

## ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 538.975:535.3:004.2:004.31

### ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ $Ge_2Sb_2Te_5$ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ

**Н. В. Вишняков**, к.т.н., доцент кафедры МНЭЛ РГРТУ; rcpm@rsreu.ru

**Н. М. Толкач**, младший научный сотрудник кафедры МНЭЛ РГРТУ; tolkach.n.m@rsreu.ru

**П. С. Провоторов**, магистрант РГРТУ; p.provotorov95@yandex.ru

Рассматривается задача нахождения оптимальных параметров (толщина слоя, длины волн информационного и управляющего сигнала) тонкопленочной структуры на основе  $Ge_2Sb_2Te_5$  (далее по тексту – GST) для оптических переключателей. Для определения необходимых параметров был введен критерий оптимального переключения. В соответствии с этим критерием в аморфном состоянии отражающая способность пленки GST должна быть максимальной, пропускающая способность минимальна. Для пленки GST в кристаллическом состоянии, наоборот, отражающая способность минимальна, пропускающая способность максимальна. Отражающая и пропускающая способности структуры были рассчитаны с помощью модели Френеля – Эйри для многослойных сред. Для поиска оптимальных параметров применялись численные методы градиентного спуска, минимизации и нелинейной оптимизации функций. **Целью работы** является оптимизация режимов работы (пропускание, отражение) оптического переключателя на основе тонкопленочной структуры GST.

**Ключевые слова:** тонкопленочная структура,  $Ge_2Sb_2Te_5$  (GST225, GST), оптический переключатель, фазовое состояние, аморфное состояние, кристаллическое состояние, информационный сигнал, управляющий сигнал, эффект фазового переключения, отражающая способность, пропускающая способность, критерий оптимального переключения.

DOI: 10.21667/1995-4565-2018-66-4-2-2-8

#### Введение

К вычислительным ресурсам электронной техники предъявляются все более и более серьезные требования. До недавнего времени рост вычислительных ресурсов происходил по закону Мура (рисунок 1), в соответствии с которым число компонентов на чипе удваивается каждые 2 года при стабильной цене изготовления такого чипа [1].

В настоящее время данный закон в том виде, в котором он был сформулирован Г. Муром, перестает действовать. Рост вычислительных мощностей приближается к пределу возможностей электронной техники. В ближайшее десятилетие рост вычислительных мощностей станет возможным только за счет увеличения плотности объемной упаковки активных вычислительных элементов (транзисторов), что непременно создаст проблему эффективного теплоотвода, приведет к усложнению технологического процесса и, как следствие, к удорожанию элементной базы. Вследствие этого актуальной на сегодняш-

ний день является разработка новых принципов и устройств для выполнения вычислительных операций. Одним из возможных путей решения этой задачи является переход от электронных технологий обработки сигналов к оптическим.



**Рисунок 1** – Прогноз закона Мура для микро- и наноэлектроники [1], количество транзисторов указано в миллионах (м)

В настоящее время ведется активный поиск новых материалов для создания полностью оптически-управляемых элементов – оптических переключателей, позволяющих путем кратковременных низкоэнергетических воздействий оптическим излучением эффективно управлять световыми сигналами, по аналогии с электронными транзисторами [2, 3, 4, 5, 6].

Концепцию работы оптического переключателя можно описать следующим образом:

1) в теле переключателя распространяются два оптических сигнала – управляющий и информационный;

2) состояние переключателя контролирует управляющий оптический сигнал;

3) в зависимости от состояния переключателя меняется характер распространения информационного оптического сигнала.

Контроль состояния оптического переключателя и изменение характера распространения информационного сигнала в нем можно осуществлять, используя уникальные свойства халькогенидных полупроводников (ХСП). Изменение фазового состояния локальных участков пленки ХСП при воздействии на них импульсов света позволяет варьировать оптическими характеристиками материала (рисунок 2). В зависимости от длительности и интенсивности импульса управляющего сигнала фазовое состояние будет меняться от аморфного к кристаллическому либо наоборот. При этом будут изменяться следующие оптические параметры:

- 1) отражающая способность;
- 2) пропускающая способность;
- 3) показатель преломления и направление преломляемых лучей.

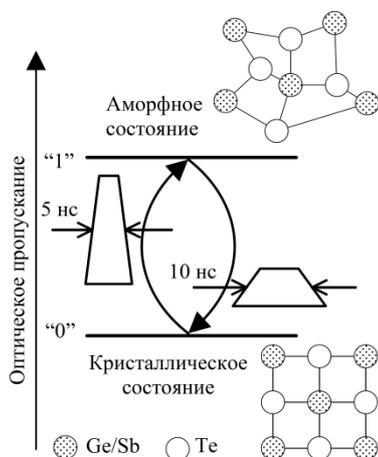


Рисунок 2 – Иллюстрация свойств GST при изменении фазовой структуры

Наиболее подходящим материалом для данных целей являются тонкопленочные халькогенидные стеклообразные структуры на основе

соединения  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (далее GST). Свойства GST на настоящий момент хорошо изучены, материал активно используется для изготовления элементов фазовой памяти 3D XPoint и оптических компакт-дисков [7, 8, 9].

