

УДК 621.382

Исследование старения резонансно-туннельного диода и смесителя радиосигналов на его основе в процессе эксплуатации

А.И. Иванов, студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технология приборостроения»*

И.А. Дукач, студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технология приборостроения»*

А.И. Дмитриева, студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технология приборостроения»*

М.А. Дозоров, студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технология приборостроения»*

*Научные руководители: Ю. А. Иванов, д.ф.м.н., профессор
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технология приборостроения»*

С.А. Мешков, к.т.н., доцент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технология приборостроения»
schashurin@bmstu.ru*

Преобразование частоты – процесс переноса спектра радиосигнала из одной области частотного диапазона в другую при сохранении структуры сигнала [2]. Устройство, осуществляющее преобразование частоты, называется смесителем (СМ). Преобразование частоты в смесителе осуществляется при подаче на его вход информационного и гетеродинного сигналов, которые, взаимодействуя друг с другом, образуют на выходе смесителя множество комбинационных составляющих вида:

$$|\pm mf_C \pm nf_H| = f_{ПЧ},$$

где m, n – целые числа, f_c – частота информационного сигнала, f_r – частота гетеродина, $f_{пч}$ – частота продукта преобразования (промежуточная частота).

Широкое распространение получили субгармонические смесители (СГСМ), основным достоинством которых является работа на комбинационной составляющей вида: $f_{пч} = 2 \cdot f_r - f_c$. Это позволяет уменьшить частоту гетеродина в два раза и понизить влияние шумов гетеродина.

Процесс преобразования в смесителе осуществляется с помощью нелинейного элемента, как правило, диода с барьером Шоттки (ДБШ). Применение РТД на основе *GaAsAl* многослойных наноразмерных гетероструктур имеет ряд преимуществ, которые подробно описаны в [1].

Антисимметричная вольтамперная характеристика (ВАХ) РТД позволяет исключить комбинационные составляющие чётного порядка в выходном спектре субгармонического смесителя [2]. ВАХ РТД имеет более пологую форму по сравнению с парой включенных встречно-параллельно ДБШ, что способствует снижению паразитных частотных составляющих на выходе смесителя [2].

В работе проведены исследования изменения формы вольтамперной характеристики резонансно-туннельного диода в процессе искусственного старения. Искусственное старение РТД реализовано термическим воздействием. Проведено пять циклов термических воздействий (1, 3, 8, 18, и 27 часов) в нагревательной печи при температуре $T = 300$ °C.

Исследование характеристик смесителя проводилось в САПР ВЧ/СВЧ устройств AWR Microwave Office. ВАХ, полученные экспериментально, вводились в программу Microwave Office, в которой рассчитывались характеристики смесителя. ВАХ РТД до и после термообработки показаны на рис. 1.

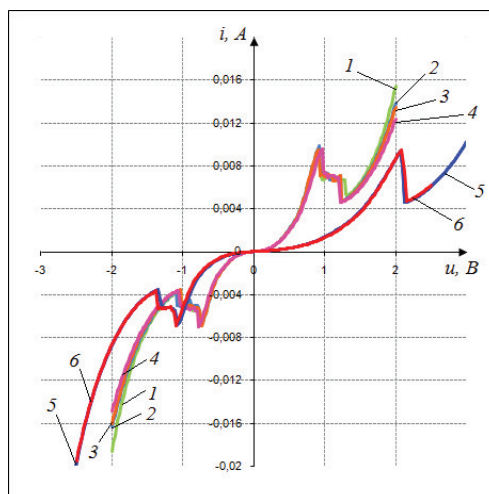
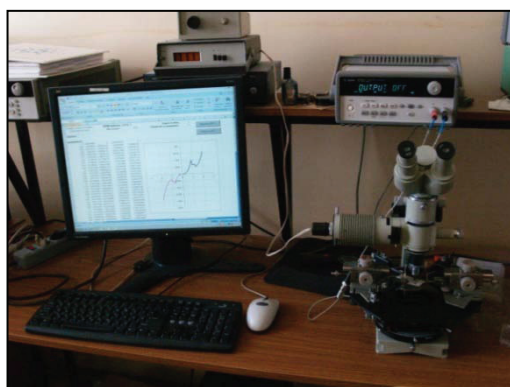


