

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ
И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК InSb ФОТОПРИЕМНИКА
В ПОЛЕ ИНТЕНСИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**EXPERIMENTAL STUDIES OF THE OPTICAL AND THERMOPHYSICAL
CHARACTERISTICS OF THE InSb PHOTODETECTOR IN THE FIELD
OF INTENSE LASER RADIATION**

М. В. Сахаров^{1}, В. Г. Средин¹, В. Ф. Чижко², С. Б. Суховей¹, Й. И. Астраускас¹, Д. С. Конради¹*

M. V. Sakharov¹, V. G. Sredin¹, V. F. Chishko², S. B. Suhovei¹, J. I. Astrauskas¹, D. S. Conradi¹

1 – Военная Академия РВСН им. Петра Великого, г. Балашиха Московской обл.

2 - АО «МЗ «САПФИР», г. Москва

Статья посвящена исследованию оптических и теплофизических характеристик InSb фотоприемника в поле интенсивного лазерного излучения среднего инфракрасного диапазона. Приведены результаты экспериментальных исследований взаимодействия импульсного лазерного излучения с монокристаллом InSb, а также с InSb с просветляющим покрытием из Si. Выявлены зависимости коэффициентов поглощения и отражения InSb от температуры для лазерного излучения длиной волны 2,94 мкм.

The article is devoted to the study of the physical characteristics of the InSb photomultiplier in the field of intense laser radiation from the middle infrared range. The results of experimental studies of the interaction of an intense laser radiation with an InSb single crystal and with InSb with antireflective coating from Si. Dependences of the absorption and reflection coefficients of InSb on the temperature for laser radiation of wavelength 2.94 μm are determined.

В настоящее время все большее развитие и применение получают интеллектуальные системы технического зрения (СТЗ), решающие информационные задачи обнаружения, классификации, идентификации и распознавания объектов. В основе построения СТЗ используются матричные фотоприемные устройства (МФПУ) «смотрящего» типа различных спектральных диапазонов. Для детектирования объектов в среднем инфракрасном (ИК) диапазоне оптического спектра (3–5 мкм) наиболее отработанными и эффективными для применения в СТЗ являются гибридные МФП на основе InSb.

Нормальному функционированию СТЗ, построенных на базе ИК МФПУ, могут мешать факторы различной физической природы, например, попадание в поле интенсивного лазерного излучения (ЛИ) [1]. Проблема заключается в том, что ЛИ, падающее на входную апертуру СТЗ, фокусируется в плоскости МФП, наиболее уязвимого

к такому воздействию. Результатом подобного облучения может явиться помеха, нарушающая получаемое изображение, а в более критических случаях – вызванное нагревом обратимое или необратимое нарушение чувствительности МФП, снижающее эффективность использования ОЭС [2].

В связи с этим задача, связанная с исследованием процессов функционирования InSb МФП в поле интенсивного ЛИ, представляется актуальной. При этом заметим, что проведение натурных испытаний на оптическую стойкость характеризуются существенными затратами в связи с высокой стоимостью образцов. Создание в этих условиях адекватной модели функционирования InSb МФП в поле интенсивного ЛИ позволит существенно снизить данные затраты.

Вопросам исследования влияния ЛИ на функционирование InSb МФП посвящен ряд работ авторов [1, 3], в которых приводятся результаты

экспериментальных исследований, позволяющие определять пороговые значения параметров ЛИ и выявлять отдельные закономерности реакции InSb МФП на попадание в поле интенсивного ЛИ. Установлено, что последствия облучения ЛИ фотоприемника существенно зависят от множества факторов: ширины запрещенной зоны, оптических и теплофизических характеристик используемых материалов, параметров ЛИ, процентного содержания примесей в фоточувствительном материале, наличия дефектов и др. При этом многие из перечисленных характеристик существенно зависят от температуры.

Проведенный анализ литературных источников показал, что, несмотря на достаточно хорошую изученность свойств InSb, имеются только отрывочные данные по температурным зависимостям оптических характеристик материалов, используемых в InSb МФП, для диапазона от комнатной температуры до температуры плавления. Это не позволяет создать тепловую модель функционирования InSb МФП в поле интенсивного ЛИ прогнозирования его поведения в условиях экстремальных температур.

Целью данной работы являлось проведение экспериментальных исследований для получения температурных зависимостей коэффициентов отражения и поглощения фоточувствительного ма-

териала InSb в условиях повышенных температур.

