

УДК 621.382

ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ GaAs ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Т. А. Брянцева¹, Д. В. Любченко², И. А. Марков¹, Ю. А. Тен¹

¹ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141120, Московская область, г. Фрязино, пл. академика Введенского, д.1

² Center for Terahertz Research and Applications (CENTERA), Institute for High Pressure Physics, PAS, 29/37 Sokolowska Str, 01-142 Warsaw, Poland

Поступила в редакцию 7 июня 2019 г.

Аннотация. Исследованы процессы преобразования приповерхностных слоев GaAs под воздействием излучения электромагнитных волн миллиметрового диапазона. Обнаружено, что в результате воздействия электромагнитных волн слабой мощности изменяется количественное соотношение между Ga и As на поверхности GaAs. Из характера изменения содержания Ga и As в зависимости от мощности и длительности облучения и величин энергий активации массопереноса Ga и As делается заключение о природе реакций трансформации. Показано, что физико-химические превращения в приповерхностных слоях могут происходить за счет эффектов деформации с участием диффузии атомов и/или дислокационной ползучести помимо явлений релаксации, обусловленной электролитическими эффектами или структурной поляризации. Изменения реологических свойств поверхности при этом приводят к возникновению собственных электромагнитных или акустических колебаний в приповерхностных слоях.

Ключевые слова: поверхность, СВЧ облучение, арсенид галлия, фотометрический анализ, акустические колебания, физико-химические превращения, полупроводниковые структуры.

Abstract. The transformations of GaAs surface under influence of radiation of millimeter-wave electromagnetic waves with weak power were investigated. This investigation bases on varies of Ga and As masses at the near-surface layers of GaAs,

depended on the power and duration of irradiation. The determination of elements Ga and As at GaAs surface under irradiation was fixed by fine chemical analysis using the method of photometric analyzes. The investigation samples were epitaxial structure of GaAs ($n^+ - n - n^{++}$). It includes the surface etching in a concentrated HCl solution. That permits to only “free” Ga and As atoms are removed in the solution HCl without affecting the main crystal (selective etching method). “Free” Ga and As – the atoms, which are not related to the crystal lattice of GaAs, or enters into a chemical bond with O, or OH. This method makes be possible to determining the quantitative of “free” Ga and As atoms in the surface layer of GaAs, both before and after irradiation, with an accuracy of up to 5%. The value of activation energy of mass (Ga and As) changing points at the nature of the surface transforming. It is shown, that during irradiation of the GaAs surface relaxation processes are observed. The interior energy in the surface layers and the surface electrical potential connects with the elastic or plastic deformation. At this, the deformation is accompanied by charged particles migration, including ions Ga^+ and As^- . They migration is due to drift or diffusion way. As occurred, the effect of relaxation is caused either by electrolytic phenomena or by of structural polarization effects. The motion of neutral atoms with the participation of charged particles obeys the redistribution of internal electromechanical stresses, in particular, due to the distortion of the As and Ga sublattices of GaAs, the ionization of atomic cores, and/or the excitation of a surface deformation wave. As a result, EM wave irradiation leads to change in the degree of dispersion, the effects of forming, coagulation and sticking of droplets (Ga + As) beside of GaAs precipitates and their redistribution over the surface.

Key words: surface, microwave irradiation, gallium arsenide, photometric analysis, acoustic vibrations, physicochemical transformations, semiconductor structures.

1. Введение

Изготовление полупроводниковых приборов СВЧ диапазона на основе тонкопленочных структур арсенида галлия потребовало существенной проработки вопросов взаимодействия поверхности GaAs с окружающей средой на различных этапах их изготовления и использования. В этом случае помимо

самопроизвольной перестройки поверхности твердого тела, стимулом к которой является стремление к понижению свободной энергии поверхности, перестройка возможна и под воздействием внешних корпускулярных и электромагнитных облучений. Эти воздействия могут носить нетепловой характер и проявляться при очень малых уровнях поглощенной мощности. Они приводят к модуляции потенциального барьера для образования зародышей и, как следствие, к разориентации решеток пленки и подложки. Примером может служить образование сверхструктуры с периодом распространяющейся поверхностной упругой волны, когда поверхностный потенциал модулируется вследствие пьезоэлектрического эффекта [1]. Воздействие электромагнитной волны на дефектообразование и зарядовый состав в тонких приповерхностных слоях рассматривалось теоретически в [2]. Основой механизма дефектообразования считается поглощение молекулой или атомом, находящимися в определённом энергетическом состоянии, фононов, возникающих при прохождении световой волны. Подготовленные химически активные частицы могут вступать в реакцию с другими активными элементами, при этом имеется тенденция к ослаблению связи. Показано, что в энергетически слабых местах возможно зарождение микротрещин. В дальнейшем эти дефекты и микротрещины становятся новыми центрами адсорбции атомов, а возмущения, возникающие в приповерхностных слоях, могут передаваться по кристаллу с помощью акустических волн. В настоящей работе проводилось исследование с помощью тонкого химического анализа состава поверхности GaAs после воздействия электромагнитных волн миллиметрового диапазона малой мощности в зависимости от величины мощности падающего излучения и времени облучения.

2. Методика и техника эксперимента

Образцы для исследования. Образцы одинаковых размеров ($5 \times 5 \text{ мм}^2$) вырезались из пластины эпитаксиальной структуры арсенида галлия ($n^+ - n - n^{++}$): слой n^+ -GaAs с концентрацией электронов $n \sim 1.05 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, толщиной 0.26 мкм; слой с $n \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$, толщиной 0.3 мкм; подложечный материал с

$n \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$, толщиной $\sim 300 \text{ мкм}$.