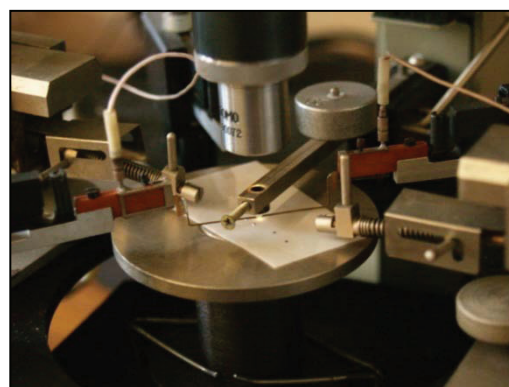
Рис. 1. Вольтамперные характеристики резонансно-туннельного диода до и после термических воздействий

1 – до термических воздействий, 2 – после 1 часа термических воздействий, 3 – после 3 часов термических воздействий, 4 – после 8 часов термических воздействий, 5 – после 18 часов термических воздействий, 6 – после 27 часов термических воздействий

Вольтамперные характеристики резонансно-туннельных диодов измерялись на лабораторном стенде (см. рис. 2). Стенд состоит из ПЭВМ, источника питания с цифровым управлением и микроскопической установки.



а)



б)

Рис. 2. Стенд для измерения ВАХ РТД

а) – ПЭВМ, блок питания и МЗУ, б) – подложка с диодами на подложкодержателе МЗУ

Схема электрическая принципиальная СГСМ, используемая для моделирования в Microwave Office, представлена на рис. 3.

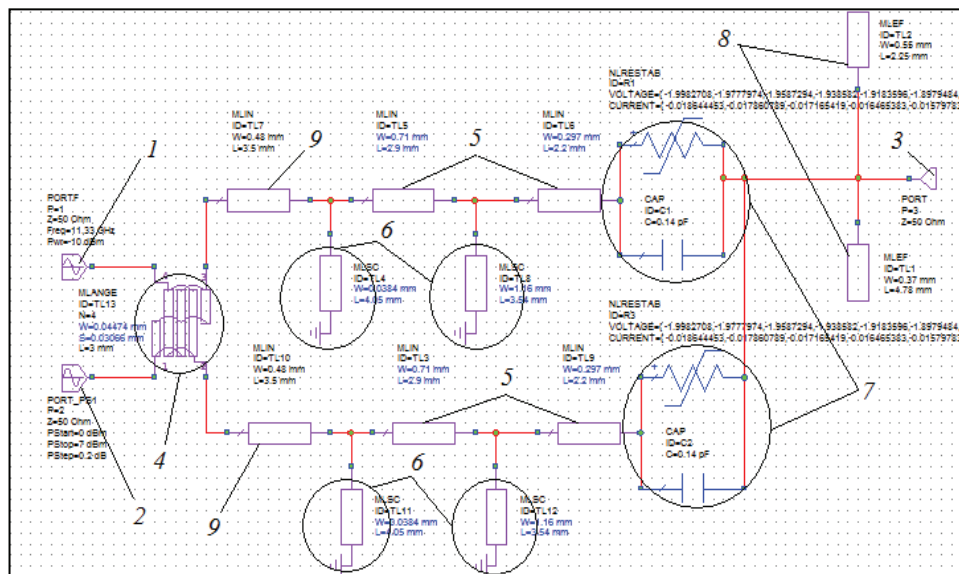


Рис. 3. Схема субгармонического смесителя в программе Microwave Office

1 – сигнальный порт; 2 – гетеродинный порт; 3 – выходной порт; 4 – направленный ответвитель Ланге; 5, 6 – согласующая цепь; 7 – эквивалентные модели РТД; 8 – режекторные фильтры; 9 – 50-омные отрезки МПЛ

При моделировании выбраны следующие параметры:

- частота сигнала: $f_c = 11,33$ ГГц;
- частота гетеродина: $f_r = 5,7$ ГГц;
- промежуточная частота: $f_{пч} = 0,07$ ГГц;
- материал подложки: поликор;
- номинальная относительная диэлектрическая постоянная: $\epsilon = 9,8$;
- тангенс диэлектрических потерь: $\text{tg}\delta = 1 \cdot 10^{-4}$;
- толщина подложки: $H = 0,5$ мм;
- толщина металлизации: $T = 10$ мкм.

