

УДК 621.383.4, 681.786, 681.787

ОПТИМАЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ ОХЛАЖДАЕМОГО FLIP-CHIP ФОТОПРИЁМНИКА ИК-ДИАПАЗОНА

© П. С. Загубисало, А. Р. Новоселов

*Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
«Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 2/1
E-mail: peter.zagubisalo@gmail.com*

Определена оптимальная конструкция охлаждаемого flip-chip фотоприёмника спектрального ИК-диапазона для установки в криостат как с сохранением возможности изгиба при охлаждении, так и жёсткого крепления к пьедесталу через пластину сапфира. Проведён численный расчёт радиально-симметричной модели фотоприёмника GaAs (первый слой) — In (кольцевые структуры) — Si — GaAs (второй слой) при диаметре пластин 10 мм. Выявлены уровни максимальных деформационных нагрузок в краевом индиевом кольце, возникающие при охлаждении фотоприёмника до 77 К для пластин разной толщины (от 0 до 700 мкм). Для модели фотоприёмника при закреплении её на охлаждаемом пьедестале криостата с сохранением возможности изгиба определена оптимальная конструкция — пластины GaAs(1) и Si толщиной около 50 мкм и без GaAs(2), уровень деформационных нагрузок в краевом индиевом кольце (ширина 15 мкм, толщина 5 мкм) при этом составил около 427 МПа. При жёстком креплении модели на пьедестале криостата оптимальной конструкцией являются пластины GaAs(1) и Si толщиной 50 мкм и компенсационный слой GaAs(2) толщиной 100 мкм, уровень максимальных деформационных нагрузок в краевом индиевом кольце при этих условиях составил 600 МПа.

Ключевые слова: технология flip-chip, фотоприёмник, криостат.

DOI: 10.15372/AUT20220213

Введение. Охлаждаемые гибридные фотоприёмники (ФП) инфракрасного спектрального диапазона обычно состоят из двух специализированных сверхбольших интегральных схем СБИС. Первая содержит массив фоточувствительных элементов (ФЧЭ) на основе плёнок узкозонных полупроводниковых материалов на полупроводниковых подложках, вторая СБИС является кремниевым мультиплексором (КМ), обрабатывающим информацию с ФЧЭ. В данной работе использован вариант ФЧЭ на основе плёнок кадмий — ртуть — теллур (КРТ) толщиной около 10 мкм на подложке GaAs [1]. Изготавливают ФП гибридизацией КМ и ФЧЭ, когда индиевые столбы их связи совместно сдавливаются, деформируются и свариваются между собой, обеспечивая электрический и механический контакты между ними (flip-chip технология).

Для нормальной работы ФЧЭ необходимо охлаждение ФП до низких температур. При этом линейные размеры ФЧЭ и КМ могут изменяться неодинаково из-за разности коэффициентов теплового расширения (КТР). Так, при снижении температуры до 80 К разница в изменении размеров пластин GaAs и Si (размером 10×10 мм) составит около 11 мкм [2]. Индиевые столбы связи при этом испытывают сильную деформационную нагрузку. Если они не выдерживают периодическую нагрузку при охлаждении, то разрывается связь между отдельными фоточувствительными элементами ФЧЭ и КМ. Для снижения деформационной нагрузки на индиевые столбы и компоненты flip-chip фотоприёмников предложено несколько разных конструкций ФП:

- крепление ФП к охлаждаемому столику криостата с сохранением возможности его изгиба [3];
- введение дополнительных компенсационных слоёв между пьедесталом и ФП [4];
- утонение ФЧЭ [5].

Крепление ФП, при котором сохраняется возможность изгиба. Для охлаждения ФП помещают в криостат, состоящий из двух отделов. В первом отделе в вакууме или в атмосфере инертного газа расположен закреплённый на охлаждаемом пьедестале ФП. Второй отдел обеспечивает охлаждение пьедестала до заданной температуры. В [3] предложен способ крепления ФП к пьедесталу, при котором сохраняется возможность его изгиба по одной оси во время охлаждения и утверждается (без ссылки на экспериментальные результаты), что возможность снятия напряжения в ФП через его изгиб увеличивает количество циклов охлаждения без потери связи между КМ и ФЧЭ.