Создание на основе материалов GST полностью оптического активного вычислительного элемента открывает широкие возможности применения в вычислительных устройствах. Например, для управления оптическими сигналами нет необходимости в двойном преобразовании сигналов: сначала из оптической формы в электрическую и затем, после их электрической модификации, вновь в оптическую. Управление сигналами производится путем изменения траектории оптических лучей, перенаправляемых с одного оптического элемента на другой [10].

### Постановка задачи

Варьируя оптической толщиной ( $h \times n$  – произведение толщины пленки на показатель преломления) пленки GST, можно добиться ее минимальной или максимальной отражающей или пропускающей способности. При изменении фазового состояния пленки GST изменяются ее показатель преломления и коэффициент экстинкции. Соответственно при подборе нужной толщины пленки, длины волны информационного сигнала можно добиться необходимых для работы оптического переключателя условий.

Установка режима оптического переключателя выполняется импульсами управляющего оптического сигнала. Длина волны управляющего сигнала выбирается в диапазоне 200 – 600 нм. В этом диапазоне пленка GST испытывает максимальное поглощение света как в аморфном, так и в кристаллическом состояниях (рисунок 3).

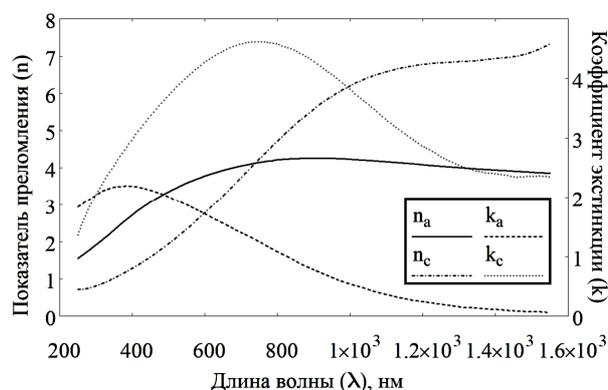


Рисунок 3 – Спектральные характеристики GST: индексы «а» и «с» указывают на аморфное и кристаллическое состояние материала GST [11]

Для эффективной работы оптического переключателя рационально разнести оптические диапазоны информационного и управляющего

сигналов в разные области оптического спектра (рисунок 3). При этом стоит учитывать, что информационный сигнал должен испытывать минимальное поглощение при взаимодействии с пленкой GST. Такая ситуация наблюдается при длинах волн свыше 1500 нм, где пленка GST испытывает минимальное поглощение света как в аморфном, так и в кристаллическом состояниях (рисунок 3 [11]). Для дальнейших исследований была выбрана длина волны информационного оптического сигнала 1550 нм. Это связано с тем, что, во-первых, именно такая длина волны используется в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) из-за минимальных потерь (отсутствует поглощение на молекулах водяного пара), во-вторых, оптоволокна, легированные ионами эрбия, хорошо усиливают оптические сигналы с длиной волны 1550 нм.

#### Многokrатное переотражение света в тонкопленочной структуре Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>

Для достижения поставленной цели вначале необходимо провести анализ распространения света в тонкопленочной структуре, изображенной на рисунке 4.

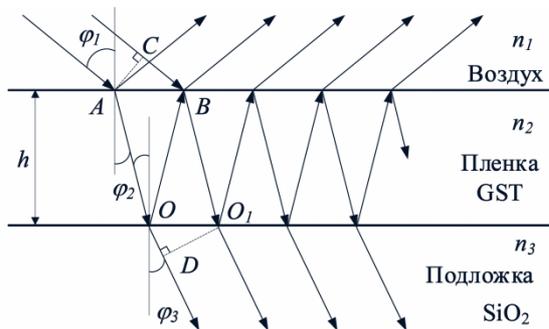


Рисунок 4 – Распространение света в структуре «воздух – пленка GST – прозрачная подложка»

