

так и для a-Ge/SiO₂, что обусловлено низким коэффициентом теплопроводности аморфного Ge. Зависимость пороговой плотности энергии, необходимой для достижения температуры плавления в плёнке, от толщины плёнки хорошо описывается экспоненциальным законом ослабления. Показано, что градиент температуры в тонкоплёночном Ge в системе a-Ge/Si возрастает с уменьшением толщины пленки.

УДК 621.315.592

ОТРАЖАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ГЕРМАНИЯ НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ

Гацкевич Е.И., Альхимович М.А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Системы плёнка Ge на кремниевых подложках широко изучаются как перспективные системы для использования в оптоэлектронике при разработке светоизлучающих приборов [1]. Такие структуры можно получить методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Однако этот метод довольно дорогой и плохо совместим с кремниевой технологией. Для практических применений Ge/Si структуры можно формировать методом ионно-лучевого распыления мишени в вакууме [2]. При использовании этого метода структуры получаются несовершенными и для улучшения их свойств используют термическую обработку. Недавно выполнены работы [2, 3], в которых показана эффективность использования для этих целей лазерного отжига. В частности в работе [3] экспериментально изучены лазерно-индуцированные процессы при воздействии моноимпульсного (70–80 нс) излучения рубинового лазера на аморфные пленки Ge на кремниевых подложках. При анализе лазерноиндуцированных процессов в указанной работе использовался метод оптического зондирования. Для правильной интерпретации результатов оптического зондирования важно иметь данные о зависимости коэффициента отражения зондирующего излучения как от толщины пленки, так и от угла падения. Кроме того для определения оптимальных режимов лазерного воздействия также важным является знание оптических свойств отжигаемых систем.

В настоящей работе проведено моделирование отражательной способности аморфного германия (a-Ge) на подложке монокристаллического кремния (Si). Рассматривались структуры, в которых толщина плёнки сравнима с длиной волны оптического излучения, а толщина подложки существенно её превышает.

Для определения отражательной способности R воспользуемся теорией распространения электромагнитных волн в слоистой среде [4]. Коэффициент отражения от такой среды определяется показателем преломления n

1. Kaschel, M. Room-temperature electroluminescence from tensile strained double-heterojunction germanium pin LEDs on silicon substrates / M. Kaschel [et al.] // Solid-State Electron. -2013. – V.83. – P. 87–91.
2. Liu, J. Ge-on-Si laser operating at room temperature / J. Liu [et al.] // Optics Lett. - 2010. – Vol.35. – P. 679.
3. Фотолуминесценция лазерно-модифицированных слоёв GeSi/Si // Г.Д. Ивлев [и др.]/Сборник докладов Международной научной конференции ФТТ-2016 «Актуальные проблемы физики твердого тела» 22-25 ноября 2016 г. - Минск, «Ковчег», 2016. - Т.2. - С. 81 – 83.

(комплексным показателем преломления $\tilde{n} = n + ik$ для проводящей среды).

Пусть оптическое излучение падает под углом θ_0 из воздушной среды ($n_0 = 1$). Для плоскополяризованной волны коэффициент отражения

$$R = \frac{R_{TE} + R_{TM}}{2}, \quad (1)$$

где индексы “TE” и “TM” соответствуют поперечной электрической и поперечной магнитной волнам, причем

$$R_{TE} = |r_{TE}|^2, \quad R_{TM} = |r_{TM}|^2. \quad (2)$$

Величины r_{TE} и r_{TM} определяются через характеристические матрицы M_{TE} и B_{TM} следующим образом:

$$r_{TE} = \frac{(m_{11} + m_{21}p_e)p_0 - (m_{21} + m_{22}p_e)}{(m_{11} + m_{12}p_e)p_0 + (m_{21} + m_{22}p_e)}, \quad (3)$$

$$r_{TM} = \frac{(b_{11} + b_{21}q_e)q_0 - (b_{21} + b_{22}q_e)}{(b_{11} + b_{12}q_e)q_0 + (b_{21} + b_{22}q_e)}, \quad (4)$$

где индексы “0” и “e” обозначают, соответственно, параметры воздуха и кремниевой подложки, $p_0 = q_0 = \cos \theta_0$, $p_e = \tilde{n}_e \cos \theta_e$, $q_e = \cos \theta_e / \tilde{n}_e$, угол определяется из обобщенного закона преломления $n_0 \sin \theta_0 = \tilde{n}_e \sin \theta_e$, m_{ij} и b_{ij} - элементы характеристических матриц.

Характеристические матрицы для аморфного слоя определяются формулами:

$$M_{TE} = \begin{bmatrix} \cos(\beta h) & \frac{-i}{p} \sin(\beta h) \\ -ip \sin(\beta h) & \cos(\beta h) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$B_{TM} = \begin{bmatrix} \cos(\beta h) & \frac{-i}{q} \sin(\beta h) \\ -iq \sin(\beta h) & \cos(\beta h) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где h - толщина плёнки, $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ - длина волны падающего излучения, $\beta = k_0 \tilde{n}_f \cos \theta_f$, \tilde{n}_f - показатель преломления аморфной плёнки, комплексный угол θ_f вычисляется из обобщенного закона преломления, $p = \tilde{n}_f \cos \theta_f$, $q = \cos \theta_f / \tilde{n}_f$.