Введение дополнительных компенсационных слоёв между пьедесталом и ФП. Классическим способом крепления ФП в криостате является приклеивание его к сапфиру (пластине Al_2O_3) с токопроводящими дорожками, обеспечивающими работу КМ. В [4] представлены результаты термоциклирования (от 300 до 77 К) гибридного ФП на основе плёнки КРТ на подложке CdZnTe ($KTR = 3,82$ мкм/(м·К)) и связанной через индиевые столбы с КМ ($KTR = 1,14$ мкм/(м·К)). Для ФП без крепления к пьедесталу после 200 циклов осталось около 300 контактов из 1920 индиевых соединений. Для случая когда ФП был приклеен к сапфировой пластине ($KTR = 3,23$ мкм/(м·К)) эпоксидной смолой, после 700 циклов оказалось разрушено чуть больше 300 контактов. Предлагается для уменьшения разрушения индиевых столбов дополнительно вводить компенсационные слои между ФП и пьедесталом. Например, под ФП, состоящий из слоя КРТ, подложки толщиной 500 мкм с $KTR = 3,82$ мкм/(м·К), КМ толщиной 480 мкм с $KTR = 1,14$ мкм/(м·К), добавляются следующие компенсационные слои: первый с KTR больше, чем у подложки, приклеивается эпоксидной смолой к КМ, потом приклеивается второй компенсационный слой с KTR , равным КМ. В [4] предлагаются и более сложные компенсирующие конструкции.

Утонение ФЧЭ. В [5] представлены результаты численного моделирования уровней напряжения в плёнке твёрдого раствора КРТ и подложке при разных толщинах (0,5, 10, ..., 500 мкм) при охлаждении ФП от 300 до 77 К. Рассмотрена структура ФП: сапфир — слой клея — кремниевый мультиплексор — индиевые столбы связи — плёнка КРТ — подложка для слоя КРТ. Результаты численного моделирования: монотонное снижение напряжения в плёнке КРТ (с 45–35 МПа) по мере утолщения подложки до 50 мкм и последующая стабилизация уровня напряжения около 30–40 МПа. В самой подложке для КРТ наблюдается явный минимум напряжения (30–31 МПа) для толщин около 20–50 мкм. Предлагается диапазон оптимальной толщины подложки для КРТ 50–100 мкм. К сожалению, не было проведено численного моделирования напряжений в индиевых столбах связи при охлаждении ФП.

Вышепредставленные данные не позволяют провести сравнительный анализ и выявить оптимальную конструкцию ФП и способ его крепления на охлаждаемом пьедестале криостата.

Цель данной работы — сравнение численным моделированием влияния разных конструкций фотоприёмников, состава, толщин компонент и способов крепления к пьедесталу в криостате на уровень деформационных нагрузок в краевых индиевых столбах в одних и тех же условиях, с помощью одних и тех же алгоритмов и программных пакетов.

Численный расчёт радиально-симметричной модели фотоприёмника GaAs(1) — In (кольцевые структуры) — Si — GaAs(2) при диаметре пластин 10 мм, где GaAs(1) — подложка для слоя КРТ, GaAs(2) — компенсационный слой. В модели диаметр

пластин составляет 10 мм, ширина индиевого кольца — 15 мкм, период между центрами колец составляет 30 мкм. При моделировании индиевые столбы ФП были заменены кольцевыми структурами из-за ограничения вычислительной мощности компьютера.

Способы фиксации модели на охлаждаемом пьедестале криостата: крепление с сохранением возможности изгиба и жёсткое крепление к сапфиру.

Вычислены уровни деформационных нагрузок в краевых индиевых кольцах после охлаждения до температуры 77 К при разных толщинах пластин GaAs(1), GaAs(2) и Si, а также разных способах крепления модели ФП к пьедесталу.

На рис. 1, а схематично представлена сборка из двух разных пластин. Между пластинами расположен соединительный слой. Для случая металлургического соединения биметаллических пластин этот слой называется «слой спая». В идеальном случае слой спая совпадает с нейтральным слоем, в котором деформационное напряжение минимально), что обеспечивает минимальное напряжение в слое спая. Для этого необходимо выполнение следующего условия:

$$(h_1/h_2)^2 = E_2/E_1,$$

где h — толщина слоя, E — модуль упругости (модуль Юнга) слоя, индекс — номер пластины.

При невыполнении данного условия нейтральный слой смещается на расстояние e от слоя спая:

$$e = (E_2 h_2^2 - E_1 h_1^2) / 2(E_1 h_1 + E_2 h_2).$$

Из-за разницы коэффициентов теплового расширения материалов при изменении температуры на ΔT градусов сборка изгибается. На рис. 1, б представлена схема сборки после изменения её температуры на ΔT градусов, а также показано распределение напряжения в сборке.

