

ИЗМЕНЕНИЕ РАССЕЯННОЙ МОЩНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ ПО ПОВЕРХНОСТИ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ В ПРОЦЕССЕ ОСАЖДЕНИЯ ПЛЕНОК ЗОЛОТА

Т.А. Брянцева^{1*}, Д.В. Любченко², И.А. Марков¹, Ю.А. Тен¹

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской Академии Наук (Фрязинский филиал), пл. акад. Введенского 1, Фрязино, Московская обл., 141190, Россия

²Department of Radio Science and Engineering, Aalto University School of Science and Technology, PL 13000, FI-00076 AALTO, Finland

*e-mail: tatiana@ms.ire.rssi.ru

Аннотация. Проведены исследования изменения потерь мощности поверхностных акустических волн в приповерхностных слоях высокоомного арсенида галлия в процессе осаждения золота. Обнаружено, что такие характеристики распространения поверхностных акустических волн, как амплитуда и, определяемые из нее колебания величины потерь на распространение, в силу особенностей расположения их векторов, отражают изменения структуры и состава в приграничных слоях Au-GaAs по мере осаждения золота в плоскости, перпендикулярной к поверхности GaAs. Спектральная характеристика рассеянной мощности отражает главным образом агрегатное состояние приповерхностных слоев и возможность поворота кристаллизованных островков в согласии с распределением линий напряженности (деформации или электрического поля) в приповерхностном слое. Изменение величины потерь энергии поверхностных акустических волн характеризуется не только числом выпавших островков, но и связано с типом деформации приповерхностного слоя.

1. Введение

Изучению физико-химических процессов на границе металл-полупроводник, в частности, Au-GaAs, посвящено достаточно большое число работ [1-4]. В частности, в [4] было обнаружено, что изменение внутреннего трения в системе Au-GaAs, *in situ* с увеличением температуры (при отжиге) зависит от физико-химических реакций на границе Au-GaAs.

Кроме того, в работах, опубликованных ранее [5-7] было показано, что изучение характера изменения параметров распространения (амплитуды и фазы) поверхностных акустических волн (ПАВ) со временем осаждения золота в условиях протекания физико-химических реакций в системе Au-GaAs и перестройки приповерхностного слоя GaAs представляет интерес, как с точки зрения определения возможностей ПАВ диагностики, так и в связи с тем, что появляется возможность уточнить природу указанных процессов.

Из представлений молекулярной акустики и теории адсорбции-десорбции атомов (ионов) следует, что изменения поглощения ПАВ в арсениде галлия зависят от того,

какие именно степени свободы возбуждаются в приповерхностном слое под воздействием паров осаждаемого золота. В рассматриваемом случае в системе Au-GaAs такими процессами могут быть [3, 5-9]:

1. колебательные или вращательные движения молекул (атомов, ионов галлия, мышьяка и золота, а также примесей) или диполей;
2. установление равновесия при химических реакциях образования соединений на базе твердого раствора Au-Ga-As;
3. перестройка молекулярной структуры, например, в жидкой фазе Au-Ga или аморфного природного оксида GaAs за счет увеличения содержания золота;
4. процессы сдвиговой деформации с изменением поверхностной энергии GaAs;
5. взаимодействие с поверхностными зарядами, в том числе и с электронами, поступающими на поверхность GaAs от испарителя;
6. взаимодействие с фононами, возникающими в частности в виде дробового шума вследствие ударов по поверхности GaAs частиц из поступающего на поверхность пучка испаряемого Au или, как результат фазовых превращений и другими элементами возбуждения.

Как известно, по поглощению звука, можно определить значение сдвиговой вязкости, объемной вязкости, время релаксации τ_r , по скорости звука: сжимаемость, отношение теплоемкостей c_p/c_v , модули упругости твердого тела и др.

В настоящей работе проводились исследования процессов взаимодействия в системе пары золота – GaAs с помощью построения Фурье-образов колебания величины рассеянной мощности ПАВ.

2. Методика и техника эксперимента

Исследования процесса осаждения пленки золота с помощью ПАВ проводились в так называемом коммерческом вакууме (до 10^{-7} Торр). При этом высокочастотные сигналы передавались через имеющиеся токовые вводы (Рис. 1).

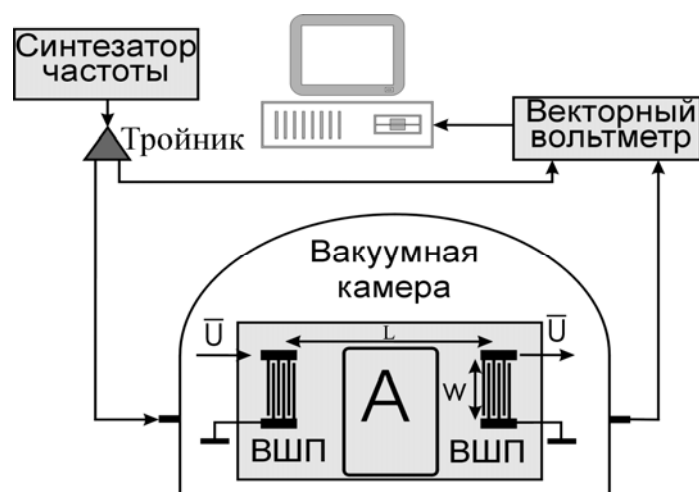


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения параметров прохождения ПАВ: А – исследуемая область, IDT – встречно-штыревые преобразователи, W – апертюра ВШП, \bar{U} – напряжение на входе и на выходе.

