

УДК 621.315.592

ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ПОДЛОЖКИ ОХЛАЖДАЕМОГО ИНФРАКРАСНОГО МАТРИЧНОГО ФОТОПРИЕМНИКА НА НАГРЕВ ЕГО ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО СЛОЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ИНТЕНСИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

А. Э. Запонов, Д. С. Конради

(ВА РВСН им. Петра Великого, г. Балашиха Московской области)

В пакете программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования "Логос" разработаны и реализованы расчетные модели взаимодействия интенсивного лазерного излучения с матричными фотоприемниками на основе InSb и $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с подложками из Si, GaAs, Ge, InAs для определения их влияния на формирование и эволюцию возникающих при этом тепловых полей. Проанализированы и представлены в аналитическом виде температурные зависимости оптических и теплофизических характеристик исследуемых материалов. Показаны полученные результаты моделирования, проведены их анализ и обобщение.

Ключевые слова: матричные фотоприемники, лазерное излучение, компьютерное моделирование, материал подложки, пакет программ "Логос".

Введение

Моделированию взаимодействия интенсивного лазерного излучения (ЛИ) с охлаждаемыми инфракрасными матричными фотоприемниками (МФП) на основе полупроводниковых материалов антимонида индия (InSb) и твердых растворов кадмия-ртути-теллура ($\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, где x показывает долю Cd в растворе) посвящено множество работ [1–4]. Расчеты в них основаны на решении нестационарного трехмерного уравнения теплопроводности с определенными начальными и граничными условиями. Моделирование нагрева МФП при воздействии на него ЛИ осуществляется с помощью численных методов в конечно-элементной форме с использованием обеспечивающих требуемую детализацию расчетных сеток, что позволяет получить достаточно точные результаты. Однако в указанных работах рассмотрены случаи взаимодействия с ЛИ фоточувствительных слоев, размещенных на подложке из кремния, в то время как возможно использование других материалов, оптически прозрачных в требуемом диапазоне длин волн. Отличные от параметров кремния оптические и теплофизические характеристики способны существенно изменить температурное поле, формирующееся в МФП при воздействии на него ЛИ с теми же значениями энергии и длительности.

Анализ устройства и конструкции современных инфракрасных МФП позволил установить, что в качестве материалов подложек для приемников среднего и дальнего инфракрасного диапазона спектра, кроме кремния (Si), также используются арсенид галлия (GaAs), германий (Ge), арсенид индия (InAs) [5–7]. Применение конкретного (определенного) материала обусловлено его стоимостью, оптической прозрачностью в требуемом диапазоне спектра, возможностью образовывать прочное соединение с материалом фоточувствительного слоя и другими требованиями. Таким образом, целью данной работы является определение влияния материала подложки на формирование и эволюцию тепловых полей в МФП, возникающих в результате его взаимодействия с интенсивным ЛИ.

Исходя из цели сформулированы частные задачи исследования:

- 1) разработка расчетной модели взаимодействия интенсивного ЛИ с МФП на основе InSb и $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$;

- 2) определение зависимостей оптических и теплофизических характеристик исследуемых материалов от температуры для уточнения расчетной модели;
- 3) проведение расчетов с использованием разработанной модели и анализ полученных результатов.

Расчетная модель взаимодействия интенсивного ЛИ с МФП на основе InSb и $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

Расчетная модель разработана в пакете программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования "Логос" по ряду причин [8]:

- данное программное обеспечение — отечественного производства и сертифицировано для использования в государственных учреждениях Российской Федерации;
- графический интерфейс и возможность автоматического построения расчетной сетки позволяют упростить процесс моделирования;
- имеются возможности распараллеливания алгоритмов и использования высокопроизводительных и суперЭВМ для уменьшения времени расчетов.

В качестве объекта исследований выбраны многослойные МФП на основе InSb и $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, содержащие 64×64 чувствительных элемента (ЧЭ) размером $25 \text{ мкм} \times 25 \text{ мкм}$. ЧЭ сформированы на подложке толщиной 400 мкм при толщине фоточувствительных слоев 25 мкм , в качестве контактов ЧЭ с мультиплексором используются индиевые (In) столбы со стороной поперечного сечения (квадрата) 20 мкм и высотой 8 мкм . Трехмерная модель элемента МФП показана на рис. 1.