Кривизна нейтрального слоя ($\Delta\chi$) при этом составит

$$\Delta\chi = \frac{6(\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T}{4(h_1 + h_2) + (E_1 h_1^2 - E_2 h_2^2)^2 / E_1 E_2 h_1 h_2 (h_1 + h_2)}.$$

Напряжение в слое AB , удалённом от слоя соединения на расстояние y , в соответствии с законом Гука для области упругих деформаций имеет вид

$$\sigma_{AB} = E_1 \Delta l_{AB},$$

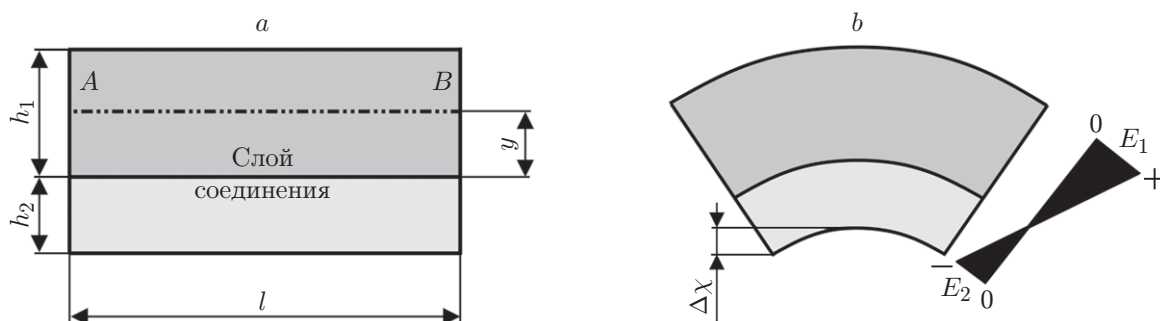


Рис. 1. Схематичное изображение сборки из двух пластин разных материалов: при комнатной температуре (а) и после изменения температуры на ΔT градусов (б)

где Δl_{AB} — изменение длины слоя AB .

Длина произвольного слоя AB в сборке при изменении температуры зависит от коэффициента температурного расширения самого материала (Δl_T) и упругого взаимодействия пластин между собой (Δl_y):

$$\Delta l_{AB} = \Delta l_{AB,T} + \Delta l_y, \quad l_{AB,T} = \Delta l_0 + y\Delta\chi,$$

где Δl_0 — изменение длины слоя спая. Изменение длины слоя AB , вызванное коэффициентом теплового расширения материала, можно записать в виде

$$\Delta l_y = \alpha \Delta T.$$

Таким образом, длина произвольного слоя AB в сборке (Δl_{AB}) при изменении температуры на ΔT градусов имеет вид

$$\Delta l_{AB} = \Delta l_0 + y \Delta\chi - \alpha \Delta T.$$

Отметим, что коэффициенты теплового расширения материалов не являются постоянной величиной, они зависят от диапазона изменения температуры. Так, если рассматривать охлаждение сборок flip-chip от комнатной температуры до 80 К, то изменяются коэффициенты теплового расширения Si, In и Al_2O_3 [2].

Сравнение между собой максимальных напряжений в индиевых столбах связи при разных толщинах пластин в ФП и разных способах крепления его на охлаждаемом пьедестале является сложной вычислительной задачей. Поэтому для численного моделирования были использованы пакеты программ COMSOL Multiphysics (метод конечных элементов) и Anaconda Python (визуализация варьирования толщин). При расчётах не рассматривались переходные процессы во время охлаждения, решалась стационарная задача методом конечных элементов. Деформации композитных структур, рассчитанные методом конечных элементов, показаны на рис. 2.

Из-за больших объёмов вычисления применяются различные варианты снижения объёмов расчёта. Так, в [6] слой с индиевыми столбами и эпоксидной смолой между ними заменили однородным эквивалентным слоем, применили масштабирование модели, когда численно исследовался только фрагмент ФП с последующим масштабированием результатов на всю сборку flip-chip. Здесь моделировался нагрев flip-chip ФП. Представлены результаты численного исследования напряжений в индиевых столбах связи для ФП при нагреве, и проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

