

# Массоперенос в приповерхностных слоях GaAs под воздействием излучения миллиметровых волн малой мощности

© Т.А. Брянцева<sup>¶</sup>, Д.В. Любченко\*, В.Е. Любченко, И.А. Марков, Р.И. Марков

Фрязинский филиал института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, 141190 Фрязино, Россия

\* Aalto University, P.O. Box 3000, Espoo, Finland

(Получена 22 апреля 2013 г. Принята к печати 22 мая 2013 г.)

Проведено исследование процессов массопереноса по результатам химического анализа приповерхностных слоев арсенида галлия после облучения поверхности GaAs электромагнитными волнами малой мощности 13–25 мВт при частоте 75 ГГц. Показано, что под воздействием излучения изменяются электромеханические напряжения на поверхности GaAs и возникают процессы релаксации с участием массопереноса заряженных частиц. В результате облучения выпадают островки на основе раствора (Ga + As) или соединения GaAs и изменяется изгиб поверхности базисного GaAs. Массоперенос при этом определяется дрейфом заряженных частиц под воздействием электрического напряжения и скоростью поверхностной самодиффузии под действием механических напряжений.

## 1. Введение

Перестройка поверхности кристалла или тонкопленочной структуры может происходить как за счет стремления к понижению свободной энергии поверхности, так и под воздействием внешних корпускулярных и электромагнитных облучений, электрических, акустических, магнитных полей и пр. [1–5]. Эти воздействия могут носить нетепловой характер и проявляться при очень малых уровнях поглощенной мощности. Они приводят к модуляции потенциального барьера и, как следствие, к разориентации решеток пленки и подложки. Примером может служить образование сверхструктуры с периодом, равным периоду распространяющейся поверхностной упругой волны. Поверхностный потенциал при этом модулируется вследствие пьезоэлектрического эффекта. Излучение миллиметровых (ММ) волн ослабляет межмолекулярные связи в твердых телах, влияя на электронные облака, и приводит к изменению агрегатного состояния [1]. В случае сильных молекулярных связей в приповерхностном слое результатом облучения, как известно, являются эффекты скатывания материала, в то время как в случае слабых молекулярных связей наблюдается более равномерное перераспределение материала по поверхности.

Ранее было показано, что воздействие излучений слабой мощности приводит главным образом к релаксации напряжений в приповерхностных слоях GaAs [4,6]. Релаксационные процессы в рассматриваемых условиях воздействия ММ волн с малой интенсивностью могут быть описаны на основании теории идеального газа или распада твердого раствора.

В данной работе проводилось исследование массопереноса атомов галлия и мышьяка в приповерхностных слоях GaAs под воздействием электромагнитных волн ММ диапазона при заданных значениях постоянной мощности и постоянной частоте в зависимости от времени излучения. Состав приповерхностного слоя

анализировался с помощью метода тонкого химического анализа.

## 2. Методика и техника эксперимента

Для исследований использовались пластины эпитаксиальной структуры арсенида галлия ( $n^+ - n - n^{++}$ ). Толщина слоя  $n^+$ -GaAs с концентрацией электронов  $n \approx 1.05 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  составляла 0,26 мкм, толщина подложки  $n^{++}$ -GaAs с концентрацией  $10^{18} \text{ см}^{-3} \sim 300$  мкм. Образцы одинаковых размеров ( $5 \times 5$  мм) откальвались от одной и той же пластинки GaAs.

Внешняя сторона  $n^+$ -слоя облучалась ММ волнами с помощью рупора (ТЕМ волна) при фиксированной частоте  $f = 75$  ГГц и мощности излучения  $P_{\text{gen}} = 13, 15, 25$  мВт. Облучение образцов проводилось в течение 0,1–300 с. Образцы размещались на расстоянии 100 мм от рупора, что разрешало рассматривать поверхность образца как дальнюю зону ММ волн. Эффективная площадь облучения рупором составляла  $S = 7 \text{ см}^2$ , плотность мощности излучения, поступающего на поверхность GaAs, соответствовала  $(10^{-1} P_{\text{gen}})/(1 \text{ см}^2)$ . В этом случае часть падающих ММ волн отражается от поверхности из-за большой концентрации электронов в образцах и поверхностной проводимости. Коэффициент отражения составляет 0,55%. Толщина скин-слоя для верхнего слоя GaAs с концентрацией  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  соответствует 1,3–1,5 мм и для подложки с  $n \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$  — 0,4–0,5 мм. Поскольку мощность проходящего через образец излучения не превышала  $1,3 \text{ мВт/см}^2$ , то для таких мощностей даже в случае полного поглощения волн образцом изменение температуры составляло не более чем  $0,015^\circ\text{C}$ .

