

07.2;15.2

Исследования фотодефлекционным методом теплопроводности и теплового сопротивления слоя спая бессвинцовыми пастами

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

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: glazov.holo@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 11 августа 2022 г.

В окончательной редакции 29 сентября 2022 г.

Принято к публикации 6 октября 2022 г.

Термоволновым фотодефлекционным методом исследованы процессы теплоотвода от многопереходных солнечных элементов на германиевой подложке в керамику AlN через слой спая. Использовались два типа бессвинцового припоя на основе SnBi и SnAgCu в различных режимах под давлением. Проведено сравнение теплопроводностей и тепловых сопротивлений слоев спая. Показано, что теплопроводности слоев спая отличаются от справочных данных для соответствующих металлических сплавов и могут зависеть от величины давления в процессе пайки.

Ключевые слова: теплое сопротивление, многопереходные солнечные элементы, бессвинцовый припой, неразрушающий контроль, тепловые волны.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.22.53806.19338

Надежность и рабочие характеристики современных полупроводниковых приборов с большим тепловыделением во многом определяются эффективностью отвода тепла [1]. К таким приборам, в частности, относятся солнечные батареи с концентраторами солнечного излучения и фотоприемники лазерного излучения [2–4]. Теплоотводящие свойства подобных приборов в первую очередь определяются качеством интерфейса — спая между фотоэлектрическим преобразователем и теплоотводящим основанием (ТО). Ранее нами было выполнено исследование теплоотводящих свойств соединений, созданных с использованием свинецсодержащих припоев [5–7]. Было установлено, что в процессе пайки имеют место нарушение однородности состава спая и образование тепловых сопротивлений на его границах, приводящих к изменению теплоотводящих свойств всей создаваемой конструкции [7].

Вместе с тем в настоящее время из-за экологических требований все большее распространение получают различные бинарные [8,9] и тройные [9–11] бессвинцовые припои. Их теплофизические свойства (особенно в паяных соединениях полупроводник–ТО) изучены недостаточно. В настоящей работе приведены результаты исследования термоволновым фотодефлекционным (ФД) методом [5] теплопроводящих характеристик конструкции солнечный элемент (СЭ) InGaP/Ga(In)As/Ge–спай–ТО с использованием в качестве припоя бессвинцовых паст KOKI TB48-M742 на основе бинарного сплава Sn42Bi58 [12] и AIM REL61 M8 из материала NC258 на основе тройного сплава SnAg3Cu0.5 с добавлением Bi [13]. Для исследования теплопроводящих свойств спая между многопереходными (МП) СЭ и керамическим ТО из AlN были подготовлены образцы размером около 6×5 мм, представляющие собой СЭ InGaP/GaAs/Ge и ТО AlN с толщинами 150 и 250 μm

соответственно. Тыльный контакт к *p*-Ge-подложке МП СЭ включал слои сплава Ag–Mg, затем Ni и финальный слой золота толщиной 200 нм, который осаждался электрохимическим методом. Общая толщина контакта не превышала 0.5 μm . Металлический контакт к поверхности керамики AlN формировался из подслоя Ti, на который последовательно осаждались слои меди, никеля и электрохимического золота. Толщина золота была не менее 1 μm . Общая толщина контакта составляла не более 7 μm . Процесс пайки выполнялся на установке VS160 Budatec (Германия) [14] в соответствии с температурными профилями, рекомендованными производителями паяльных паст [12,13]. Оплавление паяльной пасты производилось в вакууме при начальном давлении 1 mbar. Исследуемые образцы нагревались со скоростью 60 °C/min до температуры активации флюса ($t = 150$ °C). Далее в течение примерно 2 min температура в рабочей камере стабилизировалась, затем проводился дополнительный нагрев до температуры оплавления 215 °C с последующей термостабилизацией до 2 min. Охлаждение до комнатной температуры проводилось со скоростью 70 °C/min. Во время пайки часть образцов находилась под давлением 25, 50 и 75 г/см².