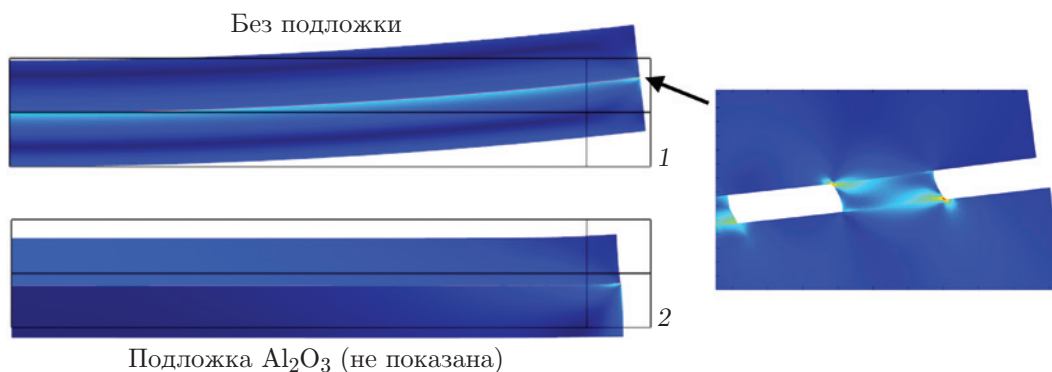


Рис. 2. Типичные преувеличенные деформации композитных структур: 1 — GaAs — In — Si, 2 — GaAs — In — Si — Al_2O_3 (показаны первые три слоя)

В [7] отмечается, что получаемые численные значения напряжений в материале ФП при нагреве зависят от сетки расчётов. Таким образом, сравнение результатов моделирования разными авторами становится не совсем корректным. Следовательно, необходимо моделировать напряжения в индиевых столбах связи при разных толщинах пластин в ФП и разных способах крепления его на охлаждаемом пьедестале параллельно, тогда полученные результаты будут сопоставимы между собой.

Была исследована радиально-симметричная модель ФП. Диаметры всех слоёв равны 10 мм. Толщины слоёв GaAs(1) и Si варьировались от 50 до 700 мкм, толщина компенсационного слоя GaAs(2) — от 0 до 700 мкм. Толщина слоя сапфира (Al_2O_3) превышала толщину пластин GaAs и Si. Это обусловлено требованием отсутствия искривления пластины сапфира при охлаждении. Индиевые столбы ФП (толщиной 5 мкм, диаметром 15 мкм и периодом квадратной ячейки 30 мкм) в модели заменены индиевыми кольцами высотой 5 мкм, толщиной 15 мкм и периодом между центрами колец 30 мкм. При охлаждении от 293,15 до 77 К максимальные напряжения (по Мизесу) в In регистрировались в кольце наибольшего диаметра. Напряжение в слое In возникает при неоднородной деформации пластин GaAs(1) и Si во время искривления ФП из-за разницы коэффициентов теплового расширения компонент. В табл. 1 представлены основные физические параметры GaAs, Si, Al_2O_3 и In, применяемые в вычислениях.

Схемы конструкций моделей ФП и результаты моделирования напряжений в In представлены на рис. 3 и 4.

Обсуждение результатов моделирования. Результаты вычисления уровней деформационных нагрузок в индиевых столбах связи в модели ФП после изменения температуры от 293,15 до 77 К для разных толщин её компонент и способов крепления к пьедесталу в криостате следующие.

Для фотоприёмника при закреплении его на охлаждаемом пьедестале криостата с сохранением возможности изгиба определена оптимальная конструкция: без GaAs(2), толщина пластин GaAs(1) и Si около 50 мкм. Уровень деформационных нагрузок в краевом индиевом кольце (ширина 15 мкм, толщина 5 мкм) при этом составил около 427 МПа. Для пластин GaAs(1) и Si без утонения (толщина 420 мкм) и без GaAs(2) уровень нагрузок составил 645 МПа. Введение компенсационного слоя дополнительно увеличивает уровень деформационной нагрузки в индиевом слое, например, при толщине GaAs(2) 420 мкм — 969 МПа.

Результаты расчёта уровней напряжений в краевом кольце In модели ФП (с разными толщинами пластин GaAs(1), Si и компенсационного слоя GaAs(2)) при креплении к

Таблица 1

Физические параметры GaAs, Si, Al_2O_3 , In при температурах 77 и 293,15 К, используемые в расчётах

Слой	КТР, мкм/(м·К)	Теплоёмкость при фиксированном давлении, Дж/(кг·К)	Плотность, кг/м ³	Тепло- проводность, Вт/(м·К)	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона, отн. ед.
GaAs	5,7	550	5316	33	85,9	0,31
Si	2,6	700	2329	130	170	0,28
In	2,65–2,91*	232,7	7437–7310	100–82,4	20,48–13,57	0,4168–0,472
Al_2O_3	2,97–5,38	60–764	3998–3990	156–35,5	397,8–392,6	0,228

Примечание: < * > — диапазоны значений, которые меняются при изменении температуры.

