

Определение пороговой плотности мощности воздействия лазерного излучения для InGaAs-фотодиодов

Кирилл Денисович Белик^{1,2}, Алексей Алексеевич Короннов¹,
Алексей Максимович Типтюх²

¹ Российский университет дружбы народов, Инженерная академия,
Базовая кафедра «Нанотехнологии и микросистемная техника»

² АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха»

E-mail: kirill.belik.science@mail.ru, koronnov_aa@pfur.ru, lesha.tiptyukh@mail.ru

Определено теоретическое значение плотности мощности лазерного излучения, превышение над которым приводит к разрушению поверхности чувствительной площадки In_{0,53}Ga_{0,47}As *p-i-n* фотодиода с обратной засветкой.

Ключевые слова: InGaAs *p-i-n* фотодиод, лазерный нагрев, обратная засветка.

DOI: 10.54965/1609-3143-2025-31-4-74-86

Введение

Одной из основных задач при проектировании систем импульсной лазерной дальнометрии является обеспечение устойчивой работы системы при наличии мощной обратной засветки, возникающей при лоцировании объектов с высоким коэффициентом отражения. При этом ограничение на максимально допустимый уровень детектируемой мощности формируется исходя из пороговой плотности мощности для фотодиодов, предназначенных для работы в составе систем лазерной локации.

В подавляющем большинстве дальномерных систем применяются лавинные или *p-i-n* фотодиоды на основе материалов Si, Ge, InGaAs, выбираемых в зависимости от требуемого энергетического потенциала системы и ее рабочей длины волны. На сегодняшний день хорошо изучены механизмы деградации лавинных фотодиодов [1, 10], и в меньшей степени – *p-i-n* фотодиодов, хотя в последние годы прослеживается тенденция к росту их применения в таких системах. В частности, одним из типов таких фотодиодов является In_{0,53}Ga_{0,47}As обратный *p-i-n* фотодиод, для которого в настоящей работе теоретически определено значение пороговой плотности мощности засветки на длине волны 1,535 мкм.

Постановка эксперимента

Рассматривая действие мощного излучения на полупроводниковую структуру, можно выделить два случая. В первом случае поверхность не разрушается и фотоэлектрические показатели *p-i-n* фотодиода практически не меняются. Во втором случае

при воздействии с более высокой интенсивностью поверхность разрушается и фотоэлектрические параметры в засвеченной зоне изменяются. Граница между первым и вторым случаем определяется уровнем интенсивности воздействия, превышение которого приводит к нагреву материала до температуры плавления. Теоретическое определение порогового уровня интенсивности было проведено на основании решения уравнения теплопроводности. Уравнение теплопроводности для случая лазерного нагрева материала запишется следующим образом [4, 5]:

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \frac{\lambda(T)}{\rho * c(T)} * \frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho * c(T)} * \frac{P(t)}{S} * (1 - R) * \alpha * \exp(-\alpha * z),$$

где ρ – плотность (кг/м³); c – удельная теплоемкость (Дж/(кг·К)); $\partial T/\partial t$ – скорость изменения температуры функционального слоя InGaAs во времени; λ – коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К)); $\nabla \cdot (\lambda * \nabla T)$ – дивергенция теплового потока; E – энергия воздействующих источников тепла на единицу объема (Вт/м³); $P(t)$ – мощность лазерного излучения от времени воздействия; S – площадь засветки; R – суммарный коэффициент отражения слоев, равный 0,11; α – коэффициент поглощения материала.

Суммарный коэффициент отражения слоев был рассчитан с использованием формулы Френеля по схеме прохождения излучения на функциональный слой, которая была приведена в прошлом разделе. Формула, используемая в расчетах представлена далее:

$$R = \frac{\left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 + \left(\frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3} \right)^2 + 2 * \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} * \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3} * \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda_{\text{изл}}} * n_2 * h \right)}{1 + \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} * \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3} \right)^2 + 2 * \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} * \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3} * \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda_{\text{изл}}} * n_2 * h \right)},$$

где $n_1 = 1,0003$ – показатель преломления воздуха; $n_2 = 1,4588$ – показатель преломления SiO₂; $n_3 = 3,2574$ – показатель преломления InP; $\lambda_{\text{изл}} = 1,535$ мкм; h – толщина диэлектрической пленки диоксида кремния, равная 0,18 мкм.

