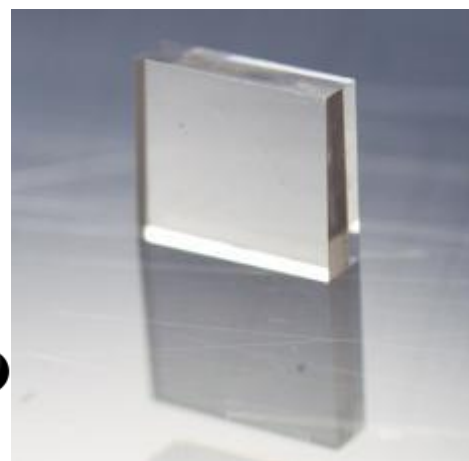
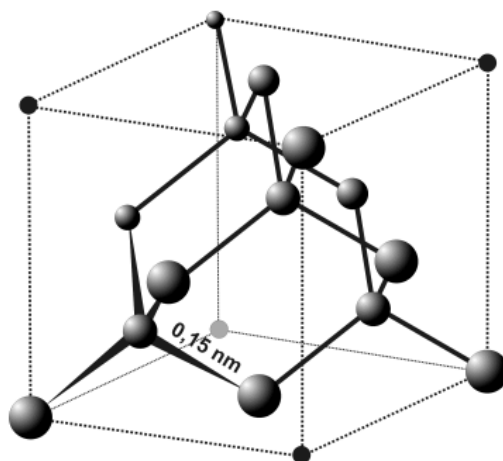


Оптические резонаторы на основе алмазных мембран.

В.Г. Ральченко, В.С. Седов.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук;
ООО «СВД.Спарк».*

Алмаз является уникальным материалом, обладающим набором непревзойденных характеристик. Так, теплопроводность монокристаллического алмаза при комнатной температуре достигает 2400 Вт/м•К, что является рекордом среди объемных твердых тел и делает алмаз лучшим материалом для разного рода теплоотводов. Твердость алмаза 100 ГПа также является самой высокой и обеспечивает промышленный спрос на алмаз в качестве материала для режущего инструмента, абразива, износостойких покрытий. Химическая инертность алмаза позволяет обеспечить таким покрытиям дополнительную защиту при функционировании в агрессивных средах. [1]



Кристаллическая решетка и образец высокочистого синтетического алмаза.

Электрические свойства алмаза – высокие дрейфовая скорость носителей тока и напряженность поля электрического пробоя, большая

ширина запрещенной зоны (5,4 эВ) делают его серьезным конкурентом традиционным материалам, используемым в электронике. Благодаря своей высокой радиационной стойкости алмаз является подходящим материалом для использования в космической и ядерной промышленности (терморезисторы, детекторы и дозиметры ионизирующих излучений и т.д.).

Первым промышленным методом получения алмаза был синтез при высоких давлениях и высоких температурах (ВДВТ метод). Он происходит в термодинамически стабильных условиях в обогащенном углеродом расплаве. В отличие от природного зарождения, здесь присутствуют растворенные металлы как катализаторы реакций, такие как: Fe, Co или Ni. [2]

Большинство произведенных этим методом алмазов – малые крупинки, которые содержат высокую концентрацию примесей и используются в основном для технических применений. Длительные периоды роста в тщательно контролируемых условиях делают возможным производство монокристаллических кристаллов с размерами до 8 мм.

Добавление гетерных смесей (например, Ti, Al, Zr) в реактор позволяет получать и более чистый алмаз. При этом, в первую очередь, минимизируется присутствие азота. В таком процессе может быть достигнута высокая степень совершенства решетки при площади кристалла более 4 x 4 мм².

Для получения более крупных кристаллов, а также поликристаллических пленок, используют метод химического осаждения из газовой фазы (Chemical Vapor Deposition - CVD). Суть метода заключается в нагреве углеводородной газовой смеси, например, метан-водородной, до температуры активации, при которой образуются необходимые для роста частицы (радикалы, ионы, кластеры), участвующие затем в химических реакциях на поверхности подложки с образованием алмаза.