Для исследования теплопередающих свойств паяного контакта между МП СЭ и ТО использовалась разработанная ранее методика определения теплофизических параметров многослойных объектов со стороны поверхности, перпендикулярной границам слоев [5]. Для этого спаянные образцы из МП СЭ и ТО AlN разделялись дисковой резкой поперек структуры на две половины. Для проведения измерений за один цикл образцы с разными технологиями пайки собирались в один пакет. Торцевая поверхность этого пакета со стороны распила структур перед измерениями была отшлифована до класса ≥ 9 . Эта поверхность облучалась сфокусированным и модулированным во времени с частотой 1 kHz излучением

непрерывного твердотельного лазера с длиной волны 0.532 nm. Диаметр пятна на поверхности составлял около 15 μm. Возбуждаемые таким образом в структуре тепловые волны детектировались по отклонению пробного луча He–Ne-лазера, проходящего над нагретой поверхностью. Регистрируемый ФД-сигнал пропорционален углу отклонения в направлении, перпендикулярном поверхности. При наличии теплового сопротивления на пути распространения тепловой волны температура поверхности локально повышается, приводя к увеличению сигнала. Для исследования поведения ФД-сигнала образец сканировался по двум координатам вдоль поверхности разреза. Полученные ФД-изображения использовались для определения свойств отдельных слоев структуры. На рис. 1 приведены два изображения поверхности разреза одной из структур со спаем пастой АИМ, полученные в оптическом микроскопе и ФД-методом. Для количественного анализа использовалась разработанная ранее модель формирования ФД-сигнала от многослойных объектов [6]. Модель позволяет учитывать как параметры самих слоев, так и неоднородные граничные условия между слоями. В рассматриваемом случае расчет проводился для объекта из четырех слоев: германиевой подложки, спаю, медного контакта, керамики AlN. Толщина контакта на поверхности германия была достаточно малой, чтобы его не учитывать в качестве отдельного слоя, однако наличие золота в нем приводит к изменению свойств прилегающего слоя спаю за счет его растворения. Этот факт был детально изучен нами для широко применяемого оловянно-свинцового припоя [7]. В той же работе было показано, что изменение состава припоя приводит к значительным изменениям его теплопроводности и теплоемкости. Последнее обстоятельство можно учесть, вводя тепловой импеданс [15] в граничное условие для тепловых потоков. В случае исследованных бессвинцовых паст для адекватного описания ФД-сигнала также было необходимо ввести аналогичный параметр в граничное условие между германиевой подложкой и слоем спаю. Тогда граничные условия для уравнения теплопроводности на границе между германием и спаем ($x = 0$) выглядят следующим образом:

$$T_{\text{Ge}}(0, t) - T_S(0, t) = -R_t K_S \left. \frac{\partial T_S(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0}, \quad (1)$$

$$K_{\text{Ge}} \left. \frac{\partial T_{\text{Ge}}(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} - K_S \left. \frac{\partial T_S(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = -Z_t T_S(0, t), \quad (2)$$

где R_t — тепловое сопротивление, Z_t — емкостный тепловой контактанс, индекс S относится к спаю. Граничные условия на других интерфейсах полагаем однородными.

Подгоночными параметрами в модели были теплопроводность и толщина спаю, толщина и средняя теплопроводность контактного слоя между спаем и ТО, а также тепловое сопротивление и емкостный тепловой контактанс контакта со стороны СЭ. Остальные теплофизические параметры полагались известными, а именно $K_{\text{Ge}} = 0.67 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$, $(\rho C)_{\text{Ge}} = 1.76 \text{ J}/(\text{cm}^3 \cdot \text{K})$,