Температурные зависимости удельной теплоемкости c и коэффициента теплопроводности λ были получены на основании данных, представленных в [6, 7], и аппроксимированы выражениями:

$$c(T) = c_{p \text{ InAs}}(T) * 0,53 + c_{p \text{ GaAs}}(T) * 0,47;$$

$$\lambda(T) = 4,8 * \left(\frac{T}{300} \right)^{-1,17}.$$

Плотность $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ ρ принималась равной 5550 кг/м^3 [8]. R – коэффициент отражения поверхности, который был принят для расчета равным 0,11, что в реальном фотодиоде обеспечивается применением просветляющего покрытия SiO_2 толщиной 0,18 мкм. Коэффициент поглощения излучения α в InGaAs на длине волны 1,535 мкм определялся из графика [9] и составил $1,5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$.

Для расчета теоретического диаметра лазерного пучка в перетяжке установки был использован пакет программ Zemax (Zemax OpticStudio – Professional Perpetual – SUL, лицензия № L106806 от 28 июня 2019 года), позволяющий моделировать, анализировать и проектировать оптические системы.

Первым этапом построения оптической схемы была установка соответствующих исходных параметров, а именно, длины волны и полей. В соответствующем окне «Система-Длины волн» установлена длина волны равная 1,54 мкм.

Длины волн

Use	Длина волны (в микронах)	Weight	Use	Длина волны (в микронах)	Weight
<input checked="" type="checkbox"/>	1.54	1	<input type="checkbox"/>	13	0.55
<input type="checkbox"/>	0.55	1	<input type="checkbox"/>	14	0.55
<input type="checkbox"/>	0.55	1	<input type="checkbox"/>	15	0.55
<input type="checkbox"/>	0.55	1	<input type="checkbox"/>	16	0.55
<input type="checkbox"/>	0.55	1	<input type="checkbox"/>	17	0.55
<input type="checkbox"/>	0.55	1	<input type="checkbox"/>	18	0.55
<input type="checkbox"/>	0.55	1	<input type="checkbox"/>	19	0.55
<input type="checkbox"/>	0.55	1	<input type="checkbox"/>	20	0.55
<input type="checkbox"/>	0.55	1	<input type="checkbox"/>	21	0.55
<input type="checkbox"/>	0.55	1	<input type="checkbox"/>	22	0.55
<input type="checkbox"/>	0.55	1	<input type="checkbox"/>	23	0.55
<input type="checkbox"/>	0.55	1	<input type="checkbox"/>	24	0.55

Select-> F, d, C (видимая область) Главная длина волны: 1

Гaussova квадратура -> Шагов: 4

Мин. длина волны: 1.54 Макс. длина волны: 1.54

OK Отменить Упорядочить

Справка Записать Загрузить

Рисунок 1. Установка рабочей длины волны установки.

Во вкладке «Система-Поля» выставлено максимально допустимое отклонение излучения, попадающего в телескопическую систему от излучателя. Максимальное допустимое отклонение излучения составляет 1 градус.

Поля

Тип Angle (Deg) Object Height Paraxial Image Height Real Image Height

Нормирование поля: Радиальный

Use	X-поле	Y-поле	Weight	VDX	VDY	VCX	VCY	VAN
<input checked="" type="checkbox"/> 1	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/> 2	0	1	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input checked="" type="checkbox"/> 3	0	-1	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 4	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 5	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 6	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 7	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 8	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 9	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 10	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 11	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<input type="checkbox"/> 12	0	0	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Равноплощадные поля -> Количество полей: 3 Максимальное поле:

OK Отменить Упорядочить Справка

Козфф. виньетир. Убрать виньетир. Записать Загрузить

Рисунок 2. Установка максимального допустимого отклонения излучения.

Вторым этапом построения являлось проектирование всех оптических компонентов. Телескопическая система состояла из окуляра и объектива. Окуляр телескопа состоял из двух одинаковых линз, которые задались четырьмя поверхностями. Линзы телескопа выполнены из бесцветного оптического стекла К8.

На рисунке 3 представлена 2D модель окуляра.

