

двупреломляющих кристаллических систем с ПДК расширить класс веществ с селективным характером рассеяния. Использование тройных соединений со структурой халькопирита позволит создавать оптические фильтры для ближней инфракрасной области спектра.

Литература

- [1] Л. Е. Соловьев, В. С. Рудаков. Вестн. ЛГУ, № 16, 170, 1967; № 4, 23, 1968.
- [2] M. V. Hobden. Nature, 220, № 5169, 781, 1968.
- [3] А. Х. Зильберштейн, Л. Е. Соловьев. Опт. и спектр., 35, 471, 1973.
- [4] Л. Е. Соловьев, А. Х. Зильберштейн. Опт. и спектр., 45, 735, 1978.
- [5] P. R. Henry. Phys. Rev., 143, 326, 1966.
- [6] C. Christiansen. Ann. Phys., 23, 298, 1884.
- [7] Н. А. Борисевич, В. Г. Верещагин, М. А. Валидов. Инфракрасные фильтры. «Наука и техника», Минск, 1971.
- [8] L. Reyleigh. Nature, 60, 64, 1899.
- [9] C. V. Raman. Proc. Ind. Acad. Sci., A29, 381, 1949.
- [10] Б. И. Степанов, А. П. Пришивалко. Тр. ин-та физики и математики АН БССР, вып. 2, 190, 1957.
- [11] R. H. Clark. Appl. Opt., 7, 861, 1968.
- [12] Физика и химия соединений $A_{II}B_{VI}$. «Мир», М., 1970.

Поступило в Редакцию 2 декабря 1980 г.

УДК 535.345.1 : 539.238

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОКИСНЫХ СУПЕРМНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК

В. А. Камин и М. В. Шилова

Однослойные диэлектрические пленки и многослойные структуры с малым числом слоев широко используются для создания пассивирующих и просветляющих покрытий [1]. В настоящее время делаются попытки использовать в приборах прикладной оптики эффективные тонкопленочные системы с числом слоев 10^2 — 10^3 [2]. На основе композиций супермногослойных диэлектрических пленок (СДП) могут быть изготовлены полосовые фильтры, а также просветляющие покрытия для линз и окон оптических приборов, работающих в видимой и инфракрасной областях спектра [3, 4].

В настоящей работе проведены исследования оптического пропускания супермногослойных пленок, состоящих из чередующихся слоев диэлектриков SiO и GeO. Измерение оптического пропускания СДП производилось на спектрофотометре СФ-26 в диапазоне длин волн 300 ÷ 800 нм.

Методика изготовления супермногослойных многокомпонентных пленок подробно описана в [6]. Для нанесения СДП образец устанавливается на карусели подложек, которая вращается над несколькими одновременно действующими испарителями. Пересекая потоки испаряемых веществ, образец покрывается многослойной многокомпонентной пленкой, число слоев в которой определяется числом работающих испарителей (количеством компонентов СДП) и количеством оборотов карусели. Толщина наносимых слоев задается скоростью вращения карусели и интенсивностью распыления веществ. Для определения соотношения компонентов в супермногослойной пленке и толщины наносимых слоев одновременно с СДП изготавливаются контрольные образцы, каждый из которых покрывается пленкой только одного компонента. Измерив толщину пленки контрольного образца, которая равна суммарной толщине слоев данного компонента в СДП, и число оборотов карусели, можно рассчитать толщину наносимых слоев.

В данной работе по методике СДП были получены структуры с числом слоев $\sim 2 \div 1000$. Расчетная толщина слоев в различных образцах составляла величину $\sim 1 \div 100$ нм. Общая толщина пленок была в пределах $\sim 0.1-10$ мкм. Температура подложки, при которой осаждались пленки, была $20-300^\circ\text{C}$. Для уменьшения влияния неконтролируемых технологических факторов на результаты проводимых исследований, супермногослойные двухкомпонентные ($\text{SiO}-\text{GeO}$) и однокомпонентные (SiO , GeO) пленки изготавливались одновременно в течение одного цикла напыления. Однослойные пленки SiO и GeO , а также двухслойные ($\text{SiO}+\text{GeO}$) изготавливались по обычной методике на неподвижной подложке [6].

