

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Возможности и ограничения ионной имплантации в алмаз и их сопоставление с другими методами введения электрически активных примесей

B.C. Вавилов

Алмаз — кристалл, характеризуемый чрезвычайно прочными межатомными связями. Для него характерны очень малые равновесные параметры растворимости примесей и их коэффициенты диффузии. В связи с этим ионная имплантация представляет собою естественную альтернативу метода легирования. Существующие экспериментальные данные показывают, что слой р-типа и р⁺-типа удается получать путем имплантации ионов бора. Имплантация ионов Li⁺ и C⁺ приводит к образованию слоев п-типа. Алмазные пленки, выращенные в присутствии фосфора и натрия, также могут обладать электронной проводимостью. Эффективность введения электрически активных центров существенно различается в зависимости от температуры алмаза во время имплантации и от режима последующего отжига.

PACS numbers: 61.70.S, 68.55.L

Содержание

1. "Мелкие" акцепторы и доноры в алмазе (429).
2. Радиационные нарушения и фазовые переходы (429).
3. Особенности легирования при выращивании и ионной имплантации в epitаксиальных и поликристаллических пленках алмаза (431).
4. Некоторые вопросы, связанные с практическими применениями алмаза в электронике и смежных областях (432).

Список литературы (432).

1. "Мелкие" акцепторы и доноры в алмазе

В очень редких случаях природные процессы роста алмаза привели к образованию легированных бором полупроводниковых кристаллов. Следовательно, прямой путь подражания природе существует. Свойства природных и синтетических алмазов, содержащих бор, описаны в [1—3]. Судя по известным нам данным, легирование в процессе роста синтетических монокристаллов алмаза примесями, которые могут иметь достаточно мелкие донорные уровни, пока не привело к результатам, которые можно было бы сопоставить с легированием донорными примесями кристаллов Ge и Si. Известно, что техника одновременного длительного приложения высокого давления и высокой температуры сложна и требует больших затрат [1]. Более того, современные технологии выращивания алмазов при

высоких температуре и давлении приводят к неравномерному распределению атомов бора по объему кристалла. В последние годы возникла привлекательная альтернатива создания полупроводниковых алмазных пленок, методика выращивания которых из газовой плазмы, содержащей продукты диссоциации углеводородов, быстро развивается [4].

Современные теоретические модели, описанные Бернхольцем и др. [5], согласуются с экспериментальными данными о действии замещающих углерод атомов бора как акцепторов с довольно мелким энергетическим уровнем ($E_v + 0,37$ эВ). Согласно этим моделям целесообразна дальнейшая работа с целью введения неравновесными методами примесей, которые должны иметь мелкие донорные уровни. К этим примесям относятся Li, Na, P.

Как рост алмазных пленок из плазмы [4, 6], так и ионная имплантация, — типично неравновесные процессы. Именно эти две методики, развивающиеся параллельно, должны стать основой широкого использования алмаза в технике. В табл. I приведены основные сведения относительно ожидаемых и установленных экспериментально центров с "мелкими" энергетическими уровнями в алмазе.

2. Радиационные нарушения и фазовые переходы

Современные экспериментальные работы по ионной имплантации в алмаз в отдельных случаях проводились с ионами очень высоких энергий — до 50 МэВ [7], однако большая часть результатов получена в обычных условиях (40—350 кэВ). Пробеги неканализирующих ионов достаточно хорошо согласовались с вычисленными [8].

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

Статья поступила 24 ноября 1993 г.

Таблица I. Центры с мелкими уровнями в алмазе (замещающие С атомы N имеют глубокие донорные уровни)

	Акцепторы	Доноры				
		[5] Бор (замещающий С) 0,37 0,37—0,09 > 10 % Бор — акцептор в природном полупроводниковом алмазе	[5] Литий (в междоузлии) 0,1 ± 10 % 0,1 эВ ≥ 1 % Замещающий Li неактивен? См. табл. II	[5] Натрий (в междоузлии)	Углерод (в комплексе) Исчезает при отжиге > 800 °C	[5] Фосфор-замещающий 0,09—0,03 Низкая Растворимость мала
Теория Примесь						
Уровень энергии, эВ						
Энергия активации						
Эффективность введения при имплантации						
Эффективность введения при росте алмазных пленок						
Примечания						

