

CVD алмаз – материал для нового поколения электронных приборов. Выращивание, характеристики и некоторые применения

В работе дается краткое описание технологии получения из газовой фазы диэлектрических и полупроводниковых монокристаллических алмазных пленок, приводятся примеры их применения в технике СВЧ, обсуждаются перспективы создания новых электронных приборов на CVD алмазе.

Ключевые слова: CVD алмаз, алмазная электроника

Повышенный интерес к искусственным алмазам, выращиваемым по CVD (chemical vapor deposition) технологии, связан с такими характеристиками этого материала, как рекордно высокая твердость (до 90 ГПа) и износостойкость, наивысший модуль упругости ($1,2 \cdot 10^{12}$ Н/м²), рекордная среди всех известных материалов теплопроводность, наименьший коэффициент теплового расширения при комнатной температуре (10^{-6} К⁻¹), оптическая прозрачность в широком диапазоне от ультрафиолетового до глубокого инфракрасного диапазона длин волн, химическая стойкость к большинству агрессивных сред, высокая подвижность основных носителей, радиационная стойкость. Благодаря этим свойствам при использовании CVD алмаза имеются предпосылками развития многих отраслей электроники (силовой и СВЧ электроники), оптики УФ и ИК диапазонов и техники.

Для газофазного осаждения алмазных пленок необходимо создать неравновесные условия, например, неравновесную концентрацию атомов водорода в углеводородной газовой среде, тогда происходит преимущественное образование алмаза по сравнению с графитом. Для получения неравновесных условий наибольшее распространение получили CVD реакторы, в которых активация газовой среды осуществляется с помощью СВЧ разряда [1]. В этих реакторах в зависимости от условий: давления и скорости газового потока, температуры подложки и состава газовой смеси выращиваются поликристаллические, нанокристаллические и монокристаллические алмазные пленки. На рисунке 1 приведены основные типы микроволновых CVD реакторов на базе объемных резонаторов, которые отличаются геометрией электромагнитного поля в области формирования плазмы около подложки [1, 2].

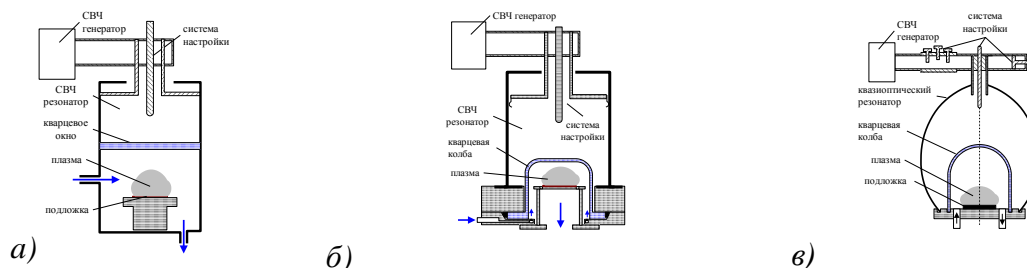


Рисунок 1

В этих реакторах плазма поддерживается СВЧ излучением, которое имеет частоту 2,45 ГГц или 915 МГц, поэтому наибольшие диаметры выращенных поликристаллических алмазных пленок равняются 60-75 мм и 100-120 мм, соответственно. Поликристаллические CVD алмазные пленки и пластины в настоящее время стали доступны для применения в электронике больших мощностей (выходные окна мегаваттных гиротронов на частоте 170 ГГц [3]), оптике (окна мощных CO₂-лазеров [1]) и микроэлектронике (теплоотводы [1]). Однако область применения поликристаллического алмаза ограничивается из-за наличия границ кристаллов. Более привлекательным с точки зрения широкого высокотехнологичного применения является монокристаллический CVD алмаз, исследованиям которого и посвящен настоящий доклад.