В настоящее время в литературе существуют противоречивые данные о размерах наносимых слоев, при которых в многослойных пленках происходит

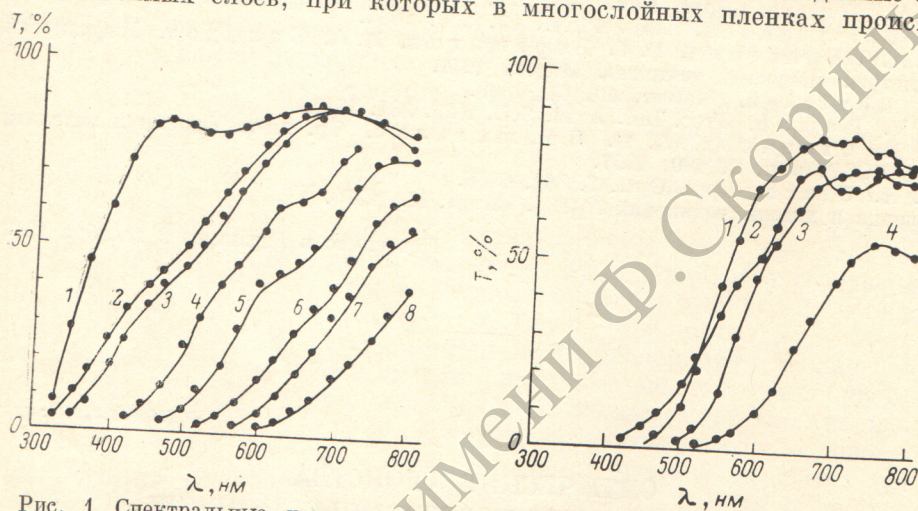


Рис. 1. Спектральные характеристики оптического пропускания пленок. Однослойные: 1 — SiO ; 2 — GeO ; 3 — двухслойная $\text{SiO}+\text{GeO}$; супермногослойные $\text{SiO}-\text{GeO}$; 4 — 50, 5 — 200, 6 — 260, 7 — 400, 8 — 500 слоев.

Рис. 2. Спектральные характеристики оптического пропускания супермногослойных пленок $\text{SiO}-\text{GeO}$ с равным числом слоев ($n \sim 200$) и различными соотношениями компонентов $p = d_{\text{GeO}}/d_{\text{SiO}}$. 1 — $p = 2.4$, $T_{\text{подл}} = 50^\circ\text{C}$; 2 — $p = 4$, $T_{\text{подл}} = 200^\circ\text{C}$; 3 — $p = 6.3$, $T_{\text{подл}} = 200^\circ\text{K}$; 4 — $p = 3$, $T_{\text{подл}} = 300^\circ\text{C}$.

нарушение слоистости и осуществляется переход от многослойника к гомогенной смеси [7-11]. По данным работ [7-9], слоистость структуры, замечаемая оптическими методами, сохраняется до толщины ~ 10 нм. В работе [10] на основе закономерностей, полученных из электрических измерений, делается заключение, что супермногослойные диэлектрические пленки $\text{SiO}-\text{GeO}$ проявляют себя как гомогенные смеси при толщине слоев < 3 нм и как многослойники при толщине слоев ≥ 3 нм. Авторы работы [11] считают, что двухкомпонентные пленки $\text{Cu}-\text{SiO}$ при толщинах слоев $\text{SiO} \sim 2.5$ нм являются многослойными. Противоречивость существующих данных о размерах переходной области от гомогенной смеси к многослойникам обусловило постановку эксперимента,¹ сущность которого заключалась в следующем. Были изготовлены металл-диэлектрические структуры двух типов. Первый тип структур содержал грунтующий слой монооксида кремния толщиной ~ 10 нм и нанесенный на него слой меди толщиной ~ 2 нм. В структурах второго типа на слой меди наносился пассивирующий слой SiO , толщина которого для различных образцов составляла величину $\sim 1 \div 10$ нм.

