

расширяемых стентов. При этом у оптимизированного стента наблюдалось более равномерное раскрытие сегментов по сравнению с исходным образцом.

После проведения дальнейшей топологической оптимизации ожидается значительное улучшение характеристик стента, таких как его гибкость, увеличение усилия съема с системы доставки, дальнейшее снижение рекойла.

УДК 621.315.592

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОТРАЖЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ СИСТЕМ С ДВИЖУЩИМИСЯ ГРАНИЦАМИ

Гацкевич Е.И.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** В настоящей работе на основе теории распространения света в многослойных поглощающих средах проведено моделирование динамики отражения структуры аморфная пленка Ge на подложке кристаллического Si в условиях лазерно-индуцированного плавления и последующего отвердевания. Рассмотрены следующие ситуации при отвердевании: 1) граница фазового перехода расплав ↔ твердое тело движется от подложки по направлению к поверхности, 2) отвердевание происходит как со стороны поверхности, так и со стороны подложки.

**Ключевые слова:** отражение, германий, кремний, лазерное облучение, плавление, отвердевание.

## SIMULATION OF REFLECTION DYNAMICS OF MULTILAYER SYSTEMS WITH MOVING BOUNDARIES

Gatskevich E.

*Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** Simulation of reflection dynamics of amorphous Ge film on crystalline Si substrate under conditions of laser-induced melting and subsequent solidification has been carried out. The simulation is based on the theory of light propagation in multilayer absorbing media. The following situations for solidification are considered: 1) the phase transition melt ↔ solid boundary moves from the substrate towards the surface, 2) solidification occurs both from the side of the surface and from the side of the substrate.

**Key words:** Reflection, simulation, germanium, silicon, laser irradiation, melting, solidification.

*Адрес для переписки: Гацкевич Е.И., пр. Независимости, 65, Минск 220013, Республика Беларусь  
e-mail: gatskevich\_elena@bk.ru*

При исследовании динамики отражения сложных систем иногда приходится иметь дело с многослойными структурами с движущимися границами. Подобного рода задачи, например, возникают при воздействии импульсного лазерного излучения на структуры аморфный слой германия на кристаллическом кремнии (a-Ge/Si) [1]. При поглощении излучения происходит нагрев пленки и последующее ее плавление. Поскольку температура плавления a-Ge ( $T_a = 965$  К [2]) почти на 200 К ниже температуры плавления кристаллического Ge в результате плавления образуется переохлажденный расплав l-Ge, при остывании которого возможно отвердевание как со стороны подложки, так и одновременно со стороны поверхности и со стороны подложки, что приводит к специфическим зависимостям коэффициента отражения  $R$  от времени [1].

## Литература

1. Bokeria, L. A. Public Health of the Russian Federation and surgical treatment of diseases of the heart and blood vessels in 2011 // Scientific Bulletin named after A.N. Bakulev RAMS. – 2012. – P. 5–47.

2. Зарецкий, А. П. / Биомеханическое моделирование персонафицированного коронарного стента / А. П. Зарецкий, А. В. Богомолов // Инжиниринг и телекоммуникации 2015. – 2015. – Том 7, № 3. – С. 82–90.

В настоящей работе проведено моделирование динамики отражения структуры пленка аморфного Ge на подложке кристаллического кремния в условиях импульсного лазерного воздействия. Толщина аморфной пленки считалась равной 100 нм, длительность импульса 10 нс. Предположим, что при воздействии лазерным импульсом на гетероструктуру a-Ge/Si наряду с обычным плавлением и отвердеванием, может наблюдаться также отвердевание с поверхности.

Моделирование отражение проводилось на основе теории распространения света в проводящих средах [3]. Оптические параметры каждого слоя считались независимыми от температуры. Параметры, используемые в вычислениях, приведены в табл. 1. Исследовалось отражение на длине волны  $\lambda = 532$  нм при падении на поверхность под углом  $45^\circ$ .

Таблица 1. Оптические параметры

Материал	532 nm	
	<i>n</i>	<i>k</i>
a-Ge	4,7	2,2
l-Ge	2,8	5,4
cSi	4,2	0,005

Предположим, что на стадии плавления граница фазового перехода переохлажденный расплав – аморфное состояние движется с постоянной скоростью от поверхности вглубь образца *V*. При моделировании считали, что скорость *V* = 2 м/с. На стадии остывания скорость движения границы фазового перехода внутри образца равна *V*<sub>1</sub>, а с поверхности *V*<sub>2</sub>. Скорости *V*<sub>1</sub> и *V*<sub>2</sub> были варьируемыми параметрами задачи.