Для проведения расчетов приняты следующие граничные условия:

- верхняя (облучаемая ЛИ) поверхность подложки излучает в окружающую среду;
- через нижнюю поверхность In-столба происходит сток тепла в мультиплексор за счет теплопроводности, что моделируется граничными условиями третьего рода со значением коэффициента теплоотдачи, подобранным таким образом, что обеспечивается охлаждение МФП от 300 до 80 К за 5 мин [6];
- стенки боковых поверхностей ЧЭ теплоизолированы.

В качестве начальных условий принято равномерное распределение температуры в МФП: $T_0 = 80 \text{ К}$.

Для расчетов выбрана сетка с переменным пространственным шагом, где по толщине каждый ЧЭ разбивался в слое подложки на 10, а в фоточувствительных слоях и In-столбах — на 5 интервалов. В поперечном сечении все элементы МФП разбивались на 3 интервала в каждом координатном направлении.

В расчетах моделировалось воздействие на МФП сквозь подложку импульсным ЛИ с длиной волны $3,98 \text{ мкм}$ и равномерным распределением энергии в сечении пучка, полностью покрывающим один ЧЭ площадью $1,225 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$ в геометрическом центре МФП. Моделирование проводилось для моноимпульса ЛИ с энергией 2 мДж при длительности воздействия 400 мкс и форме импульса *строб.*

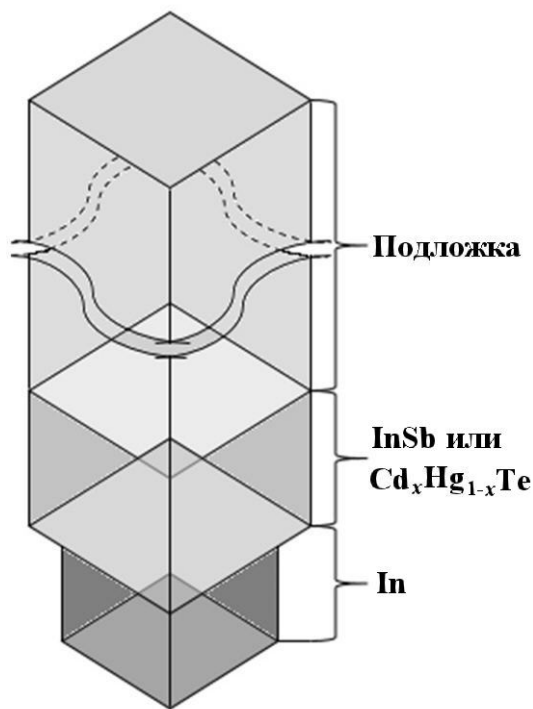


Рис. 1. Схематическое изображение объемной модели ЧЭ МФП

Зависимости оптических и теплофизических характеристик исследуемых материалов от температуры

Систематизированный набор результатов экспериментальных исследований физических характеристик полупроводниковых материалов содержится в тематической базе данных [9] в графическом виде. При помощи оцифровки графиков были получены значения характеристик, соответствующие экспериментальным с точностью до тысячных. По результатам оцифровки с помощью лицензионного пакета программ Mathcad для исследуемых материалов получены значения и выражения, наиболее точно описывающие зависимости их оптических и теплофизических характеристик от температуры (табл. 1–3).

Приведенные выражения соответствуют имеющимся экспериментальным данным для исследуемых материалов с коэффициентом корреляции не ниже 0,95 и использованы при уточнении математической модели с целью повышения точности получаемых результатов расчетов.

Таблица 1

Значения коэффициентов поглощения и плотности исследуемых материалов при температуре 300 К

Материал подложки	Коэффициент поглощения	Плотность, кг/м ³
GaAs	0,25	7 390
Ge	0,2	5 330
InAs	0,12	5 670
Si	0,2	2 330
InSb	0,72	5 777
Cd _x Hg _{1-x} Te	0,28	7 393

Таблица 2

Выражения, описывающие зависимости удельной теплоемкости исследуемых материалов от температуры

Материал подложки	Удельная теплоемкость, Дж/(кг · К)
GaAs	$10^{-7} T^5 - 32 \cdot 10^{-7} T^4 + 15 \cdot 10^{-4} T^3 - 0,23 T^2 + 53 T + 151,22 \cdot 10^3$
Ge	$7,99 \ln T - 177,7$
InAs	$67,2 \cdot 10 \ln T - 136,6$
Si	$10^{-7} T^4 + 42 \cdot 10^{-7} T^3 - 6,12 \cdot 10^{-3} T^2 + 3,9 T - 76,3$
InSb	$54,476 \ln T - 109,73$
Cd _x Hg _{1-x} Te	$0,058 T(x, t)^* + 149,76$

*Наличие параметров (x, t) подчеркивает в данном случае зависимость температуры не только от времени t , но и от концентрации x атомов кадмия.

