

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ БОРОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

Ларин Т.Д.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь

Позняк А.А. — канд. физ.-мат. наук, доцент

Борорганические соединения — соединения бора, углерода и некоторых других элементов. Такими элементами могут быть водород, галогены, сера, азот и так далее. В последнее время, борорганические соединения нашли своё применение в различных сферах. Данная работа посвящена борорганическим соединениям и перспективам их применения в микро- и нанoeлектронике.

Бор (В) представляет собой очень твёрдое вещество, такие соединения как нитрид бора и карбид бора являются невероятно прочными. Химические свойства бора более схожи с углеродом и кремнием, чем с другими элементами группы. Бор обычно образует нейтральные соединения, в которых он трехвалентен, такие, например, как трифторид бора (BF<sub>3</sub>) [1].

Борорганические соединения представляют собой соединения бора с органическим остатком, либо являются органическими производными ВН<sub>3</sub>. В борорганических соединениях, связи С-В имеют низкую полярность, и следовательно алкил борные соединения в целом стабильны, хотя могут легко поддаваться окислению. Бор часто образует электроно-дефицитные соединения. Винильные и арильные группы отдают электроны и делают бор менее электрофильным, а связь С-В приобретает некоторый характер двойной связи. Большинство борорганических соединений классифицируются в органической химии как сильные электрофилы, потому что бор не может получить полный октет электронов [2]. Классификация борорганических соединений представлена на рисунке 1.

BR <sub>3</sub> boranes	BR <sub>2</sub> (OH) borinic acids	BR <sub>2</sub> (OR) borinic esters	BR(OH) <sub>2</sub> boronic acids
BR(OR) <sub>2</sub> boronic (boronate) esters	B(OH) <sub>3</sub> boric acid	B(OR) <sub>3</sub> borate (boric) esters	RB(NR <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> boronamides
BX <sub>3</sub> boron trihalides	[ :BR <sub>2</sub> ] <sup>-</sup> boryl anions	[ R <sub>3</sub> BH <sub>3</sub> ] <sup>-</sup> borohydrides	[ RBF <sub>3</sub> ] <sup>-</sup> trifluoroborates

По химическим свойствам борорганические соединения отличаются от органических соединений Li, Mg, Al и др. металлов. Так, алкил- и арилбораны не реагируют с CO<sub>2</sub>, органическими галогенидами, эпоксидами, производными карбоновых кислот. Триалкилбораны, трициклоалкилбораны и алифатические борацикланы не расщепляются во-

Рисунок 1 — Классификация борорганических соединений

дой, спиртами, аминами, кетонами и сложными эфирами, растворами неорганических кислот и щелочей до 100-130 °С. Это позволяет проводить многие реакции борорганических соединений в водных и спиртовых растворах. В структуре гидридов бора, каждый атом бора образует двухэлектронную двухцентровую связь с концевыми атомами водорода, а остальные атомы водорода образуют двухэлектронную трёхцентровую связь. Это позволяет атомам бора иметь полный октет валентных электронов [2]. Вид такой связи представлен на рисунке 2.

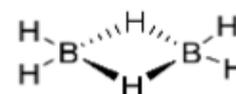


Рисунок 2 — Схема двухэлектронной трёхцентральной связи

В органическом синтезе активно применяются такие соединения, как дициамилборан, тексилборан, 9-борабициклононан и диизопинокамфеилборан. Их применяют для избирательного восстановления тройной связи до двойной, а также для получения спиртов против правила Марковникова. При этом

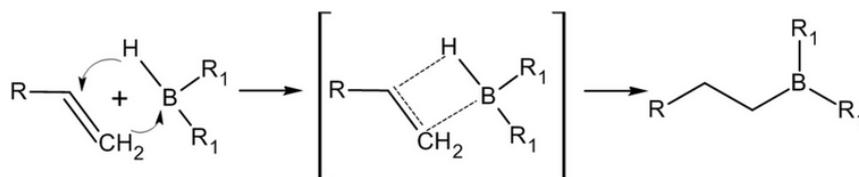


Рисунок 3 — Механизм присоединения боранов к алкенам

образуется промежуточное циклическое соединение с двумя трёхцентровыми двухэлектронными связями В-Н-С [3]. Общий механизм присоединения представлен на рисунке 3.

