

07

Исследование процесса отвода тепла на границе полупроводник—керамика в солнечных элементах лазерным термоволновым методом

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

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

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

Поступило в Редакцию 18 января 2016 г.

Лазерным термоволновым методом исследовано влияние слоя припоя между полупроводниковым солнечным элементом и теплоотводящей керамикой на нестационарные процессы теплопереноса. Предложена теоретическая модель, учитывающая у границы спая наличие дополнительного теплового сопротивления и тепловой емкости. Рассмотрены различные режимы пайки. Показано, что лазерные термоволновые методы в рамках развитой модели позволяют правильно оценить теплофизические свойства многослойных структур.

Важным условием надежной эксплуатации солнечных батарей (СБ) на основе многопереходных полупроводниковых наногетероструктурных солнечных элементов (МСЭ) и концентраторов солнечного излучения [1] является обеспечение эффективного отвода тепла. Основной задачей данной работы являлось изучение качества теплоотвода на границе паяных соединений AlN-керамики и Ge в СБ на основе гетероструктур InGaP/GaAs/Ge, получаемых с использованием активной паяльной пасты WS483. В ее состав входят частицы сплавов Sn63/Pb37 и Sn62/Pb36/Ag2 со средним размером $45 \mu\text{m}$. Необходимость подобного исследования обусловлена сложными физико-химическими процессами в современных составах для пайки [2]. В соответствии с рекомендациями производителей использование повышенных давлений и вакуумных условий повышает качество паяных соединений. В данной работе было исследовано качество теплоотвода от СБ, паяные соединения которых были выполнены как при повышенном механическом давлении, так и в условиях вакуума.

Теплопередающие свойства паяного контакта между МСЭ и керамикой исследовались с помощью лазерного термоволнового фотодефлек-

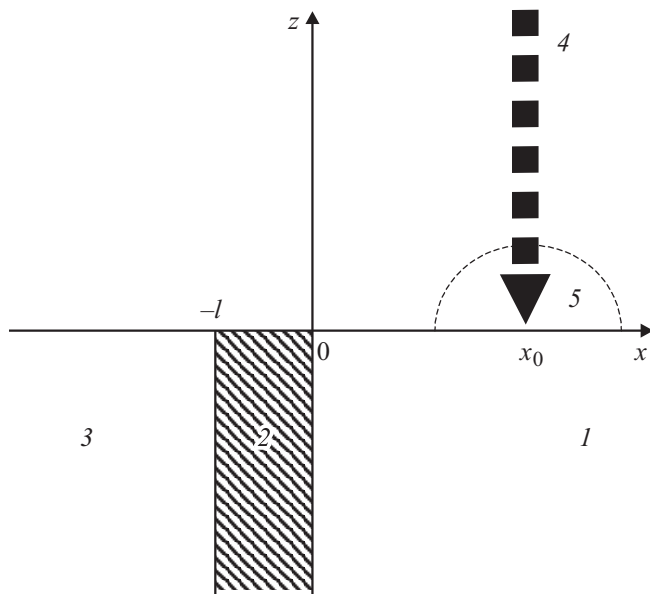


Рис. 1. Геометрия расположения образца и возбуждающего лазерного излучения: 1 — полупроводник, 2 — слой припоя, 3 — керамика, 4 — пучок возбуждающего лазерного излучения, 5 — тепловая линза.

ционного (ФД) метода. Для локального возбуждения тепловых волн в нем используется модулированное во времени излучение лазера накачки, сильно поглощающееся материалом образца и сфокусированное на его поверхность. При этом в воздушной среде вблизи поверхности образца создается нестационарная тепловая линза. Прохождение пучка зондирующего лазера через нее приводит к его отклонению, которое используется для формирования ФД-сигнала. Важным достоинством ФД-метода является его применимость к материалам любой природы. Ранее подобный подход с успехом использовался нами для определения теплофизических свойств полупроводников и керамик [3,4].

