

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, ЯВЛЕНИЯ, ТЕОРИИ

УДК 542.91:658.56:621.315.592.2

С. А. Кутюлин, В. П. Котенко, А. Е. Шаммасова, Л. Ф. Белова

СИНТЕЗ, СВОЙСТВА И КАЧЕСТВО АКТИВНОЙ ЧАСТИ
НЕЙРИСТОРПОДОБНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ
ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Изложены результаты синтеза, физико-химические, оптические и электрофизические свойства и качество халькогенидных материалов ($A_m^6 B_n^6 C_k^6$, $A_m^4 B_n^6 C_k^6$, $A_m^4 B_n^5 C_k^6$), содержащих от 6,0 до 5,5 *эл/ат*. Материалы данного типа являются активной частью нейристороподобных элементов и обладают ковалентным характером связи.

Показана взаимосвязь способа синтеза, физико-химических свойств исследуемых групп халькогенидов и качества работы функциональных приборов, получаемых на их основе.

В работе [1] изложены основные направления синтеза нейристороподобных элементов, реализуемых на основе неорганических сред материалов с ковалентной связью.

Известно, что характер ионно-ковалентной связи зависит от степени упорядоченности, т. е. степени периодичности атомов структуры. При возрастании степени разупорядоченности степень локализации электронов становится более выраженной. Поэтому концепция локализованных электронов вполне пригодна для анализа экспериментальных данных в разупорядоченных структурах [2]. К структурам такого типа относятся аморфные и, в частности, халькогенидные материалы.

В настоящем сообщении представлены результаты синтеза и изучения свойств нейристоров на основе материалов, содержащих элементы 4—5—6 групп. Число электронов, приходящихся на один атом неорганической структуры (трех-, четырехкомпонентной системы) составляет в исследуемых материалах 6,0, 5,8 и 5,5 *эл/ат*.

Процессы локализации электронов в неполновалентных (5,8—5,5 *эл/ат*) и полновалентных структурах должны отличаться. Поэтому возможна корреляция между способами синтеза и свойствами нейристора.

I. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Синтез материалов

В качестве исходных веществ использовались материалы квалификационной чистоты (табл. 1). Синтезировано 3 группы материалов, имеющих общие формулы: $A_m^6 B_n^6 C_k^6$, $A_m^4 B_n^6 C_k^6$, $A_m^4 B_n^5 C_k^6$, где верхний индекс обозначает номер группы, а нижний — число атомов; индексы m, n, k принимали значения: 1, 3, 6, а их сумма всегда была равна: $m+n+k=10$. Поэтому элементы структуры содержали от 6,0 до 5,5 эл/ат. Для материалов групп $A_m^4 B_n^6 C_k^6$, $A_m^4 B_n^5 C_k^6$, содержащих четыре компонента, например $A^4 = \text{Si} + \text{Ge}$, величина m была равна 1. Таким образом, группа халькогенидов типа $A_m^6 B_n^6 C_k^6$ состояла, например, из материалов состава: $\text{S}_1\text{Te}_3\text{Se}_6$, $\text{S}_2\text{Te}_2\text{Se}_1$, $\text{S}_6\text{Te}_1\text{Se}_3$, $\text{S}_3\text{Te}_1\text{Se}_6$, $\text{S}_1\text{Te}_6\text{Se}_3$, $\text{S}_6\text{Te}_3\text{Se}_1$.

Измельченная до 200 меш исходная шихта компонентов, взятых в соответствующем стехиометрическом соотношении, загружалась в кварцевые ампулы, откачиваемые до остаточного давления 0,01 мм рт. ст. Запаянные ампулы с помощью механического устройства опускали в вертикальную электрическую печь мощностью 15 ккал, нагреваемую до установленной температуры со скоростью 10 град/мин, и выдерживали в ней в течение заданного времени (см. табл. 1); затем ампулы охлаждали до комнатной температуры, опуская их с помощью специального устройства в проточную воду в течение 1 мин.

