

Богданов С.А.¹, Вихарев А.Л.¹, Дроздов М.Н.²

¹Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

²Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

Исследование синтеза полупроводникового CVD алмаза при высокой степени легирования

Представлены результаты экспериментальных исследований синтеза полупроводникового CVD алмаза при концентрации легирующей примеси бора 10^{18} - 10^{20} см⁻³. Исследована зависимость эффективности встраивания бора от содержания кислорода в газовой фазе. Показано, что оптическая эмиссионная спектроскопия плазмы в присутствии бора является эффективным инструментом для контроля уровня легирования. Выращены толстые сильнолегированные алмазные слои толщиной более 100 мкм и концентрацией бора более 10^{20} см⁻³, которые могут быть использованы для создания мощных электронных приборов, в частности, алмазных диодов Шоттки вертикальной структуры.

Ключевые слова: CVD алмаз, плазмохимический синтез алмаза, полупроводниковый алмаз

В настоящее время алмаз рассматривается как один из перспективных широкозонных полупроводников для создания следующего поколения мощных и высокочастотных электронных приборов, способных работать в условиях высоких температур и обладающих радиационной стойкостью [1]. Современные CVD-технологии позволили получать эпитаксиальные слои алмаза высокого кристаллического совершенства с контролируемым содержанием примесей. Однако по сравнению с традиционными полупроводниками примеси в алмазе (бор, фосфор) имеют более глубокие энергетические уровни: самая мелкая примесь в алмазе – бор – имеет энергию активации около 370 мэВ при низкой степени легирования и ионизована при комнатной температуре менее, чем на 1%, поэтому получение высокой концентрации основных носителей заряда является проблемой для данного материала. Это означает, что для получения достаточной концентрации носителей требуется использовать на порядок более высокие степени легирования по сравнению с традиционными полупроводниками. Исследование плазмохимического синтеза сильнолегированных алмазных слоёв (с концентрацией бора 10^{18} - 10^{20} см⁻³) является, таким образом, актуальной задачей для разработки полупроводниковых приборов на основе алмаза.

В данной работе проведено исследование CVD синтеза сильнолегированных алмазных слоёв, выращенных с помощью плазмохимического реактора на основе цилиндрического резонатора, возбуждаемого магнетроном на частоте 2.45 ГГц (Рис. 1) [2]. При помощи специально разработанного барборатора, который позволяет обеспечить подачу в реактор паров борсодержащего вещества при прохождении через него несущего газа (водорода), была выращена серия образцов монокристаллических алмазных слоёв с различным уровнем легирования (10^{18} - 10^{20} см⁻³). Барборатор спроектирован таким образом, чтобы иметь возможность независимо регулировать отношения В/С и О/С в достаточно широких пределах, изменяя поток несущего газа через раствор и концентрацию раствора. Известно, что малые добавки кислорода могут приводить к улучшению качества выращенных

алмазных слоёв за счет селективного травления неалмазной фазы на поверхности подложки. Однако механизмы влияния кислорода на процессы синтеза легированного алмаза не изучены в полной мере.

В данной работе были выращены две серии образцов легированных алмазных слоёв при различном уровне кислорода ($O/C=0.1$ и $O/C=0.5$). Условия роста: давление газа 150 Торр, СВЧ мощность 2.3 кВт, содержание метана в газовой смеси 4%. Отношение бора к углероду в газовой фазе изменялось в пределах $B/C=500-40000$ ppm. Показано, что несмотря на уменьшение эффективности встраивания бора в присутствии кислорода, сильнолегированные алмазные слои (с концентрацией более 10^{20} см⁻³) могут быть получены в кислород-содержащих газовых смесях.

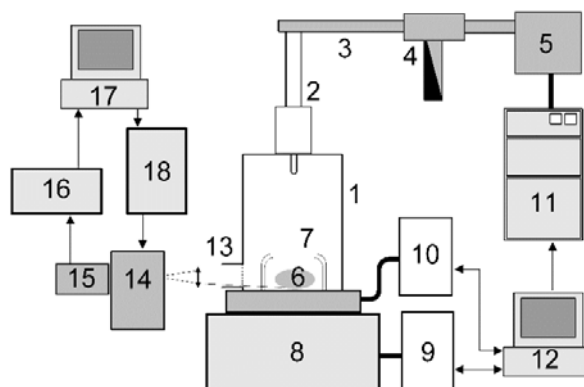


Рис. 1. Схема установки плазмохимического синтеза алмаза.

Диагностика плазмы СВЧ разряда проводилась с помощью оптической эмиссионной спектроскопии. Показано, что оптическая эмиссионная спектроскопия плазмы в присутствии бора является эффективным инструментом для контроля уровня легирования с помощью наблюдения интенсивности линии излучения радикала BH (433.2 нм), которая растет по мере увеличения содержания бора в газовой фазе (Рис. 2).

