

На правах рукописи

Синев Леонид Станиславович

**Расчёт и выбор режимов электростатического
соединения кремния со стеклом по критерию
минимума остаточных напряжений**

Специальность 05.27.06 —
«Технология и оборудование для производства полупроводников,
материалов и приборов электронной техники»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Москва — 2016

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Рябов Владимир Тимофеевич

Официальные оппоненты: **Амиров Ильдар Искандерович**,
доктор физико-математических наук,
заместитель директора по научной работе
Ярославского Филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технологического института Российской академии наук (ЯФ ФТИАН РАН)

Жукова Светлана Александровна,
кандидат технических наук,
заместитель начальника центра — начальник
научно-технологического комплекса нано-
и микротехнологий НИЦ нанотехнологий
ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики» (ФГУП «ЦНИИХМ»)

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (МИЭТ)

Защита состоится «___» _____ 201__ г. в ___ ч. ___ мин. на заседании диссертационного совета Д212.141.18 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская д. 5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д212.141.18.

Автореферат разослан «___» _____ 201__ года.

Телефон для справок: +7 (499) 267-09-63.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д212.141.18,
доктор технических наук, профессор



Цветков Ю. Б.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Технология электростатического соединения пластин кремния и стекла (анодная посадка) стала одной из ключевых в производстве приборов электронной техники. Одной из целей применения данной технологии является изоляция чувствительного элемента от окружающей среды. Это касается механических и электрических воздействий, сохранения герметичности изолируемого объёма в таких приборах, как чувствительные элементы датчиков давления, микроакселерометры, высокочувствительные микромеханические гироскопы, высокочастотные резонаторы.

К преимуществам анодной посадки (по сравнению с диффузионной сваркой, и соединением за счёт расплавления стекла) относят: температуру процесса ниже температуры деградации металлизации, возможность сохранения герметичности соединения при использовании с технологиями формирования электрических межсоединений сквозь стекло или кремний, отсутствие требования механического прижатия.

Вследствие разнородности кремния и стекла после проведения их соединения возникают остаточные напряжения, вызванные разницей в тепловом расширении этих материалов. Эти напряжения могут влиять на такие ключевые характеристики, как: уход нулевого сигнала у чувствительных элементов датчиков давления, собственная частота у микроакселерометров и микрогироскопов, геометрическое положение мембран и балок у разнообразных микромеханических приборов. Таким образом, необходимо, сохранив преимущества технологии срачивания кремния и стекла, учесть и снизить влияние такого недостатка как описанные остаточные напряжения.

Большой вклад в развитие исследований технологии электростатического соединения кремния и стекла внесён советскими и российскими учёными Н. Н. Хоменко, Ю. М. Евдокимовым, С. П. Тимошенковым и др.

Несмотря на большое количество исследований применения технологии электростатического соединения кремния со стеклом, ряд вопросов остаётся невыясненным. С повышением требований к электронным приборам возросли требования к минимизации остаточных напряжений. Недостаточно данных по термомеханическим свойствам стёкол, подходящих для электростатического соединения с кремнием, в форме, удобной к применению в аналитических расчётах и в системах компьютерного моделирования. Недостаточно хорошо исследован выбор температуры соединения и предпосылки наличия температуры проведения соединения с минимальными остаточными напряжениями. Недостаточно подробно описано влияние соотношения толщин соединяемых пластин на возникающие после соединения напряжения.

Поэтому расчёт и выбор режимов электростатического соединения кремния со стеклом по критерию минимума остаточных напряжений является актуальной темой исследования.

Целью данной работы является научно обоснованный выбор эффективных режимов анодной посадки кремния на стекло, обеспечивающих минимальный уровень остаточных напряжений.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Исследовать зависимость температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) от температуры для стёкол, совместимых с анодной посадкой.
2. Разработать модели оценки остаточных напряжений, определить их возможности по учёту температурной зависимости ТКЛР, распределению напряжений по толщине материалов и подбору температуры соединения с минимальными остаточными напряжениями.
3. Разработать методику расчёта остаточных напряжений при использовании известных марок стёкол.
4. Предложить способ коррекции температуры и выбора толщины соединяемых деталей, обеспечивающих минимальную величину остаточных напряжений.
5. Разработать методику и провести экспериментальные исследования процесса соединения кремния со стеклом с измерением остаточных напряжений в соединении.

Методы исследований. Теоретические исследования проводились на основе теории напряжённого состояния в композиционных материалах, сопротивления материалов, математического анализа. В ходе исследований применялись расчёты напряжённо-деформированного состояния сборок пластин кремния и стекла с использованием компьютерных программных пакетов. Экспериментальные исследования осуществлялись на современных аналитических приборах, обработка результатов велась с помощью теории вероятностей и математической статистики.

Научная новизна:

1. Впервые взаимосвязь температуры проведения соединения кремния со стеклом и остаточных напряжений рассмотрена с использованием температурной зависимости истинных значений температурных коэффициентов линейного расширения материалов.
2. Впервые доказано существование соотношения толщин кремния и стекла, минимизирующего остаточные напряжения на поверхности кремния, за счёт взаимной компенсации деформаций вызванных тепловым расширением кремния и присоединяемого стекла.

