

## МЕТОД СТОЯЧИХ РЕНТГЕНОВСКИХ ВОЛН В ИССЛЕДОВАНИИ СТРУКТУРНОГО СОВЕРШЕНСТВА ТОНКИХ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ СВЕРХРЕШЕТОК GaAs/AlAs.

М.И. АБДУЛЛАЕВ, Э.Ш. АЛЕКПЕРОВ, И.Р. НУРИЕВ

*Институт Фотозлектроники АН Азербайджана  
370141, г. Баку, ул. Ф. Агаева, 555-й квартал*

Методом стоячих рентгеновских волн исследована сверхрешетка GaAs/AlAs, полученная на подложке GaAs.

Установлено, что данный метод может быть использован для получения информации о верхних слоях исследуемой сверхрешетки. Определены толщина и кристаллическое состояние защитного слоя сверхрешетки GaAs/AlAs.

Метод стоячих рентгеновских волн (СРВ), базирующийся на измерении угловой зависимости выхода вторичных излучений (флуоресцентного, теплового, фото- и Оже-электронов, диффузного и комптоновского рассеяния и т.д.) в условиях динамической дифракции рентгеновских лучей, является эффективным инструментом анализа структуры реальных кристаллов и, в особенности, тонких приповерхностных слоев [1,2]. Метод СРВ с использованием фото- и Оже-электронов позволяет получить информацию о структурном совершенстве поверхностных слоев толщиной порядка глубины выхода фото (~3000 Å) и Оже-электронов (~150Å) [3-5]. В [6] данным методом была исследована сверхрешетка GaAs/Ga<sub>0.5</sub>Al<sub>0.5</sub>As и показано, что пики-спутники низких порядков с характерными для фотоэффекта аномалиями выхода дают дополнительные данные о структуре ее верхних слоев. Однако, в вышеуказанной работе измерения проведены в интегральном режиме без разделения электронов по энергиям, которые регистрировались стандартными ВЭУ-6. Тем не менее, анализ результатов работы позволяет предположить, что измерение кривых выхода с высоким угловым разрешением может существенно увеличить объем информации о структурном совершенстве верхних слоев сверхрешетки (СР) и, фактически, просканировать их и особенно защитные слои, нанесенные на поверхность.

Представленные в настоящей работе на примере сверхрешетки GaAs/AlAs экспериментальные результаты, демонстрируют правомерность сделанных предположений и, таким образом, можно считать данную статью логическим развитием работы [6].

Исследования велись по двухкристальной схеме брэгговской дифракции рентгеновских лучей на автоматическом рентгеновском спектрометре [8] с использованием в качестве кристалла-монокроматора высокосовершенного Ge [100]. Для энергетического разделения электронов был использован энергоанализатор типа цилиндрического зеркала (ЦЗА) [7], обладающего высоким разрешением (~3%). Кристаллодержатель с энергоанализатором помещался в вакуумную камеру, снабженную системой бериллиевых окон толщиной 0,3 мм для прохождения рентгеновского излучения. Отраженный рентгеновский пучок регистрировался сцинтилляционным детектором.

Исследуемый образец представлял собой сверхрешетку из чередующихся слоев GaAs (толщиной ~320Å) и

AlAs (толщиной ~120Å). Сверхрешетка толщиной 4400Å и периодом 440Å была выращена на подложке GaAs методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Подложки имели ориентацию поверхности [100], с разориентацией 3° вдоль направления [110]. Сверхрешетка по технологии изготовления сверху была закрыта защитным слоем GaAs толщиной ~160Å. В процессе эксперимента анализировалось ее кристаллическое состояние и уточнялась толщина защитного слоя. Применяемый метод позволяет отсечь информацию о более глуболежащих слоях и выделить максимумы, формирующиеся в результате выхода электронов из анализируемого поверхностного слоя.

Угловая зависимость выхода электронов из исследуемого образца в интегральном режиме показана на рис. 1.

