Ноябрь 1993 г. Том 163, № 11

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

БИБЛИОГРАФИЯ

СВОЙСТВА ПРИРОДНОГО И СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА

The Properties of Natural and Synthetic Diamond. Ed. J. E. Field. London, New York, Academic Press, 1992. 710 p.

Выход в свет рецензируемой книги, написанной выдающимися английскими, южноафриканскими и японскими специалистами, обусловлен в большой мере успехами в методах выращивания алмазных пленок из газовой плазмы.

Монография содержит подробный анализ состояния обширной области современной физики твердого тела и материаловедения. Алмаз — одно из простейших по своей структуре кристаллических веществ — с давних пор привлекал и привлекает к себе внимание людей с крайне различающимися интересами. В течение нескольких последних десятилетий алмаз стал не только объектом фундаментальных исследований, но и ценнейшим техническим материалом. Развитие методов химической кристаллизации алмазных пленок из газовой плазмы низкого давления, содержащей ионы углерода, позволяет считать, что уже в ближайшее время, помимо ставших традиционными применений алмаза для механической обработки твердых материалов, алмаз станет важным материалом в твердотельной электронике. Книга, появившаяся в 1992 г., представляет собою расширенный вариант изданной в 1979 г. также под редакцией Дж. Э. Филда книги "The Properties of Diamond", хорошо известной российским специалистам, но не переведенной своевременно на русский язык. Зарубежные коллеги часто говорили об издании 1979 г., как о "Библии алмаза". Предисловие к новому изданию написал член Королевского Общества сэр У. Митчелл, работы которого, посвященные в основном природе центров локализации электронов в алмазе, были выполнены в университете Рединг и представляют собою фундамент, на котором основаны более поздние современные исследования этого вопроса.

Содержание книги разделено на 4 части и Приложение. Первая часть состоит из 8 глав и начинается обзором современного состояния теории алмаза, составленным А.М.Стоунхэмом (Харуэлл), известным своей монографией по теории точечных дефектов в полупроводниках [1]. В обзоре дан анализ развития методов расчета зонной структуры и локальных электронных состояний в алмазе, включая такие особенности, как эффект Яна-Теллера и его влияние на энергетический спектр состояний, связанных с точечными дефектами, где особенно интересны сопоставления с новыми экспериментальными данными, полученными в значительной мере оптическими методами и приведенными в последующих главах.

Глава 2 (авторы Кларк, Коллинс и Вудс) посвящена анализу имеющихся данных об оптическом поглощении и спектрах люминесценции алмаза. Как известно специалистам, в этой области имеет место очень высокий уровень экспериментальной методики и уже довольно давно была осуществлена надежная идентификация множества узких спектральных линий, связанных с центрами локализации носителей заряда. В связи с успехами в синтезе алмазных пленок и с растущим интересом к проблемам создания полупроводникового алмаза и структур на его основе, можно ожидать появления новых важных работ в данной области.

Глава 3, написанная Селлшопом (ЮАР), содержит интересные данные о результатах изучения природы кристаллов алмаза методами воздействия на него ядерных излучений, что позволяет получать надежные данные о геометрическом распределении, количестве и микроструктуре примесных центров. В дополнение к методам, ставшим традиционными, таким, как ионная имплантация примесей в алмаз и последующий анализ их распределения по глубине и микроскопического положения относительно исходной кристаллической решетки, в обзоре Селлшопа

©В.С.Вавилов 1993

приведены современные данные о каналировании быстрых ионов в алмазе и явлениях деканалирования, об излучении, вызываемом каналирующими быстрыми электронами и когерентным тормозным излучением. Известно, что очень совершенные монокристаллы алмаза представляют собою наилучший объект для экспериментального изучения таких явлений, и в настоящее время в ряде развитых стран приняты программы систематических работ в этом направлении.

Глава 4 (С. Эванс) представляет собою подробный обзор состояния знаний о физике поверхности алмаза. В настоящее время наиболее подробно изучена поверхность монокристаллов кремния — главного материала современной планарной твердотельной электроники, где особенно ценные сведения об атомной микроструктуре получены методом туннельной электронной микроскопии. В изучении поверхности алмаза есть ряд нерешенных проблем, привлекающих внимание многих авторов. Обзор С. Эванса следует отнести к наиболее интересным, и он (как и большинство других разделов) заслуживает опубликования на русском языке.

Глава 5 (А.Р. Лэнг и др.) содержит данные анализа рентгеновской дифракции и топографии, позволившие подробно изучать естественные неоднородности, включение и механические напряжения в алмазе.

Глава 6 (Т. Эванс) посвящена проблеме примеси азота в алмазе. Азот, как известно, присутствует в природных кристаллах практически всегда и сильно влияет на его оптические и другие свойства. В значительной мере автор приводит уже неоднократно опубликованные за рубежом и в России данные (см., например, обзор А.А. Гиппиуса в книге, изданной в 1985 г.) [2].

Глава 7 (член Королевского Общества Р. Берман) посвящена важной проблеме теплопроводности алмаза. Здесь приведены новые данные относительно теплопроводности пленок алмаза, нанесенных путем химической кристаллизации на различные подложки. В настоящее время эти пленки все еще существенно уступают природным кристаллам типа IIa. Р. Берман приводит принципиально важные данные относительно теплопроводности синтетических кристаллов алмаза с измененным содержанием изотопа C^{13}, полученных путем перекристаллизации при высоком давлении и температуре исходного материала, которым служили алмазные пленки с необычным соотношением протоков углерода. Замеченные экспериментально изменения теплопроводности, которые много лет назад предвидел Р. Берман, вызвали большой интерес среди теоретиков и подвергаются подробному анализу.

