

УДК 538.913

## ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ И РОСТА ТОНКИХ ПЛЕНОК ЗОЛОТА НА ПОВЕРХНОСТИ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ИСПАРЕНИИ В ВАКУУМЕ

© 2023 г. Т. А. Брянцева<sup>а</sup>, \*, В. Е. Любченко<sup>а</sup>, Д. В. Любченко<sup>б</sup>, И. А. Марков<sup>а</sup>, Ю. А. Тен<sup>а</sup><sup>а</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
пл. Введенского, 1, Фрязино, Московской обл., 141120 Российская Федерация<sup>б</sup>Department of Micro and Nanosystems, KTH Royal Institute of Technology,  
Malvinas väg 10, Stockholm, SE-100 44 Sweden

\*E-mail: bryantseva44@mail.ru

Поступила в редакцию 07.04.2022 г.

После доработки 14.06.2022 г.

Принята к публикации 25.06.2022 г.

Проведены исследования изменения морфологии и структуры поверхности GaAs при осаждении пленки Au путем термического испарения в вакууме. Обнаружено, что осаждение пленки Au с участием потока частиц и света от разогретого испарителя вызывает возникновение фотоэффектов в приповерхностных слоях GaAs, включая дифракцию света на поверхностных акустических волнах, рост вискерсов и эмиссию электронов, что приводит к образованию микротрещин на поверхности GaAs и росту кристаллитов GaAs. Показано, что структура и состав границ пленки Au и поверхности GaAs зависят от концентрации электронов в арсениде галлия, что в конечном итоге определяет свойства электрофизических параметров контактов Au – GaAs.

DOI: 10.31857/S0033849423050030, EDN: UHIF1

### ВВЕДЕНИЕ

Осаждение тонких пленок золота на поверхность GaAs путем термического испарения в вакууме является одним из широко распространенных способов изготовления выпрямляющих и невыпрямляющих (омических) контактов, а также соединительных линий при создании приборов и интегральных схем. Показано, что под воздействием пучка испаряемого металла, а также облучения светом (белым) от разогретого испарителя на поверхности полупроводника происходят различные физико-химические и электромеханические явления, в результате которых возможна перестройка поверхности арсенида галлия [1, 2]. Стимулом перестройки является стремление к понижению свободной энергии поверхности. Перестройка возможна и под воздействием внешних корпускулярных и электромагнитных облучений, электрических, акустических, магнитных полей и пр. [3–7]. Эти воздействия приводят к модуляции потенциального барьера для образования зародышей и, как следствие, разориентации решеток пленки и подложки.

Электромагнитные волны влияют на движение заряженных частиц, таких как ионы  $Ga^+$  и  $As^-$ , электроны и дырки [5], а также на движение вакансий галлия и мышьяка. Двигающиеся по поверхно-

сти заряженные частицы обмениваются энергией с приповерхностным слоем арсенида галлия.

При осаждении металла путем испарения в вакууме возможны фотоэффекты с участием пластической деформации [7], в частности, перераспределение электронов по энергетическим состояниям под воздействием электромагнитного излучения, называемое внутренним фотоэффектом [8]. Внешний фотоэффект (фотоэлектронная эмиссия) может быть вызван возбуждением электронов из валентной зоны, а также с уровнями, обусловленных легированием, дефектами, поверхностными состояниями. Для каждого из названных случаев имеется своя величина пороговой энергии. Эти фотоэффекты включают в себя изменение электропроводности (фотопроводимость), возникновение электродвижущих сил, изменение поляризации или эмиссию электронов. Может возникнуть фотодиэлектрический эффект, который связан с изменением диэлектрической проницаемости. При сравнительно слабых интенсивностях электромагнитного излучения наблюдается изменение статической (низкочастотной) диэлектрической проницаемости среды (фотодиэлектрический эффект) за счет оптического возбуждения или оптической перезарядки примесных атомов [1, 2, 9, 10].

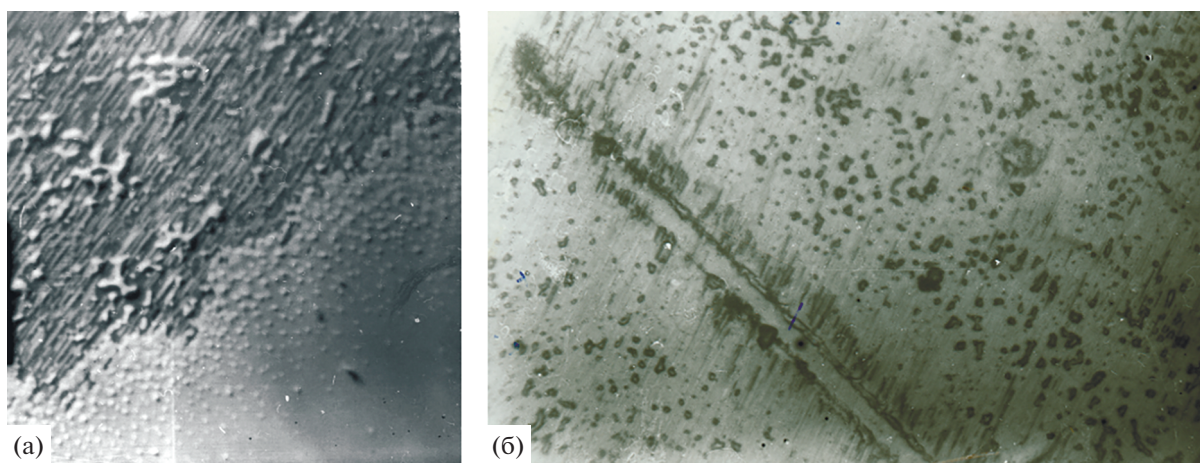


Рис. 1. Микрофотографии поверхности Au–GaAs ( $n \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ), полученные с помощью растровой электронной микроскопии: увеличение 420 (а) и 2500 (б).