Для минимизации остаточных напряжений на поверхности сплошного кремния необходимо выбирать толщину стекла:

- алюмосиликатного (SD-2, SW-YY) в 2,5–2,8 раза больше толщины кремния.
- боросиликатного (ЛК5, 7740, Borofloat 33) в 3 раза больше толщины кремния.

3. Впервые предложено рассчитывать температуру проведения соединения так, чтобы накопленная за время остывания относительная деформация была минимальной, что позволит минимизировать остаточные напряжения.

Практическая ценность работы:

1. Разработаны методики снижения остаточных напряжений, возникающих в технологии электростатического соединения кремния и стекла, повышающие функциональные и эксплуатационные характеристики приборов электронной техники.
2. Установлена возможность использования инженерной методики расчёта для оценки возможностей снижения остаточных напряжений и повышения эффективности применения различных марок стекла при срачивании с кремнием.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования зависимости ТКЛР различных марок стекла от температуры в интервале от минус 100 до 500 °С.
2. Методика минимизации остаточных напряжений за счёт выбора марки стекла для электростатического соединения с кремнием и режима проведения процесса.
3. Конструктивно-технологические методы производства чувствительных элементов приборов электронной техники при наличии требований по минимизации механических напряжений, возникающих в результате применения технологии электростатического соединения кремния со стеклом.

Достоверность полученных результатов основывается на проведённом комплексном анализе результатов теоретических данных и экспериментальных исследований. Результаты экспериментов обработаны и подтверждены статистическими методами. Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации обоснованы теоретическими решениями и экспериментальными данными и не противоречат известным положениям.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры электронных технологий в машиностроении МГТУ им. Н.Э. Баумана, на научно-технических конференциях «Молодёжь в науке» ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» (г. Саров, октябрь 2008 г., октябрь 2014 г.), на научно-технических конференциях молодых учёных ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова» (г. Москва, март 2010 г., март 2013 г., март 2016 г.), на научно-технических конференциях молодых специалистов Росатома «Высокие технологии атомной отрасли. Молодёжь в инновационном процессе» (ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Нижний Новгород, сентябрь 2015 г. (доклад отмечен дипломом за активную научную деятельность и перспективные исследования), сентябрь 2016 г.), на 6-ом

международном МЭМС-Форуме 2016 (Курский государственный университет, г. Курск, июнь 2016 г.).

Личный вклад автора. Диссертация является завершённой работой, в которой обобщены результаты исследований, полученные лично автором и в соавторстве. Участие в работе каждого соавтора отражено в совместных публикациях. Совместно с научным руководителем был определён план работы, разработаны основные теоретические положения главы 3. Личный вклад автора включает: проведение анализа современного состояния исследований в области использования технологии электростатического соединения кремния со стеклом; разработку математических моделей, позволяющих прогнозировать остаточные напряжения в зависимости от режима проведения процесса срачивания кремния со стеклом и их термомеханических свойств; проведение экспериментов по измерению температурной зависимости коэффициентов теплового расширения стёкол; проведение экспериментов по спектроскопии комбинационного рассеяния света на образцах соединённых пластин стекла и кремния; обработку экспериментальных данных и формулировку рекомендаций по использованию результатов работы.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 12 научных публикациях общим объёмом 3,3 п. л., 4 из которых находятся в изданиях из перечня рекомендованных ВАК РФ (1,3 п. л.), 6 — в тезисах докладов (1,4 п. л.).

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих выводов и заключения. Полный объём диссертации составляет 119 страниц с 29 рисунками и 12 таблицами. Список литературы содержит 124 наименования.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность, определена цель и поставлены задачи работы, сформулированы положения, определяющие новизну и практическую ценность полученных результатов, перечислены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлены результаты анализа современного состояния исследований в области применения технологий герметичного соединения при изготовлении электронной техники. Представлен обзор современных технологий, определены их достоинства и недостатки. Углублённо рассмотрены вопросы исследования и применения технологии электростатического соединения кремния со стеклом.

Электростатическое соединение (анодная посадка) — это технология герметичного соединения стекла с высоким содержанием окислов щелочных металлов с металлом или полупроводником при повышенной температуре и приложенном высоком напряжении. Будучи изначально разработанной

для соединения стекла с металлами, данная технология получила широкое распространение в микроэлектронике для соединения кремния со стеклом.

Процесс электростатического соединения проводится при температуре от 180 до 500 °С как на воздухе, так и в вакууме. Электростатическое притяжение между стеклом и кремнием исключает необходимость приложения значительного усилия к соединяемым подложкам в процессе соединения.

Кремниевая пластина помещается на стеклянную пластину. Соединяемые поверхности нагревают. Отрицательный электрод источника высокого напряжения прикладывают к стеклянной пластине, а положительный электрод — к кремниевой пластине. Значение приложенного напряжения составляет от 200 до 1500 В. Время проведения процесса в среднем составляет 30 минут.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию зависимостей температурных коэффициентов линейного расширения стёкол от температуры. Исследованы термомеханические свойства и состав основных марок отечественного и зарубежного стекла, применяемого для электростатического соединения с кремнием — ЛК5, Schott Borofloat 33, Corning 7740, Hoya SD-2.