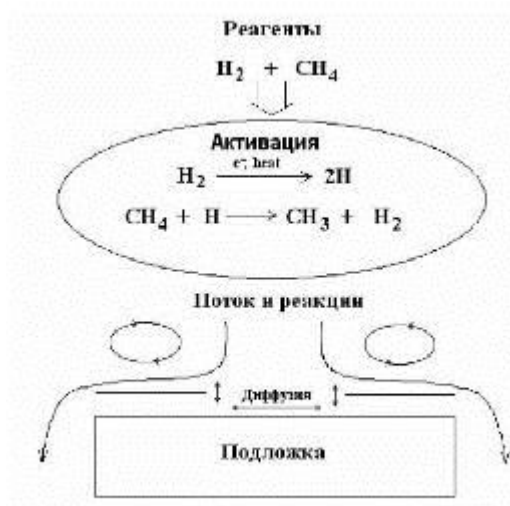


Схема процесса осаждения алмаза из газовой фазы в реакционной смеси «метан-водород».

В качестве источников углерода могут использоваться различные углеродсодержащие газы, среди которых метан самый распространенный. В отличие от HPHT синтеза, который обычно осуществляется при давлениях более 5 GPa, газофазное осаждение алмаза происходит при давлениях порядка нескольких десятков или сотен Торр. Значения скорости осаждения алмаза методом CVD находятся в широком диапазоне от десятых долей микрона до сотен микрон в час. [3]

Самым чистым и одним из самых распространенных методов синтеза алмаза является осаждение в микроволновой (СВЧ) плазме или MWCVD. СВЧ плазма «стерильна» в том смысле, что отсутствуют какие-либо распыляемые электроды, поэтому содержание примесей от компонентов реактора в алмазе наименьшее по сравнению со всеми другими известными методами.



Установка ARDIS-100 для синтеза алмаза в СВЧ плазме. Вид плазмы при синтезе алмазной пленки на подложке кремния диаметром $\varnothing 57$ мм.

Главным направлением синтеза алмаза является получение крупных поликристаллических и монокристаллических алмазных пластин, которые могут быть использованы в качестве окон при работе с мощными источниками электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн.



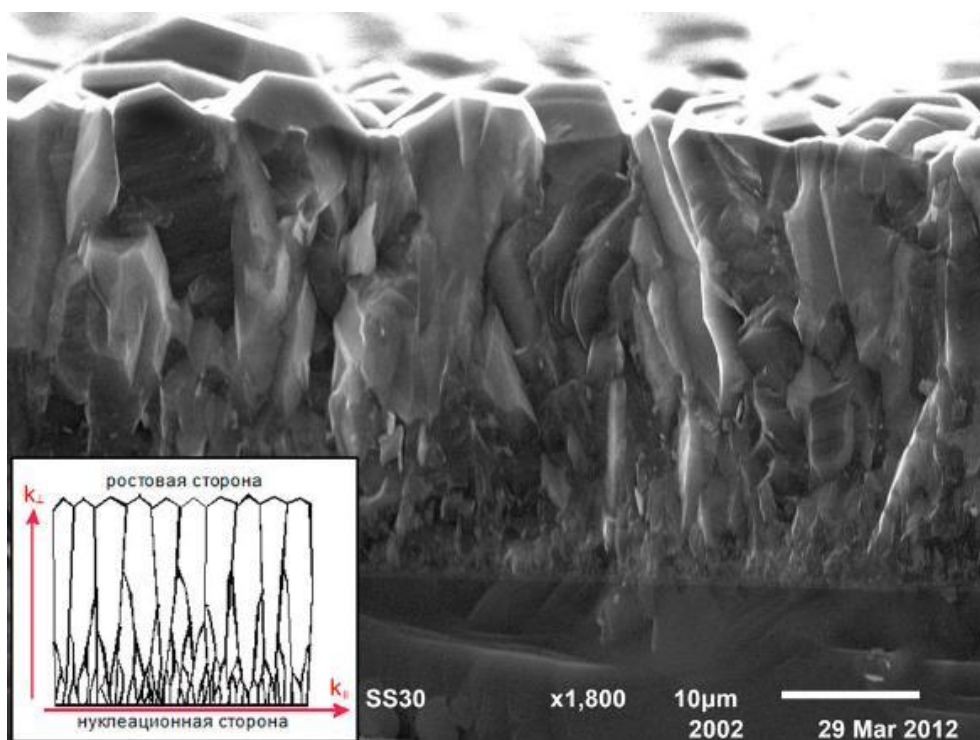
Поликристаллическая алмазная пластина диаметром 80 мм.

