07

Диагностика локальной теплопроводности паяных соединений гетероструктуры InGaP/Ga(In)As/Ge с теплоотводящей AlN-керамикой на основе сплава Sn42Bi58 методом лазерной фотодефлекционной микроскопии

© А.Л. Глазов, В.С. Калиновский, А.А. Капралов, Е.В. Контрош, К.Л. Муратиков, К.К. Прудченко

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: glazov.holo@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 16 сентября 2024 г.
В окончательной редакции 25 октября 2024 г.
Принято к публикации 26 октября 2024 г.

Методом лазерной сканирующей фотодефлекционной микроскопии проведено исследование тепловых потоков через паяные соединения в килогерцевом диапазоне модуляции. Оценены локальные теплопроводности внутри спаев, полученных с использованием флюсовых и бесфлюсовых припоев на основе эвтектического сплава Sn42Bi58. Показано, что теплопроводность спая отличается от табличного значения теплопроводности сплава, зависит от вида припоя и технологии пайки. Увеличение давления на соединяемые элементы в процессе пайки позволяет уменьшить тепловое сопротивление спая.

Ключевые слова: бессвинцовые припои, тепловое сопротивление, температурные волны, сканирующая микроскопия.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.04.59840.20123

Ужесточение экологических норм в промышленности, включая электронную, привело к сокращению использования припоев, содержащих свинец, несмотря на их популярность и хорошие физико-механические характеристики. В связи с этим в настоящее время идет активный поиск бессвинцовых сплавов с подходящими свойствами. Большинство предложенных сплавов имеет температуру плавления выше, чем у стандартного свинцово-оловянного припоя, что является серьезной проблемой при производстве большой номенклатуры электронных приборов [1]. Значительно более низкую температуру плавления имеют сплавы на основе висмута и индия [2,3]. Большой интерес вызывает использование таких сплавов в микроэлектронных приборах в качестве термоинтерфейсных материалов для передачи тепла, например, от многопереходных солнечных элементов и $p-i-n$-фотодетекторов к радиатору. Сплавы на основе Sn–Bi–In активно исследуются с точки зрения микроструктуры и механических свойств, однако их теплопроводящие свойства изучены значительно слабее. Между тем эффективность системы терморегулирования во многом ограничивается теплопроводностью спая. В целом получение информации о реальных тепловых характеристиках паяного контакта представляет значительный интерес для разработки и оценки работоспособности электронных приборов [4,5]. Следует отметить, что для характеристики термического качества контакта желательно знать не только его средние теплофизические параметры, но и их локальные значения. Локальное ухудшение теплоотвода от контакта может привести к его перегреву, возникновению термических напряжений и в конечном счете к разрушению контакта. Частой причиной этого является образование пустот внутри припоя при протекании тока [6].

Висмут — нетоксичный и широко распространенный металл. Сплавы на основе висмута и олова оказались довольно перспективными благодаря комплексу хороших тепловых и физико-механических свойств и экономической эффективности [7]. Уникальным свойством этого сплава является низкая вязкость, сравнимая с вязкостью воды. Для улучшения микроструктуры, повышения ее однородности в сплав Sn–Bi вводят различные легирующие добавки [8,9]. Благодаря хорошей смачиваемости с разными поверхностями разработчиков привлекает армирование этого сплава нанотрубками [10].

В работе [11] были измерены коэффициенты температуропроводности и теплопроводности семи сплавов Sn–Bi различного количественного состава. Для этого использовались образцы толщиной 2 mm из высокочистых олова и висмута в разных пропорциях. В то же время толщина спая в современных приборах варьируется в пределах нескольких десятков микрометров. Кроме того, на его микроструктуру и тепловое сопротивление в целом оказывает влияние взаимодействие припоя с металлизированными слоями соединяемых компонентов. Исследование теплопроводности таких контактов в готовом приборе традиционными методами, например методом вспышки [12], практически невозможно. Поэтому в настоящей работе для оценки теплопроводности и тепловых сопротивлений применялась лазерная сканирующая микроскопия с фотодефлекционной (ФД) регистрацией температурных волн [13,14].

