

БИБЛИОГРАФИЯ

## Настольная книга по проблеме промышленных алмазов и алмазных пленок

**Handbook of industrial diamonds and diamond films**  
(Eds M. Prelas, G. Popovici, L.K. Bigelow)  
(New York: Marcel Dekker Inc. USA, 1997) 1214 p.  
PACS number: 01.30.Mm

За последние годы алмаз, алмазные пленки и алмазоподобные углеродные пленки приобрели первостепенное значение во многих областях новой техники. Некоторые из практических применений этих материалов оказались весьма рентабельными. Вместе с привлекательными качествами алмазных материалов необходимо отметить то обстоятельство, что выращивание крупных монокристаллов алмаза с заданными электрофизическими параметрами до сих пор требует крайне сложной технологии. Стоимость таких кристаллов очень высока, а проблема локального легирования их электрически активными примесями решена лишь частично. Альтернативный и привлекательный путь основан на синтезе алмазных пленок из газовой плазмы, содержащей ионы углерода и водорода.

Проблема, которой посвящена рецензируемая книга, ежегодно обсуждается на нескольких международных конференциях (в 1998 г. они состоятся в США и ЮАР). В 1994 г. был издан сборник обзоров 30 ведущих специалистов из разных стран под редакцией Г. Дэвиса [1]. Рецензия на эту книгу была опубликована в УФН. К сожалению, книга не была издана в России и Украине, где ведется активная работа по синтезу монокристаллов алмаза и алмазных и алмазоподобных углеродных пленок.

Рецензируемая книга велика по объему (1214 с.). Среди авторов 34 обзорных глав — специалисты по физическим явлениям в алмазах; работы многих из них заслужили мировое признание. Приятно отметить, что среди авторов — российские, белорусские и украинские физики В.И. Негша, С.М. Пименов, В.Г. Ральченко, А.Г. Гонтарь, А.М. Зайцев.

Книга открывается статьей А.Т. Коллинза, посвященной зонной структуре алмаза. Содержание статьи охватывает более широкий круг вопросов, чем ее заглавие, так как помимо экспериментальных данных, на основе которых удается построить надежные представления о зонной структуре алмазов и их интерпретации, в ней рассмотрен и энергетический спектр основных точечных дефектов (вакансия) и двух электрически активных примесей (бор и азот). Содержание статьи в значительной мере основано на результатах работ, ранее отображенных в [1], к которым добавлены результаты, полученные с применением синхронного излучения для определения оптических констант при энергиях фотонов  $h\nu = 5 - 10$  эВ (Логофетидис, 1992 г.). Ссылки на известные теоретические модельные расчеты, проводившиеся в последние годы Бернхольцем и его коллегами, к удивлению, отсутствуют.

Следующий обзор (Р. Клаузинг) посвящен вопросу о морфологии монокристаллов алмазов, выращиваемых основными современными методами, природного алмаза, а также морфологии кристаллов (зерен) в алмазных пленках, выращиваемых из газовой плазмы. Обращает на себя внимание интерес автора к некоторым типам небольших алмазов, выращиваемых при высоком давлении и высокой температуре (метод НРНТ), когда удается вполне воспроизведимо управлять морфологией кристаллов алмаза с оптимальными параметрами для решения практических задач (резка твердых материалов).

Интересны соображения автора о влиянии примеси кислорода на характер растущих кристаллов алмаза.

Механическим свойствам всей совокупности алмазных материалов посвящена статья П. Гиелиссе. В настоящее время именно на использовании механических свойств основаны главные применения алмазов. Статья Гиелиссе содержит четкие определения свойств и областей применения алмазных материалов в зависимости от методов их получения и геометрии (мелкие кристаллы различной формы, пленки). Рассмотрены и свойства природных кристаллов алмазов. Статья содержит таблицы и графики, позволяющие быстро ориентироваться в сложной и очень разнородной области технических применений алмазных материалов. Интересно обсуждение специфического свойства, которое авторы именуют toughness<sup>1</sup>. Имеется в виду предельное значение импульсно, т.е. "почти мгновенно" выделяемой в материале энергии, при превышении которого он разрушается. Некоторая аналогия имеет место с процессами возникновения скоплений (клластеров) радиационных дефектов в конце пробега тяжело заряженных частиц. Автор приводит приближенные формулы, позволяющие сравнивать стойкости алмазов различных типов.