При падении плоской монохроматической волны из среды 1 в среду 2 в результате многократных переотражений света на границах раздела 1-2, 2-3 и 2-1 происходит пространственное разделение этой волны на множество волн, отраженных от среды 2 и прошедших через нее в подложку. Каждая отраженная волна при таком разделении будет отличаться от соседней на одну и ту же разность хода  $\Delta_R$ :

$$\Delta_R = \underbrace{(AO + OB)}_{s_1} \cdot \hat{n}_2 - \underbrace{BC \cdot n_1}_{s_2}, \quad (1)$$

$$AO = OB = h / \cos(\varphi_2), \quad (2)$$

$$BC = AB \sin(\varphi_1) = 2h \tan(\varphi_2) \sin(\varphi_1), \quad (3)$$

$$\hat{n}_2 \sin(\varphi_2) = n_1 \sin(\varphi_1). \quad (4)$$

$$\Delta_R = 2\hat{n}_2 h / \cos(\varphi_2) - 2n_1 h \tan(\varphi_2) \sin(\varphi_1), \quad (5)$$

$$\Delta_R = 2\hat{n}_2 h (1 - \sin^2(\varphi_2)) / \cos(\varphi_2), \quad (6)$$

$$\Delta_R = 2\hat{n}_2 h \cos(\varphi_2) = 2h \sqrt{\hat{n}_2^2 - n_1^2 \sin^2(\varphi_1)}, \quad (7)$$

приведенных здесь и далее соотношениях:  $n_1$ ,  $n_2$  и  $n_3$  – показатели преломления сред 1, 2 и 3 соответственно;  $\hat{n}_2 = n_2 + i k_2$  – комплексный показатель преломления среды 2;  $k_2$  – коэффициент экстинкции среды 2;  $h$  – толщина слоя 2;  $\lambda$  – длина волны в вакууме;  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  – угол падения и углы преломления;  $S_1$  и  $S_2$  – пути, пройденные соседними волнами.

Каждая прошедшая сквозь пленку волна будет отличаться от соседней на одну и ту же разность хода  $\Delta_T$ :

$$\Delta_T = \underbrace{(OB + BO_1)}_{s_1} \cdot \hat{n}_2 - \underbrace{OD \cdot n_3}_{s_2}, \quad (8)$$

$$OB = BO_1 = h / \cos(\varphi_2), \quad (9)$$

$$OD = OO_1 \sin(\varphi_3) = 2h \tan(\varphi_2) \sin(\varphi_3), \quad (10)$$

$$n_3 \sin(\varphi_3) = \hat{n}_2 \sin(\varphi_2) = n_1 \sin(\varphi_1), \quad (11)$$

$$\Delta_T = 2\hat{n}_2 h / \cos(\varphi_2) - 2n_3 h \tan(\varphi_2) \sin(\varphi_3), \quad (12)$$

$$\Delta_T = 2\hat{n}_2 h (1 - \sin^2(\varphi_2)) / \cos(\varphi_2), \quad (13)$$

$$\Delta_T = 2\hat{n}_2 h \cos(\varphi_2) = 2h \sqrt{\hat{n}_2^2 - n_1^2 \sin^2(\varphi_1)}. \quad (14)$$

Следующая отраженная от оптически более плотной среды волна на границе раздела сред будет «сдвинута» относительно предыдущей на полуволну  $\lambda/2$ , поэтому при  $n_1 < n_2 > n_3$ :

$$\Delta_R = \underbrace{(AO + OB)}_{s_1} \cdot \hat{n}_2 - \underbrace{(BC \cdot n_1 + \lambda/2)}_{s_2}, \quad (15)$$

$$\Delta_T = \underbrace{(OB + BO_1)}_{s_1} \cdot \hat{n}_2 - \underbrace{OD \cdot n_3}_{s_2}, \quad (16)$$

при  $n_1 < n_2 < n_3$ :

$$\Delta_R = \underbrace{(AO + OB)}_{s_1} \cdot \hat{n}_2 + \lambda/2 - \underbrace{(BC \cdot n_1 + \lambda/2)}_{s_2}, \quad (17)$$

$$\Delta_T = \underbrace{\lambda/2 + (OB + BO_1)}_{s_1} \cdot \hat{n}_2 - \underbrace{OD \cdot n_3}_{s_2}. \quad (18)$$

Таким образом, соседние волны, выходящие из среды 2, будут испытывать фазовый сдвиг  $\beta_R = k \Delta_R$  (где  $k$  – волновое число, равное  $2\pi/\lambda$ ), а соседние проходящие в пленку волны будут испытывать фазовый сдвиг  $\beta_T = k \Delta_T$ . Для физической интерпретации влияния фазового сдвига на интенсивности соседних волн будем использовать следующие фазовые множители для отраженных от среды 3 и прошедших в нее волн:

$$Q_R = \exp(i\beta_R), \quad Q_T = \exp(i(\beta_T - \pi)). \quad (19)$$

В множитель  $Q_T$  внесена поправка  $-\pi$ , учитывающая смену знака амплитуд волн, отраженных от среды 2.

