

г. е. при выключении магнитного поля величина сопротивления оказывалась на 1—2 % меньше исходной. Величина гистерезиса зависела от скорости изменения магнитного поля и числа рабочих циклов.

Поскольку, согласно нашим предположениям, проводимость сильно облученных электродами пленок VO_2 при гелиевых температурах определяется сверхтонкими нитями металлического ванадия, то можно считать, что магнитное поле подавляет локализацию, что и приводит к отрицательному магнитосопротивлению.

Вопрос о влиянии магнитного поля на систему слабо локализованных электронов (в случае тонкой нити) был рассмотрен в работе [6]. После некоторого преобразования формула, полученная в этой работе, принимает вид

$$\frac{\Delta R_H}{R_{H=0}} = K \left\{ \left[1 + \left(\frac{H}{H_c} \right)^2 \right]^{-1/2} - 1 \right\}, \quad (1)$$

где K — множитель, зависящий от температуры и геометрии образца, а H_c — величина критического магнитного поля, вызывающего делокализацию электронов. На рис. 2 представлены результаты измерения магнитосопротивления одного из образцов 2 при 4.2 и 1.6 К. Сплошные кривые рассчитаны по формуле (1) при $H_c = 95$ кэ. Наблюдается хорошее совпадение теории с экспериментом. Магнитосопротивление сильнооблученного образца 4 также хорошо отвечает зависимости (1) при $H_c = 50$ кэ.

В заключение приведем основные выводы работы.

1. Облучение пленки VO_2 электронным пучком приводит к образованию металлической фазы V, которая сохраняется в отсутствие кислорода.
2. При высокой (комнатной) температуре сопротивление облученных пленок VO_2 обусловлено полупроводниковой фазой, при низких (гелиевых) — металлической.
3. Магнитосопротивление облученных пленок VO_2 при гелиевых температурах отрицательно и хорошо описывается теорией магнитосопротивления тонких нитей при низких температурах.

Авторы признательны Б. П. Захарчене и Б. З. Спиваку за обсуждение результатов и М. Ю. Герману за приготовление образцов.

Литература

- [1] Мотт Н. Ф. Переходы металл—изолятор. М.: Наука, 1979, с. 237—245.
- [2] Захарченя Б. П., Мешковский И. О., Теруков Е. И., Чудновский Ф. А. Письма в ЖТФ, 1975, т. 1, № 1, с. 9—11.
- [3] Chivian J. S., Scott M. W., Case W. E., Krasutsky N. J. IEEE J. Quant. Electron., 1985, в. QE-21, N 4, p. 383—390.
- [4] Аброян И. А., Подсвилов О. А. Тез. докл. II Всес. конф. «Физика окислых пленок». Петрозаводск, 1987, т. 1. 12 с.
- [5] Thouless D. J. Phys. Rev. Lett., 1977, в. 39, N 18, p. 1167—1169.
- [6] Альтшулер Б. Л., Аронов А. Г. Письма в ЖЭТФ, 1981, т. 33, № 10, с. 515—518.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
8 декабря 1987 г.

НИЗКОДОБРОТНЫЙ РЕЗОНАТОР ФАБРИ—ПЕРО НА ОСНОВЕ ДИФFUЗИОННОГО СТЕКЛЯННОГО СВЕТОВОДА

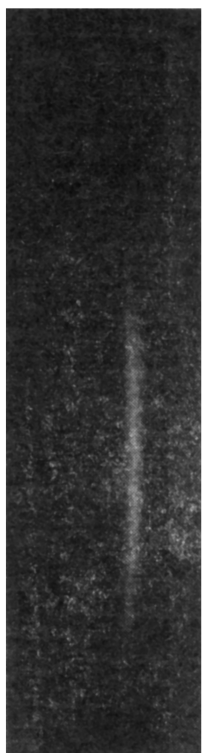
В. М. Абусея, Е. И. Кухарева, Е. И. Леонов,
А. А. Липовский, С. Э. Хабаров