Образцами служили пластины из полуизолирующего (111) GaAs размером $30 \times 23 \text{ мм}^2$, на поверхность которых для возбуждения и регистрации ПАВ были нанесены тонкопленочные алюминиевые встречно-штыревые преобразователи (ВШП),

работающие на центральной частоте 65 МГц. Перед проведением экспериментов поверхность образцов очищалась изопропиловым спиртом. Площадь облучения составляла $10 \times 15 \text{ мм}^2$, апертура ВШП – $W = 3.5 \text{ мм}$, расстояние между ВШП – $L = 15.5 \text{ мм}$. Амплитуда и фаза выходного сигнала ПАВ измерялись через равные промежутки времени 0.5 с.

Выбранная методика измерения параметров поверхностной акустической волны распространяющейся между ВШП, позволяла измерять амплитуду ПАВ с точностью до $\pm 0.01 \text{ дБ}$, фазу – до $\pm 1^\circ$, интервалы отсчетов времени с точностью до 10 мс. Потери во всем измерительном тракте до начала воздействия составляли 32 дБ. Максимальное значение выходного сигнала синтезатора частоты 0.7 В, волновое сопротивление тракта 50 Ом.

Измерения параметров ПАВ (амплитуды и фазы) проводились непосредственно до, во время и после осаждения пленки золота толщиной $\sim 2000 \text{ \AA}$. Осаждение золота осуществлялось за два последовательных цикла из двух испарителей: I – толщина пленок Au = (0–1000) \AA , II – толщина пленок Au = (1000–2000) \AA . Скорость осаждения в первом цикле составляла $\sim 0.86 \text{ \AA/с}$, а во втором цикле $\sim 1.75 \text{ \AA/с}$.

Оценка потерь энергии при распространении ПАВ. Мощность акустической волны на входе в пространство взаимодействия можно определить как $P_{AM} = P_B / X_0$, где $P_B = U_B^2 / R$ – мощность электромагнитной волны поступающей на вход образца, U_B – напряжение на входе образца, R – волновое сопротивление тракта, X_0 – потери на преобразование ВШП.

Измеряемая на опыте величина A – амплитуда относительно опорного сигнала $A = -10 \lg(P_{OK} / P_{ИК})$ (индекс ОК – опорный канал, ИК – измерительный канал) связана с потерями в тракте соотношением $X = 10^{-A/10}$.

В отсутствие воздействия внешних факторов на кристалл потери X обусловлены только потерями преобразования в ВШП и у нас два идентичных преобразователя: $X_0 = 10^{-A_0/20}$; $P_{AM0} = P_B / X_0 = U_B^2 / R \cdot 10^{A_0/20}$.

Рассмотрим случай с внешним воздействием. Поскольку мы считаем, что все процессы протекают только в области между ВШП, то $A = A_0 - A_1$, где A_1 – измеренная амплитуда при воздействии. Следовательно $X_1 = 10^{-(A_0 - A_1)/10}$, а

$$P_{AM1} = P_{AM0} / X_1 = (U_B^2 / R) 10^{(3A_0 - 2A_1)/20}. \quad (1)$$

Теперь можно оценить энергию, поглощаемую за время воздействия t_1 в приповерхностном слое GaAs в области, между преобразователями:

$$E = \int_{t=0}^{t_1} P_{AM1}(t) dt. \quad (2)$$

Полученные результаты изменения параметров распространения ПАВ в течение процесса, сравнивались с результатами исследований, проведенных, с помощью оптической микроскопии, электронной микроскопии, дифракции электронов высокой энергии (HEED), а также методов прецизионного химического анализа [3].

Изменение величины рассеянной мощности ПАВ. Зависимость величины поглощенной мощности ПАВ P от времени осаждения золота t на поверхности GaAs представлена на рис. 2. Для аппроксимации зависимости P от t и определения энергии активации изменения P график, изображенный на рис. 2, разбивался на части (1-7).

I цикл осаждения золота (0–1000) Å соответствует участкам 1–4, рис. 2. Как известно, до нанесения пленки золота на поверхности GaAs всегда присутствует природный слой оксида, имеющий аморфную или поликристаллическую структуру, состоящую из оксидов галлия, мышьяка или GaAsO_4 и т.д. В начале осаждения при толщине пленки золота ~ 10 Å структура и состав поверхности GaAs меняется. Слой оксида уплотняется и, как правило, приобретает структуру, соответствующую α - или β - Ga_2O_3 [3]. Преобразование окисного слоя происходит по реакции $\text{Ga}_2\text{O} + \text{Ga} \leftrightarrow \text{Ga}_2\text{O}_3$. Атомарный галлий легко вступает во взаимодействие с атомами испаряемого золота с образованием островков на основе соединений Au_7Ga_3 или Au_3Ga .