Чтобы учесть сдвиги разности хода на  $\lambda/2$ , описанные в выражениях (15) – (18), введем коэффициент  $\alpha$ :

$$\alpha = \pi \text{ при } n_1 < n_2 > n_3, \quad (20)$$

$$\alpha = 0 \text{ при } n_1 < n_2 < n_3. \quad (21)$$

Тогда, с учетом указанных в (19) выражений, получим:

$$Q_R = Q_T = Q = e^{i(\beta-\alpha)}, \quad (22)$$

$$\beta = 4\pi\hat{n}_2 \cos(\varphi_2)/\lambda = \beta_1 + i\beta_2. \quad (23)$$

Так как  $\hat{n}_2 = n_2 + i \cdot k_2$ :

$$\beta = 4\pi n_2 \cos(\varphi_2)/\lambda + i \cdot 4\pi k_2 \cos(\varphi_2)/\lambda. \quad (24)$$

Коэффициент  $\beta_1$  описывает влияние интерференции при сложении волн. Пропускание света через среду 2 определяется из закона Бугера – Ламберта – Бера и соответствует коэффициенту  $\beta_2$ :

$$T_2 = \exp(-4\pi k_2 h \cos(\varphi_2)/\lambda) = e^{-\beta_2}. \quad (25)$$

### Расчет отражающей и пропускающей способностей тонкопленочной структуры $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$

Процесс многократного переотражения в трехслойной структуре описывается с помощью соотношений Эйри [12, 13]:

$$r = \frac{r_{12} + r_{23} \cdot e^{i\beta}}{1 + r_{12}r_{23} \cdot e^{i\beta}}, \quad t = \frac{t_{12}t_{23} \cdot e^{i\beta}}{1 + r_{12}r_{23} \cdot e^{i\beta/2}}, \quad (26)$$

здесь  $r$  и  $t$  – коэффициенты отражения и пропускания тонкопленочной структуры,  $r_{12}$ ,  $r_{23}$  и  $t_{12}$ ,  $t_{23}$  – коэффициенты отражения и пропускания (выводятся из соотношений Френеля [13]) на границах раздела сред структуры.

В соотношениях Эйри не учитываются сдвиги разности хода, описанные в выражениях (15) – (18). С их учетом выражения примут следующую форму:

$$r = \frac{r_{12} + r_{23} \cdot e^{i(\beta_1 - i\beta_2 - \alpha)}}{1 + r_{12}r_{23} \cdot e^{i(\beta_1 - i\beta_2 - \alpha)}}, \quad (27)$$

$$t = \frac{t_{12}t_{23} \cdot e^{i(\beta_1 - i\beta_2 - \alpha)}}{1 + r_{12}r_{23} \cdot e^{i(\beta_1 - i\beta_2 - \alpha)/2}}. \quad (28)$$

Отражающая и пропускающая способности выражаются следующим образом:

$$\mathfrak{R} = |r|^2, \quad \mathfrak{T} = w \cdot |t|^2, \quad (29)$$

где  $w$  – коэффициент, учитывающий порядок следования сред с меньшим/большим показателем преломления, ТЕ и ТМ составляющие поляризации волны.

В результате моделирования было проведено уточнение действующей модели многократного переотражения света в трехслойной структуре [14] и для коэффициента  $w$  введены следующие соотношения:

$$w = N^A \cdot P^B, \quad N = n_2^2 n_1^{-1} n_3^{-1}, \quad (30)$$

$$P = \cos^2(\varphi_2) \cos^{-1}(\varphi_1) \cos^{-1}(\varphi_3) \quad (31)$$

где при  $n_2 > n_3$ :  $A = 1$ ,  $B = 1$  для ТЕ волны,  $A = 1$ ,  $B = -1$  для ТМ волны; при  $n_2 < n_3$ :  $A = -1$ ,  $B = -1$  для ТЕ волны,  $A = -1$ ,  $B = 1$  для ТМ волны.

Указанные в (29) выражения имеют действительную и мнимую части. Чтобы избавиться от комплексного представления, данные выражения переписываются в действительной форме путем следующей замены:

$$r_{12} = \rho_{12} e^{i\varphi_{12}}, \quad r_{23} = \rho_{23} e^{i\varphi_{23}}, \quad (32)$$

$$t_{12} = \tau_{12} e^{i\chi_{12}}, \quad t_{23} = \tau_{23} e^{i\chi_{23}}. \quad (33)$$

В итоге получается следующее:

$$\mathfrak{R} = \frac{\rho_{12}^2 + \rho_{23}^2 e^{-2\beta_2} + 2\rho_{12}\rho_{23} e^{-\beta_2} \cos(\varphi_1)}{1 + \rho_{12}^2 \rho_{23}^2 e^{-2\beta_2} + 2\rho_{12}\rho_{23} e^{-\beta_2} \cos(\varphi_2)}, \quad (34)$$

$$\mathfrak{T} = w \cdot \frac{\tau_{12}^2 \tau_{23}^2 e^{-\beta_2}}{1 + \rho_{12}^2 \rho_{23}^2 e^{-2\beta_2} + 2\rho_{12}\rho_{23} e^{-\beta_2} \cos(\varphi_2)}, \quad (35)$$

$$\varphi_1 = \varphi_{12} - \varphi_{23} - \beta_1 + \alpha, \quad (36)$$

$$\varphi_2 = \varphi_{12} + \varphi_{23} + \beta_1 - \alpha. \quad (37)$$

Такая форма представления упрощает расчеты, особенно когда необходимо решить обратную задачу для нахождения комплексного показателя преломления по данным о толщине пленки, спектральных зависимостях отражающей и пропускающей способностей тонкопленочной структуры от длины волны.