Облучение поверхности образцов СВЧ полем. Внешняя сторона n^+ -слоя облучалась ММ волнами с помощью рупора. Блок-схема экспериментальной установки показана в работе [3]. Длительность облучения поверхности образцов составляла от 0.1 до 300 с, мощность излучения генератора P_G варьировалась в пределах 9 – 25 мВт. Плотность мощности облучения поверхности GaAs была $10^{-1} P_G$ на 1 см^2 . Образцы размещались на расстоянии 10 см от рупора, что позволяло рассматривать поверхность образца как дальнюю зону ММ волн. Коэффициент отражения составлял 0.55%. Мощность излучения, проходящего через образец, не превышала 1.3 мВт/см^2 , так что даже в случае полного поглощения волн образцом изменение температуры образца крайне мало и могло составлять не более чем 0.015°C [4].

Определение элементов, не связанных с кристаллической решеткой проводилось с использованием метода тонкого химического анализа [5]. При этом два образца; подвергнувшийся и не подвергнувшийся облучению ММ волной, анализировались методом фотометрии. Каждый из образцов закрывался с торцов и с обратной стороны химически стойким лаком (ХСЛ) и, таким образом, проводилось исследование только одной, испытываемой стороны поверхности. Выбирался метод травления в концентрированном растворе HCl, когда удаляются только "свободные", не входящие в решетку GaAs атомы Ga и As либо их соединения с кислородом или OH, не затрагивая основной кристалл (метод селективного травления). Уходящие с поверхности элементы анализировались в растворенном виде методом фотометрического анализа. Этот метод позволял с точностью до 5% определять количественное содержание свободных (не связанных с кристаллической решеткой GaAs) атомов галлия и мышьяка в приповерхностном слое арсенида галлия как до, так и после его облучения.

3. Экспериментальные данные

Зависимости содержания Ga и As от мощности P_G (частоты) при постоянном времени облучения $t = 1 \text{ с}$ представлены на рис. 1. Зависимость

содержания Ga и As от времени облучения при фиксированных мощностях P_G генератора: 13, 15 и 25 мВт с частотой $f = 75$ ГГц изображена на рис. 2. Характер этих зависимостей указывает на механизм, вызывающий вариации свободных атомных масс. Следует отметить, что вначале до облучения в состав приповерхностных слоев входят: воздушный слой, сгущенный у поверхности полупроводника; слой аморфного природного оксида; нарушенный слой GaAs; эпитаксиальный слой GaAs. Указанные выше приповерхностные слои отличаются не только по составу, но и по своим физическим свойствам таким, как плотность, диэлектрическая проницаемость, работа выхода, электронное сродство, теплопроводность и электропроводность.

4. Анализ экспериментальных зависимостей

Из данных, полученных с помощью химического анализа поверхности образцов, величина соотношения масс Ga и As до облучения ($t = 0$) близка к единице и соответствует стехиометрическому составу GaAs. В подобном квазиравновесном состоянии имеются два потока атомов Ga и As: удвоенный – по направлению к поверхности GaAs и одиночный – по направлению к объему арсенида галлия. При этом поверхностный электрический потенциал $\Delta\varphi$ также находится в квазиравновесном состоянии [6]. Затем, в процессе облучения ММ волной содержание галлия и мышьяка в приповерхностном слое изменяется для каждого элемента по своему собственному закону в зависимости от частоты и мощности ММ облучения.

Изменение содержания масс Ga и As в зависимости от энергии падающего излучения ММ волн при постоянной длительности облучения $t = 1$ с представлено на рис. 1.

В данном случае величина энергии излучения связана с частотой. На графике зависимостей количеств Ga и As от мощности (частоты) и для соотношения Ga/As, можно выделить, по крайней мере, две области: область снижения содержания As (повышения Ga) в приповерхностном слое GaAs при частотах $f < 55$ ГГц и область повышения количества As (снижение Ga) – при $f = 55 - 72$ ГГц.

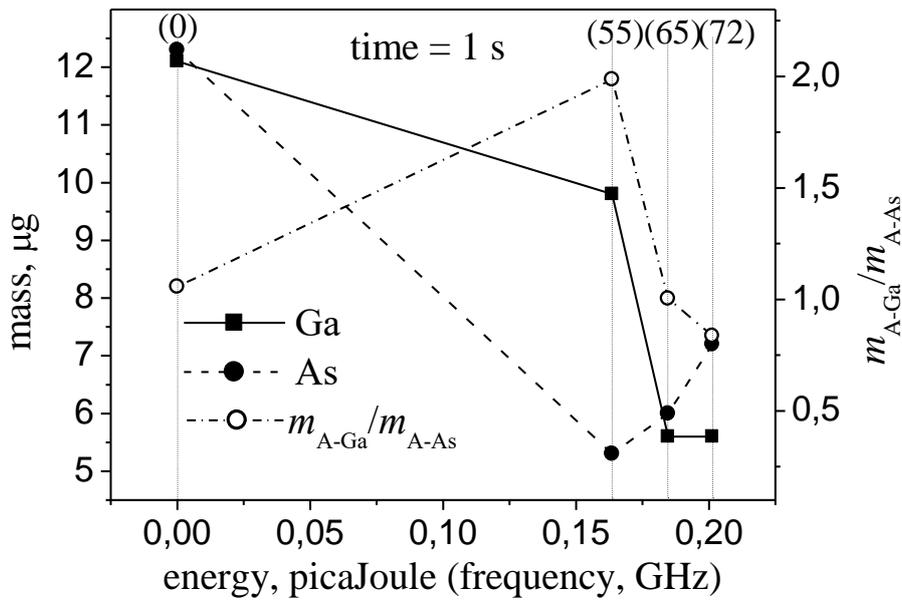


Рис. 1. Содержание "свободных" атомов Ga и As по массе (мкг) и m_{A-Ga}/m_{A-As} (в атомных массах) в зависимости от энергии (частоты, 0 – исходное состояние поверхности GaAs) облучения, время облучения $t = 1$ с.