Определение изменения состава поверхности GaAs производилось с помощью метода прецизионного химического анализа [7]. Травление испытуемой поверхности GaAs проводилось в концентрированном растворе HCl. При этом, как известно, стехиометрическое соединение GaAs практически не растворяется, тогда как

<sup>¶</sup> E-mail: tatiana@ms.ire.rssi.ru

**Таблица 1.** Толщина нарушенных слоев GaAs в зависимости от времени облучения

Атом	$P_{gen}$ , мВт	Зависимость $h$ от $t$	$t_0(c)$	Толщина $h_0$ , Å
Ga	13	$t^{1.8} \ln(h_{Ga}) = -6.311 + 1.359t^2$	2.1551	0.2051
	15	$\ln(h_{Ga}t) = 1.7556 + 1.114 \ln(t)$	0.2070	27.93
	25	$\ln(h_{Ga}t^2) = 3.05 + 2.171 \ln(t)$	0.2455	350.4628
As	13	$t^{2.2} \ln(h_{As}) = -182.563 + 5.734t^2$	5.6422	0.0173
	15	$\ln(h_{As}t) = 1.345 + 1.074 \ln(t)$	0.2858	13.4318
	25	$\ln(h_{As}t^2) = 2.338 + 2.024 \ln(t)$	0.3150	104.4121

Примечание.  $t$  — длительность облучения,  $t_0$  — предельное время, за которое достигается предельная толщина  $h_0$ .

„свободные“ атомы галлия и мышьяка в виде соединения с кислородом или водой, не входящие в решетку арсенида галлия, растворяются легко. Проводилось исследование только одной испытуемой стороны поверхности. Уходящие с поверхности элементы анализировались в растворенном виде.

### 3. Экспериментальные данные

Свободные атомы Ga и As обнаруживаются на поверхности GaAs еще до облучения на стадии подго-

товки образцов в соотношении (1 : 1) — нулевая точка на рис. 1. Как можно видеть, массы Ga и As, а также их соотношение  $M_{Ga}/M_{As}$  (далее — Ga/As) изменяются со временем облучения  $t$  и зависят от мощности ММ волн  $P$ . Изменение содержание галлия находится в противофазе по отношению к содержанию мышьяка в слое. Тем не менее количество Ga в целом заметно увеличивается по отношению к начальному содержанию, тогда как масса мышьяка уменьшается.

### 4. Анализ и аппроксимация полученных результатов

#### 4.1. Деформации, вводимые облучением ММ волнами

Общий вид зависимостей отношения масс Ga/As от величины мощности излучения  $P_{gen}$  и времени  $t$  представлен на рис. 1,  $b$  и может быть описан следующим образом.

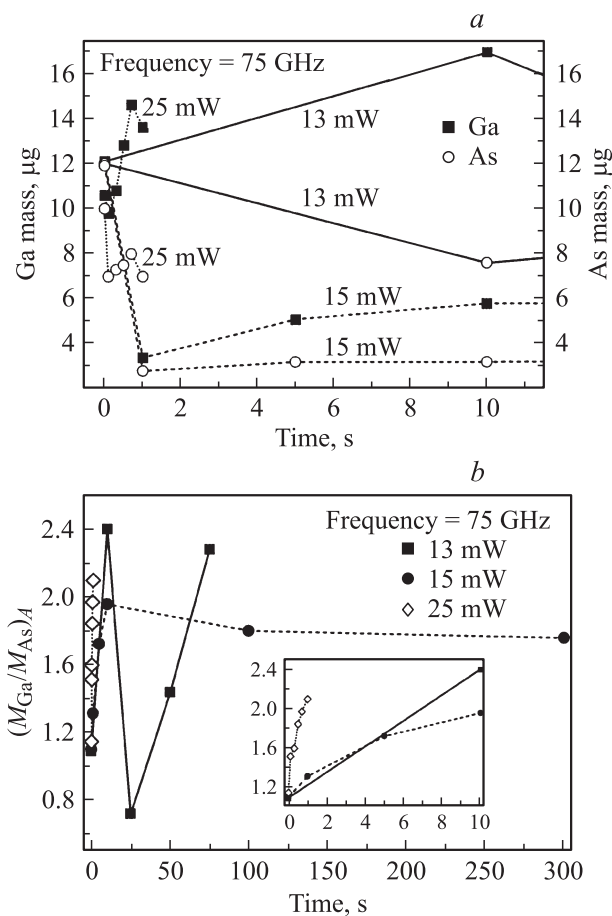
При  $P_{gen} = 13$  мВт отношения Ga/As изменяются периодически с большим периодом по времени. При этом размах колебаний величины Ga/As уменьшается, т. е. наблюдаются процессы релаксации. При  $P_{gen} = 15.25$  мВт величина Ga/As на первой стадии облучения увеличивается по закону, близкому к логарифмическому. Далее отношение Ga/As снижается и приближается к постоянному значению — к участку текучести [8]. Наблюдаемые временные зависимости позволяют сделать следующие заключения о характере деформаций, вводимых облучением ММ волнами:

1) при  $P_{gen} = 13$  мВт обнаруживается электролитическая реакция. Поскольку ионы галлия являются потенциалообразующими, изменение отношения Ga/As приводит к изменению знака заряда, а следовательно, и электрического потенциала. В результате возникают эффекты сжатия–расширения, неупругая деформация [9];

2) при  $P_{gen} = 15$  мВт, скорее всего, осуществляется пластическая деформация за счет дислокационной ползучести [8] и обнаруживается зуб текучести;

3) при  $P_{gen} = 25$  мВт пластическая деформация сопровождается диффузионной ползучестью.

Таким образом, изменения содержания Ga и As под воздействием облучения при  $P_{gen} = 13$  мВт связаны с процессами неупругой деформации, а при

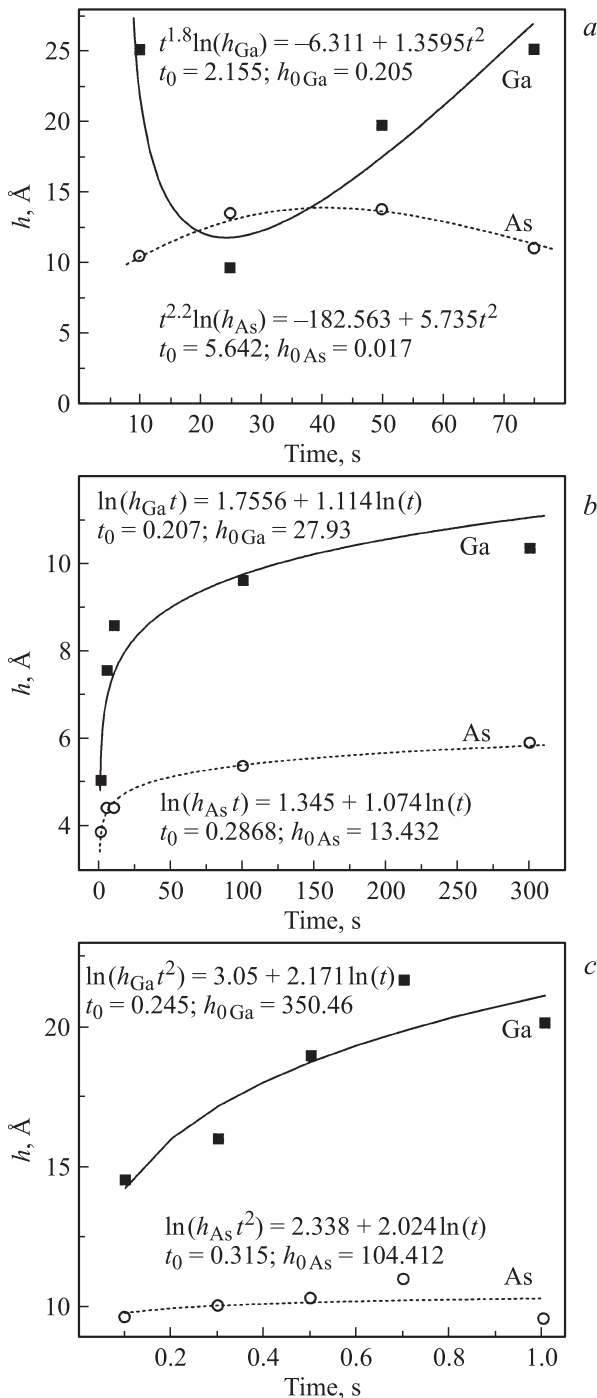


**Рис. 1.** Зависимости масс Ga и As (a) и их отношения (b) от времени облучения  $t$  и мощности миллиметровых волн  $P$ .

$P_{gen} = 15, 25$  мВт — с эффектами пластической деформации приповерхностных слоев.

### 4.2. Толщина нарушенных слоев при облучении GaAs

Из данных по содержанию Ga и As можно было определить эффективную толщину  $h$  нарушенных слоев GaAs (табл. 1).



**Рис. 2.** Зависимости толщины нарушенного под воздействием излучения слоя от длительности облучения и мощности миллиметровых волн; *a, b, c* — разные временные отрезки.

Поскольку содержание мышьяка отличается от содержания галлия и атомный вес As приблизительно равен атомному весу Ga, толщина нарушенного слоя  $h$ , образованного под воздействием излучения, определялась отдельно и для галлия, и для мышьяка по формуле  $h_{Ga} = 2M_{Ga}/(\rho S)$ , где  $M_{Ga}$  — масса галлия,  $\rho$  — удельный вес арсенида галлия или  $h_{As} = 2M_{As}/(\rho S)$ ,  $M_{As}$  — масса мышьяка. Как оказалось, величина  $h$  зависит от мощности ММ волн и длительности облучения поверхности (рис. 2).