[\(http://www.diamond-materials.com/\)](http://www.diamond-materials.com/)

Но ввиду сложности синтеза макроскопической фазы алмаза и относительно низких скоростей осаждения (для поликристаллического алмаза обычно $\sim 1-10$ мкм/час), его свойства часто выгодно использовать в форме тонких микро- и нанокристаллических пленок толщиной в несколько

микрометров и менее. Важной задачей здесь является получение сплошных равномерных пленок минимальной толщины.

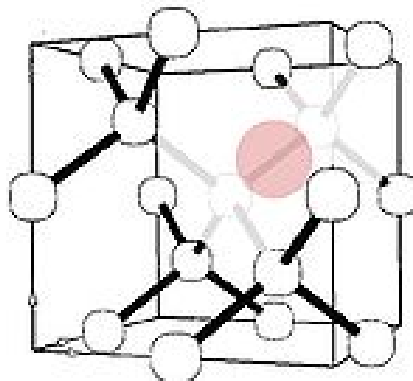
Самые распространенные, микрокристаллические алмазные пленки имеют колончатую структуру с поперечным размером зерна от единиц до сотен микрон в зависимости от толщины пленки. Особенность нанокристаллических алмазных пленок заключается в размерах зерен в десятки – сотни нанометров. Следствием является значительно меньшая шероховатость поверхности нано- пленок, чем у микрокристаллического алмаза той же толщины, что, в свою очередь, может быть предпочтительным для применений в оптике и трибологии.



Колончатая структура поликристаллической алмазной пленки, выращенной методом CVD, на примере микрокристаллической пленки толщиной 30 мкм.

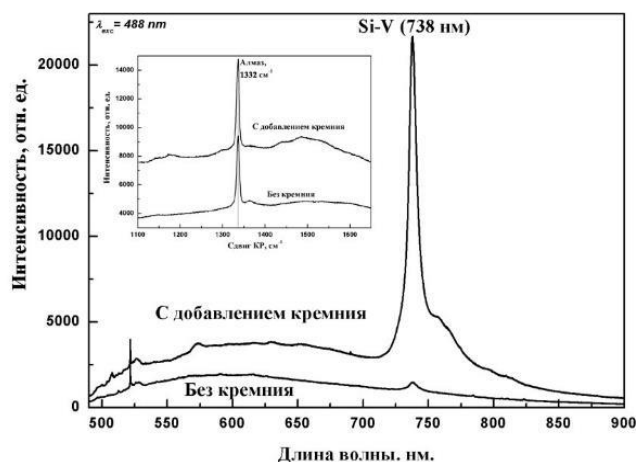
Так, тонкие алмазные пленки (мембраны) представляют интерес для практической реализации квантовых фотонных технологий при комнатной температуре (однофотонные эмиттеры для квантовых вычислений) в силу высокой яркости и большого времени когерентности излучения центров окраски, в частности, комплексов «азот-вакансия» (N-V) и «кремний-вакансия» (Si-V). Все другие варианты сред для этих целей, например, однофотонные эмиттеры на квантовых точках, требуют охлаждения до

предельно низких температур. Кроме того, яркая фотолюминесценция (ФЛ) алмаза на этих и других центрах (Ni-V), даже из столь малых объемов, как алмазные наночастицы (5-10 нм), позволяет их использовать в качестве оптических маркеров в биологии. [4]



Модель строения центров «Примесь-Вакансия» для крупного примесного атомов (розовый на рисунке - Ni, Co, Si, S, и т.п.), замещающего два атома углерода. Структура связей примеси с атомом до конца не изучена.