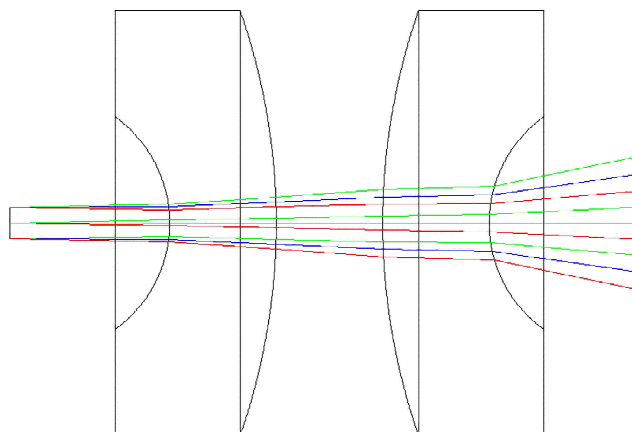


Рисунок 3. 2D модель окуляра.

На рисунке 4 представлена 3D модель окуляра в разрезе 1/2.

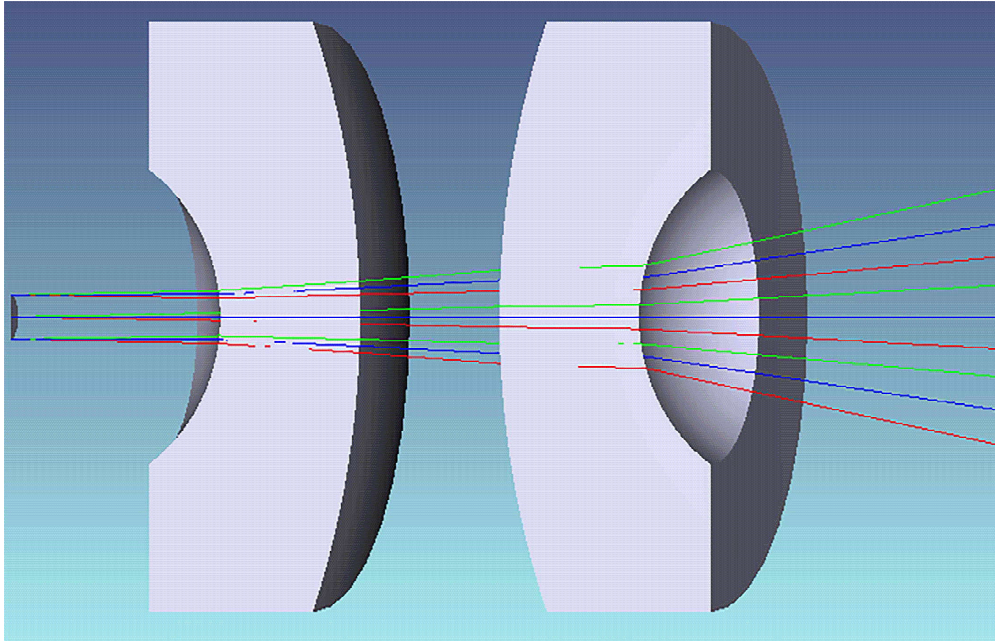


Рисунок 4. 3D модель окуляра в разрезе 1/2.

Объектив телескопической системы был задан следующими параметрами, представленными в таблице 1.

Таблица 1

Параметры объектива

Номер поверхности	Радиус	Толщина	Полудиаметр	Стекло
1	76,740	7,000	16,000	LZ_K8
2	-31,620	1,000	18,000	-
3	361,400	7,000	18,000	LZ_K8
4	-61,520	0	18,000	-

На рисунке 5 представлена 2D модель объектива.

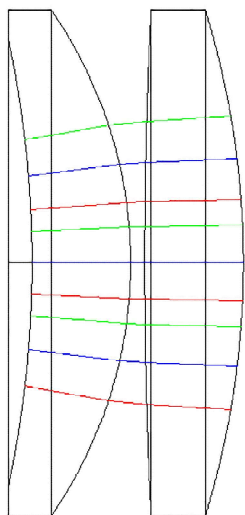


Рисунок 5. 2D модель объектива.

На рисунке 6 представлена 3D модель объектива в разрезе 1/2.

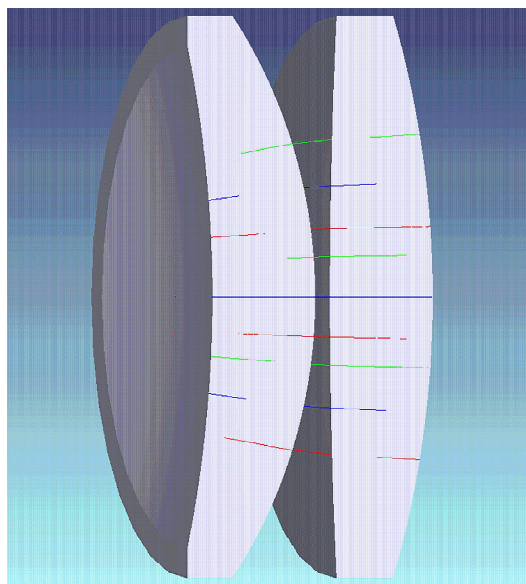


Рисунок 6. 3D модель объектива в разрезе 1/2.