Перед проведением ФД-экспериментов осуществлялась полировка поверхности структуры, обеспечивавшая оптическую однородность полупроводникового материала вблизи контакта. ФД-эксперименты по определению теплофизических свойств контакта между МСЭ и керами-

кой производилось в геометрии, показанной на рис. 1. Качество теплопередачи контактом (слоем припоя) между германием и AlN-керамикой оценивалось по характеру изменения ФД-сигнала по мере приближения зоны генерации тепловых волн к керамике со стороны полупроводника. В качестве лазера накачки в работе использовался аргоновый лазер с длиной волны $\lambda = 0.514 \mu\text{m}$, излучение которого сильно поглощалось в МСЭ, поэтому генерация тепловых волн в нем носила поверхностный характер. Излучение лазера накачки модулировалось с частотой 2.029 kHz и фокусировалось на поверхность образца в пятно с диаметром около $5 \mu\text{m}$. Для зондирования использовался пучок He–Ne-лазера, сфокусированный в зону действия тепловой линзы. Его отклонение от первоначального направления распространения регистрировалось с помощью координатно-чувствительного фотоприемника.

Количественная оценка теплофизических характеристик слоя спаива производилась с использованием теоретической модели, позволяющей оценивать его теплофизические параметры по данным ФД-экспериментов. В рамках этой модели рассматривалась трехслойная система: керамика–спай–германиевая подложка. Слои предполагались однородными и изотропными. Однако вблизи границы зоны спаива и германия допускалось наличие тонкого переходного слоя, присутствие которого моделировалось тепловым сопротивлением (в общем случае комплексным [5]). Теплофизические параметры паяного слоя и теплового сопротивления рассчитывались из условия максимального совпадения теоретических и экспериментальных результатов для характеристик ФД-сигналов.

Расчет ФД-сигналов осуществлялся в рамках трехмерной задачи теплопроводности, теоретическое решение которой для рассматриваемой структуры производилось аналогично представленному в работах [6–8]. В них было показано, что в рассматриваемой геометрии при гармоническом законе модуляции возбуждающего лазерного излучения с круговой частотой ω ФД-сигнал может быть представлен в следующем виде:

$$S_d(\omega) = k_d e^{i\omega t} \frac{\partial \int_{-\infty}^{\infty} dy T_g(x, y, z, \omega)}{\partial z}, \quad (1)$$

где k_d — некоторый коэффициент пропорциональности, $T_g(x, y, z, \omega)$ — распределение температуры вблизи поверхности объекта в зоне действия тепловой линзы.

Распределение температуры в газовой среде у поверхности образца определяется на основе выражения $T_g(x, y, z, \omega) = T(x, y, 0, \omega) \exp(-z \sqrt{i\omega/\kappa_g})$, где κ_g — температуропроводность воздуха, а $T(x, y, 0, \omega)$ — температура поверхности образца. Методика расчета температуры для рассматриваемой структуры была описана в работах [7–9]. В полученных аналитических выражениях для температуры поверхности трехслойной структуры керамика–слой спая–полупроводник теплофизические параметры керамики и полупроводника считались известными. Параметры спая подбирались из условия наилучшего соответствия экспериментально измеренным значениям ФД-сигналов.