Исследована отражательная способность системы a-Ge/Si на двух длинах волн 694 и 532 нм, которые являются длинами волн излучения рубинового и Nd:YAG лазеров, соответственно. Именно для этих типов лазеров проводились исследования в [2, 3]. Вычисления проводились для параметров плёнки и подложки, приведенных в таблице 1.

Таблица 1 – Оптические параметры системы плёнка аморфного германия на кремнии

Материал	n	k
694 нм		
a-Ge	5,3	1,4
Si	3,76	0,015
532 нм		
a-Ge	4,7	2,2
Si	4,2	0,05

При нормальном падении ($\theta_0 = 0$) составляющие коэффициента отражения для поперечной электрической и поперечной магнитной волн равны между собой и равны R (рис.1). Наиболее значительные изменения величины отражательной способности с изменением толщины плёнки имеют место при толщинах аморфной плёнки менее 200 нм, причём эти изменения более выражены на длине волны 694 нм. Максимальный разброс значений составляет 14% для длины волны 532 нм и почти 20% для 694 нм. То есть, при определении оптимальных режимов лазерного воздействия необходимо учитывать зависимость отражательной способности от толщины пленки.

Увеличение угла падения не приводит к существенному изменению отражательной способности для обеих длин волн (рис. 2).

В настоящей работе исследована отражательная способность системы a-Ge/Si на двух длинах волн 694 и 532 нм. Анализ зависимости отражательной способности от толщины пленки и угла падения показал, что при моделировании лазерно-индуцированных процессов в системах a-Ge/Si необходимо учитывать зависимость отражательной способности от толщины плёнки при толщинах аморфного Ge менее 200 нм для обеих длин волн.

Полученные результаты могут быть использованы для моделирования лазерно-индуцированных процессов при лазерном отжиге тонкопленочных систем на полупроводниковых подложках, а также при интерпретации результатов оптического зондирования.

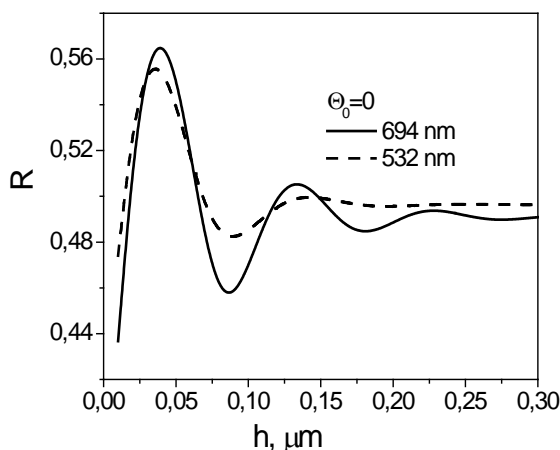


Рисунок 1 – Зависимость отражательной способности системы a-Ge/Si от толщины пленки при нормальном падении для указанных длин волн

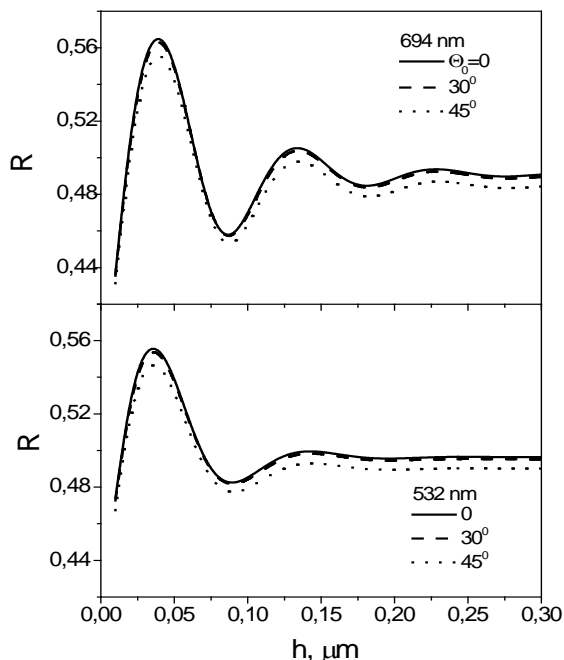


Рисунок 2 - Зависимость отражательной способности системы a-Ge/Si от толщины пленки при различных углах падения для указанных длин волн

Работа выполнена при поддержке БРФФИ по проекту Ф16Р-069.

1. Kaschel, M. Room-temperature electroluminescence from tensile strained double-heterojunction germanium pin LEDs on silicon substrates / M. Kaschel [et al.] // Solid-State Electron. -2013. – V.83. – P. 87–91.
2. Новиков, Г.А. Оптическая диагностика лазерно-индуцированных фазовых превращений в тонких плёнках германия на кремнии, сапфире и кварце / Г.А. Новиков [и др.] // ЖТФ.-2015.-Т.85, В.3.-С.89-95.
3. Новиков, Г.А. Импульсная модификация плёнок германия на подложках кремния, сапфира и кварца: структура и оптические свойства / Г.А. Новиков [и др.] // ФТП.-2015.- Т.49, В.6.-С.746-752.
4. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф.- М.: Наука, 1970. -856 с.