**Технология изготовления гетероструктур Ван-дер-Ваальса в инертной атмосфере**

***Мартанов С.Г.1, Дулебо А.И.1, Пугачев М.В.1, Блуменау М.И.1, Наумов М.А.2, Шуплецов А.В.1, Кунцевич А.Ю1***

*Младший научный сотрудник*

*1Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия.*

*2ФГУП Всеросийский НИИ автоматики имени Н. Л. Духова.*

*E-mail: sergsmart@mail.ru*

Для сборки гетероструктур Ван-дер-Ваальса из кристаллов толщиной в один или несколько атомных слоев используется технология сухого переноса. Для реализации данной технологии научным лабораториям необходимы так называемые «трансфер-машины». В статье [1] мы предложили устройство простой и удобной трансфер-машины и продемонстрировали ее работу. Установка хорошо себя зарекомендовала, с ее помощью нами уже были созданы сотни гетероструктур.

К сожалению, большинство двумерных материалов имеют тенденцию к деградации со временем на воздухе [2]. Процесс сборки гетероструктур из таких материалов должен проводиться в инертной атмосфере перчаточных боксов [3,4,5] и даже в высоком вакууме [6,7]. Помимо сборки гетероструктур, для получения прототипов приборов, необходимо выполнять такие процессы как литография, металлизация, напыление и плазмохимическое травление.

Попытки создать технологическую линию, полностью расположенную в инертной атмосфере, уже предпринимались. Например, в работе [8] несколько перчаточных боксов с различными технологическими процессами были соединены между собой. Получившийся комплекс оборудования был сложным и дорогим для лаборатории.

В данной работе мы предлагаем использовать трансфер-машину как для сборки гетероструктур, так и для контактной масочной литографии. Для процессов напыления или плазмохимического травления мы используем вакуумную камеру с прямым доступом из перчаточного бокса [9].

Таким образом, все технологические процессы, включая термическое испарение, плазменную обработку, мокрые процессы и литографию на трансферной машине, производятся в инертной атмосфере перчаточного бокса. Предложенная схема была испробована на нескольких нестабильных материалах. Использование данного комплекса оборудования значительно упрощает и удешевляет работу по созданию из них Ван-дер-Ваальсовых гетероструктур в инертной атмосфере.

**Литература**

1. Martanov, S.G.; et al, Making van der Waals Heterostructures Assembly Accessible to Everyone. Nanomaterials 2020, 10, 2305.

2. Wang, X.; Sun, Y.; Liu, K. Chemical and structural stability of 2D layered materials. 2D Mater. 2019, 6, 042001.

3. Cao, Y.; et al. Quality Heterostructures from Two-Dimensional Crystals Unstable in Air by Their Assembly in Inert Atmosphere. Nano Lett. 2015, 15, 4914–4921.

4. Gant, P.; et al, A system for the deterministic transfer of 2D materials under inert environmental conditions. 2D Mater. 2020, 7, 025034.

5. Masubuchi, S.; et al. Autonomous robotic searching and assembly of two-dimensional crystals to build van der Waals superlattices. Nat. Commun. 2018, 9, 1413.

6. Guo, S.; et al. An ultra-high vacuum system for fabricating clean two-dimensional material devices. Rev. Sci. Instrum. 2023, 94, 013903.

7. Masubuchi, S.; et al. Dry pick-and-flip assembly of van der Waals heterostructures for microfocus angle-resolved photoemission spectroscopy. Sci. Rep. 2022, 12, 10936.

8. Gray, M.J.; et al. A cleanroom in a glovebox. Rev. Sci. Instrum. 2020, 91, 073909.

9. Duleba, A.; et al. Inert-Atmosphere Microfabrication Technology for 2D Materials and Heterostructures. Micromachines 2024, 15, 94. https://doi.org/10.3390/mi15010094.