессов на поверхности твёрдых тел. В результате присоединения анализируемых молекул, находящихся в контакте с поверхностью волновода, к фиксирующим центрам образуется, так называемый, «адслой», который характеризуется определённой толщиной и показателем преломления. Исследование ТОК в широком интервале температур позволяет определить энергетику процессов на поверхности.

В эксперименте использовались золь-гель волноводы с решёточным устройством связи, которое представляло собой гофрированную периодическую структуру, изготовленную на поверхности подложки. Исследование волновода проводилось с помощью гониометра, который измерял мощность, введённую в волновод, как функцию угла падения луча $He-Ne$ лазера на решётку α . ЭПП волноводной моды определялся из соотношения

$$n_{эфф} = n \sin \alpha + l \frac{\lambda}{\Lambda},$$

где n — показатель преломления воздуха, l — дифракционный порядок, Λ — период гофра. Схема экспериментального устройства приведена на рис. 1. Исследуемый планарный оптический волновод представлял собой стеклянную подложку с гофрированным участком, на которую была нанесена золь-гель плёнка $Si_{1-x}Ti_xO_2$, где $x \sim 0,4$. Над областью вводной решётки была помещена кювета, через которую циркулировал поток нагретой жидкости. Кювета имела полуцилиндрическое сечение с радиусом 1 мм и длиной 8 мм. Температура жидкости в кювете измерялась термопарой (никель-хром-никель), помещённой в одной из

трубок кюветы. Для точного регулирования температуры был разработан специальный теплообменник. Электрически нагреваемый водяной резервуар нагревал воду до 93°C . Циркуляция воды осуществлялась с помощью насоса. Точность определения температуры при измерениях составляла $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$.

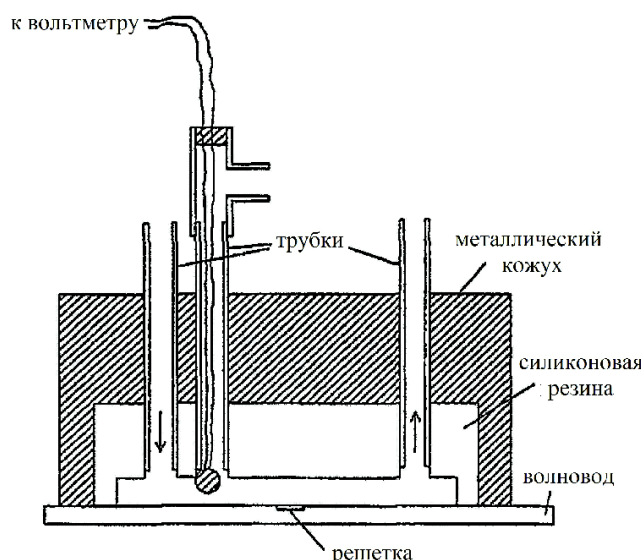


Рис. 1. Схема исследования ТОК с решёточным элементом ввода излучения в волновод

После достижения необходимой температуры проводилось 10–20 измерений угла возбуждения и затем результаты усреднялись. На рис. 2 показана кинетика изменения ЭПП TE_1 -моды волновода от температуры. Численные значения показателя преломления плёнки и её толщины были получены путём решения дисперсионных уравнений для двух мод. По результатам расчёта были построены кривые зависимости показателя преломления плёнки n_2 и её толщины h от температуры, которые затем были описаны следующими полиномами:

$$n_2 = -2,047 \cdot 10^{-7} T^2 - 2,185 \cdot 10^{-5} T + 1,803015,$$

$$\frac{h}{h_0} = 1,168 \cdot 10^{-6} T^2 - 1,838 \cdot 10^{-5} T + 1,$$

где h_0 — толщина при $T = 0^{\circ}\text{C}$.

Выбор данной методики измерений и, в частности нагрева образца, позволил исследовать поглощение молекул протеина при пролонгированном нагреве.