Исследовались следующие характеристики смесителя:

- потери преобразования частоты сигнала в сигнал промежуточной частоты L , дБ;
- граница динамического диапазона по уровню $IP3$, дБм;
- уровень 1 дБ компрессии $P_{-1\text{dB}}$, дБм.

В схеме смесителя необходимо было согласовать диод на частотах сигнала и гетеродина.

На рис. 4 представлены результаты согласования диода при входной мощности, поступающей на диод, $P_{BX} = 5$ дБм.

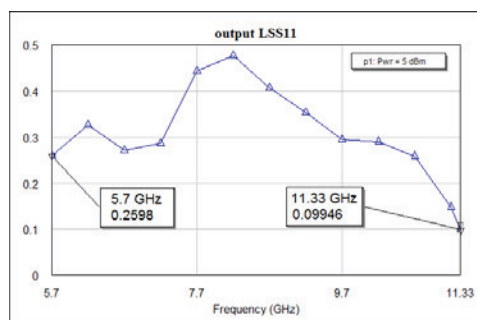


Рис. 4. Коэффициент отражения от диода, расчёт

Согласование проводилось только для диода, на который не было оказано термических воздействий, после термических воздействий согласования схемы не проводилось. Полагается, что старению подвержен только диод, согласующие элементы не стареют.

На рис. 5 представлены результаты расчета потерь преобразования до и после пяти циклов термических воздействий. Цифры на рис. 5 соответствуют цифрам на рис. 1.

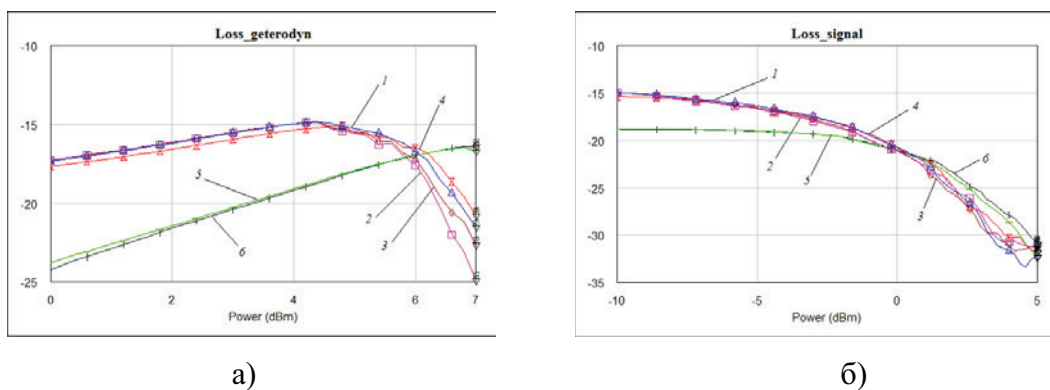


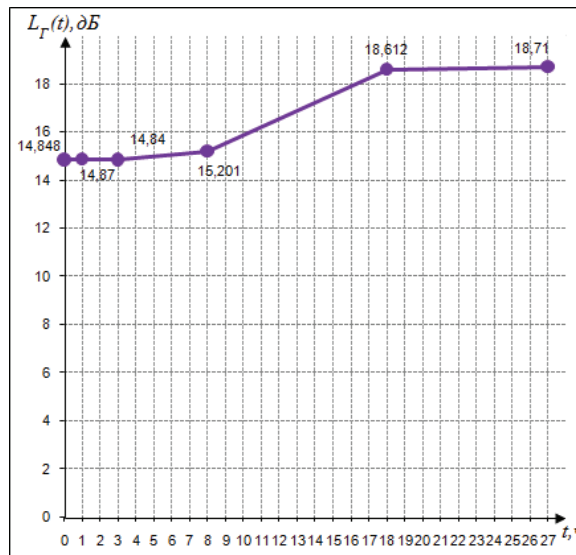
Рис. 5. Зависимость потерь преобразования от кинетики старения, расчёт

