

ОБОЗРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Алмаз в твердотельной электронике

В.С. Вавилов

В сжатой форме приведены данные о физических свойствах алмаза как материала твердотельной электроники. Основное внимание обращено на кристаллы синтетического алмаза и на алмазные пленки, осаждаемые из газовой плазмы.

PACS numbers: 07.50.Yd, 73.90.+f

Содержание

1. Введение (17).
 2. Природный алмаз (19).
 3. Эпитаксиальные и поликристаллические пленки алмаза (19).
3.1. Эпитаксиальные пленки. 3.2. Поликристаллические пленки.
 4. Алмазная керамика (20).
 5. Электрически активные примеси в алмазе и методы их введения и активации (20).
5.1. Донорные центры. 5.2. Введение электрически активных примесей в ходе выращивания монокристаллов и пленок алмаза.
 6. Заключение (21).
- Список литературы (22).

1. Введение

Алмаз со времен возникновения цивилизации привлекал особое внимание людей. Его оптические свойства интересовали Исаака Ньютона [1]. В XIX в. было обнаружено, что алмаз представляет собой одну из форм существования элементарного углерода. В 1952 г. Кастерс [2] обнаружил среди кристаллов алмаза южноафриканских месторождений полупроводниковые алмазы. В последующие годы появились работы, посвященные явлениям, связанным с генерацией и переносом носителей неравновесного заряда (ННЗ) в кристаллах алмаза [3, 4]. Алмаз представляет собой один из наиболее простых гомеоплярных кристаллов; его ближайшими родственниками являются монокристаллы германия, кремния и "серого олова" Sn_2 . Зонная структура алмаза в настоящее время подробно изучена [3, 5, 6]. Атомы углерода в алмазе чрезвычайно прочно связаны друг с другом, и равновесная растворимость большинства примесей в нем, за исключением азота и бора, ничтожно мала.

В.С. Вавилов. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
117924 Москва, Ленинский просп. 53
Тел. (095) 135-05-51
Факс (095) 938-22-51

Статья поступила 13 марта 1996 г.

Проблема применения алмаза в твердотельной электронике возникла в середине 60-х годов в связи с успехами в технологии выращивания монокристаллов алмаза. Кристаллы алмаза давно стали замечательным объектом фундаментальных исследований в физике твердого тела. Более того, уже в 1956 г. [7] достаточно неожиданно было показано, что рост пленок алмаза возможен в довольно просто осуществляемых условиях без одновременного применения очень высоких давлений и высокой температуры (метод НРНТ). Судя по опубликованным данным, включающим весьма подробные сведения о кристаллической структуре кубического алмаза¹ [6], в настоящее время с точки зрения применений в электронике можно рассматривать несколько типов алмазных материалов, основные характеристики которых приведены в табл. 1 [8].

Известно, что природные кристаллы алмаза отличаются индивидуальностью. Неизбежное наличие в них примесей, в первую очередь азота, присутствующего не только в атомарном состоянии, но и в виде разнообразных комплексов и включений, вызывает необходимость тщательной сортировки природных кристаллов до их дальнейшей механической обработки. Синтетические кристаллы, выращенные методом НРНТ, иногда превосходят природные по своему совершенству и чистоте [6]. Однако сложность и стоимость аппаратуры, необходимой для их получения, пока (1996 г.) не позволяют с уверенностью обсуждать перспективы их сколь угодно широкого применения в электронике.

Алмазные пленки, выращиваемые в метастабильных условиях из паровой фазы (Chemical Vapour Deposition, CVD) за последнее десятилетие, привлекли очень большое внимание технологов и исследователей [6, 7]. В настоящее время удается наращивать пленки алмаза на различные подложки в установках, где для создания газовой плазмы используют накаливаемые металлические нити и явление ионизации на их поверхности, СВЧ-разряд или даже факел пламени. Площадь пленки ограничена лишь размерами установки. Наряду с действительно алмазными пленками во многих опублико-

¹ Мы не будем рассматривать свойства сравнительно мало изученного гексагонального алмаза (лонсдейлита).