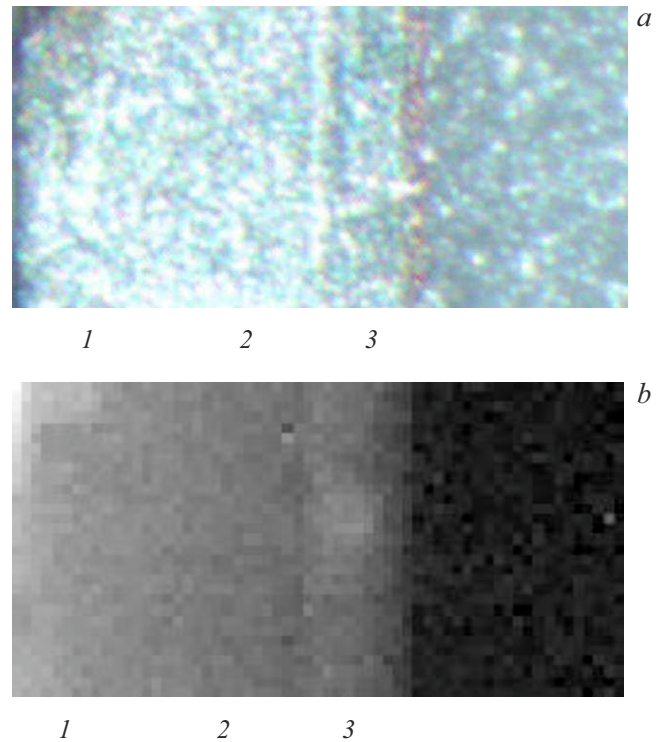


Рис. 1. Оптическое (а) и фотодетекционное (б) изображения части среза структуры СЭ–спаю–керамика AlN. 1 — СЭ, 2 — спаю, 3 — керамика AlN. Размер изображения 0.3 × 0.15 mm.

$K_{\text{AlN}} = 1.8 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$, $(\rho C)_{\text{AlN}} = 2.4 \text{ J}/(\text{cm}^3 \cdot \text{K})$, где K — теплопроводность, ρ — плотность, C — удельная изобарная теплоемкость. Объемная теплоемкость (ρC) спаю слабо зависит от состава пасты и слабо влияет на результат аппроксимации, поэтому она также не варьировалась в процессе подгоночной процедуры. Толщины слоев контролировались оптическим способом на микроскопе „Альтаи МЕТ 6С“. Аппроксимировалась зависимость сигнала от координаты в перпендикулярном слоям направлении. Для уменьшения погрешности от неоднородности поверхности сигнал усреднялся по направлению вдоль слоев.

На рис. 2 представлены зависимости амплитуды усредненного экспериментального сигнала от расстояния от границы между германиевой подложкой и спаем, а также результаты аппроксимации. Увеличение ФД-сигнала со стороны МП СЭ вызвано контактом с другим образцом через слой клея. Увеличение сигнала в области спаю вызвано более низкой теплопроводностью пасты по сравнению с теплопроводностью Ge и тем более ТО.

Теплофизические характеристики использованных паяльных паст производителями не приводятся. Из имеющихся в литературе данных по аналогичным составам теплопроводности базовых сплавов можно оценить как $K_{\text{АИМ}} \sim 0.6–0.7 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ и $K_{\text{КОКЛ}} \sim 0.2 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$. Полученные из эксперимента теплопроводности спаев отличаются от приведенных значений для соответствующих сплавов. Теплопроводность спаю из пасты

AIM REL61 M8 практически не зависит от давления при пайке и равна $\sim 0.5 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$. Спай из пасты КОКИ ТВ48-M742 демонстрирует значительное увеличение теплопроводности с ростом давления при пайке. Теплопроводность меняется от $0.13 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ при пайке без давления до $0.26 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ при давлении $75 \text{ g}/\text{cm}^2$. При этом во всех случаях $Z_T = 180 \pm 20 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ на использованной частоте 1 kHz . На рис. 3 приведены зависимости теплового сопротивления слоя спаия R_{TS} от нагрузки при пайке структур двумя типами припоя. Тепловое сопротивление спаия на основе AIM не зависит от давления и составляет $\sim 0.01 \text{ cm}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. Тепловое сопротивление спаия на основе КОКИ уменьшается с увеличением давления от 0 до $75 \text{ g}/\text{cm}^2$ примерно в 2 раза (с 0.037 до $0.020 \text{ cm}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$), но остается в 2 раза больше величины теплового сопротивления спаия на основе AIM. Большие погрешности на рис. 3 для двух образцов с припоем КОКИ обусловлены разбросом