Аппроксимация зависимостей изменения величины отклонения от стехиометрического состава в содержаниях свободных масс Ga и As (в виде концентрации или в мольных долях) от энергии падающего излучения на участке частот $f > 55$ ГГц может быть описана выражениями 1) и 2) в таблице 1. Как следует из выражений 1) и 2), величина отклонения от стехиометрического состава GaAs имеет квадратичную зависимость от энергии излучения E^2 , что присуще релаксационной поляризации упорядочения молекул [7,8].

Таблица 1. Энергия активации изменения Ga/As

$E_{gen},$ Дж·10 ⁻¹²	f, ГГц	$Q_{Ga/As},$ ккал/моль (эВ)	тип зависимости от энергии
0.15-0.2	55-72	28.324 (1.227) $E_{\beta\beta} = 1.26$ эВ	1). $1 - 2 \cdot \frac{m_{Ga} - m_{As}}{A_{Ga} + A_{As}} = -50.37838 - 47.20824 \cdot \ln(E)$
		37.332 (1.61)	2). $\frac{1 - \Delta C/C}{E^2} = -62.22183 - 54.33046 \cdot \ln(E)$

m_{Ga}, m_{As} – масса Ga и As; концентрация $C = (m_{Ga} - m_{As}) / (m_{A-Ga} + m_{A-As})$, A_{Ga} и A_{As} – атомные массы Ga и As [9].

Возникающая при этом деформация поверхности кристалла, сопровождается поворотами молекул и может рассматриваться как упругая деформация кристалла. В области частот облучения > 55 ГГц перемещение масс в арсениде галлия, по-видимому, обусловлено в первую очередь деформацией (рис. 3). Величина напряжений снижается, то есть имеют место процессы релаксации.

Квадратичная зависимость изменения соотношения масс Ga и As от энергии падающих электромагнитных волн может быть также следствием эффектов электрострикции [9]. При этом облучение поверхности GaAs ЭМ волнами приводит к возникновению в приповерхностном слое арсенида галлия колебаний на удвоенной частоте и выполняется соотношение $\Delta V/V = A \cdot E^2$, где V – элементарный объем решетки, E – напряженность электрического поля. Этот эффект характерен как для оксида (природный слой оксида на поверхности GaAs), так и для приповерхностного нарушенного слоя арсенида галлия. Диэлектрик при этом колеблется с частотой 2ω (квадратичный эффект).

Выражение 1) в таблице 1 описывает изменение молярного состава приповерхностного слоя. Уравнение изменения разницы между молярными долями Ga и As в этом случае подобно выражению, описывающему коагуляцию капель [10,11]. Из выражения 1) можно было найти энергию активации изменения разницы в содержаниях Ga и As. Как оказалось, найденная величина энергии активации в случае, когда E стремится к нулю, составляет 1.227 эВ и численно равна энергии поверхностного натяжения, которая выделяется при трансформации капли в плоскость [11]. Выделение ее реализуется в предположении, что капли расположены плотно друг к другу и их радиус равен толщине гипотетического слоя h , образованных из Ga и As атомов.

Все это в целом указывает на вероятность возникновения коагуляции Ga + As капель и их перераспределения по поверхности GaAs, включая выпадение преципитатов GaAs. Данный процесс подобен эффекту припекания, осуществляемому через диффузионную ползучесть под воздействием сил

поверхностного натяжения [10]. В результате изменения состояния поверхности GaAs возникает и изменение напряжений в приповерхностных слоях.

Следует заметить, что освобожденная энергия E близка к $E = 1.26$ эВ – энергии связи Ga-Ga атомов упорядоченных в GaAs тетрагональную решетку [12] и энергия, запасенная в каплях, на стадии растекания может расходоваться на изменение связей в приповерхностном слое GaAs.

С другой стороны, величина 1.227 эВ коррелирует с величиной статического потенциала на поверхности полупроводника и, кроме того, близка к энергии вероятности перескока атомов As в приповерхностном слое GaAs, равной 1.27 эВ. В том случае, когда E стремится к ∞ , энергия активации изменения разницы между молярными массами Ga и As равна ~ 0.0277 эВ, что соответствует высокочастотной части электрического потенциала и близка к энергии оптических длинноволновых фононов в GaAs.

Выражение 2) в таблице 1, описывает изменение разницы между массами свободных Ga и As. Из выражения 2) следует, что энергия активации изменения концентрации галлия и мышьяка при $E \rightarrow 0$, соответствует 1.61 эВ, что соответствует энергии статического электрического поля. Эта величина близка к значению ширины запрещенной зоны (для ионов) в арсениде галлия, а при $E \rightarrow \infty$ энергия активации изменения концентрации элементов соответствует высокочастотной части поверхностного потенциала 0.029 эВ и соответствует энергии оптических длинноволновых фононов в GaAs.