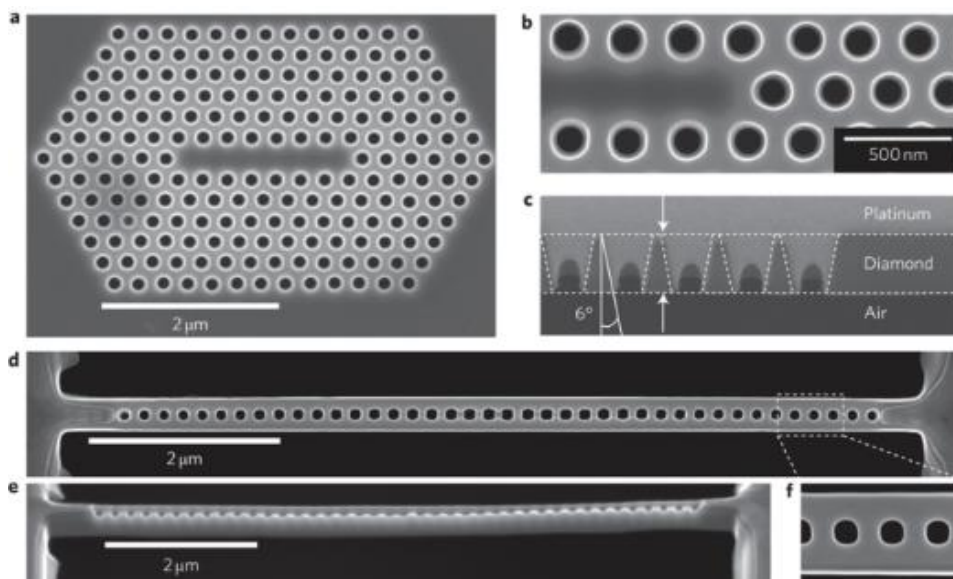
Si-V дефекты характеризуются высокостабильной и узкополосной люминесценцией на длине волны 738 нм с квантовым выходом ~ 10% при комнатной температуре.



Спектр фотолюминесценции - усиление узкополосного свечения легированного алмаза по сравнению с нелегированным.

Спонтанное излучение таких центров может быть усилено за счет помещения эмиттера в оптический резонатор определенной геометрии (Перселл-эффект). [5]

Так, повышенный интерес в последнее время уделяется формированию ионным травлением в тонких алмазных мембранах структур, состоящих из нанотверстий диаметром 100-200 нм, которые способствуют излучению в полосе длин волн, определяемых геометрическими характеристиками изготовленной структуры. Источниками излучения являются N-V и Si-V центры в алмазе. Основным показателем резонаторов различных геометрий является добротность Q резонатора.



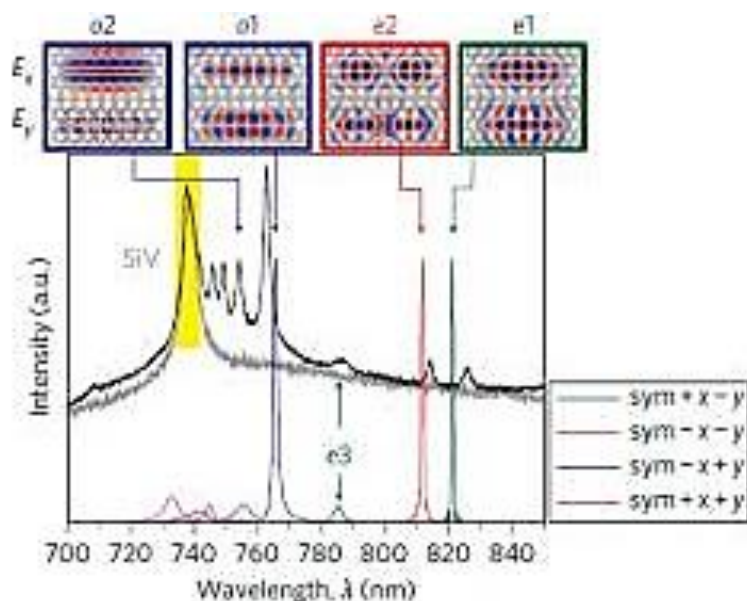
Двумерные и одномерные оптические резонаторы, сформированные в тонкой (300 нм) монокристаллической алмазной мембране. [6]