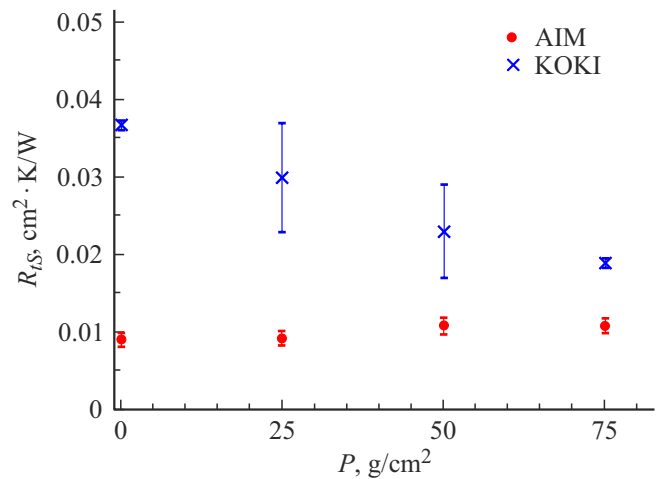


Рис. 3. Зависимости теплового сопротивления от нагрузки при пайке структур двумя типами припоя: AIM и КОКИ.

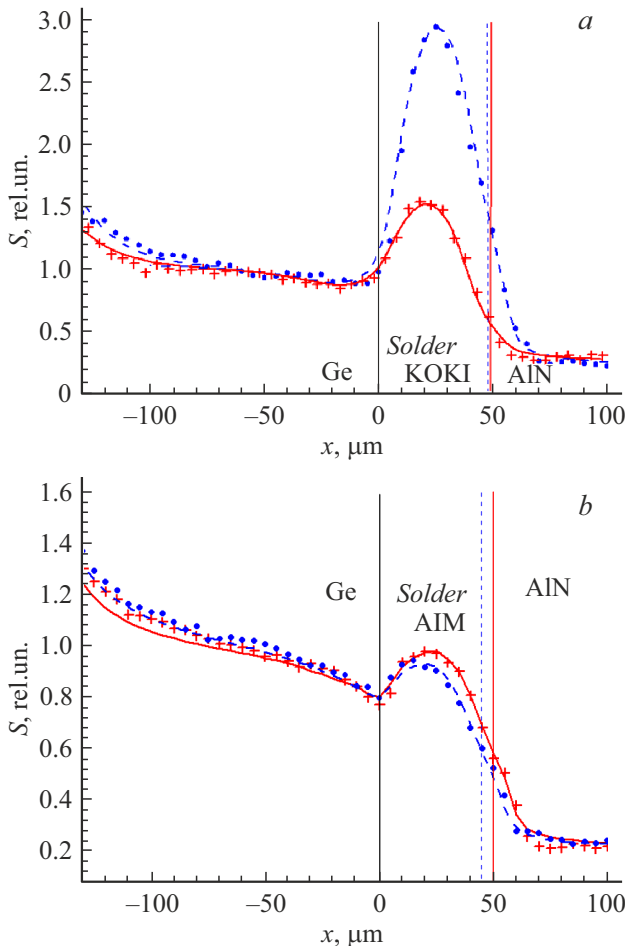


Рис. 2. Зависимости фотодетекционного сигнала от расстояния поперек границ спаия. *a* — с припоем AIM, *b* — с припоем КОКИ. Штриховая кривая и кружки — для образцов, спаенных без давления, сплошная кривая и крестики — для образцов, спаенных под давлением $75 \text{ g}/\text{cm}^2$. Точки — экспериментальные данные, кривые — результаты аппроксимации по пятислойной модели образца. Вертикальные прямые соответствующего вида обозначают границы слоев.