Цель данной работы – рассмотреть процессы зарождения и роста пленок, получаемых термическим испарением золота в вакууме, и оценить влияние трансформации поверхности GaAs на конечный результат – электрофизические характеристики пленок.

## 1. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследований были использованы образцы, представляющие собой эпитаксиально выращенные слои (100) GaAs толщиной  $\sim 0.3 \text{ мкм}$  с концентрацией электронов  $n \sim (10^{14} \dots 10^{16}) \text{ см}^{-3}$  на сильнолегированных подложках (100) GaAs с  $n \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$  либо сами подложки. Пленки золота наносили на поверхность образцов, прошедших предэпитаксиальную подготовку в концентрированной соляной кислоте или в травителе на основе серной кислоты, с последующим отжигом в вакууме. Осаждение пленок золота осуществлялось в вакуумной установке, обеспечивающей предельный вакуум  $\sim 10^{-7}$  Торр.

Процесс испарения золота осуществлялся в резистивном испарителе прямого накала, представляющего собой вольфрамовую лодочку с наплавленной на нее навеской золота. В процессе испарения золота при температуре испарителя  $\sim 1200^\circ\text{C}$ , температура поверхности GaAs не превышала  $80^\circ\text{C}$  [11]. Скорость испарения поддерживалась постоянной путем поддержания уровня тока накала испарителя.

Исследования морфологии и структуры поверхности GaAs в результате осаждения пленки Au толщиной (10...500) Å проводили с помощью сканирующей электронной микроскопии, растровой электронной спектроскопии и просвечивающей электронной микроскопии, в случаях эф-

фективной толщины пленки Au  $d < 100 \text{ Å}$  – с помощью углеродных реплик. Для изучения структуры приповерхностного слоя Au–GaAs был использован также метод селективного травления.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

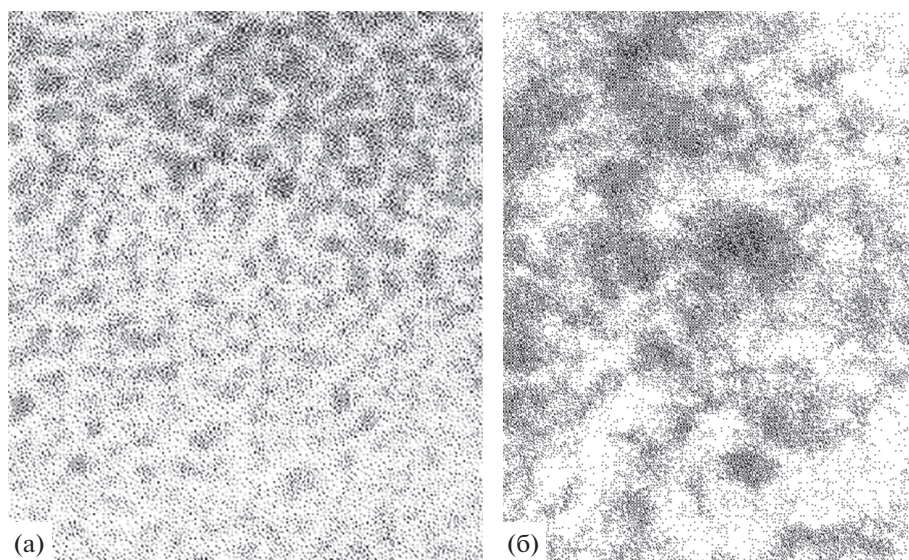
Картины морфологии поверхности (100) GaAs с пленкой Au толщиной 50...500 Å представлены на рис. 1–4. Как видим, морфология поверхности Au–GaAs зависит от концентрации электронов  $n$  в GaAs и толщины слоя золота.

Прежде всего следует отметить, что характерной особенностью структуры поверхности является декорирование золотом линейных одиночных дислокаций (см. рис. 1). Этими дефектами, скорее всего, являются заряженные дислокации (так называемые 60-градусные дислокации), расположенные вдоль направления  $[1\bar{1}0]$  как наиболее неустойчивого на поверхности (100) GaAs.

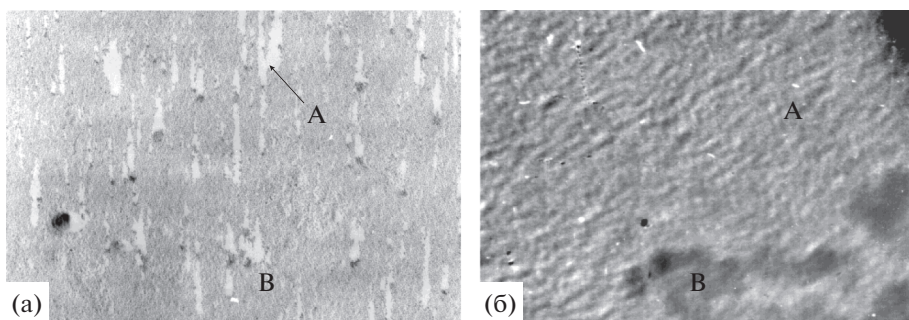
Вначале осаждения на поверхности GaAs формируются специфические картины (см. рис. 2а, 2б): обнаруживаются регулярно расположенные дискретные микрокапли. С помощью растровой электронной микроскопии показано, что в их состав помимо Au входят Ga и As. Картины распределения капель соответствуют картинам дифракции света от разогретого испарителя на поверхностной акустической волне [7].

