

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ԻՆՏԻՏՈՒՏ
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ


ԳԻՏԱԿԱՆ ՀԱՂՈՐԴՈՒՄ ՆԱՍՏԻՆՈՒԹՅԱՆ ՆԱՍՏԻՆՈՒԹՅԱՆ
НАУЧНОЕ СООБЩЕНИЕ

ЕФИ- 206(52)-76

Л.И.ДАШЕНКО, Д.Л.ЕГИКЯН, И.П.КАРАБЕКОВ
Р.А.МИКАЭЛЯН, И.В.ПРОКОПЕНКО, Ю.А.ТХОРИК

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОГО СОВЕРШЕНСТВА
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ И
ГЕТЕРОСТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ СИНХРОТРОННОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ

ԱՐՄՍ
ԵՐԵՎԱՆ 1976
ԵՐԵՎԱՆ



ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Научное сообщение ЕФИ- 206(52)-76

Л.И.ДАЦЕНКО^{х)}, Д.Л.ЕГИКЯН, И.П.КАРАБЕКОВ
Р.А.МИКАЭЛЯН, И.В.ПРОКОПЕНКО^{х)}, Ю.А.ТХОРИК^{х)}

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОГО СОВЕРШЕНСТВА
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ И
ГЕТЕРОСТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ СИНХРОТРОННОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ

^{х)} Институт Полупроводников АН УССР, г.Киев.

Ереван 1976

Ереванский Физический
ИНСТИТУТ
Зд. предприятий

Структурное совершенство гетероэпитаксиальных систем (ГЭС) играет важную роль в получении стабильных и воспроизводимых параметров полупроводниковых приборов, изготавливаемых на их основе. Ранее была показана перспективность рентгеновской дифракционной топографии (РДТ) для изучения структурных дефектов в ГЭС^{x)} Si-Ge, Ge-Si [1,2] и GaAs [3]. В частности была установлена возможность получения независимых топограмм от плёнки и от подложки. С помощью РДТ и других методов впервые была обнаружена фрагментарная структура (ФС), для выяснения природы которой понадобилась съёмка большого числа топограмм от плёнки и подложки, что повлекло за собой резкое увеличение суммарного времени экспозиции, исчисляемого сотнями часов [2].

Уникальные свойства синхротронного излучения (СИ) (большие мгновенные значения мощности излучения, незначительная расходимость пучка рентгеновских лучей с широким диапазоном длин волн) [4-7] позволяют за короткое время получить одновременно большое число топограмм с высоким разрешением от обеих веществ ГЭС, с помощью которых можно судить о нарушениях в плёнке и подложке. Целью настоящей работы была разработка методики съёмки на СИ топограмм ГЭС с низким уровнем флюоресцентного фона.

x) Здесь и далее последовательность веществ означает соответственно материалы подложки и плёнки.

Исследования были проведены на пучке синхротронного излучения ускорителя Ереванского физического института при энергии электронов $E_{\text{max}} = 4,5$ ГэВ на расстоянии $\rho = 35$ м от места эмиссии излучения. Поскольку СИ является полихроматическим, несколько узлов обратной решетки кристалла одновременно попадают на соответствующие сферы Эвальда. Поэтому, при съёмке с помощью СИ получается лауэграмма монокристалла. Малая же угловая расходимость излучения позволяет на каждом из рефлексов зарегистрировать четкие изображения дефектов образца. Такой метод получения изображений дефектов на белом слабо расходящемся излучении рентгеновской трубки впервые был разработан Фудживарой с соавторами [8]. Поэтому для удобства совокупность рефлексов (топограмм) на одной плёнке, полученных на СИ будем называть в дальнейшем фудживарограммами.

Анализ работы, выполненных на синхротронах DESY и NiNA [4,5] показывает, что важнейшим условием получения качественных топограмм является устранение паразитного влияния флюоресцентного фона, возникающего от попадания первичного пучка на различные детали камеры.