На стадии плавления характеристическая матрица [3] определялась следующим образом:

$$M = M(n_l, Vt)M(n_a, d - Vt)M(n_c, d_1), \quad (1)$$

где *n<sub>b</sub>*, *n<sub>a</sub>*, *n<sub>c</sub>* – комплексные показатели преломления соответственно жидкого, аморфного Ge и кристаллического Si, *d* = 100 nm, *d*<sub>1</sub> = 100 nm.

При остывании

$$M = M(n_a, V_2t)M(n_l, d - V_1t - V_2t)M(n_a, V_1t)M(n_c, d_1). \quad (2)$$

Элементы матрицы *M* определялись по формуле [3]:

$$M(n_j, z_j) = \begin{bmatrix} \cos(\beta_j z_j) & \frac{-i}{p_j} \sin(\beta_j z_j) \\ -ip_j \sin(\beta_j z_j) & \cos(\beta_j z_j) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где *n<sub>j</sub>* и *z<sub>j</sub>* – комплексный показатель преломления и толщина *j*-го слоя, *k<sub>o</sub>* = 2π / λ, β<sub>*j*</sub> = *k<sub>o</sub>* *n<sub>j</sub>* cos θ<sub>*j*</sub>, комплексный угол θ<sub>*j*</sub> вычисляется из обобщенного закона преломления:

$$\sin \theta_j = \frac{n_0 \sin \theta_0}{n_j}, \quad (4)$$

$$p_j = n_j \cos \theta_j, \quad (5)$$

$$q_j = \frac{\cos \theta_j}{n_j}. \quad (6)$$

Элементы указанных характеристических матриц использовались для вычисления коэффициента отражения *R* по методу, описанному в [3, 4].

Результаты моделирования представлены на рис. 1. Значения скоростей движущихся границ указаны на рисунке. С началом плавления наблюдается рост коэффициента отражения, связанный с плавлением поверхности и, соответственно, с переходом в металлическое состояние. При дальнейшем нагреве *R* не меняется.

После прекращения действия лазерного импульса начинается процесс остывания, при этом граница фазового перехода l-Ge ↔ a-Ge движется по направлению к поверхности (рис. 1, а).

После завершения процесса аморфизации Ge коэффициент отражения возвращается к исходному значению. Таким образом, в результате моделирования получилась типичная временная зависимость коэффициента отражения в условиях лазерно-индуцированного нагрева и остывания. Такая зависимость обусловлена тем, что при плавлении германий переходит в металлическое состояние, что вызывает скачок коэффициента отражения. Причем длительность фазы высокого отражения соответствует времени существования расплава [1].

При аморфизации с поверхности, когда на стадии остывания границы фазовых переходов движутся навстречу друг другу, динамика отражения меняется. В этом случае наличие тонкого металлического слоя внутри системы приводит к возникновению интерференционных эффектов, которые приводят к резкому понижению коэффициента отражения (ниже начального уровня) (рис 1, *b, c*).

Далее значение значения коэффициента отражения возрастают до начального значения. При равных скоростях *V*<sub>1</sub> и *V*<sub>2</sub> наблюдается кратковременный рост *R* и затем возвращение к нормальному значению. Аналогичные зависимости коэффициента отражения зондирующего излучения при лазерно-индуцированном плавлении и остывании наблюдались в экспериментах с облучением структур a-Ge/Si эксимерным лазером [1].

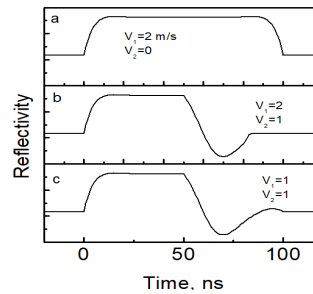


Рисунок 1 – Временные зависимости коэффициента отражения aGe/Si для различных скоростей движения межфазных границ (λ = 532 nm, Θ<sub>0</sub> = 45°)

Таким образом, предложенная модель позволяет определить характер временных изменений коэффициента отражения в условиях лазерно-индуцированных плавления и отвердевания.

#### Литература

- Ивлев, Г. Д. Фазовые превращения, инициируемые в тонких слоях аморфного кремния наносекундным воздействием излучения эксимерного лазера / Г. Д. Ивлев, Е. И. Гацкевич // ФТП. – 2003. – Т. 37, № 5. – С. 622–628.
- Szyszko, W. Melting and diffusion under nanosecond laser pulse / W. Szyszko // Appl.Surf. Science. – 1995. – V. 90. – P. 325–331.
- Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф.- М.: Наука, 1970. – 856 с.
- Гацкевич, Е. И. Отражательная способность тонкопленочного германия на кремниевых подложках / Е. И. Гацкевич, М. А. Альхимович // Матер. 10-й Международн. научн.-техн. конфер. «Приборостроение -2017», Минск, БНТУ. – 2017. – С. 357–359.