Таблица 3

Выражения, описывающие зависимости коэффициента теплопроводности исследуемых материалов от температуры

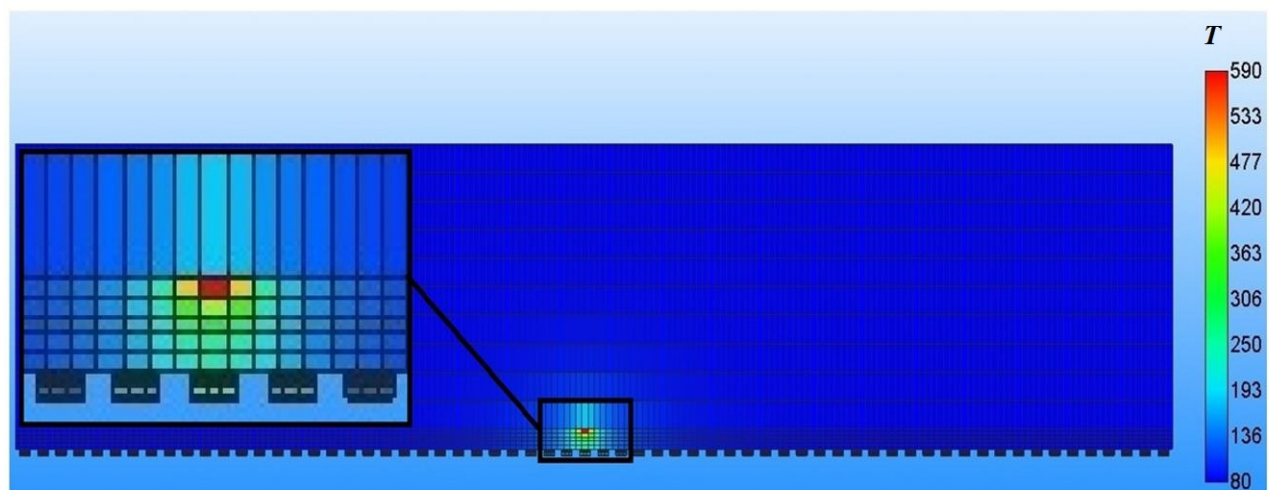
Материал подложки	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К)
GaAs	$15,4 \cdot 10^{-11} T^2 - 55 \cdot 10^{-15} T^3 - 12,3 \cdot 10^{-9} + 37 \cdot 10^{-6}$
Ge	$78,1 \cdot 10^{-5} T^{-1,25}$
InAs	$77 706,4 \cdot T^{-1,38}$
Si	$96,7 \cdot 10^{-4} T^{-1,49}$
InSb	$635,28 T^{-1,42}$
Cd _x Hg _{1-x} Te	$7 \cdot 10^{-5} T^2 - 0,0872 T + 33,859$