На рис. 2 приведены результаты лазерных термоволновых экспериментов по описанной методике, демонстрирующие характер изменения ФД-сигнала вблизи контакта между МСЭ и керамикой, создаваемого пайкой пастой WS483 по температурному режиму, рекомендованному производителем. Перед пайкой на поверхность германия и керамики AlN наносился слой золота толщиной 2–4 мкм. Пайка осуществлялась как при различных механических давлениях на воздухе, так и в вакууме. Приведенные экспериментальные значения ФД-сигналов усреднялись на участке с длиной 1 мм вдоль направления границы полупроводник–припой. На этом же рисунке приведены результаты расчета ФД-сигнала на основании решения задачи нестационарной теплопроводности для трехслойной структуры [6–8] с помощью выражения (1). При расчете теплофизические параметры германия и керамики задавались равными $K_{Ge} = 0.67 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$, $(\rho C)_{Ge} = 1.76 \text{ J}/(\text{cm}^3 \cdot \text{K})$, $K_{AlN} = 1.8 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$, $(\rho C)_{AlN} = 2.4 \text{ J}/(\text{cm}^3 \cdot \text{K})$, где K — теплопроводность, ρ — плотность, C — удельная изобарная теплоемкость. Теплофизические параметры слоя спая варьировались для достижения наилучшего совпадения с экспериментальными результатами для ФД-сигнала. Из представленных результатов видно, что учета только объемных теплофизических параметров слоя спая недостаточно для обеспечения хорошего совпадения с экспериментальными данными. Введение теплового сопротивления на границе между германием и спаем приводит к существенному улучшению их соответствия, но все же расхождение остается достаточно заметным.

Из анализа поведения и практики использования составов для пайки известно, что вблизи контакта они образуют некоторый переходной слой [2,9]. В обзоре [10] предлагается при рассмотрении нестационарных процессов в реальных тепловых контактах с неоднородной

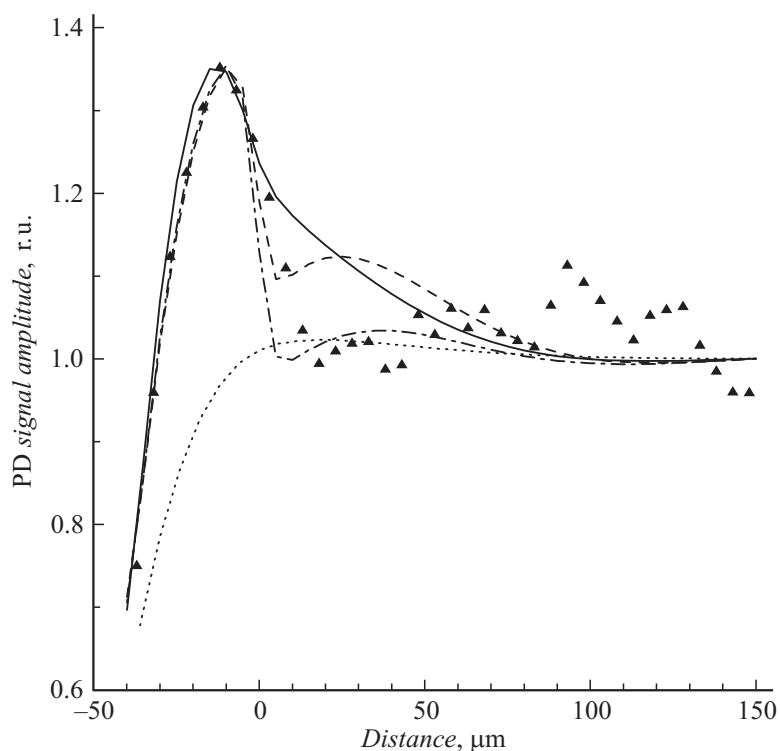


Рис. 2. Зависимость ФД-сигнала от расстояния до границы между полупроводниковой подложкой и слоем спая. ▲ — экспериментальные результаты для пайки под механическим давлением 4.6 МПа. Сплошная кривая соответствует теплопроводности спая $K = 0.22 \text{ W/(cm} \cdot \text{K)}$ и идеальной границе; штриховая линия $K = 0.3 \text{ W/(cm} \cdot \text{K)}$ и тепловому сопротивлению $0.03 \text{ (cm} \cdot \text{K)/W}$; штрихпунктирная линия $K = 0.28 \text{ W/(cm} \cdot \text{K)}$, тепловому сопротивлению $0.03 \text{ (cm} \cdot \text{K)/W}$ и емкости $\rho C \Delta l = 0.024 \text{ J/(cm}^2 \cdot \text{K)}$. Пунктирная линия соответствует $K = 0.55 \text{ W/(cm} \cdot \text{K)}$ и идеальным границам.