### Оптимизация параметров тонкопленочной структуры $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$

Чтобы реализовать концепцию переключающего устройства, был введен критерий оптимального переключения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathfrak{R}_a(\lambda, h) = \min \\ \mathfrak{T}_a(\lambda, h) = \max \\ \mathfrak{R}_c(\lambda, h) = \max \\ \mathfrak{T}_c(\lambda, h) = \min \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \mathfrak{R}_a(\lambda, h) = 0 \\ 1 - \mathfrak{T}_a(\lambda, h) = 0 \\ 1 - \mathfrak{R}_c(\lambda, h) = 0 \\ \mathfrak{T}_c(\lambda, h) = 0 \end{array} \right. \quad (38)$$

В соответствии с данным критерием необходимо подобрать такие параметры структуры «воздух – пленка GST – подложка», что при аморфном состоянии пленки GST отражающая способность  $\mathfrak{R}_a$  будет максимальна, а пропускающая способность  $\mathfrak{T}_a$  минимальна, для пленки GST в кристаллическом состоянии, наоборот, т.е.  $\mathfrak{R}_c$  минимальна, а  $\mathfrak{T}_c$  максимальна.

Для упрощения расчетов рационально ограничиться рассмотрением варианта нормального падения света ( $\varphi_1 = 0$ ), при котором поляризация света, углы  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  не учитываются.

Условие (38) можно свести к решению следующей системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1(\lambda, h) = 1 - \mathfrak{R}_a(\lambda, h) = 0 \\ f_2(\lambda, h) = \mathfrak{T}_a(\lambda, h) = 0 \\ f_3(\lambda, h) = \mathfrak{R}_c(\lambda, h) = 0 \\ f_4(\lambda, h) = 1 - \mathfrak{T}_c(\lambda, h) = 0 \end{array} \right. \quad (39)$$

Аналитическое решение данной системы уравнений представляет собой достаточно сложную задачу, поэтому решение выполняется численными методом оптимизации нелинейных систем [14].

Метод оптимизации нелинейных систем заключается в нахождении такой точки  $(\lambda'; h')$  для которой решение системы (39) будет оптимальным. Для оценки оптимальности вводится понятие оценочной функции, значения минимума или максимума которой (в зависимости от функции) соответствуют оптимальным значениям  $(\lambda'; h')$ . Оценочная функция для системы (39) описывается выражением:

$$F(\lambda, h) = \sum_{m=1}^4 (f_m(\lambda, h) / \Delta f_m(\lambda, h))^2. \quad (40)$$

Данный вид функции удобен ввиду того, что для любых точек  $(\lambda; h)$  функция неотрицательна [15] и в области ее определения найдутся такие  $(\lambda'; h')$ , что  $F(\lambda, h) \geq F(\lambda', h') \geq 0 \forall (\lambda'; h') \in R_2$ , т.е.  $(\lambda'; h') = \arg \min F(\lambda, h)$ .

Отыскав такую точку  $(\lambda'; h')$ , в которой функция  $F(\lambda, h)$  минимальна, а в лучшем случае равна 0, можно сказать, что  $(\lambda'; h')$  – ближайшее решение функции  $F(\lambda, h)$ , а в случае, когда  $F(\lambda', h') = 0$ , ее искомого решение.

В силу того, что функции  $f_1, f_2, f_3, f_4$  могут иметь различные амплитудные размерности и различный вклад в качество оптимизируемой системы, дополнительно вводятся масштабные коэффициенты  $\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta f_3, \Delta f_4$ , размерность которых совпадает с размерностью соответствующих функций, а величина их обратно пропорциональна вкладам, весам функций в качество системы [14]. Т.к. функции  $f_1, f_2, f_3, f_4$  нормированы относительно единицы, их масштабные коэффициенты  $\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta f_3, \Delta f_4$  берутся равными 1.