Для изучения химического состава рассмотренных стёкол использовался метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). РФЭС — количественный спектроскопический метод исследования элементного состава, химического и электронного состояния атомов, присутствующих в материале, основанный на явлении внешнего фотоэффекта. Измерения химического состава образцов стёкол были проведены на установке Theta Probe Angle-Resolved X-ray Photoelectron Spectrometer (ARXPS) System. Полученный химический поэлементный состав приведён в Таблице 1.

Таблица 1.

Результаты измерения химического состава стёкол

Марка стекла	Компоненты стекла, ат. %							
	О	Si	В	Al	Na	К	Mg	Zn
Borofloat 33	64,44	30,60	3,37	1,12	0,33	0,14	0,00	0,00
Corning 7740	63,68	29,20	5,24	1,26	0,47	0,15	0,00	0,00
ЛК5	63,19	31,28	2,55	1,34	0,93	0,07	0,64	0,00
Hoya SD-2	63,59	23,72	1,11	9,29	0,56	0,12	0,95	0,67

Для получения экспериментальных данных в интервале температур от 130 до 800 К (от минус 143 до 526 °С) для стёкол Borofloat 33 и ЛК5, и от 170 до 780 К (от минус 100 до 500 °С) для стёкол Corning 7740 и SD-2 использовался термомеханический анализатор ТМА 7100 SII Nanotechnology. Прибор измеряет линейные размеры образца в условиях тепловых и механических нагрузок.

Измерялось по три образца длиной $(20 \pm 0,1)$ мм для каждой марки стекла, результаты измерений затем усреднялись. Линейное приращение длины и длину образца при комнатной температуре измеряли с помощью зонда из кварцевого стекла, опирающегося на образец с силой 0,2 Н. Перед началом измерений термокамеру анализатора охлаждали. Последующий нагрев проводили со скоростью 10 К/мин. Значения температуры и линейного приращения длины регистрировались автоматически программным обеспечением термомеханического анализатора через равные промежутки времени. Для каждого образца было получено по 20 экспериментальных точек в интервале от 129 до 800 К с шагом не менее 35 К. По окончании измерений для каждого образца проводили программную коррекцию искажений, вносимых материалом колбы и зонда, с использованием эталона боросиликатного стекла SRM731.

Относительная погрешность косвенных измерений ТКЛР стёкол не превышает ± 5 %. Функции, аппроксимирующие экспериментальные данные, получены методом наименьших квадратов. Данные функции имеют вид полиномов:

$$P(T) = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3,$$

где a , b , c , d — коэффициенты полинома.

Результаты аппроксимации экспериментальных данных ТКЛР полиномами 3-го порядка сведены в Таблицу 2. В таблице обозначены: RSS — сумма квадратов регрессионных остатков; MSE — среднеквадратичная ошибка; SER — стандартная ошибка регрессии. Полученные стандартные ошибки регрессий не превышают рассчитанных относительных погрешностей косвенных измерений.

Таблица 2.

Результаты аппроксимации экспериментальных значений температурной зависимости ТКЛР $\alpha(T)$, 1/К

Марка стекла	a , 10^{-6}	b , 10^{-8}	c , 10^{-11}	d , 10^{-14}	RSS, 10^{-14}	MSE, 10^{-15}	SER, 10^{-8}
Corning 7740	2,893	0,500	-1,231	0,740	23,0	14,0	12,0
Vorofloat 33	1,628	1,040	-2,198	1,398	5,9	3,9	6,2
ЛК5	1,123	1,607	-3,496	2,435	25,0	17,0	13,0
Нояа SD-2	-0,193	1,453	-1,847	0,910	9,8	5,5	7,4

В **третьей главе** описаны существующие модели расчётной оценки остаточных напряжений в соединениях кремния со стеклом. Предложены две новые модели на основании общей теории сопротивления материалов и классической теории слоистых композитов с дополнительным учётом температурной зависимости коэффициентов теплового расширения. Приведены примеры применения этих моделей на исходных данных, полученных

в предшествующей главе. В завершении главы 3 даны рекомендации по последовательности проведения расчётной оценки остаточных напряжений.

В модели двух тонких слоёв изменения размеров оценивают в плоскости перпендикулярной плоскости соединения. Остаточные напряжения в стекле и кремнии в этой модели рассчитываются по следующим формулам:

$$\sigma_g(T) = \int_{T_b}^{T_w} \frac{E_g(T)}{1 + \left(\frac{E_g(T)}{E_{si}(T)}\right) \cdot \left(\frac{h_g}{h_{si}}\right)} (\alpha_{si}(T) - \alpha_g(T)) dT,$$

$$\sigma_{si}(T) = \int_{T_b}^{T_w} \frac{E_{si}(T)}{1 + \left(\frac{E_{si}(T)}{E_g(T)}\right) \cdot \left(\frac{h_{si}}{h_g}\right)} (\alpha_g(T) - \alpha_{si}(T)) dT,$$

где для стекла и кремния, в соответствии с индексами: σ_g , σ_{si} — напряжения в деталях, соединённых при температуре T_b , возникающие при температуре T_w , Па; $E_g(T)$, $E_{si}(T)$ — модули упругости первого рода, Па; h_g , h_{si} — толщины соединяемых деталей, м; $\alpha_g(T)$, $\alpha_{si}(T)$ — ТКЛР материалов, $1/\text{K}$.