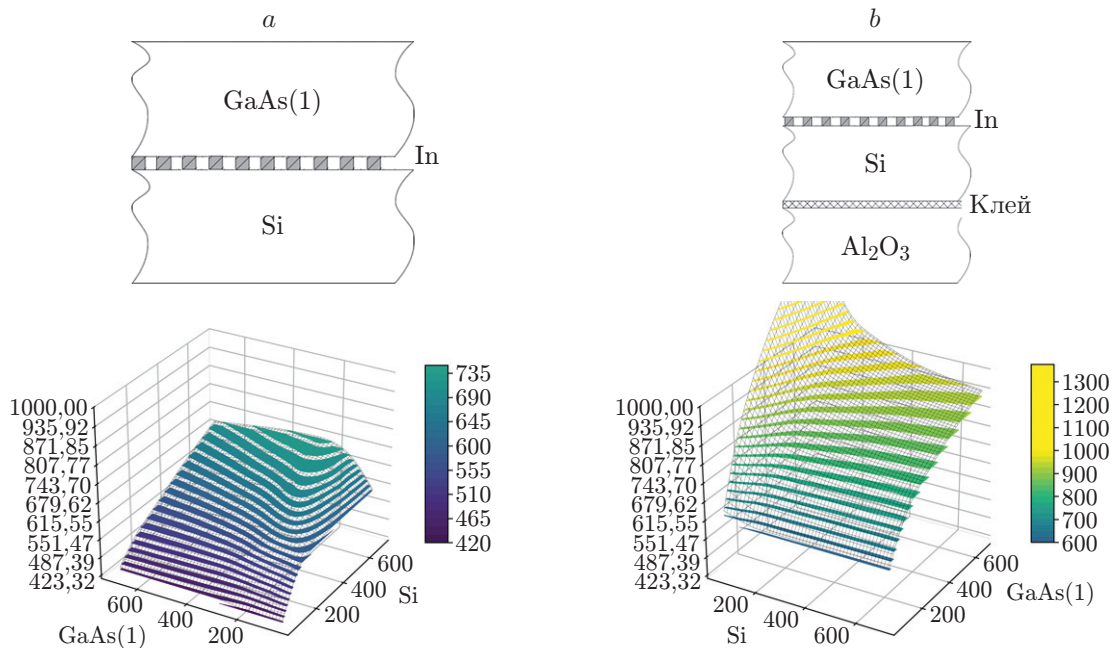


Рис. 3. Конструкции модели ФП и расчётные максимальные уровни напряжений в краевом кольце In при разных толщинах пластин GaAs и Si для разных способов крепления к охлаждаемому столику криостата: *a* — крепление модели ФП с сохранением возможности её изгиба во время охлаждения; *b* — жёсткое крепление модели ФП к сапфиру

охлаждаемому столику криостата с сохранением возможности её изгиба представлены на рис. 5, *a*.

При жёстком креплении модели на пьедестале криостата оптимальная конструкция — это компенсационный слой GaAs(2) толщиной 100 мкм и пластины GaAs(1) и Si толщиной 50 мкм. Уровень максимальных деформационных нагрузок в краевом индиевом кольце при этих условиях составил 600 МПа, а без GaAs(2) — 641 МПа. При жёстком креплении компенсационный слой уменьшает уровень максимальных деформационных нагрузок в краевом индиевом кольце. Например, при применении неутонённых пластин GaAs(1) и Si (толщиной 420 мкм) необходимо увеличить толщину компенсационного слоя GaAs(2) до 250 мкм. Деформационная нагрузка в слое индия составит при этом 860 МПа. Без компенсационного слоя GaAs(2) деформационная нагрузка в индиевом слое увеличивается до 889 МПа. Рассчитанные уровни напряжений в краевом кольце индия модели ФП при разных толщинах пластин GaAs(1), Si и GaAs(2) для жёсткого крепления к сапфиру показаны на рисунке 5, *b*.

Отметим, что уровни максимальных напряжений в краевом индиевом кольце зависят от расчётной сетки в методе конечных элементов, но конфигурации толщин, на которых достигаются оптимумы, от неё не зависят (расчёты проведены на другой более крупной сетке, и величина максимальных напряжений упала значительно).