В результате оценочная функция примет следующий вид:

$$F(\lambda, h) = (1 - \mathfrak{R}_a(\lambda, h))^2 + \mathfrak{Z}_a(\lambda, h)^2 + \mathfrak{R}_c(\lambda, h)^2 + (1 - \mathfrak{Z}_c(\lambda, h))^2. \quad (41)$$

Т.к. показатель преломления  $n_2$  и коэффициент экстинкции  $k_2$  имеют табличные значения, уникальные для каждой длины волны  $\lambda$ , стандартные подходы поиска минимумов функции  $F(\lambda, h)$  с применением производных неприменимы. Поэтому для поиска локализации минимумов функции  $F(\lambda, h)$  использовался метод перебора в областях предполагаемых значений  $n_2$  и  $k_2$ . Далее выполнялось определение положения глобального минимума (рисунок 5).

По зависимостям отражающей  $\mathfrak{R}_a, \mathfrak{R}_c$  и пропускающей  $\mathfrak{Z}_a, \mathfrak{Z}_c$  способностей (рисунок 6) от толщины пленки  $h$  видно, что найденный мини-

мум функции  $F(\lambda, h)$  удовлетворяет условиям (38) и в большей мере определяется функциями  $\mathfrak{R}_a, \mathfrak{Z}_a$ .

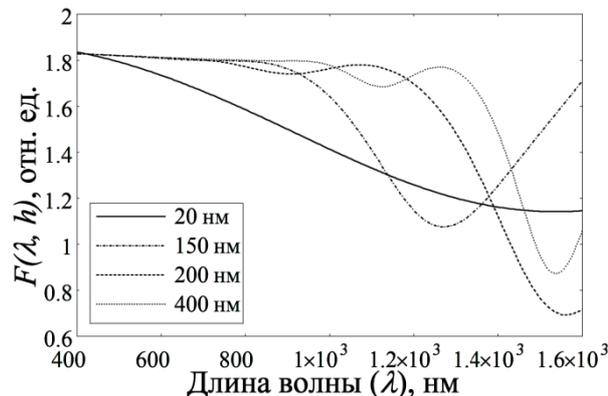


Рисунок 5 – Положение минимумов оценочной функции  $F(\lambda, h)$  для переменных значений толщины пленки  $h$  (20, 150, 200 и 400 нм) и длины волны  $\lambda$  в диапазоне от 1000 до 1600 нм

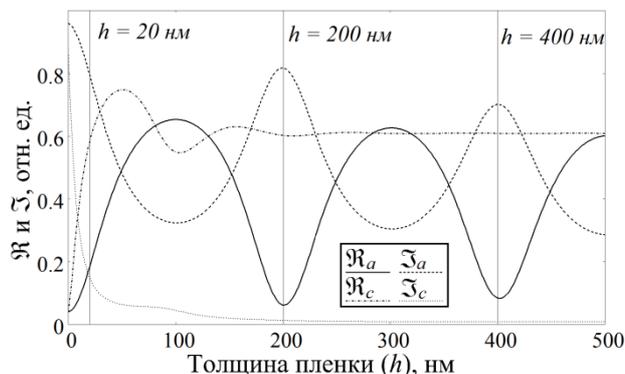


Рисунок 6 – Зависимости отражающей  $\mathfrak{R}$  и пропускающей  $\mathfrak{Z}$  способностей пленки GST225 в аморфном и кристаллическом состояниях для переменных значений толщины пленки  $h$  в диапазоне от 0 до 500 нм и при неизменном значении длины волны  $\lambda = 1550$  нм

В первом приближении положение минимумов функции  $\mathfrak{R}_a$  и максимумов функции  $\mathfrak{Z}_a$  определяется периодом функции  $\cos(\beta_1)$ , т.к.  $\exp(i \cdot \beta_1) = \cos(\beta_1) + i \sin(\beta_1)$  и соответствует [см. выражения (24), (27)-(29)]:

$$h = N \cdot \lambda / (2n_2 \cos(\varphi_2)). \quad (42)$$

где  $N$  – целое число от 0 до  $+\infty$ .

Точное определение положения локального минимума функции  $F(\lambda, h)$  выполнялось численно методом градиентного спуска [15]. В результате рассчитанная толщина пленки GST составила  $h = 200$  нм.

Стоит обратить внимание на тот факт, что чем меньше толщина пленки, тем меньшее количество оптической мощности управляющего лазера необходимо, чтобы изменить ее фазовое состояние. При толщине пленки  $h = 20$  нм оце-

ночная функция имеет локальный минимум  $F(1550, 20) = 1,1$  больший, чем при толщине пленки  $h = 200$  нм  $F(1550, 200) = 0,7$ . Для уменьшения значения оценочной функции  $F(1550, 20)$  при толщине пленки  $h = 20$  нм необходимо, чтобы функция  $\mathcal{R}_c$  стремилась к 1, а  $\mathcal{I}_c$  к 0. Это достижимо при увеличении показателя преломления или коэффициента экстинкции пленки в кристаллическом состоянии. В свою очередь подобная вариация значениями показателя преломления и коэффициента экстинкции возможна в двух случаях:

1) за счет применения материала GST с легирующими добавками Bi, Sn, In [16, 17];

2) за счет увеличения длины волны информационного сигнала.

