

## НЕСТЕХИОМЕТРИЯ СОСТАВА В ПЛЕНКАХ GaAs, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ ГАЗОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ

Ю. В. Жиллаев, Р. Н. Кютт, И. П. Никитина

Изменения электрофизических и оптических свойств GaAs и приборов на его основе частично связывают с отклонением от стехиометрии состава главным образом по мышьяку [1-3]. Однако заключение о нестехиометрии делается, как правило, на основании косвенных свидетельств, например некоторых изменений технологических параметров выращивания. При этом не проводится количественная оценка отклонения от стехиометрии в терминах «концентрация вакансий». В большинстве случаев для характеристики стехиометричности используют значения параметра элементарной ячейки, измеренные прецизионными методами. Наиболее распространенным является метод Бонда. Точность определения параметра методом Бонда  $\Delta a/a = 2 \cdot 10^{-6}$  [4]. Сопоставить относительное изменение параметра решетки с концентрацией вакансий не представляется возможным из-за отсутствия сведений об объеме, занимаемом вакансией. Кроме того, изменение параметра  $a$  нечувствительно к типу вакансии.

Поэтому более предпочтительным для измерения нестехиометрии в GaAs является метод измерения «разностных» отражений [5], который и был использован в настоящей работе. Принципиальным преимуществом метода является возможность проведения количественной оценки отклонения от стехиометрии в терминах «концентрация вакансий» определенного типа.

В основу метода положено измерение интегральной интенсивности слабых «разностных» или «квазизапрещенных» отражений типа  $h+k+l=4n+2$  в структуре типа цинковой обманки. Для стехиометрического состава GaAs структурная амплитуда таких отражений имеет вид

$$F_{hkl} = 4 \{ (f_{Ga} + f'_{Ga} + if''_{Ga}) \exp(-M_{Ga}) - (f_{As} + f'_{As} + if''_{As}) \exp(-M_{As}) \}, \quad (1)$$

где  $f_{Ga}$ ,  $f_{As}$  — атомные факторы рассеяния Ga и As,  $f'_{Ga}$ ,  $f'_{As}$ ;  $f''_{Ga}$ ,  $f''_{As}$  — поправки к атомному фактору на аномальное рассеяние,  $\exp(-M_{Ga})$ ;  $\exp(-M_{As})$  — тепловые факторы рассеяния Ga и As.

Интегральная интенсивность  $R_i$  этих отражений пропорциональна квадрату структурного фактора  $|F_{hkl}|^2$ , так как из-за малости величины  $|F_{hkl}|$  рассеяние носит кинематический характер.

При отклонениях от стехиометрии в выражение для структурной амплитуды следует ввести при атомных факторах рассеяния коэффициенты  $C_{Ga}$ ,  $C_{As}$ , отличные от единицы и имеющие смысл эффективной концентрации атомов данного типа, нормированные к идеальному кристаллу.

Анализ формулы показывает, что изменение интегральной интенсивности на 1 % соответствует  $C_{Ga} - C_{As} = 2 \cdot 10^{-4}$ , что в пересчете на концентрацию вакансий дает  $4 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. При этом вакансии галлия должны вызывать увеличение  $R_i$ , вакансии мышьяка — уменьшение  $R_i$ .

В настоящей работе изучалась степень нестехиометрии эпитаксиальных пленок GaAs, выращенных методом газотранспортных реакций на полужизолирующих подложках, ориентированных плоскостью (100) параллельно поверхности.

Для исследования были выбраны несколько серий образцов с пленками толщиной ~20 мкм. Образцы в каждой серии отличались друг от друга положением в температурной зоне выращивания по отношению к источнику. Кроме того, для контрольного эксперимента, речь о котором пойдет ниже, были приготовлены специальные образцы. Пластина GaAs марки АГЧПХ разрезалась на 4 части, одна часть покрывалась слоем SiO<sub>2</sub> толщиной 0.2 мкм, другая — слоем нитрида галлия такой же толщины. Две эти части и одна без защитного слоя подвергались высокотемпературной обработке в потоке водорода при  $t=800$  °C в течение 0.5 ч, одна часть была оставлена как исходная.

Измерения интегральной интенсивности симметричного брэгговского отражения (200) проводились на двухкристальном спектрометре с использованием Cu K<sub>α</sub>- и Mo K<sub>α</sub>-излучений.