Дифракционные пятна являются наиболее освещенными местами на поверхности. Они обогащаются электронами и играют роль стока и/или источника для дефектов, таких как ионы легирующей примеси, свободные ионы  $\text{Ga}^+$  и  $\text{As}^-$ , помимо атомов и ионов Au. Атомы и заряженные частицы перемещаются между освещенными и темными участками поверхности из-за эффектов

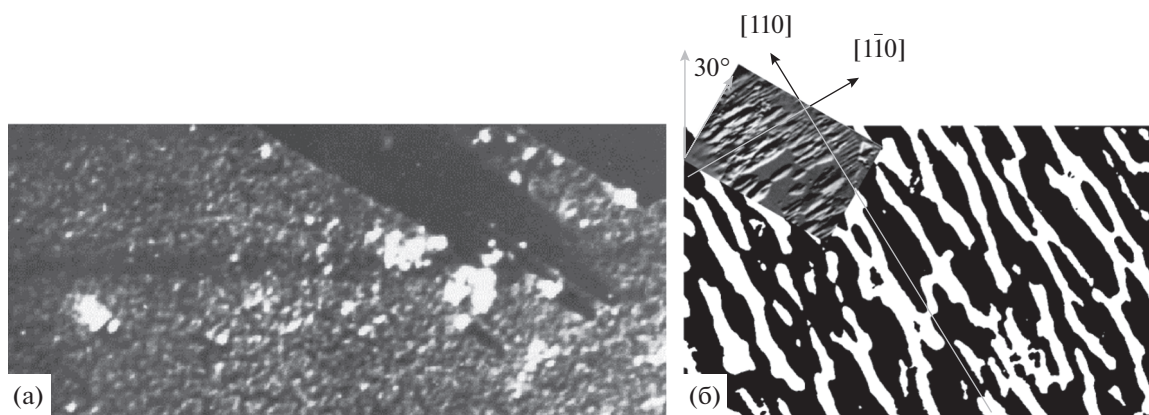




**Рис. 2.** Микрофотографии поверхности Au–GaAs, полученные с помощью электронной микроскопии, методом на просвет:  $n \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $d \text{ Au} \sim 50 \text{ \AA}$  (а);  $n \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $d \text{ Au} \sim 100 \text{ \AA}$  (б); увеличение 270000.



**Рис. 3.** Изображение поверхности Au–GaAs, полученное с помощью электронной микроскопии, методом на просвет:  $d \text{ Au} \sim 100 \text{ \AA}$ ,  $n \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$  (B – островки, A – поверхность GaAs): увеличение 33000 (а) и 625000 (б).



**Рис. 4.** Поверхность Au–GaAs после селективного травления в  $1 \text{ HNO}_3 : 1 \text{ HCl} : 1 \text{ H}_2\text{O}_2$  (5 с) для пленок Au  $\sim 200$  (а) и  $\sim 250 \text{ \AA}$  (б), увеличение 1500; в прямоугольнике – Au  $\sim 500 \text{ \AA}$ , увеличение 550; изображение получено методом растровой электронной микроскопии.

диффузии и/или дрейфа в электрическом поле. Эти пятна являются основными местами зарождения и роста микрокапель Au + Ga + As.

По расстояниям между центрами капель можно определить длину волны  $\lambda$ , период  $\tau$  и частоту  $f = 1/\tau$  стоячей акустической волны, имея в виду  $\tau = \lambda/v$ , где  $v$  – скорость распространения волны. Как известно [12], для (100) GaAs максимальная скорость распространения волны  $v = 2600$  м/с в направлении  $30^\circ$  к [110].

При  $n \sim 10^{14}$  см $^{-3}$  и  $d \leq 50$  Å в узлах стоячей звуковой волны с регулярным периодом  $\sim 1.7 \times 10^{-10}$  с формируется капельная структура. Это соответствует  $f \sim 5.7 \times 10^9$  Гц и времени жизни неосновных носителей заряда – электронов на поверхности GaAs под воздействием облучения [10]. При толщине  $d \sim 100$  Å наблюдается разрушение капель.

При  $n \sim 10^{16}$  см $^{-3}$  и  $d \sim 100$  Å на поверхности (100) GaAs все еще остаются микрокапли. Частота поверхностной волны, судя по расположению капель,  $f \sim 10^{12}$  Гц, что соответствует оптическим колебаниям решетки и времени жизни неосновных носителей заряда – дырок. Разрушение микрокапель в этом случае происходит при толщине  $d \sim 150$  Å.

При  $n \sim 10^{15}$  см $^{-3}$  и  $d \leq 300$  Å пленка Au относительно гладкая.

### 3. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЕ И В ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

В процессе осаждения золота поверхность GaAs подвергается как воздействию частиц, входящих в состав испаряемого металла, так и облучению света (белого) со стороны разогретого испарителя. При этом реализуются реакции взаимодействия, рассмотренные ниже.

Поток испаряемого Au, достигший поверхности GaAs, включает в себя такие заряженные частицы, как ионы золота, а также нейтральные атомы, электроны и ионы остаточных газов [11]. Состав прибывающих на поверхность частиц в пучке испаряемого золота не только неоднороден, но и изменяется со временем осаждения. Как было показано ранее, сначала поверхность GaAs достигают электроны (20%), а затем (2%) ионы Au $^+$ , ионы остаточных газов вакуумной камеры и затем нейтральные атомы, т.е. поток испаряемого Au является слабо заряженной (пристеночной) плазмой [11, 13–15].