Для создания электронной компонентной базы применяются различные материалы. Примерно 85% всей электроники выпускается на основе кремния. И это соотношение, по видимому, сохранится и в будущем. Однако электроника широкозонных полупроводников, будь то карбид кремния, нитрид галлия или алмаз, будет играть все более важную роль в приложениях, требующих использования больших мощностей или высоких частот. Среди широкозонных полупроводников алмаз выделяется своими характеристиками, таблица 1 (параметры полупроводников при комнатной температуре). В таблице приведены значения подвижности дырок для полупроводникового алмаза p-типа, легированного в процессе CVD синтеза [4] и путем ионной имплантации (*) [5].

Таблица 1

Материал	Ширина зоны, эВ	Поле пробоя, МВ/см	Подвижность электронов, см ² /В с	Подвижность дырок, см ² /В с	Теплопроводность Вт/м К
Ge	0,7	0,2	3900	1900	28
Si	1,1	0,4	1500	540	150
GaAs	1,4	0,4	8500	400	46
GaN	3,0	3,0	1250	850	130
4HSiC	3,3	3,0	800	70	500
Алмаз	5,5	10	4500	3800/ 1150*	2000

Поэтому понятны усилия исследователей в различных странах по разработке алмазного материала, соответствующего требованиям электроники, для создания в конечном итоге электронных устройств. Высококачественные эпитаксиальные монокристаллические слои CVD алмаза с высокой степенью кристаллического совершенства удается выращивать [6, 7], используя в качестве подложки монокристаллы алмаза, синтезированные в аппаратах высокого давления и температуры. Одной из проблем, с которой столкнулись в настоящее время при использовании CVD алмаза, является тот факт, что при попытке легирования алмаза, то есть введения в него добавок бора для придания ему электропроводности, не удается получить материал, в котором одновременно высоки и подвижность, и плотность носителей. В однородно легированном CVD алмазе подвижность дырок уменьшается с ростом концентрации бора, рисунок 2 [8].

Известно, что преодолеть эту проблему возможно за счет создания в алмазе очень узкого сильно легированного слоя – дельта слоя. Поэтому в настоящее время интенсивно

проводится [9, 10] разработка нового способа легирования алмаза, который получил название «дельта-допинг» – его применение позволит получить материал как с высокой подвижностью, так и с высокой плотностью носителей.

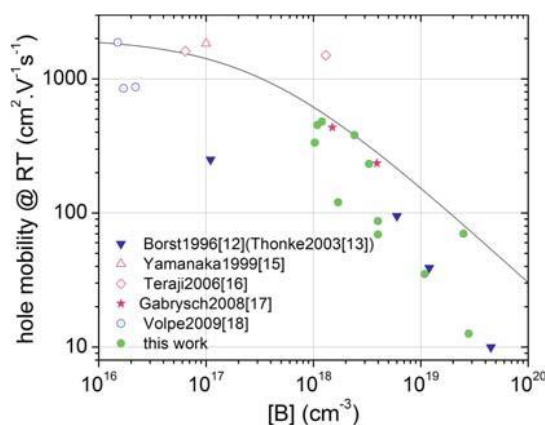


Рисунок 2

Один из способов создания дельта слоя легированного алмаза (толщиной в несколько нанометров) состоит в быстром впрыске борсодержащего газа (например, диборана) в CVD реактор. На рисунке 3 показана схема, объясняющая принцип работы разработанного в ИПФРАН такого реактора, где 1- кварцевая трубка, 2- подложкодержатель, 3- плазма, 4- резонатор, 5- СВЧ генератор, 6- прямоугольный волновод, 7- система подачи газа, 8 – система откачки.