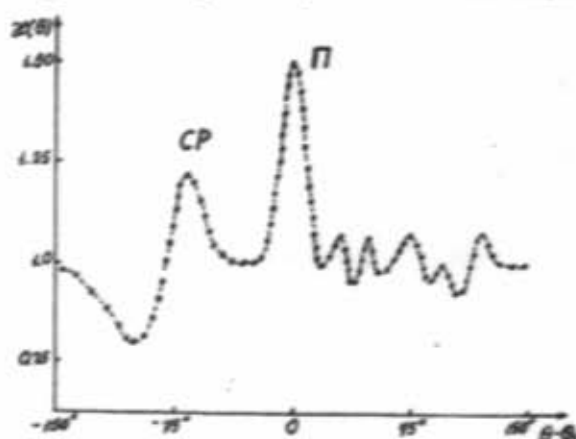


Рис. 1. Угловая зависимость выхода фотоэлектронов от сверхрешетки GaAs/AlAs в интегральном режиме измерения. СР - сверхрешетка, Π - подложка.

Следует учесть, что толщина сверхрешетки превосходит среднюю глубину выхода фотоэлектронов (~3000Å). Это обстоятельство приводит к появлению резко выделяющегося максимума от подложки. С другой стороны наблюдается структура с ярко выраженными максимумами и минимумами, похожая на осцилляции, и, по-видимому, имеющая интерференционную природу происхождения. Амплитуда осцилляций не превышает  $\sqrt{P_A(\theta)}$ , то есть выполняется условие

$$2\sqrt{\beta}R_0 e_{\gamma} E_b(\theta) E_p(\theta) < \sqrt{P_A(\theta)},$$

- где  $P_R = |R|^2$  - коэффициент отражения рентгеновских лучей,  
 $\beta = \gamma_o / |\gamma_n|$  - фактор асимметрии,  
 $R(\theta)$  - амплитуда дифракционного рассеяния,  
 $E_o(\theta), E_n(\theta)$  - амплитуды падающей и отраженной волн,  
 $e_n = \chi_{in} / \chi_{io}$ , где  
 $\chi_{in,o}$  - мнимая часть амплитуды рассеяния элементарной ячейкой кристалла (см. [2]).

Возникновение этой структуры связывается со сверхрешеткой.

По кривым выхода электронов, выходящих из глубины  $L \leq 160 \text{ \AA}$  были уточнены толщина последнего (защитного) слоя и совершенство его структуры. Энергетический спектр электронов, вылетающих из GaAs при падении рентгеновских лучей на кристалл ( $\text{CuK}_\alpha$  - излучение) представлен на рис. 2. На спектре четко выделяются максимумы от MVV, LMM Оже- и L(As), L(Ga) фотоэлектронов.



Рис. 2 Энергетический спектр электронов, выходящих из кристалла GaAs при поглощении  $\text{CuK}_\alpha$ -излучения.

MVV- Оже-электроны имеют относительно низкую энергию и представляют особый интерес, так как они выходят из малых глубин порядка нескольких нанометров. Поэтому появляется возможность использовать их для изучения состояния поверхности или отдельных адсорбированных слоев [9]. Следует учитывать, что MVV Оже-электроны возникают как в прямом процессе фотонизации, так и за счет возбуждения атомов на поверх-

ности замедленными фотоэлектронами, которые генерируются в глубине кристалла. За счет этого непрямого процесса угловая зависимость выхода MVV Оже-электронов должна отражать в той или иной степени структуру поля CPB не только вблизи поверхности, но и в глубине кристалла [10].

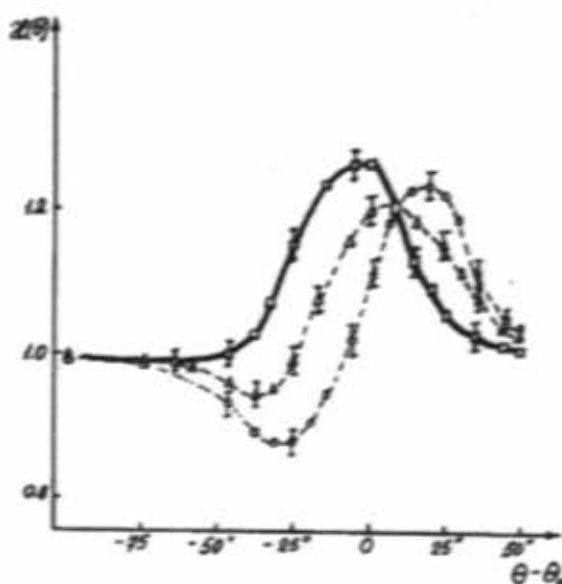


Рис. 3. Угловые зависимости выхода L-фотоэлектронов (кривые Δ, O) и LMM Оже-электронов (кривая □) от сверхрешетки GaAs/AlAs.