Под ударом налетевших частиц, как известно, передается эстафетно импульс ионам или атомам кристалла с фокусировкой вдоль плотно упакованных атомных рядов [110] GaAs [8]. Достигшие поверхности заряды из пучка испаряемого золота

рекомбинируют на ней. Следствием эффектов рекомбинации являются микровзрывы, сопровождающиеся выбросом материала: Ga, As и электронов [8, 13], что подтверждается экспериментами, проведенными нами дополнительно. Осаждение Au проводилось в условиях, когда над поверхностью GaAs на расстоянии 2 мм размещали перфорированную пластинку спектрально чистого угля с дырками – ячейками. Затем угольную пластинку исследовали с помощью химического спектрального анализа. Оказалось, что в ее составе обнаруживаются следы Ga и As. В результате микровзрывов на поверхности GaAs образуются дефекты, в частности, вакансии атомов Ga $^-$  или As $^+$ . Улетающие с поверхности атомы Ga и As захватываются парами золота и поступают обратно на поверхность GaAs. На поверхности GaAs возникают локальные неоднородности по распределению температуры, механических напряжений и поверхностных зарядов.

#### 3.1. Воздействие света разогретого испарителя

Интенсивность света  $J$ , проходящего через полупроводник, уменьшается как:

$$J = J_0 \exp(-KL); \quad E = E_0 \exp(-ax);$$

$$H = H_0 \exp(-ax),$$

где  $E_0$  и  $H_0$  – амплитуды напряженности электрического поля и магнитной составляющей [8, 10, 13],  $K$  – коэффициент поглощения света связан с электропроводностью  $\sigma(\omega)$ :  $K(\omega) \sim \sigma(\omega)$ ;  $L$  – расстояние, на котором интенсивность света  $J_0$  уменьшается в 2.7 раза;  $a$  – коэффициент затухания электромагнитной волны,  $x = 1/a = \lambda_D$  – радиус Дебая.

В результате вблизи поверхности формируется слой полупроводника в виде слоя типа тонкой пластинки, которая колеблется с частотой  $\omega$ , с эффективной толщиной  $L = \sqrt{v/\omega}$ , где  $v$  – кинематическая вязкость [8, 15]. Толщина пластины  $L$  определяется концентрацией электронов  $n$  в исходном GaAs вследствие эффекта экранирования. Экранирование является релаксационным процессом и связано с частотой релаксации  $\omega = \sigma/\epsilon$ , где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость [15, 16].

При вибрации тонкого слоя (пластинки) GaAs возбуждаются две продольные и две поперечные волны, распространяющиеся навстречу друг другу (рис. 5) [7, 8]. Первая резонансная частота может быть определена как  $f_{рез} = v/2L$ , где  $L$  – толщина слоя,  $v$  – скорость волны. Распространение волны связано с передачей энергии электронам проводимости и решетке, в результате происходит деформация решетки.

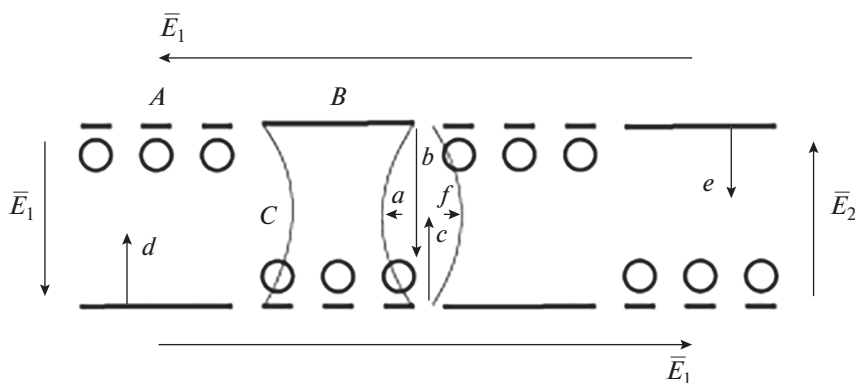


Рис. 5. Схематическое изображение распределения электрических полей в приповерхностном слое арсенида галлия.

### 3.2. Взаимодействие волновых процессов в приграничных слоях

Вибрация разрывает молекулярные связи, в результате чего соответствующие активные атомы, колеблющиеся в резонансе с возбужденной модой акустической волны, получают импульс для заполнения образованных ранее вакансий на поверхности. Свободные атомы занимают позиции вакансий: ионы  $\text{Ga}^+$  присоединяются к решетке GaAs при колебаниях ее с частотой волны акустического диапазона,  $\text{As}^-$  — за счет колебаний с частотой волны оптического диапазона. В результате в случае  $n < 10^{15} \text{ см}^{-3}$  приповерхностный слой GaAs обогащается ионами  $\text{As}^-$  и электронами, а образцы с  $n > 10^{15} \text{ см}^{-3}$  обогащаются ионами  $\text{Ga}^+$  и дырками. Это приводит к изменению поверхностного заряда, поверхностного потенциала и натяжения, а также к изменению встроенных полей на поверхности полупроводника. При  $n \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$  соотношение Ga/As  $\approx 1$ .