Кассета для фильтров позволяла установить до 16 фильтров, однако для простоты проектирования в программе Zemax были использованы 4 фильтра. Это связано с тем, что лучи после телескопа идут практически параллельно оптической оси, а значит существенные отклонения лучей при прохождении через фильтры отсутствовали. Каждый из фильтров был задан следующими параметрами, представленными в таблице 2.

Таблица 2

Параметры фильтров

Номер поверхности	Радиус	Толщина	Полудиаметр	Стекло
1	Бесконечность	3,000	12,000	LZ_K8
2	Бесконечность	3,000	12,000	–

На рисунке 7 представлена 3D модель четырех фильтров.

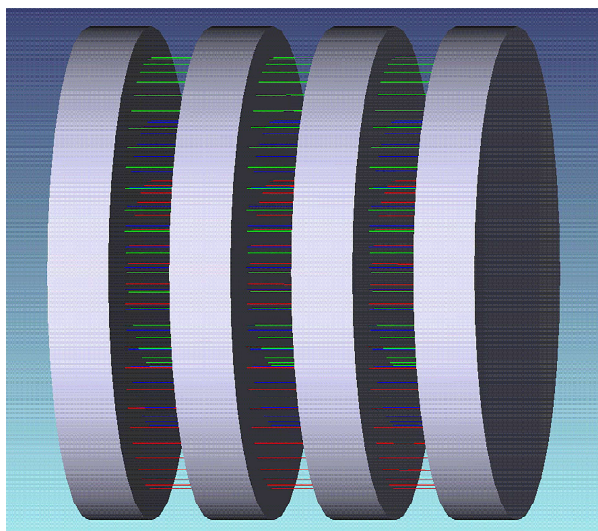


Рисунок 7. 3D модель фильтров.

Для фокусировки излучения лазера на поверхность исследуемого образца использовалась собирающая линза. Параметры собирающей линзы представлены в таблице 3.

Таблица 3

Параметры собирающей линзы

Номер поверхности	Радиус	Толщина	Полудиаметр	Стекло
1	Бесконечность	3,800	11,000	LZ_TK21
2	-50,580	77,900	11,000	–

На рисунке 8 представлена 3D модель собирающей линзы.

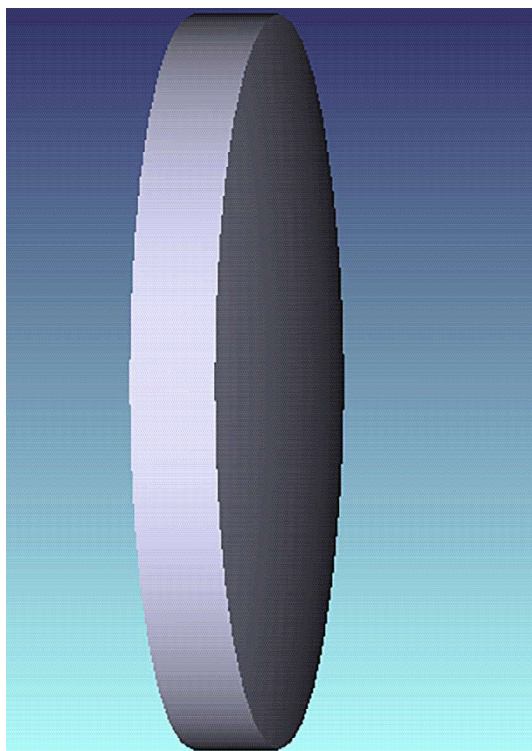


Рисунок 8. 3D модель собирающей линзы.

Итоговая схема системы представлена на рисунке 9.