Имеются опубликованные данные о канализировании, которое изучали как для проверки теории этого явления, так и для выяснения микроструктуры примесных центров и дефектов; к последней проблеме мы вернемся далее. Параметры, входящие в выражение для минимального выхода обратно рассеянных частиц для алмаза, сильно отличаются от аналогичных величин для кремния и германия: отношение u_1/a , где u_1 — средняя амплитуда колебаний решетки, a — радиус экранирования Томаса-Ферми для алмаза составляет 0,17, а для Ge и Si оно близко к единице. В работе [9] приведены данные о канализировании протонов в тщательно отобранных наиболее совершенных природных кристаллах алмаза. Температурная зависимость минимального выхода обратно рассеянных протонов и зависимость от расстояния между цепочками атомов в канале соответствовали теории [10]. В ближайшее время можно ожидать и данных о канализировании в крупных синтетических алмазах, что очень интересно в связи с задачей выяснения совершенства их кристаллической решетки. Нельзя исключить возможность того, что канализование в отдельных случаях можно будет использовать в области практического применения алмаза, исходя из данных, имеющихся для Si и GaAs [11, 12].

Весьма важные и лишь частично выясненные вопросы связаны с природой пространственного распределения и устойчивости радиационных дефектов, неизбежно возникающих в алмазе при ионной имплантации. Методика идентификации таких дефектов описана в [1, 2, 7]; она продолжает развиваться. Многие исследователи проявляли обоснованную осторожность и даже пессимизм в отношении применимости ионной имплантации для легирования алмаза, что связано с существованием других фаз — графита и аморфного углерода. Первые эксперименты, в которых была проведена имплантация ионов бора и других примесей [13], не включали измерений эффекта Холла и, обнаруженный в них рост про-

водимости, нельзя было однозначно интерпретировать как результат введения акцепторов с мелкими уровнями. Условия, в которых имеет место частичное или полное восстановление кристаллической решетки алмаза, были выяснены для имплантации бора в последующих работах [14]. Ссылки на более ранние работы имеются в [2]. Примененный Брозиусом и др. метод ЭПР [15] позволил получить независимые данные о том, что термический (квазиравновесный) отжиг имплантированных ионами алмаза приводит к восстановлению кристаллической решетки. В работах, выполненных в последнее время в США [16], сообщается о процессах восстановления (вторичного роста — regrowth) слоев алмаза, структура которых была сильно нарушена имплантацией ионов углерода. Ранее было показано, что имплантация C^+ в алмазе приводит к возникновению донорных центров [17, 18]. Обычный длительный отжиг приводил к восстановлению решетки при дозах имплантации (флюэнсах) ниже $0,9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ при 350 кэВ, однако степень (эффективность) активации примесных центров была очень мала [19]. Выше критической дозы $1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ при 350 кэВ ионов Sb^+ накопление радиационных нарушений приводило к графитизации алмаза при последующем отжиге, которое наблюдалось ранее и при внедрении других ионов [2]. В ряде работ для снижения действия радиационных нарушений была исследована имплантация в алмаз, нагретый до высокой температуры [19—21]. Действительно, этот метод позволяет избежать графитизации и часть имплантированных атомов примеси занимает замещающие положения в узлах, но параллельно этому в имплантированных слоях за счет взаимодействия точечных дефектов возникает большое число дислокаций и, возможно, скоплений междоузельных атомов [22]. Эти скопления дефектов очень устойчивы, не исчезают даже при отжиге при 1450°C и с ними связаны центры с глубокими уровнями, компенсирующие действие имплантированной примеси, что типично для широкозонных кристаллов во многих случаях.

В 1988 г. Принс предложил качественно иной метод двойной имплантации в алмаз электрически активной примеси и ионов углерода при довольно низких температурах (жидкий азот) [23]. Согласно его предположению, последующий кратковременный отжиг при высокой температуре немедленно после имплантации может привести к более эффективной активации введенной примеси вследствие высокой концентрации вакансий и междоузельных атомов, практически не дифундирующих при температуре имплантации. Вопрос о возможно-

Таблица II

Энергия ионов Li^+ , кэВ	Доза, ионы см^{-2}	Подвижность, $\text{см}^2(\text{В с})^{-1}$	Поверхностная концентрация, см^{-2}	Поверхностная проводимость, Ом^{-1}
110	$4 \cdot 10^{15}$	$870 \pm 10\%$	$5,2 \cdot 10^{10}$	$7,3 \cdot 10^{-6}$
310	$3 \cdot 10^{15}$	650	$2,4 \cdot 10^{10}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$
350	$3 \cdot 10^{15}$	1070	$2,3 \cdot 10^{10}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$
110	$2,5 \cdot 10^{16}$	1030	$2,3 \cdot 10^{10}$	$3,8 \cdot 10^{-6}$
80	$6 \cdot 10^{15}$	400	$1,1 \cdot 10^{10}$	$7,1 \cdot 10^{-6}$

