

**УЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ ОЛИЙ ВА УРТА  
МАХСУС ТАЪЛИМ ВАЗИРЛИГИ АНДИЖОН  
ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ**

***“ЯРИМУТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИНИНГ ВА КАЙТА  
ТИКЛАНУВЧИ ЭНЕРГИЯ МАНБАЛАРИНИ  
РИВОЖЛАНТИРИШНИНГ ЗАМОНАВИЙ  
МУАММОЛАРИ”***

***РЕСПУБЛИКА ИЛМИЙ-АМАЛИЙ АНЖУМАНИ***

***МА ТЕРИАЛЛАРИ***

***АНДИЖОН***

## Республика илмий-амалий анжумани материаллари тупламини тайёрлаш учун масъуллар

Таърир аъйбати раиси:

Зайнобидинов С.З. - физика-математика фанлари доктори, академик.

### Ташкилий кумита

Юлдашев А.С. Расулов  
Б.М. Алиев Р.У. Йулчиев  
Ш. Каримов И.Н. Думаев  
С.Н. Махкамов М.М.  
Носиров М.Н. Хакимов П.  
Эрматов Ш.А. Акбаров А.  
Хакимов А. Абдуазимов  
В.А. Муминов М. Мансуров  
Х.Ж. Курбанов А.О.  
Умарова Г.

Юлдашев Б.С.  
Зайнобидинов С. Муминов  
Р.А. Бахромов С.Л.  
Баходирхонов М.К.  
Ашуров М.Х.  
Мамадолимов А.Т.

Бегимкулов У.Ш. Рембеза  
С.И. Кенжаев И.Г. Рахимов  
Н.Г. Маматкаримов О.О.  
Умаров А. В. - Тошметов М.  
-Авезова Н.Р. - Матчанов  
Н. Ашуров Х.Б. Корабоев  
М.К. Абдурахмонов К.П.  
Далиев Х.С. Джураев М.  
Исмоилов К.А. Гуломов Г.  
Аноркулов К. Юлдашев Н.  
Х. Расулов Р.Я. Рахматов  
А.З.

- АДУ ректори, профессор, раис
- илмий ишлар буйича проректор, раис уринбосари
- АДУ профессор, раис уринбосари
- АДУ проректори
- АДУ профессори
- АДУ, проректори
- Физика-математика факултети декани
- АДУ физика кафедраси муdiri
- АКХИ кафедра муdiri
- АДУ доценти
- АДУ булим бошлиги
- АДУ доценти
- АДУ доценти
- АДУ доценти
- АДУ доценти
- АДМИ доценти

### Дастурий кумита

- академик, УзР ФА президенти, раис
- академик, раис муовини
- академик
- академик
- академик
- академик
- академик
- профессор, ОУМТ вазири уринбосари
- Воронеж, ДГУ профессори
- профессор, Ош ДУ проректори, Киргизистон
- профессор, Уфа, Россия
- Нам МТИ ректори
- Нам ДУ ректори
- УР ФА ЯТИ директори
- УР ФА, "Физика-Куёш" ИИЧБ директори
- Ҳалқаро Куёш энергияси институти директори
- УР ФА ИП ва ЛПИ директори
- ФарДУ профессори
- ТАТУ профессори
- УзМУ физика факултети декани
- ТДПУ профессори
- Нукус ДУ профессори
- Нам МКИ профессори
- ФарДУ кафедра муdiri
- ФарПИ профессори
- ФарДУ профессори
- "Фотон" АЖ директор муовини

Олий ва урта махсус таълим вазирлигининг 2018 йил 6 мартдаги “Вазирлик олий таълим ва илмий-тадқиқот муассасаларида 2018 йилда утказиладиган илмий анжуманлар режасини тасдиқлаш тугрисида”ги 178-Ф сонли буйруғи асосида нашрга тайёрланди.  
Матнларда фойдаланилган маълумотлар, натижалар ва хулосалар аниқлиги учун муаллифлар жавобгардирлар.