Результаты расчетов и их анализ

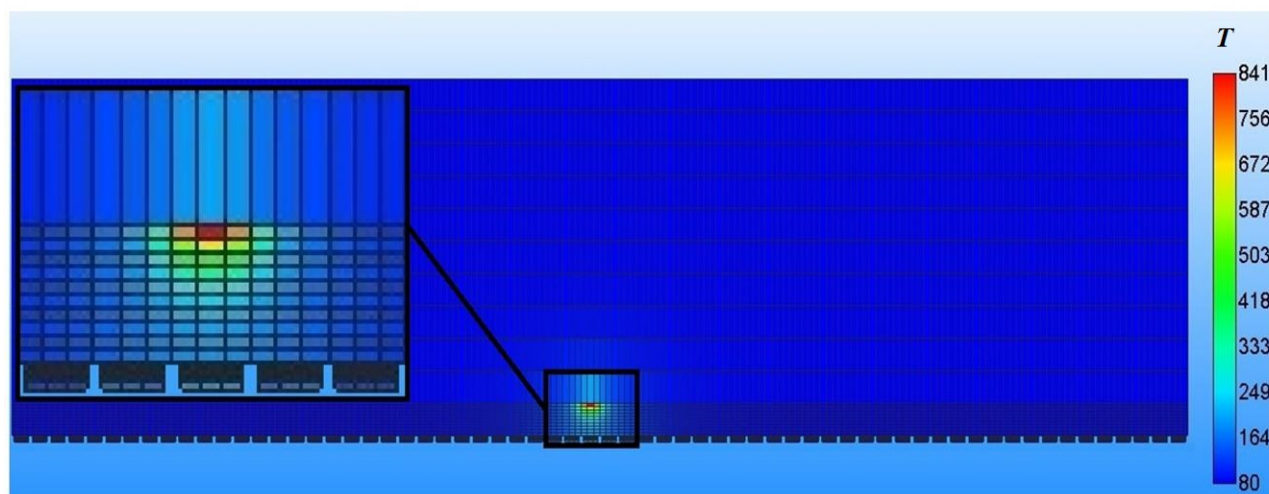
В результате проведения расчетов с использованием пакета программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования "Логос" получены графические представления тепловых полей, сформировавшихся в МФП в результате воздействия ЛИ. Примеры для кремниевой подложки показаны на рис. 2, 3. Также получены зависимости температуры для полупроводниковых материалов исследуемых МФП на основе InSb и $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (рис. 4–6).

В результате анализа зависимостей, показанных на рис. 4–6, установлено следующее:

- зависимость температуры фоточувствительного слоя от времени воздействия ЛИ (времени нагрева) описывается логарифмической функцией;
- при одинаковых уровнях воздействия МФП на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ получает больший нагрев, что обусловлено большим значением коэффициента теплопроводности тройного соединения и меньшим значением теплоемкости;
- материал подложки вносит существенный вклад в нагрев фоточувствительного слоя при воздействии ЛИ, что в большей степени обусловлено удельной теплоемкостью этого материала;