Таблица 1. Характеристики алмазных материалов

Общая характеристика	Геометрия кристаллов, пленок, керамики	Наличие примесных центров. Дефекты	Подвижность электронов и дырок	Время жизни неравновесных носителей заряда
Природный алмаз	Кристаллы размером ≈ 5 мм не очень дороги. Обработка трудная	Чаще всего азот. Кристаллы типа IIb (полупроводниковые). Очень редки. Включение примеси распределено неоднородно	Предельные значения соответственно 2400 см^2 и 2100 см^2	Не более 10^{-8} с
Синтетические монокристаллы алмаза	Размеры ≈ 6 мм воспроизводимы. Есть сообщение об очень крупных кристаллах. Стоимость очень высока	В легированных при выращивании кристаллах примеси распределены неравномерно. Совершенство иногда велико	До $100 \text{ см}^2 (\text{В с})^{-1}$	
Эпитаксиальные пленки алмаза	Пока выращены только на алмазной ориентированной подложке, что ограничивает площадь	Описаны пленки, легированные бором	100 см^2	
Поликристаллические пленки алмаза	Выращены на различных подложках (Si, металлы). Площадь $90 \times 50 \text{ см}^2$	Описаны пленки n-типа, легированные фосфором	50 см^2	
Алмазная керамика	Размеры ограничены объемом камеры пресса	Пористость $\approx 1-8$ %. Иногда включения проводящей фазы		
Алмазоподобные углеродные пленки	Любые площади		Подвижность носителей мала. Ширина запрещенной полосы $< 5,5 \text{ эВ}$	

Таблица 2. Центры с мелкими уровнями

Теория	Акцепторы	Доноры					
	В замещающий	Li междуузельный	Na междуузельный	С	Р замещающий	As замещающий	Sb замещающий
Энергия активации, эВ	0,37–0,09	0,1			0,09 0,03		
Уровень энергии, эВ	$E_V + 0,37$	$E_C - 0,1$					
Эффективность действия	> 10 %	> 1 %				Малая	Малая
Подвижность носителей, $\text{см}^2(\text{В с})^{-1}$	> 1000	≈ 1000			80		
Эффективность в пленках	> 10 %						
Примечания	Природный алмаз типа IIb	Замещающий Li неактивен (?)		Исчезает при $T > 800^\circ\text{C}$	Растворимость мала		

ванных работах описаны углеродные алмазоподобные пленки (Diamond-Like Carbon, DLC), которые также представляют серьезный интерес в качестве износостойчивых покрытий.

В пределах краткого обзора мы не будем рассматривать свойства алмазоподобных пленок в первую очередь потому, что подвижность неравновесных носителей заряда в них всегда на несколько порядков величины ниже, чем в монокристаллах алмаза.

Различия между свойствами пяти "категорий" алмазов, доступных экспериментаторам и технологам, видны из табл. 2–4, которые напоминают старинную географическую карту с "белыми пятнами". Перед тем, как обратиться к более детальному обсуждению перспектив применения алмазов в электронике, следует заметить, что в последнее время ярко выраженный оптимизм некоторых авторов, иногда называвших алмазы "полу-

Таблица 3. Li как донор (ионная имплантация)

Энергия, кэВ	Интегральная доза, 10^{15} ион см^{-2}	Холловская подвижность, $\text{см}^2 (\text{В с})^{-1}$	Поверхностная концентрация, 10^{10} см^{-2}	Поверхностная проводимость, 10^{-6} Ом^{-1}
110	4	$870 + 10$ %	5,2	7,3
310	3	650	2,4	2,6
350	3	1070	2,3	3,8
110	25	1030	2,3	3,8
80	6	400	1,1	7,1

проводником XXI в", сменился более обоснованными точками зрения. Например, Коллинз [9] пришел к выводу о том, что как материал электроники алмаз будет использоваться лишь в достаточно узких областях применения (см. раздел 6).