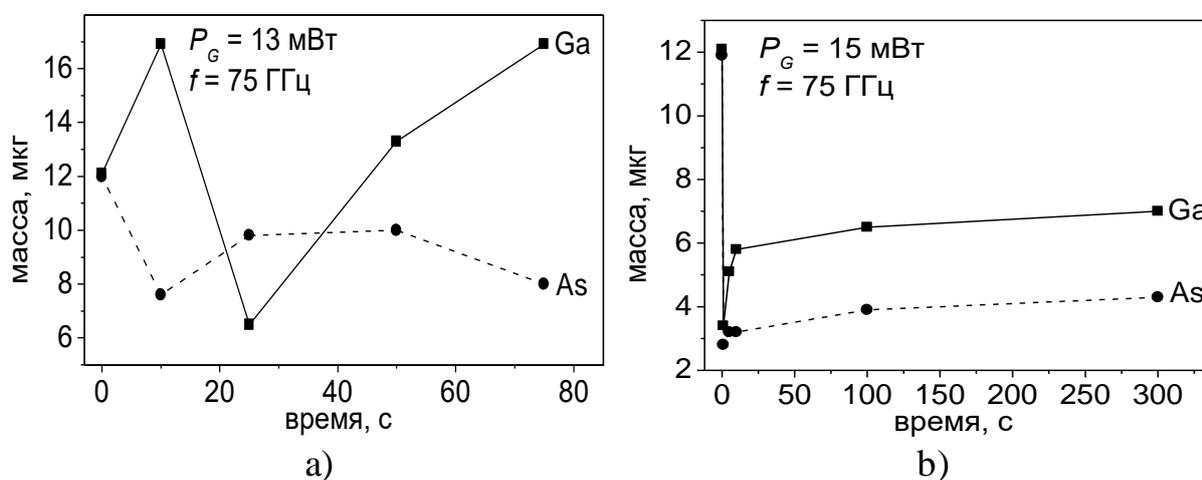
Обращает на себя внимание тот факт, что при стремлении левой части выражений 1) и 2) к нулю $\ln E = 1.067$ и совпадает со значением отношения ω_L/ω_T для GaAs [13], где ω_T – частота поперечных оптических колебаний, ω_L – частота продольных оптических колебаний. Кроме того, $\omega_T^2/\omega_L^2 = \varepsilon(\infty)/\varepsilon(0)$, $\varepsilon(0)$ – статическая диэлектрическая проницаемость, а $\varepsilon(\infty)$ – высокочастотная (оптическая) диэлектрическая проницаемость, обусловленная смещением электронных облаков.

Таким образом, можно заключить, что под воздействием ММ волн в течение 1 с перемещение масс Ga и As приводит к флуктуациям по плотности и по энергиям на границе между слоем оксида и полупроводника. Кроме того, как известно, при распространении электромагнитных волн с низкой частотой через кристалл с ионными связями, внешние электроны (может осуществляться и через электронное сродство), также как и ионные остова кристалла принимают участие в изменении диэлектрической проницаемости [13]. Помимо ковалентных связей GaAs обладает большой долей ионных связей. Энергия, выделяющаяся при образовании новых соединений, а также перераспределение энергии электромагнитных волн могут быть причиной возбуждения ионных остовов кристалла – объемного арсенида галлия и может быть причиной возбуждения собственных электромагнитных и/или акустических колебаний кристалла.

5. Анализ экспериментальных результатов

Общий вид зависимостей содержания Ga и As в приповерхностном слое GaAs от времени облучения (рис. 2) указывает на механизм, вызывающий вариации свободных атомных масс, прежде всего, на возникновение эффектов деформации.

Оказалось, что характер изменения содержания Ga и As от времени экспозиции определяется величиной мощности СВЧ излучения P_G .



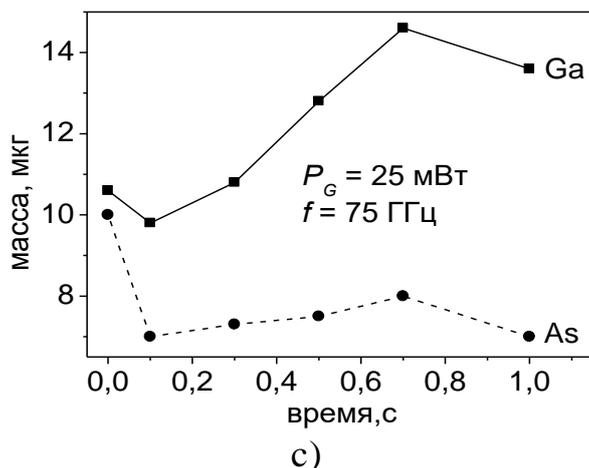


Рис. 2. Временные зависимости содержания "свободных" атомов Ga, As по массе при $P_G = \text{const}$: а) 13 мВт; б) 15 мВт, с) 25 мВт.

1. $P_G = 13$ мВт. Изменения содержаний Ga и As (увеличение-уменьшение) находятся в противофазе, что, скорее всего, связано с тем фактом, что ионы Ga, участвующие в реакции, заряжены положительно, а ионы мышьяка имеют отрицательный заряд, рис. 2а. Вид зависимости содержания "свободных" Ga и As масс указывает на протекание электролитической реакции [9], когда длительность периода изменения потенциала на электродах велика. Это дает возможность предположить, что в процессе облучения периодически изменяется поверхностный заряд, а, следовательно, и поверхностный потенциал. Изменение знака поверхностного заряда, как известно, приводит либо к растяжению приповерхностного слоя, либо к его сжатию [8].