В работе [8] для исследования ТОК золь-гель ZrO_2 плёнок для TE_1 - и TM_1 -мод волновода использовался резонансный метод, заключающийся в туннелировании излучения в волновод через призмное устройство связи (у авторов он назван методом m -линий). Принцип действия метода показан на рис. 3. Лазерный луч проходит через полуволновую пластину для выбора определённой поляризации (либо TE , либо TM), фокусируется линзой и вводится под определённым (резонансным) углом в призму, расположенную на близком расстоянии от плёнки волновода. Отражённый от основания призмы луч выходил из призмы и наблюдался на экране. Вращением столика, на котором помещён планарный волновод с призмой, добивались ввода лазерного излучения в волновод, что контролировалось по появлению тёмной полосы в отражённом пятне на экране. Измерив

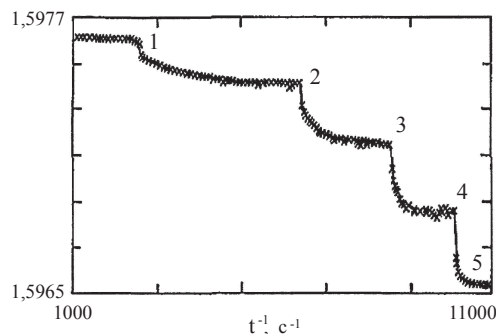


Рис. 2. Кинетика изменения ЭПП TE_1 -моды волновода от температуры: 1 — 23°C , 2 — 30°C , 3 — 40°C , 4 — 50°C , 5 — 60°C

резонансные углы падения луча на призму, по крайней мере для двух мод, и используя формулы (1) и (2), определяли и ЭПП возбуждённой моды и толщину волноводной плёнки. Абсолютная точность измерений показателя преломления и толщины в экспериментах составляла 1×10^{-3} и 1 нм, соответственно.

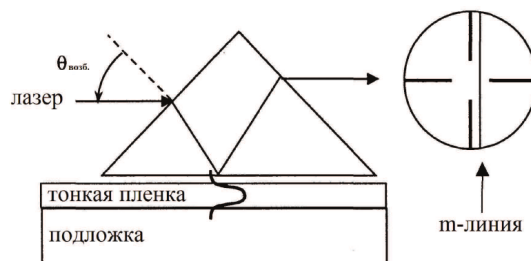


Рис. 3. Схема резонансного метода измерения ЭПП волноводных мод

Образец нагревался путём обдува потоком воздуха, температура которого контролировалась. Однородность нагрева образца обеспечивалась соответствующей длительностью воздействия нагретого потока. Изменение резонансных углов возбуждения (углов синхронизма) в результате нагрева регистрировалось. Для каждого образца проводилось 6 измерений для TE_1 - и TM_1 -мод в диапазоне температур от 20 до 80°C . При вычислении ЭПП были учтены температурные коэффициенты материалов подложки и призмы. Изменение толщины плёнки при изменении температуры не учитывалось, и ошибки, связанные с этим пренебрежением, были включены в общую ошибку измерений.

В работе установлено, что на ТОК плёнок оказывает существенное влияние коэффициент линейного расширения материала подложки, а также качество её поверхности. Точность измерений ТОК составляла 5×10^{-6} .

В работе [7] проведены исследования температурной зависимости оптических характеристик, в частности потерь в золь-гель волноводах, и предпринята попытка установить связь этих потерь с наличием в материале плёнки ОН-групп.

С помощью золь-гель технологии были созданы планарные волноводы на основе ZrO_2 и затем методами фотолитографии и травления сформированы канальные волноводы гребенчатого типа. Экспериментальная схема температурных исследований волноводов приведена на рис. 4. В волновод вводилось излучение от широкополосного источника (450 – 1700 нм) с помощью волоконного световода, состыкованного с полированным торцом канального волновода. Прошедшее через волновод излучение выводилось из волновода аналогичным образом и направлялось в оптический анализатор спектра.