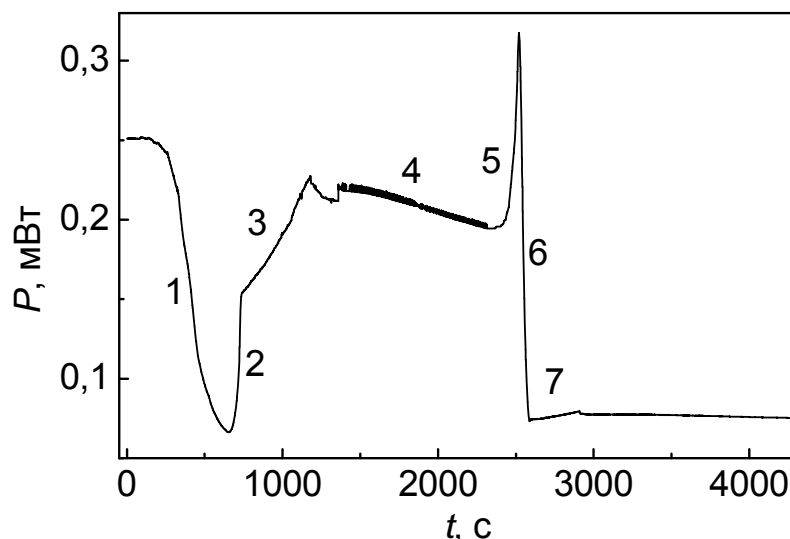


Рис. 2. $P(t)$: выделенные участки (1-7).

Уменьшение величины потерянной мощности ПАВ по мере роста пленки золота обусловлено, по-видимому, образованием плотного слоя оксида, толщина которого определяется наличием свободного галлия.

Вместе с тем в области толщины Au (0–500) Å (часть 1, рис. 2), вычисляемой из значений амплитуды, зависимость $P(t)$ имеет характер, близкий к экспоненциальному закону. Энергия активации изменения мощности ПАВ при этом соответствует энергии образования кристаллитов твердого раствора на базе соединения Au_7Ga_3 или Au_3Ga , то есть, контролируется скоростью химической реакции. В то же время с увеличением толщины слоя золота островки Au_7Ga_3 или Au_3Ga растворяются в растущем слое металла. Поэтому увеличение поглощения мощности ПАВ на участке часть 2 (рис. 2) определяется формированием жидкой фазы в системе Au-Ga-As. Одновременно вследствие частичного растворения приповерхностного слоя GaAs в растворе на базе Au-Ga выпадают островки гексагонального GaAs преимущественно параллельно поверхности GaAs и после точки перегиба между участками 1 и 2 перпендикулярно поверхности GaAs. С увеличением толщины осаждаемого золота увеличение поглощения определяется скоростью растворения уже неправильно ориентированных по отношению к подложке островков GaAs участок – 3. Участок 4 – прекращение поступления испаряемого золота на поверхность.

II цикл осаждения золота (1000–2000) Å соответствует участкам 5–7, рис. 2. Здесь также отмечается образование жидкой фазы (часть 5) и, кроме того, кристаллизация чистого золота в виде дендритов и островков GaAs – часть 6.

Аппроксимация выделенных участков (1–7) кривой $P(t)$ представлена на рис. 3. Как можно видеть, из рис.3, выражения, описывающие зависимости P от t на стадиях

осаждения I: толщина слоя до 1000 Å и II: толщина слоя золота (1000–2000) Å отличаются друг от друга.

В случае I эти выражения соотносятся с поверхностными явлениями, в случае II с объемными явлениями, происходящими в приповерхностных слоях GaAs. Ранее, в первом случае возникают механические напряжения типа сжатия-растяжения приповерхностного слоя арсенида галлия во втором – деформация сдвига [9].