При распространении волны на поверхности GaAs возникают чередующиеся участки сжатия-растяжения. Этот эффект приводит к перераспределению атомов (ионов) Ga, As между участками. Заряженные частицы движутся как по поверхности GaAs, так и в плотном плазменном слое (см. рис. 5). В результате действия сил зеркального отображения электрические потенциалы движущихся навстречу друг другу волн имеют противоположные знаки.

Свободные ионы, молекулы, атомы, а также вакансии в приповерхностном слое выстраиваются в направлении, перпендикулярном к поверхности GaAs (область C). Их перераспределение происходит за счет эффектов затягивания (конденсаторный эффект) между сжатыми и растянутыми областями. При этом величина напряженности суммарного электрического потенциала между точками A–B складывается из электрической части ПАВ и поверхностного электрического потенциала.

Вместе с тем в точках между областями сжатия и растяжения A и B, как наименее напряженных, растет на затравках пленка в виде капель Au + Ga + As, регулярно расположенных на поверхности. Размер этих капель, а, следовательно, величина образующихся зерен и длина межзеренных границ будут зависеть от частоты поверхностной волны и скорости движения электронов и дырок.

В плотном плазменном слое толщиной  $\lambda_1$  возникают колебания с частотой  $\omega_1$  вблизи границы раздела с полупроводником, а в приповерхностном слое GaAs толщиной  $\lambda_2$  — с частотой  $\omega_2$ . При этом отношении  $\omega_1/\omega_2 \approx \lambda_2/\lambda_1$  [13, 14].

### 4. ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ Au–GaAs

*Принудительное растекание капель.* При эффективной толщине пленки золота  $d \sim 50 \text{ \AA}$  на поверхности GaAs с  $n < 10^{15} \text{ см}^{-3}$  обнаруживается растекание капель. Растекание капель осуществляется в основном по дугам интерференции света и по направлениям распространения стоячей акустической волны. В то же время в случае  $n > 10^{15} \text{ см}^{-3}$  растекание капель обнаруживается при  $d \sim 100 \text{ \AA}$  (см. рис. 2).

Оказалось, что высота капель  $l$ , как и размер их основания  $D$ , зависит от концентрации электронов в GaAs. Высота увеличивается, а диаметр уменьшается с увеличением  $n$ , что связано с расстояниями между центрами зародышеобразования и роста капель [6].

Принудительное растекание может осуществляться как из-за воздействия плазмы испаренного золота, так и под воздействием распространения акустических волн. Вероятность роста и/или растекания островков зависит также от вязкости текущего верхнего слоя (Au–Ga) и коэффициента смачивания GaAs [2, 8].

Рост капель вызывает положительный изгиб поверхности GaAs [2] что, в свою очередь, приво-



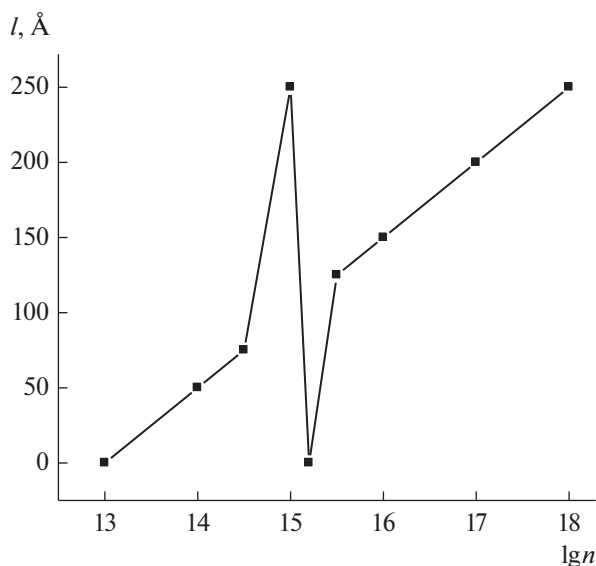


Рис. 6. Зависимость предельной высоты островков  $l = \lambda_D$  от концентрации электронов  $n$  на поверхности GaAs.

дит к скоплению электронов на вершинах капель и к изменению поверхностного потенциала [15].

**Выпадение микроостровков GaAs.** Первым на поверхность GaAs с микроостровка стекает внешний слой: Au с добавками Ga. В результате микрокапли на границе с GaAs находятся в состоянии, близком к растеканию и/или кристаллизации. Стеkanie приводит к пересыщению по As в каплях (Au + Ga + As): As плохо растворяется в Au или в Ga, но хорошо в растворе Au + Ga. Таким образом, создаются условия для затравки и роста микроостровков GaAs на поверхности GaAs, вытянутых перпендикулярно поверхности. Источником атомов галлия и мышьяка является как приповерхностный слой GaAs, так и слой плотной плазмы. Островки GaAs могут расти с небольшой капелькой раствора Au + Ga наверху по аналогии с ростом вискерсов ( $n > 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) [16]. Следует отметить, что кристаллы GaAs при небольшой температуре и избытке Ga, как правило, имеют гексагональную решетку. Вероятность роста определяется соотношением расстояний между каплями  $D$  и их высотой  $l$ . Исходя из того что на поверхности GaAs на границе между каплями возникает электрическое поле, величина  $D$  соответствует длине стоячей волны с частотой колебаний  $\omega_L^{-1}$ , а величина  $l \sim \omega_T^{-1}$ , т.е. отношение  $D/l$  соответствует  $\omega_L^{-1}/\omega_T^{-1}$ . Частоту  $\omega_L$  можно идентифицировать с частотой длинноволновых продольных оптических (ЛО) фононов, частоту  $\omega_T$  — с частотой поперечных оптических (ТО) фононов.