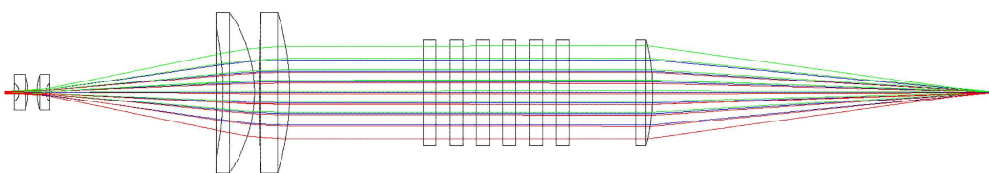


Рисунок 9. Итоговая схема системы.

Для определения теоретического диаметра лазерного пучка в перетяжке установки воспользовались диаграммой пятна рассеяния из вкладки «Анализ-Точечная диаграмма пятна рассеяния-Стандартная». На рисунке 10, видно, что геометрический радиус пятна в поле 1 составляет 53,748 мкм. Следовательно, диаметр лазерного пучка в перетяжке на уровне 0,15 равен 107,496 мкм.

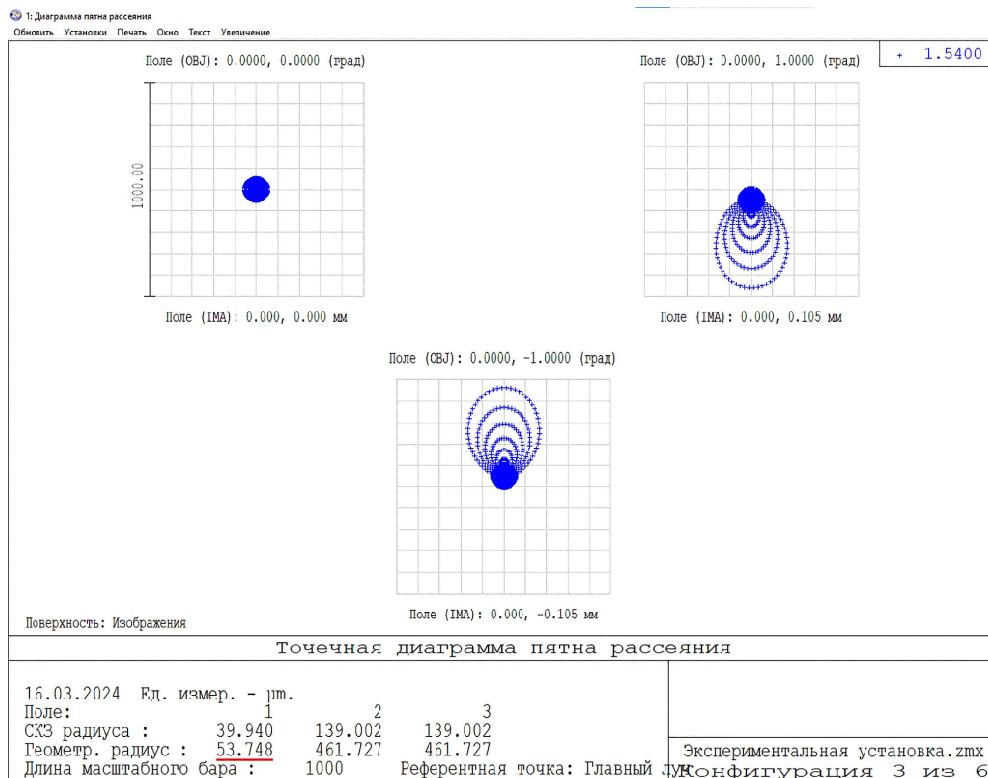


Рисунок 10. Диаграмма пятна рассеяния в плоскости изображения.

Таким образом, радиус пучка по уровню $1/e$ составил 39 мкм. Данное значение было использовано для решения уравнения теплопроводности.

Эксперименты и результаты

Решение уравнения теплопроводности искалось численным методом для случая отсутствия теплообмена кристалла с окружающей средой, что выражается граничными условиями:

$$\frac{\partial T(0,t)}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial T(\infty,t)}{\partial z} = 0.$$

Для определения плотности мощности использовалась следующая формула:

$$P_s = \frac{P}{\pi r^2},$$

где P – пиковая мощность, r – радиус пучка.

В результате было получено (см. рис. 11), что воздействие с плотностью мощности $18,21 \times 10^6$ Вт/см², обеспечиваемое колоколообразным оптическим импульсом длительностью 8,6 нс и пиковой мощностью $P = 1824$ Вт, приводит к нагреву поверхности чувствительной площадки *p-i-n* фотодиода до температуры 1373,19 К.