сти применения кратковременного отжига к имплантированному ионами алмаза и о критических дозах, выше которых возникает аморфный слой, был исследован методом резерфордовского обратного рассеяния и измерениями оптического поглощения. Изучаемые образцы — отобранные наиболее совершенные кристаллы природного алмаза — имплантировались ионами C^+ дозами в пределах от 10^{15} до $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в направлении, исключавшем канализование, при энергии 200 кэВ и отжигались в кварцевой печи в токе аргона при 1100°C в течение 2 мин. Аналогичные образцы подвергались обычному (изохронному) отжигу в вакуумной печи. Было установлено, что доза аморфизации лежит между $1,65 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ для ионов C^+ при 200 кэВ при 77 К. При меньших дозах, как быстрый отжиг при 1100°C , так и изохронный отжиг при 900°C приводил к восстановлению структуры. При более высоких дозах результаты отжига сильно различались. Изохронный отжиг при 900°C приводил к эпитаксиальному выращиванию, т.е. регенерации почти совершенного кристаллического алмаза под графитизированным слоем у поверхности, в то время как при быстрым отжиге возникал поликристаллический слой.

В работе Прауера и др. [24] для восстановления структуры "утопленных" слоев радиационных нарушений в природном алмазе, созданных глубоко проникавшими ионами C^+ с энергией 2,8 мэВ, были использованы кратковременные импульсы лазерного излучения (14 нс). Пробег ионов и его разброс ($R_p \pm \Delta R_p = 1,48 \pm 0,06 \text{ мкм}$). Длина волны излучения составляла 531 нм. По оценке авторов, плотность энергии в нарушенном слое в образце алмаза достигала 200 Дж см^{-2} за импульс. Это значение значительно превышает пороги плавления графита (0,6 Дж см^{-2} за импульс) и кремния (2 Дж см^{-2} за импульс) [25, 26]. Толщина разупорядоченного слоя согласно оценкам авторов составляла около 200 нм. Эти оценки были основаны на данных о пробегах ионов и разбросе проецированных пробегов, опубликованных Циглером и др. [27]. Внедрение ионов C^+ проводилось при температуре образцов около 77 К, когда согласно [28], возникающие точечные радиационные дефекты в алмазе практически неподвижны, что уменьшает вероятность образования более сложных образований, исчезновение которых при отжиге может быть затруднено.

Один из результатов, вначале представившийся неожиданным, состоит в том, что при дозе $3 \cdot 10^{15} C^+ \text{ см}^{-2}$, которые при энергии ионов 90 кэВ приводили к аморфизации приповерхностного слоя, при имплантации тех же ионов C^+ значительно дальше в глубь образца аморфизация не происходила. Из этого следует, что существование слоя кристалла над областью, в которой останавливаются имплантируемые ионы, снижает вероятность разупорядочения. Согласно соображениям авторов [24], представляющимся вполне обоснованными и, вообще говоря, восходящим к известной работе Бринкмана 1954 г. [29], на короткий промежуток времени каждую область в окрестности конца траектории останавливающегося иона можно представить себе как предельно сильно возбужденный объем вещества, в котором не сохраняется структура кристалла, останавливающий примерно за 100 периодов колебаний решетки (10^{-11} с). Оценок вероятного давления, которое окружающая часть кристалла оказывает на эту область, в [29] не было сделано.

Возвращаясь к данным Прауера и др. [24], следует обратить особое внимание на то, что при лазерном воздействии область вносимых энергий, приводящих к восстановлению решетки, лежит лишь ненамного ниже порога, начиная с которого происходит отслаивание всего слоя алмаза, сквозь который проводились имплантация (авторы используют термин *ablation*, смысл которого — ампутация). Как видно из результатов измерений оптического поглощения и резерфордовского обратного рассеяния, лазерный отжиг однократными импульсами приводил не к полному, а лишь частичному восстановлению решетки. По мнению авторов, от применения многократных импульсов следует ожидать более полезных для практики последствий. Типичная картина распределения внедренной примеси и радиационных нарушений приведена в работе А.М. Зайцева [7], в экспериментах которого во многих случаях исследовались ионы очень больших (до 70 мэВ) энергий. В работе [7] была высказана идея создания матриц запоминающих элементов путем облучения алмаза единичными высокоэнергетическими ионами, аналогично уже существующей методике, примененной в [30] к натриевым стеклам.

