

Комбинированные подложки из поли- и монокристаллического CVD-алмаза для алмазной электроники

© А.Л. Вихарев^{†¶¶}, А.М. Горбачев[†], М.П. Духновский*, А.Б. Мучников^{†¶¶},
А.К. Ратникова*, Ю.Ю. Федоров*

[†] Институт прикладной физики Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

* ФГУП «НПП „ИСТОК“»,
141190 Фрязино, Россия

(Получена 4 июля 2011 г. Принята к печати 11 июля 2011 г.)

Представлены результаты исследований получения алмазных подложек, в которых моно- и поликристаллический CVD-алмаз образуют единую пластину, и эпитаксиального роста алмазных пленок на таких комбинированных подложках, содержащих участки поликристаллического и монокристаллического CVD-алмаза с ориентацией (100).

1. Введение

Искусственный монокристаллический алмаз, выращиваемый по технологии CVD (chemical vapor deposition), благодаря своим уникальным свойствам является перспективным материалом для современной микроэлектроники. По совокупности параметров алмаз имеет заметные преимущества перед традиционными полупроводниковыми материалами и позволяет разработать приборы с более высокими рабочей температурой, электрической мощностью и радиационной стойкостью [1]. Однако одним из основных факторов, сдерживающих его широкое применение и появление алмазной электроники, являются малые геометрические размеры алмазных подложек, на которых происходит эпитаксиальный рост монокристаллического CVD-алмаза. В исследовательских работах монокристаллический CVD-алмаз выращивается в основном на подложках с размерами от 3×3 до 5×5 мм из искусственного алмаза, получаемого в аппаратах высокого давления и высокой температуры [2].

В настоящее время технология создания электронных приборов на кремнии освоена на подложках диаметром от 100 до 300 мм [3]. Казалось бы, будущее алмазной электроники можно обсуждать только после создания пластин монокристаллического алмаза таких размеров. В этом направлении (создании монокристаллических алмазных пластин большой площади) интенсивно ведутся исследования. Недавно группе ученых из Японии удалось вырастить монокристаллический CVD-алмаз размером 25×25 мм [4]. Размеры этих, хотя и больших, пластин все еще далеки от размеров кремниевых пластин. Тем не менее следует заметить, что пластины поликристаллического алмаза диаметром от 75 до 150 мм и толщиной от 0.2 до 2 мм с успехом выращиваются в некоторых лабораториях [5–7]. Полупроводниковый поликристаллический алмаз, получаемый легированием как в процессе синтеза алмаза в CVD-реакторе, так и легированием ионной имплантацией после выращива-

ния, имеет характеристики гораздо хуже, чем полупроводниковый монокристаллический алмаз [8,9]. Поэтому возникает вопрос: каким образом монокристаллический алмаз с теми размерами, которыми мы располагаем сейчас, может быть использован как материал для создания электронных приборов в широкомасштабном технологическом процессе? Одним из вариантов такого использования, на наш взгляд, могут быть подложки поликристаллического алмаза с включениями из монокристаллического алмаза (рис. 1). Такие комбинированные алмазные пластины будут иметь диаметр поликристаллических пластин от 75 до 150 мм и содержать большое число вращённых прямоугольных (или круглых) монокристаллов CVD-алмаза небольших размеров, до 10×10 мм. Для создания электронных приборов на таких пластинах толщиной 200–500 мкм могут быть использованы технологические линии, уже разработанные для кремниевой технологии. Для реализации рассмотренного подхода необходимы исследования, направленные на получение обсуждаемых комбинированных подложек. На сегодняшний день нам не известны работы, где изучалось совместное выращивание поли- и монокристаллического CVD-алмаза.

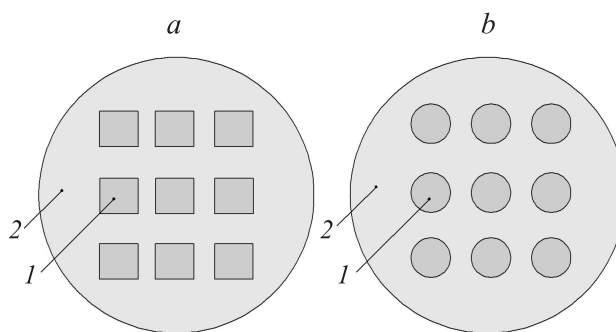


Рис. 1. Схематичное изображение подложки: монокристаллический (1) и поликристаллический (2) CVD-алмаз. Монокристаллы с ориентацией (100) прямоугольной (a) и круглой (b) формы.