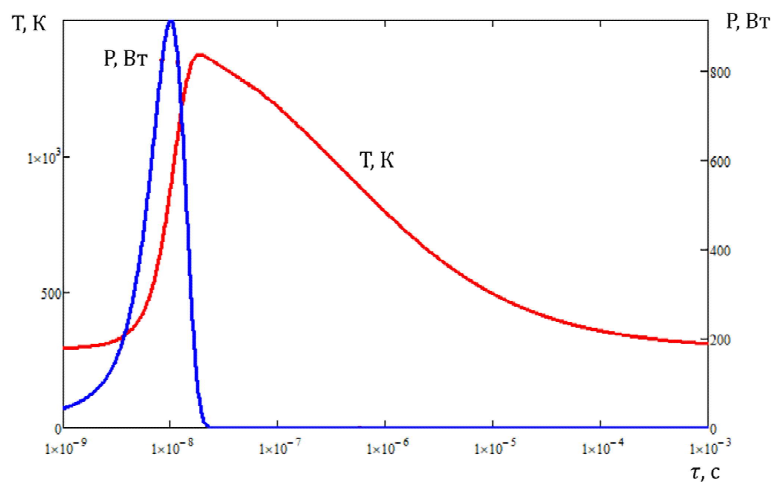


Рисунок 11. График зависимости температуры (слева) и мощности импульса (справа) от времени воздействия при 18,21 МВт/см².

На рисунке 12 приведен график зависимости максимальной температуры от длительности воздействия лазерным излучением по результатам расчётов:

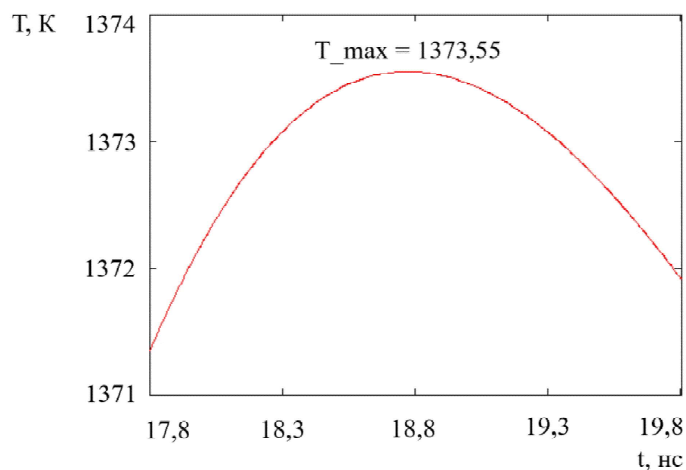


Рисунок 12. Максимальная температура на поверхности функционального слоя фотодиода.

Заключение

В результате было получено, что воздействие с плотностью мощности $18,21 \times 10^6$ Вт/см², обеспечиваемое колоколообразным оптическим импульсом длительностью 8,6 нс, радиусом пучка 39 мкм по уровню $1/e$ и пиковой мощностью $P = 1824$ Вт, приводит к нагреву поверхности чувствительной площадки $p-i-n$ фотодиода до температуры 1373,19 К. Начиная с этого значения плотности мощности, становится возможным процесс плавления $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$. Опираясь на результаты исследований деградации фотодиодов [1, 10], достижение материалом температуры плавления по окончании засветки приводит к рекристаллизации его активного слоя и росту неоднородностей в его объеме.

Стоит отметить, что исследованная в настоящей работе устойчивость $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ $p-i-n$ фотодиода к лазерной засветке напрямую связана с тем, что данный фотодиод работает в режиме обратной засветки. Проходя через подложку InP, лазерным импульсам требуется большее значение плотности мощности для разрушения функционального слоя в сравнении с фотодиодами с прямой засветкой. Это позволяет сделать вывод о преимуществах конструкции фотодиодов с обратной засветкой в области устойчивости к мощному лазерному излучению.

