

ВЫРАЩИВАНИЯ АЛМАЗНЫХ ПОДЛОЖЕК МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

Полубок А. В., Москаленко К. А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Полубок В. А. – к. т. н., доцент, доцент каф. МПСС ИИТ БГУИР

Позняк А. А. – к. ф-м. н., доцент, доцент каф. ЭТТ

Аннотация. В статье кратко рассмотрен метод химического осаждения из газовой фазы (CVD) для синтеза алмазных подложек. Определены главные проблемы в создании больших монокристаллических алмазных структур. Изучены технологические особенности гетероэпитаксиального роста и модификация путём введения примесей в процессе синтезе. Подчёркивается важность контроля за строением кристаллической решётки в процессе выращивания.

Ключевые слова: алмаз, CVD, подложки, гетероэпитаксия, монокристаллические плёнки, легирование, качество кристаллов.

Введение. Введение. Современной микроэлектронике требуются материалы с экстремальными характеристиками. Традиционный кремний (ширина запрещённой зоны 1,12 эВ) имеет фундаментальные ограничения по термостабильности и электрической прочности, что затрудняет его эксплуатацию в условиях высоких температур и напряжений [1]. Алмаз обладает уникальными параметрами: шириной запрещённой зоны 5,47 эВ, теплопроводностью до 22 Вт/см·К и пробивным напряжением до 10 МВ/см [1, 2]. Эти показатели превосходят аналогичные показатели SiC и GaN, делая алмаз перспективным для силовой электроники и детекторов радиации.

Ввиду отсутствия пригодных для серийного производства природных аналогов, основным методом получения высококачественных монокристаллов алмаза является искусственное выращивание методом химического осаждения из газовой фазы (*chemical vapor deposition* (CVD)) [3]. Для реализации высоких эксплуатационных характеристик критически важно совершенство кристаллической решётки: плотность дислокаций в материале не должна превышать 10^3 см^{-2} [4]

Основная часть. CVD представляет собой основной метод синтеза алмазных подложек. Процесс основан на разложении смеси метана (1–5%) и водорода (95–99%) в микроволновой плазме при температуре 700–900 °С и давлении 20–200 мбар [4]. Активированные радикалы углерода осаждаются на подложку со скоростью роста 1–10 мкм/ч [4].

Ключевой проблемой является выращивание монокристаллических плёнок большой площади. Чаще формируются поликристаллы, чьи границы зёрен создают центры рассеяния носителей заряда и снижают электрофизические характеристики материала [4]. Решением служит гетероэпитаксиальный рост на ориентированных буферных слоях, например иридиевых плёнках на кремнии.

Кристаллическая решётка иридия близка по параметрам к решётке алмаза, что способствует эпитаксиальному росту, а ориентация подложки (001) задаёт направление роста слоёв.

Для обеспечения высокой плотности зародышей в процессе осаждения применяется специальный этап усиленной ионной нуклеации (*Bias Enhanced Nucleation*): подача отрицательного смещения на подложку в плазме позволяет создать центры нуклеации с плотностью до 10^{10} см^{-2} [4]. Когда зародышей много, они быстро соединяются в единый слой, уменьшая число дефектов на стыках. Это даёт возможность растить плёнку нужной толщины, сохраняя её внутреннюю структуру почти идеальной (рисунок 1). Для электроники это значит

одно: приборы на такой подложке будут работать стабильнее и дольше. Особенно выигрывают от этого силовые устройства, которые часто страдают от перегрева и высоких напряжений.

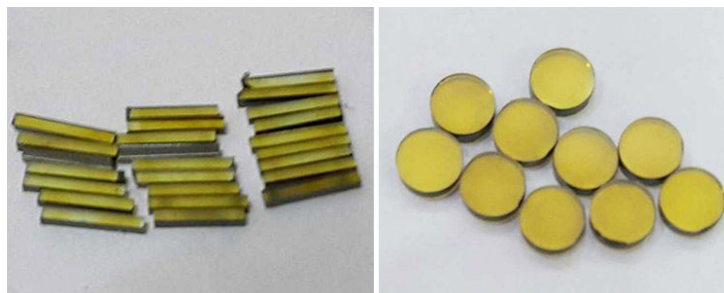


Рисунок 1 - Монокристаллические алмазные пластины, выращенная методом CVD

Важный аспект – легирование. Алмаз сложно легировать примесью, обуславливающую *n*-тип проводимости: уровень фосфора залегает на глубине $\sim 0,6$ эВ, что даёт низкую концентрацию электронов при 300 К [4]. Бор (*p*-тип) с уровнем 0,37 эВ позволяет достигать концентрации до 10^{21} см $^{-3}$ при соотношении В/С в газовой фазе 100–1000 *ppm* [5]. Отсутствие эффективного *n*-донора осложняет создание CMOS-структур [5].

Заключение. Развитие CVD-технологий критически важно для получения качественных алмазных подложек.

Алмаз не заменит кремний в массовом производстве, но займёт нишу экстремальной электроники: силовые ключи, радиационно-стойкие детекторы, СВЧ-приборы. Прогнозируется снижение стоимости подложек на 40–50% к 2030 году при масштабировании производства.

Список литературы

1. Миллер, А. В. Широкозонные полупроводники для силовой электроники: учебное пособие / А. В. Миллер. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2020. – 150 с
2. Трапезникова, И. Н. Алмазные приборы силовой электроники / И. Н. Трапезникова // Электронные компоненты. – 2022. – № 4. – С. 30–35.
3. Ральченко, В. Г. Алмазные пленки, синтезированные методом CVD: свойства и применения / В. Г. Ральченко // Успехи физических наук. – 2022. – Т. 192, № 5. – С. 515–530
4. Schreck, M. Heteroepitaxial growth of diamond / M. Schreck // MRS Bulletin. – 2014. – Vol. 39, No 2. – Pp. 130–136.
5. Kasu, M. N-type diamond growth and its application to electronic devices / M. Kasu // Diamond & Related Materials. – 2018. – Vol. 89. – Pp. 1–7

UDC 549.211:621.38

CHEMICAL VAPOR DEPOSITION OF SINGLE-CRYSTAL DIAMOND SUBSTRATES

Polubok A. V., Moskalenko K. A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Polubok V. A. – Cand. of Sci., docent, associate professor of the department MPSN IIT BSUIR

Poznyak A. A. – Cand. of Sci., docent, associate professor of the department ETT

Annotation. The article analyzes in detail the chemical vapor deposition (CVD) method for the synthesis of diamond substrates. The main problems in creating large single-crystal structures are identified. The technological features of heteroepitaxial growth and the modification of properties by adding impurities during synthesis are studied. The importance of controlling the crystal lattice structure during the growth process is emphasized.

Keywords: diamond, CVD, wide-bandgap semiconductors, power electronics, doping, radiation detectors