

Исследование влияния режимов работы Nd:YAG лазера на напряженно-деформированные состояния в обрабатываемой полупроводниковой структуре

И.В. Куликова, С.П. Малюков, Г.В. Калашников, Н.К. Приступчик

Введение

В настоящее время практически во всех областях производства микро- и наноэлектроники широко используются лазерные технологические операции. Наиболее важными из лазерных технологических процессов обработки являются «лазерная абляция», «лазерная рекристаллизация» и «лазерный отжиг», которые позволяют получить высококачественные полупроводниковые структуры. Это достигается за счет локальности, импульсного характера и селективности лазерного излучения [1-3], что является важным шагом на пути к созданию тонкопленочных солнечных элементов [4] и перфорированных мембран для элементов микросистемной техники [5, 6]. Однако локализация теплового воздействия приводит к значительным градиентам температуры и как следствие к появлению термонапряжений в области обработки [3, 7, 8]. Исследование данного вопроса особенно важно для многослойных полупроводниковых структур, в которых пленки имеют различные термомеханические параметры, что в свою очередь может привести к появлению дефектов.

Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния в процессе лазерной обработки весьма затруднительно. Поэтому применяются моделирование лазерных технологических операций, которые позволяют значительно сократить не только время и стоимость исследований, но и рассчитать оптимальные параметры данной технологической операции [1, 2, 7-12].

Разработка модели напряженно-деформированного состояния

В работе было проведено исследование влияния режимов обработки Nd:YAG лазера с длиной волны 1064 нм, таких как плотность мощности лазерного луча и скорости сканирования, на распределение температуры в сложных многослойных полупроводниковых структурах сенсублизированных красителем солнечных элементов (СЭ) при помощи численного эксперимента.

Задача была разделена на две части:

- решение нестационарного уравнения теплопроводности;
- решение задачи напряженно-деформированного состояния.

Для первой части задачи была разработана программа численного моделирования распределения температуры в исследуемой структуре на основе метода конечных разностей. В основу модели было положено нестационарное уравнение теплопроводности с граничными условиями третьего рода, которые позволили учесть конвективную и излучательную диссипацию тепловой энергии с поверхности структуры в процессе лазерной обработки. Источником тепла являлось лазерное излучение. В модели использовалось так же уравнение Бугера-Ламберта-Бера, которое позволило учитывать оптическую прозрачность некоторых слоев в структуре [1, 7, 12].

Для второй части задачи разработана программа численного моделирования распределения тензора напряжений, возникающих под действием, рассчитанного на первом этапе, температурного поля. В основу модели положены уравнения равновесия, уравнения совместимости и обобщенный закон Гука с учетом теплового расширения тела. Задача решалась в напряжениях. Граничные условия для данной системы были получены из уравнений равновесия с учетом отсутствия механического воздействия на поверхности обрабатываемой структуры [2, 7, 8].

Результаты моделирования

Разработанное программное обеспечение позволило провести исследования влияния скорости сканирования и мощности лазерного

излучения на максимальную температуру и максимальные напряжения вызываемые градиентом температуры в структуре.

В качестве теста была выбрана структура сенсibilизированного солнечного элемента, состоящего из стекла, слоя $\text{SnO}_2\text{:F}$ и TiO_2 при обработке Nd:YAG лазером с длиной волны 1064 нм. Скорость сканирования лазерного луча изменялась в пределах от 5 мм/с до 100 мм/с а мощность от 25 Вт до 80 Вт. Параметры структуры солнечного элемента приведены в таблице 1.

Таблица № 1

Оптические и тепловые параметры слоев солнечного элемента

	Толщина	$k, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$C, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$a, \frac{1}{\text{м}}$	$E, \text{Па}$	ν	$\alpha_T, \frac{1}{\text{К}}$
Стекло	1 мм	1	2.52e3	800	66	72e9	0.22	8.6e-6
$\text{SnO}_2\text{:F}$	0,8 мкм	3.2	6.95e3	353	5e5	401e9	0.29	7.8e-6
TiO_2	10 мкм	8.5	3.89e3	690	4e3	52e9	0.4	8.4e-6

На рисунке 1 представлена зависимость максимальной температуры в обрабатываемой структуре СЭ от различной скорости сканирования и плотности мощности лазерного луча.

Результаты моделирования показали, что максимальная температура в структуре линейно зависит от плотности мощности лазерного излучения, в то время как зависимость от скорости сканирования является нелинейной. Так же стоит заметить, что необходимую температуру при лазерной обработке можно получить двумя путями: увеличивая мощность лазера и уменьшая скорость сканирования (рисунок 1).

Однако уменьшение скорости сканирования приводит к растеканию тепла по структуре, что не во всех случаях допустимо, а увеличение мощности с одновременным увеличением скорости приводит к локализации теплового воздействия.