В работе исследовались тепловые характеристики паяных контактов гетероструктуры InGaP/Ga(In)As/Ge с теплопроводящей керамикой AlN в условиях, не приводящих к деградации характеристик структуры. Пайка осуществлялась между Ge-подложкой и керамикой с предварительной подготовкой их поверхностей и нанесением слоев рекомендуемых металлов. В работе исследовались тепловые характеристики соединений, полученных с использованием активных паяльных паст на основе бинарного эвтектического сплава 42 mass % Sn−58 mass % Bi в виде бесфлюсовой ленты от фирмы PFARR толщиной 0.2 mm [15] и в виде пасты с флюсом KOKI TB48-M742 [16].

Перед пайкой на поверхности AlN-керамики были сформированы контакты из нескольких слоев металлов Ti/Cu/Ni/Au общей толщиной около 7 μm, а на германии — финальный слой золота (1−2 μm) на подслое из серебра толщиной 1.6−3.5 μm. Пайка осуществлялась в вакууме в рекомендованном производителем припоя температурном режиме при различных давлениях на спаиваемые элементы. Исследовались торцевые поверхности образцов перпендикулярно слоям структур, которые шлифовались и полировались.

Тепловые волны в исследуемой области образца возбуждались сфокусированным на его поверхность лазерным излучением с длиной волны 532 nm, модулированным во времени с частотой 5 kHz. Возбуждаемые в структуре тепловые волны детектировались по отклонению пробного луча He−Ne-лазера, проходящего в воздушной среде над нагреваемым участком поверхности. Угол отклонения луча меняется в зависимости от локальных теплофизических свойств облучаемой области образца. Для исследования поведения ФД-сигнала образец сканировался по двум координатам в плоскости поверхности перпендикулярно спаю. Полученные ФД-изображения использовались для определения теплофизических свойств и контроля однородности паяных контактов.

На рис. 1 приведены лазерное ФД-изображение и микрофотография части поверхности структуры с пайкой припоем KOKI, осуществленной в вакууме под давлением 50 g/cm^2. На ФД-изображении сигнал от спая значительно больше сигнала от соседних слоев (в отличие от микрофотографии). Кроме того, внутри слоя спая видны значительные неоднородности, соответствующие областям с пониженной теплопроводностью.

Для определения неизвестных параметров спая была использована трехмерная многослойная модель тепловой диффузии с гауссовым переменным источником тепла на поверхности [14]. Слои предполагались конечной толщины, но на интерфейсах вводились граничные условия с тепловым сопротивлением R_t и тепловым емкостным импедансом Z_t, позволяющие смоделировать наличие тонких переходных слоев вблизи металлизированных поверхностей, образующихся в процессе пайки [17]. Длина тепловой волны в сплаве Sn42Bi58 для выбранной частоты модуляции превышала толщину спая, и