Глава 4 (Д'Эвелин) посвящена поверхностным свойствам алмазов. Эта область, в значительной мере граничащая с физической химией, разумеется, важна для решения практических задач и представляет фундаментальный интерес. В обзоре отражено современное состояние сведений о свойствах поверхности алмазов и

<sup>1</sup> Возможно, что слово "стойкость" ближе всего к английскому термину.

взаимодействии с ней водорода, кислорода, оксидов и галогенов. Подробно описана структура поверхностей алмазов с плоскостями основных типов (111); (100) и (110). Дан анализ химических реакций различных веществ с поверхностью алмазов (десорбция, взаимодействие атомарного водорода с другими адсорбированными примесями, диффузия на поверхности). Вызывает сожаление отсутствие ссылок на работы Ю.В. Плескова (Москва), опубликованные в ведущих российских журналах, издаваемых в английском переводе.

Статья, посвященная теплоемкости, теплопроводности и тепловому расширению алмазов (В.И. Непша, Москва), содержит данные о свойствах алмазов, давно определенных и представляющих первостепенный интерес в теории твердых тел и в практике. Автор приводит принципиально важные данные о теплопроводности кристаллов алмазов, обогащенных одним из изотопов углерода  $^{13}\text{C}$ , особенности которой были предсказаны Берманом.

Следующая глава (Дж. Гребнер) содержит данные о методике определения "тепловых" параметров алмазов. Большое внимание обращено на методику измерений в CVD-пленках. К сожалению, в главе отсутствуют данные о простых и эффективных методах, разработанных в Москве Ю.А. Концевым и его сотрудниками и опубликованных в 1995–1997 гг.

Самая большая по объему глава (А.М. Зайцев, Минск) посвящена оптическим свойствам алмазов. По существу, эта глава представляет собой монографию. Содержание главы в определенной мере совпадает или перекрываеться с аналогичными разделами книги [1] и, в то же время значительно превосходит [1] по приведенным данным русскоязычных авторов из стран СНГ. Эта глава, как и вся рецензируемая книга, превосходно иллюстрирована и отражает большой труд, вложенный в нее автором.

Аналогичные комментарии можно отнести к главе "Электрические и электронные свойства алмазов" (А.Г. Гонтарь, Киев). Как и в обзорах практически всех авторов, возросла доля ссылок на работы, выполненные на CVD-пленках.

Глава 10 (К. Мак Намара, Ратледж и К. Глисон) содержит подробное описание экспериментальных методов исследования основных параметров алмазов. Обзор основан на работах, опубликованных, в основном, за последние годы, включая 1995 г. Его содержание отображает интерес авторов в первую очередь к электронной структуре и оптическим явлениям в алмазе частично за счет анализа явлений переноса и неравновесных электронных процессов. Глава содержит материал, ценный для широкого круга специалистов, работающих в области физики и технологии не только алмазов, но и всего семейства широкозонных полупроводников. По некоторым из подразделов главы существует подробная литература (методы, основанные на рассеянии электронных пучков, электронная микроскопия, дифракция рентгеновских лучей и электронов). Следует отдать должное авторам, насколько нам представляется, впервые обобщившим возможности и результативность различных экспериментальных подходов к определению параметров алмазов (см. табл. 1 на с. 414 книги).

Относительно раздела, касающегося анализа данных об аннигиляции позитронов, следует заметить, что они развиты лишь в немногих исследовательских центрах.

Пока они мало доступны большинству экспериментаторов.