Таблица 1

Квалификация исходных веществ и режимы синтеза различных групп халькогенидных материалов

Исходный материал	Квалификация, ГОСТ	Температура, °C		Группа материала	Температура синтеза (максимальная), °C	Время синтеза при T _{max} , час
		T _{пл}	T _{хим}			
Сера	осч, МРТУ 6—09—1971—69	112,8	444,6	$A_m^6 B_n^6 C_k^6$	600—800	1,0
Селен	осч, МРТУ 6—09—638—6	180—217	685—688			
Теллур	T—1, ГОСТ 9514—60	452	1012	$A_m^4 B_n^6 C_k^6$	1050—1100	2,0
Кремний	Kp—O, ГОСТ 2169—43	1420	2600			
Германий	осч, РЭТУ 1247—65	936—958	2700—2850	Si(Ge)—Se—Te	900—1100	2,5—3,5
Мышьяк	осч, МРТУ 6—09—3912—67	...	612			
Сурьма	Sy—OO, ГОСТ 1089—62	627—630	1625	$A_m^4 B_n^5 C_k^6$		

Температура печи регулировалась с помощью платино-платинородиевой терморпары с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$. Спекти материалов использовались для получения объемных и тонкопленочных элементов нейристоров.

2. Синтез нейристороподобных элементов

Вакуумтермический способ получения пленочных переключающих элементов и конструкции объемных пленочных элементов уже описаны нами [1].

В настоящей работе для получения более однородных по составу пленок халькогенидов использовалась установка высокочастотного распыления [3]. Высокочастотный электрод присоединен к высокочастотному источнику питания через разделительный конденсатор, что позволяет осуществлять распыление полупроводников и металлов.

Рабочая частота 13,5 Мгц. Магнитное поле (15 гс), приложенное перпендикулярно мишени, позволило уменьшить остаточное давление в системе до 0,001 мм рт. ст.

В качестве рабочего газа использовался аргон марки А, очищенный от механических примесей, влаги и кислорода по методике, описанной в работе [4].

Толщина нанесенного слоя для пленки составляла 0,1—1 мкм, для объемных образцов — 10—70 мкм.

Распыление проводилось на подложку при комнатной температуре, мощности разряда 180 Вт и остаточном давлении аргона 10^{-2} мм рт. ст.

В качестве подложки для получения тонкопленочных элементов, их оптического и структурного исследования использовались ситалл, бронза, стекло С-41, кварц, монокристаллический кремний КДБ-0,5, КЭФ-7,5, вырезанный по плоскостям (111) и (100). В качестве контактов применялся алюминий марки АВ-000 толщиной 0,2—0,3 мкм.

3. Методика исследования свойств материалов

Идентификация свойств исходных халькогенидов, материалов и продуктов их распыления осуществлялась оптическим, рентгенофазовым и электронографическим методами. Спектры поглощения регистрировались в области 0,2—25 мкм. Определение толщины (с точностью ± 50 Å), показателей преломления пленок и материалов, а также аппаратура, используемая для этого, условия съемки, методика исследования электрофизических свойств исходных материалов, пленок и характеристик переключающих элементов описаны в работах [1, 3, 5]. Температурные исследования физико-химических и электрофизических свойств проводились в области 77—353 °К.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Рентгенофазовый и электронографический анализ порошкообразных, пленочных материалов халькогенидов и многослойных (металл—халькогенид—металл) структур позволил обнаружить существование следующих типов фаз.

Халькогенидные материалы и пленки на их основе, получаемые по отработанной технологии, содержали аморфную фазу. Однако материалы, содержащие значительное количество теллура в присутствии элементов шестой или пятой (мышьяк) группы наряду с аморфной фазой или фазой текстурированного алюминия в многослойных структурах содержали фазу теллура с увеличенным ($a=4,488 \pm 0,003$ Å, $c=5,816 \pm 0,003$ Å, $c/a=1,296$) или уменьшенным ($a=4,398 \pm 0,003$ Å, $c=5,758 \pm 0,003$ Å, $c/a=1,309$) параметром a . Структурные и электрофизические свойства исходного теллура ($a=4,450$ Å, $c=5,929$ Å, $c/a=1,332$), исследованные нами ранее [6], совпадали с литературными данными.