Из аппроксимации временных зависимостей  $h$  следует, что они состоят из двух изменяющихся параметров: первый характеризует изменение  $h$ , второй — изменение времени  $t$  (табл. 2). Учитывая, что величина  $h$  пропорциональна перемещенной массе  $M$ , зависимость величины  $\ln(t/t_0)$  следует рассматривать как время  $t$ , пропорциональное скорости потока энергии, где величина  $t_0$  соответствует вероятности элементарного скачка и выражается как  $t_0 \approx \exp(U/kT)$ , где  $U$  — энергия элементарного скачка или элементарного акта диффузии [10].

Как можно видеть из рис. 2, вследствие малости значений  $h$  в зависимости от мощности излучений выполняются такие соотношения, как:

при  $P_{gen} = 13$  мВт,  $\ln(h) : kt^2$ ,  
 для значений  $P_{gen} = 15.25$  мВт  $\ln(h) : k_{1,2} \ln t$ .

### 4.3. Предельные толщины нарушенных слоев и времена их достижения в зависимости от мощности излучения P

**Толщина  $h_0$  нарушенных слоев GaAs.** Из графиков, представленных на рис. 2, можно было найти предельные значения толщин нарушенных слоев GaAs  $h_0$ , которые могут быть достигнуты в течение всего времени облучения  $t_0$  при заданных мощностях  $P_{gen}$  и частоте, равной 75 ГГц ММ волн. Изменение величины  $h_0$  в зависимости от мощности ММ волн описывается выражениями, приведенными в табл. 2. Энергия активации изменения  $h_{0Ga}$  была найдена равной половине энергии смещения (Ga + As), а для As соответствовала половине энергии образования соединения GaAs. Энергия активации для переноса Ga и As в целом найдена равной 20.11 ккал/моль (0.871 эВ) и, как оказалось, соответствует высоте барьера на границе перехода металл-полупроводник Me-GaAs: 0.7–0.9 эВ.

В табл. 2 приведена аппроксимация зависимости от мощности  $P$  отклонения отношения предельных толщин  $h_{0Ga}/h_{0As}$  от единицы. Из этого выражения следует, что когда величина  $h_{0As}/h_{0Ga} \rightarrow 1$ , энергия активации изменения соотношения  $\Delta h_0/h_{0Ga}$  становится равной 0.066 эВ.

**Время достижения предельной толщины  $h_0$ .** Выражения, описывающие зависимости времени  $t_0$  — времени достижения предельной толщины нарушенного слоя GaAs от мощности  $P$ , также находились отдельно

**Таблица 2.** Зависимость предельной толщины нарушенного слоя на (100)GaAs от  $P$

Сорт атомов	Зависимость $h_0(P)$	Энергия активации, ккал/моль (эВ)
Ga	$h_{0Ga}^{0.7} = -64.84 + 5.01P$	11.093 (0.48)
As	$h_{0As}^{0.9} = -71.54 + 5.48P$	9.017(0.39)
$\frac{h_{0Ga} - h_{0As}}{h_{0Ga}}$	$P^4 \ln \left( \sqrt{\frac{\Delta h_0}{h_{0Ga}}} \right) = 263775.23 - 103427.76 \ln(P)$	

**Таблица 3.** Энергия вероятности элементарного акта диффузии (атомного скачка)

Сорт атомов	Выражение для элементарного скачка атомов	Энергия активации в ккал/моль (эВ)
Ga	$\ln(t'_0/t_0) = (\ln(t'_0)/t'_0) ((Pt_0)/P_0)$	52.807(2.28)
As		29.339(1.271)

**Таблица 4.** Зависимость радиуса кривизны поверхности GaAs от времени облучения

Сорт атомов	Выражение для радиуса кривизны (100)GaAs	Энергия активации изменения радиуса кривизны, ккал/моль (эВ)
Ga	$\ln(\ln(t_0)/\ln(t'_0)) \approx 0.0567(P/t_{0Ga})$	10.791(0.46749)
As	$\ln(\ln(t_0)/\ln(t'_0)) \approx 0.168(P/t_{0As})$	3.571(0.1547)

для Ga и As. Более близко эти зависимости описываются выражениями

$$\ln(1/(10t_{0Ga}^{1.975})) = 0.395 - 0.22(P/t_{0Ga}),$$

$$\ln(1/(10t_{0As}^{2.22})) = 0.267 - 0.045(P/t_{0As}).$$

Отсюда можно определить  $t_{0As} = 0.3998$  с для As и  $t_{0Ga} = 0.3802$  с для Ga.