Во второй модели детали рассматриваем как многослойный композиционный материал под тепловой нагрузкой. В качестве координатной плоскости xy принимаем плоскость, лежащую до нагружения сборки посередине между её верхней и нижней поверхностями, то есть срединную плоскость многослойной пластины. Рисунок 1 иллюстрирует модель слоистого композита. Положительным направлением оси z считаем направление вниз.

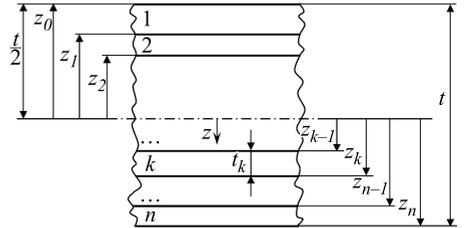


Рисунок 1. Иллюстрация модели слоистого композита:

t — толщина многослойной пластины;
1, 2, ..., k, ..., n — номер слоя

Зависимость для определения остаточных напряжений в любой плоскости внутри рассматриваемой сборки параллельной срединной поверхности

$$\sigma = \mathbf{Q} (\varepsilon^0 + z (-\mathbf{D} - \mathbf{B}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B})^{-1} (\mathbf{B}\mathbf{A}^{-1})\mathbf{N}^T + (\mathbf{D} - \mathbf{B}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B})^{-1}\mathbf{M}^T) - \int_{T_b}^{T_w} \alpha(T) dT,$$

где σ — вектор напряжений, Па; \mathbf{Q} — преобразованная матрица жёсткости каждого слоя, Па; ε^0 — относительное удлинение срединной поверхности многослойной композитной пластины (по осям); z — расстояние, измеряемое от срединной поверхности, м; \mathbf{A} — матрица жёсткости при растяжении

(мембранная жёсткость), Н/м; \mathbf{B} — матрица жёсткости изгиб-растяжение (смешанная жёсткость), Н; \mathbf{D} — матрица жёсткости при изгибе (изгибная жёсткость), Н·м; \mathbf{N}^T — усилие, вызванное тепловым воздействием, отнесённое к единице длины линий, ограничивающих элемент рассматриваемой поверхности, Н/м; \mathbf{M}^T — момент силы, вызванный тепловым воздействием, отнесённый к единице длины линий, ограничивающих элемент рассматриваемой поверхности, Н; $\alpha(T)$ — вектор ТКЛР материала, 1/К.

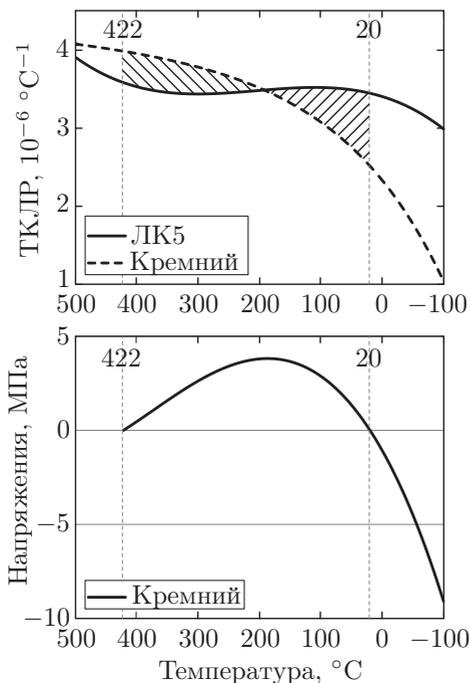


Рисунок 2. Формирование остаточных напряжений в процессе охлаждения на примере соединения стекла ЛК5 с кремнием

нее стекла ($\alpha_{si} < \alpha_g$). Величина прогиба начинает уменьшаться. Растягивающие напряжения в кремнии так же пропорционально снижаются. При достижении некоторой температуры совокупная накопленная деформация становится нулевой. Отсутствует прогиб пластин и остаточные напряжения в кремнии и стекле равны нулю.

Определить температуру проведения процесса электростатического соединения, обеспечивающую минимальные напряжения при заданной рабочей температуре, можно графически. Области, отсеённые линиями температур и графиков ТКЛР стекла и кремния по обе стороны от точки пересечения графиков ТКЛР, должны быть равными (заштрихованная

Остаточные напряжения формируются в процессе охлаждения после завершения процесса анодной посадки. Рассмотрим на примере стекла ЛК5 и кремния (см. Рисунок 2).

При температуре соединения в соединённых пластинах не возникает остаточных напряжений поскольку соединённые кремний и стекло имеют одинаковую длину. В процессе охлаждения, пока $\alpha_{si} > \alpha_g$ (кремний сжимается быстрее стекла), увеличивается прогиб пластин (вогнутостью в сторону пластины кремния). Также увеличиваются растягивающие напряжения внутри пластины кремния (при сжимающих напряжениях, их носитель стремится расширяться, при растягивающих напряжениях — сжаться). По достижении $\alpha_{si} = \alpha_g$, прогиб перестаёт увеличиваться, достигнув максимального значения. При продолжении охлаждения кремний сжимается медленнее

область на Рисунке 2). Для аналитического определения температуры ненапряжённого соединения интеграл разности температурных зависимостей ТКЛР стекла и кремния от рабочей температуры до температуры в момент подачи высокого напряжения должен равняться нулю. На основании измеренных данных (см. Таблицу 2) можно заключить, что для ЛК5 и рабочей температуры 20 °С температура соединения, обеспечивающая минимальные остаточные напряжения, составляет 422 °С.

