

УДК 539.21

Шевченко А.А., к.т.н., доцент, Королевич М.В., д.ф.-м.н., доцент
Белорусский государственный аграрный технический университет,
г. Минск

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ОСНОВАНИЙ ГИМС, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ОТХОДОВ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

В настоящее время в качестве подложек для гибридных интегральных микросхем (ГИМС) в основном применяются керамические материалы благодаря их хорошим изоляционным свойствам. Вместе с тем, к основаниям ГИМС, работающим в СВЧ-диапазоне, предъявляется ряд специфических требований. Идеальных материалов, обладающих полным набором необходимых свойств для их изготовления, не существует. В зависимости от выполняемых функций и условий работы ГИМС для подложек выбираются материалы, обладающие в большей мере необходимыми свойствами и удовлетворяющими компромиссным требованиям. На протяжении длительного времени отходы полупроводникового монокристаллического кремния безвозвратно уходили в утилизацию. Поэтому является целесообразным переработка таких отходов в кремниевый порошок с дальнейшим использованием последнего как в различных металлургических процессах, так и в процессах создания оснований ГИМС. Важной задачей при конструировании таких оснований является отвод тепла от большого количества близко расположенных на подложке тепловыделяющих компонентов, поэтому представляет интерес исследование теплофизических характеристик таких материалов, что и являлось целью данной работы.

Исходное сырье представляло собой пластины монокристаллического кремния диаметром 100 мм толщиной 0,5 мм. Вначале проводили предварительное измельчение с последующим отсевом осколков на сите 1 мм. Сырьем служил порошок, прошедший сито 1 мм. Дальнейшее измельчение проводили с использованием вихревой струйной мельницы либо мельницы САНД с халцедоновыми чашами и шарами. С использованием данных сканирующей элек-

тронной микроскопии были построены гистограммы распределения частиц измельченного порошка Si по размерам. Установлено, что около 80 % измельченных порошков заключено в интервале от 0 до 0,5 мкм. Минимальный размер частиц – 68 нм, максимальный – до 6 мкм, средний размер частиц – 250 нм. Форма частиц – преимущественно осколочная, иногда встречались частицы сферической формы, насыпная плотность порошка – 0,44 г/см³, удельная поверхность ~ 6,4 м²/г. Для улучшения прочностных свойств экспериментальных образцов использовали в качестве легирующих добавок к измельченному кремнию стекла марок 7, 52 и аэросил марки А-175, имеющих наиболее близкие КТР к кремнию. Измельченные кремниевые порошки с различными легирующими добавками были сформованы в интервале давлений 100 – 700 МПа традиционным статическим и импульсным прессованием. Установлено, что традиционным статическим методом без использования связующих невозможно спрессовать указанные композиции. С использованием связующего лучше прессовались композиции со стеклом 7 и 52, их плотность возрастала с 1,4 до 1,8 г/см³ с возрастанием давления до 700 МПа. Несколько хуже прессовались композиции с добавкой аэросила и исходный измельченный кремний со связующим (ρ менялось от 1,4 до 1,6 г/м³). Показаны преимущества использования импульсного прессования для получения образцов без связующего с относительной плотностью до 89 % ($\rho \sim 2,15 \text{ г/см}^3$).

Исследование теплового расширения образцов оснований из субмикронных и микрометрических порошков кремния, полученных из отходов микроэлектронного производства, было осуществлено dilatометрическим методом (как на сырых, так и на спеченных образцах с использованием дифференциального dilatометра фирмы «Netsch»). Исследуемые образцы имели прямоугольную форму длиной 50 мм размером диагонали 5 мм. Установка позволяла работать в интервале температур от 20 до 1500 °С в вакууме $10^{-4} - 10^{-5}$ мм рт. ст. со скоростью нагрева от 0,2 до 200 град/мин. Экспериментальные данные по линейной усадке статически спрессованных образцов измельченного кремния в зависимости от температуры обработки при нагреве в вакууме в

дилатометре со скоростью нагрева $5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ до температуры 1000°C показали следующее. Наиболее интенсивно процесс усадки в исследованном интервале температур шел в диапазоне $600\text{--}900^{\circ}\text{C}$, начиная с 80-й минуты от начала спекания. После 160 минут спекания процесс усадки экспериментальных образцов существенно замедлялся и примерно сравнивался с начальным этапом усадки (до 15 мин). Перегибы на кривой $\Delta L=f(T)$ свидетельствовали о возможной смене механизмов уплотнения экспериментальных образцов при нагреве в вакууме. Полученное в наших экспериментах значение температурного коэффициента линейного расширения для чистого кремния (1300°C , 2 ч) составило $\sim 4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Проведены исследования по определению коэффициента теплопроводности экспериментальных образцов, полученных по разным технологическим режимам из измельченных порошков монокристаллического кремния различной дисперсности. Установлено, что более высокий коэффициент теплопроводности имели экспериментальные образцы, полученные из более крупного порошка кремния (дисперсностью 1-3 мкм, $\lambda \sim 20 \div 25 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$). Образцы из ультрадисперсного порошка ($d \sim 0,1 - 0,2 \text{ мкм}$) имели более низкий коэффициент теплопроводности ($\lambda \sim 13 - 14 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$). Вероятно, полученные нами более низкие значения теплопроводности (почти в 2 раза) для образца из ультрадисперсного порошка ($d \sim 0,1 - 0,2 \text{ мкм}$), чем для образца из микронного порошка ($d \sim 1 - 3 \text{ мкм}$), соответственно 13 и 25 Вт/м·К, связаны с дополнительным рассеянием фононов на границах зерен у более мелкозернистого образца. Следует отметить, что полученное нами значение теплопроводности 25 Вт/м·К для образцов из микрометрического порошка кремния ($d \sim 1 - 3 \text{ мкм}$) без легирующих добавок, спеченного на воздухе при 1200°C , 2 ч., хотя и ниже значения теплопроводности монокристаллического кремния 83,8 Вт/м·К, но сравнимо с теплопроводностью сапфира ($18 \div 27 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) и гораздо выше теплопроводности монокристалла кварца ($12 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) и ситаллов ($1 \div 2 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$).