Такие резонаторы с встроенными N-V или Si-V центрами рассматриваются как элементная база для квантовых вычислений, однако главным сдерживающим фактором реализации подобных устройств является сложность изготовления подобных структур, заключающаяся в чувствительности добротности резонатора к отклонениям от идеальных пропорций, рассчитанных теоретически. Так, отклонения всего в 10 нм могут привести к снижению добротности резонатора почти в 2 раза, а изменение форм отверстий с цилиндрической на конусную с углом всего в 10° к нормали могут и вовсе сделать усиление едва уловимым. [7]

Действительно, согласно расчетам, такие резонаторы наиболее чувствительны к искажению радиуса отверстий и наличию угла

расхождения, связанного с дефокусировкой ионного пучка по мере протравливания алмазной мембраны. Это налагает дополнительные требования на технологию формирования отверстий методом ФИП. Важным неучтенным фактором также является требование к низкой шероховатости пленки для обеспечения плоскопараллельности контуров мембраны. Наибольшие трудности вызывает наличие значительной шероховатости ростовой стороны (противоположной подложке), на которой имеется тенденция образовывать в ходе синтеза ограниченные кристаллиты.

Первые работы на тонких поликристаллических мембранах (без легирования N или Si) позволили продемонстрировать наличие эффекта усиления определенных полос в спектре люминесценции резонатора [8]. Полученная добротность составляла всего $Q=585$, в отличие от теоретически предсказанного значения $10^3 - 10^4$. Авторы связали это с поликристаллическим строением материала, однако переход на тонкие *монокристаллические* мембраны, сопровождаемый резким усложнением изготовления каждой мембранной структуры, позволил повысить значение добротности лишь на 20% (до $Q=700$) ввиду того, что основное ограничение на величину добротности накладывает не качество или внутренняя структура материала, а сложность изготовления нанотверстий заданной геометрии.



Усиление фотолюминесценции алмаза в центральной области
оптических резонаторов.

Таким образом, в данной области на текущий момент неразрешенной является задача доступного изготовления алмазных мембран для экспериментального изучения закономерностей изменения добротности оптических резонаторов от геометрических параметров сформированных массивов отверстий.

Литература:

1. Balmer R., Brandon J., Clewes S. et al. Chemical vapour deposition synthetic diamond: materials, technology and applications // J. Phys.: Condens. Matter – 2009. – №21. – p. 364221-364244.
2. Bundy F., Hall H., Strong H., Wentorf R. Man – Made Diamonds // Nature. – 1955. – № 176. – p. 51-55.
3. Prelas M., Popovici G., Bigelow L. Handbook of industrial diamonds and diamond films // New York: Marcel Dekker – 1998.
4. Vlasov I., Barnard A., Ralchenko V., et al. Nanodiamond Photoemitters Based on Strong Narrow-Band Luminescence from Silicon-Vacancy Defects // Adv. Mater. – 2009. – 21. – p. 808.
5. Purcell E. Spontaneous emission probabilities at radio frequencies // Phys. Rev. – 1946. - №69, p. 681.
6. Riedrich-Möller J. et al. One- and two-dimensional photonic crystal micro-cavities in single crystal diamond // Nature Nanotechnology. – 2012. – №7. – p. 69-74.
7. Bayn I. et al. Processing of photonic crystal nanocavity for quantum information in diamond // Diamond & Related Materials. – 2011. - №20. – p. 937–943.
8. Wang C., Hanson R., Awschalom D., Hu E., Feygelson T., Yang J., Butler J. Fabrication and characterization of two-dimensional photonic crystal microcavities in nanocrystalline diamond // Appl. Phys. Lett. – 2007. - №91. - 201112.