Методом вторично-ионной масс-спектрометрии исследованы эмиссия отрицательно-ионных кластеров галлия, галлия-азота и легирующих примесей GaN/SiC в зависимости от энергии бомбардирующих ионов цезия, а также от температуры подложки. Показано, что эмиссия отрицательно-ионных кластеров экспоненциально зависит от энергии бомбардирующих ионов в пороговой области распыления, что указывает на рекомбинационный механизм энергетического порога распыления кластеров. Кластеризация галлия указывает на образование пор дивакансий галлия-азота в процессе легирования. Результаты исследования зависимости выхода атомарных и кластерных ионов от температуры нитрида галлия при бомбардировке ионами Cs<sup>+</sup> показывают, что происходит ко-сегрегация примесей углерода и кислорода.

The emission of negative-ion gallium, gallium-nitrogen, and GaN / SiC alloy impurities as a function of the energy of the bombarding cesium ions, as well as the substrate temperature, was studied by secondary-ion mass spectrometry. It is shown that the emission of negative ion clusters depends exponentially on the energy of bombarding ions in the threshold spray region, which indicates the recombination mechanism of the energy threshold for the sputtering of clusters. Gallium clustering indicates the formation of pores of gallium-nitrogen divacancies during the doping process. The results of a study of the dependence of the yield of atomic and cluster ions on the temperature of gallium nitride when bombarded with Cs<sup>+</sup> ions show that co-segregation of carbon and oxygen impurities occurs.

Bombardimonchi seziiy ionlarining energetik funksiyasi sifatida salbiy-ionli galliy, galliy-azot va GaN / SiC qotishmalarining emissiyasi, shuningdek, taglik haroratini ikkinchi darajali ion massasi spektrometri bilan o'rganishdir. Salbiy ion klasterlari emissiya chastotasini buzadigan amallar hududida bombardimon ionlarining energetikasiga bog'liqligini ko'rsatib turibdi, bu esa klasterlarni parchalanish uchun energiya chegarasining rekombinatsiya mexanizmini ko'rsatmoqda. Galliy klasterizatsiya jarayoni, doping jarayonida galliy-azotli bo'linishning ko'zga ko'rinishini hosil qiladi. Atom va klaster ionlarining hosilalari galliy nitriti ++ ionlari bilan bombardimon qilingan paytda haroratga bog'liqligini o'rganish natijalari uglerod va kislorod aralashmalarining birgalikda ajratilishini ko'rsatadi.

Экспериментальное исследование кластерного распыления широкозонного высокотемпературного полупроводника нитрида галлия актуально для создания новых моделей эмиссии кластеров и разработки технологии диффузионного легирования.

Ранее нами впервые было показано, что эмиссия отрицательно-ионных кластеров галлий-азот происходит прямо с поверхности нитрида галлия бомбардируемой кэВными энергиями цезия, однако в пороговой области эмиссия кластеров может лимитироваться рекомбинацией отдельно распыленных атомов галлия и азота. Кроме того, нами впервые обнаружена кластеризация металлического галлия в процессе роста пленок нитрида галлия. Фотоэлектронные спектры анионных кластеров галлия указывают на переход от плоской к трехмерной структуре для числа атомов больше чем шесть[1]. В работе[2] проведено экспериментальное и теоретическое исследование структуры и электронных свойств трёхмерных, легированных азотом анионных кластеров галлия Ga<sub>x</sub>N<sub>y</sub>, x= 4-12,y=1и x=7-12, y=2. Это позволило произвести идентификацию изомеров, присутствующих в пучках для конкретных кластерных анионов Ga<sub>x</sub>N<sup>-4-7</sup>). Также сообщается о неожиданном присутствии галлий обогащённых кластеров Ga<sub>x</sub>N.

Кластерные цезий-металл положительные ионы MCs используются также для повышения чувствительности элементного анализа примесей в нитриде галлия методом вторично-ионной масс-спектрометрии [3-4]. Разработанная в [3] модель учитывает рекомбинацию независимо распыленных Cs и M атомов на очень малом расстоянии от поверхности в поле поверхностей диполей. Процесс формирования молекулы, как предполагается, находится ранее процесса ионизации молекулы.

Экспериментальных работ по коэффициентам распыления нитрида галлия в пороговой области нет, поэтому в работе [5] молекулярно-динамическим моделированием было

проведено изучения распыления выхода  $Y$  для BN, ALN и GaN поликристаллов вюрцитной структуры в зависимости от массы  $m_1$  бомбардирующих ионов с энергией от 200 до 2000 эВ. Экспериментальное и теоретическое исследование структурных и электронных свойств распыленных кластеров нитрида галлия проводится методами фотоэлектронной спектроскопии для измерения сродства к электрону, однако работы по вторично-ионной масс-спектрометрии для измерения распределения эмиссии и стабильности кластеров не проводились.