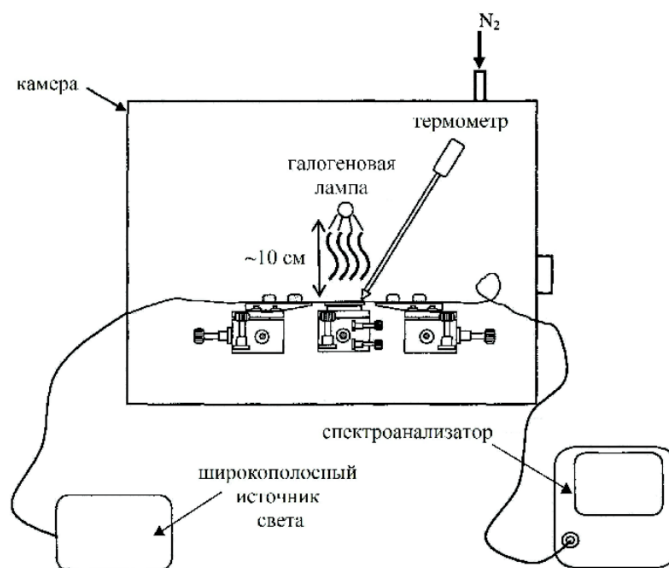


Рис. 4. Экспериментальная схема температурных исследований волноводов с широкополосным источником излучения

Нагревателем волновода служила галогеновая лампа мощностью 250 Вт, расположенная на расстоянии 10 см от его поверхности. Температура измерялась электронным термометром, который контактировал с образцом. Диапазон изменения температуры составлял 20–150 °С. Волновод с устройствами ввода и вывода, нагреватель и термометр помещались в специальный бокс. На рис. 5 показана эволюция спектров поглощения при повышении температуры. Пик поглощения находился вблизи 1550 нм, который совпадал с пиком поглощения воды. Интенсивность поглощения уменьшалась примерно в два раза при повышении температуры от 20 до 150 °С. Этот эффект объяснялся устранением воды, поглощённой порами золь-гель плёнки из атмосферы. Проведённые исследования показали, что уменьшить потери можно путём защиты поверхности волновода от влияния атмосферы.

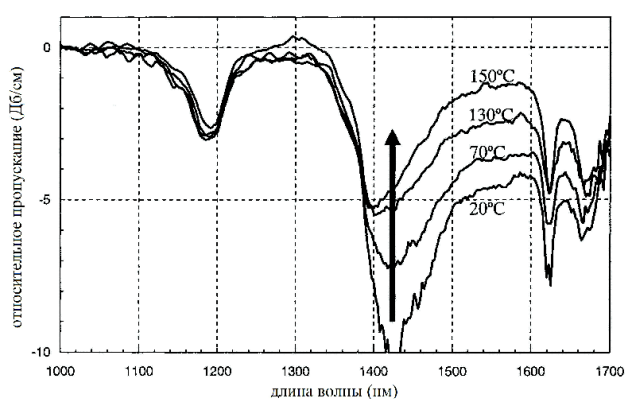


Рис. 5. Эволюция спектров поглощения при изменении температуры

При исследовании ТОК золь-гель волноводов на основе SiO_2-TiO_2 авторы работы [5] использовали экспериментальную схему, в которой излучение $He-Ne$ лазера через призмное устройство связи вводилось в волновод, и измерялся

резонансный угол возбуждения. С целью повышения точности измерения резонансного угла момент возбуждения волновода фиксировался по максимальному выводу излучения из второй призмы.

Для исследования температурной зависимости волноводная система помещалась в печь, которая позволяла повышать температуру от 20 до 100°C. Температура в процессе измерений контролировалась с помощью термистора, щуп которого приводился в контакт с волноводом. Изменение температуры при измерениях лежало в диапазоне от 20 до 80°C. Методика измерения температурной зависимости ЭПП состояла в измерении углов возбуждения φ через определённый температурный интервал по мере охлаждения волновода.