В случае зависимости предельного времени  $t_0$  от мощности электромагнитной волны при  $P \rightarrow 0$ ,  $\ln(t_0) = U/RT$ , где  $R$  — газовая постоянная,  $T$  — температура,  $U$  — энергия атомных перескоков в начальном состоянии:  $U_{Ga} = 0.0657$  эВ и  $U_{As} = 0.0973$  эВ.

*Вероятность элементарного акта диффузии (скачка) атомов.* Определение времени  $t_0$ , соответствующего времени достижения предельной толщины  $h_0$  нарушенного слоя GaAs, позволяет определить энергию активации атомного скачка, при этом вероятность элементарного акта диффузии коррелирует со временем как

$$\ln(t'_0/t_0) = (\ln(t'_0)/t'_0) ((Pt_0)/P_0).$$

Это выражение подобно выражению, описывающему вязкость, и при  $t_0 = 0.39$  с энергия активации равна 72 ккал/моль (3.11 эВ), что совпадает с энергией плавления Ga [11].

Энергия вероятности прыжка атомов Ga  $t'_0 \approx \exp(-u/kT)$  найдена равной 2.28 эВ и соответствует  $\Delta H_{As}/4.47$ , где  $\Delta H_{As} = 10.2$  эВ — энергия активации самодиффузии атомов As [12].

Энергия вероятности атомного скачка As равна 1.27 эВ и соответствует  $\Delta H_{Ga}/4.4$ , где  $\Delta H_{Ga} = 5.6$  эВ —

энергия активации самодиффузии атомов галлия (табл. 3).

*Изменение радиуса кривизны поверхности.* При росте зародышей новой фазы, как известно, происходит изменение радиуса кривизны поверхности  $R$  [1]. Из рассмотрения рис. 2 можно сделать вывод, что в случае облучения поверхности ММ волнами выполняется соотношение

$$\frac{h}{h_0} = \frac{t_0}{t} \exp \frac{\ln(ht_0) \ln t}{\ln t_0},$$

при этом

$$\ln \frac{\ln t_0}{\ln t'_0} \approx \frac{t'_0}{P_0} \frac{P}{t_0},$$

что тождественно отношению объемов, поскольку площадь одна и та же, а  $t$  определяет количество свободных атомов  $M/M_0 = \exp(-kt)$ . Имея в виду, что отношение  $t/t_0$  определяет изменение скорости движения частиц в единице объема, можно заключить, что изменение этой величины означает изменение радиуса кривизны объема.

Энергия активации изменения кривизны поверхности GaAs за счет массопереноса Ga равна  $\varphi_{Ga} = 0.467$  эВ — половина энергии смешения As + Ga [11]. Энергия активации изменения кривизны поверхности за счет переноса As составляет величину  $\varphi_{As} = 0.1547$  эВ (табл. 4).

Таким образом, изменение кривизны приповерхностного слоя GaAs, скорее всего, связано со скоростью миграции галлия. Это объясняется тем известным фактом, что галлий уже при комнатной температуре становится жидким, и силы сцепления в приповерхностных слоях будут определяться количеством галлия в слое.

Таблица 5. Параметры атомной диффузии на поверхности GaAs под воздействием облучения

Сорт атомов	$D_0$ , см <sup>2</sup> /с	Выражение для коэффициента диффузии	$Q$ , ккал/моль (эВ)
Ga	$\frac{1}{\sqrt{8} \cdot 10^4}$	$D_{Ga} = \frac{\exp(-Q/kT)}{\sqrt{2D_{0As}}}$	1) 11.26(0.48) 2) 9.40(0.407)
As	$\frac{1}{14.4 \cdot 10^7}$	$D_{As} = \frac{\exp(-Q/kT)}{14.4D_{0Ga}}$	1) 3.35(0.145) 2) 1.67(0.072)

#### 4.4. Определение коэффициента диффузии

Из выражения зависимости толщины  $h$  от времени скорость диффузии можно определить как

$$U = (2.7h_0)^2 / 1.7t_0,$$

а коэффициент диффузии

$$D = h_0^2 / (2.7 \cdot 1.7t_0).$$

Выражение для коэффициента диффузии как функции  $P/t_0$  соответствует:

$$\ln(D_{Ga}) = -5.64347 + 0.36279(P/t_{0Ga})^{5/6},$$

$$\ln(D_{As}) = -18.78375 + 6.75755(P/t_{0As})^{1/3}.$$

*Диффузия атомов Ga.* Из выражения для диффузии можно заключить, что для атомов Ga предэкспоненциальный фактор  $A_{Ga} = \sqrt{(2D_{0As})^{-1}}$ , где  $D_{0As} = 4 \cdot 10^4$  см<sup>2</sup>/с — значение коэффициента объемной самодиффузии для атомов As. Массоперенос Ga осуществляется посредством диффузии атомов мышьяка, при этом  $A_{Ga} = 3.5 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с. Энергия активации изменения коэффициента диффузии, судя по оценкам, составляет:

1) 11.260 ккал/моль (0.48 эВ) при  $P/t \rightarrow 0$ , что близко к величине энергии изгиба поверхности по Ga или к величине энергии смещения Ga + As.

