

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ СЛОЕВ НИТРИДОВ ПРИ СОЗДАНИИ НЕМТ-ТРАНЗИСТОРОВ МЕТОДАМИ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ.

Г. В. ПРУЦКОВ

НИЦ «Курчатовский Институт»

Московский государственный институт электроники и математики

E-mail: prutskov@zoho.com

Нитриды III группы, отличаясь от других полупроводниковых соединений уникальным сочетанием качеств, а именно высокой теплопроводностью, большой шириной запрещенной зоны, химической и термической устойчивостью и пр., находят широкое применение в полупроводниковой промышленности. Основной областью их применения являются светодиоды синей и УФ-области спектра, а также высокочастотные транзисторы с повышенной концентрацией электронов (НЕМТ).

Согласно принципу работы НЕМТ, транзисторы подобного типа на основе системы AlGaIn/GaN, крайне чувствительны к дефектам в слое нитрида галлия. Потому крайне важным является определение структурного совершенства образцов на самых ранних этапах их изготовления.

В основу исследования положены получение и анализ двумерного распределения интенсивности рентгеновской дифракции вокруг различных узлов обратной решетки. В общем случае пленка, имеющая рассогласование параметров решетки с подложкой, характеризуется компонентами тензора дисторсии ε_{ij} , где смещения атомов слоя рассматриваются относительно узлов прямой решетки подложки и в общем виде могут иметь место как деформации, так и развороты. При этом средние значения компонент ε_{ij} определяют положение узлов обратной решетки слоя относительно одноименного узла подложки:

$$\Delta H_i = -\sum \langle \varepsilon_{ij} \rangle \cdot H_j$$

где H_i и H_j – соответствующие компоненты вектора дифракции H .

Кроме макродеформации, обусловленной однородным распределением структурных дефектов и примеси, в слое имеются микродисторсии, вызванные полями смещений вокруг структурных дефектов. Они могут быть представлены как среднеквадратичные флуктуации $\delta \varepsilon_{ij}$ компонент средней дисторсии. Микродисторсии влияют на форму узлов обратной решетки, вызывая их растяжение и уширение соответствующих дифракционных кривых.

Кроме деформации на ширину дифракционных пиков оказывает влияние размер областей когерентного рассеяния (зерен). Разделение вкладов возможно произвести исходя из того, что компоненты микродисторсии уширяют только те рефлексы, которые имеют соответствующую компоненту вектора H :

$$\partial q_i = -\sum \langle \delta \varepsilon_{ij} \rangle \cdot H_j,$$

а ограничение размера в каком-либо направлении влияет на все узлы обратной решетки в том же направлении:

$$\partial q_i = 1/\tau_i$$

В зависимости от моды, т.е. направления сканирования узла обратной решетки, связь между координатами в обратном пространстве и уширениями будет различаться. Так, для θ -сканирования уширение $\partial\omega = \partial q_{\perp} / H$. При θ - 2θ сканировании же уширение будет равно $\partial\omega = \partial q_H / (k \cdot \cos\theta_B)$, где q_H и q_{\perp} – проекции вектора обратной решетки q , параллельные и перпендикулярные вектору дифракции H [1].

Для получения компонент тензора необходимо измерить дифракционные кривые от нескольких отражений, причем целесообразно выбирать отражения так, чтобы вектор дифракции H совпадал с осями x , y или z кристалла. Так, для θ - 2θ -кривой уширения будут давать размерный эффект ($\omega_{TX(TZ)}$), мозаичный разброс (ω_{tl}) и микроразориентации дифрагирующих плоскостей вблизи дефектов в ОКР (ω_{φ}):

$$\left(\omega_{\theta-2\theta}^{B(L)}\right)^2 = \left(\omega_{TX(TZ)}^{B(L)}\right)^2 + \left(\omega_{tl}^{B(L)}\right)^2 + \left(\omega_{\varphi}^{B(L)}\right)^2$$

При θ -сканировании уширение дифракционной кривой обусловлено лишь вкладами от размерного эффекта ($\omega_{TX(TZ)}$) и микродеформациями плоскостей около дефектов в ОКР (ω_{ε}):

$$\left(\omega_{\theta}^{B(L)}\right)^2 = \left(\omega_{TZ(TX)}^{B(L)}\right)^2 + \left(\omega_{\varepsilon}^{B(L)}\right)^2$$

Во всех случаях суммирование идет по квадратичному закону, т.к. форма кривых близка к гауссовой [2].