Измерения показали сильную зависимость ТОК от параметров волновода и от типа волноводной моды, распространяющейся по волноводу. Кроме того, выявлена сильная нелинейность зависимости ЭПП от температуры в диапазоне от 20 до 80°C. Для более детальных исследований необходимо расширить температурный диапазон измерений.

Проведённый обзор методов температурного исследования характеристик золь-гель волноводов позволил сделать следующие выводы.

1. Возбуждение волновода осуществлялось либо узкополосным источником излучения (лазером) [5, 6, 8], либо широкополосным (спектральными лампами с непрерывным спектром) [7]. Тот или иной источник выбирался в соответствии с поставленной задачей.
2. Способ возбуждения волновода был либо резонансным при использовании лазера (дифракционная решётка [6], призма [5, 8]), либо с помощью пристыкованного к торцу волновода волокна в случае использования широкополосного источника излучения [7].

Преимущество решётки состоит в её компактности, недостаток — предварительное изготовление гофрированной структуры на подложке, которое требует специального оборудования и соответствующей квалификации персонала.

Достоинство призмы — простота, недостаток — необходимость учитывать при измерениях изменение показателя преломления материала призмы при изменении температуры.

3. Метод нагрева образцов. Выбор того или иного метода нагрева обусловлен основными характеристиками методики, к которым можно отнести следующие:
 - а) диапазон изменения температуры;
 - б) проведение измерений при фиксированных значениях температуры в выбранном диапазоне температур, шаг измерений и время стабилизации нужной температуры;
 - в) проведение измерений в случае непрерывного изменения температуры, проведение измерений по схеме: нагрев до максимальной температуры диапазона — остывание (или нагрев от начальной температуры до максимальной), шаг измерений, скорость изменения температуры;
 - г) время достижения нужной температуры;
 - д) время измерения при фиксированной температуре и общее время измерений во всём диапазоне температур;
 - е) методика определения температуры при измерениях ЭПП и точность определения температуры.

С учётом вышеизложенного можно сделать следующие выводы. Для детального исследования зависимости ЭПП от температуры желательно иметь как можно более широкий диапазон температур, достаточно большую скорость измерений и при этом обеспечить хорошую точность определения как температуры, так и ЭПП.

В настоящей работе была поставлена задача исследования температурной зависимости ЭПП в расширенном диапазоне температур, что представляет значительный интерес для применений золь-гель волноводов в различных устройствах

интегральной оптики, а также для дальнейшего продвижения в понимании природы изменения температурной зависимости ЭПП и роли воды, поглощённой нанопорами золь-гель плёнки.

4. Экспериментальные исследования золь-гель волноводов

4.1. Методика нагрева (охлаждения) образцов волноводов

Для исследования характеристик золь-гель волноводов в области пониженных температур (ниже комнатной температуры) была разработана методика изменения температуры образцов, использующая термоэлектрический модуль Пельтье [9].

Действие термоэлектрического модуля основано на эффекте Пельтье, принцип действия которого состоит в следующем: при прохождении электрического тока через контакт двух проводников, сделанных из различных материалов, в зависимости от его направления, помимо джоулева тепла выделяется или поглощается дополнительное тепло, которое получило название тепла Пельтье. Степень проявления данного эффекта в значительной мере зависит от материалов выбранных проводников и используемых электрических режимов.

Наиболее сильно эффект Пельтье наблюдается в случае использования полупроводников p - и n -типа проводимости. В зависимости от направления электрического тока через контакт полупроводников разного типа — p - n и n - p -переходов вследствие взаимодействия зарядов, представленных электронами (n) и дырками (p) и их рекомбинации, энергия либо поглощается, либо выделяется. В результате данных взаимодействий и порождённых энергетических процессов тепло либо поглощается, либо выделяется.