В работе [6] изучены структуры и стабильности малых (мономер, тример и димер) нейтральных и ионизованных кластеров ALN, GaN и InN. Избыток азота или металла трехатомных кластеров показывает минимальные энергетические приблизительно линейные конфигурации. Наиболее стабильные изомеры  $AhN$  и  $Ga_2N_2$  являются ромб с синглетным спиновым состоянием, хотя  $In_2N_2$  по прогнозам не будет устойчивы против диссоциации в  $In_2$  и N. Сильное доминирование N-N связей на границе металл-азот и металл-металл управляет структурными скелетами и химическим составом этих кластеров.

В работе [7] показано, что треугольные и плоские прямоугольные структуры являются общими минимумами для Гази  $Ga_4$ , соответственно, в то время как общие минимумы для  $Ga_5$  и  $Ga_6$  являются низкоспиновые неплоские структуры. Также предсказаны значения сродства к электрону 1.51 ( $Ga_2$ ), 1.81 ( $Ga_3$ ), 2.14 ( $Ga_4$ ), 2.27 ( $Ga_5$ ), и 2.31 эВ ( $Ga_6$ ). Первая энергия диссоциации нейтральных кластеров галлия составляют 1,30 ( $Ga_2$ ), 1,58 ( $Ga_3$ ), 1,98 ( $Ga_4$ ),

1.80 ( $Ga_5$ ), и 2.29 эВ ( $Ga_6$ ). Из эксперимента известна только энергия диссоциации для  $Ga_2$  (1.10 эВ). В работе [8] теоретически исследованы сродство к электрону и потенциал ионизации нанокластеров  $Ga_xN_y$ ,  $6 < x < y < 19$ .

#### Методика

Для выяснения вопроса, нами исследовалась эмиссия отрицательно заряженных кластерных ионов при распылении поверхности GaN ионами цезия; зависимость выхода кластерных ионов от плотности первичных ионов цезия. Исследуемый образец (GaN) представлял собой эпитаксиальную пленку, нанесенную на подложку карбида кремния. Выращенная пленка GaN n-типа. Плотность тока первичных ионов является важным параметром, от которого зависит корректность измерения числа вторичных ионов объемного происхождения, т.е. ионов возникающих в результате распыления атомов кристаллической решетки мишени. Наличие на поверхности мишени инородных примесей или пленок может существенно изменить коэффициент ВИЭ.

Экспериментальная часть На рис.1 изображён масс-спектр в области от 0 до 300 а.е.м., пики которого представляют собой выход отрицательных ионов при бомбардировке поверхности нитрида галлия положительными ионами кислорода с энергией 3 кэВ и током, равным  $1 \cdot 10^8$  А. Первым на этом графике выделяется сигнал водорода. Далее присутствуют атомарные ионы углерода и кислорода. Пик ионов наибольшей интенсивности выхода на данном масс- спектре. После мы видим наличие адсорбированной примеси CN.