В последние годы исследователями проявляется значительный интерес к резонаторам типа Фабри—Перо на основе оптических волноводов, формируемых в подложках из ниобата лития [1, 2] или арсенида галлия [3]. Несмотря на низкую добротность подобных резонаторов, в литературе имеются сообщения об их использовании в качестве чувствительного элемента

датчика температуры [2], элемента бистабильного оптического устройства с электронной обратной связью [4], для определения затухания в световодах [1, 3, 5]. Структуры на основе LiNbO_3 световодов с отражающим покрытием на одном из торцов, кроме того, использовались как элемент составного резонатора полупроводникового лазера [6]. Также отмечалась перспективность применения высокодобротных интегрально-оптических резонаторов для генерации второй гармоники светового излучения и в параметрических генераторах света. Кроме того, аналогично объемным нелинейным резонаторам Фабри—Перо [7], интегрально-оптические резонаторы, несомненно, могут быть использованы для получения чисто оптической би- и мультистабильности. Высокие плотности мощности излучения, распространяющегося в оптических волноводах, позволяют рассчитывать на умеренные по сравнению с объемными структурами мощности переклещивания.

Целью настоящей работы было изготовление и исследование резонатора Фабри—Перо на основе оптического волновода, сформированного в стеклянной подложке.

Поскольку стекла в среднем обладают худшей по сравнению с кристаллическими средами чувствительностью к различным воздействиям (практически стеклянные резонаторы будут изменять свои параметры только за счет изменения давления или температуры) представляют интерес интегрально-оптические резонаторы Фабри—Перо с различными покрывающими слоями. В этом случае оказывается возможным применение таких композитных структур в качестве чувствительных элементов различных оптических датчиков, а использование нелинейных покрытий может послужить основой создания бистабильных интегрально-оптических устройств. Таким образом, простота изготовления оптических волнопроводов в дешевых стеклянных подложках, легкость варьирования характеристик этих волнопроводов в достаточно широких пределах и возможность нанесения на структуру различных покрывных слоев определяют перспективность исследований в этой области.



На первом этапе работы исследовался резонатор Фабри—Перо без каких-либо покрывающих слоев. Резонатор был сформирован на основе канального оптического волновода, изготовленного на подложке из стекла марки К8 методом электростимулированной диффузии из расплава смеси нитратов серебра и калия [8]. Режим диффузии соответствовал формированию одномодового для длины волны излучения 0.63 мкм планарного оптического волновода глубиной ≈ 1 мкм. Диффузия проводилась через алюминиевую маску в виде щели шириной 5 мкм, соответствующей одномодовому по ширине каналному световоду для использованного режима диффузии. Маска формировалась с помощью стандартной фотолитографической процедуры.

Стекло (в отличие от кристаллических материалов, использовавшихся ранее для изготовления интегральных резонаторов Фабри—Перо) не обладает плоскостями спайности и имеет низкий показатель преломления. Поэтому для изготовления добротных резонаторов необходима тщательная полировка торцов и последующее нанесение на них отражающих покрытий.

Рис. 1.

В наших экспериментах торцы сформированной структуры полировались по классу $\Delta 14$, при этом особое внимание уделялось полировке торцов канальных волнопроводов с целью получения качественной режущей кромки прямого угла. Также контролировалось отсутствие заколов на торце световодов. Полупрозрачные зеркала были нанесены на торцы структуры методом термического испарения алюминия в вакууме. Существенным моментом является запыление торца световода при отсутствии подпыла на его боковую поверхность, так как последнее может послужить причиной увеличения затухания. Алюминий не является лучшим из отражающих покрытий в такой конфигурации, даже нанесение на торец подложки непрозрачной пленки из золота вносит, согласно литературным данным, потери ≈ 2 дБ. Наилучших результатов, несомненно, следует ожидать при нанесении на торцы подложки многослойных диэлектрических покрытий.