^{¶¶} E-mail: mabl@appl.sci-nnov.ru

^{¶¶} E-mail: val@appl.sci-nnov.ru

Параметры CVD-алмаза в комбинированной подложке после процесса сращивания

№ кристалла	Монокристаллический CVD-алмаз			Поликристаллический CVD-алмаз		
	Толщина слоя, мкм	Скорость роста, мкм/ч	FWHM, см ⁻¹	Толщина слоя, мкм	Скорость роста, мкм/ч	FWHM, см ⁻¹
1	790	5.7	2.2	700	5	2.6
2	820	5.9	2.1			

Примечание. FWHM — ширина на половине высоты интенсивности пика, соответствующего алмазу, в спектре комбинационного рассеяния.

В настоящей работе представлены результаты исследований, в которых решались две задачи. Первая — исследование процесса получения подложек, в которых моно- и поликристаллический алмаз образуют единую пластину. Вторая — шлифовка пластин и исследование эпитаксиального роста алмазных пленок из газовой фазы на комбинированных подложках, содержащих участки поликристаллического и монокристаллического CVD-алмаза с ориентацией (100). В ходе проведенных экспериментов определялись условия, при которых происходило осаждение моно- и поликристаллических алмазных пленок высокого качества, а также изучались условия шлифовки комбинированных подложек методом термического травления. На каждой стадии экспериментов характеристики полученных алмазных пленок анализировались методами сканирующей электронной микроскопии (SEM), атомно-силовой микроскопии (AFM) и спектроскопии комбинированного рассеяния.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для получения комбинированных подложек использовалась экспериментальная установка [10], в которой плазмохимический реактор создан на основе объемного СВЧ резонатора. Внутри цилиндрического резонатора, возбуждаемого магнетроном (на частоте 2.45 ГГц) на моде ТМ₀₁₃, находилась кварцевая колба, в которой загорался и поддерживался СВЧ разряд в газовой смеси водорода и метана. Разрядная плазма создавалась над молибденовым подложкодержателем, на поверхности которого помещалась кремниевая подложка. Эксперименты проводились в импульсно-периодическом режиме поддержания плазмы при частоте повторения СВЧ импульсов 250 ГГц и скважности 2. В ходе ранее проведенных экспериментов [11] были найдены условия, при которых происходило осаждение монокристаллических алмазных слоев высокого качества, поэтому найденные режимы синтеза алмаза использовались и в настоящей работе. Содержание метана в водород-метановой смеси поддерживалось равным 4%, скорость потока водорода составляла 200 сссм (стандартных кубических сантиметров в минуту), газовое давление равнялось 155 Торр. Эксперименты проводились при средней мощности магнетрона 2.7 кВт. Температура подложки измерялась ин-

фракрасным пирометром MIKRON M67S и поддерживалась равной 900°С.

Выращивание комбинированных подложек из моно- и поликристаллического алмаза проводилось следующим образом. На кремниевой подложке диаметром 25 мм, обработанной предварительно алмазным порошком механическим способом, помещались две монокристаллические алмазные подложки размером 3 × 3 мм, толщиной ~ 300 мкм, ориентированные плоскостью (100) перпендикулярно направлению роста.

Далее осуществлялся процесс роста алмаза при приведенных выше условиях. На монокристаллических подложках происходил эпитаксиальный рост монокристаллического алмаза, а на кремнии наращивался поликристаллический алмаз. В процессе осаждения поли- и монокристаллический алмаз срастались, образуя единую пластину (рис. 2).

Скорости роста поли- и монокристаллических участков подложки были примерно равными, поэтому в результате при средней толщине поликристаллической пластины ~ 700 мкм монокристаллы CVD-алмаза выступали над поверхностью подложки на толщину первоначальных монокристаллических подложек. Характеристики алмаза в комбинированной подложке, анализировавшиеся методами SEM и спектроскопии комбинационного рассеяния (рамановской спектроскопии), представлены в таблице. Затем комбинированная моно- и поликристаллическая алмазная пластина была удалена с кремниевой подложки химическим травлением.