Электроннографический анализ полученных структур показал, что незащищенные слои меди в результате влияния влажной атмосферы окисляются с образованием соединения Cu_2O . Аналогичные электронограммы были получены

¹ Этими результатами авторы обязаны сотрудникам Горьковского исследовательского физико-технического института при Горьковском государственном университете имени Н. И. Лобачевского — Андрееву С. С. и Беляеву А. В.

и от структур второго типа, в которых верхний пассивирующий слой SiO имел толщину менее 3—4 нм. В структурах, где толщина пассивирующего слоя превышала 3—4 нм, окисел меди не образовывался. В связи с этим можно предположить, что окисные пленки толщиной более 3—4 нм обладают достаточно высокой сплошностью, а структуры, составленные из таких слоев, могут быть отождествлены с многослойниками. Эти данные находятся в хорошем согласии с результатами работ [10, 11].

На рис. 1 представлены спектры оптического пропускания СДП SiO—GeO, содержащие различное количество слоев (кривые 4—8). На этом же рисунке приведены спектральные характеристики однокомпонентных пленок SiO и GeO (кривые 1, 2), полученные по методике СДП, и характеристика двухслойной системы (кривая 3), образованной механическим сложением двух подложек с указанными выше однокомпонентными пленками.

Отметим, что способ изготовления двухслойной системы (последовательное нанесение пленок SiO и GeO на одну подложку или механическое сложение двух подложек с разными пленками) не оказывает существенного влияния на вид получаемой характеристики. Граница пропускания таких систем определяется границей пропускания пленок GeO.

В супермногослойных пленках SiO—GeO с числом слоев $\sim 10^1$ — 10^3 наблюдается смещение границы пропускания в длинноволновую область. Величина смещения возрастает с увеличением числа слоев и достигает ~ 300 нм для структур, содержащих ~ 500 слоев.

Рис. 2 иллюстрирует влияние различных факторов на величину смещения края полосы пропускания. Кривые 1—4 характеризуют СДП с равным числом слоев (n) и различными величинами толщин (d), соотношений компонентов ($p = d_{\text{GeO}}/d_{\text{SiO}}$) и температур подложки ($T_{\text{подл}}$).

Анализ представленных экспериментальных данных показывает, что толщина пленки не оказывает заметного влияния на величину сдвига спектральных характеристик (рис. 2, кривые 1 и 4). Величина смещения границы пропускания не может быть удовлетворительно объяснена и изменением процентного содержания GeO в пленке. Об этом свидетельствуют кривые 2 и 3 рис. 2, полученные для структур равной толщины с одинаковым количеством наносимых слоев и разным соотношением компонентов. Имеющееся здесь смещение характеристик значительно меньше смещения, обусловленного изменением числа слоев в структуре СДП (рис. 1).

Температура подложки также не является доминирующим фактором, поскольку она лишь стимулирует увеличение сдвига характеристик.

Смещение спектральных характеристик не может быть обусловлено и изменением энергии оптических переходов типа зона—зона, так как ширина запрещенной зоны исследуемых материалов превышает 4 эВ [12].

На основании вышесказанного можно заключить, что основным фактором, обуславливающим смещение границы пропускания СДП, является изменение количества границ в пленке. Как показано в работах [5, 10], в супермногослойных пленках на границах раздела между слоями могут возникать переходные области, оказывающие значительное влияние на такие электрофизические характеристики пленок, как удельное сопротивление, диэлектрические потери, электрическая прочность. Можно предположить, что эти же переходные области оказывают влияние и на положение границы пропускания СДП.

Причиной образования переходных областей может служить как химическое взаимодействие между материалами осаждаемых слоев, в результате которого возможно возникновение нового химического соединения с новыми физико-химическими свойствами, так и влияние технологических факторов процесса термического испарения в вакууме (адсорбция остаточных газов на поверхности наносимых слоев, радиационный нагрев поверхности слоя от испарителя и т. п.).