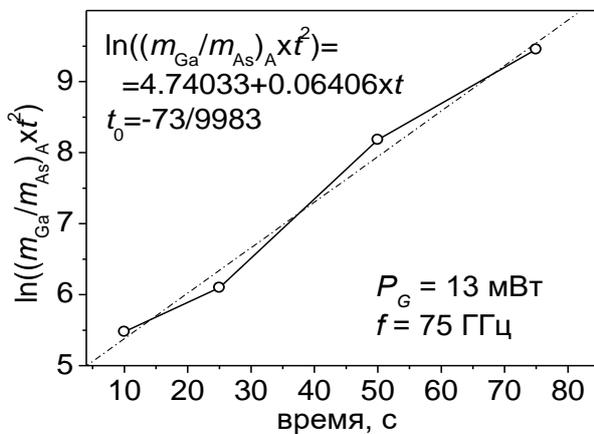
2. $P_G = 15$ мВт. Осуществляется другой тип деформации (рис. 2б): пластическая деформация за счет дислокационной диффузионной ползучести [7,9], которая, как известно, выполняется при малых механических напряжениях и отличается скольжением (проскальзыванием) плоскостей на поверхности кристалла или по границам зерен (сдвиговая деформация). Следует заметить, что эта зависимость подобна известным случаям, когда деформация осуществляется под воздействием силы, изменяющейся синусоидально.

3. $P_G = 25$ мВт. Временные зависимости (рис. 2в) похожие на процессы пластической деформации, характерные для диффузионной ползучести, когда

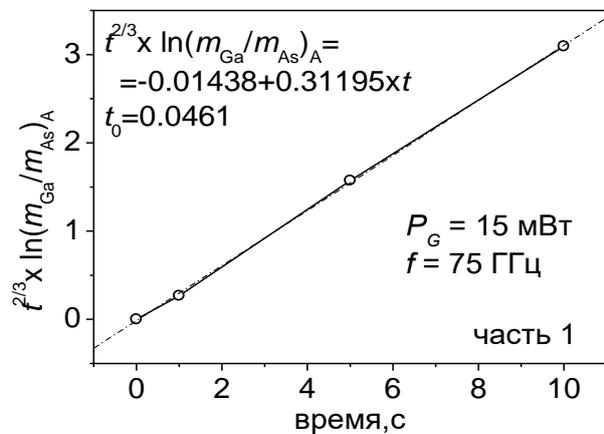
движение атомов в результате напряжения, вызванного постоянным нагружением, осуществляется посредством диффузии.

Аппроксимация временных зависимостей содержания свободных масс Ga, As (рис. 2) в приповерхностных слоях и их отношения Ga/As дает возможность определить энергии активации изменения содержания как отдельно для Ga (q_{Ga}) и As (q_{As}), так и для их соотношения Ga/As ($Q_{Ga/As}$) для таких значений мощности P_G как: 13 мВт, 15 мВт, 25 мВт (рис. 3, таблица 2).

1. **$P_G = 13$ мВт.** Как показано на рис. 2а, характеристика количественного содержания Ga и As в приповерхностном слое обнаруживает периодическую зависимость от времени облучения. Выражение 1) в таблице 2 для Ga/As, подобно уравнениям, описывающим процесс коагуляции дисперсных частиц [10,11]. В этом случае происходит движение двух потоков дисперсных частиц: атомы Ga и As со скоростями, противоположно направленными. Энергия активации массопереноса Ga соответствует половине энергии смешения Ga + As, а энергия активации переноса As – близка к энергии образования GaAs [14]. Одновременное движение атомов (Ga/As) в этом случае определяется энергией (скоростью) переноса Ga. Разница между общей энергией активации для Ga и As и энергией активации $\sum(q_{Ga} + q_{As}) - Q_{Ga/As}$ близка к энергии образования GaAs и к энергии сродства электронов для As.



a)



b)

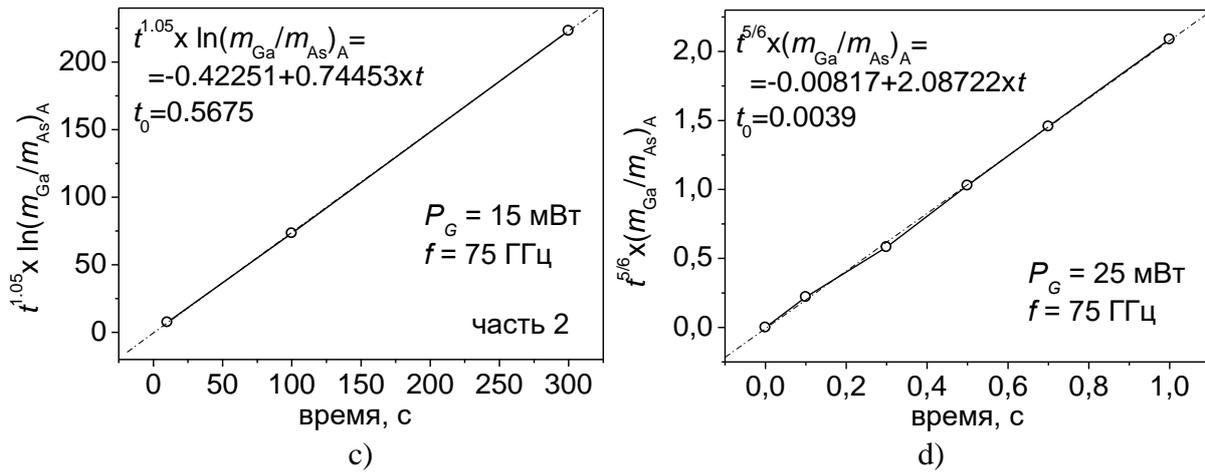


Рис. 3. Аппроксимация временных зависимостей Ga/As при $P_G = \text{const}$: а) 13 мВт; б) и с) 15 мВт 1-я часть: 1-10 с, 2-я часть; 10 – 300 с; д) 25 мВт.