Для достижения цели исследования разработана схема экспериментальной установки, показанная на рис. 1. Она содержит юстировочный, силовой и измерительный каналы.

Юстировочный канал использовался для точного позиционирования исследуемого образца InSb в силовом канале и измерительных головок приборов ИМО-2Н в измерительных каналах. Для юстировки оптической части схемы экспериментальной установки оптическая ось силового твердотельного импульсного Er:YAG-лазера (2) совмещалась с оптической осью юстировочного газового He-Ne лазера ЛГН-209 (1). Юстировка каналов производилась путем совмещения пучка излучения ЛГН-209 с центром пятна Er:YAG-лазера на образце (5) – в силовом канале.

В состав силового канала входили: твердотельный импульсный Er:YAG-лазера (2), управление функционированием которого осуществляется с помощью блока питания ВЗИ-1 (16); ZnSe плоскопараллельная пластина (4) для отвода 23 % энергии излучения силового лазера в детектор измерителя энергии; нагреватель (6), питание которого осуществлялось блоком ТЕС 41 (9) для нагрева исследуемого образца до заданных температур; образец InSb (5) толщиной 400 мкм или пластина из InSb толщиной 5 мкм на кремниевой

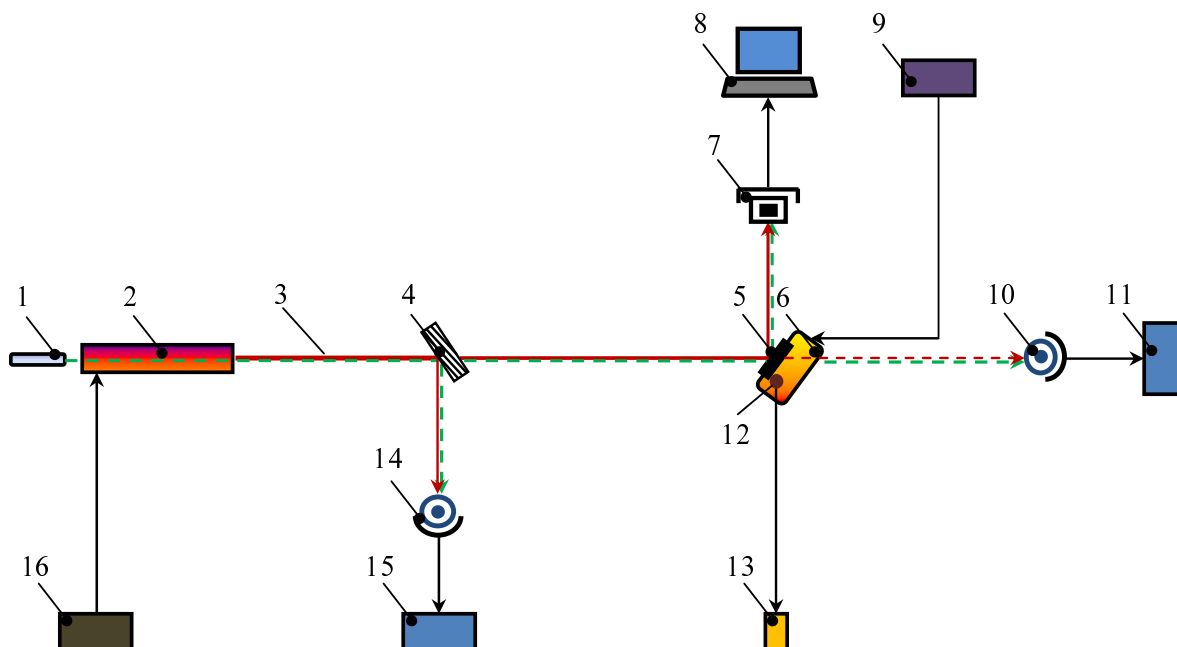


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – юстировочный газовый He-Ne лазер ЛГН-209; 2 – твердотельный Er:YAG-лазер; 3 – оптическая ось; 4 – ZnSe пластина; 5 – пластина InSb; 6 – нагреватель; 7 – измеритель энергии ОРНИР; 8 – ПЭВМ; 9 – блок питания нагревателя ТЕС 41; 10, 14 – измерительная головка ИМО-2Н; 11, 15 – измерительный прибор ИМО – 2Н; 12 – термопара; 13 – мультиметр МУ – 64; 16 – блок питания ВЗИ – 1

подложке толщиной 100 мкм, закрепленная на нагревателе (6); термопара (12), закрепленная на исследуемом образце для регистрации его температуры; измерительная головка ИМО-2Н (10), установленная за образцом.