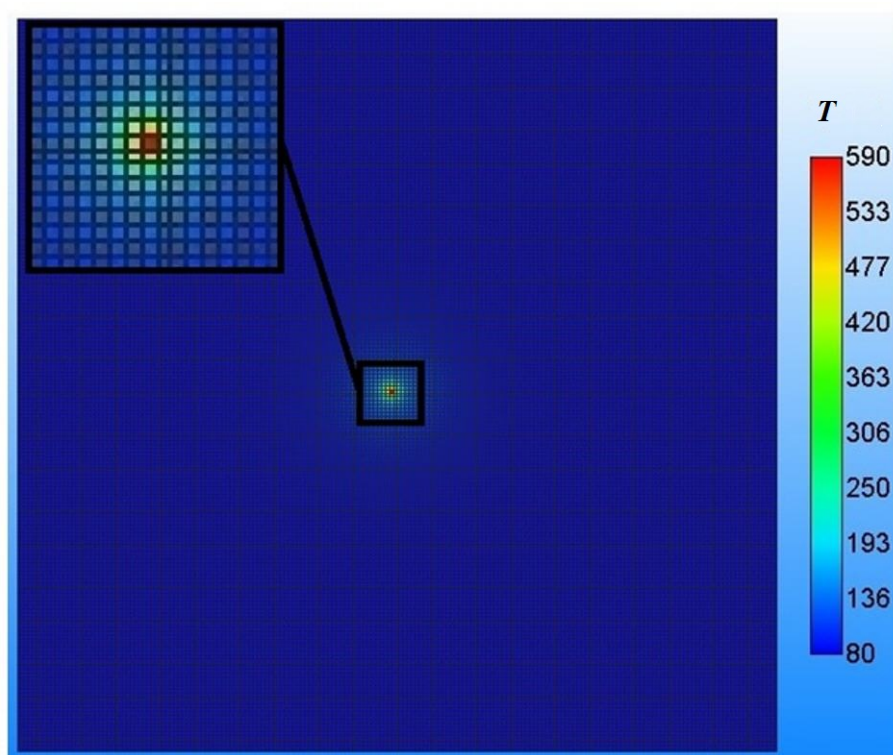


a

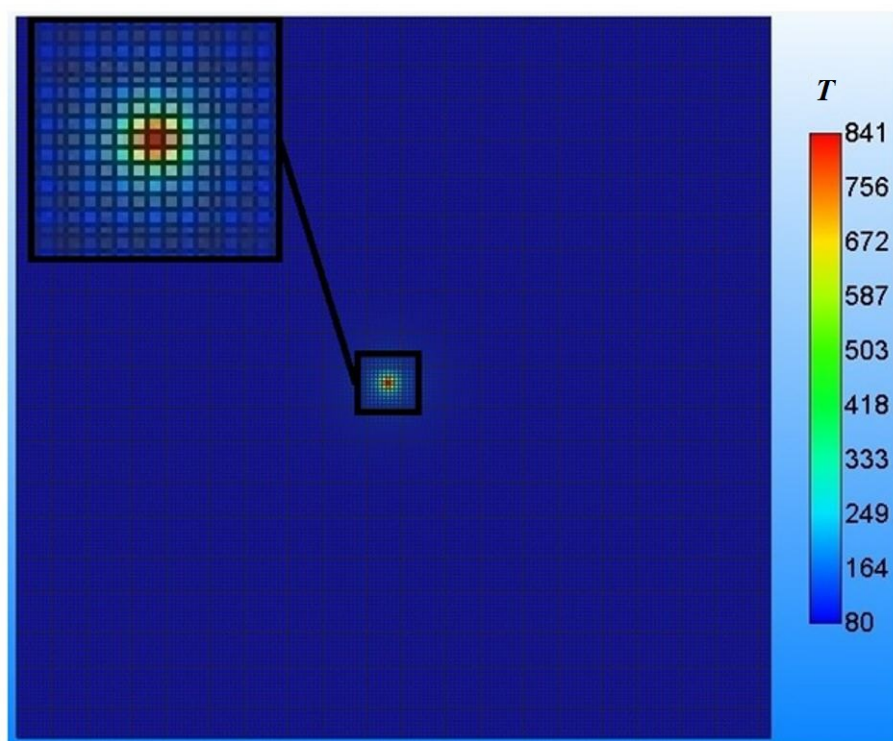


б

Рис. 2. Термограмма результата взаимодействия интенсивного ЛИ с МФП на основе InSb (*a*) и $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (*б*). Вид сбоку



a



б

Рис. 3. Термограмма результата взаимодействия интенсивного ЛИ с МФП на основе InSb (*a*) и $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (*б*). Вид сверху

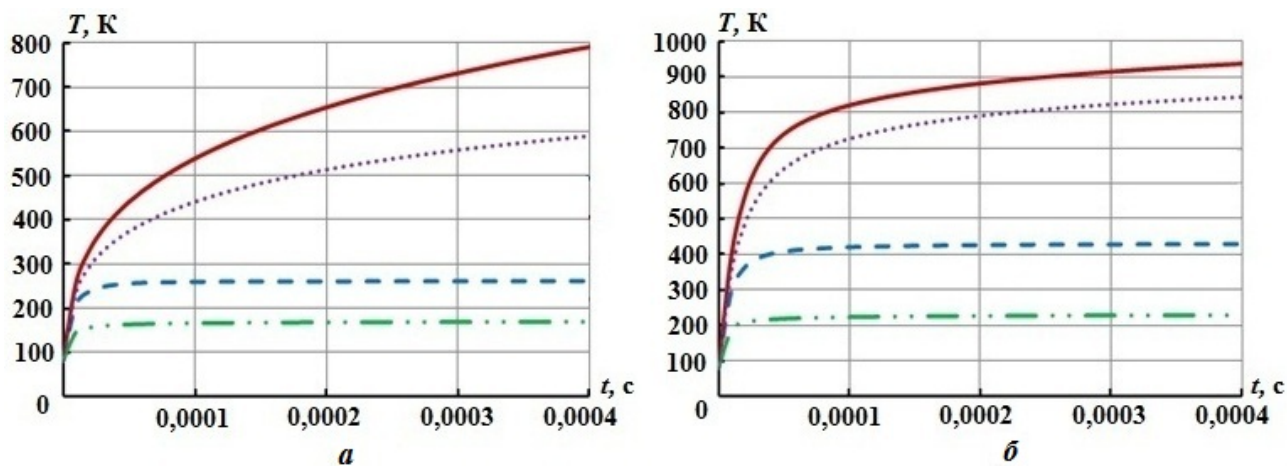


Рис. 4. Зависимости температуры нагреваемого ЧЭ от времени воздействия ЛИ для МФП на основе InSb (a) и $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (б): — — GaAs; — — Ge; — · — InAs; ····· — Si