*Соотношения расстояний между каплями и их высотой.* Направленное движение электронов по

поверхности GaAs приводит к резистивному нагреванию, тогда как движение дырок — к охлаждению поверхности [9].

Из рис. 6 следует, что зависимость высоты  $l$ , по достижении которой происходит взрыв капель, соответствует выражению

$$l = l_0 \frac{\lg(n/n_{02})}{\lg(n_{01}/n_{02})}. \quad (1)$$

Предельный размер  $l = k \ln(n/n_{02})$ ,  $k = l_0/\ln(n_{01}/n_{02})$ ;  $n = n_{02} \exp(1/k)$ ; при уменьшении  $n$  в 2.7 раза  $l_0 = 21.7 \text{ Å}$ .

На поверхности капля как на остриях всегда скапливается заряд и электроны смещаются по отношению к ионам. В результате между зарядами на острие капля и поверхности подложки GaAs возникает электрическое поле  $E$ . Теперь расстояния между каплями и их высота  $l$  определяются как величиной концентрации электронов  $n_-$ , так и величиной напряженности поля  $E$ .

Как показано в [15],  $E = 4\pi en_- l$ , где  $e$  — заряд электрона,  $l \approx \lambda_D$  — расстояние, на которое все электроны смещаются в слое, равном высоте капли  $l$ . Увеличение потенциальной энергии заряда, прошедшего расстояние  $l$  в направлении этого поля, определяется по формуле

$$\Delta V = eEl = 4\pi e^2 n_- l^2.$$

В этом случае дебаевский радиус  $\lambda_D$  определяется из условия  $\Delta V = kT$ , где  $k$  — постоянная Больцмана, а  $T$  — абсолютная температура.

Соседние электроны и ионы со стороны вакуума располагаются в поле этого потенциала согласно распределению Больцмана [15]

$$\ln(n_-/n_+) = 2e\Phi_S/kT,$$

где  $n_+$  — концентрация ионов,  $\Phi_S$  — потенциал экранирующего слоя в области вблизи стенки — поверхности GaAs. Кроме того, за счет перемещения потенциалообразующих ионов  $\text{Ga}^+$  и  $\text{As}^-$  в приграничной области со стороны подложки GaAs возникает двойной электрический слой, потенциал которого задается выражением

$$\Phi_S = (kT/2e) \ln(N_+/N_-),$$

где  $N_+(\text{Ga}^+)$  и  $N_-(\text{As}^-)$  — концентрации соответствующих ионов [15].

Энергия активации увеличения высоты  $l$ , полученная из выражения (1), соответствует потенциалу  $\Phi_S$  и составляет  $\sim 0.066 \text{ эВ}$ .

Поскольку высоты капли  $l$  соответствует  $\lambda_1$  при  $\Delta V = \Phi_S$ , где  $\Phi_S/e$  — электростатический потенциал, ускоряющий электроны, то по величине

$\Phi_3$  равен кинетической энергии электронов в электрон-вольтах [13]:

$$\lambda_1 = 12.3(1/\sqrt{\Phi_3}) \text{ \AA}.$$

Из уравнения следует, что  $\Phi_3 \sim 0.009$  эВ соответствует переходу плоскости (100) GaAs в плоскость (111) GaAs. Отметим, что значение потенциала  $\Phi_3$  близко к значению энергии продольных акустических (LA) фононов  $\sim 0.008$  эВ.

Выражение (1) может быть записано в виде

$$n/n_0 = \exp((l/l_0)(1/\ln(n_{01}/n_{02}))),$$

что согласуется с выражением для электростатического потенциала  $\Phi$  вокруг заряда  $q$  [13]

$$\Phi = (q/r) \exp(-r/\lambda_D),$$

где  $q$  – величина заряда. Как видно экранировка будет полной уже на расстояниях  $r$  порядка несколько дебаевских радиусов.

*Разрушение и взрыв капель (электронная эмиссия).* На картинах поверхности фиксируется разрушение и взрыв капель (Au + Ga + As), что, как известно, связано с эмиссией электронов [8, 13] и образованием плотной плазмы (см. рис. 1–4). Как следует из рис. 6, предельная высота капель  $l$  до разрушения определяется концентрацией электронов на поверхности GaAs. Это указывает на формирование над поверхностью арсенида галлия экранирующего слоя, толщина которого определяется концентрацией электронов и температурой поверхности. Потенциальным барьером, определяющим выход электронов с поверхности, является потенциал экранирующего слоя [13].

При  $n \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и  $d \sim 100 \text{ \AA}$  разрушение капель (взрыв острия), судя по всему, является следствием шнурования тока в каплях перпендикулярно поверхности (направление  $E$  от отрицательно заряженной поверхности GaAs к вершине капли).

При  $n > 10^{15} \text{ см}^{-3}$  разрушение капель осуществляется вследствие пробоя (направление  $E$  от вершины капли к положительно заряженной поверхности GaAs). Положительно заряженная поверхность формируется за счет увеличения концентрации дырок и автоэлектронной эмиссии, поверхность полупроводника охлаждается (эффект Ноттингема).

Таким образом, поскольку  $\lambda_D$  определяется частотой колебаний поверхности, предельная величина  $l$  в области  $n < 10^{15} \text{ см}^{-3}$  при разогреве поверхности меньше, чем в области  $n > 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , за счет ее охлаждения.