Нами была разработана камера для получения топограмм с низким уровнем фона при съёмке в случае геометрии Лауэ. Схема камеры для съёмки фудживарограмм показана на рис.1. Камера выполнена из стального цилиндра со съёмной передней и задней крышками. Внутренняя поверхность камеры выложена алюминиевой фольгой толщиной 1 мм. Входное отверстие передней крышки использовалось для установки кристаллодержателя. В выходном отверстии камеры укреплялась алюминиевая трубка (4) диаметром 10 мм, основное назначение которой заключалось в подавлении флюоресцентного фона, создаваемого пучком в воздухе. Она же используется для юстировки камеры относительно оси пучка, которая заключается в получении на флюоресцентном экране, укрепленном

на выходе трубки неискаженного изображения входного отверстия. В этом случае синхротронный пучок проходит по оси прибора, не касаясь никаких деталей камеры. На наш взгляд единственным источником фона мог быть сам исследуемый образец. Использовалась фотоплёнка с отверстием, которая надевалась на защитную трубку (см. рис.1), что исключало возможность появления флюоресценции от стекла фотопластины, которые применялись во всех предыдущих опытах. Кроме того в результате помещения фотопленки в кассету из плексигласа удалось значительно снизить уровень мягкой компоненты фона и тем самым повысить четкость топограмм.

Съёмка топограмм проводилась на плёнку с высоким разрешением (эмульсия МК). Средняя экспозиция определялась измерением общего числа ускоренных электронов [9]. В эксперименте это число было выбрано равным $8,8 \cdot 10^{12}$ электронов. Соответственно время экспозиции колебалось в интервале от одной до 5 минут в зависимости от толщины исследуемого кристалла. На одной фудживарограмме на расстоянии 80 мм от кристалла до фотопленки регистрировалось одновременно до 20 рефлексов. Для того, чтобы в одной установке кристалла получить качественные топограммы от рефлексов различной интенсивности, в кассету закладывалась стопа из нескольких фотоплёнок. При этом экспозиция выбиралась таким образом, чтобы на наиболее удаленной от кристалла эмульсии сильным рефлексам типа 220 соответствовало нормальное почернение. В этом случае на передней фотоплёнке нормально экспонированными получаются отражения с более слабой интенсивностью (типа 113,440 и др.). На рис.2 показана одна из фудживарограмм кристалла кремния, поверхность которого была перпендикулярной направлению $\langle 111 \rangle$. Легко видеть, что уровень флюоресцентного фона незначителен.

С целью выяснения величины разрешения топограмм с использованием СИ был снят кристалл Si с большой

плотностью дислокаций ($N_d = 1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$). В участках с указанной величиной N_d разрешаются отдельные линии (рис.3). Нами было проведено также сопоставление топограмм, снятых с использованием СИ и MoK_α излучения рентгеновской трубки по методу Ланга от одного и того же участка кристалла кремния, в котором были обнаружены ряды скольжения дислокаций (рис.4-а и 4-б). Снимок, полученный на СИ (рис. 4-а) мало отличается по четкости изображений дефектов от снимка, полученного на рентгеновской трубке.

Для выяснения возможностей применения СИ к исследованию гетероструктур были проведены съёмки ГЭС Si-Ge, полученных путем наращивания плёнок из молекулярного пучка на подложках бездислокационного Si, как и в работах [1,2]. Температура подложек варьировалась в интервале от 400 до 800°C. Толщина плёнок составляла 20 мкм.

Фудживарограммы, полученные от ГЭС Si-Ge, выращенные при температурах $T_0 = 450^\circ\text{C}$, характеризуются наличием рефлексов только от подложки Si. Отражения от плёнки Ge отсутствуют, поскольку при такой T_0 она является поликристаллической. Один из 220-рефлексов от подложки показан на рис.5. Основной особенностью этой топограммы является наличие своеобразного фона, состоящего из темных и светлых пятен (зерен). Заметных искажений структуры на таких топограммах не обнаружено. Поэтому абсолютная деформация области подложки, расположенной под одним кристаллом относительно невелика из-за малых размеров зерен [10]. Низкая температура осаждения не способствует к тому же развитию пластической деформации. Поэтому подложка кремния в случае поликристаллической плёнки германия по структурному совершенству мало отличается от исходного бездислокационного кристалла.