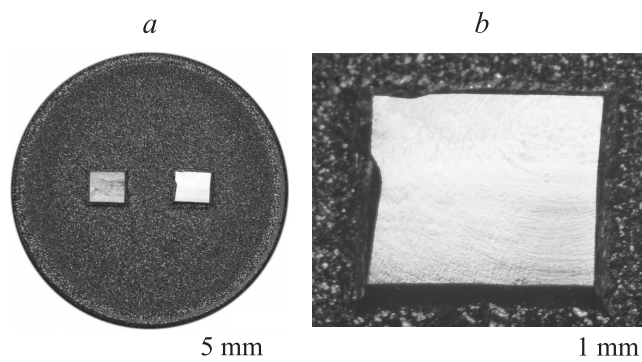


Рис. 2. Комбинированная подложка после процесса сращивания поли- и монокристаллического алмаза (а) и один из монокристаллов алмаза (b).

Как известно, подготовка алмазной подложки перед последующим эпитаксиальным ростом является одним из критических факторов, определяющих качество алмазного CVD-материала [12]. Нами ростовая поверхность комбинированной подложки была выровнена с использованием метода термического травления на железном пьедестале [13]. Как показали проведенные исследования, для планаризации такой пластины метод термического травления более предпочтителен по сравнению со стандартным методом механической шлифовки, поскольку механическая шлифовка вносит существенно больше дефектов в алмазный материал, чем термическая обработка.

После шлифовки и стандартной процедуры химической очистки поверхности комбинированной подложки на ней были произведены эксперименты по эпитаксиальному росту алмаза. В этих экспериментах условия синтеза алмаза были такие же, как и при получении комбинированной подложки. Для оптимизации режима планаризации подложек методом их термического травления на железном пьедестале травление и эпитаксиальное наращивание CVD-слоя на комбинированной подложке проводилось несколько раз. Каждый раз толщина нарастающего CVD-слоя была в пределах 300–500 мкм. Параметры CVD-алмаза в этом эпитаксиальном слое были близки к характеристикам алмаза в комбинированной подложке (см. таблицу). На монокристаллических участках качество слоев CVD-алмаза, ориентации (100), превышало качество подложки.

На заключительном этапе комбинированные алмазные подложки подвергались термической планаризации для получения плоскопараллельных алмазных пластин толщиной ~ 500 мкм. Пластины имели высокую оптическую прозрачность. Это позволило исследовать границу раздела между сращенными монокристаллическим и поликристаллическим алмазом (рис. 3).

Как видно из рисунка, где крупным планом показана граница раздела между монокристаллическим и поликристаллическим алмазом, произошло полное срастание монокристаллов CVD-алмаза с поликристаллическим

алмазом и образование единой алмазной пластины. Такие пластины в дальнейшем могут быть легко клонированы. Для получения клонов известна технология создания жертвенного слоя в алмазе путем ионной имплантации (lift-off process) [4,14]. Образующиеся при ионной имплантации дефекты при отжиге формируют графитизированный слой. Глубина расположения и толщина слоя алмаза с радиационным повреждением зависит от вида и энергии имплантированных ионов. При этом на поверхности подложки слой алмаза не поврежден, поэтому подложка позволяет проводить эпитаксиальное выращивание CVD-слоя толщиной 200–300 мкм и удаление выращенного CVD-слоя (клона) химическим травлением графитизированного жертвенного слоя. Сама подложка при этом может быть использована для получения следующего CVD-слоя. Таким образом, созданная комбинированная подложка будет использоваться для получения не одного десятка плоскопараллельных CVD-пластин толщиной 200–300 мкм, пригодных для разработки современных полупроводниковых приборов на базе CVD-алмаза.

3. Заключение

Таким образом, в данной работе исследовано получение комбинированных подложек диаметром 25 мм — пластин, содержащих участки поликристаллического и монокристаллического алмаза, исследован эпитаксиальный рост алмазных пленок на таких подложках, изготовлены экспериментальные образцы эпитаксиальных слоев CVD-алмаза, содержащие участки поликристаллического и монокристаллического алмаза для последующего формирования полупроводниковых широкозонных алмазных структур для создания мощных СВЧ полупроводниковых приборов. Установлено, что важным процессом является планаризация подложки с помощью термической шлифовки. Такая подготовка поверхности подложки позволяет формировать высококачественные эпитаксиальные CVD-слои в виде плоскопараллельных пластин требуемой толщины (200–300 мкм).