Измерительный канал содержит: измерительную головку прибора ИМО-2Н (14) для измерения энергии импульса ЛИ, отведенного пластиной (4) из ZnSe; детектор измерителя энергии OPHIR (7) и ПЭВМ (8) со специальным программным обеспечением для измерения энергии отраженного от образца импульса ЛИ и отображения результата; измерительную головку прибора ИМО-2Н (10) для измерения энергии импульса лазерного излучения, прошедшего сквозь образец; термопару (12) и мультиметр МУ-64 (13) для регистрации температуры образца InSb (5).

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. Проводилась юстировка оптических каналов с помощью ЛГН-209 (1). На блоке питания ВЗИ-1 (16) Er:YAG-лазера (2) устанавливалось различное напряжение заряда конденсаторов от 1,3 до 1,5 кВ, подающееся при их разряде на лампу накачки. Это позволило лазеру генерировать импульсы с различной энергией и длительностью порядка микросекунд. Плоскопараллельной пластиной (4) из ZnSe 23 % энергии лазерного импульса отводилось в измерительную головку (14) прибора ИМО-2Н (15). Прошедшие 77 % энергии пучка ЛИ падали на исследуемый образец InSb, установленный таким образом, что отраженное от него ЛИ попадало на детектор измерителя энергии OPHIR (7), показания которого отображались на ПЭВМ (8). Образец антимонида индия был закреплен на нагревателе (6) и предварительно разогревался до требуемой температуры в диапазоне от 293 до 533 К для пластины InSb и от

288 до 548 К для пластины из InSb на Si подложке с шагом в 20 К. Нагреватель конструктивно выполнен на базе нихромовой нити, намотанной на слюду, его температура менялась с помощью блока питания ТЕС 41 (9) путем подачи соответствующего напряжения на нить. На образце была закреплена термопара (12) для регистрации его температуры с помощью мультиметра МУ-64 (13). За образцом на оптической оси размещалась измерительная головка (10) прибора ИМО-2Н (11) для измерения энергии импульса ЛИ, прошедшего сквозь образец.

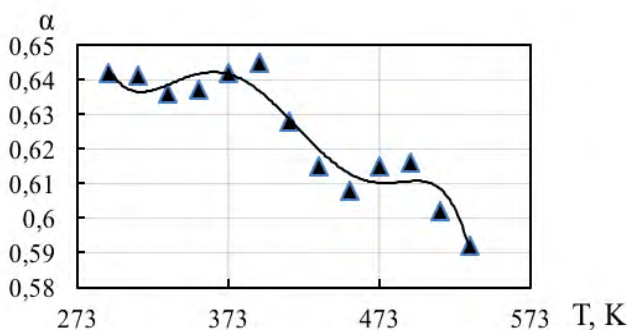
Генерация импульса ЛИ производилась в момент достижения образцом требуемой температуры. В проведенной серии экспериментов прохождения ЛИ через образец InSb зафиксировано не было.

На рис. 2 показаны графики температурных зависимостей коэффициента поглощения и коэффициента отражения ЛИ с длиной волны 2,94 мкм исследуемой пластины InSb, построенные по экспериментальным данным для образца, подвергнутого облучению в диапазоне температур от 293 до 533 К.

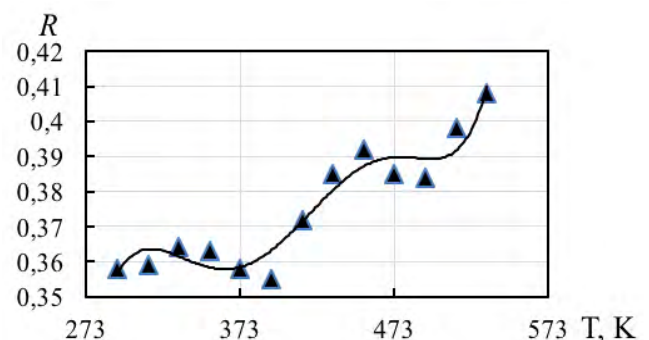
На рис. 2 треугольниками показаны экспериментальные точки, сплошной кривой – график полиномиальной аппроксимации шестого порядка, имеющей вид:

$$\alpha = -6 \cdot 10^{-15} \cdot T^6 + 10^{-11} \cdot T^5 - 9 \cdot 10^{-9} \cdot T^4 + 3 \cdot 10^{-6} T^3 - 0,0002 \cdot T^2 - 0,0527 \cdot T + 9,9435 \quad (1)$$