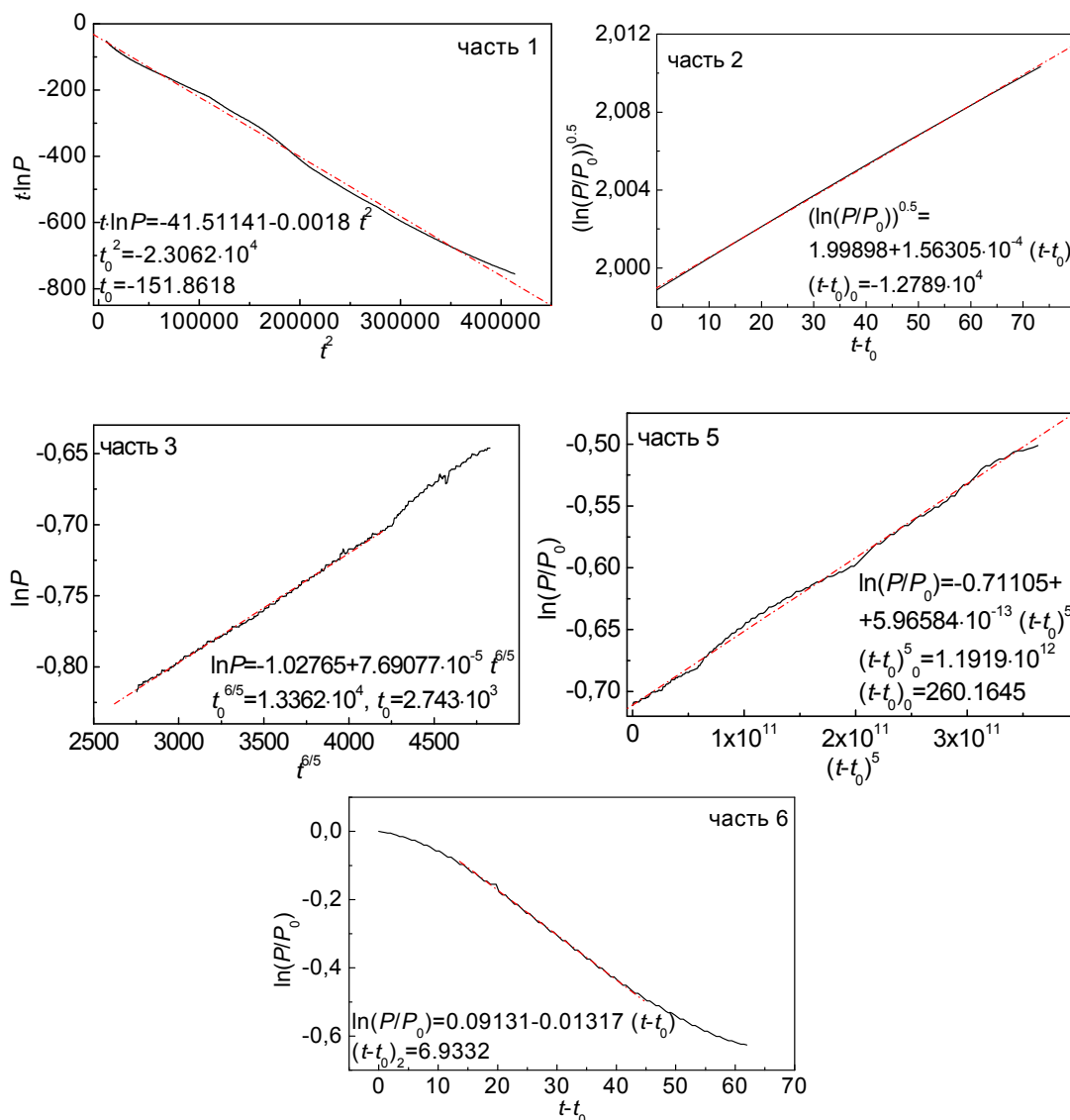


Рис. 3. Аппроксимация основных участков $P(t)$ (штрих-пунктир).

Фурье-образы колебаний величины $P(t)$. Фурье-образы зависимостей $P(t)$ представлены на рис. 4.

1). *Время осаждения (0–600) с, часть 1.* На начальном этапе спектральная характеристика $P(t)$ имеет вид непрерывной кривой с присутствием мелкой ряби. Вид спектральной характеристики, скорее всего, отражает реакцию образования слоя твердого раствора на основе Au-Ga на границе с GaAs. В определенном диапазоне спектра наблюдается сложный «сигнал» (часть 1), соответствующий по времени образованию дефектов, в частности, галлия, не связанного с решеткой. Периодичность

«сигнала» $f_0 = 1/\tau_0 \approx 0.5$ Гц соответствует вероятности протекания реакции образования соединений Au_7Ga_2 или Au_3Ga в виде мелких кристаллитов.