Большая 11-я глава (Д. Гудвин и Дж. Батлер) посвящена теории и методикам химического осаждения пленок алмазов из газовой плазмы (CVD). Как известно, первые экспериментальные результаты в этой области были получены еще в середине 50-х годов, однако очень большой интерес к углеродным пленкам проявился в начале 80-х годов. В обширном списке литературы приведено около 20 названий обзорных статей, опубликованных после 1987 года! Особое внимание обращено на важную роль атомарного водорода, присутствие которого в плазме, по большинству опубликованных данных, считают критическим фактором в сложной цепи процесса роста пленок. Приведены современные данные о содержании атомарного водорода в плазме.

Значительная часть главы содержит описание электрофизических и иных свойств пленок, выращенных CVD-методом. Эти заключительные результаты представляют большой интерес. Основная часть главы посвящена химическим процессам в плазме, взаимодействующей с растущей алмазной пленкой или иной подложкой. Выводы авторов, согласующиеся с результатами многочисленных параллельных исследований, состоят в том, что качество пленок улучшается с относительным количеством атомарного водорода, но при увеличении скорости роста их дефектность неизменно растет.

Следующие главы (Боземан, Стонер и Гласс) содержат обзор данных о нуклеации в процессе роста алмазов и эпитаксиальном росте этого вещества на различных подложках, включая BN, окись берилия BeO, карбид кремния SiC, никель Ni и кобальт Co. Особый интерес авторы проявили к процессам нуклеации в присутствии приложенного извне электрического поля. Говорить об установлении надежной технологии подобных процессов, по-видимому, еще рано. Цитируемая литература, в основном, очень нова (1988–1995 гг.).

Обзор Калиша и Прауэра посвящен проблеме ионной имплантации в алмазы и алмазные пленки, включая и явления фазовых переходов алмаз–графит, осуществляемые в тонких слоях, глубина которых в определенных пределах удается управлять.

Специалистам известно, что именно ионная имплантация (ИИ) еще в 60-х гг. была с определенным успехом применена для локального легирования алмазов [3]. Естественные причины этого обсуждаются и в рецензируемой книге, в которой использована литература вплоть до 1995 г. Особое внимание авторы обратили на неизбежные радиационные нарушения и фазовые переходы (аморфизацию и переход алмаза в графит). Должное внимание в обзоре удалено импульсному локальному отжигу имплантированных слоев алмаза. Содержание представит интерес для специалистов, работающих в этом направлении. Судя по публикациям самого последнего времени, работа в данном направлении интенсифицируется.

Следующая глава (Ральченко и Пименов) содержит данные о механической обработке кристаллов алмазов, т.е. таких технических методов, как раскалывание, резка механическими воздействиями, а также воздействием интенсивного лазерного излучения или электрического разряда (искры). Отдельный раздел содержит описание методов полировки алмазов — старинного искусства, которым занимался еще философ Б. Спиноза! Современ-

ная лазерная методика позволяет быстро и воспроизведимо достигать прекрасных результатов. Приведены также новые данные о методике локального осаждения алмазных пленок, что открывает новое направление в твердотельной электронике, альтернативное локальному травлению (ion milling) (см., например, микрофотографию на с. 1009).

Последняя глава (Дрейфус и Фокс) представляет собой критический обзор данных об активных элементах твердотельной электроники на основе алмазов по публикациям за последние годы. Авторами использовано большое число первоисточников, включая публикации 1995 г. В начале приводится критический анализ основных классов алмазов как материала для электронных устройств, а также сведения о существующих способах создания устойчивых электрических контактов алмазов с другими материалами (в первую очередь — металлами). Далее анализируются основные пути и возможности создания приборов на основе алмаза. За этим следует ценный для инженеров и технологов справочник об уже осуществленных устройствах (1982—1995 гг.), включающих наименования, основные параметры и ссылки. Глава, в целом, обязательно должна быть сделана доступной специалистам в СНГ (в первую очередь в России, Украине, Белоруссии), однако публикация ее в УФН вряд ли целесообразна.

