

мод  $\Delta g_{\text{пор}}$  повышают спектральную селективность ЛВСНР по сравнению с ЛД без теплового зазора, что увеличивает возможность достижения одномодового режима генерации. При сканировании теплового зазора изменяются условия складывания оптических полей ЛВСНР, что приводит к перестройке рабочей длины волны лазера. Здесь следует ожидать сильное изменение  $\lambda_r(x)$  с периодом  $\sim \lambda/2$ . Однако такая быстроосциллирующая зависимость в эксперименте не наблюдалась, что, по-видимому, связано с некоторым «размытием» теплового зазора за время импульса подкачки.

На основе модели плоских волн в приближении отсутствия рассеяния излучения на тепловом зазоре и с учетом порогового условия генерации найдено простое уравнение, позволяющее оценить величины изменений  $\Delta g_{\text{пор}}$  лазерных мод,

$$\sqrt{r}R \exp(i\theta) [\exp(-2\Gamma l_1) + \exp(-2\Gamma l_2)] + R(1 - \sqrt{r})^2 \exp(-2\Gamma L + i2\varphi) = 1, \quad (1)$$

где  $\Gamma$  — комплексная постоянная распространения;  $l_1, l_2$  — длины парциальных резонаторов;  $\theta, \varphi$  — соответственно фазовые сдвиги отраженной и прошедшей через тепловой зазор волн.

Несмотря на то что  $r \ll R$ ,  $\Delta g_{\text{пор}}$  может достигать значений 0.1—1.0 см<sup>-1</sup>. Такие значения  $\Delta g_{\text{пор}}$  вполне могут привести к наблюдаемым диапазонам перестройки  $\lambda_r$  и изменений мощности генерации.

Таким образом, ЛВСНР с тепловым зазором позволяет: 1) получать одномодовый режим генерации; 2) управлять  $\lambda_r$ ; 3) понизить порог генерации; 4) перераспределять мощности, излучаемые с переднего и заднего зеркал. Сильная зависимость параметров ЛВСНР от геометрических характеристик зазора объясняет разброс параметров ЛД, изготовленных в одном технологическом цикле, где в результате присутствия неконтролируемых неоднородностей показателя преломления [3] неизбежно образуются внутренние сильносвязанные низкодобротные резонаторы. В заключение отметим, что приведенные результаты не противоречат качественным выводам работы [3], авторы которой сделали попытку описать неоднородный по длине гетеролазер, формально перенося известные в квантовой механике принцип Франка—Кордона и эффект Рамзауэра на исследуемую систему.

#### Список литературы

- [1] Tsang W. T., Olsson N. A., Logan R. A. // Appl. Phys. Lett. 1983. Vol. 42, N 8. P. 650—652.
- [2] Tsang W. T., Olsson N. A., Logan R. A. et al. // Appl. Phys. Lett. 1983. Vol. 43. N 11. P. 1003—1005.
- [3] Манько М. А., Микезьян Г. Т. // Тр. ФИАН. 1986. Т. 166. С. 126—154.
- [4] Анисимов С. И., Имас Я. А., Романов Г. С., Ходыко Ю. В. Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука, 1970. 272 с.
- [5] Marple D. T. F. // J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35. P. 1244—1242.

Институт прикладной физики  
АН МССР

Поступило в Редакцию  
9 ноября 1987 г.

### ВЛИЯНИЕ СОСТАВА МАТЕРИАЛА ПОДЛОЖКИ НА ПАРАМЕТРЫ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

А. В. Хомченко, В. П. Редько

Известно, что свойства тонких пленок, полученных напылением в вакууме, практически всегда в большей или меньшей степени не соответствуют свойствам распыляемого материала [1]. Это относится и к стеклянным пленкам, получаемым высокочастотным (ВЧ) распылением и используемым в качестве оптических волноводов. Для таких пленок характерно, что их показатель преломления (ПП) практически всегда больше, чем ПП распыляемых материалов. Это обстоятельство позволило в свое время получить новый класс тонкопленочных оптических волноводов из стекол, названных гомогенными [2]. Очевидными причинами изменения ПП материала пленок являются отклонение состава материала пленки от состава рас-

пыляемой мишени и внутренние механические напряжения в пленках, вызывающие явление фотоупругости. Однако в ряде случаев одними этими причинами трудно объяснить величину отклонения показателя преломления  $\Delta n = n_{\text{пл}} - n_{\text{м}}$  (где  $n_{\text{пл}}$  и  $n_{\text{м}}$  — ПП материала пленки и мишени соответственно), достигающую значений  $3 \times 10^{-3} \dots 2 \times 10^{-2}$ . Кроме того, мы обратили внимание, что тонкопленочные волноводы, полученные в идентичных условиях, но на подложках, изготовленных из стекол различного состава, имеют также сильно отличающиеся оптические потери. Все это в целом побудило нас провести исследования влияния химического состава стеклянных подложек на свойства получаемых пленок. Результаты этих исследований и изложены в данной работе.