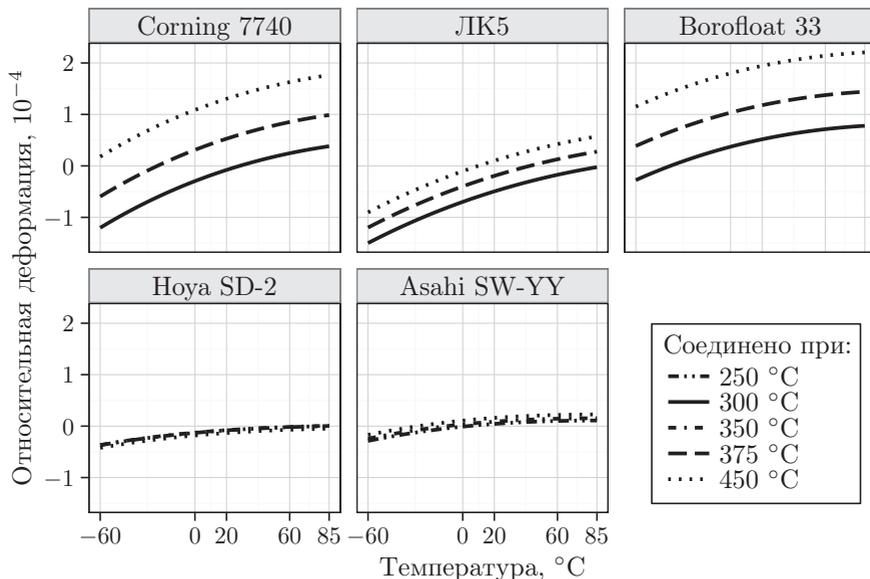


Рисунок 3. Расчётная оценка накапливаемой относительной деформации в области рабочих температур сборки кремний–стекло для разных стёкол

Расчётные значения накапливаемой относительной деформации приведены на Рисунке 3. Учёт зависимости ТКЛР от температуры влияет на расчётные значения напряжений. На Рисунке 4 построены расчётные значения накапливаемой относительной деформации при температуре 20 °С в зависимости от температуры соединения кремния с разными марками стекла для двух случаев применяемых в расчётах значений ТКЛР: постоянного среднего значения в широком интервале температур и нелинейно зависящего от температуры. Графики построены на основе следующей формулы:

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \int_{T_b}^{T_w} (\alpha_g(T) - \alpha_{si}(T)) dT,$$

где Δl — изменение линейного размера тела, м; l_0 — начальный размер тела, м.

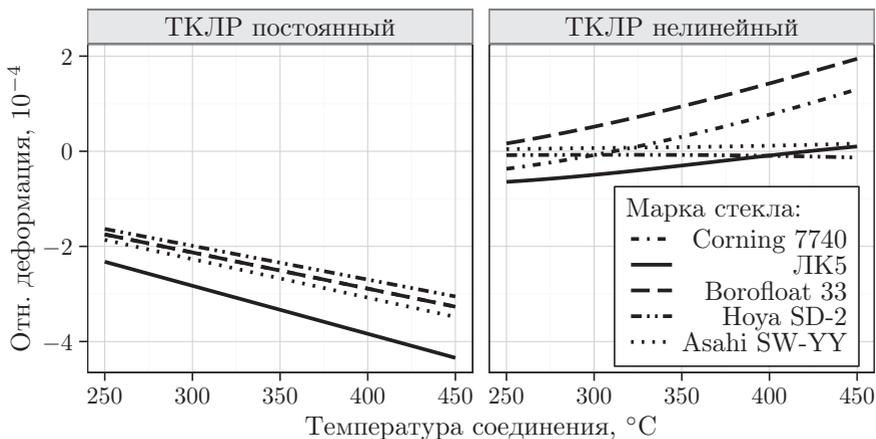


Рисунок 4. Расчётная оценка накапливаемой относительной деформации при температуре 20 °C в зависимости от температуры соединения сборки кремний—стекло для стёкол разных марок

В расчётах по модели двух тонких слоёв учёт толщины материалов влияет только на величину остаточных напряжений. В модели многослойного композиционного материала учёт толщины материалов влияет ещё и на знак остаточных напряжений.