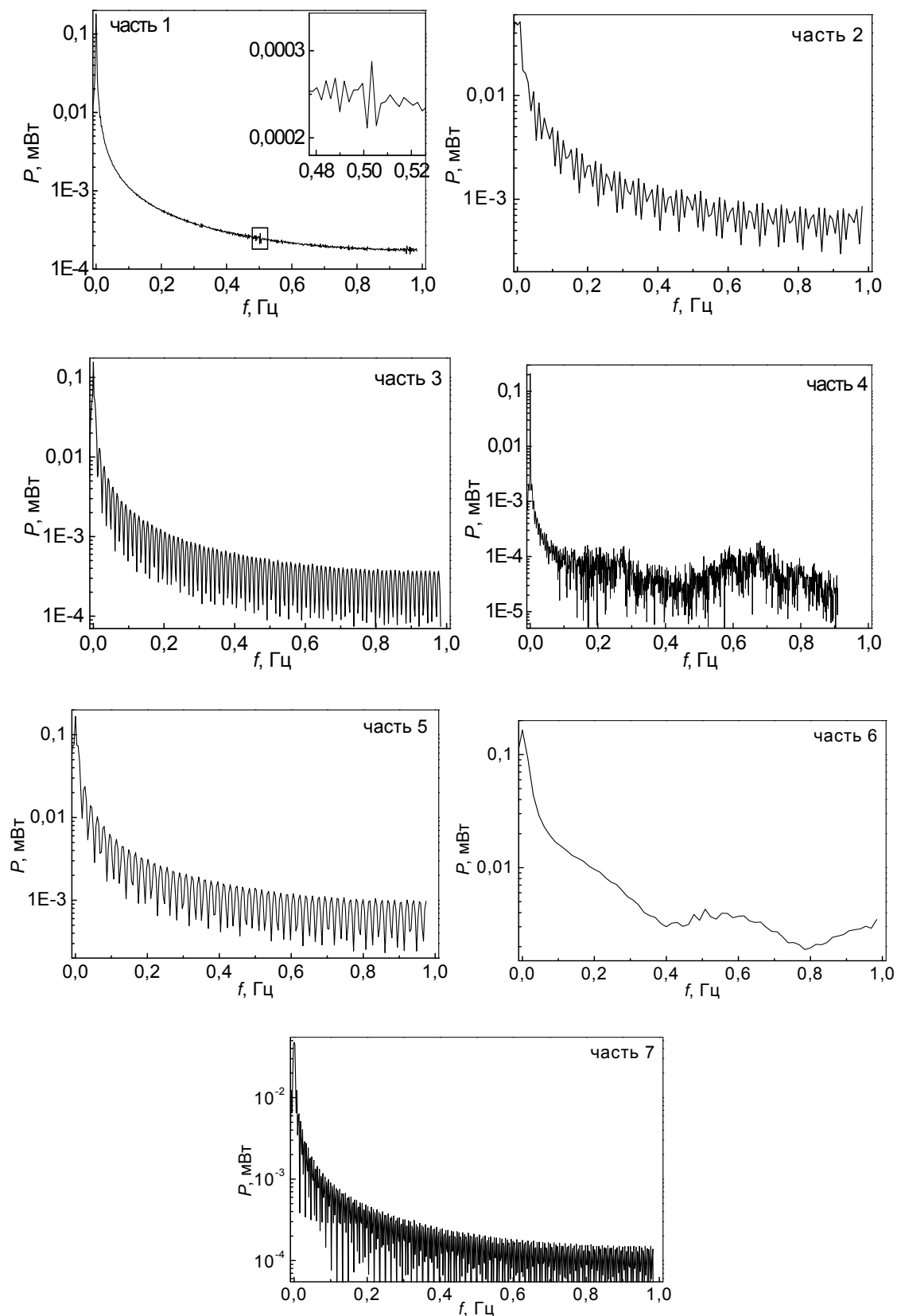


Рис. 4. Фурье-образы $P(f)$ частей $P(t)$: 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 7 (рис. 2).

Кристаллиты, как известно, стремясь расположиться развитой гранью параллельно поверхности GaAs, поворачиваются перпендикулярно к силовым линиям электрического поля или к направлению механического напряжения (арсенид галлия – пьезоэлектрик).

Величина рассеянной мощности при этом определяется углом разворота. Поскольку вращение в вязком растворе затруднено, кристаллиты располагаются хаотично, соответственно, спектр рассеянной энергии становится широким.

2). *На отрезке времени (660–730) с, рис. 4, часть 2.* реакция взаимодействия сдвигается в сторону образования жидкой фазы. С уменьшением вязкости поворот кристалликов облегчается, и спектр поглощения становится дискретным. Он также имеет сложный вид, скорее всего, за счет формирования и поворотов кристаллических островков на базе соединений Au-Ga и островков GaAs.

3). *Время осаждения (730–1200) с, рис. 4, часть 3.* Колебательный спектр поглощения (рассеяния) регулярно дискретный и определяется главным образом эффектами поворотов островков GaAs в жидкой фазе Au-Ga-As, по краям участков кристаллизующегося золота.

В этом случае островки GaAs стремятся встать вытянутой гранью перпендикулярно к поверхности, поскольку диффузия атомов происходит в направлении параллельном поверхности GaAs вследствие кристаллизации золота.

4). *Участок 4 (1200–2300) с, рис. 4, часть 4.* При выключении испарителя прекращается поступление атомов, ионов и электронов из газовой фазы на поверхность GaAs, спектр колебаний соотносится с эффектами релаксации. Спектральная характеристика представляет собой наложение нескольких спектров. В приповерхностных слоях в этом случае осуществляется уменьшение механического напряжения за счет поворотов плоскостей ориентационными силами, стремящимися согласовать решетки островков GaAs, выпавших ранее, с базисной решеткой арсенида галлия.

5). *Участок 5 (2300–2500) с, рис. 4, часть 5.* Жидкая фаза Au-Ga образуется по краям участков кристаллического золота [9].

Выпавшие ранее островки GaAs поворачиваются в соответствии с линиями напряженности, распределенными по поверхности. Колебательный спектр поглощения (рассеяния) становится регулярно дискретным.

6). *На участке 6, 2500–2590 с, рис. 4* величина рассеянной мощности определяется эффектами солидификации. Спектр колебаний становится размытым.

7). *На участке 7, 2600–2900 с, рис. 4.* Спектральная характеристика соответствует процессам релаксации и представляет собой картину наложения нескольких колебаний.

Таким образом, спектральная характеристика рассеянной мощности ПАВ отражает главным образом агрегатное состояние приповерхностных слоев и возможность поворота кристаллизованных островков в согласии с распределением линий напряженности (деформации или электрического поля) в приповерхностном слое.

3. Величина рассеянной энергии

Используя значения мощности P , можно определить энергию ПАВ E , рассеянную вследствие изменения условий распространения (среды) при осаждении Au. Зависимость E от времени осаждения золота t представлена на рис. 5. С целью аппроксимации и определения энергии активации изменения рассеянной энергии от времени осаждения кривая зависимости $E(t)$ также разбивалась на части (1-5), как это показано на рис. 5.

