

Таким образом, наблюдается, что молекулы диоксида углерода последовательно образуют димерные $2\text{CO}_2:\text{C}_1$, тримерные $3\text{CO}_2:\text{C}_1$ и тетрамерные $4\text{CO}_2:\text{C}_1$ комплексы с начальными активными центрами активированного угля.

После достижения количества адсорбции в 0,4 ммоль/г изотерма изменяет кривизну, переходя в линейное возрастание, что указывает на адсорбцию в однородной части активированного адсорбента Рр-РАУ-А. Полное описание сорбционного механизма можно определить, опираясь на относительное давление P/P_s , дифференциальную теплоту адсорбции, значения изотермы, а также на изменение энтропии, рассчитанное по энергии Гиббса и дифференциальной энтальпии, и используя время теплового равновесия.

ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТЕКЛООБРАЗНОГО НАНОКОМПОЗИТА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В КНИ-СТРУКТУРАХ

**В. Е. Гайшун¹, Д. Л. Коваленко¹, Я. А. Косенок¹, В. В. Васькевич¹, О. И. Тюленкова¹,
В. Е. Борисенко², Н. С. Ковальчук³, А. Н. Петлицкий³**

¹*Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины,
Республика Беларусь, ykosenok@gsu.by;*

²*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Республика Беларусь;*

³*ОАО «Интеграл» - Управляющая компания холдинга «Интеграл»,
Республика Беларусь*

Пакеты из двух пластин монокристаллического кремния, соединенных слоем изолятора, сегодня все активнее используются при создании микро-электромеханических систем (МЭМС) и интегральных микросхем кремний-на-изоляторе (КНИ), а также рассматриваются в качестве перспективных для трехмерной интеграции элементов интегральных микросхем [1]. Обычно их создают методом анодной сварки (anodic bonding) при помощи боросиликатных стекол типа Pyrex или Borofloat [2]. Анодная сварка производится сжатием пластин кремния и стекла, нагревом такой заготовки до 550 °С и приложением постоянного электрического напряжения от 200 до 2000 В (так называемого анодного напряжения). При нагреве происходит расщепление оксидов натрия в стекле и дальше под воздействием электрического поля положительно заряженные ионы натрия перемещаются от границы соприкосновения стекла с пластиной кремния в стекло, оставляя на границе слой, обогащенный кислородом. Он вступает в реакцию с кремнием, окисляя его и формируя сплошное соединение. Основным недостатком анодной сварки – необходимость дорогостоящего технологического оборудования и высочайшие требования к геометрии поверхностей склеиваемых пластин кремния и стекла. Целью исследований авторов явилась разработка и опробование стеклообразного материала, синтезируемого золь-гель методом, для соединения пластин кремния, который позволяет снизить требования к подготовке поверхностей соединяемых пластин кремния и совместим с традиционными материалами и процессами современной планарной технологии изготовления интегральных микросхем.

Для создания стабильного соединения пластин различных материалов предлагается использовать боросиликатную стеклообразную композицию, формируемую золь-гель методом. При этом минимизируется влияние разницы в температурных коэффициентах линейного расширения соединяемых материалов и промежуточного слоя. Известно, что эта разница не должна превышать $1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [3]. Иначе индуцированные нагревом/охлаждением механические напряжения приводят к растрескиванию соединенных пластин, нарушению герметичности такого соединения и его электрических свойств. В качестве исходного материала использовали наноразмерный диоксид кремния, который может образовывать стабильные водные суспензии с дисперсной фазой, состоящей преимущественно из частиц со средним размером 12 нм. Водную суспензию приготавливали следующим образом: в дистиллированную воду порционно добавляли диоксид кремния

при постоянном перемешивании, затем выполняли ультразвуковую обработку при частоте перемешивания 250 мин^{-1} в течение 1 ч. Для синтеза боросиликатной композиции в суспензию, нагретую до 80°C , добавляли соединение бора. Стеклообразующую жидкую композицию наносили на вращающиеся пластины монокристаллического кремния (111) диаметром 100 мм, прошедшие химико-механическую полировку и оксидирование для формирования слоя диоксида кремния толщиной примерно 0,7 мкм, предназначенного для препятствия диффузии бора из композита в подложку при последующей высокотемпературной обработке. Нанесение осуществляли методом механического распыления композиции на пластины кремния, нагретые до температуры не выше 60°C . По две пластины механически соединяли друг с другом сторонами, на которые нанесен композит. Созданные таким образом сборки выдерживали на воздухе при комнатной температуре в течение 20...30 мин, после чего подвергали термообработке на воздухе при $950...1100^\circ\text{C}$ по программе: нагрев до заданной температуры в течение 60 мин, выдержка при этой температуре в течение 30 мин, охлаждение до комнатной температуры в течение 4...5 ч [4].

Установлено, что применение диоксида кремния со средним размером частиц 12 нм в стеклообразующей композиции обеспечивает формирование высокооднородного соединительного слоя (10-15 мкм) и позволяет понизить температуру его стеклования до $\sim 1000^\circ\text{C}$. Совокупный эффект состоит в повышении структурной целостности и термической совместимости соединения кремниевых пластин, что, в перспективе, улучшает долговечность и надёжность микросистемных устройств.

Таким образом, применение золь-гель технологии позволяет получить стеклообразующий состав с требуемыми характеристиками и снизить температуру стеклообразования. Многослойные стеклокомпозиции могут быть использованы в технологических процессах, требующих формирования неразъемных соединений кремниевых пластин на ОАО «ИНТЕГРАЛ», а также других предприятиях электронной промышленности в странах СНГ и ближнего зарубежья.

Список литературы

1. Athif A. M. F., Sabzehmeidani Y., Suzumori K. Application of Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) as Sensors: A Review // J. of Robotics and Mechatronics. 2020. Vol. 32, № 2. P. 281–288.
2. Тимошенко С. П., Бойко А. Н., Симонов Б. М. Методы сборки и монтажа макетных образцов микроэлектромеханических систем // Изв. вузов. Электроника. 2010. Т. 84, № 4. С. 58–63.
3. Неразъемные соединения в конструкциях микроэлектронных датчиков. Особенности материалов и технологий формирования / П. Г. Михайлов и др. // Вестн. Пензенского гос. ун-та. 2016. Т. 16, № 4. С. 78–85.
4. Соединение пластин кремния стеклообразным нанокомпозитом, формируемым золь-гель методом/ В. Е. Гайшун, Я. А. Косенок, В. В. Васильевич, О. И. Тюленкова, В. Е. Борисенко, Н. С. Ковальчук, А. Н. Петлицкий, С. В. Чумак // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сэрыя фізіка-матэматычных навук. – 2023. – Т. 59, № 3. – С. 233–240.

СВОЙСТВА СИЛИКАТСОДЕРЖАЩИХ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е. Ф. Кудина

*Белорусский государственный университет транспорта,
Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем
им. В. А. Белого НАН Беларуси»,
Республика Беларусь, kudina_mpri@tut.by*

Широкое применение эпоксидных смол (ЭС) обусловлено широким спектром их высоких физико-механических свойств. Однако при этом они относительно хрупки, склонны к растрескиванию, недостаточно прочны при ударе.