В случае  $n \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$  вначале осаждения Au зарождение и рост островков осуществляются в согласии с теорией роста: в точках зарождения и роста островков Au возникают механические напряжения на поверхности GaAs. Это, как известно, приводит к возникновению упругой деформационной волны [9]. В отсутствие синхронизма частоты

колебаний могут быть любыми. Этот факт дает возможность предположить, что при облучении светом поверхность GaAs с  $n \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$  отражает свет.

Для образцов с  $(10^{15} > n > 10^{15}) \text{ см}^{-3}$ , судя по всему, именно колебания пластинки такого рода являются синхронизирующими, навязывающими свою частоту.

*Особенности поверхности при  $n \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .* С увеличением толщины Au до  $d \sim 250 \dots 300 \text{ \AA}$  на отдельных дислокациях возникает рекомбинация электронов (см. рис. 16). Рекомбинация электронов приводит к взрыву, сопровождающемуся выбросом материала (Ga, As и электронов) и возникновению колебаний поверхности с частотой волны акустического диапазона  $f = 2 \times 10^9 \text{ Гц}$ . В этом случае наблюдается диффузия материала (атомов галлия) со скоростью волны. В узлах стоячей акустической волны формируются капли. При достижении высоты капель  $l > 250 \text{ \AA}$ , достаточной для возникновения эмиссии, возникает их разрушение с образованием кратера (эктон [8]) (см. рис. 1а). Частота волны, синхронизирующая систему колебаний, соответствует длинноволновой поверхностной акустической волне, возникающей вследствие эффектов рекомбинации на дислокациях. Эти дислокации окружены эмиссионным материалом, мигрирующим по поверхности со скоростью распространения акустической волны. Рекомбинация зависит от времени жизни электронов и дырок. Влияние выделенной энергии на решетку может быть таким сильным, что может происходить быстрая эрозия материала.

*Формирование микрополосок.* В результате взрыва (рекомбинации) капель (Au + Ga + As) на поверхности GaAs (см. рис. 1–4) формируются регулярные микрополоски, заполненные раствором Au + Ga + As. Затем, при увеличении толщины Au трещины заполняются выпавшими микроостровками GaAs гексагональной фазы.

Рассмотрим характерные примеры формирования полосок.

1. GaAs с  $n \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $d \sim 100 \text{ \AA}$ . Полоски разделены одинаковым расстоянием (см. рис. 2б), соответствующим длине стоячей волны с  $f \sim 8 \times 10^{11} \text{ Гц}$ . Эта частота соответствует ионно-плазменным колебаниям в GaAs и соотносится со временем жизни неосновных носителей – дырок на поверхности GaAs. При этом формируется множество микроостровков GaAs (гексагональной фазы), плотно прижатых друг к другу и выращенных на этих полосках.

Микроостровки GaAs имеют вытянутую грань, повернутую по отношению к полоскам на угол  $60^\circ$ . Наиболее развитая грань кристалла, как известно, располагается перпендикулярно к направлению теплоотвода. Теплоотвод в данном случае коррелирует с направлением электрического дрейфа заря-

женных частиц или с диффузией. Как показано на рис. 1а, микрокапли движутся по поверхности GaAs преимущественно в одном направлении:  $30^\circ$  относительно [110]. Ранее при меньшей толщине Au эти капли находились на вершине микроостровков GaAs. Микрокапли дрейфуют в направлении внутреннего электрического поля: максимальный коэффициент электромеханической связи расположен под углом  $30^\circ$  к [110] GaAs. Преимущественное движение капель в одну сторону объясняется, скорее всего, отрицательным знаком заряда капель Ga + Au (ввиду малого размера), а также геометрической формой выпавших микроостровков GaAs. Распределение этих капель соответствует стоячей волне с  $f \sim 4 \times 10^{10}$  Гц, близкой к частоте циклотронного резонанса электронов. При движении по поверхности GaAs капли собирают материал окружающей среды и имеют в своем составе Au + Ga + As. Таким образом, формируется еще одна поверхностная субструктура. При увеличении  $d$  Au эти капли становятся источниками роста островков GaAs, вытянутых перпендикулярно поверхности в виде усов.

2. GaAs с  $n \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $d \sim 300 \text{ \AA}$ . Микрополоски распределены по поверхности GaAs с шагом, соответствующим  $f \sim 1.2 \times 10^{10}$  Гц, что соответствует колебаниям с частотой акустического диапазона. При этом наблюдается диффузия Ga в направлении электрической составляющей акустической волны.

3. GaAs с  $n \sim (10^{16} - 10^{18}) \text{ см}^{-3}$ ,  $d \sim 500 \text{ \AA}$ . Микрополоски распределяются с шагом, соответствующим  $f \sim (1.2 \dots 1.5) \times 10^{10}$  Гц. Островки GaAs развернуты на  $60^\circ$  по отношению к направлению полосок (см. рис. 4б).

Перечисленные выше эффекты имеют следующее объяснение. Поскольку GaAs является хрупким материалом, взрыв микрокапель вызывает образование микротрещин на поверхности GaAs. Направление микротрещин совпадает с направлением  $[1\bar{1}0]$  на (100) GaAs, которое состоит из атомных цепочек As. Формирование канавок с определенной регулярностью приводит к образованию структуры поверхности, аналогичной дифракционной решетке для падающего света от нагретого испарителя (GaAs имеет слабые пьезоэлектрические свойства) [8]. В результате механических напряжений возникают акустические волны со своей частотой. В этом случае также присутствует дифракция света на акустической волне. Сгруппированные вместе дифракционные пятна расположены вдоль линий трещин. Они являются основными центрами стекания свободных атомов и ионов. Когда трещины заполняются посторонними атомами, они растут и развиваются, а оставшиеся свободные трещины схлопываются.