1 – до термических воздействий ($\triangle$), 2 – после 1 часа термических воздействий ($\square$), 3 – после 3 часов термических воздействий ($\diamond$), 4 – после 8 часов термических воздействий ($\times$), 5 – после 18 часов термических воздействий ($-$), 6 – после 27 часов термических воздействий ($+$)

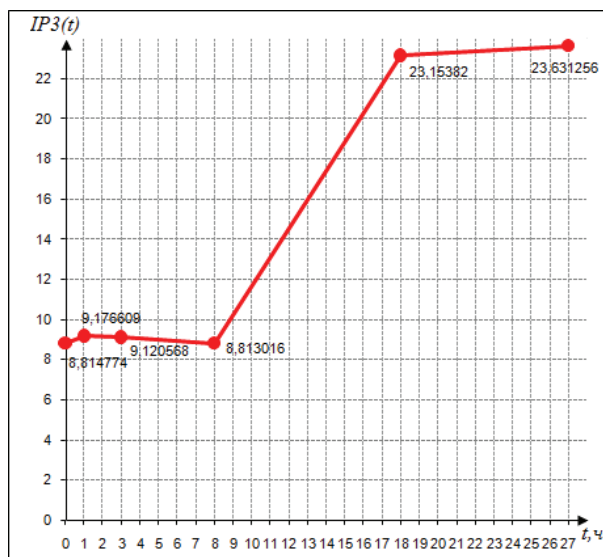
а) – потери преобразования в зависимости от мощности гетеродина, дБ, б) – потери преобразования в зависимости от мощности сигнала, дБ

Уровень 1 дБ компрессии рассчитан из графика зависимости потерь преобразования от мощности сигнала (см. рис. 5,б), верхняя граница динамического

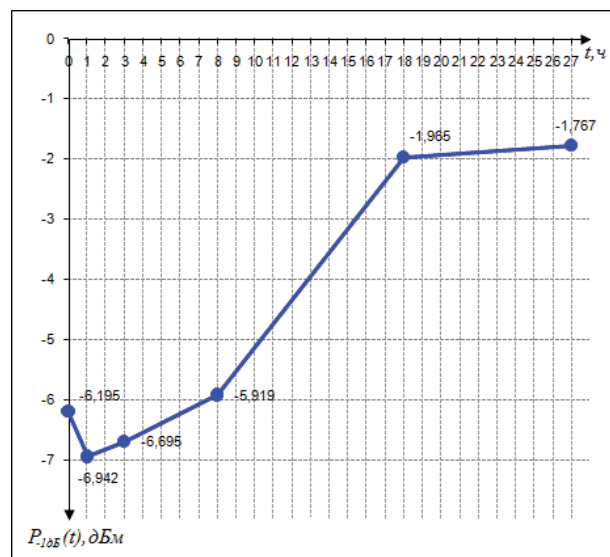
диапазона по уровню $IP3$ была рассчитана программой на частоте сигнала $f_c = 11,33$ ГГц мощностью $P_C = -10$ дБм до и после пяти циклов термических воздействий. На рис. 6 приведены характеристики смесителя в зависимости от времени термического воздействия.



а)



б)



в)

Рис. 6. Кинетика характеристик смесителя в процессе искусственного старения резонансно-туннельного диода, расчёт

а) – потери преобразования при мощности гетеродина $P_H = 4,4$ дБм и мощности сигнала $P_C = -10$ дБм; б) – верхняя граница динамического диапазона по уровню $IP3$; в) – уровень 1 дБ компрессии

Сравнивая результаты расчетов по рис. 6 с экспериментальными данными (см. рис. 1), можно сделать вывод, что форма ВАХ РТД влияет на выходные параметры смесителя. Увеличение $IP3$, показанное на рис. 6,б, объясняется рассогласованием согласующей цепи диода и, как следствие, увеличением коэффициента отражения. Ухудшение коэффициента отражения входа смесителя влечёт за собой «увеличение» верхней границы динамического диапазона по уровню $IP3$. В подтверждение этому на рис. 7 представлена зависимость коэффициента отражения от диода, прошедшего все 5 циклов термических воздействий.