с коэффициентом корреляции $k = 0,93$, для коэффициента отражения



а



б

Рис. 2. Температурные зависимости оптических характеристик InSb: а – коэффициента поглощения, б – коэффициента отражения ЛИ с длиной волны 2,94 мкм и энергией импульса около 300 мДж

$$R = 6 \cdot 10^{-15} \cdot T^6 - 10^{-11} \cdot T^5 + 9 \cdot 10^{-9} \cdot T^4 - 3 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 + 0,0002 \cdot T^2 + 0,0527 \cdot T - 8,9435 \quad (2)$$

с коэффициентом корреляции $k = 0,93$.

На рис. 4–6 показаны графики, построенные по экспериментальным данным для образца из InSb на Si подложке в диапазоне температур от 288 до 558 К и графики регрессий этих данных для различных энергий ЛИ.

На рис. 3 треугольниками показаны экспериментальные точки, сплошной кривой – график полиномиальной аппроксимации шестого порядка, имеющей вид: для коэффициента поглощения

$$\alpha = 5 \cdot 10^{-15} \cdot T^6 - 10^{-11} \cdot T^5 + 10^{-8} \cdot T^4 - 9 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 + 0,0028 \cdot T^2 - 0,4806 \cdot T + 34,409 \quad (3)$$

с коэффициентом корреляции $k = 0,9077$, для коэффициента отражения

$$R = -5 \cdot 10^{-15} \cdot T^6 + 10^{-11} \cdot T^5 - 10^{-8} \cdot T^4 + 9 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 - 0,0028 \cdot T^2 + 0,4806 \cdot T - 33,409 \quad (4)$$

с коэффициентом корреляции $k = 0,9077$.

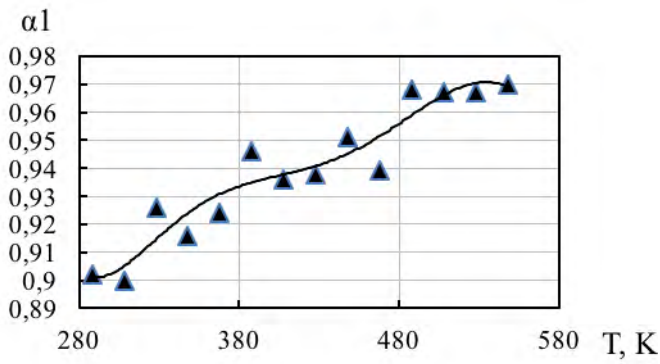
На рис. 4 сплошной кривой показан график полиномиальной аппроксимации шестого порядка, имеющей вид: для коэффициента поглощения

$$\alpha = 4 \cdot 10^{-14} \cdot T^6 - 9 \cdot 10^{-11} \cdot T^5 + 9 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 - 5 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 0,0143 \cdot T^2 - 2,1978 \cdot T + 138,02 \quad (5)$$

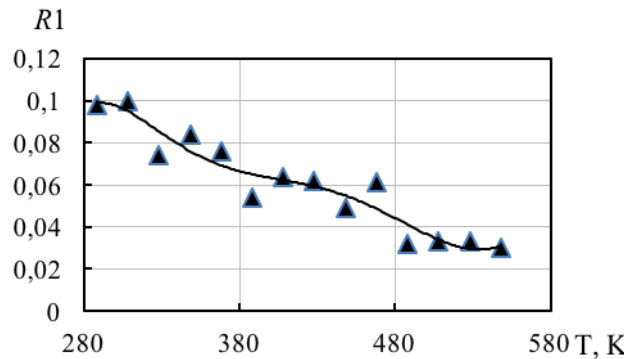
с коэффициентом корреляции $k = 0,9411$, для коэффициента отражения

$$R = -4 \cdot 10^{-14} \cdot T^6 + 9 \cdot 10^{-11} \cdot T^5 - 9 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 - 0,0143 \cdot T^2 + 2,1978 \cdot T + 137,02 \quad (6)$$

с коэффициентом корреляции $k = 0,9411$.