Таблица 4. Некоторые применения алмазных материалов

Техническое применение	Тип алмазного материала	Необходимость имплантации	Примечания
Износостойкие покрытия	Алмазные или алмазоподобные пленки		Быстро расширяется
Теплоотводы	Монокристаллы, поликристаллы, пленки		Широко используется
Диоды, транзисторы	Синтетический алмаз, эпитаксиальные пленки	+	Первые результаты
Детекторы частиц и квантов, дозиметры	Природный и синтетический алмазы, пленки будут применяться	+	Успешное применение
Лавинно-пролетные диоды	Необходимы кристаллы высокого совершенства	+	
Ультрафиолетовые излучатели	Монокристаллы и пленки	+	
Инфракрасные детекторы	Все виды алмазов	+	
Термисторы	Применяются монокристаллы малых размеров		

Далее мы приведем основные данные относительно различных видов алмазов, имея в виду *только* их применение в электронике.

2. Природный алмаз

Электрофизические свойства кристаллов природного алмаза во всем их многообразии подробно описаны в нескольких книгах [3, 5, 6]. Во многих странах, в том числе и в России, добыча природных алмазов достигла высокого уровня. Отработаны методы отборы кристаллов наиболее интересных для физических экспериментов и технических применений [4, 10, 11]. Электронные и оптические процессы в алмазе были рассмотрены в [4]. В последнее время особенно ценным оказался метод локально возбуждаемой остро сфокусированным сканирующим электронным пучком люминесценции, позволяющий проследить за геометрией распределения врожденных или введенных, например методом ионной имплантации, примесей [10]. Стоимость природных кристаллов алмаза размером 2–4 мм невелика, что делает их доступными для использования в таких приборах, как дозиметры [12] или фотоэлементы для анализа ультрафиолетового излучения Солнца. В последнее время методом ионной имплантации Зайцев и его коллеги [13] в Минске создали матрицы униполярных транзисторов и диодов на пластинах природного алмаза. Однако выяснилось, что часть элементов таких матриц "убита" микродефектами, присутствующими в исходном материале. Как известно, в течение многих лет присутствие таких дефектов в монокристаллах кремния и GaAs приводило к малому выходу пригодных планарных систем в микроэлектронике [14].

Тем не менее многие из экспериментаторов продолжают успешную работу с природными кристаллами, в том числе с южно-африканскими алмазами типа Пв.

Российские авторы, результаты исследования которых опубликованы [10], считают продолжение прикладных работ на образцах природного алмаза целесообразными на ближайшие годы. Кроме того, как следует из современных результатов по выращиванию эпитаксиальных алмазных пленок, в настоящее время такие пленки почти всегда выращивают на ориентированных подложках природных кристаллов алмаза.

3. Эпитаксиальные и поликристаллические пленки алмаза

3.1. Эпитаксиальные пленки

Пленки алмаза могут быть получены в условиях, когда скорость роста алмаза много больше скорости роста графита. Это возможно в присутствии травителя, который не действует на алмаз, но газифицирует зародыши графита. Показано, что таким травителем может быть атомарный водород.

В опубликованной в 1977 г. статье были приведены результаты изучения эпитаксиальных полупроводниковых слоев алмаза на алмазной изолирующей подложке [15]. В плазму во время осаждения алмазной пленки вводилось соединение, содержащее бор. В результате были выращены слои р-типа, что было подтверждено измерениями эффекта Холла. Подвижность дырок не превышала $80 \text{ см}^2 (\text{В с})^{-1}$, что было объяснено влиянием рассеяния носителей на свободной поверхности пленки и на границе раздела с изолирующей подложкой. В последующих работах подобные результаты были многократно воспроизведены.

В [6] сообщается о трех разновидностях методики осаждения алмазных пленок: химической транспортной реакции, электрической и термической активации газовой фазы. Общим для всех трех методов является сходный состав газовой фазы, включающей как ростовые, так и травящие компоненты: углеводородные частицы (молекулы, ионы, радикалы) и водород (атомарный и молекулярный). Авторы изучали кинетику роста эпитаксиальных пленок, выращенных на гранях природного алмаза, а также поликристаллических, полученных на таких подложках, как Mo, Ni и Si. Температура подложек в разных случаях составляла от 600 до 1200 °С, а давление в газовой фазе не превышало 1 атм. Максимум скорости роста пленки с возрастанием давления смещался в область более высоких температур. Атомарный водород не только газифицирует неалмазные формы углерода, но и благоприятствует образованию на растущей поверхности адсорбционных комплексов с тетраэдрической координацией атомов. В [6] описаны легированные бором пленки р-типа, а также легированные фосфором пленки n-типа.