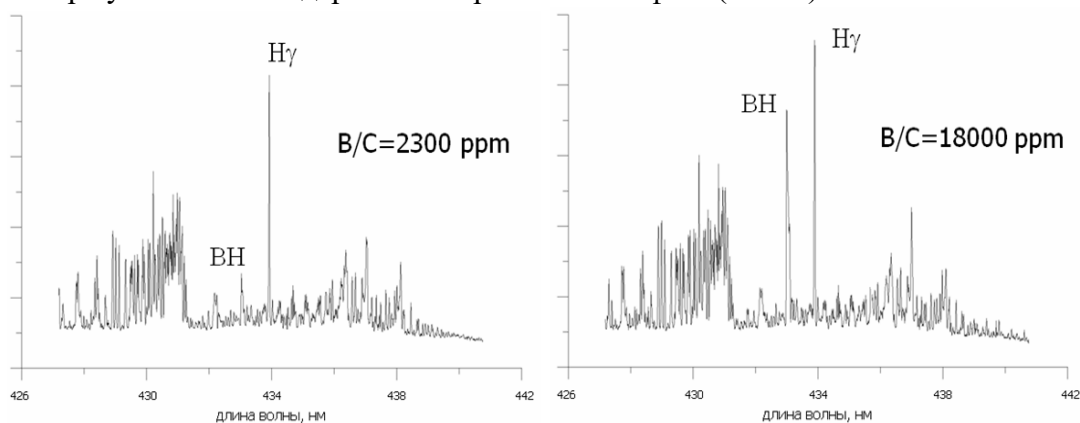


Рис. 2. Оптические эмиссионные спектры плазмы в окрестности линии излучения радикала BH (433.2 нм).

Выращенные алмазные слои толщиной 2.5-4.5 мкм исследовались с помощью ВИМС (вторичная ионная масс-спектрометрия) для определения концентрации бора. Результаты измерений ВИМС, демонстрирующие влияние кислорода на эффективность встраивания бора, приведены на Рис. 3. Из рисунка 3 видно, что при повышении уровня кислорода в 5 раз концентрация бора в алмазе уменьшалась в 2-3 раза при том же содержании бора в газовой фазе.

Проведенная серия экспериментов на легированных слоях толщиной 2.5-4.5 мкм позволила определить режим CVD синтеза толстых сильнолегированных слоёв,

позволяющий выращивать сильнолегированные проводящие слои алмаза толщиной более 100 мкм при высокой скорости роста $\sim 4\text{-}5$ мкм/ч. CVD синтез толстых сильнолегированных алмазных слоёв ранее представлял собой существенную проблему, поскольку при достижении необходимых скоростей роста в сочетании с высоким уровнем легирования не удавалось поддерживать длительное осаждение из-за повышенного образования сажи в СВЧ разряде, препятствующей дальнейшему осаждению [3]. В данной работе с помощью использования кислород-содержащих смесей удалось решить эту проблему. Механизмы образования сажи при сильном легировании и ее подавления с помощью кислорода не ясны. Влияние кислорода, возможно, сводится к связыванию излишек бора и углерода в стабильных молекулах CO и HBO.

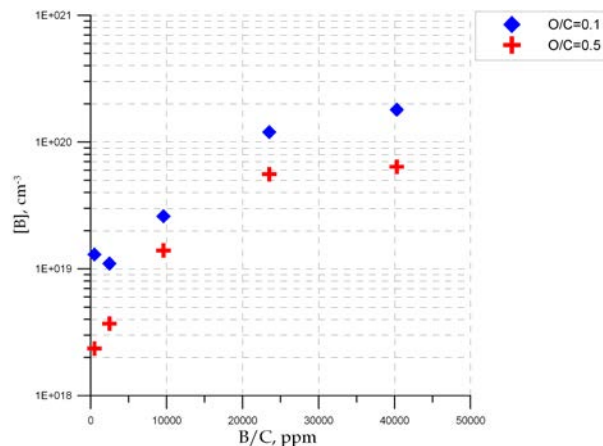


Рис. 3. Концентрация бора (по измерениям ВИМС) в зависимости от отношения бора к углероду в газовой фазе.

Выращенные толстые сильнолегированные алмазные слои (концентрация бора более 10^{20} см⁻³) после отделения от подложки могут быть использованы для создания мощных электронных приборов (Рис. 4). Такие сильнолегированные алмазные подложки могут быть в дальнейшем использованы для CVD роста слаболегированных алмазных слоёв, на основе которых могут быть созданы, например, диоды Шоттки с вертикальной структурой, сочетающие высокие обратные напряжения до нескольких киловольт и высокие значения тока в прямом направлении.

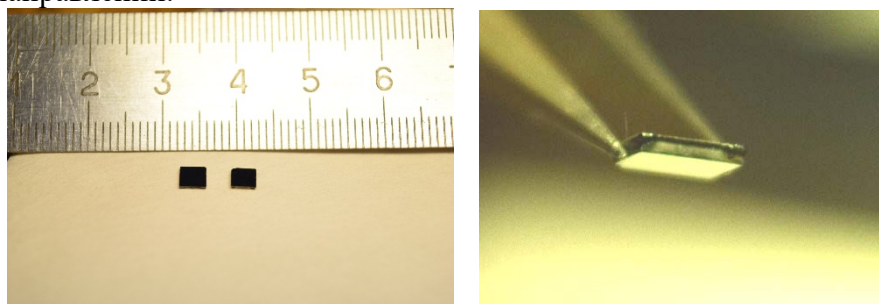


Рис. 4. Образцы сильнолегированных алмазных слоев толщиной более 100 мкм.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства РФ по постановлению 220, договор № 14.В25.31.0021 с ведущей организацией ИПФ РАН.

Библиографический список

1. CVD Diamond for Electronic Devices and Sensors, edited by Ricardo S. Sussmann, Wiley, 2009.
2. A.B. Muchnikov, A.L. Vikharev, A.M. Gorbachev, et al., Diamond and Related Materials, 19, 2010, 432.
3. J. Achard, R. Issaoui, A. Tallaire, et al., Applied Physics Letters, 97, 2010, 182101