

УДК 621.3.084.866

Г.В. ШАРОНОВ, И.И. ВАСИЛЬЕВ, С.А. ПЕТРОВ, А.В. ПУШКАРЕВ

РЕНТГЕНОВСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПОДЛОЖЕК СИНТЕТИЧЕСКОГО МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛМАЗА ДЛЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Off-orientation of plain (001) and surface of diamond single crystal was analyzed. On basis of diamond single crystal films, which were raised on the synthetic diamond substrates, were worked out ultraviolet radiation detectors.

Работы в области использования алмазов в электронной технике ведутся с 1980-х гг. Однако до настоящего времени не создана промышленная технология производства изделий пассивной и активной электроники на алмазе. Это в значительной степени объясняется высокой твердостью алмаза, его химической стойкостью, отсутствием надежного источника материала требуемого качества с низкой концентрацией примесей и дефектов. На чистых природных и синтетических монокристаллических структурно-совершенных алмазах исследуется возможность изготовления полупроводниковых приборов (СВЧ-транзисторов, диодов Шоттки, УФ-детекторов, датчиков рентгеновского излучения и т. п.).

В последние годы значительный прогресс достигнут в области осаждения монокристаллических пленок алмаза из газовой фазы (Chemical Vapor Deposition – CVD-технология). Эта технология является наиболее перспективной и позволяет выращивать особо чистые монокристаллы алмаза и пленки больших размеров [1, 2]. При использовании в эпитаксиальных технологиях подложек из синтетических монокристаллов алмаза важно достичь высокой степени кристаллического совершенства структуры поверхности с минимальной разориентацией кристаллографической плоскости (001) алмаза к поверхности подложки. В связи с этим представляется целесообразным совершенствование технологии обработки рабочих поверхностей алмазных подложек до уровня, удовлетворяющего требованиям эпитаксиального роста. Следовательно, задача промышленного производства изделий активной и пассивной электроники на алмазе напрямую связана с разработкой технологического процесса и оборудования для обработки монокристаллических алмазных подложек с обеспечением структурного совершенства их приповерхностного слоя. Поэтому несомненный интерес представляет определение критериев отбора алмазных подложек для применения в эпитаксиальных технологиях, что и явилось целью настоящей работы.

Материал и методика

Объектами изучения являлись 50 подложек (001)-ориентации монокристаллического синтетического сверхтвердого алмаза (СТМ «Алмазот») [3], изготовленных по традиционной технологии. Типовой процесс изготовления алмазных подложек оптического качества включает следующие основные технологические операции: 1) контрольную (отбор кристаллов для подложек); 2) шлифовальную (снятие затравки); 3) лазерной разметки и распиловки кристаллов на пластины; 4) механического распиливания кристаллов алмаза на пластины; 5) шлифовальную (шлифовка и полировка рабочих поверхностей подложек); 6) приемочного контроля (измерения шероховатости, дефектности поверх-

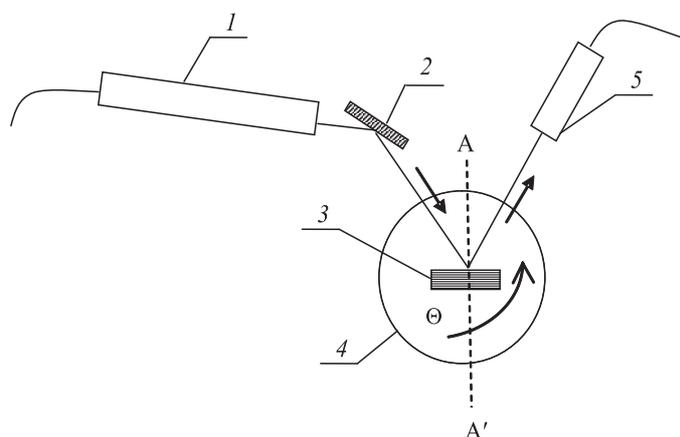


Рис. 1. Схема рентгеновской установки: 1 – рентгеновская трубка, 2 – монохроматор, 3 – ориентируемый кристалл, 4 – гониометр, 5 – детектор рентгеновского излучения

сталлических решеток пленки и подложки) является качество подготовки поверхности и угол разориентации кристаллографической плоскости (001) с поверхностью подложки. Разрабатываемая технология изготовления подложек должна обеспечивать минимальный угол разориентации. Согласно имеющимся данным, для эффективного эпитаксиального роста алмазных пленок этот угол должен быть не более $2,5^\circ$. С целью оценки возможностей традиционной технологии нами проведены исследования угла разориентации кристаллографической плоскости (001) кристалла относительно ее поверхности у 50 изготовленных экспериментальных образцов.