Исследованы свойства тонких пленок из стекол марок ЛК, БК, ТК, ЛФ, БФ, Ф, нанесенных на подложки из оптических стекол различного состава. Пленки наносились по методике, описанной в работе [2]. Так как коэффициенты термического расширения распыляемых мишеней и подложек зачастую в нашем эксперименте различались, то было учтено влияние механических напряжений, возникающих вследствие этого, на величину ПП пленок. Их величина измерялась по методике, описанной в [1]. Установленная величина изменения ПП за счет влияния напряжений составляла  $3 \times 10^{-4} \dots 2 \times 10^{-3}$ .

При осаждении тонких пленок характер взаимодействия частиц распыляемого материала с поверхностью подложки определяется энергией распыляемых атомов и ионов, температурой подложки и энергией химической связи между распыленными частицами и атомами поверхности подложки. Поэтому при исследовании влияния химического состава подложек на свойства получаемых пленок первые два параметра сохранялись неизменными путем поддержания постоянных условий распыления. А в качестве материала подложек использовались силикатные стекла различного состава. Известно, что основной характеристикой стеклообразных силикатов является относительная катионная фракция  $f_{\text{Si}}$ , равная отношению числа атомов кремния к числу атомов немостиковых кислорода [3]. Она характеризует степень связности кремнекислородного каркаса и образование определенного типа силикатов (либо отклонение от уравновешенного состава). В стеклах неуравновешенного состава имеется либо избыток, либо недостаток кремнезема  $\Delta$  [4], т. е. содержание кремнезема в стекле не соответствует тому количеству, которое необходимо для образования определенного типа силикатов.

Первым фактом, подтвердившим наше предположение о влиянии состава материала подложки (влияние  $\Delta_s$ ) на параметры напыленных пленок, стал следующий эксперимент. В качестве подложки под напыление пленок была использована подложка из стекла ЛК7, на одной из поверхностей которой методом электролиза был создан волновод. На этой поверхности подложки был сформирован обогащенный слой, а на другой — обедненный ионами щелочных металлов (подложка 1) [5]. При одновременном напылении на подложку 1 и подложку из ЛК7 (2) пленок из различных оптических стекол мы получили различные значения ПП для пленок на подложках 1 и 2. Этот факт и позволил сделать предположение о зависимости параметров тонких пленок от состава материала используемой подложки. У пленок из разных стекол на подложках, у которых  $\Delta_s$  изменялось от  $-25$  до  $+50$  мол.%, значения ПП также оказались различными и зависели от величины  $\Delta_s$ . На рис. 1 приведены типичные зависимости приращения ПП для пленок на подложках различного состава. Если вернуться теперь к нашему эксперименту с подложкой из ЛК7, то становится понятными различия в ПП пленки на подложках 1 и 2 (рис. 1, кривая 5). Пленка, нанесенная на подложку 1, имеет ПП больше, чем пленка на подложке из стекла ЛК7, не подвергнутой специальной обработке (точки  $A_1$  и  $A$  на кривой 5 соответственно). Так как вблизи поверхности такой подложки создан слой, обедненный ионами щелочных металлов, то для него  $\Delta_s$  увеличилось [3]. А это и объясняет смещение точки  $A$  в точку  $A_1$  на кривой 5.

Эффект влияния состава материала подложки на параметры тонкопленочных волноводов сильнее проявляется при меньшей ВЧ мощности и повышенных температурах подложки  $T_s$  (рис. 1, кривые 1, 3, 4), так как в обоих случаях скорость роста пленок уменьшается. Так, при уменьшении скорости роста пленок с 30 до 12 Å/мин различие в ПП пленок, напыленных, например, на подложки с  $\Delta_s = \Delta_m$ , где  $\Delta_m$  — отклонение от уравновешенного состава материала мишени, возрастает с  $2 \times 10^{-3}$  до  $5 \times 10^{-3}$ .