На рисунках 2 и 3 представлены зависимости минимальных и максимальных, соответственно сжатия и растяжения, значений компонент тензора напряжений при различных режимах обработки структуры. Скорости

сканирования и мощность лазера были подобраны так, чтобы максимальный перегрев структуры не превышал 400 °С, при этом скорости сканирования изменялись от 5 до 55 мм/с, а мощность лазерного луча от 15 до 80 Вт.

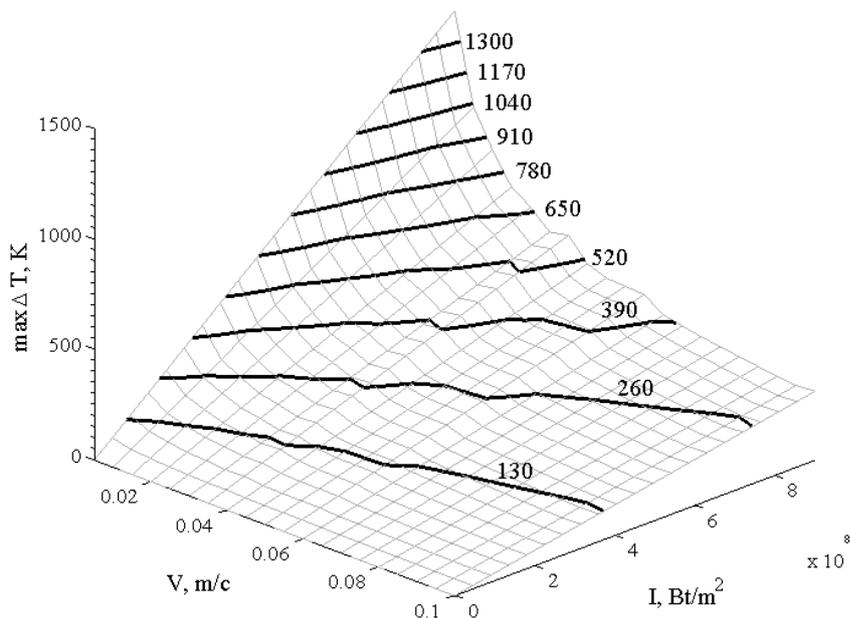


Рис. 1 – Зависимость максимальной температуры в структуре при различных режимах сканирования лазерным лучом.

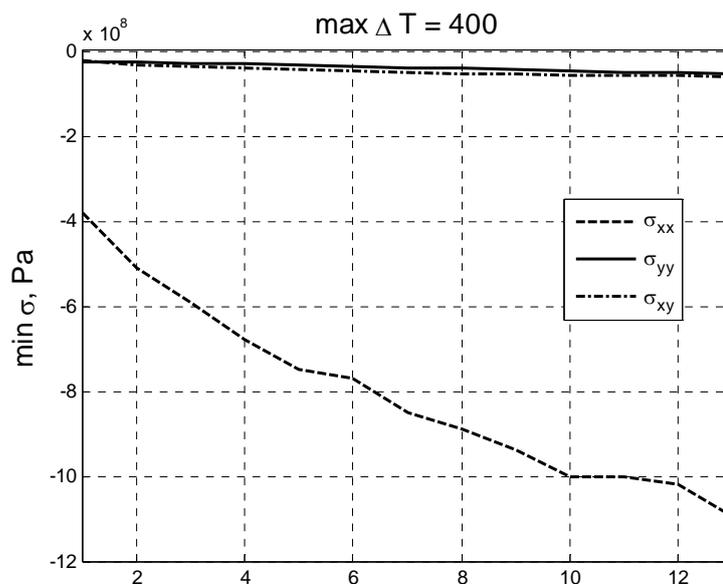


Рис. 2 – Зависимость сжимающих напряжения при различных режимах лазерной обработки

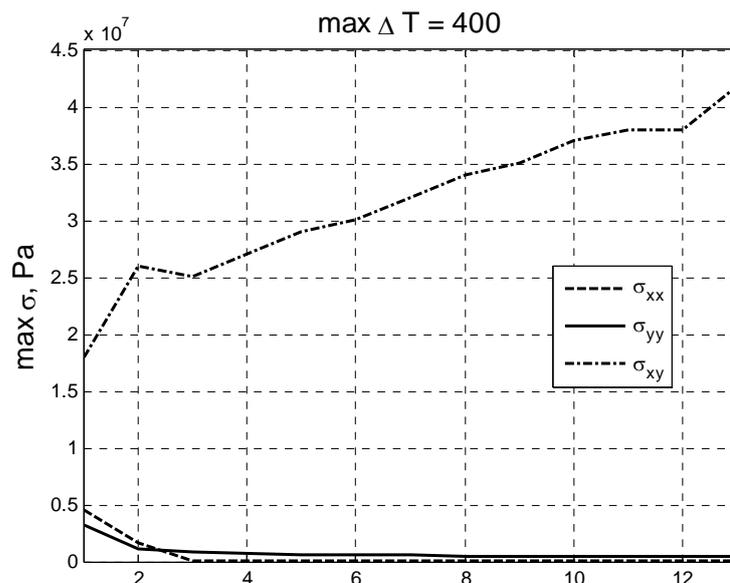


Рис. 3 – Зависимость растягивающих напряжения при различных режимах лазерной обработки