Бор при содержании менее 1 ат. % входит преимущественно в узлы решетки алмаза, а при больших концентрациях — и в тетраэдрические межузлия. Минимальное удельное сопротивление для пленок р-типа составляло 10^{-3} Ом см, а для пленок п-типа — 10 Ом см. Сопротивление аналогичных легированных пленок достигало 10^{13} Ом см при 300 К.

Эпитаксиальные полупроводниковые пленки, согласно [8], были выращены также на синтетическом алмазе Фудзимори и др. [16].

Если быть оптимистом, можно предвидеть, что после преодоления технологических трудностей, монокристаллы синтетического алмаза будут получать, наращивая пленку необходимой толщины на монокристалл синтетического же алмаза и отделяя выращенный слой от подложки, после чего ее будет можно вновь использовать.

3.2. Поликристаллические пленки

В настоящее время доказана возможность наращивания поликристаллических слоев алмаза на различные подложки.

Относительно явлений переноса и неравновесных электронных процессов в алмазных пленках времен жизни неравновесных носителей заряда, спектров катодоллюминесценции и связи этих спектров с электрически активными примесями имеется пока мало сведений. Хираки [17] сообщил об интенсивной катодоллюминесценции в ультрафиолетовой области (238 нм, т.е. $h\nu \simeq 5,2$ эВ) поликристаллических пленок алмаза р-типа. Авторы сообщают о своем намерении создать гетеропереходы алмаз–кубический нитрид бора BN для осуществления первого алмазного светодиода для ультрафиолетовой области.

Очевидно, что в самое ближайшее время алмазные пленки на различных подложках станут материалом, необходимым для многих областей приложения. Напомним, что поликристаллические пленки кремния стали оптимальным материалом для солнечных батарей и ряда других применений. Было показано, что границы между микрокристаллами могут не представлять собой барьеры для процессов переноса неравновесных носителей заряда и их рекомбинации.

4. Алмазная керамика

Развитие современной планарной микроэлектроники во многом определяется наличием подложек, которые должны обладать совокупностью ряда свойств: механической прочностью при небольших толщинах, стабильностью размеров при температурах вжигания и пайки, высокой теплопроводностью. В качестве подложек в настоящее время используют стекла, кварц, сапфир, а также керамики на основе оксида алюминия и окиси бериллия.

Однако даже окись бериллия не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к рассеянию тепла в малогабаритных приборах. В связи с этим в Одесском государственном университете и Институте сверхтвердых материалов (Киев) были проведены работы по созданию керамики на основе алмаза. В настоящее время этот материал получил название "ОКМАЛ". В работе [18] описаны основные черты технологии его получения, включающей нагрев до 2000 °С при гидростатическом сжатии в 7–8 ГПа. Алмазная керамика представляет собой трехкомпонентную систему алмаз–проводящая фаза–поры, заполненные воздухом. Пористость составляет 2–8 %. Интересны результаты локального воздействия лазерного излучения в режимах, приводящих к возникновению проводящих дорожек заданной геометрии и электрического сопротивления, устойчивых относительно дальнейших температурных режимов в

широких пределах. Природа таких дорожек окончательно не установлена. Вероятнее всего, в них присутствуют как аморфный углерод, так и нанокристаллы (кластеры) структурами алмаза и графита.

5. Электрически активные примеси в алмазе и методы их введения и активации

Экспериментаторы, занятые изучением широкозонных полупроводников, знают, сколько неожиданностей и трудностей связано с центрами сильной локализации носителей, имеющими глубокие энергетические уровни. Алмаз наряду со своими привлекательными свойствами отличается многообразием таких центров, систематизации сведений о которых посвящены обзоры Гиппиуса и др. [4], а также Дэвиса в [6] и [19]. Исследования этого вопроса продолжают, но подробностей их результатов мы будем касаться лишь в отдельных случаях. Как и в других широкозонных полупроводниках, наиболее ценны для большинства задач практики те кристаллы, в которых концентрация центров с глубокими уровнями минимальна, либо если, как, например, при создании светодиодов, эти центры относятся к определенному типу и доминируют [20].