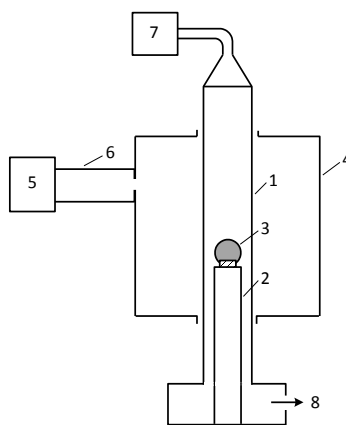


Рисунок 3

Реактор представляет собой СВЧ резонатор с цилиндрической кварцевой трубкой, внутри которой расположен подложкодержатель. Плазма поддерживается над подложкодержателем СВЧ излучением, подводимым с помощью волновода от СВЧ генератора на частоте 2,45 ГГц. Газовая смесь подается с одной стороны трубы, а с другой осуществляется откачка газа. За счет выбора размеров, давления газа и скорости газового потока в трубе обеспечивается безвихревое движение газовой смеси. Это позволяет осуществлять эпитаксиальное осаждение многослойных монокристаллических алмазных пленок, имеющих различающиеся электрофизические характеристики слоев, за счет быстрой смены состава газовой смеси.

В таком реакторе в принципе может быть реализован новый профиль дельта-легированного проводящего канала [11]. Профиль распределения концентрации допирующей примеси в этом канале имеет два близко (на расстоянии порядка 3 нм) расположенных максимума, разделённых локальным минимумом, в котором концентрация допирующей примеси на порядок меньше, чем в максимумах, рисунок 4. Такой профиль обеспечивает пространственное разделение находящегося в локальном минимуме концентрации допирующей примеси максимума концентрации носителей заряда и максимумов концентрации ионизованных атомов допирующей примеси. В результате этого рассеяние носителей заряда на ионизованных атомах допирующей примеси становится менее интенсивным, чем в случае профиля с одним максимумом концентрации допирующей примеси (применённого, например, в работе [12]). Это приводит к существенному увеличению подвижности носителей заряда в дельта-легированном проводящем канале и, следовательно, повышению быстродействия основанного на нём полевого транзистора. На рисунке 4 представлен рассчитанный профиль дельта-легированного слоя с двумя максимумами. Расстояние между максимумами 1 и 2 концентрации бора, т.е. толщина легированного дельта-слоя, равна 3 нм, концентрация бора в максимумах – $2,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Зависимости концентраций ионизованных атомов бора, N^- (сплошная линия), и дырок, p (пунктир), от отсчитываемой от центра дельта-легированного проводящего канала координаты x [11].

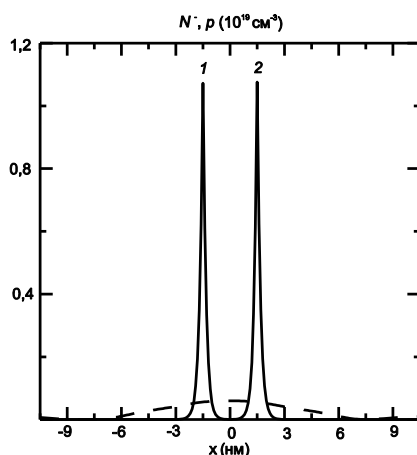


Рисунок 4

В настоящее время имеются примеры лабораторных разработок приборов на основе CVD алмаза: диодов Шоттки и полевых транзисторов. Для реализации силовых высокочастотных приборов на основе CVD алмаза существует два основных подхода, суть которых заключается в формировании на поверхности канала с высокой проводимостью: (1) использование дельта легированных бором слоев алмаза (толщиной 5-20 нм) и (2) использование гидрогенизированных (H-terminated surface) слоев. На рисунке 5 приведены структуры первого [13] и второго [14] вариантов полевого СВЧ транзистора. Так, в первом варианте [13] используется тонкий дельта-слой, легированный бором, рисунок 5(а). Этот слой наносится на высококачественный CVD алмаз толщиной 50-250 нм. На поверхность дельта слоя снова осаждается тонкий слой CVD алмаза-изолятора, на котором размещается затвор из алюминия. Толщина дельта слоя не превышает 10 нм. Канал формируется непосредственно над легированным слоем и чем острее профиль легирования, тем выше подвижность дырок в канале.

Другой вариант транзистора разработан на основе поверхностной проводимости алмазных пленок. Дело в том, что при синтезе CVD алмаза его поверхность содержит много атомарного водорода (hydrogen-termination), что приводит к появлению тонкого приповерхностного слоя с проводимостью р-типа, в результате формируется слой двумерного дырочного газа. Затвор изменяет проводимость дырок, делая возможным работу транзистора [14], рисунок 5(б).