Принимая во внимание изотропию плоскостей типа (0001), для полного описания тензора микродисторсии необходимо определить лишь 5 компонент из 9.

Измеряя образцы в геометрии Брегга ($H \parallel z$) и Лауэ ($H \perp z$), находятся компоненты тензора e_{xx} , e_{zz} , e_{xz} и e_{zx} . Компонента e_{xy} находится благодаря аппроксимации уширений косоугольных отражений вида $(10\ \square\ 1l)$, как показано в [3].

В работе был измерен образец с толщиной слоя GaN 1500 нм, выращенный на сапфировой подложке с ориентацией (0001) методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

Отражение	Сканирование	Угол Брегга, град	Экспериментальная полуширина, угл. сек.	Дисперсия, угл. сек.	Экспериментальная полуширина с учетом дисперсии, угл. сек.	Собственная полуширина, угл. сек.	Уширение, угл. сек.
0 0 0 2	θ -2 θ	17,309	67	6,7	57,6	22,8	41,0
0 0 0 2	θ	17,309	219	6,7	216,3	22,8	212,5
0 0 0 4	θ -2 θ	36,516	107	20,3	99,2	7,9	93,1
0 0 0 4	θ	36,516	196	20,3	192,0	7,9	188,9
1 0 -1 4	θ -2 θ	41,092	604	28,6	602,4	3,5	601,5
1 0 -1 5	θ -2 θ	52,605	575	56,1	571,3	6,5	570,3
1 0 -1 0	θ -2 θ	7,385	51	3,6	45,8	4,9	45,5
1 0 -1 0	θ	7,385	109	3,6	106,6	4,9	106,5
2 0 -2 0	θ -2 θ	14,896	94	6,1	91,1	2,5	91,1
2 0 -2 0	θ	14,896	104	6,1	102,4	2,5	102,4

На основе полученных уширений дифракционных кривых рассчитаны компоненты тензора микродисторсии, размеры ОКР и плотности вертикальных винтовых (ρ_{vs}) и краевых (ρ_{ve}) дислокаций, как показано в работе [2].

T_x , МКМ	0,37
T_z , МКМ	0,52
e_{xx} , 10^{-4}	10,45
e_{zz} , 10^{-4}	2,86
e_{xz} , 10^{-4}	5,05
e_{zx} , 10^{-4}	8,00
e_{xy} , 10^{-4}	49,43
ρ_{vs} , 10^8	1,56
ρ_{ve} , 10^{10}	2,62

Выводы

1. На основе данного метода было оценено качество эпитаксиальных слоев GaN: были найдены плотности основных типов дислокаций, а также компоненты тензора микродисторсии.
 2. Были оценены размеры ОКР образца.
1. Р.Н. Кютт, В.В. Ратников, Г.Н. Мосина, М.П. Щеглов «Структурное совершенство эпитаксиальных слоев GaN по данным рентгеновской дифракции», Журнал ФТТ, т. 41, №1, 1999.
 2. В.В. Ратников, Р.Н. Кютт, Т. В. Шубина «Рентгеновское измерение тензора микродисторсии и анализ на его основе дислокационной структуры толстых слоев GaN, полученных методом хлоргидридной газофазной эпитаксии», Журнал ФТТ, т. 42, №12, 2000.
 3. V. Strikant, J.S. Speck, D. R. Clarke. «Mosaic structure in epitaxial thin films having large lattice mismatch» J. Appl. Phys. 82, 9, 4286, 1997.