Уже с 1979 г. существуют убедительные доказательства того, что относительно мелкие акцепторные центры ($E_V \div 0,37$ эВ) в алмазе связаны с присутствием замещающих углерод атомов бора [3]. В настоящее время, особенно в связи с развитием методики расчетов энергетических спектров локальных центров с применением ЭВМ для "кластерных" моделей, стало общепринятым представление о том, что замещающие углерод атомы бора представляют собою устойчивые акцепторные центры. Накопилось достаточно свидетельств тому, что введение примеси бора в процессе роста алмаза и такие методы, как ионная имплантация, позволяют осуществлять легирование бором до пределов, когда доминирует прыжковая проводимость [21, 22]. Таким образом, проблему создания алмаза р-типа с использованием бора в качестве акцептора можно признать решенной, если не слишком велико влияние центров с глубокими уровнями. Пока у нас нет сведений об акцепторных центрах с меньшими энергиями ионизации.

5.1. Донорные центры

Известно [3, 6], что замещающие атомы азота, а также пары таких атомов образуют очень глубокие донорные уровни (E_C — 1,5 эВ; E_C — 4 эВ), которые не могут эффективно использоваться в электронике.

Ведущие специалисты в области создания интегральных схем считают, что не разрешенный окончательно до нашего времени вопрос о создании алмаза п-типа представляет собой одно из главных препятствий к осуществлению таких устройств на его основе.

Существует значительное число основанных на экспериментах публикаций, в которых сообщается о создании алмаза п-типа; к их числу можно отнести, например, [23]. Большинство из них обсуждено в [5, 6]. Однако, за исключением работ, в которых приведены результаты легирования алмаза литием [24, 25], в указанных исследованиях отсутствуют данные о больших значениях подвижностей электронов, чего следовало бы ожидать в случае переноса в зоне проводимости.

Согласно теоретическим оценкам Бернхольца и др. [26], атомы Li, Na и P, так же как и подробно изученная примесь атомарного N, должны образовывать донорные уровни в алмазе. В случае азота энергетический уровень лежит в глубине запрещенной полосы [27]. В работе [26] использованы данные о зонной структуре алмаза и метод квантовой

молекулярной динамики для расчетов равновесных атомных конфигураций примеси и окружающих атомов углерода в "сверхъячейках", содержащих большое (до 64) число атомов. В соответствии с расчетами атом Р должен замещать атом углерода, в то время как Li и Na должны быть донорами в межузельном положении.

Во всех трех случаях донорные уровни должны быть мелкими. Однако растворимости указанных примесей невелики, что должно приводить к малой эффективности их введения в алмаз путем термической диффузии. Вместо нее, по мнению авторов [26], следует применять кинетический захват в процессе роста алмаза или ионную имплантацию [21, 22]. Как известно, ионная имплантация использовалась во многих работах. По данным [26] наиболее устойчивыми должны быть атомы Р в узлах углерода, т.е. для них наиболее вероятен механизм вакансионной диффузии, характеризующийся высокой энергией активации. Для Li и Na в межузельных состояниях энергии активации диффузии, согласно вычислениям, составляют соответственно 0,85 и 1,6 эВ, т.е. свободный межузельный литий достаточно легко должен мигрировать. Вероятно, в ближайшее время появятся результаты экспериментов по ионной имплантации Na. Следует напомнить, что при введении примеси Na в кремний диффузионными методами донорные центры не возникают, возможно, в связи с объединением атомов Na в нейтральные комплексы.