приконтактной зоной заменять ее некоторым фиктивным однородным слоем с определенной теплоемкостью и объемной теплопроводностью. При этом указанные теплофизические параметры определяются через скорости изменения во времени и в пространстве некоторых средних

температур слоя. Указанный подход позволяет приблизительно определять теплофизические параметры эквивалентного контакта и при рассмотрении нестационарных задач может приводить к появлению у него комплексных теплофизических параметров. Вместе с тем следует отметить, что с математической точки зрения подобный подход не является корректным [10].

В связи с этим в данной работе используется другой подход, основанный на замене переходной области между германием и спаем тонким слоем, имеющим не только тепловое сопротивление, но и тепловую емкость [5]. При этом роль тепловой емкости контакта выполняет комбинация параметров $\rho C \Delta l$, где Δl — толщина переходной области. При средних значениях ρC для паяного слоя оценки показывают, что ее роль для рассматриваемого контакта может становиться существенной при толщинах $\Delta l \approx 10 \mu\text{m}$. Переходный слой вблизи контакта может образовываться из-за различного процентного содержания Sn и Pb вблизи контакта и в объеме слоя [2,9], а также благодаря частичному растворению Au в расплаве Sn и Pb [9]. Приведенные на рис. 2 графики показывают, что подобный подход заметно улучшает совпадение экспериментальных и теоретических данных для ФД-сигнала. Полученные результаты для теплофизических параметров спая позволяют определить качество теплоотвода из германия в керамику.

На основании полученных тепловых параметров для реальных паяных контактов рассматриваемой структуры был рассчитан тепловой поток в AlN-керамику из германия при условии, что на паяный слой со стороны германия падает тепловой поток единичной амплитуды с частотой 2.029 kHz. Из приведенных на рис. 2 данных видно, что на этой частоте через контакт проходит около 45% теплового потока с фазовой задержкой относительно потока, входящего со стороны германия, в 115° .

На рис. 3 показаны результаты лазерных ФД-экспериментов, выполненных на аналогичных структурах после пайки в вакууме до 40 mbar, без механического давления. Представленные результаты показывают, что теплофизические параметры спая и его качество оказываются примерно такими же, как и в предыдущем случае. Для сравнения на рис. 2 и 3 пунктирной линией показаны результаты расчета ФД-сигнала для параметров слоя спая с идеальными объемными характеристиками припоя $K = 0.55 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$, $\rho C = 1.83 \text{ J}/(\text{cm}^3 \cdot \text{K})$. Согласно расчетам, через такой идеальный слой спая должно проходить около 80% теплового потока с фазовой задержкой 34° .