Скорость роста пленок на различных подложках также различна. Она максимальна при напылении пленки на подложку, изготовленную из материала, идентичного материалу распыляемой мишени, и принимает наименьшие значения при напылении на подложку, для которой величина  $\Delta_s = -\Delta_m$ . При этом значение ПП пленки непосредственно связано со скоростью роста и имеет обратную зависимость от  $\Delta_s$ . Таким образом, изменение скорости роста пленок на подложках различного состава определяет изменение их ПП. Заметим, что

именно в случае  $\Delta_s = -\Delta_m$  в пленках существуют максимальные механические напряжения, обусловленные захватом пленкой частиц рабочего газа при малых скоростях роста [6].

Дисперсия материала пленок также зависит от химического состава подложек (рис. 2). Эта зависимость для пленок на подложках, у которых  $\Delta_s$  изменяется в интервале от  $-\Delta_m$

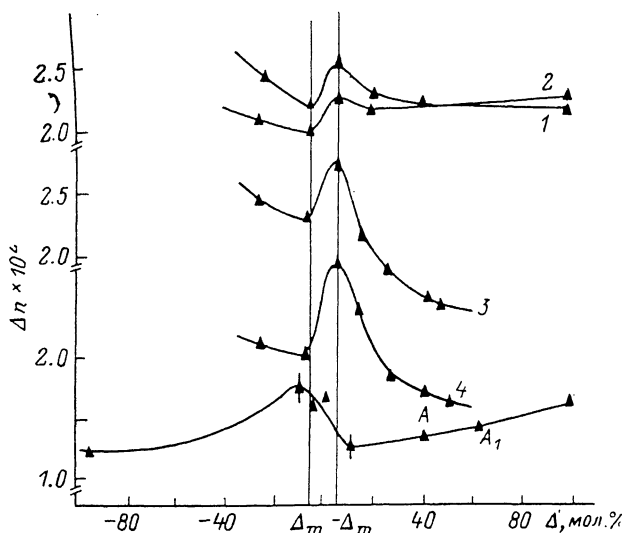


Рис. 1. Зависимость приращения ПП пленки от отклонения состава материала подложки от уравновешенного.

1, 3 — пленка из стекла ТК20 при напряжении смещения на мишени  $U_{см} = 180, 150$  В соответственно и  $T_s = 180^\circ$ ; 4 — при  $U_{см} = 180$  В,  $T = 240^\circ$ ; 2 — пленка из стекла ТК20, отожженная при  $T_s = 400^\circ$  в течение 4 час; 5 — для пленки, полученной распылением стекла БК10 при  $U_{см} = 180$  В.

до  $+\Delta_m$ , позволяет высказать предположение о причине возрастания ПП пленок [4]. При напылении пленок из стекол, например, с  $\Delta_m < 0$  на подложки, у которых  $\Delta_s$  изменяется от  $-\Delta_m$  до  $+\Delta_m$ , количество кислорода, вносимого в пленку, возрастает вследствие уменьшения скорости роста пленки на таких подложках. Содержание  $SiO_2$  в материале подложек в этом ряду также возрастает. Все это делает возможным формирование пленок, которые характеризуются более высокими координационными числами окислов, входящих в их состав.

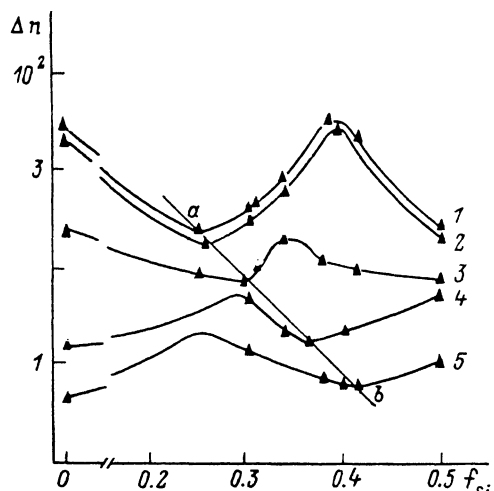
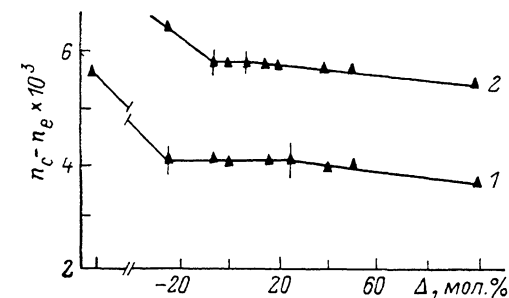


Рис. 2. Зависимость частной дисперсии ПП пленки из ТК14 (1) и пленки из ТК20 (2) от состава материала подложки.