5.2. Введение электрически активных примесей в ходе выращивания монокристаллов и пленок алмаза

5.2.1. Монокристаллы алмаза. Судя по данным, приведенным в [5, 6], наиболее крупные и совершенные монокристаллы синтетического алмаза были выращены методом повторной кристаллизации, когда в качестве исходного материала в камере высокого давления используют не графит, а мелкий алмазный порошок. Некоторые из кристаллов, выращенные в присутствии бора, по своим электрическим свойствам были идентичны южно-африканским алмазам типа IIb. Одновременно с этим сотрудники института Джeneral Электрик, а вслед за ними другие авторы отмечали, что распределение бора в синтетическом алмазе неоднородно. Кроме того, как отмечено в работе [28], различия характеристик кристалла в пирамидах нарастания граней (111), (113) и (100) обусловлены преимущественным входжением неконтролируемой примеси азота в пирамиды роста $\langle 111 \rangle$ и никеля в пирамиды роста $\langle 111 \rangle$ и $\langle 113 \rangle$.

Однако приведенные данные о характере нарастания слоев легированного алмаза вдоль определенных кристаллографических осей в дальнейшем по мере улучшения технологии могут оказаться полезными и для практических целей. В связи с различиями в конструкциях и объемах камер высокого давления, а также в температурных режимах выращивания сопоставлять результаты различных работ пока преждевременно. В современных сообщениях о наиболее крупных монокристаллах, выращиваемых, как представляется, уже серийно в лаборатории фирмы Сумитомо, данные об электропроводности и особенностях распределения примесей не приведены.

В 1985–1991 гг. в СССР появились публикации, в которых приведены данные о практических возможностях технических применений сравнительно небольших синтетических полупроводниковых алмазов р-типа, легированных бором при выращивании [4, 6]. Здесь же имеются и указания на синтез кристаллов алмаза n-типа, легированных мышьяком. Подробных сведений о концентрации эффективных акцепторов и доноров в этих работах нет, и мы вернемся к ним ниже, рассматривая применение алмаза в электронных приборах.

5.2.2. Эпитаксиальные и поликристаллические пленки. Как уже было указано выше, в 1977 г. [15] методом изменения ЭДС Холла и проводимости был установлен механизм переноса дырок в эпитаксиальных алмазных слоях алмаза р-типа, выращенных в Институте физической химии АН СССР. Эти работы получили дальнейшее развитие. В работе Спицына и др. [29] указано, что авторами были выращены эпитаксиальные слои на синтетических монокристаллах алмаза как диэлектрических, так и полупроводниковых. Эти монокристаллы имели размеры около 0,8 мм и сопротивление от 10^2 до 10^{14} Ом. Рост алмазного слоя в пределах толщин 1–10 мкм проходил по механизму гомоэпитаксии. Низкая концентрация дефектов по границе подложка–пленка обеспечивала возможность нагрева полученных структур до температуры 1500 °С. Пленки были выращены на гранях (100) и (111).

Среди многочисленных работ, в которых в последние годы сообщалось о росте поликристаллических алмазных пленок при разложении углеводородов в плазме [6], следует выделить работу Окано и др. [30]. Интересны теоретические соображения авторов [25] о механизме роста пленки в таких условиях и о возможности введения малорастворимой примеси (в данном случае фосфора) в растущие пленки.

Авторы [30], использовавшие в качестве легирующей компоненты P_2O_5 , получили на кремниевых подложках ориентации (100) поликристаллические алмазные пленки n-типа с удельным сопротивлением около 100 Ом см. В работе приведены свидетельства того, что имеет место электронная проводимость. По прямым данным измерений эффекта Холла подвижность электронов составляла $50 \text{ см}^2 (\text{В с})^{-1}$. Это чрезвычайно интересно, равно как и то обстоятельство, что авторам удалось осуществить омические контакты с помощью обычной серебряной пасты. Энергия активации проводимости составляла всего 0,05 эВ. Таким образом, следует считать, что на границах зерен не возникало высоких потенциальных барьеров. В работе приведены данные о спектрах комбинационного рассеяния света, указывающие на то, что доминирует структура алмаза, но присутствуют в относительно небольшой доле и связи типа SP^2 . Межплоскостные расстояния, рассчитанные по данным дифракции быстрых электронов, почти в точности совпадают со стандартными параметрами монокристаллов алмаза.