2) 9.4 ккал/моль (0.407 эВ) при  $\ln(D_{Ga}) \rightarrow 0$  и близко к величине энергии образования GaAs.

Можно сделать вывод, что массоперенос Ga является результатом диффузии при пластической деформации поверхности GaAs.

*Диффузия атомов As.* Коэффициент диффузии мышьяка определяется в этом случае коэффициентом диффузии Ga. Предэкспоненциальный фактор  $A_{As} = (kD_{0Ga})^{-1}$ , где  $D_{0Ga} = 1 \cdot 10^7$  см<sup>2</sup>/с — объемный коэффициент самодиффузии Ga и коэффициент  $k = 14.4$ . Энергия активации перемещения атомов составляет:

1) 3.3484 ккал/моль (0.145 эВ) при  $P/t_{0Ga} \rightarrow 0$ , что близко к энергии изменения радиуса кривизны поверхности по As;

2) 1.667 ккал/моль (0.072 эВ) при  $\ln(D_{Ga}) \rightarrow 0$ . Следует заметить, что 0.072 эВ — энергия микроволновых фононов в GaAs  $n$ -типа [13].

Оба эти случая связаны, с одной стороны, с излучением электронов или с изменением зарядового состава на поверхности при изменении кривизны поверхности, когда колебания решетки связаны с колебаниями заряженных частиц. С другой стороны, являются результатом увлечения электронов вследствие микроволновых колебаний.

*Перемещение заряженных частиц.* Как было показано ранее, при  $P \rightarrow 0$  или  $\Delta h \rightarrow 0$  энергия атомных перескоков в начальном состоянии  $U_{Ga} = 0.0657$  эВ, что, как оказалось, составляет 1/91 часть энергии ионизации для Ga  $U_{iGa} = 5.999$  эВ. Для As —  $U_{As} = 0.0973$  эВ и составляет 1/100 часть от  $U_{iAs} = 9.789$  эВ [12]. Таким образом, в условиях отсутствия облучения за счет выделения—поглощения энергии ионизации ионов скачок атомов может происходить на каждое сотое колебание решетки [14]. При этом

$$\ln(U_{iGa}/U_{Ga}) = 4.51,$$

тогда как

$$\ln(U_{iAs}/U_{As}) = 4.66.$$

В то же время отношение энергии самодиффузии мышьяка к энергии элементарного скачка атомов Ga ( $Q_{Ga}$ ):  $\Delta H_{As}/Q_{Ga} = \ln(U_{iAs}/U_{As})$ , а для атомов As:  $\Delta H_{Ga}/Q_{As} = \ln(U_{iGa}/U_{Ga})$ . Отношение  $(\Delta H_{As}Q_{As})/(\Delta H_{Ga}Q_{Ga})$  близко к единице. Наблюдаемые соотношения между энергиями можно объяснить тем фактом, что перемещение отрицательно заряженных ионов мышьяка осуществляется одновременно с отрицательно заряженными вакансиями галлия и наоборот — положительно заряженные ионы галлия перемещаются вместе с положительно заряженными вакансиями мышьяка.

*Ионы Ga<sup>+</sup>* двигаются одновременно с вакансиями мышьяка  $As_v^+$  в связке с отрицательно заряженными частицами — электронами. Вид зависимости  $A_{Ga} \approx \sqrt{(2D_{0As})^{-1}}$  указывает на тот факт, что под воздействием электрического поля совместное движение их становится упорядоченным. В этом случае, как известно, осуществляется движение, когда ионы медленно перемещаются (дрейфуют) со скоростью, пропорциональной напряжению поля. Подвижность иона для данного способа массопереноса определяется как  $K \approx l/mv$ , где  $m$  — масса иона,  $v$  — скорость теплового движения

иона, скорость свободного пробега  $\tau \approx l/v$ . Длина свободного пробега иона (вакансии мышьяка)  $l \approx \sqrt{D_{0As}\tau}$  и  $D \approx v\sqrt{D_{0As}\tau}$ . Отсюда следует вывод, что скорость массопереноса галлия определяется дрейфом в электрическом поле вакансий мышьяка. Можно предположить, что вакансии мышьяка подходят к поверхности вместе с ионами галлия и заполняются ионами As из материала приповерхностного слоя, и, как результат, приповерхностный слой обедняется галлием. К тому же в случае перемещения ионов  $Ga^+$  поверхность GaAs обогащается электронами.