В данном исследовании не рассматривались переходные процессы охлаждения ФП. При жёстком креплении ФП на пьедестале криостата охлаждение ФЧЭ и КМ происходит одновременно. Кремниевый мультиплексор начинает охлаждаться раньше, поскольку он жёстко закреплён на пьедестале. Охлаждение ФЧЭ осуществляется через индиевые столбы связи. Таким образом, при охлаждении возможен градиент температуры как в самих пластинах КМ и ФЧЭ, так и между ними. Предполагается, что в отдельные моменты

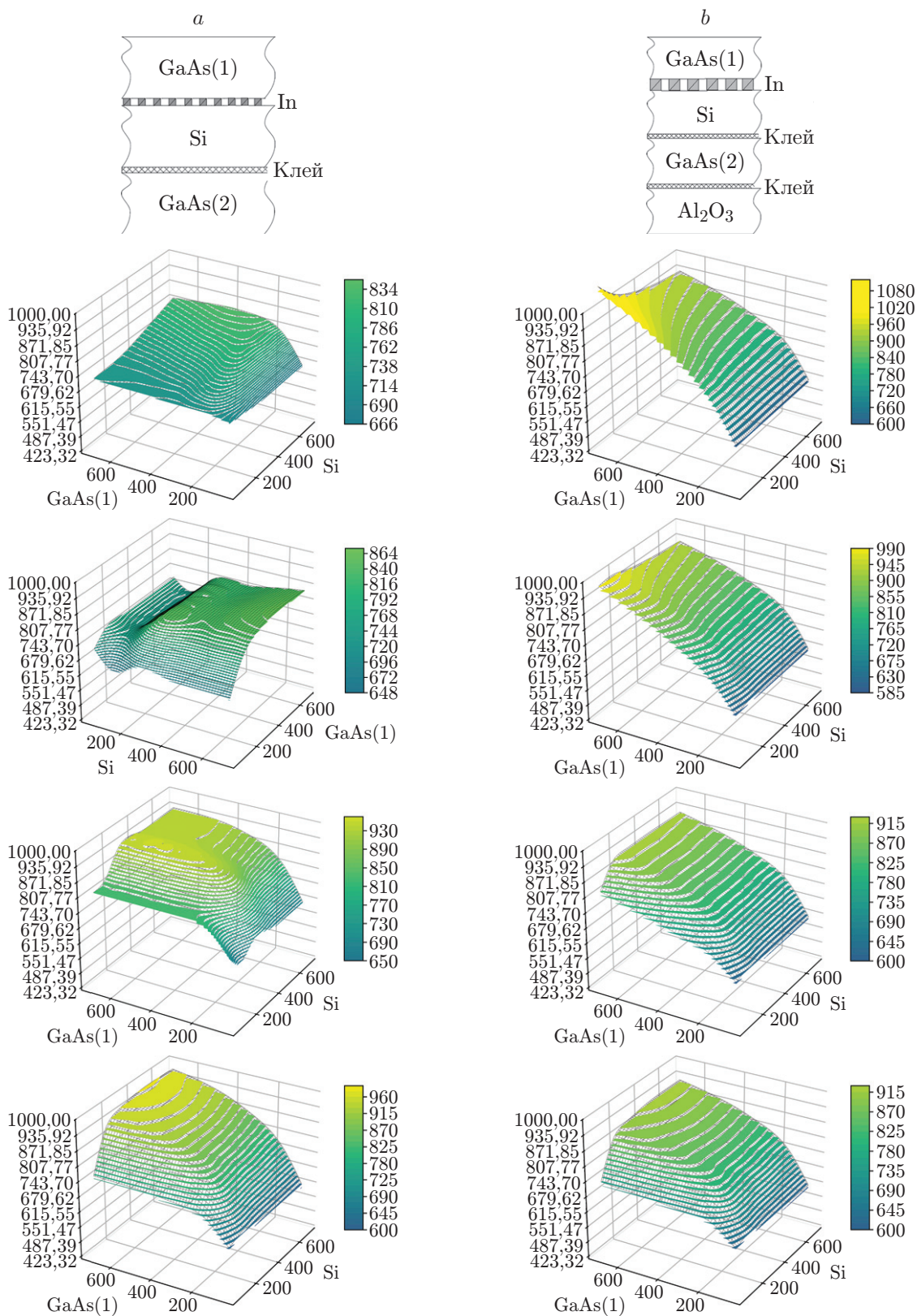


Рис. 4. Конструкции модели ФП и расчётные максимальные уровни напряжений в краевом кольце In при разных толщинах пластин GaAs(1), Si и разных толщинах GaAs(2) (50, 100, 250, 700 мкм): *a* — крепление модели ФП с сохранением возможности её изгиба во время охлаждения; *b* — жёсткое крепление модели ФП к сапфиру