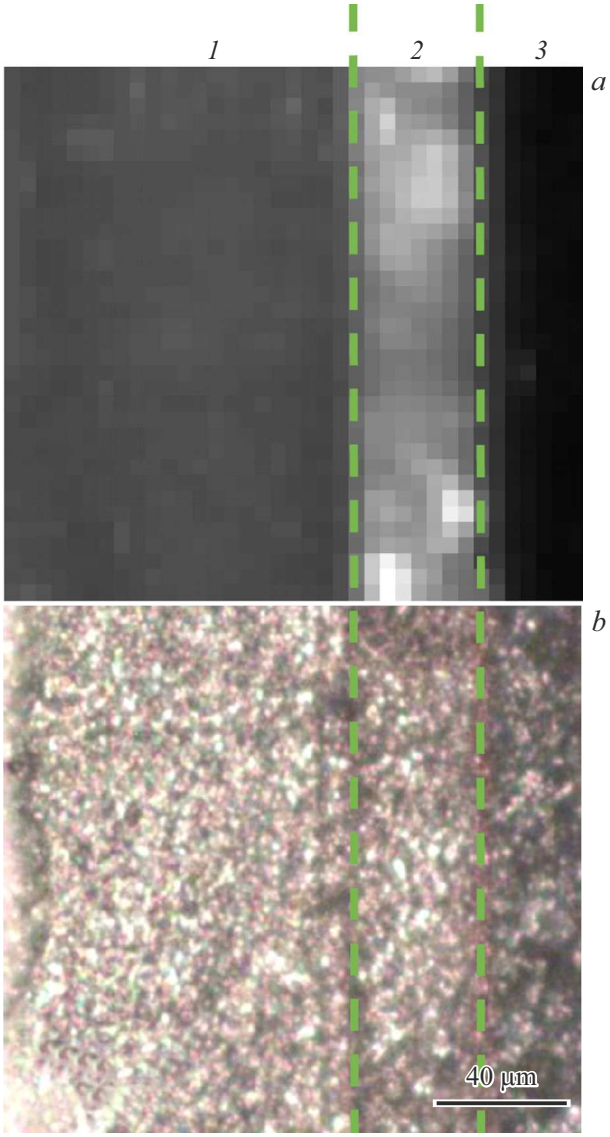

Рис. 1. Фотодефлекционное (*a*) и оптическое (*b*) изображения области вокруг спая с использованием пасты KOKI Sn42Bi58. Штриховыми линиями показаны границы слоя спая. *1* — слой германия, *2* — спай, *3* — AlN-керамика.

поэтому на сигнал вблизи контактов оказывали влияние параметры всех компонентов структуры. В то же время длина температурной волны в германии на частоте 5 kHz равна 47 μm, и в середине германиевой пластины толщиной 130 μm сигнал определяется только коэффициентом теплопроводности германия и может быть использован для калибровки сигнала в других точках образца.

Чтобы получить средние параметры спая, сечения ФД-изображений перпендикулярно границам слоев усреднялись для области без дефектов с минимальным тепловым барьером. На рис. 2 и 3 показаны такие сечения для образцов, спаянных без давления и под давлением 25 и 50 g/cm^2. Для всех кривых характерно значительное увеличение сигнала в области спая, что

Значения коэффициента теплопроводности K, полученные с помощью подгоночной процедуры, и рассчитанные тепловые сопротивления R_t паяных соединений с учетом тепловых импедансов интерфейсов

Припой	Давление, g/cm^2					
	0		25		50	
	K, W/(cm · K)	R_t, cm^2 · K/W	K, W/(cm · K)	R_t, cm^2 · K/W	K, W/(cm · K)	R_t, cm^2 · K/W
Лента PFARR	0.30 ± 0.01	0.024 ± 0.003	0.25 ± 0.01	0.028 ± 0.004	0.22 ± 0.01	0.025 ± 0.005
Паста KOKI	0.15 ± 0.01	0.044 ± 0.007	0.14 ± 0.01	0.026 ± 0.007	0.16 ± 0.01	0.034 ± 0.006

