

УДК 621.315.592

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРЁХСЛОЙНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ Ge И Si**

**Гацкевич Е.И., Альхимович М.А.**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

В современной микроэлектронике широко используются многослойные структуры со слоями Ge и Si, а также слоями их твердых растворов  $Ge_xSi_{1-x}$  с различным содержанием  $x$  [1]. Использование многослойных структур позволяет создавать гетероструктуры с заданными оптическими свойствами и электрофизическими характеристиками. При формировании и модификации подобного рода структур часто применяют оптические обработки, в частности, лазерное воздействие [2, 3]. Для правильной интерпретации результатов оптической диагностики, а также определения режимов облучения необходимо иметь данные об оптических свойствах данных структур.

В настоящей работе проведено моделирование оптических свойств трёхслойных гетероструктур вида Ge/SiO<sub>2</sub>/Si. Ранее нами проводился анализ отражательной способности  $R$  систем тонкопленочный Ge на полупроводниковых и диэлектрических подложках [4, 5]. Как и в работах [4, 5], при моделировании оптических свойств трёхслойных гетероструктур использовался метод характеристических матриц [6]. Расчёты проведены для длин волн рубинового ( $\lambda_1=694$  нм) и Nd:YAG лазеров ( $\lambda_2=532$  нм).

Исходными параметрами для расчета являются комплексные показатели преломления  $\tilde{n} = n + ik$  для каждого слоя и толщины слоёв. Комплексные показатели преломления для Ge, SiO<sub>2</sub> и кристаллического кремния, используемые в расчётах, приведены в таблице.1. Кремниевая подложка предполагалась толщиной порядка сотен микрометров, излучение полностью поглощается в этом слое. Толщины двух других слоёв варьировались от нескольких десятков до нескольких сотен нанометров, таким образом, их толщины были сравнимы с длинами волн оптического диапазона.

Таблица 1 – Комплексные показатели преломления Ge, Si и SiO<sub>2</sub>

Материал	n	k
694 нм		
Ge	5.81	0.82
Si	3.76	0.015
SiO <sub>2</sub>	1.455	0
532 нм		
Ge	5.05	2.28
Si	4.2	0.05
SiO <sub>2</sub>	1.461	0

В отличие от двухслойной структуры [4], при расчёте трёхслойных структур характеристическая матрица  $M$  является произведением матриц для каждого слоя. Для s-поляризованной волны

(вектор электрического поля перпендикулярен плоскости падения):

$$M_s = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = M_{s-1} M_{s-2}, \quad (1)$$

где  $M_{s-1}$  и  $M_{s-2}$  обозначают матрицы соответствующих слоёв Ge и SiO<sub>2</sub>

Характеристические матрицы для  $k$ -го слоя определяются формулами:

$$M_{s-k} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_k h_k) & \frac{-i}{p_k} \sin(\beta_k h_k) \\ -ip_k \sin(\beta_k h_k) & \cos(\beta_k h_k) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $h_k$  – толщина,  $k_0 = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  – длина волны падающего излучения,  $\beta_k = k_0 \tilde{n}_k \cos \theta_k$ ,  $\tilde{n}_k$  – показатель преломления, комплексный угол  $\theta_k$  вычисляется из обобщенного закона преломления,  $p_k = \tilde{n}_k \cos \theta_k$ . Индекс  $k$  указывает на принадлежность параметров  $k$ -ому слою.

Аналогично (1), определялась характеристическая матрица  $M_p$  для оптического излучения р-поляризации (вектор электрического поля лежит в плоскости падения), где характеристические матрицы  $k$ -го слоя находятся из выражений:

$$M_{p-k} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_k h_k) & \frac{-i}{q_k} \sin(\beta_k h_k) \\ -iq_k \sin(\beta_k h_k) & \cos(\beta_k h_k) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

здесь  $q_k = \cos \theta_k / \tilde{n}_k$ .

Для плоскополяризованной волны коэффициент отражения

$$R = \frac{R_s + R_p}{2}, \quad (4)$$

где  $R_s$  и  $R_p$  выражаются через элементы матриц  $M_s$  и  $M_p$  аналогично работе [4].

Моделирование проводилось в интегрированной среде Mathcad. Разработаны алгоритмы, позволяющие рассчитывать оптические свойства многослойных систем.

Результаты расчёта отражательной способности гетероструктуры Ge/SiO<sub>2</sub>/Si с фиксированной толщиной слоя SiO<sub>2</sub> (500 нм) при варьировании толщины слоя Ge показали, что зависимость от толщины германиевого слоя более выражены на

$\lambda_2$ , чем на  $\lambda_1$  (рис.1). Зависимость от толщины проявляется при толщине слоя менее 200 нм для длины волны рубинового лазера, для Nd:YAG лазера эта толщина менее 400 нм.