Заключение

В работе представлены результаты численного эксперимента для сенсibilизированного красителем солнечного элемента, состоящего из стеклянной подложки с нанесенными на нее слоями $\text{SnO}_2\text{:F}$ и TiO_2 , при различных скоростях сканирования поверхности и мощности лазерного луча.

Моделирование показало, что основной вклад в напряженно деформированное состояние вносит градиентов температур, а не различие коэффициентов линейного расширения слоев, которое в данной структуре было незначительно. Увеличение скорости сканирования подложки лазерным лучом от 5 мм/с до 55 мм/с привело к увеличению максимального напряжения от 400 МПа к 1000 МПа. Так же стоит заметить, что максимальные нормальные напряжения сжатия локализованы непосредственно в зоне воздействия лазерного луча, в то время как напряжения сдвига максимальны за его пределами. Моделирование так же показало (см. рисунок 2, 3), что нормальное к поверхности напряжение и

напряжение сдвига (σ_{yy} , σ_{xy}) в 20 раз меньше напряжения тангенциального к поверхности подложки (σ_{xx}).

Результаты исследований, изложенные в данной статье, получены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации проекта «Создание высокотехнологичного производства для изготовления комплексных реконфигурируемых систем высокоточного позиционирования объектов на основе спутниковых систем навигации, локальных сетей лазерных и СВЧ маяков и МЭМС технологии» по постановлению правительства №218 от 09.04.2010 г. Исследования проводились в ФГАОУ ВПО ЮФУ

Литература

1. Малюков С.П., Куликова И.В., Калашников Г.В. Моделирование процесса лазерного отжига структуры «кремний-стекловидный диэлектрик» [Текст] // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск «Интеллектуальные САПР». – 2011. – № 7. – С. 182-188.

2. Рындин Е.А., Исаева А.С., Рыжук Р.В. Математическая модель механических напряжений, инициированных лазерным импульсом [Текст] // Фундаментальные исследования. – 2012. – №11. – С.609 – 614

3. W.-S. Kim, L. G. Hector, R. B. Hetnarski. Thermoelastic stresses in a bonded layer due to repetitively pulsed laser radiation. [Text] // Acta Mechanica 125, 107-128 (1997). Springer-Verlag.

4. Малюков С.П., Куликова И.В., Саенко А.В., Рукавишникова А.С. Теоретическое исследование влияния толщины и структуры электрода TiO₂ на фотоэлектрические характеристики солнечного элемента. Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 1. – с. 247.

5. Куликова И.В., Шпак А.А. Методика расчета эквивалентных механических параметров мембран сложной топологии для элементов микросистемной техники. «Инженерный вестник Дона», 2013, № 2. – Режим

доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1648> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. Рус.

6. Лысенко И.Е. Модель равновесия подвижных элементов микромеханических зеркал с внутренними подвесами. [Текст] // «Инженерный вестник Дона», 2013, № 2 – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1604> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. Рус.

7. Мажукин В.И., Носое В.В., U. Semmler. Исследование тепловых и термоупругих полей в полупроводниках при импульсной обработке. [Текст] // Матем. моделирование, 12:2 (2000), 75–83.

8. B. S. Yilbas & N. Ageeli (2006) Thermal stress development due to laser step input pulse heating. [Text] // Journal of Thermal Stresses, 29:8, 721-751 To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/01495730600705349>

9. Баранова Д.А. Математическая модель деформирования подкрепленных оболочек вращения при учете различных свойств материала. [Текст] // «Инженерный вестник Дона», 2012, № 2 – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/745> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. Рус.

10. Рындин Е.А., Леньшин А.С. Методика численного моделирования спектрометрических газочувствительных сенсорных систем. [Текст] // «Инженерный вестник Дона», 2012, № 4, Ч. 2. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1360> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. Рус.

11. Онишкова А.М. Численное решение задачи для плоской области со свободной границей. [Текст] // «Инженерный вестник Дона», 2012, № 4, ч. 1 – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1205> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. Рус.

12. Малюков С.П., Куликова И.В., Бростилов С.А. Моделирование теплового воздействия лазерного излучения на биологические ткани. [Текст] // Фундаментальные исследования. Часть 2. – 2012. -№ 11. – С. 425-429.