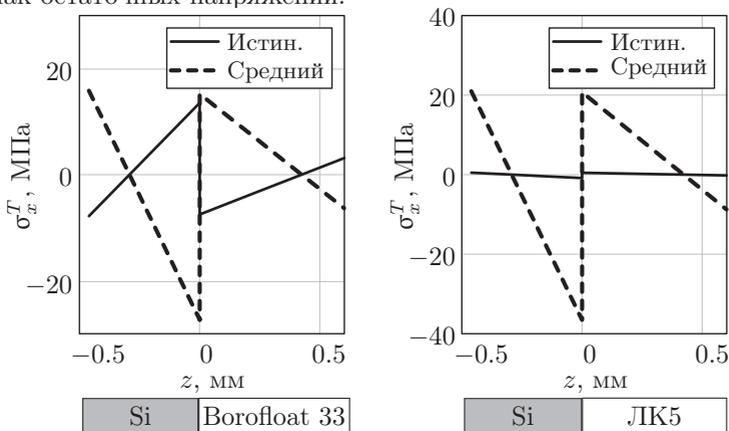


Рисунок 5. Расчётная оценка остаточных напряжений в кремнии для двух стёкол (модель многослойного композиционного материала для истинных и средних ТКЛР) при $T_w = 20$ °C, $T_b = 400$ °C

На Рисунке 5 графиками показана расчётная оценка по модели многослойного композиционного материала остаточных напряжений по толщине сборки при температуре 20 °C в зависимости от температуры соединения с разными марками стекла. Видно, что результаты заметно отличаются.

Из расчёта, проиллюстрированного Рисунками 3 и 4, видно, что между разными марками стекла есть различие как в разбросе (вариации) остаточ-

ных напряжений в зависимости от рабочей температуры, так и в разбросе (вариации) остаточных напряжений в зависимости от температуры соединения.

В Таблицу 3 сведены рассчитанные по модели двух тонких слоёв разбросы для пяти марок стёкол, применяемых при проведении анодной посадки в разных странах мира. Для расчёта использованы толщина кремния 460 мкм, стекла — 600 мкм.

Значения разброса напряжений, связанного с изменением температуры соединения, σ_b , показывают степень влияния изменения температуры соединения кремния с данными марками стёкол на получаемые напряжения.

Существует такая толщина стекла $h_g = H_0 \cdot h_{si}$, при которой напряжения на поверхности кремния будут минимальными во всём рабочем диапазоне температур. Эта же толщина будет толщиной смены знака напряжений. Она связана с параметрами жёсткости стекла (Таблица 4).

В случае учёта температурной зависимости модуля Юнга материалов в расчётах, для определения оптимальной толщины нужно рассматривать каждую конкретную комбинацию стекла и кремния с учётом всех допустимых диапазонов температур соединения и их влияния на напряжения в рабочем диапазоне. При этом может быть найден узкий диапазон соотношений толщин стекла и кремния, удовлетворяющий целям оптимизации.

В случае структурированных поверхностей, например мембранных структур, имеет место несплошной контакт соединяемых кремния и стекла. Для таких случаев применяется моделирование конечными элементами. Описанные ранее модели позволяют облегчить подготовительные шаги и область поиска для задания граничных условий.

Моделирование методом конечных элементов подтверждает форму эпюр расчётных напряжений и возможность снижения напряжений

Таблица 3.

Расчётные вариации остаточных напряжений для различных марок стёкол

Марка стекла	σ_w	σ_b
ЛК5	7,5	3,8
Corning 7740	6,5	4,9
Schott Borofloat 33	5,1	8,7
Hoya SD-2	3,5	0,3
Asahi SW-YY	2,2	0,4

Примечание — расчётные разбросы (вариации) остаточных напряжений по модели двух тонких слоёв, МПа: $\sigma_w = |\sigma_{si}^{-60} - \sigma_{si}^{85}|$ — в рабочем диапазоне температур; $\sigma_b = |\sigma_{si}^{250} - \sigma_{si}^{450}|$ — в диапазоне допустимых температур соединения.

Таблица 4.

Расчётное значение оптимального отношения толщины стекла к толщине кремния (для неструктурированных материалов)

Марка стекла	E , ГПа	ν	H_0
Corning 7740	62,75	0,200	3,12
Borofloat 33	64,00	0,200	3,09
ЛК5	68,45	0,184	3,05
Asahi SW-YY	82,00	0,200	2,76
Hoya SD-2	86,89	0,244	2,54

за счёт подбора толщин материалов. На Рисунке 6 показаны результаты моделирования конечными элементами сборки кремниевого элемента размерами $4 \times 4 \times 0,46$ мм с мембраной толщиной 50 мкм и стеклянного элемента размерами 4×4 мм нескольких толщин. Площадь области соединения со стеклом составляла половину от площади поверхности стеклянного элемента. Температура проведения смоделированного соединения 300°C . Марка стекла — ЛК5. Расчётная оптимальная толщина стекла для сплошного кремния такой толщины — 1400 мкм. Видно, что вычисляемая оптимальная толщина стала меньше пропорционально площади соединения со стеклом.

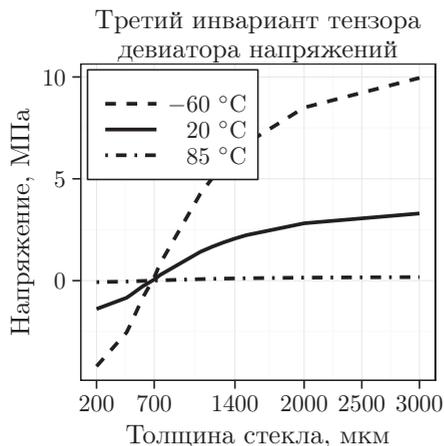


Рисунок 6. Смоделированная оценка остаточных напряжений на открытой поверхности кремниевой мембраны для различных толщин стекла ЛК5 при нескольких рабочих температурах

В четвёртой главе описаны эксперименты, проведённые для подтверждения утверждений из предыдущих глав. Описаны исследования и практический опыт по снижению остаточных напряжений посредством термообработки. Предложена методика минимизации остаточных напряжений, представленная в виде шагов для разработчика прибора. Также описаны сложности, на которые стоит обратить внимание при разработке современной электронной техники с применением технологии электростатического соединения.