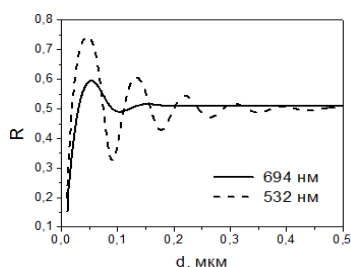


Рисунок 1 – Отражательная способность гетероструктуры Ge/SiO<sub>2</sub>/Si в зависимости от толщины плёнки Ge для указанных длин волн при нормальном падении излучения

При нормальном падении излучения отражательная способность не зависит от типа поляризации и  $R=R_s=R_p$ , при падении излучения под некоторым углом значения  $R_s$  выше, чем значения  $R_p$  (рис. 2). Увеличение угла падения приводит к уменьшению амплитуды изменения значений отражательной способности с уменьшением толщины слоя Ge.

Из результатов расчёта следует, что при варьировании толщины SiO<sub>2</sub> слоя при фиксированной толщине Ge (270 нм) отражательная способность системы практически не меняется.

Таким образом, в настоящей работе проведено моделирование отражательной способности системы Ge/SiO<sub>2</sub>/Si на длинах волн оптического диапазона 694 и 532 нм. Исследована зависимость отражательной способности от толщин слоёв при различных поляризациях излучения и углах падения. В частности, из результатов моделирования установлено, что изменения  $R$  с уменьшением толщины Ge слоя более выражены для волны с длиной 532 нм, чем на длине волны 694 нм, что, по всей видимости, связано с более низким показателем поглощения  $k$  на  $\lambda_1$ . Варьирование толщины прозрачного слоя SiO<sub>2</sub> ( $k=0$ ) не влияет на отражательную способность системы.

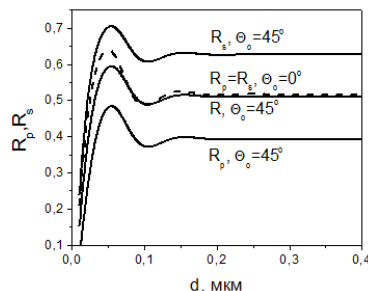


Рисунок 2 – Отражательная способность гетероструктуры Ge/SiO<sub>2</sub>/Si на длине волны 0.694 мкм в зависимости от толщины слоя Ge при указанных поляризациях и углах падения

Проведенные исследования указывают, что при выборе режимов лазерной обработки систем Ge/SiO<sub>2</sub>/Si необходимо учитывать зависимости отражательной способности от толщины германиевого слоя.

#### Литература

1. The revolution in SiGe: impact on device electronics / D.I. Narame [et al.] // Appl. Surf. Sci., 2004. – V. 224. – P. 9–17.
2. All laser assisted heteroepitaxial growth of Si<sub>0.8</sub>Ge<sub>0.2</sub> on Si(100): Pulsed laser deposition and laser induced melting solidification / R.Serna [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 1996. – Vol. 68. – P. 1781–1783.
3. Laser-induced melting and recrystallization of CVD grown polycrystalline Si/SiGe/Ge layers / P.I. Gaiduk [et al.] // Physica B. – 2009. – Vol. 404. – P. 4708–4711.
4. Гацкевич, Е.И. Отражательная способность тонкопленочного германия на кремниевых подложках / Е.И. Гацкевич, М.А. Альхимович // Приборостроение - 2017: материалы 10-й Международной научно-технической конференции, 1-3 ноября 2017 года, Минск, Республика Беларусь / Минск : БНТУ, 2017. – С. 359–360.
5. М.А. Альхимович, Е.И. Гацкевич. Отражательная способность аморфного германия на кварцевых подложках // Новые направления развития приборостроения. Материалы 11-й Международной научно-технической конференции молодых учёных и студентов. 18–20 апреля 2018. Минск, БНТУ, 2018. – С. 334.
6. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М. : Наука, 1970. – 856 с.

УДК 517.518.24

### ПОСТРОЕНИЕ ФУНКЦИЙ, УДОВЛЕТВОРЯЮЩИХ УСЛОВИЮ ЛИПШИЦА

Гундина М.А., Абдыев А.Д.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

В данной работе строится набор функций, обладающих определенными свойствами, позволяющими применять условие Липшица соответствующего порядка.

Говорят, что функция  $f : [a, b] \rightarrow R$  удовлетворяет условию Липшица порядка  $\alpha$ , если су-

ществует такое положительное число  $c$ , что выполняется следующее условие [1]:

$$|f(x_1) - f(x_2)| \leq c|x_1 - x_2|^\alpha, \quad \forall x_1, x_2 \in [a, b].$$

Если функция  $f$  непрерывна на отрезке  $[a, b]$  и дифференцируема на интервале  $(a, b)$ , то