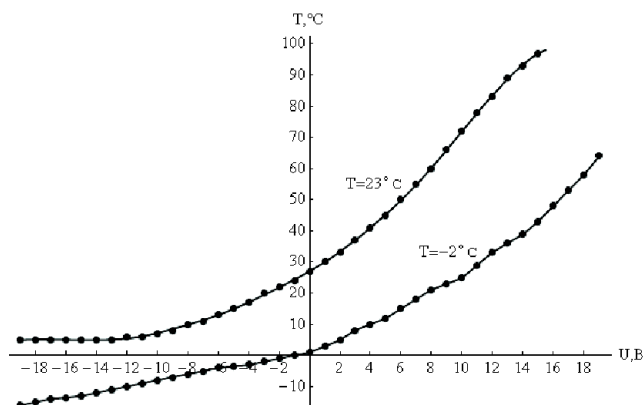
Модуль Пельтье представляет собой термоэлектрический холодильник, состоящий из последовательно соединённых полупроводников p - и n -типа, образующих p - n - и n - p -переходы. Каждый из таких переходов имеет тепловой контакт с одним из двух радиаторов. В результате прохождения электрического тока определённой полярности образуется перепад температур между радиаторами модуля Пельтье: один радиатор работает как холодильник, другой радиатор нагревается и служит для отвода тепла. Типичный модуль обеспечивает значительный температурный перепад, который составляет несколько десятков градусов. При соответствующем принудительном охлаждении нагревающегося радиатора второй радиатор — холодильник позволяет достичь отрицательных значений температур.

В данной работе использовался термоэлектрический модуль Пельтье МД1-39-1,4/2,5 со следующими техническими характеристиками: толщина $H = 4,50 \pm 0,05$ мм; площадь $S = 20 \times 30$ мм²; сопротивление $R = 1,0 \pm 0,1$ Ом; диапазон температур $\Delta T = 65^\circ\text{K}$.

Перед измерениями ЭПП в зависимости от температуры модуль Пельтье был проградуирован, т. е. построена зависимость температуры T от напряжения U . Градуировка осуществлялась с помощью стандартного прибора М 890 С+, датчиком температуры служила термопара.

Представляет интерес поведение зависимости $T(U)$ при изменении температуры окружающей среды. Поэтому измерения проводились при двух значениях температуры окружающей среды: при комнатной температуре $T_1 = 23^\circ\text{C}$ и при температуре ниже нуля $T_2 = -2^\circ\text{C}$. Диапазон изменения напряжения составлял от -19 до 19 В. Графические зависимости $T(U)$ приведены на рис. 6.

При комнатной температуре T_1 диапазон изменения температур составил интервал от 5 до 97°C , а при $T_2 = -2^\circ\text{C}$ — от -18 до 62°C (рис. 6). Из графиков нетрудно заметить, что при уменьшении температуры окружающей среды нижняя и верхняя границы диапазона сдвигаются в сторону пониженных температур, а сам температурный диапазон ΔT остаётся, примерно, тем же самым ($\Delta T \sim 90^\circ\text{C}$).

Рис. 6. Градуировочная кривая модуля Пельтье ($T(U)$)

Поскольку ТОК наименее исследован при пониженных температурах, был рассмотрен вопрос зависимости нижней границы температурного диапазона от конструкции модуля Пельтье. В первую очередь следует обеспечить достаточный теплоотвод от модуля. Для этого необходимо использовать радиатор, который имел бы совершенный контакт с поверхностью модуля. Путём дополнительной шлифовки поверхности модуля Пельтье и радиатора нижняя граница диапазона изменения температур была снижена до $\sim 0^\circ\text{C}$.

Инерционность установления фиксированной температуры также зависела от начальной температуры измерений. Установлено, что чем больше отклонение от начальной температуры, тем больше инерционность.