2. $P_G = 15 \text{ мВт}$. Массы свободных Ga и As (рис. 2б), снижаются сразу после начала облучения до 75% от значений определяемых до облучения ($t = 0$). При более длительной экспозиции масса свободного Ga возрастает примерно до половины первоначального значения. Выражение 2) в таблице 2, рис. 3б, соответствует уравнениям, описывающим процессы коагуляции капель, а выражение 3) рис. 3в – диффузионную ползучесть. Энергия активации перемещения масс Ga и As равны $q_{Ga} = 0.227 \text{ эВ}$ и $q_{As} = 0.35 \text{ эВ}$. Следует заметить, что электронное сродство для молекул Ga = 0.3 эВ. Энергия активации одновременной миграции Ga и As для первой части ($t = 0 - 10 \text{ с}$) соответствует энергии активации зернограничной диффузии Ga, а на втором участке соответствует энергии образования GaAs [14]. Кроме того, и для Ga и для As значение энергии активации равно 0.577 эВ, что близко к $E_{\alpha\alpha}$ – энергии искажения тетраэдрической As подрешетки GaAs, а также совпадает с энергией одноразовой ионизации атомных остовов [12].

Изменение состояния поверхности GaAs на начальном этапе облучения определяется скоростью диффузии атомов Ga, затем, с увеличением времени облучения, скоростью движения атомов As, которая, в свою очередь, определяется скоростью образования соединения GaAs. Отсюда следует вывод, что трансформация поверхности GaAs под воздействием облучения заключается в формировании жидкоподобных капель, содержащих в себе Ga и

As, и в последующем выпадении преципитатов GaAs вследствие коагуляции этих капель, поскольку такие параметры, как растворимость и предел насыщения, зависят от изменения формы или размера капель Ga.

Таблица 2. Энергия активации массопереноса As и Ga под воздействием ММ волн при $f = 75$ ГГц и $P = \text{const}$

P_G , мВт	q_{Ga} , ккал/моль (эВ)	q_{As} , ккал/моль (эВ)	$Q_{Ga/As}$, ккал/моль (эВ)	$\sum(q_{Ga} + q_{As})$, ккал/моль (эВ)	Зависимость Ga/As (в атомных массах) от времени t
13	10.66 (0.46)	17.19 (0.74)	9.366 (0.405)	27.85 (1.21)	$1. \ln \left(\frac{m_{Ga}}{m_{0Ga}} \cdot \frac{m_{0As}}{m_{As}} \cdot t^2 \right) \sim ct$
15	5.261 (0.227)	8.08 (0.35)	2) 5.806 (0.251) 3) 16.117 (0.698)	13.34 (0.577) $E_{\alpha\alpha} = 0.54$ эВ	$2. t^{\frac{2}{3}} \cdot \ln \left(\frac{m_{Ga}}{m_{0Ga}} \cdot \frac{m_{0As}}{m_{As}} \right) \sim k_1 t$ $3. t^{1.05} \cdot \ln \left(\frac{m_{Ga}}{m_{0Ga}} \cdot \frac{m_{0As}}{m_{As}} \right) \sim k_2 t$
25	3.5 (0.1516)	25.62 (1.09) $E_2 = 1.09$ эВ	3.46 (0.149)	29.12 (1.2615) $E_{\beta\beta} = 1.26$ эВ	$4. t^{\frac{5}{6}} \cdot \ln \left(\frac{m_{Ga}}{m_{0Ga}} \cdot \frac{m_{0As}}{m_{As}} \right) \sim kt$

q_{Ga} , q_{As} – энергия активация переноса атомов Ga и As (рис. 3); $E_{\beta\beta}$ – энергия искажения тетраэдрической Ga подрешетки GaAs совпадает с E_1 -энергией одноразовой ионизации атомных остовов GaAs; $E_{\alpha\alpha}$ – энергия искажения тетраэдрической As подрешетки; E_2 – энергия двухразовой ионизации GaAs

3. $P_G = 25$ мВт. Количество «свободных» атомов Ga от времени облучения на начальном этапе облучения увеличивается, а мышьяка As – уменьшается (рис. 2, таблица 2). Выражение 4) изменения соотношения Ga/As (рис. 3г) со временем облучения указывает на то, что в этом случае перенос массы атомов

определяется как механизмом диффузионной ползучести дислокаций, так и зернограничной диффузией [7,10]. Энергия активации $Q_{Ga/As}$ одновременного массопереноса Ga и As приблизительно равна q_{Ga} , то есть скорость перемещения атомов Ga для этого случая является определяющей. Сумма значений энергии активаций $\sum(q_{Ga} + q_{As})$, рассчитываемых отдельно для перемещения атомов Ga и As, равна 1.26 eV и коррелирует с энергией искажения Ga подрешетки арсенида галлия $E_{\beta\beta}$ [13]. Необходимо отметить, что энергия активации перемещения As, определяемая как q_{As} , близка к энергии двухразовой ионизации остова GaAs. Т.е. процесс миграции атомов мышьяка может быть осуществлен под влиянием движения зарядов в электрическом поле.

Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы.