Рассматривая кристаллическую структуру теллура в виде бесконечных винтовых цепей, располагающихся в гексагональной ячейке теллура параллельно оси c , можно представить активную фазу нейристороподобного элемента в виде цепей атомов теллура, относительно которых или между которыми располагаются атомы мышьяка, серы, селена. Увеличение содержания теллура в таких цепях приводит к возникновению кристаллизации цепей атомов теллура, между которыми находятся атомы элементов 5—6 групп. Это изменяет параметры решетки теллура по сравнению с параметрами исходного материала.

2. Наряду с фазовым анализом определение показателей преломления и рефрактометрический анализ порошков и пленок халькогенидов разного состава позволяют полагать, что состав исходных халькогенидов и пленок, получаемых на их основе, остается неизменным, как неизменным в пределах точности эксперимента характер химической связи в пленках.

между атомами халькогенидных материалов (табл. 2). Действительно, средние значения показателей преломления порошков и пленок существенно не различаются между собой, а экспериментальные данные рефракций близки к теоретическим, рассчитанным путем суммирования ковалентных рефракций элементов, значения которых приведены в работе [7]. Таким образом, материалы исследуемого состава обладают ковалентным характером связи.

Таблица 2

Физико-химическая характеристика некоторых халькогенидных материалов и пленок

Состав	Структура	Электронная проводимость, $\text{ом}^{-1}\text{см}^{-1}$	Пикнометрическая плотность, $\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$	Показатель преломления $n_{\text{ср}} \pm 0,05$ (0,7—1,0 мкм)		Рефракция	
				порошок (200 меш)	пленка $d=0,2 \pm 0,3 \text{ мкм}$	$R_{\text{эксп}}^*$ см ³	$R_{\text{теор}}^*$ см ³
$\text{S}_3\text{Se}_8\text{Te}_1$	Аморфен	6,9	4,13	2,50	2,55	105,5	102,90
$\text{Si}_{0,3}\text{Ge}_{0,7} \times \text{S}_3\text{Se}_8\text{Te}_3$	Аморфен + тв. р-р Te $a = 4,488 \text{ \AA}$ $c = 5,816 \text{ \AA}$	5,8	5,49	2,90	2,85	121,0	121,07
$\text{Si}_{0,3}\text{Ge}_{0,7} \times \text{As}_3\text{Te}_6$	Аморфен + тв. р-р Te $a = 4,398 \text{ \AA}$ $c = 5,758 \text{ \AA}$	5,5	5,88	3,10	3,00	132,5	132,97

3. Порошки и пленки халькогенидных материалов исследуемых групп ($A_m^6 B_n^6 C_k^6$, $A_m^4 B_n^6 C_k^6$, $A_m^4 B_n^5 C_k^6$) имеют размытый край полосы поглощения в области 1,6—1,4 эв, несколько смещающийся в длинноволновую часть спектра при увеличении содержания теллура (рис. 1).

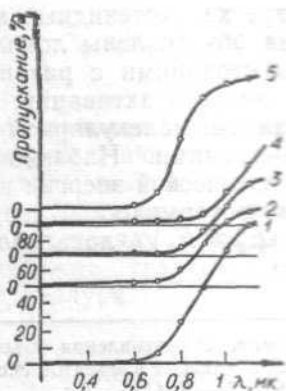


Рис. 1. Край полосы поглощения халькогенидных материалов состава:

- 1 — $\text{S}_3\text{Se}_8\text{Te}_1$ 3 — $\text{S}_3\text{Se}_1\text{Te}_8$
- 2 — $\text{Si}_1\text{Se}_3\text{Te}_6$ 4 — $\text{Si}_{0,3}\text{Ge}_{0,7}\text{As}_3\text{Te}_6$
- 5 — $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}\text{Se}_6\text{Te}_3$

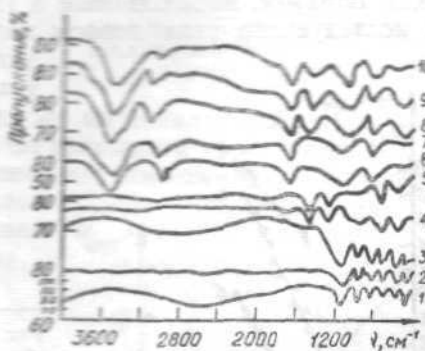


Рис. 2. ИК-спектры поглощения халькогенидных материалов состава:

- 1 — $\text{S}_3\text{Se}_1\text{Te}_1$ 6 — $\text{Si}_{0,3}\text{Ge}_{0,7}\text{Sb}_3\text{Te}_3$
- 2 — $\text{S}_3\text{Se}_8\text{Te}_1$ 7 — $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}\text{Sb}_3\text{Te}_3$
- 3 — $\text{S}_6\text{Se}_1\text{Te}_3$ 8 — $\text{Si}_{0,3}\text{Ge}_{0,7}\text{As}_6\text{Te}_3$
- 4 — $\text{Si}_{0,3}\text{Ge}_{0,7}\text{Se}_6\text{Te}_3$ 9 — $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}\text{As}_6\text{Te}_3$
- 5 — $\text{Si}_{0,3}\text{Ge}_{0,7}\text{Se}_6\text{Te}_3$ (порошок)
- 10 — $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}\text{As}_3\text{Te}_6$

Спектрофотометрический анализ поглощения пленок и порошков (по методу прессования в КВч) халькогенидов данных групп в области $1,0\text{--}25\ \mu\text{м}$ находится в качественном согласии с результатами работы [8], выполненной в целях изучения пропускания халькогенидных стекол в ИК-области спектра.

Исследуемые нами типы халькогенидных материалов, не описанные в работе [8], обладая (по данным рефрактометрического анализа) ковалентным характером связи, отличаются между собой следующими особенностями (рис. 2).

Халькогенидные материалы в виде пленок или порошка, безразлично, состава $A_m^6 B_n^6 C_k^6$ ($6,0\ \text{эл/ат}$) имеют полосы поглощения, расположенные в области $0,05\text{--}0,14\ \text{эв}$. По мере перехода от полновалентных халькогенидных материалов ($6,0\ \text{эл/ат}$) к неполновалентным ($5,8\text{--}5,5\ \text{эл/ат}$) область полос поглощения составляет: для материалов типа $A_m^4 B_n^6 C_k^5$ ($5,8\ \text{эл/ат}$): $0,20\text{--}0,07\ \text{эв}$; $A_m^4 B_n^6 C_k^5$ ($5,5\ \text{эл/ат}$): $0,43\text{--}0,10\ \text{эв}$; $A_m^4 A_s^6 C_k^6$ ($5,5\ \text{эл/ат}$): $0,43\text{--}0,06\ \text{эв}$.

Независимо от состава компонентов 4—5 групп, замещающих элементы 6 группы, в халькогенидных материалах всех типов наблюдаются одинаковые полосы поглощения. Это позволяет связать наблюдаемые полосы поглощения в инфракрасной области спектра с локализацией электронов и увеличением области локализации электронов по мере перехода от полновалентных структур к неполновалентным, т. е. более разупорядоченным структурам халькогенидных материалов.

Высказанные соображения однозначно подтверждаются при изучении изменения сопротивления халькогенидных материалов в зависимости от температуры нагрева и охлаждения. В результате этих исследований (рис. 3) обнаружено равенство энергии, соответствующей полосе поглощения в ИК-спектре материала (E_0) и термической энергии активации (E_a), вычисляемой на основании измерений зависимости сопротивления системы от температуры.

Таким образом, наблюдаемые в ИК-спектре халькогенидных материалов исследуемого типа полосы поглощения обусловлены локализованными состояниями с различной величиной энергии активации, а не существованием молекулярной связи между атомами. Наблюдаемое равенство оптической энергии полос поглощения и термической энергии активации ($E_0 \approx E_a$) локализован-

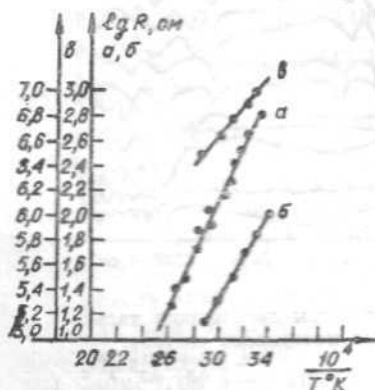


Рис. 3. Изменение сопротивления объемных образцов переключающих элементов системы Si—Ge—Se(As)—Te:

$$a - E_a = 0,43 \pm 0,06 \text{ эв}; \quad б - E_a = 0,36 \pm 0,03 \text{ эв};$$

$$в - E_a = 0,20 \pm 0,03 \text{ эв}$$

ных состояний характерно для материалов, обладающих ковалентной связью [9—10], что и подтверждается проведенным рефрактометрическим анализом материалов.