Время установления фиксированной температуры при измерении ЭПП составило в среднем 90 секунд.

4.2. Методика изготовления волноводов на основе TiO_2-SiO_2 золь-гель плёнок

В основе процесса золь-гель плёнок [1] лежат реакции гидролиза и поликонденсации элементоорганических соединений, ведущие к образованию элементарного каркаса, постепенное разветвление которого вызывает последовательные структурные изменения по схеме РАСТВОР \rightarrow ЗОЛЬ \rightarrow ГЕЛЬ \rightarrow ОКСИД. В настоящей работе для изготовления плёнок были приготовлены два золя на основе тетраэтилортосиликата $Si(OC_2H_5)_4$ и тетрабутоксид титана $Ti[O(CH_2)_3CH_3]_4$, которые смешивались в соответствующих объёмных соотношениях.

Полученная смесь золь фильтровалась и наносилась на подложку, которая после этого подвергалась нагреву до температуры $100 \dots 200^\circ\text{C}$. Вследствие испарения растворителя на подложке остаётся пористая плёнка — каркас. Последующий отжиг при температурах $300 \dots 800^\circ\text{C}$ приводил к образованию сплошной плёнки, пористость которой уменьшалась и составляла $10 \dots 15\%$.

В качестве подложек использовалось кварцевое стекло. Нанесение плёнки производилось посредством вытягивания подложки из раствора с помощью электро-механического устройства. Скорость движения подложки регулировалась напряжением, подаваемым на электромеханическое устройство, и в экспериментах составляла $0,14-0,25$ мм/с.

Нанесённый на подложку слой раствора подвергался сушке в термостате при температуре $\sim 100^\circ\text{C}$ в течение 10 минут. После этого проводился отжиг образцов в высокотемпературной печи при фиксированных температурах в диапазоне $400-700^\circ\text{C}$ в течение 1 часа.

По описанной технологии были изготовлены несколько серий образцов волноводов на основе золь-гель плёнок разной толщины и с разными коэффициентами преломления.

4.3. Методика измерения температурной зависимости ЭПП волноводных мод

Измерительная установка (рис. 7) включала исследуемый волновод, состоящий из подложки и сформированной на ней в результате золь-гель процесса плёнки. Этот волновод помещался на пластину устройства Пельтье, снабжённого радиатором, и фиксировался в специальном держателе вместе с призмой связи. Вся конструкция размещалась на столике гониометра, который измерял угол возбуждения волноводной моды.

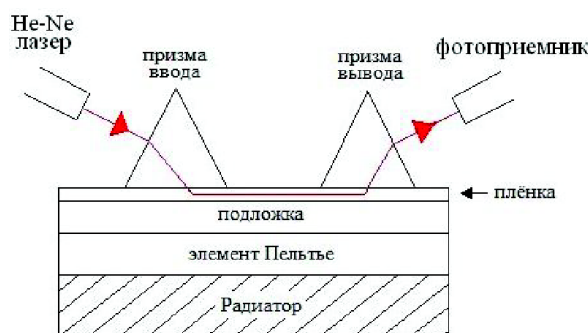


Рис. 7. Схема экспериментальной установки

Источником излучения служил гелий-неоновый лазер ($\lambda = 0,6328$ мкм). При изменении температуры изменялся угол возбуждения волноводной моды в соответствии с её ТОК.

Тестирование установки проводилось с помощью одного из образцов, изготовленного из раствора смеси золей TiO_2-SiO_2 с соотношением компонент 2:3 при следующих технологических параметрах режима: температура отжига составляла 500°C и время отжига — 1 час.

Возбуждение волновода осуществлялось на TE_1 - и TM_1 -модах. Измерение резонансного угла для каждой температурной точки проводилось 5 раз, затем показания усреднялись. ЭПП рассчитывался по формуле (2). Толщина и показатель преломления были определены из дисперсионного уравнения с помощью измеренных значений ЭПП для TE_1 - и TM_1 -мод.