Рис. 3. Зависимость ПП пленок из стекла ТК14 (1), БФ16 (2), ТК20 (3), БК10 (4), БК4 (5), напыленных на подложки различного состава.

Так, при напылении пленок из стекла ТК14 на подложки со значениями  $\Delta_s$  от  $-25$  до  $+25$ , что соответствует изменению содержания  $SiO_2$  в интервале от 32.9 до 49.5 мол.%, скорость роста пленок уменьшается от 21 до 16 Å/мин, а кислородное число по бору ( $B_2O_3$ ) возрастает

от 1.2 до 1.8. Все это в целом делает возможным переход части борного ангидрида из тригональной конфигурации в тетраэдрическую. При этом ПП пленки увеличивается от 1.630 до 1.638.

Увеличение дисперсии и большие потери при волноводном распространении света в пленках, напыленных на подложки с  $\Delta_s < \Delta_m$ , свидетельствуют об избыточном содержании понов металлов в них (нарушение стехиометрии). Изотермический отжиг этих пленок приводит к уменьшению их ПП (рис. 1, кривая 2), росту толщины и уменьшению оптических потерь.

Аналогичен характер зависимости параметров пленок от состава материала подложки при распылении мишеней из стекол с избытком кремнезема (рис. 1, кривая 5). Однако для пленок из таких стекол, как ТК8, БФ21, ЛК5, наблюдается отклонение от характерной для пленок из других стекол зависимости параметров пленки от состава материала подложки. Это привело нас к необходимости рассмотрения зависимости свойств напыленных пленок от величины относительной катионной фракции  $f_{Si}$ . В первом приближении можно считать, что стекла, имеющие одинаковые значения  $f_{Si}$ , являются структурно-эквивалентными [3], хотя и имеют различные  $\Delta$ . Это подтверждает и эксперимент. При напылении пленок на подложки, у которых коэффициенты  $f_{Si}$  одинаковы, а расчетные отклонения от уравновешенного состава  $\Delta_s$  различны, мы получили пленки с одинаковыми параметрами. И тогда для всех исследуемых стекол были получены типичные зависимости ПП напыленных пленок от коэффициента  $f_{Si}$ , определяющего состав и структуру материала подложки (рис. 3). Кривая *ab*, соединяющая точки, в которых выполняется равенство коэффициентов  $f_{Si}$  для материалов мишени и подложки, и определяющая значения ПП гомогенных волноводов, дает результаты, совпадающие с данными работы [2].

Таким образом, получены зависимости таких свойств тонких пленок, как показатель преломления, его дисперсия, скорость роста и величина механических напряжений, от состава материала используемой подложки. Характер зависимости параметров тонких пленок определяется соотношением относительных катионных фракций материалов распыляемой мишени и используемых подложек. Зная эту зависимость, параметры пленок можно достаточно точно прогнозировать, создавая определенные условия напыления.

#### Список литературы

- [1] Технология тонких пленок / Под ред. Л. Майсella. М.: Сов. радио, 1977. Т. 2. 767 с.
- [2] Петровский Г. Т., Редько В. П., Хомченко А. В. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 10. С. 2045—2047.
- [3] Аппен А. А. Химия стекла. Л.: Химия, 1974. 350 с.
- [4] Демкина Л. И. Исследование зависимости свойств стекол от их состава. М.: Изд-во оборонной промышл., 1958. 239 с.
- [5] Войтенков А. И., Редько В. П., Петровский Г. Т. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 2. С. 370—371.
- [6] Ивановский Г. Ф., Петров В. И. Ионно-плазменная обработка материалов. М.: Радио и связь, 1986. 230 с.

Могилевское отделение  
Института физики АН БССР

Поступило в Редакцию  
15 декабря 1987 г.

### МАГНИТОСТАТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ В ОДНООСНОМ КРИСТАЛЛЕ С ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

М. А. Сигал

1. Исследованию спектра магнитостатических колебаний (МСК) в одноосном кристалле с плоскопараллельной доменной структурой (ДС) посвящен ряд работ [1-4]. В [1-3] анализ спектра МСК основан на методе, в котором стандартные граничные условия на физической границе раздела магнитных фаз дополнены условием трансляционной инвариантности, кото-