4. Пленки халькогенидных материалов, имеющие край полосы поглощения в области 1,40—1,50 эв и локализованные состояния электронов в области 0,43—0,06 эв, позволяют получать многократно переключающие нейристороподобные элементы, у которых относительный уход напряжения включения при времени хранения до 1000 час составляет не более 1,6%. Пленки материалов, не отвечающих этим требованиям, т. е. пленки на основе полновалентных халькогенидных материалов, не позволяют изготовить многократно переключающие элементы.

Объемные и пленочные переключающие элементы, изготовленные на основе неполновалентных халькогенидных материалов с аморфной структурой, не обладают свойствами памяти, т. е. стабильны, переключают до 10^7 раз токи ≈ 10 ма на частоте 20— 10^6 гц. Напряжение включения для пленочных переключающих элементов зависит от расстояния между электродами [1] и меняется линейно. Увеличение тока через образец в проводящем состоянии при неизменном питающем напряжении вызывает уменьшение времени срабатывания ($\leq 10^{-6}$ — 10^{-7} сек) переключающего элемента и динамического сопротивления в открытом состоянии. Сопротивление элемента в закрытом состоянии ($R_{\text{зак}}$) достигает $5 \cdot 10^9$ ом, а в открытом ($R_{\text{откр}}$) — 10 ом (табл. 4).

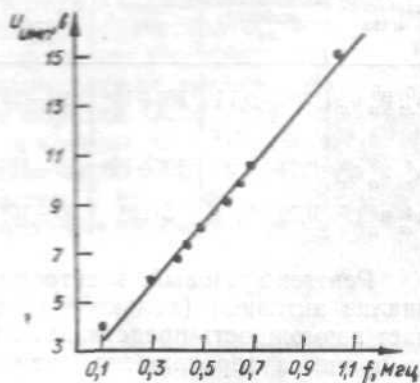


Рис. 4. Явление генерации на пленочных образцах материала $\text{Si}_{0,3}\text{Ge}_{0,7}\text{As}_3\text{Te}_6$ при времени импульса ($\tau_{\text{имп}}$) 10 мсек:

- | | |
|------------------------------|-----------------|
| a — $U_{\text{имп}} = 5$ в, | $f = 0,27$ Мгц; |
| б — $U_{\text{имп}} = 7$ в, | $f = 0,4$ Мгц; |
| в — $U_{\text{имп}} = 10$ в, | $f = 1,1$ Мгц. |

Неполновалентные халькогенидные материалы (5,8 эв/ат) обладают в переключающих элементах бистабильными свойствами (свойствами памяти), если состав материала имеет повышенное содержание теллура, а структура халькогенидного материала наряду с аморфной фазой содержит твердый раствор на основе теллура.

Рис. 5. Зависимость частоты генерации от амплитуды импульса для пленки ($d = 7200$ Å) материала $\text{Si}_{0,3}\text{Ge}_{0,7}\text{As}_3\text{Te}_6$ (R нагрузки 43 ком, $\tau_{\text{имп}} = 10$ мсек, f следования = 40 гц)



Неполновалентные, содержащие мышьяк аморфные халькогенидные материалы ($5,5 \text{ эл/ат}$) позволяют получать отчетливое явление генерации (рис. 4) с частотой $0,2\text{--}10 \text{ МГц}$. Зависимость частоты генерации от амплитуды импульса носит линейный характер и представлена на рис. 5.

5. На основании проведенных исследований можно высказать ряд соображений относительно физико-химического механизма работы нейристороподобных элементов, изготавливаемых на основе полновалентных и неполновалентных халькогенидных материалов.