Для LMM Оже-электронов вклад непрямого возбуждения относительно мал и измерение соответствующей угловой зависимости дает возможность получить информацию о структурном совершенстве приповерхностного слоя толщиной порядка глубины их выхода. В данном случае использование LMM Оже-электронов представляется благоприятным (глубина выхода  $\sim 150 \text{ \AA}$ ) и несмотря на то, что максимум этих электронов располагается на "пьедестале", образованном L(As), L(Ga) -фотоэлектронами выходящими из больших глубин, можно, используя методику из работы [11], выделить соответствующий сигнал.

Угловая зависимость (см. рис.3) непосредственно LMM Оже-электронов определялась по измерениям угловых зависимостей для электронов с энергиями 1000 эВ и 1200 эВ. Форма полученной зависимости аналогична кривой рентгеновского отражения и свидетельствует о наличии аморфного GaAs толщиной  $\sim 150 \text{ \AA}$  на поверхности сверхрешетки.

[1] B.W. Batterman. J. Appl. Phys. Lett., 1962, v.1, p. 68.  
 [2] А.М. Афанасьев, П.А. Александров, Р.М. Иمامов. Рентгенодифракционная диагностика субмикронных слоев. М.Наука, 1989, с.151.  
 [3] А.М. Афанасьев, В.Г. Кон. ЖЭТФ, 1978, т. 74, с.300.  
 [4] M.V. Kruglov, V.N. Schemelev, G.G. Kareva. Phys. Status Solidi. (a), 1978, v. 46, p. 343.  
 [5] А.В. Маслов, Э.Х. Мухамеджанов, Ле Конг Куи,

Р.М. Иمامов. Кристаллография, 1987, т. 32, № 3, с. 723.  
 [6] А.М.Афанасьев, Р.М. Иمامов, А.В. Маслов, В.Г. Мокеров, Э.М. Пашаев и др. Кристаллография, 1993, т. 38, № 3, с. 58.  
 [7] П.Н. Александров, В.Е. Бреслер и др. ПТЭ, 1986, вып. 1, с. 198.  
 [8] М.В. Ковальчук, Э.К. Ковьев и др. ПТЭ, 1976, № 1, с. 194.

- [9] S.M. Durbin, L.E. Berman, B.W. Batterman. Phys. Rev. B., 1986, v. 56, p. 236. 1988, т. 301, № 5, с. 1098.  
 [11] Э.М.Пашаев, М.Н. Абдуллаев. Кристаллография, 1989, т. 34, вып. 1, с. 263.

M.I. Abdullayev, E.Ş. Ələkbərov, H.R. Nuriyev

**İFRAT GƏFƏSİN NAZİK SƏTH TƏBƏGƏLƏRİNİN QURULUŞ MÜKƏMMƏLLİYİNİN TƏDQIQINDƏ DURGUN RENTGEN DALĞALARI METODUNUN TƏTBİQİ**

Təqdim olunan məqalədə molekulyar dəstədən epitaksiya metodu ilə GaAs oturacaq monokristal üzərində alınmış GaAs/AlAs ifrat qəfəsinin nazik səth təbəqələrinin quruluş mükəmməlliyi durgun rentgen dalğaları metodu ilə tədqiq edilmişdir. Rentgen şüalarının təsiri altında kristaldan çıxan foto- və Oje-elektronlar silindrik güzgü tipli analizatorun köməyi ilə enerjiyə görə ayrılmışlar. Qeyd olunan Oje-elektronların vasitəsilə ifrat qəfəsin üst qoruyucu təbəqəsinin qalınlığı və kristallik halı müəyyən edilmişdir.

M.I. Abdullaev, E.Sh. Alekperov, I.R. Nuriyev

**INVESTIGATION ON STRUCTURE PERFECTION OF THIN SURFACE SUPERLATTICE LAYERS BY STANDING X-RAY WAVE METHOD**

The investigation of superlattice GaAs/AlAs, obtained on the perfect substrate GaAs has been considered by standing X-ray wave method.

It is shown that the standing X-ray wave method gives the information about upper layers of superlattice under investigation. The thickness and crystalline state of superlattice protective layer have been determined by means of fixed Auger-electrons.

Дата поступления: 02.05.96

Редактор: П.Б. Шафиева