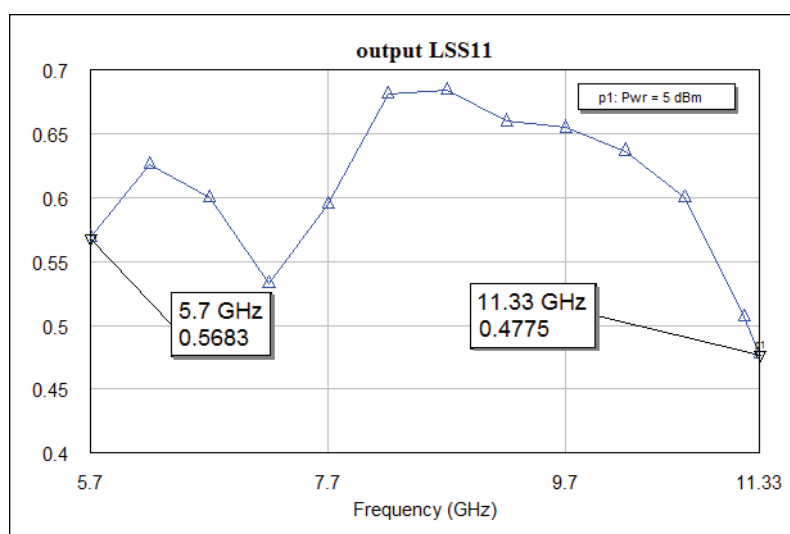


Рис. 7. Расчет коэффициента отражения от диода, прошедшего 5 циклов термических воздействий

Увеличение уровня 1 дБ компрессии в результате термической деградации иллюстрируют данные рис. 5,б.

В результате проведенных исследований характеристик субгармонического смесителя установлено, что:

- 1) Термическое воздействие на РТД влияет на выходные характеристики смесителя,
- 2) Результаты исследований могут быть использованы при расчёте надёжности смесителя по постоянным отказам.

В работах [4], [5] показано, что деградация РТД прежде всего вызвана диффузионными процессами в приконтактных слоях и слоях гетероструктуры, на основе которой он изготовлен. Для исследования диффузионных процессов в гетероструктуре РТД используется метод оже-электронной спектроскопии (ОЭС) [6].

Для исследования используется установка компании Specs. Внешний вид установки показан на рис. 8.