Заключительная глава 8 первой части книги (И. Принс, ЮАР) содержит анализ состояния проблемы управления электрофизическими свойствами алмаза, где уже в течение многих лет особое внимание привлекают возможности ионной имплантации примесей. Рецензенту приятно отметить, что И. Принс подчеркивает важность работ, выполненных начиная с середины 60-х годов в Москве в Физическом институте им. П.Н. Лебедева и ИАЭ им. И.В. Курчатова и продолжающихся в настоящее время (число ссылок на них превышает 20). В беседе с рецензентом И. Принс высказал сожаление о том, что многие из работ, не переведенных на английский язык, оставались ему недоступными. В последние годы Принс предложил и осуществил методику двойной имплантации, когда в алмаз, помимо электрически активной примеси, вводятся точечные дефекты, взаимодействием которых с примесью можно в определенной мере управлять. Обзор Принса представляет интерес для специалистов, работающих в области применений широкозонных полупроводников в электронике.

Вторая часть книги посвящена геологическим данным о присутствии алмаза в земной коре (Дж.У. Харрис), глава 9 — проблеме выращивания монокристаллов алмаза (Р. Берне и Г. Дэвис) и синтезу алмаза из газовой фазы (И. Сато и М. Камо). Девятая глава содержит достаточно подробные сведения о месторождениях алмаза в различных частях земного шара. Ссылки на работы советских авторов немногочисленны, по-видимому, в связи с типичными для долгих лет прошлого трудностями в публикации статей по данному вопросу. Глава, посвященная выращиванию монокристаллов в определенной мере (в краткой форме) повторяет содержание аналогичной главы книги, изданной Филдом в 1979 г., и в дополнение приведены тщательно отобранные данные о наиболее крупных монокристаллах алмаза, выращенных в последние годы. Серьезное внимание уделено приему, получившему название реконституции, когда для получения кристаллов предельного размера и совершенства используют в качестве исходного материала большое число небольших синтетических алмазов, тщательно отобранных с целью достижения максимальной однородности свойств. Именно этим способом были выращены в 1990 г. в лаборатории "Дженерал Электрик" изотопно чи-

стые монокристаллы алмаза. Глава заканчивается кратким разделом, где рассмотрены специальные применения крупных однородных кристаллов для детекторов ионизирующего излучения и для биологических исследований в которых используется термолюминесценция.

Авторы приводят веские основания, позволяющие считать, что выращивание очень крупных монокристаллов всегда требует больших затрат и процесс роста весьма длителен (14-каратный кристалл был выращен за 500 часов).

Выращивание алмазных пленок (глава 11), в принципе, позволяет получать их на подложках большой площади, однако в течение длительного времени, по данным авторов главы, эпитаксиальные слои удавалось получить лишь на ориентированных монокристаллах алмаза, а использование других подложек приводило к росту кристаллических пленок, менее пригодных для многих практических применений. Авторы обзора И. Сато и М. Камо (Япония) в основном приводят собственные результаты. Представляют интерес данные анализа спектров комбинационного рассеяния света в пленках, из которых следует, что не все межатомные связи в пленках имеют гомеополярный характер.

Опыты, целью которых было выращивание монокристаллов из газовой фазы, по данным авторов, приводили к возникновению кристалликов размером до 10 мкм, после чего имела место вторичная нуклеация. Сопоставление содержания их обзора с публикациями в трудах последних конференций (например, "Diamond Films - 92" (Heidelberg, ФРГ) сентябрь 1992 г.) позволяет сделать вывод о том, что за последний год после того, как был подготовлен их обзор, достигнуты новые серьезные успехи.

Третья часть книги содержит данные о механических свойствах алмаза: параметрах, характеризующих прочность, и механизмах разрушения кристаллов. Как известно, именно эти свойства алмаза, в первую очередь - твердость и устойчивость к механическим, химическим и термическим воздействиям стали основой широкого применения алмаза в современной технике. Рецензенту *известно,* что обработка стали алмазными резцами была применена фирмой "Роллс-Ройс" лет 80 назад с поразительными результатами; в наши дни без алмазного инструмента высокая технология невозможна. Рецензент, работающий в области физики полупроводников, не в праве обсуждать содержание глав 12 и 13 (авторы Дж. Филд и К. Брукс), но полагает, что специалисты найдут в ней много интересного. Это же следует сказать о главе 13, (авторы Д. Табор и Дж. Филд), посвященной физическим процессам трения алмаза, соприкасающегося с алмазом и другими материалами. Интересно отметить, что ряд новых представлений о трении и механизме износа трущихся поверхностей был сформулирован недавно — в конце 80-х годов. Серьезное влияние на развитие принципиальных представлений о процессах трения оказала возможность проведения экспериментов в сверхвысоком вакууме.

Необходимость ограничить объем рецензии не позволяет подробно остановиться на содержании заключительных глав книги, посвященных данным о методике полировки алмаза и явлениях, сопровождающих ее (износ поверхности), а также о наиболее распространенных практических применениях алмаза и алмазных порошков в современной технике.

В конце книги приведены подробные таблицы основных параметров алмаза с указанием первоисточников.

Подводя итоги ознакомления с книгой, следует высказать высокое мнение о ней и пожелать издателю и авторам обзоров дальнейших успехов в их деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Стоунхэм А.* Теория дефектов в твердых телах. Пер. с англ, под ред. И. Е. Дзялошинского. М., Мир, 1978. Т. 1, 569 с. Т. 2, 368 с.
2. *Вавилов В.С., А.А. Гиппиус, Конорова Е.А.* Электронные и оптические процессы в алмазе. М., Наука, 1985. 119 с.