В качестве монохроматора был выбран монокристалл чистого бездислокационного кремния с отражением (111). Для устранения ошибок, связанных с явлением многоволновой дифракции, азимутальное положение образца выбиралось в соответствии с диаграммами Реннингера [6] в области, свободной от пиков многоволнового рассеяния. Для исключения влияния разориентации отражающей плоскости (100) относительно поверхности измерения  $R_i$

проводились при двух азимутальных положениях, отличающихся на  $180^\circ$ . Скорость вращения образца вблизи брэгговского отражения (200) составляла  $1.217 \cdot 10^{-6}$  рад/с. Глубина проникновения рентгеновских лучей, рассчитанная по массовому коэффициенту поглощения, составляла 4.2 (для Mo  $K_\alpha$ ) и 7.2 мкм (для Cu  $K_\alpha$ ). Погрешность измерения  $R_i$  в наших условиях составляла 1 %.

Целью контрольного эксперимента являлась демонстрация возможностей метода «разностных» отражений. Предполагалось, что высокотемпературная обработка в условиях, описанных выше, приведет к сильной нестехиометрии по мышьяку образца без защитного слоя. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1  
Значения интегральной интенсивности  $R_i \cdot 10^5$   
в контрольных образцах GaAs (АГЧПХ)

| Тип излучения | Исходный образец | После термообработки без защитного покрытия | После термообработки под $\text{SiO}_2$ | После термообработки под GaN |
|---------------|------------------|---|---|------------------------------|
| Mo $K_\alpha$ | 0.182            | 0.141                                       | 0.159                                   | 0.182                        |

Как видно, при отжиге пластины без защитного покрытия происходит снижение интегральной интенсивности по сравнению с нетермообработанной на 23 %, что свидетельствует об образовании высокой концентрации вакансий мышьяка. Отжиг пластины с покрытием из нитрида галлия не привел к изменению интегральной интенсивности. Снижение  $R_i$  на 13 % в образце, покрытом слоем  $\text{SiO}_2$ , по сравнению с исходным связано, по-видимому, с диффузией галлия в слой  $\text{SiO}_2$  [?].

Т а б л и ц а 2  
Значения интегральной интенсивности  $R_i \cdot 10^6$   
отражения (200) в эпитаксиальных слоях

| Начало зоны | Центр зоны | Конец зоны | Тип излучения |
|-------------|------------|------------|---------------|
| 1.17        | 1.13       | —          | Cu $K_\alpha$ |
| 1.18        | 1.16       | 1.12       |               |
| 1.12        | —          | 1.10       |               |
| 0.174       | 0.170      | 0.163      | Mo $K_\alpha$ |
| 0.170       | —          | 0.164      |               |

Результаты измерений  $R_i$  в сериях эпитаксиальных слоев представлены в табл. 2.

Анализ полученных результатов показывает, что во всех сериях образцов наблюдается падение интегральной интенсивности отражения (200) вдоль температурной зоны выращивания на 2—6 %, что соответствует концентрации вакансий мышьяка к концу зоны  $8 \cdot 10^{18}$ — $4 \cdot 10^{19}$  см $^{-3}$ .

Наблюдаемое нами уменьшение  $R_i$  к концу зоны, по-видимому, объясняется уменьшением относительного давления паров мышьяка в том же направлении. Ранее в работе [8] было показано на основании данных метода ДЛТС, что к концу температурной зоны происходит увеличение концентрации центров  $E_3$ . Относительно природы этих центров, в частности, высказывается предположение, что они представляют собой комплекс вакансии мышьяка + мелкая примесь. Максимальная концентрация центров  $E_3$  оценивалась авторами  $\sim 10^{15}$  см $^{-3}$ . Такое расхождение в оценке концентрации может быть связано с тем, что образование центров  $E_3$  лимитируется концентрацией мелких примесей.