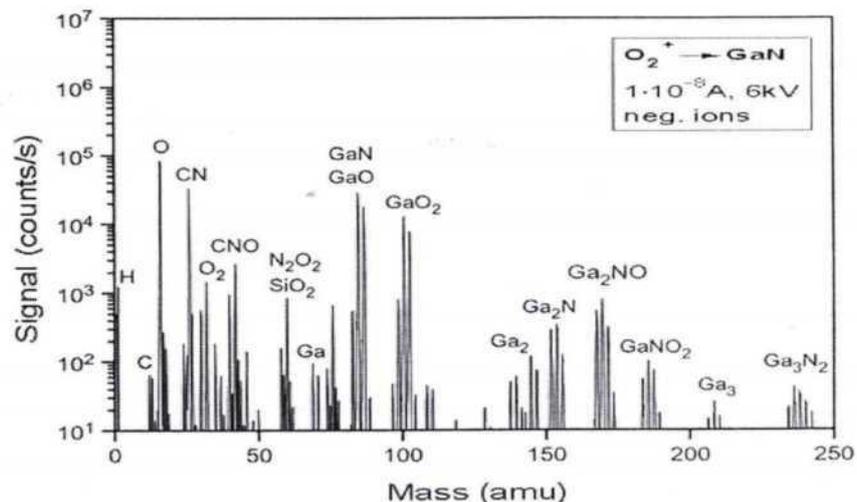


Рис1. Масс-спектр отрицательного ионного распыления, установка <<CAMECA>>

Пик молекулярного кислорода наблюдается далее. Следующими появляются сигналы от молекулярных ионов  $CNO^-$  и  $N_2O_2^-$ . Затем на графике масс-спектра наблюдается появления атомарного  $Ga^-$ . Сигналы от двухкомпонентного ионного кластера  $Ga_2^-$  виден за ними. Далее по возрастанию появляются пики ионного кластера  $Ga_2N^-$  и оксида  $Ga_2NO^-$ . Затем уже по убыванию следуют друг за другом оксид  $Ga_2NO_2^-$  и однокомпонентный ионный кластер  $Ga_3^-$ , интенсивность которого является наименьшей среди всех вторичных ионов данного графика масс-спектра. Последней линией выступает пик двухкомпонентного ионного кластера  $Ga_3N_2^-$ .

Как и в случае графика масс-спектра, изображённого на рис.1, здесь наблюдается уменьшение интенсивности выхода кластерных ионов для  $Ga_3^-$  по отношению  $Ga_2^-$  (разница составляет в 2,4 раза), что, видимо, является некую общую закономерность для однокомпонентных кластерных ионов. Рис.2 изображает область масс-спектра от 0 до 300 а.е.м., пики которого являются выход отрицательных вторичных ионов при облучении поверхности галлия положительными ионами цезия. Энергия первичного пучка составляет 11,7 кэВ его ток  $-1,25 \cdot 10^{-8}$  А. Здесь также наблюдаются пики отрицательных вторичных ионов  $C^-, O^-, CNO^-, Ga^-, GaO^-, GaO_2^-, Ga_2^-, Ga_2N^-, Ga_2NO^-, Ga_3^-, Ga_3N^-, Ga_3N_2^-$ . Немалый интерес представляет появление мощных пиков ионных кластеров  $Ga_4^-$  и  $Ga_4N^-$ .

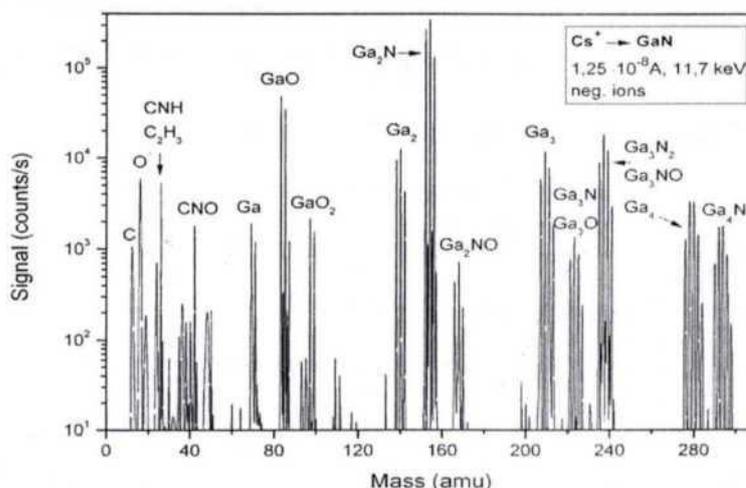


Рис.2. Масс- спектр отрицательного ионного распыления , установка <<CAMECA>>

Также показано, что наряду с решеточными молекулярными отрицательно- ионным и кластерами  $GaN$ ,  $Ga_2N_2$  и  $Ga_2N$  наблюдается эмиссия димеров, тримеров и тетрамеров галлия. Это связано с энергией связи этих кластеров, т.е. с их стабильностью, поскольку сродство к электрону для них примерно одинаково и совпадает с зоной проводимости.

Последнее обстоятельство объясняет низкий ионный выход кластеров. Высокая интенсивность отрицательно- ионного распыления кластеров галлия нами впервые объясняется кластеризацией ростовых дивакансий, декодируемых островками металла.

Нами проведён анализ масс-спектров в положительных ионов в области от 0 до 250 а.е.м. при бомбардировке GaN положительными ионами кислорода с энергией 6 кэВ и током  $1 \cdot 10^{-8}$  А.