В литературе есть гипотезы относительно физической природы возникновения отрицательного сопротивления в ряде неорганических материалов. Это гипотезы: теплового пробоя [11]; быстрого формирования металлических нитей электродного материала с последующим их пробоем [12]; электрического пробоя [13]; электронного [14] и гистерезисного [15] механизма переключения и памяти; модифицированная теория туннельного эффекта по Зенеру [16], а также работы, описывающие аналогичные явления как переход типа «диэлектрик—металл» [17—18] или переход из неупорядоченного состояния в упорядоченное под действием электрического поля [19, 20].

Напряжение переключения нейристороподобных элементов, получаемых на основе полновалентных халькогенидных материалов, сильно зависит от температуры, в то время как для элементов, получаемых на основе неполновалентных халькогенидных материалов, разброс вольт-амперных характеристик невелик в интервале температур $123\text{--}353 \text{ }^\circ\text{К}$ (см. табл. 4). Наряду с этим наблюдаемая линейная зависимость напряжения переключения от толщины халькогенидного слоя для образцов с минимальной толщиной (см. табл. 3) позволяет считать, что гипотезы теплового и электрического пробоя могут быть верны лишь для описания ограниченного круга явлений в процессе работы переключающего элемента.

Таблица 3

Зависимость напряжения включения переключающего элемента от толщины пленки халькогенида

Толщина пленки халькогенида (d), $\mu\text{м}$	0,30	0,35	0,45	0,70
Напряжение включения ($U_{\text{кр}}$), в	3,6	4,2	5,4	8,4

Таблица 4

Свойства нейристороподобных элементов в зависимости от состава халькогенидного материала

Материал халькогенида	Область локализованных состояний, эв	$R_{\text{закр. ом}}$	Переключающие свойства					
			$R_{\text{откр. ом}}$	рабочий ток, а	рабочий диапазон температур, $^\circ\text{К}$	число переключений	разброс параметров характеристик, %	частотный диапазон работы, гц
$\text{A}_t^6 \text{B}_n^6 \text{C}_k^6$	0,05—0,14	$10^7\text{--}10^8$	10—20	0,5	сильно зависит от температуры 123—353	до 10	30	$20\div 10^6$
$\text{A}_t^4 \text{B}_n^6 \text{C}_k^6$	0,07—0,20	$10^7\div 10^8$	$10\div 10^2$	0,08	123—353	10^5	10	„
$\text{A}_t^4 \text{B}_n^5 \text{C}_k^6$	0,06—0,43	$5\cdot 10^9$	$30\div 10^2$	0,04	123—353	$\geq 10^7$	5	„

Рентгенофазовый, электронографический и спектрофотометрический анализ активной (халькогенидной) среды переключающего элемента дает возможность представить качественную картину физико-химического процесса переключения, запоминания и генерации нейристороподобного элемента.

Прежде всего активная (халькогенидная) часть нейристороподобного элемента обладает неупорядоченной структурой, в которой имеет место набор локализованных состояний, возникающих в результате делокализации электронов, участвовавших в образовании химической связи между атомами в упорядоченной структуре.

Такое состояние следует рассматривать как псевдоравновесное состояние термодинамической системы [21], способное под действием внешнего воздействия, например, электрического поля, вернуться в исходное, т. е. упорядоченное состояние, в результате чего имеет место скачкообразное изменение проводимости — «переключение».

Способность активной (халькогенидной) части переключающего элемента не растрчивать свою упорядоченность, т. е. организацию системы, после снятия внешнего воздействия (электрического поля) можно рассматривать как «память» системы. Макропроцесс упорядочения (организации [22]) в халькогенидных материалах проявляется в виде островковой или троповидной кристаллизации, способствующей сохранению проводимости — «памяти» системы после снятия электрического поля. Имеющий место затравочный кристалл в виде твердого раствора на основе теллура в неполновалентных халькогенидных материалах способствует протеканию такого процесса.