Метод рамановской спектроскопии (РС) (в отечественной литературе известный как спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) света) применяется для исследования спектров электронных возбуждений и оптических фононов в разных веществах. Метод РС основан на эффекте неупругого рассеяния света на возбуждениях системы при воздействии лазерного излучения. Исследуется сдвиг частоты отражённого лазерного излучения.

На дисперсионном Раман микроскопе Nicolet DXR Spectrometer измеряли пластины диаметром 100 мм кремния марки КЭФ (кремний электронного типа проводимости, легирующий элемент — фосфор) односторонней (ОП) и двусторонней полировки (ДП) с удельным сопротивлением $4,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ в свободном состоянии и после соединения с пластинами стекла марки Vогоfloat 33. Для возбуждения использовался лазер с длиной волны 633 нм. Апертура устанавливалась в 25 мкм с формой отверстия. Использовался объектив 10x/0.25 VD и решётка разрешением 1200 линий/мм.

Рамановская спектроскопия поверхности кремния качественно подтвердила повышение величины напряжений с повышением температуры у соответствующих образцов.

Метод поляризационно-оптического измерения разности хода лучей основан на явлении двулучепреломления, которое наблюдается в напряжённом стекле при прохождении через него луча линейно-поляризованного света, и заключается в разложении луча на два: обыкновенный и необыкновенный, распространяющиеся с различными скоростями и вследствие этого имеющие при выходе из напряжённого стекла разность хода.

Для экспериментальной проверки распределения напряжений использовались пластины кремния марки КЭС (кремний электронного типа проводимости, легирующий элемент — сурьма) диаметром 60 мм ориентации {100} с удельным сопротивлением 0,01 Ом·см и прямоугольные пластины стекла ЛК5 размерами 30 × 50 × 4,5 мм. Соединения были проведены при температуре от 330 до 350 °С. Измерения величины двулучепреломления в стекле проводились на полярископе-поляриметре ПКС-250.

В сборках стекло—кремний наблюдалась смена знака напряжений в стекле от растягивающих к сжимающим по мере удаления от границы соединения, что хорошо соотносится с расчётными результатами, приведёнными на Рисунке 5 на странице 10.

Для исследования влияния термообработки на остаточные напряжения использовались кристаллы кремния размером 4 × 4 мм и толщиной 0,4 мм с вытравленной полостью. Они были предварительно электростатически соединены с пьедесталами из стекла ЛК5 толщиной 5 мм при температуре 440 °С. Ширина обода контакта кремния со стеклом составляла 0,7 мм.

Первый вариант термообработки: нагрев до температуры (415±30) °С, выдержка 60 минут и затем неуправляемое охлаждение. Второй вариант — нагрев до температуры (440±30) °С, выдержка 15 минут и затем управляемое охлаждение со скоростью не превышающей 3 °С/мин. Охлаждение проводилось до температуры 200 °С, на которой проходила выдержка 30 минут. Затем образцы охлаждались в неконтролируемом режиме. Величина остаточных напряжений в стекле для каждого из вариантов была снижена за счёт этой термообработки более чем в 2 раза.

Проведены эксперименты по снижению остаточных напряжений за счёт управляемого охлаждения. Среднеарифметическая величина остаточных напряжений в стекле у образцов с управляемым охлаждением составила 63 % от исходного значения.

Результаты экспериментов продемонстрировали возможность снижения внутренних механических напряжений при помощи термообработки и возможность совмещения процессов соединения и последующего отжига. Для стекла ЛК5 возможно снижать напряжения за счёт охлаждения со скоростью 2 °С/мин. Предположительно, этот вывод можно распростра-

нить и на другие боросиликатные стёкла, совместимые с анодной посадкой: Schott Borofloat 33 и Corning 7740.

Проведённые автором диссертационного исследования эксперименты по проведению процесса в режиме ограничения тока средствами импульсного источника высокого напряжения (за счёт плавного нарастания подводимой к пластинам разности потенциалов, использовалось ограничение до уровня плотности тока $0,4 \text{ А/м}^2$) продемонстрировали снижение риска возникновения прожигов стекла и локального перегрева.

На основании описанных в третьей главе примеров применения моделей оценки остаточных напряжений в работе предложены следующие шаги минимизации напряжений при разработке конструкции приборов электронной техники:

1. Определить рабочий диапазон температур прибора и верхнюю границу температуры соединения.
2. Получить термомеханические характеристики кремния и стекла, доступных к применению.
3. Выбрать марку стекла, сравнив эти характеристики.
4. По модели двух тонких слоёв примерно определить температуру проведения процесса.
5. При необходимости, учесть несимметричность распределения напряжений в рабочем диапазоне температур, соответствующим образом подобрав температуру соединения.
6. Выбрать толщину стекла (с учётом поправки на площадь соединения), если конструкция позволяет.
7. По возможности, провести более точное моделирование методом конечных элементов.
8. При необходимости повторить шаги, начиная с 3.