Первой линией служит сигнал водорода. Далее наблюдается присутствие атомарного азота и кислорода. После выделяются сигналы решёточных примесей, среди которых есть пики положительных ионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Al}^+$ ,  $\text{K}^+$  и  $\text{Ca}^+$ . Относительно всех сигналов самым большим выступает следующий пик атомарного галлия. Затем наблюдается появление двухкомпонентного кластерного иона  $\text{GaN}^+$ , после которого виден оксид  $\text{GaO}^+$ .

Анализ экспериментальных масс-спектров кластерного распыления нитрида галлия, полученных за ионно-зондовом масс-спектрометре IMS 7f <<САМЕСА>> показал, что их интенсивность с ростом числа атомов в кластере увеличивается. Однако согласно современным представлениям должна наблюдаться противоположная тенденция. Нами предложена модель прямого кластерного распыления, согласно которой возрастание интенсивностей пиков  $\text{GaN}$ ,  $\text{Ga}_2\text{N}_2$  и  $\text{Ga}_2\text{N}$  связано с энергией связи этих кластеров, т.е. с их стабильностью, поскольку потенциал ионизации у всех трёх молекул примерно одинаков и совпадает с зоной связанных состояний. Последнее обстоятельство объясняет низкий ионный выход кластеров. В связи с тем, что кластер  $\text{Ga}_2\text{N}$  обладает большей стабильностью по сравнению с  $\text{GaN}$ , интенсивность эмиссии положительных ионов  $\text{Ga}_2\text{N}$  выше, чем для  $\text{GaN}$ . Высокая интенсивность ионного распыления металла объясняется большой вероятностью выживания кинетически ионизованных атомов за счёт резонанса потенциала ионизации галлия с запрещённой зоной нитрида галлия.

Пики ионного кластера  $\text{Ga}^+$  и оксида  $\text{GaO}^+$  видны далее. Затем наблюдается линия однокомпонентного ионного кластера  $\text{Ga}_2^+$ . Кластер  $\text{GaN}_2^+$  и оксид  $\text{Ga}_2\text{O}^+$  следует после. Самым маленьким из всех пиков на этом графике является ионный пик  $\text{Ga}_2\text{N}_2^+$ . После него мы видим возрастающий сигнал от кластера  $\text{Ga}_3^+$ . Далее идут убывающие пики  $\text{Ga}_3\text{N}^+$ ,  $\text{Ga}_3\text{O}^+$  и  $\text{Ga}_3\text{N}_2^+$ . Из масс-спектра видно, что интенсивность выхода однокомпонентных кластерных ионов убывает по мере увеличения их атомной массы. Так, выход ионов  $\text{Ga}_2^+$  в 50 раз больше  $\text{Ga}_3^+$ . Далее поверхность облучалась положительными ионами кислорода, энергия которых

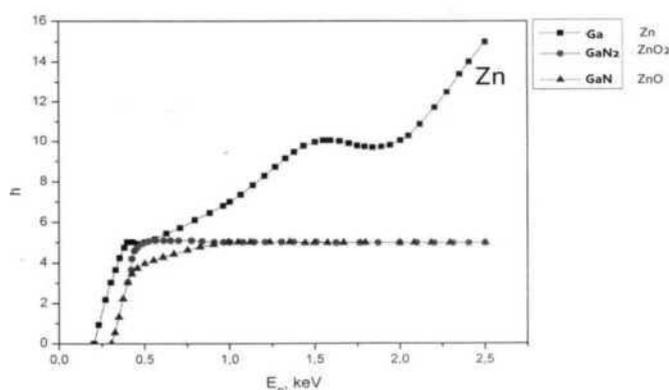


Рис.3. Энергетические зависимости атомарного и кластерного распыления GaN при бомбардировке ионами  $\text{Cs}^+$

Таким образом, теоритическое и экспериментальное исследования показали, что пороговое атомарное распыление происходит по механизму прямого выбивания или рекойлинга, а пороговое кластерное распыление по рекомбинационному механизму. При повышении энергии кластеры распыляются по механизму прямой эмиссии.

Нами проведены эксперименты по определению выходов ионного распыления поверхности GaN зависимости от температуры. Нами наблюдались выходы как адсорбированных примесей, так и состава поверхности GaN.

