

## ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 538.911

DOI: 10.17223/00213411/68/3/1

## Новые двумерные графеноподобные материалы и гетероструктуры\*

К.А. Лозовой<sup>1</sup>, В.В. Дирко<sup>1</sup>, А.П. Коханенко<sup>1</sup>, О.И. Кукунов<sup>1</sup>,  
Н.В. Плотников<sup>1</sup>, Н.Ю. Акименко<sup>2</sup>, А.В. Войцеховский<sup>1</sup><sup>1</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*<sup>2</sup> *Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия*

Успехи в синтезе двумерных графеноподобных материалов – трансграфенов – стимулируют интерес ученых к поиску новых элементов периодической системы, имеющих двумерные аллотропные модификации. Это привело к успешному получению в последние годы таких новых одноэлементных 2D-материалов, как бериллен (Be), индий (In), молибден (Mo) и голден (Au). Помимо этого, активно развиваются методы создания различных производных трансграфенов – их соединений с другими элементами. Кроме того, в последнее время появляется все больше работ по созданию гетероструктур на основе двумерных материалов. Данный обзор посвящен новым двумерным аллотропным модификациям одиночных элементов, методам создания 2D-гетероструктур, а также их приборному применению.

**Ключевые слова:** двумерный кристалл, бериллий, индий, молибден, золото, бериллен, индий, молибден, голден, трансграфены, молекулярно-лучевая эпитаксия, гетероструктура.

## Введение

С момента получения в 2012 г. силицена [1–3] – первого представителя семейства графеноподобных двумерных материалов [4–8], количество таких материалов чрезвычайно разрослось [9–13]. Теперь в число трансграфенов входят элементы от II до VI группы в периодической таблице, включая и некоторые побочные подгруппы [14–17].

Существует два основных подхода к созданию 2D-материалов. С одной стороны, это подход «снизу вверх», означающий послойное эпитаксиальное выращивание на подходящей подложке, а с другой – «сверху вниз», объединяющий традиционные механические и недавно появившиеся химические методы отслаивания монослоев. Эпитаксиальные методы позволяют тщательно контролировать морфологию поверхности на атомарном уровне. Кроме того, эпитаксиальные методы эффективны для получения двумерных слоев большой площади. Тем не менее, с точки зрения массового производства, выход таких структур довольно ограничен, а стоимость их, как правило, высока из-за необходимости поддержания в установке сверхвысокого вакуума. Напротив, химические методы могут обеспечить экономически эффективное массовое производство двумерных структур в ущерб их качеству. Механическое же отслаивание позволяет получать дешевые структуры достаточно высокого качества, но с невысоким выходом. Недостатком этого подхода также является его применимость только к ограниченному числу материалов.

Развитие технологии получения двумерных материалов проложило путь к разработке новых приборов на основе двумерных слоев, имеющих фундаментальные отличия от объемных материалов по своим физическим свойствам [18–23]. Особую роль здесь приобретают производные трансграфенов – графеноподобные слои, функционализированные различными лигандами [24–28], а также 2D-гетероструктуры – контакты двух различных двумерных слоев [29–33].

Производные графена и трансграфенов создаются путем создания ковалентных  $\pi$ -связей атомов двумерного слоя с ионами водорода (например, графан  $(\text{CH})_n$ , силикан  $(\text{SiH})_n$ , германан  $(\text{GeH})_n$  и другие трансграфаны с общей формулой  $(\text{XH})_n$ , где X – это один из элементов, образующих исходный двумерный материал: C, Si, Sn, Pb, B, P и т.д.) или другими лигандами (например, катионами металлов, гидроксильными группами, органическими радикалами) [5].

Другим трендом развития технологии 2D-материалов является в настоящий момент создание двумерных гетероструктур с вертикальной или латеральной геометрией. В первом случае слои

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-62-10021, <https://rscf.ru/project/23-62-10021/>.