1). В случае $P_G = 13$ мВт, когда образуются относительно большие зерна, значительную роль начинают играть межзёренные границы, где, скорее всего, и осуществляется поворот молекул и воздействие на электрический потенциал поверхности.

2). При $P_G = 15$ мВт с началом времени облучения обнаруживается зернограничная диффузия, и затем дислокационная ползучесть, и, кроме того, выпадают преципитаты GaAs. Совместное движение атомов Ga и As осуществляется в поле искаженной As подрешетки GaAs при одноразовой ионизации остова GaAs.

3). При $P_G = 25$ мВт энергия активации переноса атомов As соответствует энергии двукратной ионизации остова GaAs, тогда как энергия активации переноса атомов Ga соответствует энергии свободной поверхности GaAs. Массоперенос осуществляется на фоне искажения галлиевой подрешетки.

Таким образом, результатом облучения поверхности является изменение состояния приповерхностных слоев GaAs, включая их реологические параметры.

6. Объяснение результатов

Как известно, в электрическом поле на диэлектрики и полупроводники действуют пондеромоторные силы, причиной возникновения которых является сообщение телам электрических зарядов [9]. Результатом является возникновение поляризационных зарядов и эффектов деформации в диэлектриках и полупроводниках. Различием этих величин по разные стороны границы диэлектриков и определяются силы, действующие на единицу поверхности указанной границы. Излучение электромагнитных волн миллиметрового диапазона, как правило, ослабляет межмолекулярные связи посредством влияния на электронные облака и приводит к изменению агрегатного состояния. При этом наблюдаются эффекты скатывания материала (образование зерен) или более-менее равномерное перераспределение материала по поверхности [2]. Исходя из полученных экспериментальных данных, с учетом сказанного выше, физико-химические реакции на поверхности под воздействием электромагнитного излучения можно представить следующим образом.

Электромеханические возмущения в приповерхностных слоях. В процессе облучения между разноименно заряженными частицами: ионами, электронами и дырками, (эффект примесной проводимости) изменяется расстояние, и возникает деформация типа растяжение-сжатие. Образованные диполи способны вращаться [8,9]. Отсюда можно заключить, что в результате облучения может осуществляться деформация сдвига, которая, как известно, включает в себя неупругую часть деформации (растяжение-сжатие) и упругую часть (вращение диполей). Возникает концентрационная, деформационная и термическая нестабильность и, как результат, изменение поверхностного потенциала, то есть, имеется внутреннее электрическое и механическое возмущение в тонких приповерхностных слоях.

Возбуждение поверхностных деформационных волн. Поскольку арсенид галлия является пьезоэлектриком, его деформация сопровождается появлением электрического поля и наоборот. В результате возбуждается поверхностная

деформационная волна, распространяемая со скоростью, типичной для звуковых волн в кристалле GaAs. Следствием этого является снижение запасенной поверхностной энергии. Выделенная энергия перераспределяется на атомы и молекулы приповерхностного слоя и ослабляет внутренние связи [2].

При возбуждении и распространения акустической волны на поверхности возникают области сжатия и растяжения противоположно заряженные (области А-В, рис.4).

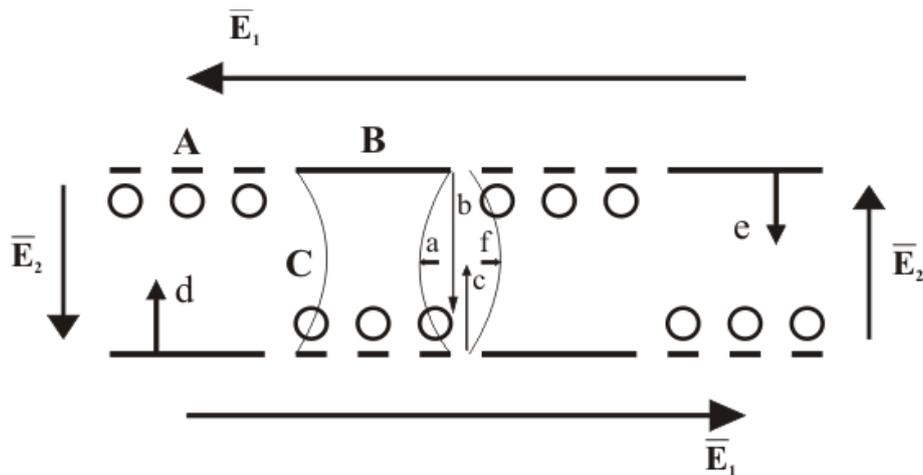


Рис. 4. Схема распределения электрических полей в приповерхностном слое GaAs: \bar{E}_1 – электрическое напряжение вдоль поверхности; \bar{E}_2 – перпендикулярно к поверхности; a, f – напряжения в зернах GaAs вдоль поверхности, b, c – напряжения в зернах GaAs перпендикулярно к поверхности, d, e – направления движения противоположно заряженных свободных частиц.

Вследствие эффектов зеркального отображения в направлении, перпендикулярном к поверхности полупроводника, также формируются чередующиеся области, противоположно заряженные.

Свободные ионы, молекулы, атомы, и вакансии приповерхностного слоя выстраиваются в направлении перпендикулярном к поверхности GaAs за счет эффектов затягивания (конденсаторный эффект) между сжатыми и растянутыми областями. Величина напряженности суммарного электрического потенциала в направлении между точками А-В складывается из электрической части ПАВ и напряжения электрической составляющей электромагнитной волны. Тогда как в перпендикулярном направлении электрический потенциал

складывается из напряжения двойного электрического слоя и электрической составляющей поверхностной акустической волны.