На рис.4 показаны температурные зависимости состава адсорбированных примесей на поверхности GaN в диапазоне температур от 100 до 500 °С. Из рисунка видно, что выходы отрицательного ионного распыления таких примесей как NH<sup>-</sup>, NO<sup>-</sup> и OH<sup>-</sup> слабо зависят от температуры и имеют выходы 5, 10 и 20 относительных единиц соответственно. Их график имеет вид прямой линии. Однако, следует отметить, что выходы NH<sup>-</sup> постоянны на всем исследованном промежутке температур (125-425 °С), а выходы NO<sup>-</sup> и OH<sup>-</sup> сначала немного увеличиваются (125-225 °С), а затем уже достигают насыщения. Выходы примесей H<sup>-</sup>, C<sub>2</sub><sup>-</sup>, C<sup>-</sup> и O<sup>-</sup> также имеют сходный характер.

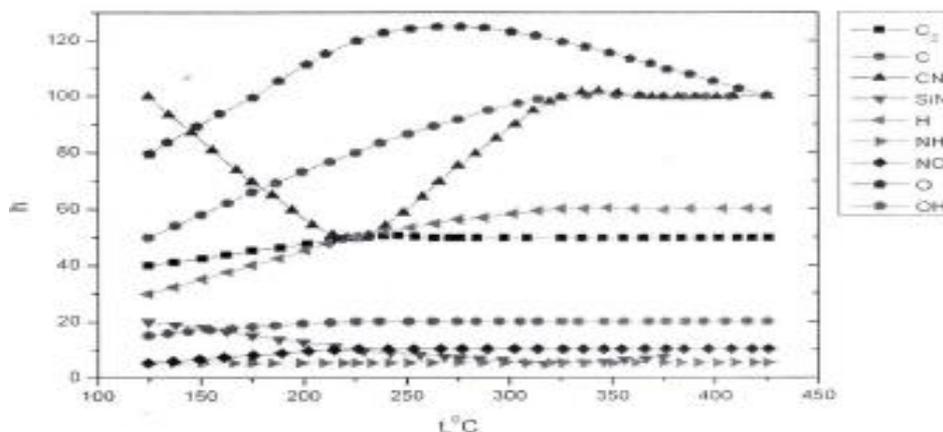


Рис.4. Температурные зависимости состава адсорбированных примесей на поверхности GaN

Все они при повышении температуры немного увеличиваются, а затем достигают насыщения. Выходы H<sup>-</sup> увеличиваются от 30 относительных единиц при температуре 125 °С и повышаются до 60 относительных единиц при 325 °С при этом достигая своего насыщения. И аналогично C<sub>2</sub><sup>-</sup> увеличивается от 40 до 50, C<sup>-</sup> от 50 до 100 относительных единиц соответственно. Выходы O<sup>-</sup> при 125 °С имеют 80 относительных единиц, увеличивается до 120 относительных единиц при 225 °С, а с 325 °С начинается уменьшение выходов до 100 относительных единиц. Выходы CN<sup>-</sup> имеет другой характер - в графике температурной зависимости наблюдается минимум при 225 °С с выходом на насыщение при 325 °С. Выходы CNO<sup>-</sup> уменьшаются в 2 раза до 325 °С и далее стабилизируются. Температурные зависимости состава поверхности GaN показали, что выходы Ga<sup>-</sup> увеличиваются до 30 относительных единиц при 225 °С и при этом достигая своего насыщения. Кривая выходов Si имеет два экстремума - максимум (50 единиц) при 225 °С и минимум (30 единиц) 325 °С. Подобным образом ведет себя пик GaO<sup>-</sup>. Остальные решеточные N<sup>-</sup>, GaN<sup>-</sup>, GaN<sub>2</sub><sup>-</sup> и примесные B<sup>-</sup>, B<sub>2</sub><sup>-</sup> ионы слабо зависят от температуры.

Анализ сравнения температурных зависимостей адсорбированных, решеточных и примесных ионов показывает, что пик Ga<sup>-</sup> коррелирует с пиками кислорода и углерода. Пик GaO<sup>-</sup> коррелирует с пиком сегрегирующей примеси кремния.

При максимуме кислороде наблюдается минимум пика CN<sup>-</sup> и уменьшение пика CNO<sup>-</sup>, который в свою очередь можно идентифицировать как пик SiN<sup>-</sup>. Таким образом, на поверхности пленки GaN, выращенной на SiG наблюдается сегрегация адсорбированных газовых примесей а растворенных в объеме примесей из подложки.