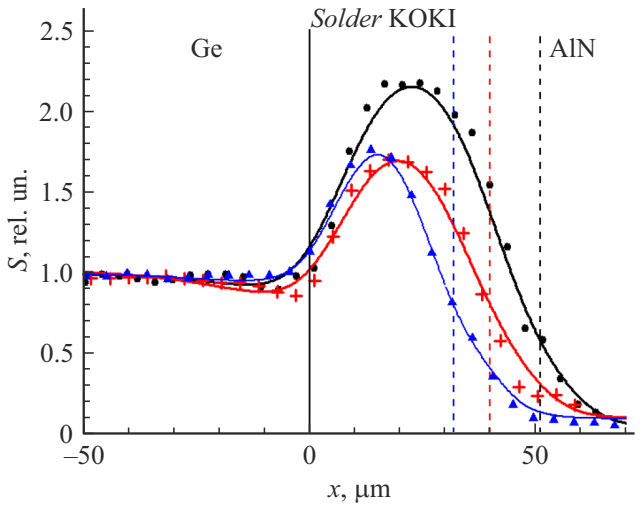

Рис. 2. Усредненное сечение фотодефлекционного изображения образцов, спаянных флюсовым припоем Sn42Bi58 (KOKI). Символами обозначены данные эксперимента: кружки — для образца, спаянного без давления, треугольники — для образца, спаянного под давлением 25 g/cm^2, крестики — для образца, спаянного под давлением 50 g/cm^2. Кривые — результат подгонки. Вертикальной сплошной линией показана граница спая со стороны германия, штриховыми прямыми — граница спая со стороны керамики.

означает меньшую теплопроводность, чем для соседних слоев Ge и AlN. Значения коэффициента теплопроводности спая, полученные с помощью подгоночной процедуры, и рассчитанные тепловые сопротивления соединений приведены в таблице. Определенные таким образом коэффициенты теплопроводности спая отличаются от значения для объемных образцов чистого сплава Sn42Bi58, равного 0.19 W/(cm · K) [2,11]. При этом для спаев, полученных с помощью флюсовой пасты KOKI, значения меньше, а для спаев с лентой PFARR больше 0.19 W/(cm · K). Для паек с флюсом уменьшение коэффициента теплопроводности наблюдалось и ранее [18], а локальное увеличение коэффициента теплопроводности при пайке лентой можно объяснить наличием в сплаве двух фаз: Bi и Sn, которые при данном соотношении компонентов имеют вид сильно вытянутых (до нескольких десятков микрометров) областей [2]. Фазы Sn при малых толщинах слоя могут играть роль теплопроводящих мостиков, так как теплопроводность олова равна 0.65 W/(cm · K). Следует отметить, что для других сплавов это может быть не так. Например, наши предварительные эксперименты с лентой сплава Sn48In52 показали уменьшение коэффициента теплопроводности в спае. При этом данный сплав имеет более сложную структуру, состоящую из четырех фаз.

Для пайки пастой KOKI с флюсом давление приводит к уменьшению теплового барьера. Для пайки бесфлюсовой лентой PFARR хотя давление и привело к уменьшению толщины спая, однако в целом тепловое сопротивление незначительно увеличилось.

Проведенные исследования показывают, что при выборе материала и технологических условий пайки для обеспечения наилучшего теплоотвода необходимо учитывать реальные тепловые характеристики слоев спая, которые могут значительно отличаться от характеристик базовых многокомпонентных сплавов. Максимальный коэффициент теплопроводности спая из флюсового припоя Sn42Bi58 оказался почти в два раза ниже коэффициента теплопроводности спая из ленты аналогичного сплава.