Иная картина наблюдается в случае ГЭС, выращенные при $T_0 = 800-850^\circ\text{C}$. Плёнка германия в этих усло-

виях является монокристалльной. Поэтому фудживарограммы таких ГЭС состоят из удвоенного числа рефлексов, поскольку плёнка дополнительно дает независимые отражения. При этом рефлексы от плёнки характеризуются большой диффузностью, что свидетельствует о более низкой степени структурного совершенства плёнки по сравнению с подложкой. Вместе с тем в подложке формируется своеобразная ячеистая дефектная структура (рис.6), появляющаяся на всех рефлексах фудживарограммы. Поля смещений в окрестности каждой ячейки распределены изотропно. Наконец, в толстых плёнках возникает фрагментарная структура (рис.7), идентификация которой облегчается наличием набора топограмм на фудживарограмме. Как и в предыдущей работе [2], были обнаружены поля напряжений параллельных поверхности раздела двух веществ вокруг каждого элемента ФС. Излучение различных рефлексов показало, что характер искажений меняется при переходе от одного к другому отражению, что свидетельствует о сложном азимутальном распределении напряжений.

ВЫВОДЫ

1. Разработана усовершенствованная экспериментальная методика съёмки фудживарограмм с использованием синхротронного излучения. Снимки характеризуются высоким разрешением, сравнимым с разрешением Ланговских топограмм, а также низким уровнем флюоресцентного фона.
2. Впервые получены фудживарограммы композитных систем. Использование синхротронного излучения позволяет получать одновременно топограммы от плёнки и подложки ГЭС, что представляет большие удобства для расшифровки возникающих дефектных структур.

Авторы выражают глубокую признательность М.А.Мартыросяну, Г.А.Макаряню за помощь при проведении работ на пучке СИ и Н.Н.Солдатенко за выращивание образцов ГЭС.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис.1 Схема камеры для съёмок фудживарограмм на синхротронном излучении: 1-исследуемый кристалл; 2-фотоплёнка; 3-кассета из плексигласа; 4-трубка-коллиматор из алюминия; 5-корпус камеры из стали; 6-внутренняя оболочка из алюминия; 7-флюоресцирующий экран; А и Б-дифрагированные лауэлучки.
- Рис.2 Фудживарограмма кристалла кремния № 1 с дислокационными полосами скольжения.
- Рис.3 Топограмма кристалла Si № 2 с большой плотностью дислокаций Nd ($N_d = 1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$), 220- рефлекс. Синхротронное излучение X14.
- Рис.4 Топограммы (рефлекс 220) одного и того же участка кристалла № 1, полученные с помощью: а) синхротронного излучения, X 14; экспоз. 2 мин. б) излучения $M\alpha K\alpha$ трубки БСВ-10, X 14, экспоз. 4 часа.
- Рис.5 220 -рефлекс от подложки ГЭС, полученной при температуре подложки 450°C. X 14.
- Рис.6 Ячеистая дефектная структура в подложке ГЭС, полученной при температуре подложки 800°C. 220-рефлекс. X 14.
- Рис.7 Фрагментарная структура в ГЭС Si-Ge, возникающая при быстром охлаждении системы после выращивания. Видны напряжения вблизи каждого элемента структуры. 220-рефлекс. X 14.