#### Результаты и их обсуждение

Известно, что аномальный выход отрицательных многоатомных ионов при бомбардировке ионами цезия невозможно объяснить только изменением работы выхода поверхности. Особенности образования кластерных ионов при бомбардировке поверхности твердых тел ионами цезия объясняется тем, что при имплантации цезия образуются новые

химические связи и происходит увеличение сродства к электрону кластера за счёт поляризации.

1. Полученные графики масс-спектров характеризуются наличием большого количества как однокомпонентных  $Ga_2$ ,  $Ga_3$ ,  $Ga_4$ , так и двухкомпонентных  $GaN$ ,  $GaN_2$ ,  $Ga_2N$ ,  $Ga_2N_2$ ,  $Ga_3N$ ,  $Ga_3N_2$  ионных кластеров.
2. Интенсивность выхода однокомпонентных ионных кластеров  $Ga_2$ ,  $Ga_3$ ,  $Ga_4$  падает по мере их появления на конкретном масс-спектре.
3. Образование  $Ga$ ,  $Ga_2$ ,  $Ga_3$ , а также кластеров  $GaN$ ,  $Ga_2N$ ,  $GaN_2$ ,  $Ga_2N_2$  и  $Ga_3N_3$  в положительных ионах описывается рекомбинационным механизмом.
4. Образование в отрицательных ионах  $Ga$ ,  $Ga_2$ ,  $Ga_3$ ,  $Ga_4$ , а также кластеров  $GaN$ ,  $Ga_2N$ ,  $GaN_2$ ,  $Ga_3N$ , и  $Ga_3N_2$  описывается механизмом прямой эмиссии.
5. Зависимости выхода атомарных и кластерных ионов от температуры нитрида галлия показывают, что происходит ко-сегрегация примесей углерода и кислорода.

Составила 10 кэВ, а ток  $-1,57 \cdot 10^{-8}$  А. На данном графике масс-спектра, как и в случае с предыдущим, также видно наличие решёточных примесей, атомарного галлия и двухкомпонентных ионных кластеров  $GaN^+$ ,  $GaN_2^+$ ,  $Ga_2N^+$  и нескольких оксидов, среди которых есть  $GaO^+$   $Ga_2O^+$ . Однако, в дополнение ко всему, здесь появляются две решёточные примеси - индия и цезия. Сравнение масс-спектров показывает, что с увеличением энергии первичного пучка в 1,7 и тока в 1,57 раз интенсивность выхода атомарных ионов  $Ga$  возрастает в 9,1 раза интенсивности двухкомпонентных кластерных ионов  $GaN^+$ ,  $GaN_2^+$ ,  $Ga_2N^+$  в 10,80 и 20 раз соответственно.

Нами также проведено экспериментальное исследование энергетической зависимости атомарного  $Ga$  и кластерного  $GaN$  и  $GaN_2$  распыления ионами цезия при бомбардировке под углом в 45 градусов. Рис 3 показывает, что порог атомарного распыления атомов галлия составляет 200эВ. Это значения близко к теоретическому порогу согласно компьютерному моделированию распыления  $GaN$  ионами аргона. С другой стороны, линейная зависимость распыления отрицательных ионов галлия от энергии бомбардирующих ионов указывает на механизм прямого выбивания или рекойлинга. Нами также показано, что порог эмиссии кластеров  $GaN$  и  $GaN_2$  совпадает, и составляет 250 эВ. Это значение совпадает теоретическим порогом распыления атомов галлия совместно с атомами азота [9].

Кроме того, из рис.3 видно, что в диапазоне энергией выше 0,5 кэВ выход кластеров  $GaN$  и  $GaN_2$  слабо зависит от энергии, а отношение  $GaN_2/GaN$  не зависит от энергии бомбардирующих ионов. Последний экспериментальный факт указывает на механизм прямой эмиссии кластеров  $GaN$  и  $GaN_2$ .

#### Литература

- 1) Франкевич Е. Л. Физические методы исследований, Курс лекций, ч.2, МФТИ, 1978, с. 5-56.
- 2) Физические основы масс-спектрометрии (методы ионизации), Башкирский филиал АН СССР, Уфа, 1986.
- 3) Полякова А. А. Молекулярный масс-спектральный анализ органических соединений. М.: Химия, 1983.
- 4) Сыроев А. А. Физика и техника масс-спектрометрических приборов и электромагнитных установок. М.: Энергоиздат, 1983.