Изготовленный интегрально-оптический резонатор имел длину $L=25$ мм при глубине оптического волновода 1 мкм и ширине 5 мкм. На рис. 1 представлены распределения интенсивности излучения, выводимого из канального оптического волновода резонатора с помощью призмы при торцевом возбуждении.

Для определения добротности резонатора использовалось температурное сканирование, т. е. оптическая длина резонатора варьировалась за счет линейного расширения и термооптического эффекта. При этом излучение когерентного источника ($\lambda=0.63$ мкм) вводилось с торца в оптический резонатор с помощью микрообъектива, а увеличенное изображение распределения интенсивности выходящего излучения поступало на фотоприемник. Для измерения температуры использовалась термопара. Полученные значения контраста K (т. е. отношения амплитуды переменной части сигнала, снимаемого с выхода резонатора, к средней выходной интенсивности) составили 0.21 для TM - и 0.10 для TE -моды. По-видимому, отличия связаны с различным затуханием и неодинаковыми условиями отражения TE - и TM -мод. Это значение контраста $K=0.21$ превышает значение контраста для $Ti : LiNbO_3$ — резонатора, полученное при использовании неметаллизированных торцов световода $K=0.18$ [1]. Исходя из измеренной величины K и беря коэффициент отражения от торца $R \leq 0.5$, оценим величину затухания света α в канальном волноводе с помощью известного соотношения [1]

$$\alpha = \frac{4.34}{L} \ln \frac{RK}{1 - \sqrt{1 - K^2}},$$

где L — длина резонатора.

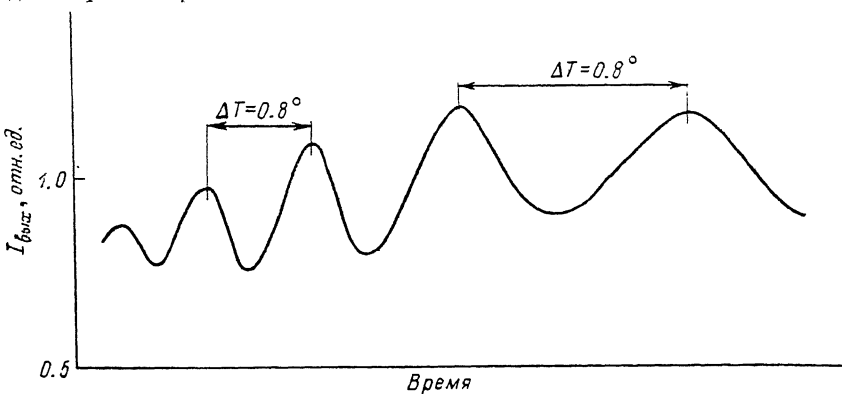


Рис. 2.

Полученное значение затухания составляет ≤ 2.3 дБ/см. Это значение является верхним пределом потерь, так как значение $R=0.5$ соответствует отражению от торца подложки достаточно далеко от поверхности, вблизи которой расположен канальный световод. Коэффициент отражения для моды световода может быть существенно меньшим как за счет неидеальности режущей кромки, так и за счет дефектности покрытия вблизи режущей кромки. Прямое измерение коэффициента отражения для моды нами не проводилось, однако значение $R=0.5$, несомненно, является завышенным. Кроме того, торцы подложки, от которых происходит отражение, не строго перпендикулярны направлению канального световода и не параллельны друг другу (непараллельность в плоскости подложки составляет $\approx 0.8^\circ$, а в плоскости, перпендикулярной плоскости подложки, $\approx 2.6^\circ$). Реально это приводит к дополнительным потерям света. Этот факт хорошо иллюстрируется тем, что при переходе от канального к планарному оптическому волноводу, сформированному на той же подложке, наблюдалось падение контраста до $K=0.03$. Следует заметить, что объемный резонатор Фабри—Перо, даже низкодобротный, при такой непараллельности практически не может быть реализован на такой базе ($L=25$ мм). Последний факт также был подтвержден экспериментально.