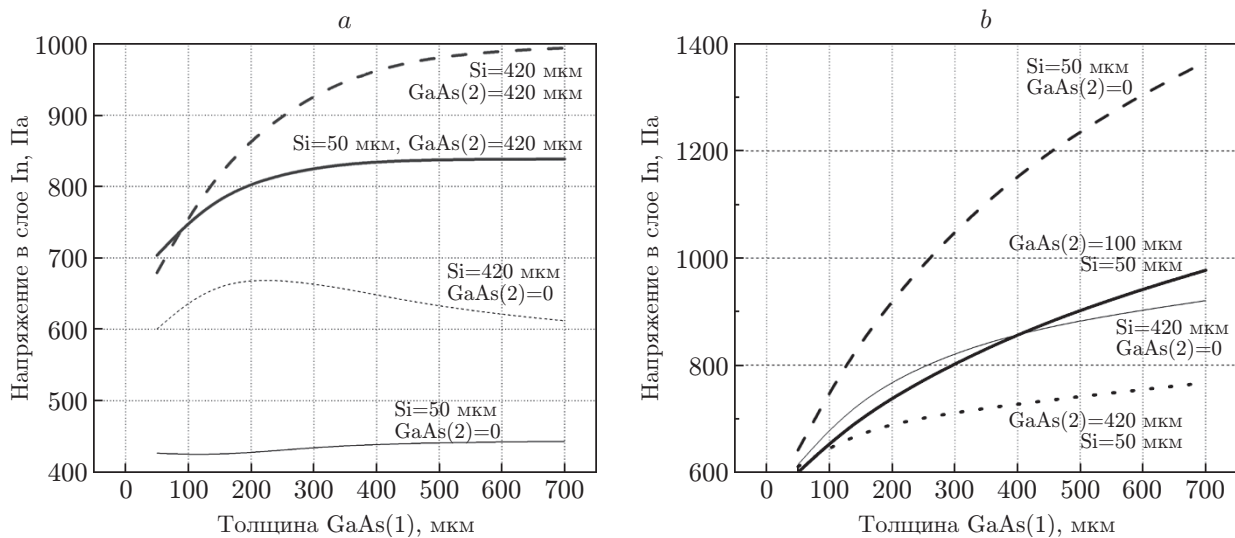


Рис. 5. Рассчитанные максимальные уровни напряжений в краевом кольце In модели ФП при разных толщинах пластин GaAs(1), Si и компенсационного слоя GaAs(2) для разных способов крепления к охлаждаемому столику криостата: *a* — крепление модели ФП с сохранением возможности её изгиба во время охлаждения; *b* — жёсткое крепление модели ФП к сапфиру

достигаются уровни деформационных нагрузок в индиевых столбах связи, превышающие рассчитанные. Крепление ФП, при котором сохраняется его подвижность при охлаждении, вероятно, увеличивает градиент температуры как между КМ и ФЧЭ, так и по их площади. Уровни деформационных нагрузок в индиевых столбах связи во время охлаждения ФП также не анализировались.

Кроме градиента температуры, при охлаждении ФП на уровни деформационных нагрузок в индиевых столбах связи оказывает влияние форма поверхности ФП и его компонент. Исследования [8, 9] подробно описывают формы поверхности компонент и самих ФП и влияние величины изгиба их поверхностей на количество выдерживаемых циклов охлаждения. Таким образом, исходные напряжения в ФЧЭ и КМ также влияют на уровни деформационных нагрузок в индиевых столбах связи, что требует дополнительных исследований.

Для численного расчёта предполагалось, что соединение между пластинами GaAs(1) и Si осуществляется по всей площади индиевого слоя. В действительности [10] соединение каждого столба с ответным индивидуально и возможно не по всей площади столба (в месте сварки индиевых столбов). Из-за уменьшения площади сварки индиевых столбов при периодических охлаждениях гибридной сборки разрыв осуществляется не в областях контакта индиевого столба со СБИС, а между индиевыми столбами в месте сварки. Результаты исследования увеличения площади сварки индиевых столбов при гибридизации ФЧЭ на основе плёнок КРТ на подложке GaAs представлены в [11, 12, 13]. Этот фактор также не учитывался в расчётах.

Заключение. В представленной работе определена оптимальная конструкция среди конфигураций, получаемых комбинированием крепления ФП к охлаждаемому столику криостата с сохранением возможности его изгиба, введения дополнительных компенсационных слоёв между пьедесталом и ФП, утонения ФЧЭ.

Рассмотрена радиально-симметричная модель flip-chip фотоприёмника, состоящая из пластин GaAs(1) — In — Si — GaAs(2).

При двух способах крепления модели к охлаждаемому пьедесталу криостата (с сохранением возможности изгиба модели при охлаждении до 77 К или жёстком креплении её к сапфиру) анализировались уровни деформационных нагрузок в краевом индиевом кольце при разных толщинах пластин (50–700 мкм). При сохранении возможности изгиба оптимальной толщиной пластин GaAs(1) и Si является 50 мкм, компенсационный слой GaAs(2) отсутствует. Уровень деформационных нагрузок в краевом индиевом кольце составил 427 МПа.