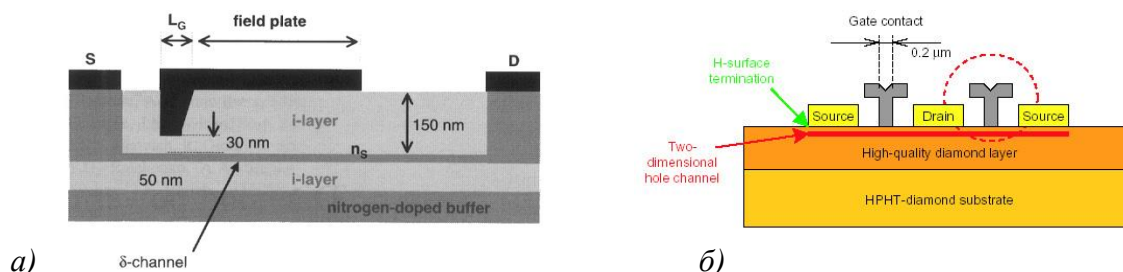


Рисунок 5

В настоящее время СВЧ транзисторы на CVD алмазе имеют максимальную частоту до 81 ГГц и ведется разработка структур способных работать на частоте до 200 ГГц и выходной мощностью 27 Вт/мм. Оценки показывают, что на $4 \times 4 \text{ мм}^2$ алмазной структуре 100 Вт усилитель может работать при максимальной температуре в канале всего равной 237°C [15].

О создании высоковольтного диода Шоттки на монокристаллическом CVD алмазе с различными характеристиками сообщалось в работах [16, 17]. Например, диод, разработанный компанией Element Six (Великобритания), может работать при напряжении 1700 В и плотности тока более 10 А/см^2 .

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

Библиографический список

1. Diamond Films Handbook, Ed. by J. Asmussen and D. K. Reinhard, New York, Marcel Dekker, 2001
2. Funer M., Wild C., Koidl P., Appl. Phys. Lett., 1998, v.72, pp.1149-1151
3. Thumm M., Diamond and Related Materials, 2001, v.120, pp.1692-1699
4. Isberg J., Hammersberg J., Johansson E. et al., Science, 2002, v.297, pp.1670-1672
5. Ratnikova A.K., Dukhnovsky M.P. et al., Diamond and Related Materials, 2011, v.20, pp.1243-1245
6. Gu Y., Lu J., Grotjohn T. et al., Diamond and Related Materials, 2012, v. 24, pp.210-214
7. Tallaire A., Achard J., Brinza O. et al., Diamond and Related Materials, 2013, v. 33, pp.71-77
8. Barjon J., Habka N., Mer C. et al., Phys. Status Solidi RRL, 2009, v.3, N6, pp.202-204
9. Volpe P.N., Tranchant N., Arnault J.C. et al., Phys. Status Solidi RRL, 2012, v.6, No. 2, pp.59-61
10. Mer-Calfati C., Tranchant N., Volpe P.N. et al., Materials Lett., 2014, v.115, pp.283-286
11. Kukushkin V.A., Snider G., Bogdanov S.A. et al., Phys. Status Solidi RRL, 2014, v.8, No. 10, pp.876-879
12. El-Hajj H., Denisenko A., Kaiser A. et al., Diamond and Related Materials, 2008, v.17, pp.1259-1263
13. Denisenko A., Kohn E., Diamond and Related Materials, 2005, v.14, pp.491-498
14. Kasu M., NTT Technical Review, 2004, v.2, N6, pp.19-24
15. Aleksov A., Kubovic M., Kaeb N. et al., Diamond and Related Materials, 2003, v.12, pp.391-398.
16. Nawawi A., Tseng K.J., Rusli et al., Diamond and Related Materials, 2013, v.36, pp.51-57.
17. Blank V.D. et al., Diamond and Related Materials, 2015, doi: 10.1016/j.diamond.2015.01.005