Применяют борорганические соединения также для как катализаторы и сокатализаторы полимеризации непредельных со-

единений и окисления углеводов; антиоксиданты, бактерициды, фунгициды. Также, такие соединения как:  $\text{NaB}(\text{C}_6\text{H}_5)_4$  и  $\text{Na}[(\text{C}_6\text{H}_5)_3\text{BCK}]$  используются в химическом анализе как реагенты для определения и выделения  $\text{K}^+$ ,  $\text{Rb}^+$ ,  $\text{Cs}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  [4].

Боргидрид натрия ( $\text{NaBH}_4$ ), наиболее широко используется как в органической, так и в неорганической химии. Боргидрид калия ( $\text{KBH}_4$ ) является его альтернативой. Например, его успешно использовали для уменьшения образования оксидного слоя на поверхности интерметаллического материала  $\text{Mg}_{1.3}\text{Co}_{0.85}\text{Al}_{0.3}\text{Mn}_{0.3}$  (MI: мишметалл, обогащенный лантаном), используемого в качестве анода топливного элемента [5].

Стоит отметить, что бороводороды невероятно химически активны и их сгорание сопровождается большим выделением тепла. Например, пентаборан ( $\text{B}_5\text{H}_{11}$ ), так называемое «Экзотическое горючее», используется военными с 1950-х годов ввиду удобства его синтеза и применения.

Реакция Сузуки — органическая реакция арил- и винилборных кислот с арил- или винилгалогенидами, катализируемая комплексами палладия. Реакция Сузуки широко используется в препаративной органической химии для получения полиолефинов, стиролов, а также замещенных бифенилов [6]. Механизм реакции представлен на рисунке 4.

Сравнительно недавно были обнаружены электропроводящие полимеры (так называемые органические металлы) и их изучение набирает большие обороты. Реакция Сузуки является весьма перспективной в области молекулярной электроники ввиду того, что она может поспособствовать синтезу новых электропроводящих полимеров.

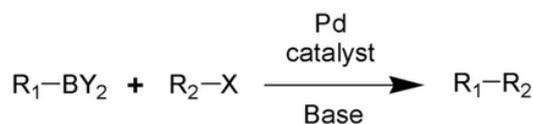


Рисунок 4 — общий механизм реакции Сузуки

Трехкоординированный бор с его вакантной *p*-орбиталью является полезным акцептором в сопряженных органических молекулах. Эти материалы имеют интересные линейные, а также нелинейные оптические свойства первого и второго порядков, проявляют двухфотонно-возбуждаемые флуоресцентные свойства. Трехкоординированный бор был включен в широкое разнообразие молекулярных и полимерных систем. Многие из этих соединений могут оказаться полезными в быстро расширяющейся области органической электроники, что было продемонстрировано при создании ряда оптоэлектронных устройств [7].

#### Список используемых источников:

1. Boron [Electronic resource] // Wikipedia, the free encyclopedia. — Mode of access: <https://en.wikipedia.org/wiki/Boron>. — Date of access: 01.04.2020.
2. DeFrancesco, H. Boron Chemistry: An Overview // H. DeFrancesco, J. Dudley, A. Coca / Boron Reagents in Synthesis; ed.: A. Coca. — New Haven, 2016. — Ch. 1. — P. 1–25. — (ACS Symposium Series : Vol. 1236).
3. Борорганические соединения [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. — Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Борорганические\\_соединения](https://ru.wikipedia.org/wiki/Борорганические_соединения). — Дата доступа: 01.04.2020.
4. Бубнов, Ю.Н. Борорганические соединения [Электронный ресурс] / Ю.Н. Бубнов // Химическая энциклопедия. — Режим доступа: <http://www.ximuk.ru/encyklopedia/618.html>. — Дата доступа: 01.04.2020.
5. Chen Y. Studies of Modified Hydrogen Storage Intermetallic Compounds Used as Fuel Cell Anodes // Y. Chen, D.M.F. Santos, C.A.C. Sequeira, R.F.M. Lobo / Crystals. — 2012. — Vol. 2, № 1. — P. 22–33.
6. Suzuki reaction [Electronic resource] // Wikipedia, the free encyclopedia. — Mode of access: [https://en.wikipedia.org/wiki/Suzuki\\_reaction](https://en.wikipedia.org/wiki/Suzuki_reaction). — Date of access: 01.04.2020.
7. Entwistle, C.D. Applications of Three-Coordinate Organoboron Compounds and Polymers in Optoelectronics // C.D. Entwistle, T.B. Marder / Chemistry of Materials. — 2004. — Vol. 16, Iss. 23. — P. 4574–4585.