При жёстком креплении модели flip-chip фотоприёмника к охлаждаемому пьедесталу криостата через пластину сапфира необходимо утонение пластины GaAs(1) до 50 мкм и введение компенсационного слоя GaAs(2) толщиной 100 мкм. Уровень деформационных нагрузок в краевом индиевом кольце при этих условиях составил 600 МПа. Для варианта без утонения GaAs(1) и Si с жёстким креплением к охлаждаемому пьедесталу криостата через сапфировую плату с токопроводящими дорожками и варианта с компенсационным слоем GaAs(2) толщиной 250 мкм уровень деформационных нагрузок в краевом индиевом кольце возрастает до 860 МПа. Без компенсационного слоя GaAs(2) нагрузка на краевом индиевом столбе ещё выше — 889 МПа.

Благодарность. Авторы выражают благодарность к. т. н. В. Н. Федорину за участие в формировании модели фотоприёмника flip-chip.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зверев А. В., Сусяков А. О., Сабина И. В. и др.** Матричные фотоприёмные устройства формата 384 × 288 элементов для ИК-диапазона 8–10 мкм // *Успехи прикладной физики*. 2018. **6**, № 3. С. 224–230.
2. **Новитский Л. А., Кожевников И. Г.** Теплофизические свойства материалов при низких температурах. М: Машиностроение, 1975. 216 с.
3. **Пат. 2571452 РФ.** Способ сборки мозаичного фотоприёмного модуля большого формата из фотоприёмных модулей меньшей площади /А. П. Ковчавцев, И. И. Ли, А. А. Гузев, В. М. Ефимов, И. В. Мжельский. Опубл. 20.12.2015, Бюл. № 35.
4. **Pat. 5672545 US.** Thermally matched flip-chip detector assembly and method /Т. А. Trautt, Т. Е. Wolverton. Publ. 30.09.1997.
5. **Zhang H., Lu H.** Analysis of the thermal stress of IRFPA assembly using FEM // *Proc. SPIE*. 2008. **6835**. 68350J. DOI: 10.1117/12.757438.
6. **Krobie W., Bonfoh N., Dreistadt C. et al.** 3D modeling of high count fine pitch flip chip assemblies // *Proc. of the IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference*. Las Vegas, USA, 2013. P. 2319–2325. DOI: 10.1109/ECTC.2013.6575907.
7. **Davoine C., Fendler M., Marion F. et al.** Low temperature fluxless technology for ultra-fine pitch and large devices flip-chip bonding // *Proc. of the 7th Electronic Packaging Technology Conference*. Singapore, 7-9 Dec., 2005. Vol. 2. P. 639–645. DOI: 10.1109/ECTC.2005.1614480.
8. **Новоселов А. Р., Алдохин П. А., Маточкин А. Е. и др.** Оперативные методы контроля формы поверхностей компонент фотоприёмников flip-chip ИК диапазона // *Автометрия*. 2019. **55**, № 2. С. 70–80. DOI: 10.15372/AUT20190208.
9. **Алдохин П. А., Маточкин А. Е., Добровольский П. П.** Исследование разрушения гибридных фотоприёмников инфракрасного диапазона при многократных циклах охлаждения до температуры жидкого азота интерференционным методом // *Оптический журнал*. 2021. **88**, вып. 1. С. 69–75.
10. **Новоселов А. Р., Косулина И. Г.** Оперативный метод контроля сборок flip-chip // *Автометрия*. 2009. **45**, № 6. С. 119–122.

11. **Новоселов А. Р., Предеин А. В., Косулина И. Г. и др.** Оптимизация температуры сварки индиевых столбов в методе групповой сборки многоэлементных ФП // Прикладная физика. 2010. № 1. С. 73–77.
12. **Новоселов А. Р., Косулина И. Г., Паулиш А. Г. и др.** Оплавленные индиевые столбы в технологии сборки ИК ФПУ // Прикладная физика. 2010. № 5. С. 77–80.
13. **Новоселов А. Р., Косулина И. Г., Клименко А. Г. и др.** Повышение механической прочности гибридных фотоприёмников на основе гетероэпитаксиальных слоёв кадмий—ртуть—теллур // Автометрия. 2013. 49, № 1. С. 111–118.

Поступила в редакцию 27.12.2021

После доработки 04.01.2022

Принята к публикации 12.01.2022