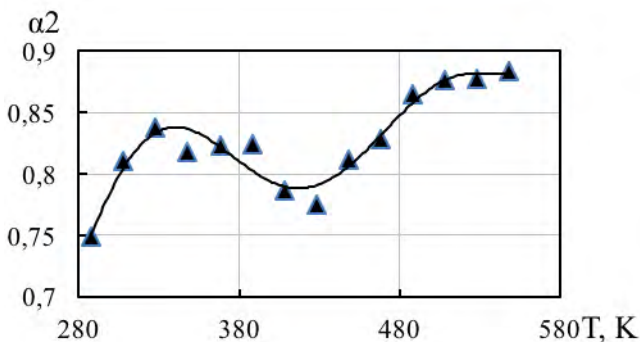


а

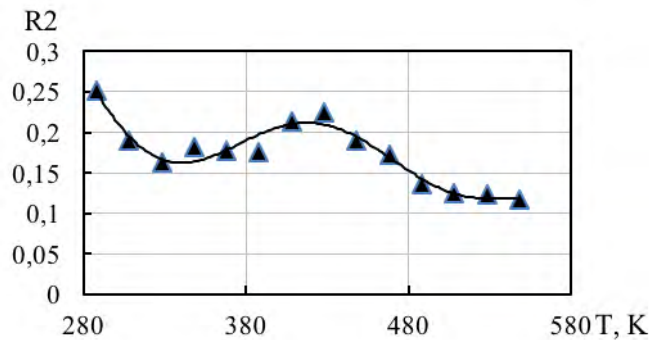


б

Рис. 3. Температурные зависимости оптических характеристик образца InSb на Si подложке: а – коэффициента поглощения, б – коэффициента отражения ЛИ с длиной волны 2,94 мкм и энергией импульса около 30 мДж



а



б

Рис. 4. Температурные зависимости оптических характеристик образца InSb на Si подложке: а – коэффициента поглощения, б – коэффициента отражения ЛИ с длиной волны 2,94 мкм и энергией импульса около 50 мДж

На рис. 5 сплошной кривой показан график полиномиальной аппроксимации шестого порядка, имеющей вид: для коэффициента поглощения

$$\alpha = -3 \cdot 10^{-14} \cdot T^6 + 7 \cdot 10^{-11} \cdot T^5 - 7 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 + 4 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 - 0,0114 \cdot T^2 + 1,8292 \cdot T - 120,9 \quad (7)$$

с коэффициентом корреляции $k = 0,9807$, для коэффициента отражения

$$R = 3 \cdot 10^{-14} \cdot T^6 - 7 \cdot 10^{-11} \cdot T^5 + 7 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 - 4 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 0,0114 \cdot T^2 - 1,8292 \cdot T + 121,9 \quad (8)$$

с коэффициентом корреляции $k = 0,9807$.

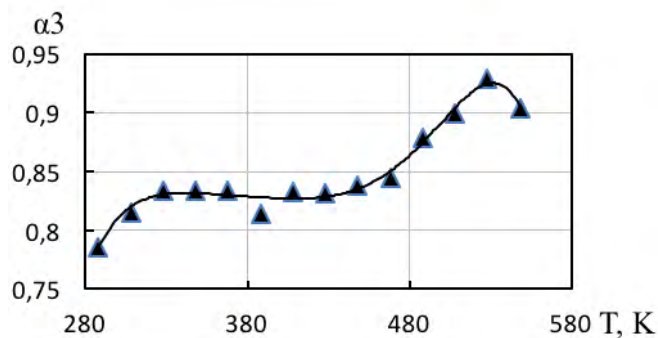
В результате нагрева исследуемых образцов, а также многократного облучения интенсивным ЛИ произошло изменение как их поверхностных

слоев, так и внутренних структур, о чем свидетельствуют представленные на рис. 6 снимки.

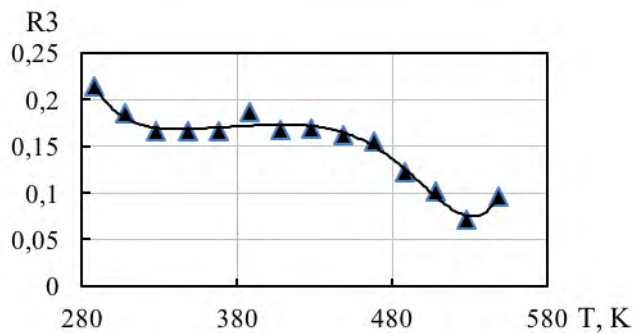
Анализ экспериментально полученных графиков температурных зависимостей оптических характеристик InSb позволил сформулировать следующие выводы.