При действии электрического поля на активную (халькогенидную) часть нейристороподобного элемента возможно одновременное протекание двух типов процессов: локализации и делокализации электронов относительно химической связи между атомами

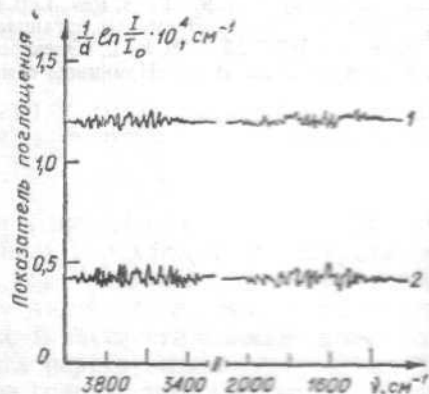


Рис. 6. Осцилляция коэффициента поглощения для халькогенидной пленки состава:

1 — $d=0,43$ мкм; 2 — $d=0,7$ мкм

системы. Такое состояние псевдоравновесной системы приводит к выделению особого колебательного состояния в активном слое халькогенидного материала, которое проявляется в виде наблюдаемой генерации на примере нейристороподобных элементов. В оптической области спектра это сопровождается возникновением осцилляции коэффициента поглощения (рис. 6), не связанного с нестабильностями во времени, интерференцией света или состоянием поверхности образца. Осцилляции расположены в области частот $1340\text{--}4000$ см^{-1} и состоят из нескольких серий.

Применяемые методы контроля позволяют надежно идентифицировать свойства нейристороподобных систем и могут быть использованы для анализа и разбраковки аналогичного типа приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котенко В. П., Кутюлин С. А., Степанов И. В. «Электронная техника», серия 12, 1970, вып. 4, 81.
2. Мотт Н. Электроны в неупорядоченных структурах. М., «Мир», 1969.

3. Гаштольд В. Н., Кутюлин С. А. и др. «Электронная техника», серия 12, 1970, вып. 4, 53.
4. Гаштольд В. Н., Кутюлин С. А., Остаповский Л. М. «Электронная техника», серия 5, 1968, вып. 2, 35.
5. Кутюлин С. А., Самойлова Р. Н., Воронов В. Ф. и др. Физико-химические и электрофизические свойства сульфидов редкоземельных металлов типа R_2S_3 . ИСЛ № 000789, М., «Электроника», 1969; РИР, 4, 3074, 1970.
6. Кутюлин С. А., Дубровин Г. А. «Пром. хим. реактивов», ИРЕА, М., 1968, вып. 14(20), 90.
7. Бацаиов С. С. Электроотрицательность элементов и химическая связь. Новосибирск, СО АН СССР, 1962, стр. 120.
8. Savage I. A., Nielsen S. «Infrared Physics», 1965, 5, 195.
9. Иоффе А. Ф. Физика полупроводников. М.—Л., АН СССР, 1957.
10. Полупроводники (под ред. Н. Б. Хеннея). М., ИИЛ, 1962.
11. Eaton A. Y. «I. Am. Cer. Soc.», 1964, 47, 554.
12. Gibbons I. F., Blade W. E. «Sol. State Electron.», 1963, 7, 785.
13. Герман В. И., Базаров В. Д., Резников В. А. «Изв. вузов», серия «Физика», 1969, 2, 15.
14. Коломиец Б. Т., Лебедев Э. Л., Таксами И. А. «Физ. и техн. полупроводников», 1969, 3, 312.
15. Стафеев В. И. «Физ. и техн. полупроводников», 1970, 4, 106.
16. Mattis D. C. «Phys. Rev. Lett.», 1969, 22, 936.
17. Mott N. F. «Rev. Mod. Phys.», 1968, 40, 677.
18. Christopher I. E. et al. «Phys. Rev.», 1968, 172, 485.
19. Matare F. H. «Solid State Technol.», 1969, 12, 43.
20. Ovshinsky S. R. «Phys. Rev. Lett.», 1968, 21, 1450.
21. Кутюлин С. А. Элементы организации и самоорганизации в физико-химических системах. ИСЛ № 000800. М., «Электроника», 1969. РИР, 9, 9080(1970).
22. Баумен Дж. В сб. «Принципы самоорганизации», М., «Мир», 1966, стр. 511.

Статья поступила 28 августа 1970 г.