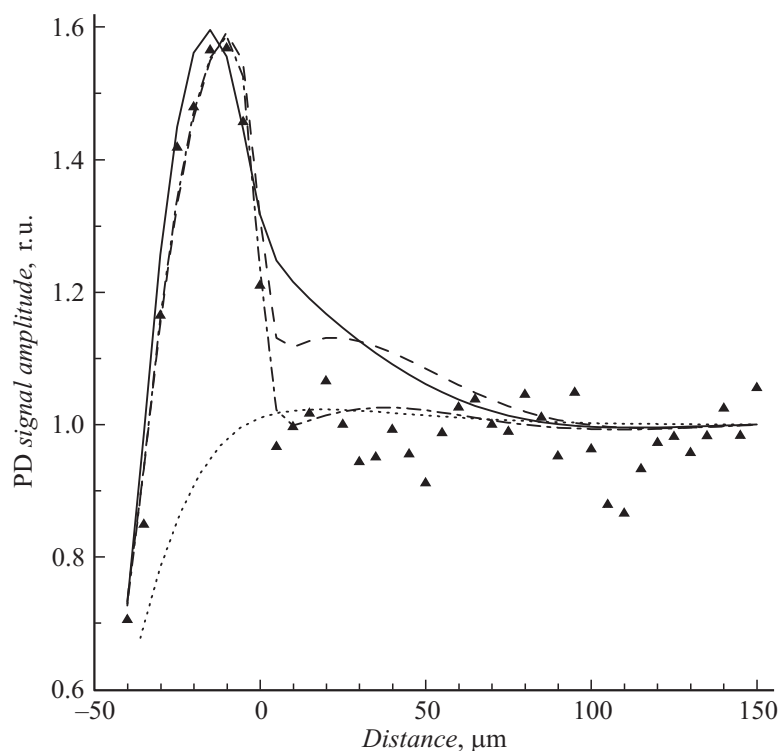


Рис. 3. Зависимость ФД-сигнала от расстояния до границы между полупроводниковой подложкой и слоем спаива для режима пайки в вакууме. \blacktriangle — экспериментальные результаты. Сплошная кривая рассчитана для $K = 0.15 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ и идеальной границы; штриховая линия соответствует $K = 0.225 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$, тепловому сопротивлению $0.03 (\text{cm} \cdot \text{K})/\text{W}$; штрихпунктирная линия соответствует $K = 0.21 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$, тепловому сопротивлению $0.03 (\text{cm} \cdot \text{K})/\text{W}$ и емкости $\rho C \Delta l = 0.024 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$. Пунктирная линия соответствует $K = 0.55 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ и идеальным границам.

Таким образом, приведенные результаты показывают, что лазерный ФД-метод позволяет исследовать динамические теплофизические процессы в паяных соединениях МСЭ с учетом влияния приграничных слоев спаива. При этом показано, что предложенные режимы пайки с дав-

лением и пайки в вакууме при рассмотренных условиях обеспечивают близкое качество теплоотвода.

В.С. Калиновский и Е.В. Контрош благодарят Министерство образования и науки России за поддержку данной работы, соглашение о предоставлении субсидии от 27.06.2014 г. № 14.604.21.0088 на выполнение прикладных научных исследований по теме работы, уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI60414X0088.

Список литературы

- [1] *Alferov Zh.I., Andreev V.M., Romyantsev V.D.* // High-Efficient Low-Cost Photovoltaics. / Eds.: V. Petrova-Koch, R. Hezel, A. Goetzberger. Springer Series in Optical Sciences. 2008. V. 140. P. 101–141.
- [2] *Brandmair A., Müller W., Savenkova M., Sheshnin S.* // Technische Mechanik. 2011. V. 31. N 2. P. 156–170.
- [3] *Glazov A.L., Muratkov K.L.* // Opt. Eng. 1997. V. 36. N 2. P. 358–362.
- [4] *Глазов А.Л., Муратиков К.Л.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. В. 6. С. 110–115.
- [5] *Глазов А.Л., Васютинский О.С.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 24. С. 86–93.
- [6] *Глазов А.Л., Козлов В.А., Муратиков К.Л.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 24. С. 16–25.
- [7] *Глазов А.Л., Калиновский В.С., Лисицина Ю.Г., Муратиков К.Л., Попович Н.С.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 14. С. 60–67.
- [8] *Glazov A., Kalinovsky V., Muratkov K., Romyantsev V.D.* // Proc. 40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. June 8–13, 2014. P. 1158–1163. DOI: 10.1109/PVSC.2014.6925121.
- [9] *Зенин В., Рягузов А., Бойко В., Гальцев В., Фоменко Ю.* // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 5. С. 46–51.
- [10] *Меснянкин С.Ю., Викулов А.Г., Викулов Д.Г.* // УФН. 2009. Т. 179. № 9. С. 945–970.