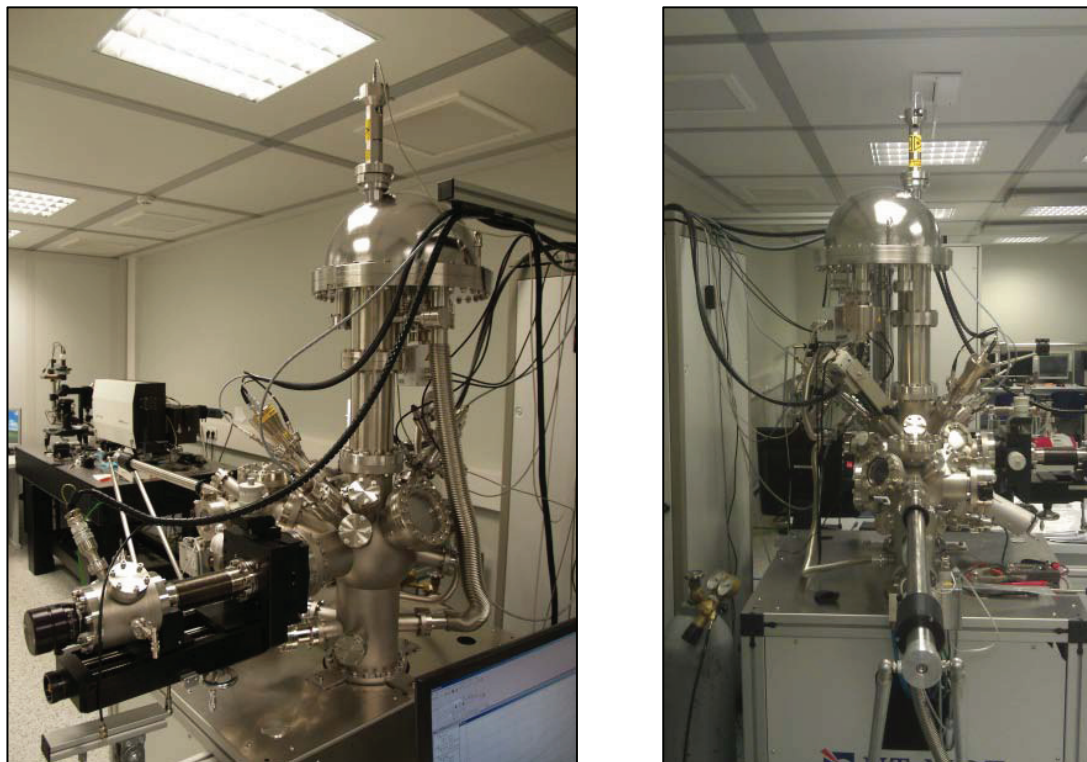


Рис. 8. Внешний вид оже-спектрометра

Основные узлы установки – загрузочная камера, высоковакуумная аналитическая камера, в которой располагается образец при оже-анализе, электронная и ионная пушки, энергоанализатор, детектор вторичных электронов.

Метод ОЭС позволяет получить информацию об элементном и химическом составе поверхностного слоя исследуемого материала от 2 до 5 монослоев в пятне диаметром до 180 мкм.

При исследовании старения гетероструктур необходимо получить профиль состава образца по глубине до и после термических воздействий. Для этого в ОЭС используется ионно-лучевое травление. Ионный пучок создает на поверхности образца кратер, диаметр которого (примерно от 1 до 3 мм) больше диаметра зондирующего пучка электронов (примерно 0,2 мм). Профиль концентрации химических элементов по глубине получают путем периодической регистрации элементного состава на дне кратера в ходе травления или после прекращения травления. Для травления используются ионы аргона.

n-GaAs сильнолегированный Si ($5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$)	100-200 нм
n-GaAs легированный Si ($2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$)	30,0 нм
Арсенид галлия GaAs (спейсер)	1,5 нм
Арсенид алюминия AlAs (барьер)	1,7 нм
Арсенид галлия GaAs (яма)	4,5 нм
Арсенид алюминия AlAs (барьер)	3,0 нм
Арсенид галлия GaAs (спейсер)	10,0 нм
n-GaAs легированный Si ($2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$)	30,0 нм
n-GaAs сильнолегированный Si ($5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$)	1000 нм
Подложка GaAs	0,35 мм

Рис. 9. Профиль подложки с резонансно-туннельной структурой

Скорость травления зависит от распыляемого материала, энергии ионов, угла, под которым располагается ионный луч по отношению к поверхности (в данной установке 45°). Необходимо учитывать, что чем больше энергия ионов, тем сильнее будет «перемешивание» верхнего слоя кратера травления, и оно может превзойти ожидаемое «расплывание» элементного состава структуры при искусственном старении.

При этом в приповерхностном слое образуется большое число разорванных связей, что затрудняет анализ химического состава по глубине.

Для *GaAs* скорость травления составляет примерно 2,5 нм/с при энергии ионов 3000 эВ. Для *Si* и *SiO₂* она составляет около 0,35 нм/с при энергии ионов 5000 эВ. На рис. 10 показан пример оже-спектра образца *GaAs* до начала травления. В спектре заметны пики *C* (270 эВ), *O* (510 эВ), *Ga* (1070 эВ), *As* (1230 эВ).