Увеличение числа слоев в СДП при неизменной общей толщине пленки приводит к возрастанию доли переходных областей в общем объеме пленки и как результат этого к смещению границы пропускания. Размеры переходных областей возрастают с увеличением температуры подложки, что и обуславливает температурный сдвиг кривых. Об этом же свидетельствует результат исследований структур СДП с $n \sim 1000$, в которых расчетная толщина слоев ($d_{\text{сл}} \geq 2$ —3 нм)

была сравнима с размерами переходных областей. В таких пленках, представляющих собой квазиоднородную систему, целиком состоящую из переходных областей, величина смещения границы пропускания имела максимальную величину.

Литература

- [1] Дж. Т. Кокс, Г. Хасс. В сб. «Физика тонких пленок» под ред. Г. Хасса, т. 2, Мир, М., 1967.
- [2] V. N. Yadava, K. L. Chopra. Thin Solid Films, 21, 297, 1974.
- [3] А. Телен. В сб. «Физика тонких пленок» под ред. Г. Хасса, т. 5, Мир, М., 1972.
- [4] Э. Риттер. В сб. «Физика тонких пленок» под ред. Г. Хасса, т. 8, Мир, М., 1978.
- [5] В. А. Камин. Канд. дисс., Горький, 1978.
- [6] Технология тонких пленок. Справочник под ред. Л. Майссела, Р. Гленга. т. I, «Сов. радио», М., 1977.
- [7] V. N. Yadava, S. K. Sharma, K. L. Chopra. Thin Solid Films, 17, 243, 1973.
- [8] О. А. Мотовилов, О. Г. Рудина. Опт.-мех. пром., № 6, 36, 1974.
- [9] О. А. Мотовилов, О. Г. Рудина. Опт.-мех. пром., № 3, 47, 1978.
- [10] В. А. Камин, Ю. Д. Панков. Изв. вузов, физика, № 8, 133, 1977.
- [11] K. L. Chopra, P. Nath. J. Appl. Phys., 45, 1923, 1974.

Поступило в Редакцию 12 января 1981 г.

УДК 539.184

К ВОПРОСУ О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ В РАДИАЦИОННЫХ ВРЕМЕНАХ ЖИЗНИ ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМА ВОДОРОДА

Я. Ф. Веродайнен

Закономерности в радиационных временах жизни возбужденных состояний атомов и ионов одной спектральной серии находятся в последнее время в центре внимания исследователей, занимающихся расчетом или экспериментальным определением времени жизни [1, 2]. Здесь и далее под спектральной серией понимается набор возбужденных состояний с одинаковым орбитальным и спиновым моментами.

Начиная с 1975 г. было выявлено эмпирически [1-5], что для многих спектральных серий атомов и ионов I, II и VIII групп радиационные времена жизни подчиняются степенной зависимости

$$\tau = \tau_0 n^\alpha, \quad (1)$$

где τ_0 и α — константы для данной серии и данного атома, n — главное квантовое число. При этом α меняется от 3 до 6, а при замене n на n^* (эффективное главное квантовое число) значение α колеблется от 2.5 до 3.5.

Зависимости (1) некоторыми исследователями используются для оценки времени жизни путем экстраполяции их на уровни, остающиеся неисследованными, в том числе и в атоме водорода [6].

Степенная зависимость изменения радиационных времен жизни возбужденных уровней атома водорода вытекает из квантовой механики. Как было показано в монографии [7], радиационные времена жизни возбужденных состояний атома водорода увеличиваются с возрастанием главного квантового числа n как в том случае, когда азимутальное квантовое число l остается постоянным, так и в том случае, когда по l производится суммирование. При постоянном l для водорода с достаточной точностью будет [7]

$$\tau_{n,l} \sim n^3, \quad (2)$$

а среднее время жизни n -го состояния

$$\tau_n = \left(\sum_l \frac{2l+1}{n^2} \tau_{n,l} \right)^{-1} \sim n^{4.5}. \quad (3)$$