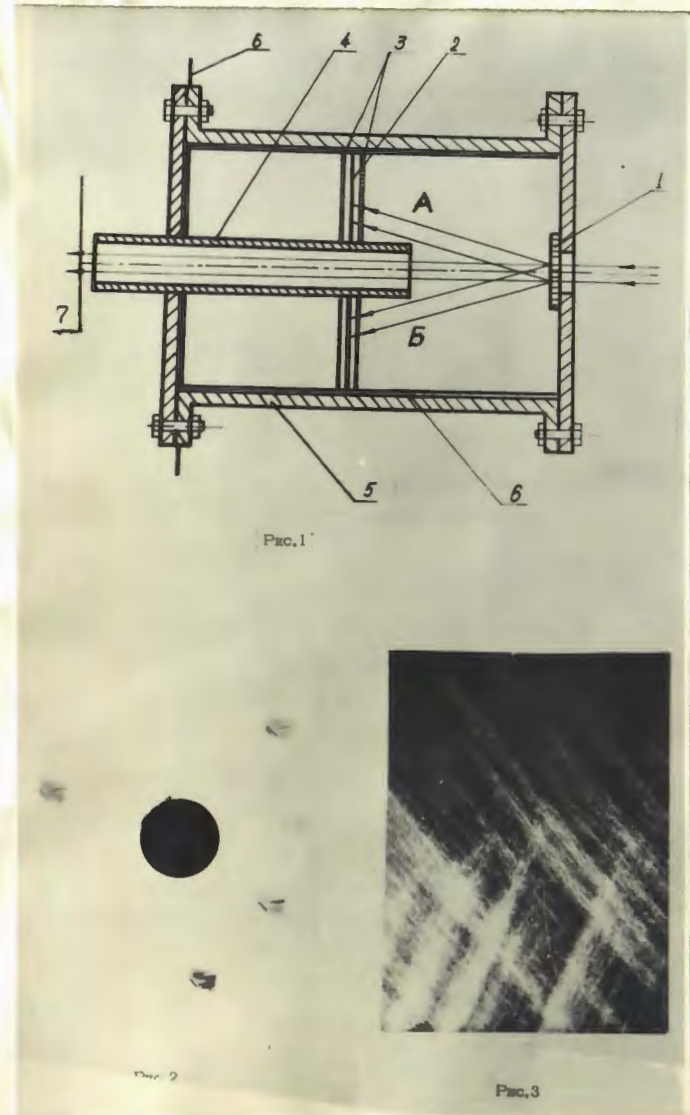




Рис.4а

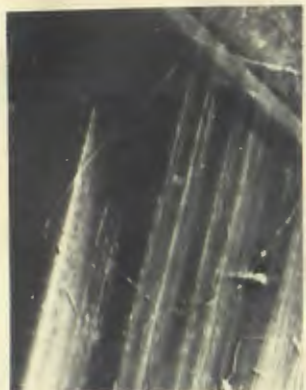


Рис.4б

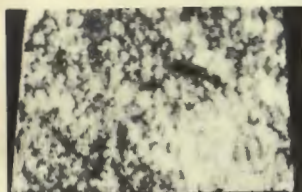
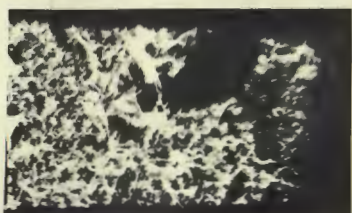


Рис.5



Рис.6

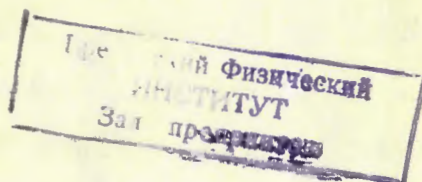


ЛИТЕРАТУРА

1. L.I.Datsenko, A.N.Gureyev, N.V.Korotkevich, N.N.Soldatenko, Yu.A.Tkhorik. *Thin. Solid Films*, 7, 117, 1971.
2. V.N.Vasilevskaya, L.I.Datsenko, N.N.Osadchaya, J.V.Prokopenko, N.N.Soldatenko, Yu.A.Tkhorik. *Thin Solid Films*, 22, 221, 1974.
3. L.I.Datsenko, A.P.Klimenko, L.A.Matveyeva, J.V.Prokopenko, Yu.A.Tkhorik. *Thin Solid Films*, 33, 275, 1976.
4. T.Tuomi, K.Naukkarinen, P.Rabe. *Phys.Stat.Sol.(a)*, 25, 93, 1974.
5. M.Hart, *J.Appl.Cryst.*, 8, 436, 1975.
6. А.И.Алиханян, Ц.М.Авакян, П.А.Безирганян, И.П.Карабеков, М.А., М.А.Мартиросян, А.М.Кочинян, С.С.Овакимян. *ИТЭ*, 3, 39, 1974.
7. V.Bonse, G.Materlik, W.Schröder. *DESY SR 75/14*
October 1975
3. T.Fujiwara, S.Dohi, J.Sunada. *Jap.J.Appl.Phys.*, 3,
129, 1964.

9. И.П.Карабеков и др. Научное сообщение ЕФИ-23(73).
10. В.И.Клочков, О.Н.Григорьев, В.И.Полудин, Н.Н.Солдатенко, Н.М.Торчун, Ю.А.Тхорик. Полупроводниковая техника и микроэлектроника, 6, 24, 1971.

Рукопись поступила 29-го октября 1976г.



Редактор Л.П.Мукаян
Тех.редактор А.С.Абрамян

Заказ 795 ВФ- 03504 Тираж 299

Подписано к печати 21/1-77г. Формат издания 30x40

1,0 уч.изд.л. Ц. 7 к.

Издано Отделом научно-технической информации
Ереванского физического института, Ереван-36, пер.Мар-
каряна 2