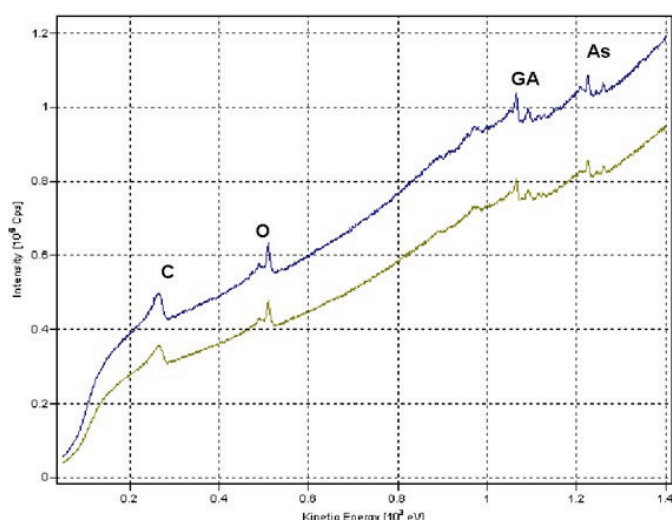


Рис. 10. Оже-спектр образца *GaAs*

Пики *C* и *O* свидетельствует о наличии загрязнений на поверхности образца. Эти пики исчезают примерно после 12 секунд травления.

Для решения проблемы выбора скорости травления планируется протравить в образце несколько отверстий с разной энергией ионов с одновременным контролем диаметра кратера травления по данным микроскопии во вторичных электронах (см. рис. 11).

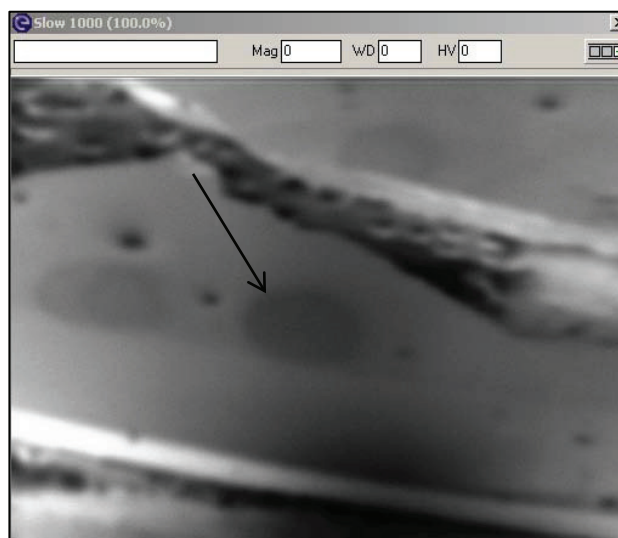


Рис. 11. Изображение образца *GaAs* во вторичных электронах (стрелкой указан кратер травления)

Таким образом, подготовлена методика послойного оже-анализа гетероструктур для сравнения профилей состава по глубине исходных и искусственно состаренных структур.

Список литературы

1. Ю.А. Иванов, К.В. Малышев, Н.В. Федоркова. Формирование ВАХ *AlGaAs* нанодиодов. / 14-я Международная Крымская конференция: «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2004), Севастополь, Крым, Украина, 2004. Материалы конф., – Севастополь: «Вебер», 2003, С. 532-534.
2. Применение пакета программ Microwave Office для проектирования микрополосковых СВЧ устройств: Учеб.пособие / Н.В. Федоркова [и др.] – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – С. 54, ил.
3. Субгармонический смеситель с улучшенными интермодуляционными характеристиками на базе резонансно-туннельного диода / Ю.А. Иванов [и др.] Радиотехника и электроника. – 2010. – Т. 55, N 8. – С. 982-988. – Библиогр.: С. 988 (13 назв.). – ISSN 0033-8494.

4. Исследование термической деградации *AuGeNi* омических контактов резонансно-туннельных диодов на базе наноразмерных *AlAs/GaAs* гетероструктур / Ю.А. Иванов [и др.] // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон.журн. – 2012. № 9. DOI: <http://dx.doi.org/10.7463/0912.0453636> (дата обращения: 26.10.2013 г.).
5. Оценка надёжности смесителей на основе резонансно-туннельных диодов путём анализа происходящих в них изменений / В.Д. Шашурин [и др.] // Rusnanotech'08. Международный форум по нанотехнологиям: Сборник тезисов докладов научно-технологических секций. – Москва, 2008. – Т. 1. - С. 89-90.
6. Физические основы методов исследования электронных свойств и локальной структуры функциональных наноматериалов для энергетики / В.Д. Борман [и др.] – М: Изд-во МИФИ, 2009.