

Тепловое сопротивление светодиодов на основе узкозонного твердого раствора InAsSb

© А.Л. Закгейм¹, А.А. Климов², Т.С. Лухмырина², Б.А. Матвеев², А.Е. Черняков¹

¹ НТЦ микроэлектроники РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

e-mail: Chernyakov.anton@ya.ru

Поступила в редакцию 19.05.2023 г.

В окончательной редакции 25.09.2023 г.

Принята к публикации 30.10.2023 г.

Экспериментально исследовано тепловое сопротивление светодиодов среднего инфракрасного диапазона спектра на основе гетероструктур $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAsSb}$ „флип-чип“-конструкции. Показано, что для светодиодов на основе узкозонных полупроводников измерение теплового сопротивления с использованием температурночувствительного параметра прямого напряжения на $p\text{-}n$ -переходе необходимо проводить при пониженных температурах для обеспечения постоянства температурного коэффициента напряжения.

Ключевые слова: средний ИК диапазон, ИК светодиоды, тепловое сопротивление, температурный коэффициент прямого напряжения.

DOI: 10.61011/OS.2023.11.57012.5201-23

Светодиоды (СД) среднего инфракрасного (ИК) диапазона излучения ($3\text{--}6\ \mu\text{m}$) нашли применение в ряде оптических сенсоров, например, для анализа состава газовых смесей [1,2]. Внутренний квантовый выход таких СД обычно не превышает 10% [3], что в условиях больших токов накачки позволяет пренебречь „оптическим охлаждением“ и считать, что вся подводимая электрическая энергия преобразуется в тепло. Для многоэлементных структур, например, таких как монолитные светодиодные матрицы или микрооптопары, протекание прямого тока в одном из их элементов вызывает в соседнем с ним элементе повышение температуры и соответственно снижение эффективности его работы [4,5]. Поэтому при разработке излучающего кристалла СД контроль теплового сопротивления $p\text{-}n$ -переход/теплоотвод является актуальной задачей как для одиночных, так и для многоэлементных устройств.

В настоящей работе методом, базирующимся на измерении переходных температурночувствительных характеристик, экспериментально исследовано тепловое сопротивление излучающего кристалла „флип-чип“-конструкции на основе гетероструктуры $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAsSb}$.

Объект исследования

Излучающий кристалл СД ($\lambda = 4.7\ \mu\text{m}$) в виде диодной тройки был изготовлен на основе гетероструктуры $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAs}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}$, выращенной на нелегированной подложке $n\text{-InAs}$, и был аналогичен описанному ранее в [6]. Кристалл размером $0.4\text{--}0.55\ \text{mm}$ содержал три круглые мезы диаметром $\varnothing_{\text{mesa}} = 190\ \mu\text{m}$ и высотой

$20\ \mu\text{m}$ с металлическими анодами ($\varnothing_A = 170\ \mu\text{m}$) на их вершинах и металлические подковообразные катоды, размещенные сбоку от мез на подложке InAs. Методом „флип-чип“ излучающий кристалл монтировался на теплопроводящую плату-носитель из AlN. Расположение слоев, общая конструкция излучающего кристалла и схема монтажа на коммутационную плату-носитель, монтируемую в корпус и на теплоотвод, показаны на рис. 1.

Известными преимуществами приведенной „флип-чип“-конструкции СД с оптической точки зрения является отсутствие затеняющих контактов, а с тепловой — расположение $p\text{-}n$ -перехода и контактных площадок в непосредственной близости от теплоотводящей коммутационной платы-носителя (основания прибора), выпол-

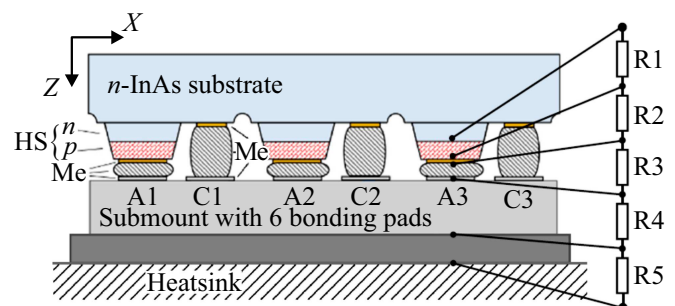


Рис. 1. Схема продольного сечения диодной тройки, смонтированной на монтажной плате, и схема тепловой цепи, где HS — гетероструктура, Me — металлы (контакты и припой), $n\text{-InAs substrate}$ — подложка, A_i — аноды, C_i — катоды, Al case — Al корпус, Heatsink — теплоотвод, R_i — тепловые сопротивления слоев.