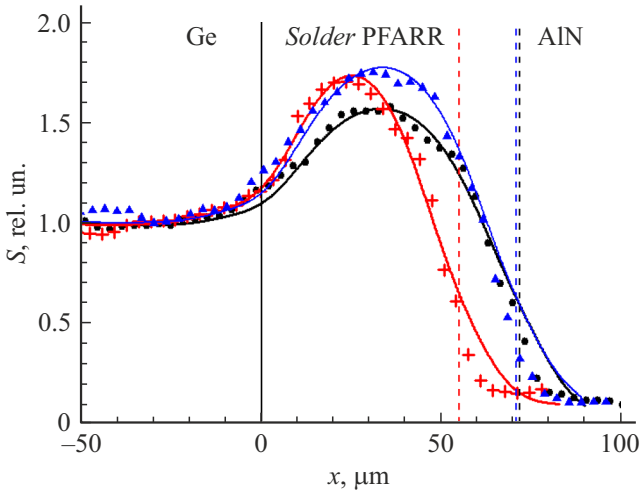

Рис. 3. Усредненное сечение фотодефлекционного изображения образца, спаянного бесфлюсовой лентой из Sn42Bi58 (PFARR). Обозначения те же, что на рис. 2.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00716 (https://rscf.ru/project/24-19-00716/).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] M. Aamir, R. Muhammad, M. Tolouei-Rad, K. Giasin, V.V. Silberschmidt, Solder. Surf. Mount Technol., **32** (2), 115 (2020). DOI: 10.1108/SSMT-11-2018-0046
[2] I. Manasijević, L. Balanovic, U. Stamenković, M. Gorgievski, V. Ćosović, Mater. Testing, **62** (2), 184 (2020). DOI: 10.3139/120.111470
[3] S.R. Mang, H. Choi, H.J. Lee, J. Korean Phys. Soc., **82** (11), 1105 (2023). DOI: 10.1007/s40042-023-00788-9
[4] X. Rao, H. Liu, S. Wang, J. Song, C. Jin, C. Xiao, Therm. Sci., **27** (5), 4193 (2023). DOI: 10.2298/TSCI220805061R
[5] G. Krishnan, A. Jain, Int. Commun. Heat Mass Transfer, **140**, 106482 (2023). DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106482
[6] F. Jia, L. Niu, Y. Xi, Y. Qiu, H. Ma, C. Yang, Int. J. Heat Mass Transfer, **202**, 123719 (2023). DOI: 10.1016/j.ijheatmass-transfer.2022.123719
[7] N. Jiang, L. Zhang, L.L. Gao, X.-G. Song, P. He, J. Mater. Sci.: Mater. Electron., **32** (18), 22731 (2021). DOI: 10.1007/s10854-021-06820-7
[8] F.Q. Hu, Q.K. Zhang, J.J. Jiang, Z.L. Song, Mater. Lett., **214**, 142 (2018). DOI: 10.1016/j.matlet.2017.11.127
[9] Q. Wang, X. Cheng, X. Wang, T. Yang, Q. Cheng, Z. Liu, Z. Lv, Materials, **16** (15), 5325 (2023). DOI: 10.3390/ma16155325
[10] M.M. Billah, Q. Chen, Composites B, **129**, 162 (2017). DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.07.071
[11] K.N. Božinović, D.M. Manasijević, L.T. Balanović, M.D. Gorgievski, U.S. Stamenković, M.S. Marković, Z.D. Mladenović, Hem. Ind., **75** (4), 227 (2021). DOI: 10.2298/HEMIND210119021B
[12] Е.С. Макарова, А.В. Асач, И.Л. Тхоржевский, В.Е. Фомин, А.В. Новотельнова, В.В. Митропов, ФТП, **56** (2), 173 (2022). DOI: 10.21883/FTP.2022.02.51957.30a [E.S. Makarova, A.V. Asach, I.L. Tkhorzhevskiy, V.E. Fomin, A.V. Novotelnova, V.V. Mitropov, Semiconductors, **56** (2), 141 (2022). DOI: 10.21883/SC.2022.02.53700.30a].
[13] A. Glazov, K. Muratikov, Sensors, **23** (7), 3590 (2023). DOI: 10.3390/s23073590
[14] A.L. Glazov, V.S. Kalinovskii, K.L. Muratikov, Int. J. Heat Mass Transfer, **120**, 870 (2018). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.049
[15] https://pfarr.de/de/legierungsliste/
[16] http://www.koki.org/pdf/B1-07_TB48-M742_E.pdf
[17] А.Л. Глазов, О.С. Васютинский, Письма в ЖТФ, **40** (24), 86 (2014). [A.L. Glazov, O.S. Vasyutinskii, Tech. Phys. Lett., **40** (12), 1130 (2014). DOI: 10.1134/S1063785014120244].
[18] A.L. Glazov, V.S. Kalinovskii, A.V. Nashchekin, K.L. Muratikov, J. Alloys Compd., **800**, 23 (2019). DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.06.054