Определение угла разориентации кристаллографической плоскости с поверхностью кристалла проводилось на рентгеновской установке (рис. 1) с источником рентгеновского CuK_α -излучения 1, монохроматизированного совершенным кристаллом германия 2, обеспечивающим малую угловую расходимость рабочего пучка, составляющую величину, на порядок меньшую, чем полуширина кривой отражения для ориентируемого кристалла 3. Последнее служило более точному определению углового положения рефлекса и тем самым повышало точность определения угла разориентации. Углы дифракции определялись гониометром 4 (ГУР-5) с ценой деления на шкале отсчета углов $0,005^\circ$.

Методика определения угла разориентации кристаллографической плоскости кристалла с его поверхностью состояла в следующем. Анализируемый кристалл закреплялся в фиксирующем кольце так, что его поверхность совпадала с плоской поверхностью самого кольца. Затем кольцо с кристаллом размещалось на головке гониометра рентгеновской установки так, чтобы на поверхность кристалла попадал рентгеновский пучок. Путем поворота кольца в собственной плоскости вокруг оси AA', перпендикулярной общей плоскости кольца и кристалла, и вращением гониометрической приставки вокруг оси гониометра (угол поворота Θ) находилось отражение (рефлекс) 400 для случаев, когда угол отражения от кристалла имел, во-первых, минимальное значение (Θ_{\min}) и, во-вторых, максимальное значение (Θ_{\max}). Сложение найденных углов и деление суммы пополам $(\Theta_{\min} + \Theta_{\max})/2 = \Theta_0$ дает значение угла отражения для случая, когда разориентация кристаллографической плоскости и поверхности отсутствует (угол Θ_0). Тогда искомое значение угловой разориентации определяется как разность значения данного угла Θ_0 и минимального (или максимального) значения угла, найденного из показаний гониометра $\alpha = \Theta_0 - \Theta_{\min}$. Максимальное и минимальное значение углов определялось по отклонению кристалла от максимума дифракции при вращении образца в собственной плоскости (для которой искалась разориентация) и вращении гониометрической приставки. Точность углового определения этого отклонения составляла $0,03 \pm 0,05^\circ$. Значение отклонения, умноженное на 2 (находили два угла – минимальный и максимальный), соответствует точности определения угла разориентации кристаллографической плоскости кристалла с его поверхностью.

Результаты и их обсуждение

Как видно из результатов измерений, приведенных в таблице, 24 подложки из 50 удовлетворяют критерию отбора по углу разориентации $\leq 2,5^\circ$. Таким образом, типовой технологический процесс изготовления подложек позволяет обеспечить 48 % выход годных подложек для эпитаксиального наращивания полупроводниковых алмазных слоев. Следует отметить, что из подложек, не удовлетво-

ностного слоя, теплопроводности и др.). Шлифовка и полировка базовых плоскостей подложек проводилась на разработанной технологической оснастке. В качестве обрабатывающего инструмента использовался чугунный диск, шаржированный алмазным порошком АСН с зернистостью 20/14, 10/7, 5/3, 3/2 и 2/1 мкм. Диаметр диска равен 140 мм, скорость вращения алмазного круга – 2800 об/мин. Последовательным шлифованием противоположных сторон вырезанных кристаллов формируется подложка.

Одним из важных параметров для эпитаксиального роста монокристаллических алмазных пленок на монокристаллических алмазных подложках (сращивания кри-

ряющих допустимому критерию по разориентации, могут быть изготовлены элементы пассивной электроники (теплоотводы, звукопроводы в приборах на поверхностных акустических волнах), режущий инструмент и др. Подложки с углом разориентации $\leq 2,5^\circ$ были использованы для осаждения монокристаллических алмазных пленок из газовой фазы (смеси метана с водородом, которая диссоциирует в вакуумной камере под действием СВЧ-плазмы). Размер выращенной монокристаллической пленки составил около 20 мкм. С помощью фотолитографии формировалась решетка встречно-штырьевых электродов Cr – Cu – Ni с периодом 200 мкм, зазором 100 мкм и площадью 10 мм².