*Потенциальная энергия эмиссии электронов (разряд).* Из соотношения частоты колебаний поверх-

ности GaAs до разрушения (взрыва) капель  $\omega_1$  и после  $\omega_2$ , т.е. при переводе системы из одного состояния в другое, можно было определить потенциальную энергию, при которой происходит эмиссия электронов. Оказалось, что для GaAs при  $n < 10^{15} \text{ см}^{-3}$  разряд происходит при частоте поперечных оптических (ТО) колебаний с энергией 0.033 эВ [10, 12], тогда как при  $n > 10^{15} \text{ см}^{-3}$  — при частоте длинноволновых продольных оптических (ЛО) колебаний с энергией 0.029 эВ.

При  $n \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$  разряд происходит при частоте длинноволновых продольных акустических (ЛА) колебаний с энергией 0.023 эВ.

Как показано в [14], для GaAs отношение квадратов частот ТО-колебаний и ЛО-колебаний для малых волновых векторов  $K$  равно

$$\omega_T^2 / \omega_L^2 = \epsilon(\infty) / \epsilon(0),$$

где  $\epsilon(0)$  — статическая диэлектрическая проницаемость,  $\epsilon(\infty)$  — высокочастотная (оптическая) диэлектрическая проницаемость, обусловленная смещением электронных облаков относительно ионов. Подставляя числа, получаем

$$\frac{\omega_L}{\omega_T} = \sqrt{\frac{\epsilon(0)}{\epsilon(\infty)}} = 1.08.$$

Следует отметить, что величина  $D$  соответствует длине стоячей волны с частотой колебаний  $\omega_L^{-1}$ , а величина  $l \sim \omega_T^{-1}$ , при  $\omega_L / \omega_T \approx D/l$  имеем  $\omega_L^{-1} / \omega_T^{-1} \approx 1.07$ .

Падающий на поверхность среды свет с частотой  $\omega_T < \omega < \omega_L$  не будет распространяться, а будет отражаться от ее границы. Что и происходит при  $n \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Атомы, ионы и электроны в потоке термически испаряемого золота в вакууме обмениваются с атомами поверхности GaAs энергией и электронами (физические и химические эффекты адсорбции). Облучение образца светом от разогретого испарителя вызывает возникновение фотоэффектов в приповерхностных слоях GaAs. Реакции взаимодействия на границе Au–GaAs приводят к изменению электрического потенциала как в направлении, перпендикулярном поверхности, формируя потенциал двойного электрического слоя, так и в плоскости поверхности. Возникает концентрационная, деформационная и термическая нестабильность в приповерхностных слоях. При этом возбуждаются волны акустического при концентрации электронов  $n < 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и оптического диапазона при  $n > 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Синхронизм колебаний связан с поглощением света разогретого испарителя. При  $n \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$  вследствие отражения света синхронизм колебаний обеспечи-



вается на плоскости эффектами рекомбинации заряженных частиц на отдельных дислокациях. На картинах поверхности образцов GaAs фиксируется разрушение и взрыв капель (Au + Ga + As), что связано с эмиссией электронов. В случае образцов с  $n < 10^{15} \text{ см}^{-3}$  эмиссия электронов происходит вследствие разогрева за счет шнурования тока, а в случае с  $n > 10^{15} \text{ см}^{-3}$  — за счет охлаждения поверхности. Эмиссия электронов приводит к растрескиванию поверхности GaAs и росту кристаллитов GaAs гексагональной фазы. Все это в конечном итоге определяет зависимость электрофизических параметров контактов металл–GaAs от концентрации электронов в образцах.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0030-2019-0012.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черняев В.Н. Физико-химические процессы в технологии РЭА. М.: Высш. шк., 1987.
2. Гладков С.О. Физика композитов. Термодинамические и диссипативные свойства, М.: Наука, 1999.
3. Брянцева Т.А., Любченко Д.В., Марков И.А., Тен Ю.А. // Журн. радиоэлектроники. 2019. № 6. <http://jre.cplire.ru/jre/jun19/9/text.pdf>.
4. Брянцева Т.А., Любченко Д.В., Любченко В.Е. и др. // ФТП. 2014. Т. 48. № 2. С. 196.
5. Брянцева Т.А., Любченко В.Е., Любченко Д.В. и др. // РЭ. 2009. Т. 54. № 5. С. 621.
6. Lioubtchenko D.V., Briantseva T.A., Lebedeva Z.M. et al. // Defect and Diffusion Forum. 2001. V. 194–199. P. 745.
7. Брянцева Т.А., Марков И.А., Тен Ю.А. // РЭ. 2021. Т. 66. № 5. С. 490.
8. Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1983.
9. *Laser Annealing of Semiconductors* / Eds. by J.M. Poate, J.W. Mayer. N. Y.: Academic, 1982.
10. Арсенид галлия в микроэлектронике / Под ред. Н. Айнспрука, У. Уисмена. М.: Мир, 1988.
11. Брянцева Т.А., Любченко В.Е., Юневич Е.О. // РЭ. 1987. Т. 10. № 11. С. 2231.
12. Физические величины. Справочник. Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова М.: Энергоатомиздат, 1991.
13. Кристи Р., Питти А. Строение вещества: введение в современную физику. М.: Наука, 1969.
14. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.
15. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. М.: Химия, 1982.
16. Тонких А.А., Цырлин Г.Э., Самсоненко Ю.Г. и др. // ФТП. 2004. Т. 38. № 10. С. 1260.