Как можно видеть, кривая $E(t)$ состоит из отрезков (1, 3, 5) с прямой зависимостью от времени осаждения, отличающихся друг от друга величиной наклона, то есть, скоростью изменения $E(t)$ и лишь в переходных участках (2, 4) имеет более сложный характер.

Если в случае переходной характеристики 2 изменение энергии можно увязать с движением структурных единиц по поверхности, то в случае 4 – с движением в объеме.

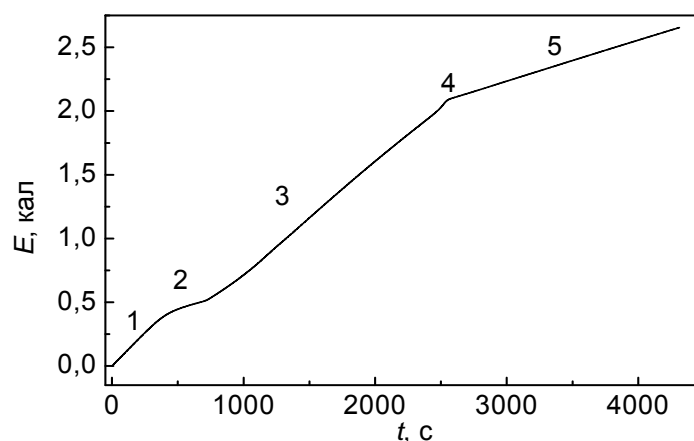


Рис. 5. Изменение рассеянной энергии в процессе осаждения пленки золота.

В случае 2 изменение рассеянной энергии ПАВ связано, скорее всего, с изменением сдвиговой вязкости, то есть движение дефектов осуществляется в основном по поверхности кристалла. В случае 4 – изменение рассеянной энергии ПАВ происходит за счет изменения объемной вязкости приповерхностного слоя. Движение дефектов происходит в объеме приповерхностного слоя кристалла.

Потери энергии ПАВ фиксируют агрегатное состояние приповерхностного слоя и отражение (рассеяние) от выпавших островков [11]. Разница в наклонах на кривой $E(t)$ указывает, скорее всего, на изменение скорости роста, что находится в соответствии с работами [12, 13].

Число выпавших кристаллитов, как известно, определяется количеством заряженных дефектов на поверхности и определяется индексом плоскости подложки. То есть, отрезки на кривой $E(t)$ соответствуют определенной плоскости GaAs. Аппроксимация участков 2, 4 рис. 6 указывает на механизмы смены ориентации.

Известно, что ориентация поверхности кристалла меняется с изменением количества дефектов [11], число которых при изменении напряжения (механического или электрического) на поверхности зависит от их подвижности. В кристаллах, содержащих примеси, включая свободные ионы галлия, мышьяка и их вакансии, подвижность отрицательно заряженных дефектов определяется как [12]:

$$\delta_- \cong \delta_0 (n_i/n_0) \exp(-E_-/RT), \quad (3)$$

где E – энергия активации перескока атомов между соседними междоузлиями, n_i/n_0 – концентрация примесей. Когда избыточные заряды создаются примесными атомами, выполняется соотношение $n \approx n_i$. Частота успешных перескоков $\nu \approx \nu_0 \exp(-E/RT)$, ν_0 – собственная максимальная частота кристалла, что, по-видимому, и наблюдается на первом этапе осаждения металла – I, когда механическое напряжение возникает в направлении параллельном поверхности. В случае, когда избыточные заряды создаются

собственными дефектами, $\exp(-W/2RT) \approx n_i/n_0$, где W – энергия образования дефектов. Реальный коэффициент самодиффузии $D = D_d(n/n_0)$, поскольку в твердых телах диффузия осуществляется только через посредство диффузии дефектов n/n_0 . Таким образом,

$$D_d \approx a^2 \nu_0 \exp(-E/RT) \text{ и } D \approx a^2 \nu_0 \exp(-(W + E_-)/RT), \quad (4)$$

где a – размер элементарной ячейки, что и выполняется для случая II.