### Заключение

Разработан математический аппарат оценки параметров тонкопленочной структуры и их оптимизации для оптического переключателя. Найдены оптимальные параметры трехслойной структуры «воздух – пленка GST – подложка SiO<sub>2</sub>»: диапазоны длин волн управляющего сигнала от 200 до 600 нм; информационного сигнала от 1550 до 1600 нм; значения длины волны 1550 нм, толщины пленки GST – 20 нм и 200 нм, задающие оптимальные режимы работы оптического переключателя на отражение и пропускание информационного оптического сигнала с длиной волны – 1550 нм, направленного под нормальным углом падения – 0°.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект 8.8760.2017/БЧ) с использованием научного оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования Рязанского государственного радиотехнического университета в научно-образовательном центре неупорядоченных и наноструктурированных материалов и устройств на их основе.*

### Библиографический список

1. Моррис К. Пробудят ли МЭМС закон Мура? // РадиоЛоцман. 2014. № 43. С.24-27.

2. Zou L. et al. Phase change material based tunable reflectarray for free-space optical inter/intra chip interconnects. Opt. Express. 2014. V. 20, no.22, pp. 24142-8.

3. Rios C., Stegmaier M., Hosseini P., Wang D. et al. Integrated all-photonic non-volatile multi-level memory. Nat. Photon. 2015, no. 9, pp.725-732.

4. Gholipour B., Zhang J. et al. An All-Optical, Non-volatile, Bidirectional, Phase-Change Meta-Switch. Adv. Mater. 2013, no. 25. pp. 3050-3054.

5. Takashi H. et al. Switching the Localized Surface Plasmon Resonance of Single Gold Nanorods with a Phase-Change Material and the Implementation of a Cellular Automata Algorithm Using a Plasmon Particle Array. Adv. Opt. Tech. 2015. Vol. 2015. Pp.1-5.

6. Pernice W., Bhaskaran H. Nanophotonic spatial light modulator, patent № US9470955B2, 18.06.2014.

7. Коломиец Б. Т., Горюнова Н. А. Свойства и структура тройных полупроводниковых систем // ЖТФ. 1955. Т. 25. № 6. С. 984-994.

8. Богословский Н. А., Цэндин К. Д. Физика эффектов переключения и памяти в халькогенидных стеклообразных полупроводниках // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46. № 5. С.577-608.

9. Korczynski E. XPoint NVM Array Process Engineering [Электронный ресурс] // Semiconductor Manufacturing and Design. 2017. URL: <http://semimd.com/blog/2017/10/18/xpoint-nvm-array-process-engineering/> (дата обращения: 01.08.2018).

10. Tolkach N., Vishnyakov N., Vorobyov Y., Avachev A., Rybina N. Optical computing device architecture based on Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>. 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing. 2017. Pp.67-69.

11. Wang X. et al. Proposal of a Grating-Based Optical Reflection Switch using Phase Change Materials // Opt. Express. Vol.17, no.19, pp.16947-16956.

12. Airy G. B. // Phil. Mag. 1833. No.2, pp.20-30.

13. Born M., Wolf E. A homogeneous film // In: Principles of optics. 7th ed. Cambridge: CUP, 2003. 65 p.

14. Родионов С. А., Гутман Е. И. Оптимизация нелинейных систем // В кн.: Расчет и конструирование механизмов и деталей приборов. Л.: Машиностроение, 1975. С.5-37.

15. Вержбицкий В. М. О решении нелинейных систем методами спуска // В кн.: Основы численных методов. М.: Высшая школа, 2002. С. 306-311.

16. Lazarenko P. et al. Influence of Bi doping on electrical and optical properties of phase change material Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>. J. Optoelectron. Adv. Mater. 2011. Vol.13, no. 11-12, pp.1400-1404.

17. Вишняков Н. В., Воробьев Ю. В., Вихров С. П., Толкач Н. М., Козюхин С. А. Влияние висмута на параметры оптической записи в структурах на основе тонких пленок (Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>)<sub>100-x</sub>Bi<sub>x</sub> // Международная научная конференция «Аморфные и микрокристаллические полупроводники». 2016. С. 136-137.