В общих выводах и заключении приведены краткие выводы по результатам проведённых в работе исследований.

В диссертации поставлена и решена научно-техническая задача исследования методов снижения остаточных напряжений при электростатическом соединении кремния со стеклом.

Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы при разработке и производстве приборов электронной техники с использованием технологии электростатического соединения, таких как микрорезонаторы, микрореле, микроакселерометры, микрогироскопы, чувствительные элементы датчиков давления. Проведённые расчёты и сделанные выводы могут способствовать импортозамещению зарубежных марок стекла в отечественных приборах электронной техники.

Дальнейшая разработка темы может состоять в разработке аналитических моделей оценки распределения остаточных напряжений в микрообработанном кремнии, с использованием температурной зависимости истинных значений ТКЛР материалов. Кроме того, востребованными будут

модели, учитывающие изменение свойств стекла, связанное с переносом ионов в результате проведения процесса электростатического соединения. Для этого также потребуется дополнительное исследование свойств стёкол как по составу, так и по анализу связи подвижности ионов с температурой и подводимой разностью потенциалов.

Общие выводы по работе

1. Расчётным путём выявлено, что для электростатического соединения с минимальными остаточными напряжениями подбор стекла, согласованного с кремнием по ТКЛР, следует осуществлять по критерию минимальности накапливаемой разности между ТКЛР, в процессе охлаждения с температуры соединения до диапазона рабочих температур прибора.
2. Для моделирования сборок кремния со стёклами марок ЛК5, VoroFloat 33, 7740, SD-2 в диапазоне температур от минус 100 до 500 °С следует использовать полученные автором диссертационной работы температурные зависимости ТКЛР для этого диапазона температур.
3. Показано, что предварительный расчёт по моделям двух тонких слоёв и многослойного композиционного материала с учётом динамики накопления остаточных напряжений повышает эффективность применения моделирования методом конечных элементов.
4. Для минимизации остаточных напряжений на поверхности сплошного кремния необходимо выбирать толщину стекла:
 - алюмосиликатного (SD-2, SW-YY) в 2,5–2,8 раза больше толщины кремния.
 - боросиликатного (ЛК5, 7740, VoroFloat 33) в 3 раза больше толщины кремния.

Это объясняется разницей в согласованности жёсткости стекла и кремния. Остаточные напряжения на поверхности кремния минимизируются за счёт компенсации деформаций, вызванных тепловым расширением кремния, деформациями, вызванными воздействием присоединённого стекла.

5. При охлаждении сборки со скоростью не более 2 °С/мин после окончания подачи высокого напряжения происходит снижение остаточных напряжений в стекле (например в ЛК5, соединённом с кремнием при температуре 440 °С, до 63 % от уровня напряжений при неконтролируемом охлаждении). Это объясняется релаксацией аморфной структуры стекла.
6. Рекомендуется проводить электростатическое соединение в режиме ограничения тока, что снижает риски локального перегрева границы кремний—стекло и последующего прожига стекла.

Наиболее значимые публикации автора по теме диссертации

1. Синев Л. С., Рябов В. Т. Согласование коэффициентов термического расширения при электростатическом соединении кремния со стеклом // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 5. С. 24–27. (0,33 п. л. / 0,28 п. л.)
2. Синев Л. С., Рябов В. Т. Расчет коэффициентных напряжений в соединениях кремния со стеклом // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 9. С. 32–37. (0,42 п. л. / 0,35 п. л.)
3. Синев Л. С. Оценка механических напряжений в соединенных при повышенной температуре кремнии и стекле // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. Рег. № ФС 77-48211. 2014. № 12. С. 951–965. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/745310.html>. (0,46 п. л.)
4. Синев Л. С., Петров И. Д. Температурный коэффициент линейного расширения (в интервале температур от 130 до 800 К) боросиликатных стекол, пригодных для соединения с кремнием в микроэлектронике // Стекло и керамика. 2016. № 1. С. 35–38. (0,24 п. л. / 0,18 п. л.)
5. Синев Л. С., Рябов В. Т., Тиняков Ю. Н. Коэффициентные напряжения при электростатическом соединении кремния со стеклом // Наноинженерия. 2011. № 2. С. 16–19. (0,36 п. л. / 0,27 п. л.)
6. Синев Л. С. Особенности применения электростатического соединения кремния со стеклом в микросистемной технике // Инженерный вестник. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. Рег. № ФС 77-51036. 2014. № 5. С. 501–509. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/722572.html>. (0,37 п. л.)
7. Синев Л. С. Использование технологии электростатического соединения кремния со стеклом при разработке МЭМС // Молодежь в науке (Саров, 28–30 окт. 2008 г.) : Сб. докл. 7-й науч.-техн. конференции. Саров : ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008. С. 560–563. (0,37 п. л.)
8. Синев Л. С. Способы выбора марки стекла для анодной посадки на кремний // Десятая научно-техническая конференция молодых специалистов Росатома «Высокие технологии атомной отрасли. Молодежь в инновационном процессе» (Н. Новгород, 10–12 сент. 2015 г.) : Материалы конференции. Н. Новгород : изд-во «Дятловы горы», 2015. С. 91–96. (0,23 п. л.)