Отклонение кристаллографической плоскости (001) относительно поверхности монокристаллических алмазных подложек

Номер образца	Угол разориентации плоскости (001) с поверхностью алмазной подложки, °	Номер образца	Угол разориентации плоскости (001) с поверхностью алмазной подложки, °
1	6,08	26	13,30
2	6,48	27	3,31
3	0,94	28	3,68
4	5,34	29	1,98
5	1,80	30	4,27
6	0,86	31	4,18
7	2,20	32	2,67
8	2,60	33	8,86
9	1,73	34	1,63
10	1,89	35	5,09
11	2,10	36	2,97
12	1,02	37	5,44
13	2,81	38	3,33
14	1,89	39	2,98
15	1,16	40	2,69
16	0,83	41	1,39
17	2,68	42	4,56
18	0,73	43	7,10
19	1,15	44	2,81
20	1,86	45	5,36
21	0,42	46	4,97
22	2,26	47	8,61
23	0,61	48	0,34
24	2,75	49	2,47
25	0,90	50	0,18

На базе полученных структур были разработаны детекторы УФ-излучения. Исследование временных и энергетических характеристик осуществлялось с использованием 4-й гармоники ($\lambda = 266$ нм) импульсного лазера на иттриево-алюминиевом гранате (АИГ: Nd³⁺) в режиме модуляции добротности с длительностью импульса 5 нс по полуширине и с энергией 0,5 мДж. Кинетика отклика УФ-детектора на лазерный импульс приведена на рис. 2.

Таким образом, показано, что типовой технологический процесс изготовления алмазных монокристаллических подложек из СТМ

«Алмазот» позволяет обеспечить 48 % выхода годных подложек (001)-ориентации для эпитаксиальных технологий в микро- и нанoeлектронике. Проведенные исследования показывают высокую на-

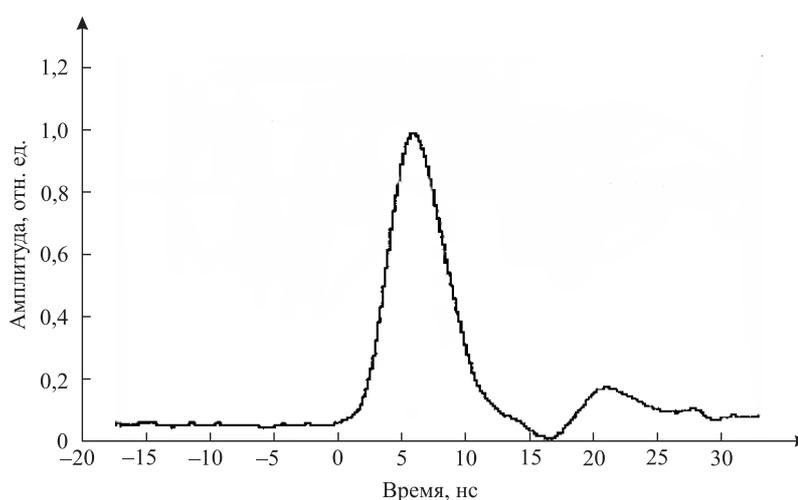


Рис. 2. Временная структура отклика УФ-детектора на излучение 4-й гармоники импульсного АИГ: Nd³⁺

дежность и стабильность параметров разработанных УФ-детекторов на алмазных монокристаллических пленках, выращенных на подложках синтетического монокристаллического алмаза.

1. Ральченко В.Г., Конов В.А. // Электроника. 2007. № 4. С. 58.
2. Krasnicki S., Yan C.-S. et al. // MRS Fall meeting, Symposium J: Diamond electronics. Fundamentals to applications. 2006. Nov. 27. Dec. 1. Abst. J9.28.
3. Монокристалл синтетический сверхтвердый – СТМ «Алмазот». ТУ РБ 40007852.010-2004.

Поступила в редакцию 12.03.09.

Геннадий Викторович Шаронов – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией обработки и передачи информации НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ.

Игорь Иванович Васильев – научный сотрудник лаборатории обработки и передачи информации НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ.

Сергей Александрович Петров – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории обработки и передачи информации НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ.

Анатолий Васильевич Пушкарёв – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики твердого тела НПЦ по материаловедению НАН Беларуси.