Ионы  $As^-$  движутся совместно с вакансиями  $Ga_v^-$  в связке с положительно заряженными частицами — дырками. Оценка коэффициента диффузии в этом случае дает соотношение  $A_{As} = (kD_{0Ga})^{-1}$ . Выражение для  $A_{As}$  соответствует уравнениям, описывающим процессы самодиффузии, что объясняется следующим образом. Длина свободного пробега  $l$  ионов (среднее расстояние между двумя столкновениями) имеет порядок величины  $l \approx (n\sigma)^{-1}$ , где  $n\sigma$  — число молекул в объеме,  $\sigma = 4\pi r_0^2$ . Коэффициент диффузии  $D \approx v/n\sigma$ ,  $v$  — средняя тепловая скорость молекул,  $n$  — число молекул в единице объема. Это выражение соответствует уравнениям, описывающим процессы самодиффузии. В данном случае  $r_0 = \sqrt{Dt}$ , где  $t$  — время выравнивания концентраций.

Таким образом, скорость процесса массопереноса мышьяка определяется движением (самодиффузией) вакансий галлия. В этом случае уже вакансии галлия заполняются ионами галлия из материала приповерхностного слоя. Кроме того, поверхность обогащается дырками, т.е. происходит смена знака поверхностного заряда. Изменяется и величина, и знак деформации поверхности. Если в случае массопереноса Ga она растянута, то при массопереносе As — сжимается [9]. Вследствие чего выделяется (поглощается) энергия ионизации Ga и As. Это и определяет механизм процессов массопереноса, в частности, самодиффузия элементов осуществляется под воздействием изменения температуры или давления.

Перечисленные выше эффекты могут вызывать возникновение в приповерхностных слоях поверхностной акустической волны, при этом возникают регулярные области сжатия и расширения, периодически распределенные в пространстве.

## 5. Обсуждение результатов

Обнаружение масс свободных атомов Ga и As с помощью химического анализа служит дополнительным доказательством существования тонкого слоя природного оксида на поверхности базисного GaAs кристалла еще до облучения ММ волнами [7]. Изначально наличие слоя оксида приводит к возмущениям (напряжениям) в приповерхностном слое GaAs. ЭМ волны способны влиять на ослабление межмолекулярных связей и на совместное движение заряженных частиц, в частности, электронов и дырок, а также свободных ионов Ga и As

или их вакансий [4,5], а также на реакции образования новых видов дефектов, такие как:  $V_{Ga} \Rightarrow As_{Ga} + V_{As}$  и др.

Под воздействием электромагнитного поля организуется их направленное движение (тепловая ориентационная поляризация [6]). Наиболее вероятно движение заряженных частиц, времена жизни которых находятся в соответствии с частотой ММ волн — резонансный эффект [16]. Двигающиеся частицы обмениваются энергией с приповерхностным слоем арсенида галлия. В этом случае движение является наиболее успешным, когда их скорость совпадает с частотой колебаний подложки при соответствующей температуре. Результатом является периодическое распределение заряда (и поля) в приповерхностных слоях.

Формирование периодического заряда служит причиной зарождения и роста зерен GaAs в теле оксида в выделенных местах на поверхности GaAs. Эти преимущественные места, исходя из теории роста, являются местами пучности для стоячей волны, формирующейся на поверхности GaAs, а размер соединительных пленок между зернами соответствует ее длине. Выпадение островков приводит к возникновению регулярных напряжений в приповерхностном слое, которое максимально в местах касания и передается по кристаллической решетке базисного GaAs путем возникновения бегущей акустической волны со скоростью, характерной для данного кристалла [1].

Рассеяние акустической волны на электронах проводимости совместно с появлением мелкодисперсной фазы приводит, в свою очередь, к изменению степени деформации приповерхностного слоя, избыточная энергия которой расходуется на изменение величины изгиба поверхности. Результатом является изменение поверхностного потенциала, зарядового состава поверхности, и как следствие, изменяется частота стоячей волны в приповерхностном слое. При этом меняется и степень дисперсности — число выпавших островков на единицу поверхности.

С увеличением времени облучения при постоянной частоте и мощности ММ волн и возникновении бегущей акустической волны на поверхности островков GaAs накапливается заряд, наибольший в точках контактов с поверхностью полупроводника. По мере накопления заряда на вершинах островков возникают электрические напряжения, токи утечки или пробойные явления. Величина накопленного заряда определяется мощностью ММ волн и временем облучения. Эти эффекты сопровождаются принудительным растеканием выпавших островков. Текучесть — величина, обратная вязкости, при этом зависит от размера, состава островков и расстояния между ними. Таким образом, под действием электрического напряжения в теле зерна и по границам зерен со временем облучения на поверхности GaAs осуществляются одновременно два процесса: дрейф ионов галлия, определяемый скоростью положительно заряженных вакансий мышьяка в поле электрических напряжений, и диффузия ионов мышьяка, определяемая

самодиффузией вакансий галлия в поле механических напряжений. Далее вакансии заполняются ионами из материала приповерхностного слоя с выделением (поглощением) энергии ионизации. Как результат, возникают процессы припекания островков к поверхности GaAs и релаксации поверхностных напряжений. Мощность и время облучения электромагнитных волн определяют физико-химические свойства самих островков GaAs, их ориентацию и степень покрытия поверхности (число островков на поверхности), а также характеристики материала в соединительных пленках (в межзеренных границах).