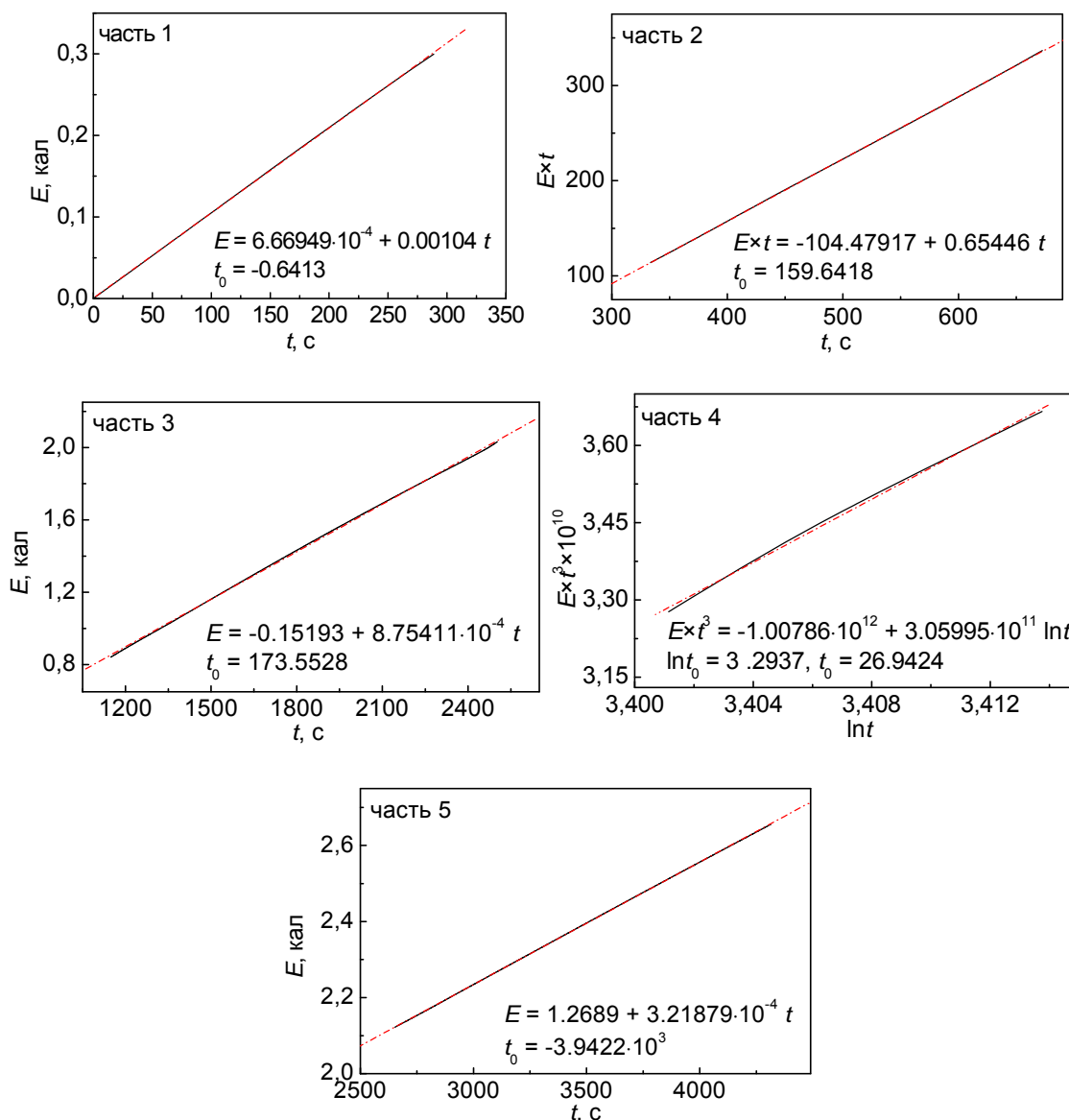


Рис. 6. Аппроксимация участков кривой $E(t)$.

В то же время скорость образования центров конденсации определяется вероятностью их генерации: $I = A_1 \exp(\Delta G/RT)$, где ΔG – энергия Гиббса зародышеобразования, а скорость переноса материала к центрам конденсации: $U = A_2 \exp(E_\eta/RT)$, где E_η – энергия вязкого потока, энергия переноса материала

начальной фазы на поверхность зародыша. Отсюда скорость роста зародыша определяется величиной [14]:

$$v = A_3 \exp((\Delta G + E_\eta) / RT). \quad (5)$$

Таким образом, количество кристаллизованных островков, а, следовательно, и потери ПАВ по мощности и энергии связаны с изменением величины энергии Гиббса и вязкостью слоя.

4. Выводы

Изменение величины потерь ПАВ при распространении по поверхности GaAs в процессе осаждения золота отражает процессы физико-химического взаимодействия в системе Au-GaAs в плоскости, перпендикулярной к поверхности. Спектральная характеристика рассеянной мощности в зависимости от времени осаждения отражает главным образом агрегатное состояние приповерхностных слоев и возможность поворота кристаллизованных островков в согласии с распределением линий напряженности (деформации или электрического поля) в приповерхностном слое. Разница в наклонах на кривой зависимости энергии потерь ПАВ указывает на изменение скорости роста, ориентации и числа выпадающих островков. Изменение величины потерь энергии ПАВ характеризуется не только числом выпавших островков, но и типом деформации поверхности, и величины вязкости приповерхностного слоя.