Точность измерений ЭПП составляла 2×10^{-5} и определялась точностью измерения резонансного угла возбуждения волновода через призмное устройство связи. Точность определения температуры составляла $0,1^\circ\text{C}$. Рассчитанные параметры плёнки исследуемого образца волновода имели следующие значения: показатель преломления (ПП) — 1,5 и толщина 0,5 мкм.

При измерениях и расчётах изменение температуры призмы не учитывалось. В отличие от методики, использованной в работе [5], призма не нагревалась. Оценка изменения температуры призмы была проведена путём решения задачи теплопроводности, которая показала, что оно пренебрежимо мало и составляло порядка 10^{-7} .

Преимущество использованной в работе методики состояло в следующем:

- 1) компактность и простота измерительной установки;
- 2) проведение измерений при фиксированных температурах;
- 3) высокая скорость измерений;
- 4) повышение точности измерений температуры и ЭПП;
- 5) сдвиг нижней границы температурного диапазона (вплоть до 0°C и ниже).

4.4. Полученные результаты и их обсуждение

Температурные исследования ЭПП проводились по описанной выше методике. Диапазон изменения температуры составлял от 10 до 80°C. Измерения проводились от минимальной до максимальной температуры диапазона с шагом 5°C. Время установления температуры составляло 90 секунд. При каждом значении температуры проводилось три измерения резонансного угла возбуждения и затем результаты усреднялись. Полученная зависимость ЭПП для TE_1 - и TM_1 -мод от температуры, приведённая на рис. 8, нелинейна. На полученных кривых можно выделить три температурных участка с примерно линейной зависимостью ЭПП:

1. $\Delta T_1 = 10\text{--}25^\circ\text{C}$,
2. $\Delta T_2 = 25\text{--}75^\circ\text{C}$,
3. $\Delta T_3 = 75\text{--}80^\circ\text{C}$.

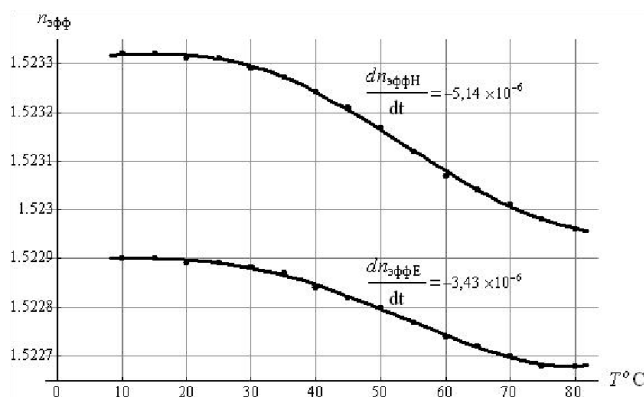


Рис. 8. Зависимость ЭПП для TE_1 - и TM_1 -мод от температуры

Численные значения ТОК для TE_1 - и TM_1 -мод для трёх выделенных температурных диапазонов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Численные значения ТОК для TE_1 - и TM_1 -мод

Значения ТОК	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3
ТОК $_{TE_1}$, 10^{-5} град. $^{-1}$	~ 0	-0,6	-0,4
ТОК $_{TM_1}$, 10^{-5} град. $^{-1}$	~ 0	-0,4	~ 0

Значения ТОК для ΔT_2 и ΔT_3 температурных диапазонов с хорошей точностью совпадают с данными, приведёнными в работе [5]. Довольно большой отрицательный ТОК для TE_1 -моды объясняется значительной концентрацией поля волны в золь-гель плёнке, обладающей отрицательным значением ТОК. Для TM_1 -волны концентрация поля волны в плёнке меньше за счёт увеличения доли мощности волны в подложке, материал которой характеризуется очень малым положительным ТОК. Практически нулевое значение ТОК для ΔT_1 неожиданно и требует дальнейших исследований.