экспериментальных данных для этих образцов. Следует отметить, что теплопроводность спаия из пасты AIM REL61 M8 оказалась примерно в 2 раза выше теплопроводности свинецсодержащего спаия, исследованного в работе [5], а теплопроводность спаия на основе пасты КОКИ ТВ48-M742 при давлении $75 \text{ g}/\text{cm}^2$ примерно совпадает с ней.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что при выборе паяльной пасты и технологических условий пайки СЭ InGaP/GaAs/Ge на TO AlN для обеспечения наилучшего теплоотвода необходимо учитывать реальные тепловые характеристики слоев спаия, которые могут значительно отличаться от характеристик базовых многокомпонентных сплавов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J. Mathew, S. Krishnan, J. Electron. Packag., **144**, 010801 (2022). DOI: 10.1115/1.4050002
- [2] V.S. Kalinovskii, E.V. Kotrosh, A.V. Andreeva, E.A. Ionova, A.V. Malevskaya, V.M. Andreev, V.B. Malutina-Bronskaya, V.B. Zalesskiy, A.M. Lemeshevskaya, V.I. Kuzoro, V.I. Khalimanovich, M.K. Zayceva, AIP Conf. Proc., **2149**, 030003 (2019). DOI: 10.1063/1.5124180
- [3] Д.Ф. Зайцев, В.М. Андреев, И.А. Биленко, А.А. Березовский, П.Ю. Владиславский, В.Ф. Гурфинкель, Л.И. Цветкова, В.С. Калиновский, Н.М. Кондратьев, В.Н. Косолюбов, В.Ф. Курочкин, С.О. Слипченко, Н.В. Смирнов, Б.В. Яковлев, Радиотехника, **85** (4), 153 (2021). DOI: 10.18127/j00338486-202104-17
- [4] M. O'Neill, A.J. McDaniel, M. Piszczor, M. Myers, P. Sharps, C. McPheeters, J. Steinfeldt, in *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conf. (PVSC)* (IEEE, 2017). p. 525. DOI: 10.1109/PVSC.2017.8366596

- [5] А.Л. Глазов, В.С. Калиновский, Е.В. Контрош, К.Л. Муратиков, Письма в ЖТФ, **42** (11), 33 (2016). [A.L. Glazov, V.S. Kalinovskii, E.V. Kontrosh, K.L. Muratikov, Tech. Phys. Lett., **42** (6), 570 (2016). DOI: 10.1134/S1063785016060080].
- [6] A.L. Glazov, V.S. Kalinovskii, K.L. Muratikov, Int. J. Heat Mass Transf., **120**, 870 (2018). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.049
- [7] 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
- [8] M. Wu, J. Li, J. Electron. Mater., **47**, 155 (2018). DOI: 10.1007/s11664-017-5909-7
- [9] 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
- [10] Y. Altintas, Y. Kaygisiz, E. Öztürk, S. Aksöz, K. Keşlioğlu, N. Maraşlı, Int. J. Therm. Sci., **100**, 1 (2016). DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2015.09.004
- [11] S. Cheng, C.-M. Huang, M. Pecht, Microelectron. Reliab., **75**, 77 (2017). DOI: 10.1016/j.microrel.2017.06.016
- [12] <https://www.ko-ki.ru/produksiya/payalnye-pasty>
- [13] <https://aim.avanteh.ru/katalog/bezotmyvnye-materialy/bezotmyvnaja-pajalnaja-pasta-m8>
- [14] <https://budatec.ru/cat/vacuum/ustanovka-vakuumnoi-paiki-vs160ug>
- [15] 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].