Подводя итоги ознакомления с книгой, надо отметить, что ее появление принесет очень большую пользу

специалистам в области твердотельной электроники. В сравнении с монокристаллами германия и кремния, где решающие успехи, приведшие к становлению современной микроэлектроники, были достигнуты за 5—7 лет после создания транзисторов, алмаз оказывает физикам, химикам и инженерам упорное сопротивление, но дело идет вперед.

Повторение ряда фактов, касающихся электрофизических параметров алмазных материалов, а также некоторые различия в численном выражении их параметров неизбежны. Составители и редакторы книги — Марк Прелас, Галина Попович и Льюис Биглоу издали за короткий срок ценную для специалистов книгу, которую следует иметь в каждой фундаментальной библиотеке, пополняемой изданиями в области прикладной физики и современной твердотельной электроники.

### Список литературы

1. *The Properties and growth of Diamond* (Ed. G Davies) (London: JEEE, 1994)
2. Зайцев А М *Коллекция данных об оптических свойствах алмазов*
3. Вавилов В С УФН **167** 18 (1997)

*В.С. Вавилов*

## Новые книги по физике

### В издательской фирме ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ Академиздатцентра "Наука" РАН

вышли в свет в 1995—1998 гг. при поддержке  
РОССИЙСКОГО ФОНДА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА

БОРИСОВИЧ Ю.Г., БЛИЗНЯКОВ Н.М., ИЗРАИЛЕВИЧ Я.А., ФОМЕНКО Т.Н. Введение в топологию. — 2-е изд., 1995, Пер. 416

ГОППА В.Д. Введение в алгебраическую теорию информации, 1995, Обл.112

ЕЛКИН В.И. Редукция нелинейных управляемых систем: Дифференциально-разностный подход, 1997, Пер. 320, 78-97.И

ЖУРАВЛЕВ В.Ф. Основы теоретической механики, 1997, Пер. 320, 70-98.И

ЛАБЗОВСКИЙ Л.Н. Теория атома: Квантовая электродинамика электронных оболочек и процессы излучения, 1996, Пер. 304, 81-97.И

ЛАВРОВ И.А., МАКСИМОВА Л.Л. Задачи по теории множеств, 1995, Обл. 256

ЛАНДАУ Л.Д., ЛИФШИЦ Е.М. Статистическая физика. Часть 1. —

4-е изд. (Теор. физ.: Т. V), 1995, Пер. 608, 93-96.И

ПИКУЛИН В.П., ПОХОЖАЕВ С.И. Практический курс по уравнениям математической физики, 1995, Пер. 224

СВЕТОЗАРОВА Г.И., КОЗЛОВСКИЙ А.В., СИГИТОВ Е.В. Современные методы программирования в примерах и задачах, 1995, Пер. 432

СТРУКОВ Б.А., ЛЕВАНЮК А.П. Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах. — 2-е изд., 1995, Пер. 304, 94-96.И

#### СПРАВОЧНАЯ ЛИТЕРАТУРА

ЗАЙЦЕВ В.Ф., ПОЛЯНИН А.Д. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям: Точные решения, 1995, Пер. 560

Фундаментальные экологические проблемы в разработках Российской академии наук: Справочное руководство /Сост. А.А. Веденяпин,

И.К. Козлова, Л.В. Шаумян, 1995, Обл. 96

#### НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ ЛИТЕРАТУРА

ИГОШИН В.И. Михаил Яковлевич Суслин (1894—1949), 1996, Обл. 160, 208-96.И

СОНИН А.С. "Физический идеализм": История одной идеологической кампании, 1995, Обл. 224

СОНИН А.С., ФРЕНКЕЛЬ В.Я. Всеволод Константинович Фредерикс (1885—1944), 1995, Обл. 176, 207-96.И