Заметим, что создание комбинированных пластин из поли- и монокристаллического CVD-алмаза (особенно большого диаметра) может заметно улучшить (и технически упростить) теплоотвод от монокристаллических алмазных пластин, используемых в мощных приборах, требующих охлаждения, в частности в рентгеновских монохроматорах [15].

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 09-08-00019).

Список литературы

- [1] *CVD Diamond for Electronic Devices and Sensors*, ed. by R.S. Sussmann (John Wiley&Sons, 2009).
- [2] T.Teraji. In: *Physics and Applications of CVD Diamond*, ed. by S. Koizumi, C. Nebel, M. Nesladek (Wiley-VCH, 2008) p. 29.

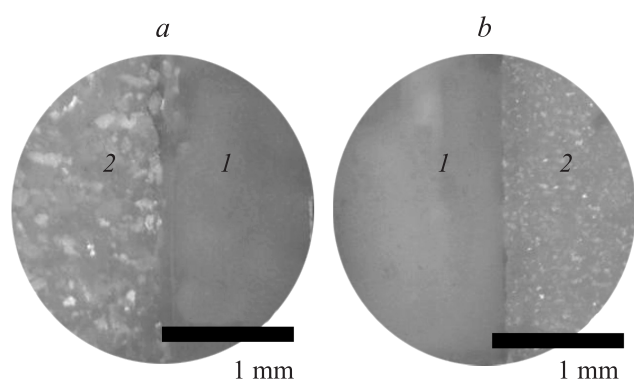


Рис. 3. Граница раздела между монокристаллическим (1) и поликристаллическим (2) алмазом с ростовой (а) и подложечной (б) сторон после термической планаризации эпитаксиального слоя комбинированной подложки.

- [3] М. Макушин. Электроника: НТБ, № 8, 82 (2005).
- [4] Н. Yamada, А. Chayahara, Y. Mokuno, Н. Umezawa, S. Shikata, N. Fujimori. Appl. Phys. Express, **3**, 051301 (2010).
- [5] <http://www.e6cvd.com>
- [6] <http://www.diamond-materials.com>
- [7] <http://www.ipfran.ru/structure/lab122/info.html>
- [8] В.С. Вавилов. УФН. **167** (2), 17 (1997).
- [9] С. Nebel. In: *Thin-Film Deamond-I*, ed. by С. Nebel, J. Ristein (Elsevier, 2003).
- [10] А.А. Алтухов, А.Л. Вихарев, А.М. Горбачев, М.П. Духновский, В.Е. Земляков, К.Н. Зяблук, А.В. Митенкин, А.Б. Мучников, Д.Б. Радищев, А.К. Ратникова, Ю.Ю. Федоров. ФТП, **45** (3), 403 (2011).
- [11] А.В. Muchnikov, А.Л. Vikharev, А.М. Gorbachev, D.B. Radishev. Diamond Relat. Mater., **20**, 1225 (2011).
- [12] Т. Teraji. Phys. Status. Solidi, **203** (13), 3324 (2006).
- [13] М.П. Духновский, А.К. Ратникова, Ю.Ю. Федоров, О.Ю. Кудряшов, И.А. Леонтьев. Электрон. техн., сер. 1, СВЧ-техника, № 2, 41 (2008).
- [14] Y. Mokuno, А. Chayahara, Н. Yamada. Deamond Relat. Mater., **17**, 415 (2008).
- [15] А.К. Freund, J. Hoszowska, J.P.F. Sellschop, R.C. Burns, M. Rebak. Nucl. Instr. Meth. A, **467–468**, 384 (2001).

Редактор Л.В. Шаронова

Combined poly- and monocrystalline CVD diamond substrates for diamond electronics

A.L. Vikharev[†], A.M. Gorbachev[†], M.P. Dukhnovsky*, A.B. Muchnikov[†], A.K. Ratnikova*, Yu.Yu. Fedorov*

[†] Institute of Applied Physics,
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

* FSUE „Istok“,
141190 Fryazino, Russia

Abstract The results of combined diamond wafer growth containing mono- and polycrystalline CVD diamond are presented. Also, the epitaxial diamond film growth is investigated on such combined substrates, which contain sections of poly- and monocrystalline (100) CVD diamond.