5.2.3. Ионная имплантация. Преимущества метода ионной имплантации, равно как и связанные с ним неизбежные трудности, известны специалистам и описаны в учебниках и обзорах [31, 32]. Использование ионной имплантации применительно к алмазу представлялось естественным уже сравнительно давно [4, 21]. В первых опубликованных работах авторы сообщали о возникновении проводящих слоев на поверхности облученных кристаллов; однако интерпретация результатов не была однозначной из-за возможностей фазовых переходов углерода в другие его модификации. Впоследствии были выяснены условия, при которых происходит практически полное восстановление структуры алмазной решетки, сильно нарушенной при имплантации ионов примесей. В настоящее время существует возможность создавать области необходимой геометрии с дырочной проводимостью, используя внедрение ионов бора по заданным программам. Особое внимание привлекает имплантация ионов с большими (в несколько мегаэлектронвольт) энергиями [8].

6. Заключение

Как было указано во введении, оптимизм некоторых авторов, касающийся широкого применения алмазов в электро-

нике, пока оправдался далеко не в пределах желаемого. В промышленных приборах природные и синтетические кристаллы алмазов применяются в основном в качестве теплоотводов [28, 33]. Судя по данным сборника [6], алмазные пленки, полученные методом CVD, пока уступают объемным кристаллам по теплопроводности. Для приборов, работающих в непрерывном режиме, существует оптимальная площадь алмаза; в импульсном режиме алмазный теплоотвод позволяет повысить частоту повторения импульсов [34].

Трудности на путях создания промышленных образцов алмазных транзисторов обусловлены довольно большой глубиной акцепторных уровней и связаны с тем обстоятельством, что донорные центры с относительно мелкими уровнями (L_i в межузлиях: $E_C - (0,1-0,15) \text{ эВ}$), судя по теоретическим оценкам, неустойчивы при высоких температурах. Это обстоятельство было подтверждено и в прямом эксперименте методом SIMS (вторичная ионная масс-спектрометрия). Относительно донорного центра атомов Р в межузлиях, который должен быть более устойчивым, пока нет окончательных экспериментальных данных. Замещающие углерод в узлах решетки атомы фосфора, согласно теории, имеют очень малую растворимость в алмазе. Однако не исключена возможность оптимизации результатов введения атомов Р при выращивании алмазных пленок и при ионной имплантации.

По указанным выше причинам пока реализованы лишь экспериментальные образцы маломощных высокотемпературных транзисторов. Они не удовлетворяют требованиям к надежности (работа в течение не менее 15000 часов). Контакты таких систем как Сг–Аи или Сг–Рт с алмазом имеют энергию активации отказов около 1 эВ и 1,4–1,5 эВ [34]. Процессы деградации контактов при температурах выше 500 °С пока не изучены.

Экспериментальные образцы диодов Шоттки были созданы на природном алмазе, синтетических кристаллах [5, 6], а в последнее время и на алмазных пленках [35].

Развитие современной "групповой" планарной технологии, по-видимому, будет экономически оправдано только на пути использования пленок алмаза, которые, как было указано выше, пока почти всегда имеют поликристаллическую структуру и худшие электрофизические параметры, чем монокристаллы. В настоящее время существует достаточно большая потребность в алмазных дозиметрах, в 1968 г. созданных Коноровой и Козловым [12]. Эти приборы отличаются большой радиационной стойкостью и удобны для исследований в области радиобиологии.

Алмазоподобные углеродные пленки (DLC) применяются в оптике и электронике как защитные, просветляющие и теплоотражающие слои. Возможность их получения при температурах близких к комнатной делает их удобными для решения многих технических задач.