Литература

- [1] *Тонкие пленки. Взаимная диффузия и реакции*, под ред. Дж. Поута, К. Ту, Дж. Мейера (Мир, М., 1982).
- [2] А.П. Серейка, Э.П. Гаршка, З.А. Милькявичене, А.И. Юцис // *ФТТ* **16** (1974) 2415.
- [3] Т.А. Briantseva, D.V. Lioubtchenko, In: *The science and Technology of Millimetre Wave Components and Devices*, ed. by V.E. Lyubchenko, (Taylor & Francis, London and New York, 2002) p. 55.
- [4] T. Nakanisi // *Japan J. Appl. Phys.* **12** (1973) 1818.
- [5] Т.А. Briantseva, T.J. Bullough, D.V. Lioubtchenko, I.A. Markov, E.M. Tolmachev // *Physica B: Condensed Matter.* **263-264** (1999) 84.
- [6] D.V. Lioubtchenko, I.A. Markov, T.A. Briantseva // *Appl. Surf. Sci.* **194** (2002) 42.
- [7] D.V. Lioubtchenko, I.A. Markov, T.A. Briantseva // *Appl. Surf. Sci.* **211** (2003) 335.
- [8] Т.А. Брянцева, В.Е. Любченко, Д.В. Любченко, И.А. Марков // *Инженерная физика.* **2** (2008) 31.
- [9] Т.А. Брянцева, Д.В. Любченко, И.А. Марков, Е.М. Толмачев // *Неорганические материалы* **45** (2009) 901.
- [10] А.А.Чернов, *Нормальный и послыйный рост кристаллов. / Современная кристаллография. Т. 3. Образование кристаллов* (Наука, М., 1980).
- [11] В.М. Иевлев, Л.И. Трусов, В.А. Холмянский, *Структурные превращения в тонких пленках.* (Металлургия, М., 1982).
- [12] Р. Кристи, А. Питти, *Строение вещества: введение в современную физику.* (Наука, М., 1969).
- [13] С.О. Гладков, *Физика композитов. Термодинамические и диссипативные свойства* (Наука, М., 1999).
- [14] Ю.Г. Фролов, *Термодинамические соотношения между поверхностным натяжением и электрическим потенциалом. / Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы* (Химия, М., 1982).

CHANGE OF THE SCATTERED POWER OF THE SURFACE ACOUSTIC WAVE PROPAGATING ALONG THE SURFACE OF GALLIUM ARSENIDE IN PROCESS OF DEPOSITION OF GOLD FILMS

Т.А. Bryantseva^{1*}, D.V. Lioubtchenko², I.A. Markov¹, Yu.A. Ten¹

¹Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS (Fryazino Branch), sq. Vvedenskogo. 1,
Fryazino, Moscow rgn., 141190, Russia

²Department of Radio Science and Engineering, Aalto University School of Science and Technology, PL 13000,
FI-00076 AALTO, Finland

*e-mail: tatiana@ms.ire.rssi.ru

Abstract. Investigated changes in the power loss of surface acoustic waves in the surface layers of high-resistance gallium arsenide during the deposition of gold. It is found that such characteristics of the propagation of surface acoustic waves, the amplitude and determined by fluctuations in the value of her loss on the distribution, by reason of their position vectors, reflect changes in the structure and composition of the layers in the border Au-GaAs as the deposition of gold in the plane perpendicular to the surface of GaAs. The spectral characteristics of the scattered power mainly reflects the aggregate state of the surface layers and the ability to rotate the crystallized islands in agreement with the distribution lines of tension (strain or electric field) in the surface layer. Change the value of the energy loss surface acoustic wave is characterized not only by the number dropped islands, but also related to the type of deformation of the surface layer.

References

- [1] *Thin Films – Interdiffusion and Reactions*, ed. by J.M. Poate, K.N. Tu, J.V. Mayer (A Walley-Interscience Publication, 1978).
- [2] A.P. Sereyka, A.P. Garshka, Z.A. Milkyavichene, A.I. Yutsis // *Fizika Tverdogo Tela* **16** (1974) 2415.
- [3] T.A. Briantseva, D.V. Lioubtchenko, In: *The science and Technology of Millimetre Wave Components and Devices*, ed. by V.E. Lyubchenko, (Taylor & Francis, London, and New York, 2002) p. 55.
- [4] T. Nakanisi // *Japan J. Appl. Phys.* **12** (1973) 1818.
- [5] T.A. Briantseva, T.J. Bullough, D.V. Lioubtchenko, I.A. Markov, E.M. Tolmachev // *Physica B: Condensed Matter.* **263-264** (1999) 84.
- [6] D.V. Lioubtchenko, I.A. Markov, T.A. Briantseva // *Appl. Surf. Sci.* **194** (2002) 42.
- [7] D.V. Lioubtchenko, I.A. Markov, T.A. Briantseva // *Appl. Surf. Sci.* **211** (2003) 335.
- [8] T.A. Bryantseva, D.V. Lyubchenko, I.A. Markov // *Engineering Physics* **2** (2008) 31.
- [9] T.A. Bryantseva, D.V. Lyubchenko, I.A. Markov, E.M. Tolmachev // *Inorganic Materials* **45** (2009) 835.
- [10] A.A. Chernov, *Normalnyy i posloynnyy rost krystallov / Sovremennaya krystallografiya / Obrazovanie krystallov v. 3* (Nauka, M., 1980).
- [11] V.M. Ievlev, L.I. Trusov, V.A. Holmyanskiy, *Strukturnye prevrascheniya v tonkih plenkah* (Metallurgia, M., 1982).

- [12] Robert W. Christy, Agnar Pytte, *The Structure Of Matter: An Introduction To Modern Physics* (W.A. Benjamin, New York, 1965).
- [13] S.O. Gladkov, *Fizika kompozitov. Termodinamicheskie i dissipativnye svoystva* (Nauka, M., 1999).
- [14] Yu.G. Frolov, *Termodinamicheskiye sootnosheniya mezhdu poverhnostnym natyazhenyem i elektricheskim potentsialom / Kurs kolloidnoy himii. Poverhnostnyy yavleniya i disperstnyy systemy* (Himiya, M., 1982).