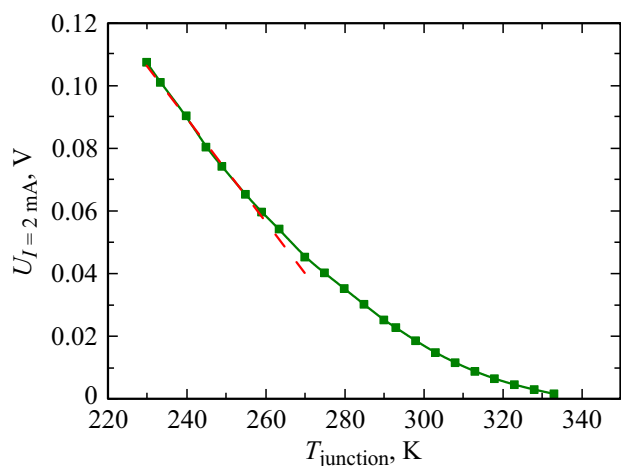


Рис. 2. Зависимость прямого напряжения на СД от температуры $p-n$ -перехода при $I = 2 \text{ mA}$. Линейный участок зависимости наблюдается в диапазоне 230–265 К.

ненного из керамики (AlN) с высокой теплопроводностью. Тепловое сопротивление отдельных элементов образца определялось по термоэлектрической аналогии [7]. Схематичное изображение пути теплообмена при подключении одного из трех элементов образца (правая меза на рис. 1) в виде цепи последовательных сопротивлений от $p-n$ -перехода к теплоотводу показано на рис. 1.

Тепловое сопротивление R_{th} исследовалось методом, базирующимся на измерении переходных температурно-чувствительных характеристик (прямого напряжения на $p-n$ -переходе) в ответ на скачкообразное воздействие греющего токового импульса с использованием прибора Thermal Transient Tester T3Ster [8], реализующего измерения по международной методике JEDECJESD 51-14. В нашем случае в качестве температурночувствительного параметра использовалось прямое напряжение на СД при пропускании через него малого измерительного тока, величина которого исключала саморазогрев. Значение измерительного тока было выбрано 2 мА, разогревающий импульс тока, в свою очередь — 100 мА.

Для измерения теплового сопротивления прибором T3Ster необходимо произвести предварительную калибровку и задать температурный коэффициент прямого напряжения (TCU) при измерительном токе (2 мА), который должен быть постоянным. То есть предполагается, что температурная зависимость напряжения $U_f = f(T)$ не является таковой. Это связано с тем, что поведение U_f определяется совокупностью процессов в структуре (изменением ширины запрещенной зоны, генерацией носителей фоновым излучением, статистикой носителей в полупроводнике). В то же время можно выделить диапазон температур $T_{p-n} = 230\text{--}265 \text{ K}$, в котором зависимость $U_f = f(T)$ близка к линейной

(рис. 2). Температура теплоотвода задавалась с помощью криостата замкнутого цикла с оптическим окном „CCS-450 Standard Optical Closed-cycle Refrigerator Systems“. При этих температурах значение TCU постоянно и равно -1.65 mV/K . При заданной температуре теплоотвода $T_{\text{heatsink}} = 250 \text{ K}$ был получен спектр тепловых сопротивлений эквивалентной тепловой цепи и оценено общее тепловое сопротивление, которое составило $R_{\text{th}} \approx 250 \text{ K/W}$.

Программное обеспечение прибора T3Ster позволяет получить кумулятивную и дифференциальную структурные функции [9], наглядно отражающие тепловой импеданс (теплоемкость и тепловое сопротивление) звеньев тепловой цепи, т. е. отдельных слоев структуры СД.

На рис. 3 представлена экспериментальная дифференциальная структурная кривая, отражающая тепловые сопротивления основных звеньев тепловой цепи СД, показанной на рис. 1. Каждый пик дифференциальной структурной кривой соответствует границе раздела слоев конструкции СД. Из анализа кривой были получены значения тепловых сопротивлений: R_1 — от $p-n$ -перехода до нижней плоскости кристалла, R_2 — для контакта (анода), R_3 — для монтажного слоя от кристалла до платы-носителя, R_4 — для керамической (AlN) платы-носителя, R_5 — для корпуса из Al.