Образование регулярных включений в виде зерен GaAs. В областях между точками сжатия и растяжения образуется стехиометрический GaAs в виде регулярных включений или зерен как результат процессов дистилляции. Размер этих включений, а, следовательно, и величина зерен и межзёренных границ (их периметра), будет зависеть от частоты и мощности акустической волны.

Таким образом, размер зерен, также как и расстояния между ними, определяют не только степень покрытия ими поверхности GaAs, а следовательно, и степень дисперсности, но и позволяют рассматривать структурные единицы в соединительных пленках на границах зерен (Ga + As) как мелкие осцилляторные системы. Указанные границы периодически распределены по поверхности GaAs, и в них возникают колебания молекулярной релаксации. В результате изменения структуры, состава и плотности возникшие колебания либо гасятся, либо усиливаются в зависимости от расстояний между ними или рассеиваются на избыточных носителях, что и происходит при $P_G = 13$ мВт. Вдобавок ко всему, по мере накопления зарядов противоположных знаков в точках максимальной кривизны поверхности в зернах арсенида галлия увеличивается напряжение того или иного знака.

Направление напряженности электрического поля в этих местах приводит к образованию островков GaAs (зерен) в виде вискеров с ориентациями (111)As – наиболее быстро растущая и быстро разрушающаяся грань, что происходит в случае $P_G = 15$ мВт.

С увеличением напряжённости возникают токи проводимости (b,c) и (a,f), а также возможен микропробой, и выживает более стабильная, медленно растущая грань (111)Ga, что происходит при $P_G = 25$ мВт.

Все это в целом приводит к деформациям тела зерна, выражающиеся нарушения тетрагональных As и Ga подрешеток, а также одноразовой или двухразовой ионизации решетки GaAs. Толщина слоя, в котором возможно

возникновение акустических колебаний определяется длиной экранирования Дебая.

7. Заключение

При облучении поверхности GaAs наблюдаются процессы релаксации: уменьшение внутренней энергии приповерхностных слоев и поверхностного потенциала за счет упругой или пластической деформации, сопровождаемой дрейфом или диффузией заряженных частиц. Процессы релаксации связаны либо с электролитическими эффектами, либо с явлениями структурной поляризации. Движение атомов с участием заряженных частиц подчиняется перераспределению внутренних электромеханических напряжений, в частности, за счет искажения As и Ga подрешеток GaAs, ионизации атомных остовов и возбуждения поверхностной деформационной волны. Сила сцепления и напряжения на границах варьируются частотой, величиной энергии электромагнитного излучения, а также временем экспозиции. В результате облучение ЭМ волнами приводит к трансформациям приповерхностных слоев GaAs, таким как: изменение степени дисперсности, эффекты формирования, коагуляции и припекания капель (Ga + As); выпадение преципитатов GaAs и перераспределение их по поверхности.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

Литература

1. Арсенид галлия в микроэлектронике / под ред. Айнспрука Н., Уиссмана У. М.: Мир, 1988. 555 с.
2. Гладков С.О. Физика композитов. Термодинамические и диссипативные свойства. М.: Наука, 1999. 329 с.
3. Lioubtchenko D.V., Räisänen A.V., Briantseva T.A., Lebedeva Z.M., Markov I.A. GaAs Surface Modifications under Millimeter Wave Irradiation // Defect and Diffusion Forum, 2001. V. 194-199. P. 745–750.
4. Thompson K., Booske J.H., Gianchandani Y., Cooper R., Bykov Yu., Ereemeev A., Plotnikov I. Electromagnetic induction heating for cold wall rapid thermal

processing. *Proc. 9th Int. Conf. Advanced Thermal Processing of Semiconductors*. 2001, IEEE, P. 190-196.

5. Briantseva T.A., Lebedeva Z.M., Markov I.A., Bullough T.J., Lioubtchenko D.V. Processes-induced modification to the surface of crystalline GaAs measured by photometry // *Appl. Surf. Sc.* 1999. V. 143. P. 223–228.
6. Фролов Ю.Г. Количественные характеристики когезии и адгезии. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. М.: Химия, 1982. 399 с.
7. Фридкин В.М. Динамика решетки и фазовые переходы. Современная кристаллография / под ред. Вайнштейна Б.К. М.: Наука. 1979-1981. Т. 2. Структура кристаллов. Гл. 4. С. 262.
8. Шувалова Л.А, Урусовская А.А., Жолудев И.С. и др. Современная кристаллография. / под ред. Вайнштейна Б.К. Т. 4, Физические свойства кристаллов. М.: Наука, 1981. 496 с.
9. Сивухин Д.В. Общий курс физики. М.: Физматлит, 2002. Т. 1. 792 с.
10. Колешко В.М., Ковалевский А.А. Поликристаллические пленки в полупроводниковой электронике. Минск: Наука и техника, 1978. 343 с.
11. Бокштейн Б.С. Диффузионная ползучесть. Диффузия в металлах. М.: Металлургия, 1978. 230 с.
12. Таблицы физических величин. Справочник / под ред. И.К. Кикоина М.: Атомиздат, 1975. 1008 с.
13. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978. 791 с.
14. Яценко С.П. Галлий. Взаимодействие с металлами. М.: Наука, 1974. 220 с.

Для цитирования:

Т.А.Брянцева, Д.В.Любченко, И.А.Марков, Ю.А.Тен. Трансформация приповерхностных слоев GaAs под воздействием электромагнитного излучения миллиметрового диапазона. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun19/9/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.6.9