Для оценки температурной чувствительности резонатора использовалось соотношение [2]

$$\Delta T = \lambda/2L (\partial n_{эфф}/\partial T + n_{эфф}\alpha_L)^{-1},$$

где ΔT — расстояние между максимумами пропускания по температуре, L — длина резонатора, $n_{эфф}$ — эффективный показатель преломления, λ — длина волны излучения, α_L и $\partial n_{эфф}/\partial T$ — коэффициенты линейного расширения и термооптический соответственно. Для стекла К8, использованного в качестве подложки $\alpha_L=7.6 \cdot 10^{-6}$, $\partial n_{эфф}/\partial T=2.4 \cdot 10^{-6}$ [°]. Это дает чувствительность $\Delta T=0.91^\circ$. Измеренная экспериментально величина несколько меньше: $\Delta T \approx 0.8^\circ$. Вероятно, причиной расхождения является различие между оптическими коэффициентами для подложки и ионнообменного слоя.

Для иллюстрации работы интерферометра на рис. 2 представлена зависимость от времени интенсивности излучения на выходе структуры при ее остывании. Расстояние по температуре между максимумами постоянно и составляет $\Delta T \approx 0.8^\circ$, хорошо проявляется нелинейный по времени характер остывания. Контраст составляет 0.21. Близкий к синусоидальной характер зависимости типичен для низкодобротных интерферометров Фабри—Перо.

Таким образом, авторами настоящей работы впервые изготовлен и исследован резонатор типа Фабри—Перо на основе канального световода, сформированного в стеклянной подложке. Контраст интерферометра составляет 21 %, что выше, чем для структур, изготовленных на основе ниобата лития. Температурная чувствительность резонатора близка к расчетной и составляет $\approx 0.8^\circ$ на период. Структура на основе канальных световодов значительно менее чувствительна к непараллельности отражающих элементов, чем объемный интерферометр. Подобные интерферометрические элементы могут найти применение в интегрально-оптических датчиках в качестве внешних резонаторов полупроводниковых лазеров, а при использовании нелинейных покрывающих слоев как бистабильные интегрально-оптические устройства.

Литература

- [1] Regener R., Sohler W. Appl. Phys. B, 1985, v. 36, p. 143—147.
- [2] George H., Hollenbach U., Söchtig J., Sohler W. In: Integrated Optics / Ed. by H. P. Nothling, R. Ulrich. Berlin: Springer Verlag, Heidelberg, 1985, p. 21—25.
- [3] Austin M. W., Kemeny R. C. In: Integrated Optics / Ed. by H. P. Nothling, R. Ulrich. Berlin: Springer Verlag, Heidelberg, 1985, p. 140—143.
- [4] Smith P. W., Kaminow I. P., Maloney P. J., Stulz L. W. Appl. Phys. Lett., 1979, v. 34, N 1, p. 62—65.
- [5] Kaminow I. P., Stulz L. W. Appl. Phys. Lett., 1978, v. 33, N 1, p. 62—64.
- [6] Alfjerness R. C., Eisenstein G., Korotky S. K. et al. Appl. Phys. Lett., 1984, v. 45, N 9, p. 944—946.
- [7] Cush R., Trundle C., Kirkby C. J. G., Bennion I. Electron. Lett., 1987, v. 23, N 8, p. 419—421.
- [8] Липовская М. Ю., Липовский А. А., Петрунькин В. Ю. В сб.: Разработка элементов гибридных интегральных схем оптического и СВЧ диапазонов. Тула, 1980, с. 3—9.
- [9] Справочник конструктора оптико-механических приборов / Под ред. В. А. Попкова. Л.: Машиностроение, 1980. 742 с.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
17 декабря 1987 г.