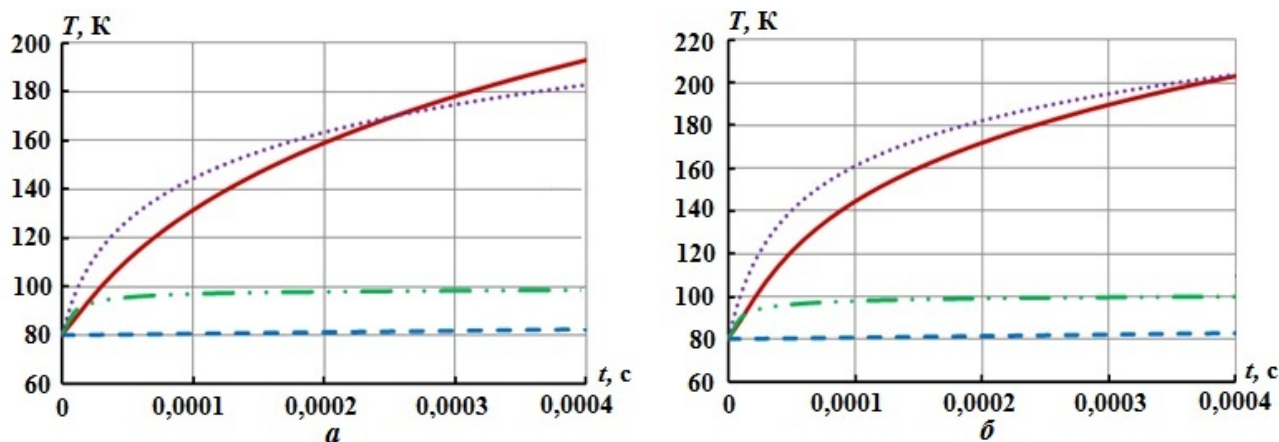


Рис. 5. Зависимости температуры подложки непосредственно над нагреваемым ЧЭ от времени воздействия ЛИ для МФП на основе InSb (a) и $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (б): — — GaAs; — — Ge; — · — InAs; ····· — Si

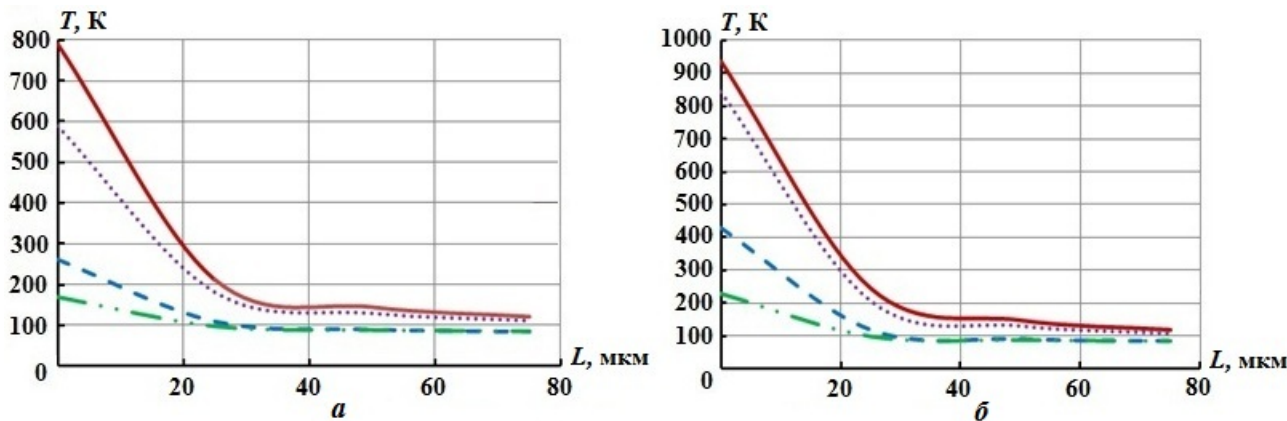


Рис. 6. Зависимости температуры фоточувствительного материала от расстояния до места воздействия ЛИ на МФП на основе InSb (a) и $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (б): — — GaAs; — — Ge; — · — InAs; ····· — Si

- характер зависимости нагрева фоточувствительного слоя от времени воздействия для различных подложек не зависит от материала, на основе которого изготовлен МФП;
- тепловая волна от места воздействия ЛИ на МФП быстрее распространяется по фоточувствительному слою на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ независимо от материала подложки, что объясняется большим значением коэффициента теплопроводности по сравнению с InSb .