Литература

1. Короннов, А.А. Исследование характеристик германиевого лавинного фотодиода, подвергнутого мощному лазерному воздействию / А.А. Короннов, Г.М. Зверев, М.М. Землянов, Е.В. Жарикова, Д.В. Марсагишвили // Прикладная физика. – 2015. – № 4. – С. 54–58.
2. Короннов, А.А. Повышение стойкости фотоприемных устройств на базе германиевого лавинного фотодиода к воздействию мощного лазерного излучения / А.А. Короннов, А.Е. Сафутин, М.М. Землянов, Г.М. Зверев // Прикладная физика. – 2015. – № 6. – С. 65–69.
3. Короннов, А.А. Pin-фотодиод на основе InGaAs/InP для фотоприемных устройств систем импульсной лазерной дальнометрии / А.А. Короннов, Н.Ф. Салова, М.М. Землянов, А.В. Гринин, А.Е. Сафутин, Е.В. Кузнецов, М.А. Ладугин, М.Ю. Кузнецов, Н.Н. Брагин, А.В. Мамин // Квантовая электроника. – 2022. – № 52. – С. 1–5.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967.
5. Головань Л.А., Кашкаров П.К., Лакеенков В.М. и др. // Физика и техника полупроводников. – 1997. – Т. 31. – № 8. – С. 931.
6. Passler, R. Non-Debye heat capacity formula refined and applied to GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb / R. Passler // AIP ADVANCES. – 2013. – № 3. – P. 1–34.
7. Хорунжий, И.А. Тепловые процессы в мощном высокоскоростном InGaAs/InP $p-i-n$ -фотодиоде с балочными выводами / И.А. Хорунжий, Д.С. Доманевский, С.А. Малышев, А.Л. Чиж // Труды БГТУ. – 2013. – № 6. – С. 72–75.

8. Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе – справочная информация [Электронный ресурс] : база данных содержит сведения о физико-химических свойствах InGaAs – Электрон. дан. – СПб. – Режим доступа: <https://ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaInAs/thermal.html> – (Дата обращения 15.03.2025).
9. *Bacher, F.R.* Optical-absorption coefficient of $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}/\text{Inp}$ / F.R. Bacher, J.S. Blakemore, J.T. Ebner, J.R. Arthur // PHYSICAL REVIEW B. – 1988. – № 5. – P. 2551–2557.
10. *Chen L.*, Experimental Investigation of Millisecond-Pulse Laser Heating of Biased Si Avalanche Photodiodes in an External Circuit / L. Chen, Liu H., Jin G. // Russ Laser. – 2020. – № 41. – P. 384–389.

Determination of the Threshold Power Density of Laser Radiation for InGaAs Photodiodes

K.D. Belik^{1,2}, A.A. Koronnov¹,
A.M. Tiptiukh²

¹ RUDN University

² Joint Stock Company "Research Institute" Polyus" of M.F. Stelmakh

E-mail: kirill.belik.science@mail.ru,

koronnov_aa@pfur.ru, lesha.tiptyukh@mail.ru

Received November 12, 2025

PACS 42.62.-b, 85.60.Dw, 42.65.Re

The theoretical value of laser radiation power density, above which excess leads to the destruction of the surface of the sensitive site of the inverse $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ *p-i-n* photodiode, is determined.

Keywords: InGaAs *p-i-n* photodiode, laser heating, backlighting.

References

1. Koronnov A.A. Applied Physics. – 2015. – № 4. – Pp. 54–58 [in Russian].
2. Zverev G.M. Applied Physics, № 2, 79–83 (2015) [in Russian].
3. Koronnov A.A. Quantum Electronics. – 2025. – 52(1). – Pp. 106–112 [in Russian].
4. Lykov A.V. Vysshaya Shkola, 83–84 (1967) [in Russian].
5. Golovan' L.A. et al. Fizika i tekhnika poluprovodnikov. – 1997. – Vol. 31. – No. 8. – P. 931 [in Russian].
6. Passler, R. Non-Debye heat capacity formula refined and applied to GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb / R. Passler // AIP ADVANCES. – 2013. – № 3. – Pp. 1–34 [in Russian].
7. Khorunzhiy I.A. Proceedings of BSTU. – 2013. – № 6. – Pp. 72–75 [in Russian].
8. Ioffe Institute, Electronic resource, St. Petersburg, Access: <https://ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaInAs/thermal.html> – (Accessed 15.03.2025) [in Russian].
9. Bacher, F.R. Optical-absorption coefficient of $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}/\text{InP}$ / F.R. Bacher, J.S. Blakemore, J.T. Ebner, J.R. Arthur // PHYSICAL REVIEW B. – 1988. – № 5. – P. 2551–2557.
10. Chen L., Experimental Investigation of Millisecond-Pulse Laser Heating of Biased Si Avalanche Photodiodes in an External Circuit / L. Chen, Liu H., Jin G. // Russ Laser. – 2020. – № 41. – P. 384–389.