3. Особенности легирования при выращивании и ионной имплантации в эпитаксиальных и поликристаллических пленках алмаза

Методика выращивания эпитаксиальных алмазных пленок на алмазе описана в работе А.Е. Алексенко и Б.В. Спицына [6], применявшим плазменный газовый разряд в постоянном электрическом поле. Альтернативные методики были развиты рядом авторов в США и Японии [4]. Согласно [6] пленки, выращенные из плазмы в присутствии бора, содержали эту примесь, и при концентрации бора менее 0,1 % его атомы находились преимущественно в узлах решетки. Авторам удалось вырастить пленки с очень низким удельным сопротивлением (до 10^{-3} Ом см), но подвижность носителей не превышала $15 \text{ см}^2 (\text{В с})^{-1}$, что примерно в 100 раз ниже подвижности дырок в достаточно совершенных монокристаллах алмаза.

Определенные успехи достигнуты и при выращивании пленок алмаза, содержащих донорные примеси, в частности Р и Sb. Судя по опубликованным в Москве [6] и в Японии [31] данным, эффективность введения донорных центров невелика, т.е. большая часть атомов сурьмы или фосфора остается нейтральной или их действие компенсируется вводимыми одновременно центрами захвата с глубокими уровнями. Этот факт согласуется с теоретическими оценками [5].

Первые данные об ионной имплантации в эпитаксиальные и поликристаллические пленки алмаза опубликованы в [32]. Эпитаксиальные (монокристаллические) пленки наращивались на ориентированную алмазную подложку из газовой фазы по методу, развитому Б.В. Спицыным и др. [33]. Пленки, выращенные на вольфрамовых подложках, были поликристаллическими. Для изготовления полупроводниковых слоев, контактных областей и структур для измерений эффекта Холла использовались методы фотолитографии и ионной имплантации. Энергии ионов и дозы внедрения были рассчитаны так, чтобы концентрация бора в легированном слое составляла $1,2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Контактные области были созданы имплантацией бора дозой $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Таблица III

Область применения или тип прибора	Тип алмазного материала, необходимого для применения	Необходимость в ионной имплантации	Примечания
Твердые износостойчивые покрытия	Поликристаллические пленки алмаза или алмазоподобные углеродные пленки	—	Применения быстро расширяются
Теплоотводы в микроэлектронике	Природный и синтетический алмаз; пленки алмаза и керамика	—	Применяются (пока природный и синтетический алмаз)
Транзисторы; диоды; интегральные схемы	Природный алмаз (физика); синтетический алмаз; эпитаксиальные пленки	+	Первые положительные результаты
Детекторы частиц; дозиметры	Природный алмаз; начинается применение синтетического алмаза и пленок	+	Устойчиво работают (природный алмаз)
Лавинно-пролетные диоды	Нужны очень однородные кристаллы	+	Вероятное появление вскоре —"
Фотоэмиттеры (ультрафиолетовая область)	Возможно применение кристаллов и пленок	+	—"
Инфракрасные фотодиоды	—"—		
Быстрые переключатели тока	Осуществлены на природных кристаллах алмаза	+	—"—

Отжиг производился в графитовом контейнере в вакууме ($\approx 10^{-4}$ Па). Исследование зависимости проводимости легированных пленок от температуры отжига показали качественное сходство с результатами отжига имплантированных ионами B^+ кристаллов природного и синтетического алмаза.

В области температур отжига до 800 °C, проводимость как моно-, так и поликристаллических слоев была обусловлена радиационными дефектами, исчезавшими при дальнейшем повышении температуры [2, 23]. Электрическая активация бора возникала, начиная с 1300 °C. Дальнейшее увеличение температуры отжига монокристаллических пленок вплоть до 1600 °C приводило к росту проводимости. Энергия активации проводимости составляла около 0,1 эВ, а подвижность дырок по данным эффекта Холла не превышала $6 \text{ см}^2 (\text{В с})^{-1}$. При более высоких температурах пленки разрушались. Отжиг поликристаллических пленок при температурах выше 1300 °C приводил к появлению проводящего слоя по всей поверхности, включая участки за пределами области легирования, по-видимому, связанной с графитизацией. Поэтому поликристаллические пленки, подобные изученным, непригодны для применения к ним высокотемпературной технологии.