## 6. Заключение

Облучение электромагнитными волнами ММ диапазона малой мощности поверхности GaAs вызывает процессы релаксации напряжений, введенных наличием слоя оксида на поверхности GaAs еще до облучения. Процессы релаксации сопровождаются массопереносом Ga или As, включая образования островков GaAs или смешения атомов Ga и As на границах зерен. Связи между молекулами, а также деформационные сдвиги в слоях при этом контролируются возникающими механическими и электрическими напряжениями. Выпадение преципитатов GaAs в выделенных местах на поверхности приводит к изменению изгиба поверхности и к возникновению бегущих акустических волн. Вследствие рассеяния этих волн на островках и электронах проводимости меняется эффективная толщина нарушенного слоя. Скорость массопереноса ионов  $Ga^+$  в теле зерна и в прослойках определяется подвижностью вакансий  $As^-$  под действием электрических напряжений, тогда как массоперенос ионов  $As^-$  определяется скоростью поверхностной самодиффузии вакансий  $Ga^+$  под действием механических напряжений.

## Список литературы

- [1] С.О. Гладков. *Физика композитов. Термодинамические и диссипативные свойства* (М., Наука, 1999).
- [2] В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. *Физика полупроводников* (М., Наука, 1977).
- [3] В.М. Фридкин. *Современная кристаллография* (М., Наука, 1979) т. 2.
- [4] G.A. Baraff, M. Schlater. *Phys. Rev. Lett.*, **55** (21), 2340 (1985).
- [5] H.J. von Bardeleben, J.C. Bourgoin, A. Miret. *Phys. Rev. B*, **34** (2), 1360 (1986).
- [6] D.V. Lioubtchenko, T.A. Briantseva, Z.M. Lebedeva, I.A. Markov, A.V. Raisanen. *Defect and Diffusion Forum*, **194–199**, 745 (2001).
- [7] Т.А. Брянцева, М.А. Бобылев, З.М. Лебедева, Д.В. Любченко. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, **78** (4), 42 (2012).
- [8] Л.А. Шувалов, А.А. Урусовская, И.С. Желудев. *Современная кристаллография* (М., Наука, 1981) т. 4.
- [9] Ю.Г. Фролов. *Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы* (М., Химия, 1982).
- [10] Ф.Ф. Волькенштейн. *Электронные процессы на поверхности полупроводников при хемосорбции* (М., Наука, 1987).
- [11] С.П. Яценко. *Галлий. Взаимодействие с металлами* (М., Наука, 1974).
- [12] *Физические величины. Справочник* (М., Энергоатомиздат, 1991).
- [13] *Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками*, под ред. Дж.М. Поуга, Г. Фоти, Д.К. Джекобсона (М., Машиностроение, 1987).
- [14] Р. Кристи, А. Питти. *Строение вещества: введение в современную физику* (М., Наука, 1969).
- [15] D.V. Lioubtchenko, T.A. Briantseva, Z.M. Lebedeva, T.J. Bullough. *Def. Dif. Forum*, **316–317**, 89 (2011).
- [16] Я.И. Френкель. *Введение в теорию металлов*, под ред. Вонсовского (Л., Наука, 1972).

Редактор Т.А. Полянская

## Masstransport at surface GaAs layers under electromagnetic small power waves

T.A. Bryantseva, D.V. Lybchenko\*, V.E. Lybchenko, I.A. Markov, R.I. Markov

Institute for radiotechnic and elektronik,  
Russian Academy of Sciences,  
141190 Fryazino, Russia  
\* Aalto University,  
P.O. Box 3000, Espoo, Finland

**Abstract** The gallium arsenide surface layers been after electromagnetic waves irradiation with low power 13–25 mW at the frequency 75 GHz were investigated with thin chemical analysis. It is shown that the variation of electromechanical stresses at the GaAs surface under influence of the irradiation, and the relaxation processes are due to mass transfer with charged particles participation. As results the islands based on (Ga + As) solution or GaAs compounds are precipitated, and the GaAs surface curve changing. In this case mass transfer determined by charged particles mobility arise under the voltage and by the rate of the surface self-diffusion guided by mechanical stresses influences.