Необходимо отметить, что экспериментальные значения  $R_i$  во всех измеренных образцах превышали расчетные. Расчет проводился на основании табличных значений атомных факторов для нейтральных атомов Ga и As [9], значений дисперсионных поправок [10] и тепловых факторов [11]. Возможно, отличие экспериментальных значений  $R_i$  от расчетных связано с частичной ионизацией связи Ga—As. Смещение электронной плотности в направлении атома мышьяка должно приводить к увеличению структурной амплитуды отражения (200), как

видно из выражения (1). Количественная оценка вклада эффективного заряда в рассеивающие способности атомов мышьяка и галлия в настоящей работе не проводилась, потому что мы пока имеем возможность достоверно определять лишь относительное изменение стехиометрии состава в ряду однотипных образцов.

Таким образом, применение метода «разностных» отражений позволило оценить количественно отклонение от стехиометрии состава эпитаксиальных слоев GaAs, полученных методом газофазной эпитаксии. Показано, что концентрация вакансий мышьяка растет к концу температурной зоны выращивания и может достигать значений  $8 \cdot 10^{18}$ — $4 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>.

В заключение авторы приносят искреннюю благодарность Н. К. Полегаеву за полезные обсуждения результатов работы.

#### Список литературы

- [1] *La L., Hobgood H., Rohatgi A., Thomas R.* // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53. N 8. P. 5771—5775.
- [2] *Parsey J., Nanishi J., Lagowski J., Gatos H.* // J. Electrochem. Soc. 1982. Vol. 129. P. 388—393.
- [3] *Holmes D., Chem R., Elliot K., Kirkpatrick C.* // Appl. Phys. Lett. 1982. Vol. 40. P. 46—48.
- [4] *Nakajima M., Sato T., Jnada T., Fukuda T., Jshida T.* // Appl. Phys. Lett. 1986. Vol. 49. N 19. P. 1251—1253.
- [5] *Fujimoto J.* // Jap. J. Appl. Phys. 1984. Vol. 23. N 5. P. L287—L292.
- [6] *Cole H., Chambers F. W., Dann H. M.* // Acta Cryst. 1962. Vol. 15. P. 138—144.
- [7] *Onuma T., Hirao T., Sugawa T.* // J. Electrochem. Soc. 1982. Vol. 129. N 4. P. 837—840.
- [8] *Ботнарюк В. М., Жильев Ю. В., Кечек А. Г. и др.* // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 2. С. 181—185.
- [9] *Cromer D. T., Mann J. B.* // Acta Cryst. 1968. Vol. A 24. P. 321—324.
- [10] *Cromer D. T., Liberman D.* // J. Chem. Phys. 1970. Vol. 53. P. 1891—1898.
- [11] *Кюмм Р. Н.* // ФТТ. 1978. Т. 20. Вып. 2. С. 395—398.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
23 ноября 1989 г.

04; 05

Журнал технической физики, т. 60, в. 11, 1990

© 1990 г.

## ФОРМИРОВАНИЕ ДЛИННЫХ НЕВЕТВЯЩИХСЯ КАНАЛОВ ПРОБОЯ В ЩЕЛОЧНО-ГАЛОИДНЫХ КРИСТАЛЛАХ

А. Л. Миронов, А. И. Зубарев, В. Г. Шпак, В. В. Быков

1. В современной физике пробоя твердых диэлектриков существуют две основные причины, препятствующие прямому количественному изучению импульсного электрического пробоя: 1) ветвление каналов пробоя при импульсном электрическом разряде; 2) малое межэлектродное расстояние ( $\sim 100$  мкм), при котором возможно формирование неветвящихся каналов пробоя [1].

Известно [2], что импульсный электрический разряд в твердых диэлектриках приводит к возникновению ветвящихся каналов пробоя. В аморфных диэлектриках геометрических закономерностей ветвления не наблюдается, в кристаллических диэлектриках ветвление идет по определенным кристаллографическим направлениям. Поэтому невозможно дать количественную характеристику физических процессов, определяющих закономерности распространения отдельного канала, так как энергия импульсного электрического поля распределяется между отдельными ветвями канала неконтролируемо и измеряемые электрические, оптические и механические величины являются интегральными, т. е. относятся ко всей совокупности ветвей канала пробоя. Для физической интерпретации получаемых в эксперименте данных необходимы сведения, относящиеся к одной ветви канала или неветвящемуся каналу пробоя.

Известные методики формирования неветвящихся каналов пробоя, реализованные в экспериментах по изучению ориентационной зависимости пробоя в щелочно-галлоидных кристал-