Список литературы

1. Newton Isaac *Opticks* (London, 1704)
2. Custers J F H *Physica* **18** 489 (1952); **20** 183 (1954)
3. *The Properties of Diamond* (Ed. J Field) (London: Acad. Press, 1979)
4. Вавилов В С, Гиппиус А А, Конорова Е А *Электронные и оптические процессы в алмазе* (М.: Наука, 1985)
5. *The Properties of Natural and Synthetic Diamond* (Ed. J Field) (London, New York: Acad. Press, 1992)
6. *The Properties and Growth of Diamond* (Ed. G Davis) (London: JEE, 1994)
7. Спицын Б В, Дерягин Б В Авт. свид. СССР, 10.7.1956 Патент СССР № 339.134, 5.05.1980
8. *Second Int. Symposium on Wide Bandgap Electronic Materials, 4–6 May 1994, Abstracts* (Minsk: Byelorussian State University, 1994)
9. Collins A, in *The Properties and Growth of Diamond* (Ed. G Davis) (London: JEE, 1994) p. 261
10. *Алмаз в электронной технике* (под ред. В Б Кваскова) (М.: Энергоатомиздат, 1990)
11. Saparin G V, in *Cathodo Luminescence: New Methods in Scanning Electron Microscopy Biophysical Electron Microscopy* (New York: Acad. Press, 199) p. 451
12. Козлов С Ф, в сб. *Алмаз в электронной технике* (под ред. В Б Кваскова) (М.: Энергоатомиздат, 1990) с. 34
13. Зайцев А М и др., в сб. *Алмаз в электронной технике* (под ред. В Б Кваскова) (М.: Энергоатомиздат, 1990) с. 228
14. Мильвидский М Г, Освенский В Б *Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников* (М.: Металлургия, 1984) с. 231
15. Алексенко А Е и др. *ДАН СССР* **233** 334 (1977)
16. Fujimori N et al. *Vacuum* **36** 99 (1986)
17. Hiraki A *Diamond Depositions* **2** (1) 5 (1991)
18. Ротнер Ю М, Ротнер С М, в сб. *Алмаз в электронной технике* (под ред. В Б Кваскова) (М.: Энергоатомиздат, 1990) с. 186
19. Davies G *Mater. Sci. Forum* **143–147** 21 (1994)
20. Вавилов В С *УФН* **164** 288 (1994)
21. Вавилов В С *УФН* **164** 430 (1994)
22. Prins J F *Mat. Sci. Reports* **7** (7–8) 271 (1992)
23. Вавилов В С и др. *ФТП* **4** 17 (1970)
24. Konorova E A et al. *Cryst. Lattice Defects* **1** 269 (1970)
25. Вавилов В С и др. *ФТП* **13** 2135 (1979)
26. Kajihara S A et al. *Phys. Rev. Lett.* **66** (15) 2010 (1991)
27. Collins A, Lightowers E, in *The Properties of Diamond* (Ed. J Field) (London: Acad. Press, 1979) Ch. 3
28. Новиков Н В, Гонтарь А Г, в сб. *Алмаз в электронной технике* (под ред. В Б Кваскова) (М.: Энергоатомиздат, 1990) с. 57
29. Spitsyn B V et al. *J. Crystal Growth* (Netherlands) **52** 219 (1981), in *The Properties and Growth of Diamond* (Ed. G Davis) (London: JEE, 1994) p. 323
30. Okano K et al. *Appl. Phys. A* (Japan) **51** 344 (1990)
31. Броудай И, Мерей Дж *Физические основы микротехнологии* (М.: Мир, 1985) с. 493
32. Вавилов В С и др. *Радиационные методы в твердотельной электронике* (М.: Радио и связь, 1990)
33. Непша В И, Клюев Ю А, в сб. *Алмаз в электронной технике* (под ред. В Б Кваскова) (М.: Энергоатомиздат, 1990) с. 140
34. Концевой Ю А, в сб. *Тез. докл. конф. "Перспективы применения алмазов в электронике"* (М.: Акц. компания Алмазы России – Саха, 1995) с. 3
35. Zhao G et al. *Appl. Phys. Lett.* **61** 1119 (1992)

Diamond in solid state electronics

V.S. Vavilov

P.N. Institute of Physics, Russian Academy of Sciences, 117924 Moscow, Leninsky prosp. 53
Tel. (7-095) 135-05 51. Fax (7-095) 938-22 51

Data on the physical properties of diamond as a solid state electronics material are briefly discussed with particular emphasis placed on synthetic crystals and plasma-precipitated films.

PACS numbers: 07.50.Yd, **73.90. + f**

Bibliography – 35 references

Received 13 March 1996