4. Некоторые вопросы, связанные с практическими применениями алмаза в электронике и смежных областях

Ниже в предельно сжатой форме будут упомянуты уже осуществленные приборы на основе алмаза и направления ближайшего развития. Если сравнивать ситуацию к середине 1992 г. с 1978 г., когда находилась в печати известная книга, изданная Филдом в 1979 г. [1], надо отметить, что две "разновидности" алмаза можно считать " заново родившимися" после появления ее в 1-м издании. Речь идет об алмазных пленках и алмазной керамике [34]. Судя по материалам последних двух конференций, проведенных в Москве в 1991 и 1992 гг. [35, 36], в России и Украине работает около десяти групп, занятых выращиванием, характеризацией и практическим применением пленок алмаза¹. По мнению автора, труд этих групп и затраты на проведение таких работ,

масштабы которых в развитых странах Запада несравненно больше [1, 4], более чем оправданы. Главные технические задачи, решаемые в настоящее время, относятся не к твердотельной электронике, а к созданию износостойчивых, твердых, прозрачных и химически стойких покрытий в машиностроении и прикладной оптике, включая лазерную технику. Развитие "электронных" применений алмаза идет более медленными темпами, но ряд приборов применяется систематически. Первое место пока занимают алмазные теплоотводы, для которых уже достаточно часто используют синтетический алмаз [37]. Вероятно, что скоро будут применены и пленки. Среди устройств, нашедших применение в биологии и медицине, следует упомянуть счетчики частиц и дозиметры, созданные в Физическом институте им. П.Н. Лебедева в Москве [38], в которых для подавления объемной поляризации были использованы инжектирующие контакты, получаемые методом ионной имплантации (табл. III).

Успехи в конструировании полевых транзисторов [39] затруднены в первую очередь неоднородностью исходного полупроводникового алмаза. Однако принципиальная возможность их создания не вызывает сомнений.

Другие осуществленные и возможные типы полупроводниковых устройств с использованием алмаза описаны в [40], а также в книге Викулина и Стafeева [41].

Автор выражает благодарность А.А. Гиппиусу, А.М. Зайцеву, В.Ф. Сергиенко, Б.В. Спицыну и Р.А. Хмельницкому, а также И. Принсу (Иоханнесбург, ЮАР) за их замечания, связанные с ионной имплантацией и физическими явлениями в алмазе.

Список литературы

1. *The Properties of Diamond* (Ed. J. Field) (London: Academic Press, 1979), p. 677; *The Properties of Diamond and Diamond Films* (Ed. J. Field) (London, Academic Press, 1992).
2. Вавилов В.С., Гиппиус А.А., Конорова Е.А. *Электронные и оптические процессы в алмазе* (М.: Наука, 1985), с. 140.
3. Бокий Г.Б. и др. *Природные и синтетические алмазы* (М.: Наука, 1987), с. 255.
4. Materials Research Society (MRS, USA). *Boston Meeting. Abstracts. Symposium G and R* (Boston, 1991).
5. Bernholz J. et al. In *XX Inter. Conference on Semiconductor Physics* (Thessaloniki, 1990). *Abstracts*, p. 610; *Proceedings*, vol. 1, p. 332.
6. Alexenko A., Spitzyn B. *Semiconductor diamonds made in USSR*. In *Proc. of Diamond of 1991 Intern. Conference* (Nice, France, 1991).
7. Зайцев А.М. Ионная имплантация в полупроводники со сверх-

¹ К сожалению, здесь нет возможности рассматривать применения алмазоподобных углеродных пленок.