Как следует из рис. 3, в значение теплового сопротивления от $p-n$ -перехода до Al корпуса ($\sim 180 \text{ K/W}$) основной вклад вносит контактный слой металл-полупроводник ($R_2 = 45 \text{ K/W}$) и слой припоя/металлизации платы-носителя ($R_3 = 40 \text{ K/W}$). Исходя из значения $R_{\text{th}} \sim 250 \text{ K/W}$, можно заключить, что перегрев $p-n$ -перехода относительно теплоотвода при $I = 100 \text{ mA}$ ($U = 0.36 \text{ V}$) лежит в пределах $\sim 9 \text{ K}$. Во время измерения реальная температура $p-n$ -перехода не превышала 260 К, следовательно, TCU был постоянным.

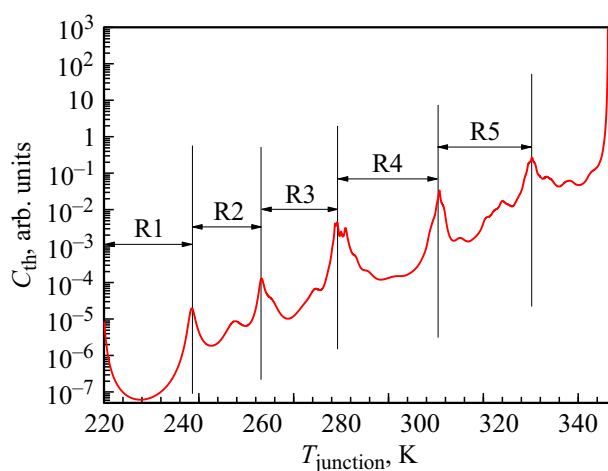


Рис. 3. Дифференциальная структурная функция, полученная с использованием прибора T3Ster. Пики соответствуют элементам тепловой цепи.

Заключение

Внутренний квантовый выход СД среднего ИК диапазона критически зависит от температуры, что требует учета и контроля саморазогрева, который связан с выделением тепла СД и зависит от его теплового сопротивления. Общепринятый метод измерения теплового сопротивления СД использует температурночувствительный параметр — прямое напряжение на $p-n$ переходе, а именно, его температурный коэффициент TCU. Для СД видимого диапазона TCU постоянен в широком диапазоне температур, включая комнатную и выше, и определяется при предварительной калибровке. Для СД среднего ИК диапазона ($\lambda \sim 4.7 \mu\text{m}$) значение TCU утрачивает свое постоянство. Для обеспечения возможности определения теплового сопротивления СД среднего ИК-диапазона нами было предложено проводить калибровочные измерения TCU и последующие измерения R_{th} при пониженных температурах. В результате для СД на основе $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAs}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}$ были получены значения $\text{TCU} = -1.65 \text{ mV/K}$, а $R_{\text{th}} \approx 250 \text{ K/W}$, которые будут использованы в дальнейшем для анализа тепловых процессов и разработки усовершенствованных СД среднего ИК диапазона.

Благодарности

Исследования параметров светодиодов выполнены в ЦКП „Элементная база радиофотоники и наноэлектроники: технология, диагностика, метрология“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А. Загнитько, И. Мацуков, В. Пименов, С. Сальников, Д. Федин, В. Алексеев, С. Вельмакин. ЖТФ, **92** (6), 783 (2022). DOI: 10.61011/OS.2023.11.57012.5201-23
- [2] Б. Матвеев, Г. Сотникова. Опт. и спектр., **127**, 300 (2019).
- [3] A. Krier, E. Repiso, F. Al-Saymari, P. Carrington, A. Marshall, L. Qi, S. Krier, K. Lulla, M. Steer, C. MacGregor et al. in *Mid-Infrared Optoelectronics* (Elsevier, 2020), pp. 59–90.
- [4] J.V. Lawler, J. Currano. in *Technologies for Synthetic Environments: Hardware-in-the-Loop Testing XIII*, Vol. 6942 (International Society for Optics and Photonics, 2008), p. 69420E.
- [5] S.A. Karandashev, T.S. Lukhmyrina, B.A. Matveev, M.A. Remennyu, A.A. Usikova. Phys. St. Sol. (a), **219**, 2100456 (2022).
- [6] А.Л. Закгейм, С.А. Карандашев, А.А. Климов, Р.Э. Кунков, Т.С. Лухмырина, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, А.А. Усикова, А.Е. Черняков. ФТП, **57** (1), 42 (2023).
- [7] C.J. Lasance, A. Poppe et al. *Thermal Management for LED Applications*, Vol. 2 (Springer, 2014).
- [8] A. Poppe. [Электронный ресурс]. URL: http://S3.Mentor.Com/Public_documents/Whitepaper/Resources/Mentorpaper_59097.Pdf (2010).
- [9] [Электронный ресурс]. URL: <http://www.micred.com/t3ster/>.