1. Энергия квантов ЛИ, облучающего InSb, несущественно превышает ширину запрещенной зоны в диапазоне температур от 340 до 470 К. Вследствие этого увеличивается концентрация носителей за сравнительно малое время воздействия ЛИ, что приводит к насыщению межзонного поглощения и, возможно, полупроводник просветляется [6]. С повышением энергии излучения до определенного уровня эффект становится более заметен.

2. Наличие локальных экстремумов в графиках зависимости коэффициента поглощения от температуры свидетельствует о квантовом харак-



а

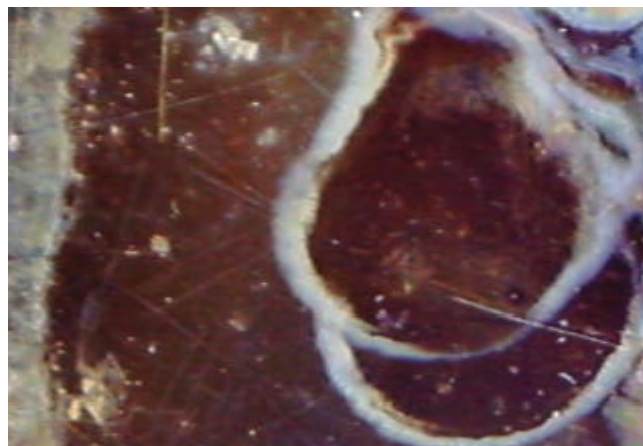


б

Рис. 5. Температурные зависимости оптических характеристик образца InSb на Si подложке: а – коэффициента поглощения, б – коэффициента отражения ЛИ с длиной волны 2,94 мкм и энергией импульса около 60 мДж



а



б

Рис. 6. Снимки поверхности исследуемых образцов: а – пластины InSb, б – пластины InSb на Si подложке после их нагрева и воздействия ЛИ с длиной волны 2,94 мкм

тере поглощения энергии, переносимой фотонами ЛИ [7]. То есть при повышении температуры в определенном диапазоне электронам внешних энергетических уровней передается энергия, достаточная для их отрыва – образования свободных носителей, которые и поглощают приходящее ЛИ. При дальнейшем повышении температуры в некотором диапазоне увеличения поглощения не происходит ввиду недостаточности энергии для отрыва электронов со следующих энергетических уровней. И далее процесс продолжается до начала плавления материала.

Полученные экспериментальные температурные зависимости оптических характеристик InSb могут быть использованы в тепловой модели InSb фотоприемника в поле интенсивного ЛИ с целью прогнозирования его поведения в условиях высоких температур. Направлением дальнейших исследований в данной области является получение (уточнение) температурных зависимостей оптических характеристик ЛИ с другими длинами волн для диапазона температур от криогенных до плавления, а также показателя поглощения ЛИ для использования в законе Бугера.

Список литературы

1. Сахаров М. В., Средин В. Г., Чишко В. Ф., Автин А. А. Оценка условий возникновения необратимых последствий воздействия импульсного ЛИ среднего ИК диапазона на InSb МФП / Труды НПО им. Лавочкина, 2016. № 4. С. 103–109.

2. Сахаров М. В., Астраускас Й. И. Оценка эффективности решения информационных задач оптико-электронной системой «смотрящего» типа с ИК МФПУ в поле ЛИ / Прикладная физика. 2014. № 1. С. 78–82.

3. Сахаров М. В., Средин В. Г., Чишко В. Ф., Астраускас Й. И. и др. Потеря чувствительности фотодиодами на основе InSb в поле импульсного ЛИ / В сб. VII Межд. конф. «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов». МИСИСС, 2017. С. 222.

4. Средин В. Г., Сахаров М. В. Математическая модель воздействия лазерного импульса на многослойную полупроводниковую фоточувствительную структуру // Прикладная физика, 2011. № 2. С. 5–11.

5. Илюшин М. А., Смирнова А. В., Сударилов А. М. и др. Взаимодействие лазерного излучения с твердыми материалами // Царскосельские чтения, 2010. С. 314–320.

6. Dabto N. B., Harimkar S. P. Laser Fabrication and Machining of Materials // Laser Materials Interactions, 2008. Ch. 2. Springer, P. 34–65.

7. Берченко Е. А., Захаров Н. С., Соболев А. П. Взаимодействие миллисекундных лазерных импульсов ближнего инфракрасного диапазона спектра с конденсированными средами / монография под ред. проф. Н. С. Захарова – Сергиев Посад: 12 ЦНИИ МО РФ, 2015. С. 280.

8. Поляков А. М. Разгаданный полупроводник. М.: Просвещение, 1981. С. 160.