- прочной ковалентной связью. В кн. *Алмаз в электронной технике* (Под ред. Кваскова В.Б.) (М.: Энергоатомиздат, 1990), с. 211.
8. Буренков А.Ф. и др. *Таблица параметров пространственного распределения ионноимплантированных примесей* (Минск: БГУ, 1980).
 9. Derry T. et al. *Phys. Rev. B* **24**, 3675 (1981); **26**, 17 (1982).
 10. Buret J. *Phys. Rev. B* **3**, 1527 (1971).
 11. Galkin G. et al. *Rad. Effects* **77**, 57 (1983).
 12. Larnella F. et al. *Appl. Phys. Lett.* **56**, 1561 (1990).
 13. Вавилов В.С., Гусева М.И., Конорова Е.А. и др. *ФТП* **8**, 1964 (1966).
 14. Вавилов В.С., Гусева М.И., Конорова Е.А., Сергиенко В.Ф. *ФТП* **4**, 17 (1970).
 15. Brosious P., Corbett J., Bourgoin J. *Phys. Stat. Sol. a* **21**, 677 (1974).
 16. Lin B. et al. *Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. B* **45**, 420 (1990).
 17. Vavilov V.S. *Phys. Stat. Sol. a* **31**, 11 (1975).
 18. Braunstein G. et al. *Rad. Effects* **48**, 139 (1980).
 19. Braunstein G., Kalish R. *Appl. Phys. Lett.* **38**, 416 (1980).
 20. Braunstein G., Kalish R. *Nucl. Instr. and Meth.* **209/210**, 387 (1980).
 21. Nelson R. et al. British Patent No. 1599 (7 oct. 1981).
 22. Nelson R. *Proc. Roy. Soc. (London) A* **386**, 211 (1983).
 23. Prins J. *Phys. Rev. B* **38**, 5576 (1988); in *Material Science Reports* (Amsterdam, North-Holland, 1992), p. 271.
 24. Prawer S. In *Proc. of Boston MRS Meeting*, Dec. 1991 (to be published).
 25. Venkatesan T. et al. *Phys. Rev. Lett.* **53**, 360 (1984).
 26. Foti G. *Rad. Effects* **48**, 161 (1980).
 27. Ziegler J. et al. *The Stopping and Range of Ions in Solids* (New York: Pergamon Press, 1985).
 28. Prins J. et al. *Nucl. Instr. and Meth. B* **18**, 261 (1987).
 29. Brinkman J. *J. Appl. Phys.* **25**, 961 (1954).
 30. Fischer B., Spohr R. *Workshop on Industrial. Applied of Energetic Heavy Ions* (Caen, France, 1989), p. 1.
 31. Okano K. *Appl. Phys. A. Sol. Surf. (Germany)* **A 51** (44), 344 (1990).
 32. Денисенко А.В. и др. Электрофизические исследования эпитаксиальных алмазных пленок, легированных ионами бора. В кн. *1-й международный семинар "Алмазные пленки"*. (30.06—6.07.1991, Москва—Улан-Удэ, АН СССР), с. 25.
 33. Спицын Б.В. В кн. *Рост кристаллов* (М.: Наука, 1980), с. 55.
 34. Ротнер Ю.М., Ротнер С.М. Поликристаллические алмазы в электронной технике. В кн. [7], с. 186.
 35. *Перспективы применения алмазов в электронике и электронной технике*. Тезисы докладов Всесоюзной конференции. (Под ред. Кваскова В.Б.) (М.: Энергоатомиздат, 1991).
 36. *Проблемы применения алмаза в электронике*. Тезисы докладов II конференции (Под ред. Кваскова В.Б.) (М.: Знание, РФ, 1992).
 37. Новиков Н.В., Гонтарь А.Г. Применение синтетических алмазов в электронике. В кн. [7], с. 57.
 38. Козлов С.Ф., Конорова Е.А. Способ изготовления алмазных детекторов ядерных излучений. Авт. свид. СССР № 224697 (1968); см. также: *ФТП* **4** (10), 1865 (1970).
 39. Мельников А.А., Зайцев А.М. и др. Полупроводниковые структуры р-типа на природном алмазе. В кн. [7], с. 228.
 40. Vavilov V.S. Diamond as a material for solid state electronics. Inv. Paper. In *Proc. of Boston MRS Meeting*. Dec. 1991 (to be printed).
 41. Викулин И.М., Стафеев В.И. *Физика полупроводниковых приборов* (М.: Радио и связь, 1990).

THE POSSIBILITIES AND LIMITATIONS OF ION IMPLANTATION INTO DIAMOND AS COMPARED TO OTHER DOPING TECHNIQUES

V.S. Vavilov

P.N. Lebedev Institute of Physics, Russian Academy of Sciences
53, Leninskii prospect, 117924, Moscow, Russian Federation
Tel. (095) 135-0551

Diamond as an extremely tightly spaced crystal must have low equilibrium solubilities and diffusion coefficients for impurity atoms. Thus, ion implantation presents a way of doping worth trying. Existing experimental data show that p-type and p⁺-type layers can be produced by B ion implantation. Li and C ion implantation results in n-type layer formation. Diamond films grown in presence of P are reported to exhibit electron conductivity. The efficiency of the introduction of donors and acceptors by implantation depends critically on the diamond temperature during implantation and on the annealing process.

Bibliography — 41 references

Received 24 November 1993