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что основной вклад в процесс нагрева фоточувствительного слоя МФП в процессе его взаимодействия с интенсивным ЛИ определяется значениями теплофизических характеристик материала подложки.

С помощью разработанных в ходе настоящих исследований расчетных моделей возможна оценка оптической стойкости InSb и $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ МФП, а также обоснование целесообразности использования конкретных материалов в качестве подложек исходя из условий их применения. Возможности пакета программ "Логос" позволяют разработать другие аналогичные модели фотоприемников на основе перспективных полупроводниковых материалов с любой топологией для исследования процессов их функционирования в различных условиях взаимодействия с интенсивным ЛИ.

Направлением дальнейших исследований является моделирование взаимодействия интенсивного ЛИ с многодиапазонными МФП на квантовых ямах с целью определения влияния особенностей топологии матрицы на растекание тепла.

Список литературы

1. *Средин В. Г., Сахаров М. В.* Математическая модель воздействия лазерного излучения на многослойную полупроводниковую фоточувствительную структуру // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 5–11.
Sredin V. G., Sakharov M. V. Matematicheskaya model vozdeystviya lazernogo izlucheniya na mnogosloynnuyu poluprovodnikovuyu fotochuvstvitelnyuyu strukturu // Prikladnaya fizika. 2011. № 2. S. 5–11.
2. *Сахаров М. В., Средин В. Г., Астраускас Й. И., Васильева Ю. В.* Трехмерная математическая модель воздействия лазерного излучения на матричный фотоприемник на основе $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ // Известия вузов. Физика. Томский ГУ. 2013. Т. 56, № 9–2. С. 98–101.
Sakharov M. V., Sredin V. G., Astrauskas Y. I., Vasilyeva Yu. V. Tryekhmernaya matematicheskaya model vozdeystviya lazernogo izlucheniya na matrichnyy fotopriyemnik na osnove $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ // Izvestiya vuzov. Fizika. Tomskiy GU. 2013. T. 56, № 9–2. S. 98–101.
3. *Сахаров М. В., Средин В. Г., Конради Д. С.* Трехмерная модель нагрева многослойного матричного фотоприемника в поле интенсивного лазерного излучения // Прикладная физика. 2018. № 6. С. 43–48.
Sakharov M. V., Sredin V. G., Konradi D. S. Tryekhmernaya model nagreva mnogosloynnogo matrichnogo fotopriyemnika v pole intensivnogo lazernogo izlucheniya // Prikladnaya fizika. 2018. № 6. S. 43–48.
4. *Сахаров М. В., Средин В. Г., Запонов А. Э., Конради Д. С.* Имитационное моделирование воздействия лазерного излучения на InSb матричный фотоприемник в пакете программ ЛОГОС // Известия вузов. Физика. Томский ГУ. 2019. Т. 62, № 9. С. 117–122.
Sakharov M. V., Sredin V. G., Zaponov A. E., Konradi D. S. Imitatsionnoe modelirovanie vozdeystviya lazernogo izlucheniya na InSb matrichnyy fotopriyemnik v pakete programm LOGOS // Izvestiya vuzov. Fizika. Tomskiy GU. 2019. T. 62, № 9. S. 117–122.
5. *Пономаренко В. П.* Квантовая фотосенсорика. М.: АО "НПО "Орион", 2018.
Ponomarenko V. P. Kvantovaya fotosensorika. M.: AO "NPO "Orion", 2018.
6. *ФГБУН "Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова".* <https://www.isp.nsc.ru>.
FGBUN "Institut fiziki poluprovodnikov im. A. V. Rzhanova". <https://www.isp.nsc.ru>.

7. *Тарасов В. В., Якушенко Ю. Г.* Инфракрасные системы "смотрящего типа". М.: Логос, 2004.
Tarasov V. V., Yakushenko Yu. G. Infrakrasnye sistemy "smotryashchego tipa". М.: Logos, 2004.
8. Пакет программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования "Логос".
<http://logos.vniief.ru>.
Paket programm inzhenerenogo analiza i superkompyuternogo modelirovaniya "Logos".
<http://logos.vniief.ru>.
9. Тематическая база данных перспективных полупроводниковых материалов. <http://ioffe.ru>.
Tematicheskaya baza dannykh perspektivnykh poluprovodnikovyykh materialov. <http://ioffe.ru>.

Статья поступила в редакцию 25.06.2021.