В заключение следует отметить перспективность использованной методики исследования температурной зависимости ЭПП с помощью термоэлектрического модуля Пельтье. Эта методика позволила сдвинуть нижнюю границу диапазона температур до 5–6°C и при этом существенно упростить измерительную установку и сделать её более компактной. Кроме того, была обеспечена высокая точность определения температуры и большая скорость её установления при измерениях ЭПП.

Литература

1. Чехлова Т. К., Живцов С. В., Погосян А. С. Оптические волноводы на основе плёнок, изготовленных по технологии золь-гель // Вестник РУДН. Серия «Физика». — 2005. — № 1(13). — С. 35–47. [*Chekhlova T. K., Zhivcov S. V., Pogosyan A. S. Opticheskie volnovodih na osnove plynok, izgotovlennihkh po tekhnologii zolj-gelj // Vestnik RUDN. Seriya «Fizika». — 2005. — No 1(13). — S. 35–47.*]
2. Fardad M. A., Mishechkin O., Fallahi M. Hybrid Sol-Gel Materials for Integration of Optoelectronic Components // J. of Lightwave Technology. — 2001. — Vol. 19, No 1. — Pp. 84–91.
3. Optical Properties of Zirconia-Titania-ORMOSIL Films for Temperature Tuning Distributed Feedback Waveguide Lasers / X. L. Zhu, L. Shi, J. Chan et al. // Optics Communications. — 2005. — Vol. 251, No 4–6. — Pp. 322–327.
4. Determining the Minimum Number of Arrayed Waveguides and the Optimal Orientation Angle of Slab for the Design of Arrayed Waveguide Gratings / J. Zhao, N. Q. Ngo, K. Pita et al. // Optics Communications. — 2003. — Vol. 226, No 1–6. — Pp. 181–189.
5. Чехлова Т. К., Живцов С. В., Грабовский Е. И. Температурная зависимость золь-гель волноводов // Радиотехника и электроника. — 2006. — Т. 51, № 7. — С. 855–861. [*Chekhlova T. K., Zhivcov S. V., Grabovskiy E. I. Temperaturnaya zavisimostj zolj-gelj volnovodov // Radiotekhnika i ehlektronika. — 2006. — T. 51, No 7. — S. 855–861.*]
6. Temperature Dependence of Pyrolysed Sol-Gel Planar Waveguide Parameters / S. Saini, R. Kurrat, J. E. Prenosil, J. J. Ramsden // J. Phys. D: Appl.Phys. — 1994. — Vol. 27, No 6. — Pp. 1134–1136.
7. Influence of Temperature and Environment Humidity on the Transmission Spectrum of Sol-Gel Hybrid Channel Waveguides / O. Soppera, P. J. Moriera, P. V. S. Marques, A. P. Leite // Optics Communications. — 2007. — Vol. 271, No 2. — Pp. 430–435.
8. Thermo-Optical Coefficients of Sol-Gel ZrO_2 Thin Films / Z. Elalamy, E. Drouard, T. M. Govern et al. // Optics Communications. — 2004. — Vol. 235, No 4–6. — Pp. 365–372.
9. Элемент Пельтье. — http://ru.wikipedia.org/wiki/Элемент_Пельтье.

UDC 621.378.826.535 8

Study of Thermo-optical Coefficient of Sol-Gel Waveguides

S. V. Pavlov, N. S. Trofimov, T. K. Chekhlova

*Department of Radiophysics
Peoples' Friendship University of Russia
6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russia*

Review of methods for studying temperature dependence of characteristics of optical waveguides fabricated by sol-gel technique is presented. The method of studying temperature properties of effective refractive index of waveguide modes with the help of thermoelectric module Peltier is proposed and approved. This method allows to widely expand the temperature researches of materials and waveguides made of them.

Key words and phrases: integrated optics, optical waveguide, effective refractive index, sol-gel process, thermo-optical coefficient.