UDC 538.975:535.3:004.2:004.31

## OPTIMIZATION OF THIN FILM STRUCTURE $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ FOR OPTICAL SWITCHES

**N. V. Vishnyakov**, Ph.D. (Tech.), associate professor, RSREU, Ryazan; rcpm@rsreu.ru

**N. M. Tolkach**, junior researcher, RSREU, Ryazan; tolkach.n.m@rsreu.ru

**P. S. Provotorov**, master student, RSREU, Ryazan; p.provotorov95@yandex.ru

*The problem of finding optimal parameters (layer thickness, wavelengths of information and control signal) of  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST) thin-film structure is studied. An optimal switching criterion was introduced to determine necessary parameters. In accordance with this criterion: in amorphous state of GST film, reflectivity should be maximum, transmissivity should be minimum; in crystalline state of GST film, reflectivity should be minimum, transmissivity should be maximum. The Fresnel-Airy model for multilayer media was used to calculate reflectivity and transmissivity of GST structure. Numerical methods of gradient descent, minimization and nonlinear optimization of functions were used to search for optimal parameters of GST structure. **The aim is to optimize operating modes (reflection, transmission) of optical switch based on thin-film structure of GST.***

**Key words:** thin-film structure,  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST225, GST), optical switch, phase state, amorphous state, crystal state, information signal, control signal, phase switching effect, reflectivity, transmissivity, optimal switching criterion.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2018-66-4-2-2-8

### References

1. **Morris K.** Probudjat li MEMS zakon Mura? RadioLocman. 2014, no. 43, pp.24-27. (in Russian).
2. **Zou L.** et al. Phase change material based tunable reflectarray for free-space optical inter/intra chip interconnects. Opt. Express. 2014. Vol.20, no. 22, pp.24142-8.
3. **Rios C., Stegmaier M., Hosseini P., Wang D.** et al. Integrated all-photonics non-volatile multi-level memory. Nat. Photon. 2015, no.9, pp. 725-732.
4. **Gholipour B., Zhang J.** et al. An All-Optical, Non-volatile, Bidirectional, Phase-Change Meta-Switch. Adv. Mater. 2013, no. 25, pp. 3050-3054.
5. **Takashi H.** et al. Switching the Localized Surface Plasmon Resonance of Single Gold Nanorods with a Phase-Change Material and the Implementation of a Cellular Automata Algorithm Using a Plasmon Particle Array. Adv. Opt. Tech. 2015. Vol.2015. Pp. 1-5.
6. **Pernice W., Bhaskaran H.** Nanophotonic spatial light modulator, patent no. US9470955B2, 18.06.2014.
7. **Kolomic B. T., Gorjunova N. A.** Svoystva i struktura trojnyh poluprovodnikovyh system. ZhTF. 1955. Vol.25, no. 6, pp. 984-994. (in Russian).
8. **Bogoslovskij N. A., Cjendin K. D.** Fizika jeffektov pereklyuchenija i pamjati v hal'kogenidnyh stekloobraznyh poluprovodnikah. Fizika i tehnika poluprovodnikov. 2012. Vol.46, no. 5, pp.577-608. (in Russian).
9. **Korczynski E.** XPoint NVM Array Process Engineering [Elektronnyj resurs]. Semiconductor Manufacturing and Design. 2017. URL: <http://semimd.com/blog/2017/10/18/xpoint-nvm-array-process-engineering/> (data obrashhenija: 01.08.2018).
10. **Tolkach N., Vishnyakov N., Vorobyov Y., Avachev A., Rybina N.** Optical computing device architecture based on  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ . 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing. 2017. Pp.67-69.
11. **Wang X.** et al. Proposal of a Grating-Based Optical Reflection Switch using Phase Change Materials. Opt. Express. Vol.17, no.19, pp.16947-16956.
12. **Airy G. B.** Phil. Mag. 1833. No.2, pp.20-30.
13. **Born M., Wolf E.** A homogeneous film. In: Principles of optics. 7th ed. Cambridge: CUP. 2003. 65 p.
14. **Rodionov S. A., Gutman E. I.** Optimizacija nelinejnyh sistem. V kn.: Raschet i konstruirovanie mehanizmov i detalej priborov. L.: Mashinostroenie, 1975. Pp. 5-37. (in Russian).
15. **Verzhbickij V. M.** O reshenii nelinejnyh sistem metodami spuska. V kn.: Osnovy chislennyh metodov. M.: Vysshaja shkola, 2002. Pp.306-311. (in Russian).
16. **Lazarenko P.** et al. Influence of Bi doping on electrical and optical properties of phase change material  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ . J. Optoelectron. Adv. Mater. 2011. Vol.13, no.11-12, pp.1400-1404.
17. **Vishnjakov N. V., Vorob'ev Ju. V., Vihrov S. P., Tolkach N. M., Kozjuhina S. A.** Vlijanie vismuta na parametry opticheskoj zapisi v strukturah na osnove tonkih plenok  $(\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5)_{100-x}\text{Bi}_x$ . Mezhdunarodnaja nauchnaja konferencija «Amorfnye i mikro-kristallicheskie poluprovodniki». 2016. Pp.136-137. (in Russian).